HOJA DE RUTA BIOCOMBUSTIBLES EN COLOMBIA

Estudio técnico de análisis, diagnóstico y formulación

Producto 2. Informe sobre contexto internacional y análisis comparativo

Contrato n.º GGC-844-2023

Consorcio Alternativas

Bogotá, noviembre de 2023

ANTECEDENTES **20**
1. INTRODUCCIÓN AL ANÁLISIS DEL CONTEXTO INTERNACIONAL DE LOS BIOCOMBUSTIBLES **24**
2. ASPECTOS GENERALES EN LA PRODUCCIÓN DE BIOCOMBUSTIBLES **26**
2.1 PRETRATAMIENTOS DE LOS PRECURSORES DE BIOCOMBUSTIBLES 27
2.2 TECNOLOGÍAS DE PRODUCCIÓN DE BIOCOMBUSTIBLES 29
2.2.1 Biodiésel *29*
2.2.2 Bioetanol *30*
2.2.3 Aceite vegetal hidrogenerado (HVO) *36*
2.2.4 Biogás *38*
2.2.5 Combustibles sostenibles de aviación (SAF) *40*
2.3 ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE LOS BIOCOMBUSTIBLES 42
2.3.1 Biodiésel *42*
2.3.2 Bioetanol *47*
2.3.3 HVO o diésel verde *49*
2.3.4 Biogás *50*
2.3.5 Combustibles sostenibles de aviación (SAF) *51*
2.4 PORCENTAJES DE MEZCLAS 54
2.5 EMISIONES DE GASES EFECTO INVERNADERO (GEI) 56
2.5.1 Estatus de emisiones de gases de efecto invernadero por país y por sectores IPCC *57*
2.5.2 Potencial de reducción de emisiones de los biocombustibles *58*
3. CONTEXTO INTERNACIONAL DEL SECTOR DE LOS BIOCOMBUSTIBLES **61**
4. DESARROLLO DEL SECTOR DE LOS BIOCOMBUSTIBLES EN LOS PAÍSES DE REFERENCIA PARA LA HOJA DE RUTA **78**
4.1 CASO ESTADOS UNIDOS 78
4.1.1 Actores oficiales *79*
— Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA) 79
— Departamento de Transporte de Estados Unidos (DOT) 80
— Administración de Alimentos y Medicamentos de Estados Unidos (FDA) 80
— Comisión Federal de Comercio (FTC) 80
4.1.2 Actores privados *81*
4.1.3 Marco regulatorio y económico *81*
4.1.3.1 Mapa normativo 81
— Regulación de precios y principales incentivos 83
— Regulaciones establecidas para gestionar adecuadamente el aceite usado 85
— Políticas vigentes de mandatos de mezcla 85
— Normas que rigen el consumo 87
— Normas que rigen la comercialización 87
— Regulación del comercio exterior 88
4.1.3.2 Variables económicas en la producción de biocombustibles 89
— Subsidios en la cadena de biocombustibles 89
— Impuestos en la cadena de biocombustibles 89
— Papel del Gobierno en la cadena de los biocombustibles 89
— Papel del sector privado en la cadena de los biocombustibles 90
— Generación de ingresos a nivel nacional y de empleos 91
4.1.3.3 Contratos en firme 94
4.1.4 Aspectos técnicos relacionados con la producción *96*
4.1.4.1 Descripción de materias primas, pretratamiento, procesamiento, rendimiento, costo 96
— Proceso de etanol de molino seco 99
— Proceso de etanol de molino húmedo 100

— Cultivo de maíz 100
— Producción de maíz 101
4.1.4.2 Tecnologías de producción (características técnicas, costo/beneficio ambiental y rendimiento técnico y energético) 105
• **Segunda generación** 109
— Otras tecnologías a partir de biomasa 111
— Producción de bioetanol a partir de lodos de depuradoras 113
— Proceso de transesterificación para la producción de biocombustibles 115
— Proceso de gasificación para la producción de biogás 115
— Proceso de purificación para la producción de biocombustibles 119
4.1.4.3 Implicaciones de carácter agrario 121
4.1.4.4 Estrategias de recolección, tratamiento y transporte de materias primas (experiencia y gestión en aprovechamiento de aceite usado de cocina) 122
4.1.4.5 Porcentaje de mezclas de biocombustibles 124
— Sobre las mezclas de diésel 124
— Sobre las mezclas de etanol 126
4.1.4.6 Mecanismos de producción 126
— Proceso de hidrólisis 126
— Proceso de fermentación 128
4.1.4.7 Capacidad de producción y consumo de biocombustibles 129
4.1.2.8 Experiencias internacionales (requerimientos energéticos) tasa de retorno energético 142
4.1.5 Cadena de suministro 145
— Costos 145
4.1.5.1 Cadena de suministro del biodiésel 145
— Producción primaria 146
— Almacenamiento y transporte hasta las plantas de procesamiento 147
— Plantas de procesamiento 147
— Producción de biodiésel y comercialización 148
— Ventas y exportación 149
— Aceite de cocina usado 150
4.1.5.2 Cadena de suministro del bioetanol 151
— Producción primaria 152
— Almacenamiento y transporte hasta las plantas de procesamiento 153
— Plantas de procesamiento 153
— Producción de bioetanol y comercialización 155
— Ventas y exportación 155
4.1.5.3 Cadena de suministro del biogás 156
— Producción primaria 157
— Almacenamiento y transporte 157
— Plantas de procesamiento 157
— Distribución y comercialización 158
4.1.5.4 Cadena de suministro de SAF 159
— Producción primaria 159
— Almacenamiento y transporte 159
— Plantas de procesamiento 159
— Distribución y comercialización 160
4.1.6 Aspectos ambientales 161
4.1.6.1 Análisis de ciclo de vida 161
4.1.6.2 Emisiones de gases de efecto invernadero 167
4.1.6.3 Compromisos ambientales en reducción de GEI 170
4.1.6.4 Sector agrícola 170
— Perfil geográfico 170

— Perfil climático ... 171
— Políticas e iniciativas ... 172
4.1.6.5 Sector producción y transformación ... 172
— Políticas e iniciativas ... 173
— Otros programas de agencias federales ... 174
4.1.6.6 Sector transporte y consumo ... 175
— Políticas e iniciativas ... 176
4.1.6.7 Política ambiental ... 178
— Iniciativas de materias primas para biocombustibles avanzados (Das, 2020) ... 181
4.1.7 Aspectos sociales ... 181
4.1.7.1 Seguridad alimentaria ... 182
4.1.7.2 Uso de la tierra e impacto a comunidades locales, agrícolas e indígenas ... 184
— Usos de la tierra ... 184
— Impacto a comunidades locales ... 186
4.1.7.3 Salud pública ... 188
4.1.7.4 Condiciones laborales y de seguridad y salud en el trabajo ... 189
— Características de la población empleada ... 189
— Puestos de trabajo temporales ... 189
— Principales riesgos en materia de seguridad y salud en el trabajo ... 190
4.2 Caso Brasil ... 190
4.2.1 Actores oficiales ... 190
4.2.2 Actores privados ... 192
4.2.3 Marco regulatorio y económico ... 192
4.2.3.1 Mapa normativo ... 192
— Regulación de precios y principales incentivos ... 192
— Normativas y regulaciones en el procesamiento de la materia prima ... 195
— Regulaciones establecidas para gestionar adecuadamente el aceite usado ... 196
— Políticas vigentes de mandatos de mezcla ... 196
— Principales normativas específicas relacionadas con el sector de los biocombustibles ... 197
— Normas específicas que rigen la producción de biocombustibles ... 197
— Normas específicas que rigen el consumo de biocombustibles ... 197
— Normas específicas que rigen la comercialización de biocombustibles ... 198
— Programa RenovaBio de Brasil ... 199
4.2.3.2 Variables económicas en la producción de biocombustibles ... 199
— Subsidios en la cadena de biocombustibles ... 199
— Impuestos en la cadena de biocombustibles ... 199
— Papel del Gobierno en la cadena de los biocombustibles ... 201
— Papel del sector privado en la cadena de los biocombustibles ... 202
— Generación de ingresos a nivel nacional ... 202
— Generación de empleos ... 202
4.2.3.3 Contratos en firme ... 203
4.2.4 Aspectos técnicos relacionados con la producción ... 204
4.2.4.1 Descripción de materias primas (pretratamiento, procesamiento, rendimiento, costo) ... 204
4.2.4.2 Tecnologías de producción (características técnicas, costo/beneficio ambiental y rendimiento técnico y energético) ... 212
— Tecnologías utilizadas en la producción de biodíesel ... 212
— Tecnologías utilizadas en la producción de bioetanol ... 220
4.2.4.3 Implicaciones de carácter agrario ... 221
4.2.4.4 Estrategias de recolección, tratamiento y transporte de materias primas (experiencia y gestión en aprovechamiento de UCO) ... 224
5.2.4.5 Porcentaje de mezclas de biocombustibles ... 225
4.2.4.6 Experiencias internacionales (requerimientos energéticos) tasa de retorno energético ... 225

4.2.5 Cadena de suministro ... *226*
4.2.5.1 Cadena de suministro del biodiésel ... 227
— Producción primaria ... 227
— Almacenamiento y transporte hasta las plantas de procesamiento ... 228
— Plantas de procesamiento ... 229
— Comercialización ... 229
— Ventas y exportación ... 231
— Aceite de cocina usado ... 232
4.2.5.2 Cadena de suministro del bioetanol ... 233
— Producción primaria ... 233
— Almacenamiento y transporte hasta las plantas de procesamiento ... 234
— Plantas de procesamiento ... 234
— Producción y comercialización ... 235
— Ventas y exportación ... 236
— Costos ... 236
4.2.5.3 Cadena de suministro del biogás ... 236
— Producción primaria ... 237
— Plantas de procesamiento ... 237
— Distribución y comercialización ... 238
4.2.5.4 Cadena de suministro de SAF ... 238
— Producción primaria ... 238
— Almacenamiento y transporte ... 238
— Plantas de procesamiento ... 239
— Distribución y comercialización ... 240
4.2.6 Aspectos ambientales ... *241*
4.2.6.1 Análisis de ciclo de vida ... 241
4.2.6.2 Emisiones de gases de efecto invernadero ... 245
4.2.6.3 Compromisos ambientales en reducción de GEI ... 245
4.2.7 Aspectos sociales ... *245*
4.2.7.1 Seguridad alimentaria ... 245
4.2.7.2 Uso de la tierra, impacto a comunidades locales, agrícolas e indígenas, y afectación a los recursos naturales ... 246
— Usos de la tierra ... 246
— Impacto a comunidades locales ... 248
— Afectación sobre el recurso hídrico ... 249
— Deforestación y pérdida de biodiversidad ... 249
4.2.7.3 Procesos de desplazamiento o relocalización de comunidades ... 249
4.2.7.4 Condiciones laborales y de seguridad y salud en el trabajo ... 250
4.3 CASO ARGENTINA ... 250
4.3.1 Actores oficiales ... *251*
4.3.2 Actores privados ... *252*
4.3.3 Marco regulatorio y económico ... *253*
4.3.3.1 Mapa regulatorio de biocombustibles ... 253
— Regulación de precios y fórmula para calcular el precio ... 255
— Régimen promocional, sujetos beneficiarios y beneficios promocionales ... 256
— Normativa y regulaciones en el procesamiento de la materia prima ... 257
— Regulaciones establecidas para gestionar adecuadamente el aceite usado ... 258
— Políticas vigentes de mandatos de mezcla ... 258
— Principales incentivos específicos del sector de los biocombustibles ... 259
— Normas específicas que rigen la producción de biocombustibles ... 259
— Normas específicas que rigen el consumo de biocombustibles ... 260
— Normas específicas que rigen la comercialización de biocombustibles ... 260

— Normas específicas que rigen la regulación de la exportación e importación de biocombustibles 260
— Plan Nacional de Adaptación y Mitigación al Cambio Climático al 2030 261
4.3.3.1 Variables económicas en la producción de biocombustibles en Argentina 262
— Subsidios en la cadena de biocombustibles 262
— Impuestos en la cadena de biocombustibles 262
— Papel del Gobierno en la cadena de los biocombustibles 263
— Papel de sector privado en la cadena de los biocombustibles 263
— Generación de ingresos a nivel nacional 263
— Generación de empleos 264
4.3.3.2 Contratos en firme 264
4.3.4 Aspectos técnicos *265*
4.3.2.1 Descripción de materias primas (pretratamiento, procesamiento, rendimiento, costo) 265
— Cultivo de soja 267
4.3.2.2 Tecnologías de producción de biocombustibles en Argentina (características técnicas, costo/beneficio ambiental y rendimiento técnico y energético) 270
— Tecnologías utilizadas para la producción del biodiésel 271
— Tecnologías utilizadas para la producción del bioetanol 276
4.3.2.3 Implicaciones de carácter agrario 280
4.3.2.4 Estrategias de recolección, tratamiento y transporte de materias primas (experiencia y gestión en aprovechamiento de UCO) 282
4.3.2.5 Porcentaje de mezclas de biocombustibles 283
— Ensayos de durabilidad B20 284
4.3.2.6 Requerimientos energéticos y tasa de retorno energético 284
4.3.5 Cadenas de suministros *288*
4.3.5.1 Cadena de suministro del biodiésel 288
— Producción primaria 288
— Almacenamiento y transporte hasta las plantas de procesamiento 289
— Plantas de procesamiento 289
— Producción y comercialización 291
— Ventas y exportación 292
— Aceite de cocina usado 293
4.3.5.2 Cadena de suministro del bioetanol 294
— Producción primaria 295
— Almacenamiento y transporte hasta las plantas de procesamiento 295
— Plantas de procesamiento 296
— Producción de bioetanol y comercialización 297
— Ventas y exportación 297
— Costos 298
4.3.5.3 Cadena de suministro del biogás 299
— Producción primaria 299
— Almacenamiento y transporte 299
— Plantas de procesamiento 300
— Distribución y comercialización 301
4.3.5.4 Cadena de suministro de SAF 301
— Producción primaria 301
— Almacenamiento y transporte 302
— Plantas de procesamiento 303
— Distribución y comercialización 303
4.3.6 Aspectos ambientales *304*
4.3.6.1 Análisis de ciclo de vida 304
4.3.6.2 Emisiones de gases de efecto invernadero 308
4.3.6.3 Compromisos ambientales en reducción de GEI 309

4.3.7 Aspectos sociales *309*
4.3.7.1 Seguridad alimentaria 310
4.3.7.2 Acceso a la tierra e impacto a comunidades locales, agrícolas e indígenas 311
— Usos de la tierra 311
— Impacto a comunidades locales 311
— Afectación sobre el recurso hídrico 312
4.3.7.3 Condiciones laborales y de seguridad y salud en el trabajo 312
4.4 CASO FRANCIA 313
4.4.1 Actores oficiales *313*
4.4.2 Actores privados *313*
4.4.3 Marco regulatorio y económico *314*
4.4.3.1 Mapa normativo 314
— Regulación de precios 314
— Fórmula para calcular el precio 314
— Principales normativas específicas relacionadas con el sector de los biocombustibles 315
— Principales incentivos específicos del sector de los biocombustibles 315
— Normas específicas que rigen la producción de biocombustibles en Francia 315
— Normativas y regulaciones en el procesamiento de la materia prima 316
— Regulaciones establecidas para gestionar adecuadamente el aceite usado 316
— Políticas vigentes de mandatos de mezcla 316
— Normas específicas que rigen el consumo de biocombustibles en Francia 317
— Programa de promoción de uso de biocombustibles y sus características específicas 317
4.4.3.2 Variables económicas en la producción de biocombustibles 318
— Generación de ingresos a nivel nacional 318
— Generación de empleos 318
4.4.3.3 Contratos en firme 319
4.4.4 Aspectos técnicos *319*
4.4.2.1 Descripción de materias primas (pretratamiento, procesamiento, rendimiento, costo) 319
— El cultivo de la remolacha en Francia 324
4.4.2.2 Tecnologías para la producción de biodiésel 330
— Producción de biodiésel utilizando la tecnología de transesterificación 331
— Localización de las plantas de producción de biodiésel que utilizan la tecnología de transesterificación 331
— Producción de biodiésel utilizando la tecnología de microalgas 332
— Localización de las plantas de producción de biodiésel que utilizan la tecnología de microalgas 333
— Producción de biodiésel utilizando la tecnología de hidrogenación catalítica 334
— Localización de las plantas de producción de biodiésel que utilizan la tecnología de hidrogenación catalítica 335
— Producción de biodiésel utilizando la tecnología de Fischer-Tropsch en Francia 336
— Localización de las plantas de producción de biodiésel que utilizan la tecnología de Fischer-Tropsch en Francia 336
— Maquinaria tecnológica utilizada en Francia para la producción de biodiésel 337
4.4.2.3 Tecnologías para la producción de bioetanol 338
—Proceso de fermentación de primera generación 340
— Localización de las plantas que utilizan fermentación de primera generación 341
— Proceso de fermentación de segunda generación 341
— Localización de las plantas que utilizan fermentación de segunda generación 342
— Proceso de gasificación 343
— Localización de las plantas que utilizan gasificación 344
— Proceso de hidrólisis enzimática 344
— Localización de las plantas que utilizan hidrólisis enzimática 345

— Proceso de destilación y purificación ... 346
— Localización de las plantas que utilizan destilación y purificación ... 347
— Maquinaria tecnológica para la producción de bioetanol ... 347
4.4.2.4 Tecnologías para la producción de biogás ... 348
— Proceso de digestión anaerobia ... 349
— Localización de las plantas que utilizan digestión anaerobia ... 350
— Uso plantas de biometanización ... 351
— Localización de las plantas de biometanización ... 351
— Uso de plantas de tratamiento de aguas residuales ... 352
— Localización de las plantas de tratamiento de aguas residuales ... 353
— Proceso de fermentación en seco ... 354
— Localización de las plantas que utilizan la tecnología de fermentación en seco ... 354
— Maquinaria tecnológica utilizada para la producción de biogás ... 355
4.4.2.5 Implicaciones de carácter agrario ... 356
4.4.2.6 Estrategias de recolección, tratamiento y transporte de materias primas (experiencia y gestión en aprovechamiento de UCO) ... 358
4.4.2.7 Porcentaje de mezclas de biocombustibles ... 360
4.4.2.8 Experiencias internacionales, requerimientos energéticos y tasa de retorno energético ... 361
4.4.5 Cadena de suministro ... *362*
4.4.5.1 Cadena de suministro del biodiésel ... 362
— Producción primaria ... 363
— Almacenamiento y transporte ... 363
— Plantas de procesamiento ... 363
— Ventas y exportación ... 364
— Aceite de cocina usado ... 365
4.4.5.2 Cadena de suministro del bioetanol ... 365
— Producción primaria ... 366
— Plantas de procesamiento ... 367
— Ventas y exportación ... 368
4.4.5.3 Cadena de suministro del biogás ... 368
— Producción primaria ... 368
— Almacenamiento y transporte ... 369
— Plantas de procesamiento ... 369
— Distribución de biogás y comercialización ... 370
4.4.5.4 Cadena de suministro de SAF ... 370
— Producción primaria ... 370
— Plantas de procesamiento ... 370
— Distribución y comercialización ... 370
4.4.6 Aspectos ambientales ... *371*
4.4.6.1 Análisis de ciclo de vida ... 371
4.4.6.2 Emisiones de gases de efecto invernadero ... 374
4.4.6.3 Compromisos ambientales en reducción de GEI ... 374
4.4.7 Aspectos sociales ... *374*
4.4.7.1 Seguridad alimentaria ... 375
4.4.7.2 Acceso a la tierra e impacto a comunidades locales, agrícolas e indígenas ... 375
— Usos de la tierra ... 375
— Impacto a comunidades locales ... 377
4.5 CASO INDIA ... 378
4.5.1 Actores oficiales ... *378*
4.5.2 Actores privados ... *378*
4.5.3 Marco regulatorio y económico ... *379*
4.5.3.1 Mapa normativo ... 379

— Política Nacional de Biocombustibles 2018 ... 379
— Regulación de precios ... 381
— Políticas vigentes de mandatos de mezcla ... 382
— Normas específicas que rigen la comercialización de biocombustibles ... 382
— Programas de promoción de uso de biocombustibles ... 383
4.5.3.2 Variables económicas en la producción ... 383
— Subsidios en la cadena de biocombustibles ... 383
— Impuestos en la cadena de biocombustibles ... 383
— Regulación del comercio exterior ... 384
— Papel del Gobierno en la cadena de los biocombustibles ... 384
— Papel del sector privado en la cadena de los biocombustibles ... 384
— Desarrollo económico y empleabilidad ... 384
— Generación de empleos ... 384
4.5.3.3 Contratos en firme ... 385
— Contratación de agricultores y cooperativas ... 385
4.5.4 Aspectos técnicos ... *385*
4.5.4.1 Descripción de materias primas (pretratamiento, procesamiento, rendimiento, costo) ... 385
4.5.4.2 Tecnologías de producción (características técnicas, costo/beneficio ambiental y rendimiento técnico y energético) ... 391
— Procesos de mejora de la calidad para biocombustibles ... 394
4.5.4.3 Implicaciones de carácter agrario ... 396
4.5.4.4 Estrategias de recolección, tratamiento y transporte de materias primas (experiencia y gestión en aprovechamiento de uco) ... 399
4.5.4.5 Porcentaje de mezclas de biocombustibles ... 401
5.5.4.6 Experiencias internacionales, requerimientos energéticos y tasa de retorno energético ... 401
4.5.5 Cadena de suministro ... *403*
4.5.5.1 Cadena de suministro del biodiésel ... 403
— Producción primaria ... 404
— Plantas de procesamiento ... 405
— Producción de biodiésel y comercialización ... 406
— Venta y exportación ... 407
— Aceite de cocina usado ... 407
— Costos ... 408
4.5.5.2 Cadena de suministro del bioetanol ... 408
— Producción primaria ... 409
— Plantas de procesamiento ... 409
— Producción de bioetanol y comercialización ... 410
— Ventas y exportación ... 410
— Costos ... 411
4.5.5.3 Cadena de suministro del biogás ... 411
— Producción primaria ... 411
— Almacenamiento y transporte ... 412
— Plantas de procesamiento ... 412
— Distribución y comercialización ... 412
4.5.6 Aspectos ambientales ... *413*
5.5.4.1 Análisis de ciclo de vida ... 413
5.5.4.2 Emisiones de gases de efecto invernadero ... 415
5.5.4.3 Compromisos ambientales en reducción de GEI ... 415
4.5.7 Aspectos sociales ... *416*
4.5.7.1 Seguridad alimentaria ... 416
4.5.7.2 Acceso a la tierra e impacto a comunidades locales, agrícolas e indígenas ... 417
— Usos de la tierra ... 417

— Impacto a comunidades locales ... 418
— Afectación sobre el recurso hídrico ... 419
4.5.7.3 Condiciones laborales y de seguridad y salud en el trabajo ... 420
5. ANÁLISIS COMPARATIVO ... 422
5.1 ACTORES OFICIALES ... 422
5.2 ACTORES PRIVADOS ... 423
5.3 MARCO REGULATORIO Y ECONÓMICO ... 425
5.3.1 Respecto al mapa normativo ... 425
— Regulación de precios ... 427
— Fórmula para calcular el precio ... 430
— Principales incentivos específicos del sector de los biocombustibles ... 432
— Normativas y regulaciones en el procesamiento de la materia prima ... 434
— Políticas vigentes de mandatos de mezcla ... 435
— Normas específicas que rigen la producción de biocombustibles ... 437
— Normas específicas que rigen el consumo de biocombustibles ... 438
— Normas específicas que rigen la comercialización de biocombustibles ... 440
— Programa gubernamentales asociados a la producción, comercialización y consumo de los biocombustibles ... 442
5.3.2 Variables económicas en la producción de Biocombustibles ... 444
— Subsidios en la cadena de biocombustibles ... 444
— Impuestos en la cadena de biocombustibles ... 445
— Regulación del comercio exterior de biocombustibles ... 447
— Papel Gobierno en la cadena de los biocombustibles ... 449
— Papel del sector privado en la cadena de los biocombustibles ... 451
5.4 ASPECTOS TÉCNICOS Y AMBIENTALES ... 454
5.5 ASPECTO LOGÍSTICO ... 462
5.5.1 Comparación del bioetanol *... 462*
5.5.2 Comparación del biodiésel *... 463*
5.6 ASPECTO SOCIAL ... 466
REFERENCIAS ... 474

Indice de Tablas

Tabla 1. Cronograma de ejecución del proyecto 21
Tabla 2 Criterios de selección de países para el análisis internacional del sector de biocombustibles..... 22
Tabla 3. Tipos de pretratamiento de biomasa en la obtención de biocombustibles28
Tabla 4. Generaciones en la producción de bioetanol..... 31
Tabla 5 Tipos de hidrólisis en la producción de bioetanol..... 35
Tabla 6. Tipos de fermentación en la producción de bioetanol..... 36
Tabla 7. Tecnologías certificadas en la producción de SAF..... 41
Tabla 8. Descripción de los grados de biodiésel B100 43
Tabla 9. Especificaciones estándar para el combustible biodiésel mezcla B100 para destilados medios 43
Tabla 10. Características para B100 norma brasilera (ABNT NBR) *vs.* norma americana (ASTM), europea/internacional (EN/ISO) 45
Tabla 11. Especificaciones técnicas para biodiésel FAME según estándar europeo (EN 14214)..... 46
Tabla 12. Especificaciones estándar del combustible desnaturalizado etanol para mezclas con gasolina para uso como combustible para motores de encendido por chispa de automoción (ASTM D4806-21a) 47
Tabla 13. Especificaciones técnicas para bioetanol según estándar europeo (EN 15376)..... 48
Tabla 14. Especificaciones técnicas para bioetanol en Brasil (ABNT/NBR) 49
Tabla 15. Propiedades para diésel verde en comparación con diésel convencional y la normativa que rige cada método 50
Tabla 16. Especificaciones de biometano en India según IS 16087:2013..... 50
Tabla 17. Requisitos para biometano acorde con UNE-EN 16723-2:2018..... 51
Tabla 18. Especificaciones para los combustibles de turbina de aviación con hidrocarburos sintetizados según ASTM D7566-22a 52
Tabla 19. Descripción de biocombustibles 54
Tabla 20. Porcentajes de mezcla por países para los biocombustibles..... 55

Tabla 21. Mandatos para mezclas de biocombustibles por país. 55
Tabla 22. Mandatos de mezcla de Bioetanol y Biodiésel para otros países no incluidos en el presente estudio. 55
Tabla 23. Emisiones de gases efecto invernadero por país y por sectores IPCC en el último año de estimación de la serie temporal de los informes bienales de actualización..... 57
Tabla 24. Generación de emisiones por MJ de combustible consumido 58
Tabla 25. Demanda de combustibles mundial (mb/d)..... 63
Tabla 26. Consumo energético histórico y proyectado a 2030 y 2050 67
Tabla 27. Consumo de biodiésel en 2021 72
Tabla 28. Consumo de bioetanol en 2021 72
Tabla 29. Distribución de la producción de biogás a nivel mundial etanol en 2021 74
Tabla 30. Vías productivas de biogás 74
Tabla 31. Resumen actividad legislativa sobre biocombustibles, congreso de los Estados Unidos en la década de los 2000 83
Tabla 32. Legislación específica para mezclas según estado 86
Tabla 33. Aportes de los biocombustibles en Estados Unidos 92
Tabla 34. Producción de etanol 95
Tabla 35. Pérdida frente a los contratos 95
Tabla 36. Área plantada y cosechada y rendimiento del cultivo de maíz 2018 a 2023 102
Tabla 37. Consumo de energías renovables en Estados Unidos (miles de millones de Btu)..... 107
Tabla 38. Comportamiento biodiésel en Estados Unidos, 2021 149
Tabla 39. Comportamiento del bioetanol en Estados Unidos, 2021 156
Tabla 40. Plantas de procesamiento de SAF 160
Tabla 41. Resumen de resultados totalizados para Estados Unidos..... 166
Tabla 42. Resumen de resultados normalizados para Estados Unidos en comparación con la gasolina 166

Tabla 43 Emisiones por sectores IPCC para Estados Unidos, BUR-5, en MMT CO_2eq..... 167
Tabla 44. Principales fuentes de emisiones por GEI 1990-2020, BUR-5, MMT CO_2eq..... 169
Tabla 45. Superficie, productividad y producción de caña de azúcar..... 207
Tabla 46. Productos de la industria azucarera y alcohólica. Estimación de la producción de azúcar cosecha 2022-2023 y 2023-2024..... 208
Tabla 47. Estimación de la producción total de etanol a partir de la caña de azúcar, comparación cosecha 2022-2023 y 2023-2024..... 209
Tabla 48. Estimación de producción de etanol a partir de maíz, cosecha 2022-2023 y 2023-2024..... 210
Tabla 49. Cosecha manual y mecanizada (en %), cosechas 2022-2023 y 2023-2024..... 212
Tabla 50. Transporte de la materia prima a las plantas de transformación..... 239
Tabla 51. Plantas de procesamiento de SAF en Brasil..... 239
Tabla 52.Cantidad de biodiésel producido por empresa..... 292
Tabla 53.Cantidad de bioetanol producido por empresa..... 296
Tabla 54. Plantas de procesamiento de SAF en Argentina..... 303
Tabla 55. Implicaciones a nivel económico..... 318
Tabla 56. Total empleos..... 319
Tabla 57. Resultados por km recorrido para los biocombustibles seleccionados en Francia..... 373
Tabla 58. Empleos generados..... 385
Tabla 59. Características de los biocombustibles en la India..... 387
Tabla 60. EROI del biojet a partir de diferentes materias primas..... 402
Tabla 61. Precio del bioetanol según materia prima..... 410
Tabla 62. Valores promedio del ACV y otros parámetros de interés..... 414
Tabla 63. Análisis comparativo del componente técnico..... 454
Tabla 64. Consideraciones del bioetanol..... 462
Tabla 65. Consideraciones del biodiésel..... 463
Tabla 66. Análisis comparativo del componente social..... 466

Índice de Figuras

Figura 1. Tipos de biocombustibles 27
Figura 2. Proceso general de obtención de biodiésel 30
Figura 3. Proceso general de obtención del bioetanol 30
Figura 4. Tipos de procesos de desintoxicación del bioetanol 31
Figura 5. Proceso de obtención de bioetanol de primera, segunda y tercera generación 33
Figura 6. Tipos de procesamiento de bioetanol de primera generación de acuerdo con su precursor 34
Figura 7. Proceso de producción de HVO o diésel renovable 37
Figura 8. Consumo del biogás por tipo de uso final (2018) 38
Figura 9. Proceso general de producción de biogás 39
Figura 10. Esquema de certificación para usar los SAF en mezcla con combustibles convencionales 52
Figura 11. Suministro de energía total por combustible y emisiones de CO_2 por escenario 63
Figura 12. Producción de electricidad bruta (PWh) 65
Figura 13. Suministro de bioenergía primaria en 2020, 2030 y 2050 bajo escenario PES y 1.5-S 66
Figura 14. Consumo final de bioenergía por sector en 2020, 2030 y 2050 bajo escenario PES y 1.5-S 67
Figura 15. Producción mundial de biocombustibles por región, 2022 68
Figura 16. Producción mundial de biocombustibles por países, 2022 69
Figura 17. Producción de biodiésel y biogasolina, 2022 70
Figura 18. Consumo de biocombustibles por región, 2022 71
Figura 19. Consumo de biocombustibles por países, 2022 71
Figura 20. Exportaciones de bioediésel mundiales 2021 73
Figura 21. Importaciones de bioediésel mundiales 2021 73
Figura 22. Exportaciones de bioetanol mundiales 2021 73
Figura 23. Importaciones de bioetanol mundiales 2021 73

Figura 24. Producción de biogás por región y por tipo de materia prima (2018) ... 75
Figura 25. Evolución de la producción de combustibles sostenibles de aviación SAF (miles de m^3) ... 76
Figura 26. Legislación específica para mezclas según estado ... 86
Figura 27. Aportes económicos de los biocombustibles por eslabón en la cadena de valor ... 92
Figura 28. Biorrefinerías de etanol en Estados Unidos, 2022 ... 97
Figura 29. Proceso de etanol de molino seco ... 100
Figura 30. Proceso de etanol de molino húmedo ... 100
Figura 31. Capacidad de producción de etanol combustible de Estados Unidos 129
Figura 32. Capacidad de producción de biodiésel de Estados Unidos (al 1º de enero de 2022) (millones de galones por año) ... 130
Figura 33. Capacidad de producción de combustible diésel renovable y otros biocombustibles de Estados Unidos (al 1º de enero de 2022) (millones de galones por año) ... 131
Figura 34. Capacidad de producción de combustible diésel renovable y otros biocombustibles de EE. UU. (a 1º de enero de 2023) (en millones de galones por año) ... 133
Figura 35, Algunas características del diésel renovable ... 135
Figura 36. Producto promedio suministrado de aceites combustibles destilados de la costa oeste de EE. UU. (2000-2022, enero-abril de 2023) ... 137
Figura 37. Producto estadounidense suministrado y aportes netos de biodiésel y diésel renovable (enero 2013 - abril 2023) ... 139
Figura 38. Capacidad anual de producción de diésel renovable existente y prevista en EE. UU. (2010-2025) ... 140
Figura 39. EROI medio para combustibles térmicos ... 142
Figura 40. Consumo energético per cápita ... 143
Figura 41. PIB energético ... 144
Figura 42. Cadena de valor del biodiésel en Estados Unidos ... 146
Figura 43. Zonas de producción de soja ... 147
Figura 44. Plantas de biodiésel en EE.UU. por estado ... 148

Figura 45. Cadena de valor del bioetanol en Estados Unidos 152
Figura 46. Zonas de producción de maíz 153
Figura 47. Plantas de producción de etanol en Estados Unidos por estados, 2023 154
Figura 48. Distribución del bioetanol en EE. UU. 155
Figura 49. Sitios de producción de biogás en EE. UU. 158
Figura 50. Aeropuertos con sumunistro SAF en EE. UU. 161
Figura 51. Límites del sistema para el análisis de ciclo de vida 162
Figura 52. Inventario general para la construcción del análisis de ciclo de vida para biodiésel (soja) y bioetanol (maíz) 163
Figura 53. Resultados económicos y ambientales para bioetanol (maíz) y biodiésel (soja) [Precio mínimo de venta del combustible MFSP, Impacto GEI (GHGi), Potencial de agotamiento de agua WDP] por estado en los que se encuentra información disponible 164
Figura 54. Resultados económicos y ambientales para bioetanol (maíz) y biodiésel (soja) [Eutrofización EUT, Efectos respiratorios RE, Ocupación de tierras agrícolas ALOP] por estado en los que se encuentra información disponible 164
Figura 55. Impacto total y económico para bioetanol (maíz) y biodiésel (soja) [Precio mínimo de venta del combustible MFSP, Impacto GEI (GHGi), Potencial de agotamiento de agua WDP] 165
Figura 56. Impacto total y económico para bioetanol (maíz) y biodiésel (soja) [Eutrofización EUT, Efectos respiratorios RE, Ocupación de tierras agrícolas ALOP] 165
Figura 57. Coste evitado de las emisiones de gases de efecto invernadero para el bioetanol de maíz y el biodiésel de soja 167
Figura 58. Emisiones del sector Industrial en Estados Unidos (MMt CO_2eq) 173
Figura 59. Consumo de biodiésel, diésel renovable y otros biocombustibles en Estados Unidos (billones de galones) 176
Figura 60. Cadena de valor del biodiésel en Brasil 227
Figura 61 Distribución de materias primas y/o biomasas en Brasil 228
Figura 62 Plantas productoras de biodiésel 229

Figura 63 Producción de biodiésel en Brasil 230
Figura 64. Tanqueo 231
Figura 65. Ventas de biodiésel 231
Figura 66. Cadena de valor del bioetanol en Brasil 233
Figura 67. Producción de caña de azúcar en Brasil 234
Figura 68. Plantas de procesamiento de bioetanol 235
Figura 69 Producción de bioetanol en Brasil 236
Figura 70. Panorama de la generación de energía eléctrica con la fuente biogás 238
Figura 71 Aeropuertos internacionalesy locales en Brasil 240
Figura 72. Límites del sistema para el ACV en la producción de biodiésel por transesterificación catalítica 242
Figura 73. Resultados ACV para biodiésel en Brasil 243
Figura 74. Delimitación del sistema para el ACV 244
Figura 75. Producción de biodiésel en la Argentina. Tomado de: (Secretaría de Agricultura Ganadería y Pesca. Argentina., 2023) 266
Figura 76. Producción de bioetanol en la Argentina. 266
Figura 77. Producción de bioetanol en la Argentina. 267
Figura 78. Superficie sembrada, cosechada, producción y rendimiento del cultivo de soja para el periodo 2012-2023. 269
Figura 79 Producción de bioetanol en Argentina a base de maíz y caña de Azúcar a 2022 280
Figura 80. EROI para ASp y BAUp 285
Figura 81. EROI para ASh y BAUh 285
Figura 82. Contribuciones energéticas de entradas y salidas al EROI en la producción de biodiésel a partir de soja en Argentina 286
Figura 83. EROI para biodiésel a partir de soja usando diferentes sistemas de frontera 287
Figura 84. Cadena de valor del biodiésel en Argentina 288
Figura 85. Localización de plantas de biodiésel 291
Figura 86. Biodiésel en Argentina. Ventas al corte y exportaciones, 2023 293

Figura 87. Cadena de valor del bioetanol en Argentina..... 295
Figura 88. Mapa de Argentina con la localización del transporte empleado para los biocombustibles..... 298
Figura 89. Distribución geográfica de las plantas de biogás 301
Figura 90. Aeropuertos en Argentina Obtenido de: (Maps, 2021) 304
Figura 91. Límites del sistema para el ACV del bioetanol a partir de maíz en Argentina..... 305
Figura 92. Resultados ACV para bioetanol de maíz en Argentina con Eco-indicador 99 306
Figura 93. Resultados ACV para bioetanol de maíz en Argentina con ReCiPe... 306
Figura 94. Límites de los sistemas empleados en el ACV de bioetanol a partir de caña de azúcar en Argentina..... 307
Figura 95. Resultados del ACV para bioetanol a partir de caña de azúcar en Argentina..... 308
Figura 96. Materias primas utilizadas en la producción de etanol en 2019 320
Figura 97. Proporción de cultivos permanentes en la superficie agrícola utilizada (SAU) en 2020..... 321
Figura 98. Superficie sembrada de remolacha, maíz y trigo, para el periodo 2017 a 2023 (septiembre) 322
Figura 99. Producción de remolacha, maíz y trigo, para el periodo 2017a 2023 (septiembre). 323
Figura 100. Rendimiento de la producción de remolacha, maíz y trigo, para el periodo 2017a 2023 (septiembre). Tomado de: (Ministère de l'Agriculture, 2023a) 324
Figura 101. El sector azucarero en Francia, campaña 2022-2023. Principales departamentos productores de azúcar..... 325
Figura 102. Recuperación de aceites comestibles usados 360
Figura 103. Cadena de valor del biodiésel en Francia 363
Figura 104. Industrias dedicadas a la producción de biodiésel 364
Figura 105. Cadena de valor de bioetanol en Francia..... 366
Figura 106. Ubicación de plantas de bioetanol en Francia..... 367

Figura 107. Biometano en Francia en 2022 369
Figura 108. Producción total de biometano de las plantas existentes..... 370
Figura 109. Distribución y comercialización de SAF 371
Figura 110. Esquema general en el ACV de biocombustibles de primera generación en Francia..... 372
Figura 111. Superficie sembrada caña de azúcar para el periodo 2013-2014 a 2022-2023 389
Figura 112. Producción de caña de azúcar para el periodo 2018-19 a 2022-23. 390
Figura 113. Estados principales productores de caña de azúcar (2022-2023).... 390
Figura 114. Rendimiento de la producción de caña de azúcar para el periodo 2018-2019 a 2022-2023 391
Figura 115. Huella energética y EROI en cogeneración de bagazo en distritos de Maharashtra, India 402
Figura 116. Cadena de valor de biodiésel en India 404
Figura 117. Fabricantes de biodiésel en India..... 406
Figura 118. Cadena de suministro para bioetanol en India 409
Figura 119. Límites del Sistema para el ACV en India 414

Antecedentes

El 15 mayo de 2023 el Ministerio de Minas y Energía publicó el concurso de méritos abierto número 001 de 2023 con el objeto de contratar un estudio técnico integral que analice, diagnostique y formule la hoja de ruta que promueva el uso de biocombustibles alternativos en Colombia, producidos a partir de materias primas de origen vegetal, animal y/o renovables y/o residuales y/o materias primas sintéticas u otros productos.

El tipo de contrato es una consultoría y la justificación de la modalidad de contratación es la Ley 1150 de 2017. El 25 de julio de 2023 el contrato n.º GGC-844-2023 fue adjudicado al Consorcio Alternativas con una duración es de seis (6) meses, a partir de la fecha de inicio, la cual fue 22 de agosto de 2023.

El alcance del objeto requiere:

a) Analizar y comparar, desde el componente técnico, económico, tecnológico, legal, ambiental y social, en mínimo cinco (5) países, previamente aprobados por el Ministerio de Minas y Energía.
b) Diagnosticar y evaluar las potenciales materias primas y tecnológicas a utilizar en Colombia en la producción de biocombustibles alternativos de segunda generación, así como de combustibles sintéticos.
c) Analizar el impacto social y de generación de empleo como proyección de la implementación de la cadena productiva del uso de biocombustibles alternativos en el país.
d) Revisar la necesidad de ajuste y/o modificación de la normatividad actual, asociada con biocombustibles, así como la estructuración de gobernanza y política pública regulatoria, a fin de implementar el uso de biocombustibles alternativos en Colombia.
e) Formular la hoja de ruta que promueva el uso de los biocombustibles alternativos en Colombia.

Los siguientes son los entregables que, de acuerdo con el alcance, se relacionan a continuación:

- Producto 1. Plan de trabajo y cronograma
- Producto 2. Informe sobre contexto internacional y análisis comparativo
- Producto 3. Informe sobre el potencial en biocombustibles alternativos de segunda generación en Colombia
- Producto 4. Informe sobre el potencial en producción de combustibles sostenibles de aviación (SAF), diésel renovable (HVO) y combustibles sintéticos, incluyendo los denominados *e-fuels*, en Colombia
- Producto 5. Informe sobre el análisis social y generación de empleos verdes
- Producto 6. Hoja de ruta de biocombustibles alternativos en Colombia

A continuación, se describe el cronograma (tabla 1) definido para la ejecución del proyecto.

Tabla 1. Cronograma de ejecución del proyecto

Entregables	Semanas																									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
	29-ago	5-sep	12-sep	19-sep	26-sep	3-oct	10-oct	17-oct	24-oct	31-oct	7-nov	14-nov	21-nov	28-nov	5-dic	12-dic	19-dic	26-dic	2-ene	9-ene	16-ene	23-ene	30-ene	6-feb	13-feb	21-feb
Acta inicio	22-ago																									
Producto 1. Plan de Trabajo y cronograma.	29-ago																									
Producto 2. Informe contexto Internacional y análisis comparativo (5 paises)						3-oct																				
Estados Unidos																										
Brasil																										
Argentina																										
Francia																										
India																										
Producto 3. Informe potencial Biocombustibles Alternativos de Segunda Generación en Colombia												14-nov														
Etanol																										
Biodiésel																										
Biogás																										
Producto 4. Informe potencial en producción de Combustibles Sostenibles de:																	19-dic									
Aviación (SAF)																										
Diésel renovable (HVO)																										
Combustibles sintéticos (e-fuels en Colombia)																										
Producto 5. Informe sobre el análisis social y generación de empleos verdes.																				9-ene						
entrevistas o socializaciones: comunidades, agentes del sector energético, entidades públicas, privadas																										
Producto 6. Hoja de Ruta de Biocombustibles Alternativos en Colombia.																								6-feb		
socialización propuesta de la hoja ruta: comunidades, agentes del sector energético, entidades públicas, privadas																										
Reuniones de seguimiento Consorcio - MME																										
Fin contrato																										21-feb

En el presente, se hace entrega del Producto 2, sobre el contexto internacional y análisis comparativo de los cinco (5) países seleccionados como

referentes en el uso de biocombustibles a nivel mundial, los cuales fueron propuestos por el consultor y aprobados por el Ministerio de Minas y Energía.

Los países elegidos para este propósito son Estados Unidos, Brasil, Argentina, Francia e India y los criterios usados para su elección están en la tabla 2.

Tabla 2 Criterios de selección de países para el análisis internacional del sector de biocombustibles

Países	Materia Prima	Criterios
Estados Unidos	Maiz:Etanol Aceite de soya: Biodiesel	Es el principal productor mundial de biocombustibles líquidos, primer productor de bioetanol y segundo de biodiesel, pionero mundial en programas de renovación de combustibles como el Renowable Fuels Standard (RFS) originado en la Ley de política energética de 2005, con una gran inversión por parte del gobierno con impacto económico y ambiental para brindar opciones de combustibles más limpios a nivel mundial.
Brasil	Caña de Azucar:Etanol Aceite de Soya:Biodiesel	Referente Latinoamericano, al ser el segundo mayor productor de biocombustibles líquidos a nivel mundial, segundo productor mundial de bioetanol tiene el marco regulatorio más antiguo de Latinoamérica con una normatividad de 1977 de uso obligatorio de etanol. Cuenta con el mayor apoyo estatal hacia los biocombustibles líquidos con una mezcla obligatoria del 27% de bioetanol y del 11% de biodiesel, además del programa Renovabio que es una política pública cuyo objetivo es la transición a una matriz energética más sostenibles y fomentar la inversión en biocombustibles
Argentina	Caña de Azucar:Etanol Aceite de Soya:Biodiesel	Es el tercer productor mundial de biodiesel con base en aceite de soya, cuenta con más de 36 plantas de biodiesel y 19 plantas de bioetanol, en marzo de 2023 la unión europea reconoció en su diario oficial que Argentina tiene la industria de biodiesel más moderna del mundo que cumple con los estándares de calidad más altos en términos técnicos económicos y ambientales.
Francia	Maiz:Etanol Aceite de colza:Biodiesel	Es el principal productor (principalmente remolacha, trigo y maíz) y exportador de Bioetanol en Europa, tiene unos Niveles de mezcla ejemplares para el resto de Europa, está implementando E85 con éxito teniendo un aumento en el consumo del 55% entre 2021 y 2022 . El gobierno Francés ofrece un impuesto reducido al combustible E85 y tiene un enfoque regulatorio que incentiva la mezcla de combustible con alto contenido de etanol.
India	Caña de azucar:etanol Aceite usado de cocina:Biodiesel	Programa estatal ambicioso en la renovación de combustibles que incluye aumento en la producción nacional, ejecución de métodos de eficiencia energética, aumento de uso de biocombustibles, incentivos para reducir importación de combustibles fósiles, tiene como meta niveles de mezcla que superan los países europeos con en 20% de etanol en gasolina a 2025. Además, el gobierno impulsa la construcción de biorrefinerías de etanol de segunda generación que utilicen recursos agropecuarios en distintas partes del país.

El informe incluye el análisis técnico, económico, tecnológico, legal, ambiental, social y el marco regulatorio de estos cinco (5) países, describiendo las materias primas utilizadas en el proceso de producción, la revisión de las estrategias de recolección, tratamiento, transporte, tecnologías aplicadas en los procesos de producción, implicaciones de carácter ambiental, ecológico, agrario, uso del suelo, así como la descripción del ciclo de vida y estimación de la reducción de emisiones de gas efecto invernadero por el uso de biocombustibles en el sector transporte e industria.

1. Introducción al análisis del contexto internacional de los biocombustibles

Desde la crisis internacional del petróleo, en la decada de los setenta, se inició la utilización de los biocombustibles como un sustituto a los combustibles fósiles, lo cual ha permitido a varios países mejorar sus condiciones de seguridad energética. En 1973, los países miembros de la OPEP determinaron reducir la producción de petróleo y aumentar sus precios, ello como respuesta al apoyo de Estados Unidos a Israel en la guerra de Yom Kippur, lo cual provocó escasez de petróleo a nivel global con una respectiva subida de precios. En consecuencia, el Gobierno de Estados Unidos estableció una serie de medidas para disminuir la dependencia del petróleo foráneo, lo que incluyó el desarrollo de fuentes alternativas de energía como los biocombustibles.

En tal sentido, desde esa época Estados Unidos y Brasil han liderado la formulación e implementación de normas y políticas que incentivan la producción, consumo y comercialización de los biocombustibles.

Actualmente, la importancia de los biocombustibles en el mundo radica en su capacidad en abordar problemas críticos como el cambio climático, la seguridad energética, el desarrollo sostenible y la generación de empleo; estos combustibles renovables representan una parte fundamental a la transición de un sistema energético más limpio y sostenible a nivel global.

En este estudio, se describirán los aspectos más relevantes de dicho sector en esos países pioneros, así como otros tres casos de naciones que igualmente se consideran referentes para la hoja de ruta del desarrollo de los biocombustibles en Colombia, es decir, se analizarán los sectores de biocombustibles de Argentina, Francia e India.

En el documento, se describen los principales aspectos técnicos relacionados con los biocombustibles de primera y segunda generación, considerando las características fisicoquímicas de las materias primas usadas y los procedimientos industriales para la obtención de dicha energía renovable.

Asimismo, se presentan las cifras económicas fundamentales del sector de los biocombustibles a nivel global.

En el caso de cada país seleccionado, se ilustran los temas más relevantes del sector en el ámbito local, es así como se presenta el respectivo marco regulatorio y económico, los aspectos técnicos específicos en la produccion de los biocombustibles y una descripción completa de la cadena de suministro que integra todo el proceso asociado a la producción, consumo y comercialización.

Para cada país, se describen sus características en los ámbitos sociales y ambientales; finalmente, se realiza una comparación de los cinco casos analizados en el estudio.

2. Aspectos generales en la producción de biocombustibles

Los biocombustibles o biocarburantes (*biofuels* en inglés) provienen de la materia orgánica vegetal o animal; lo anterior significa que las fuentes de biomasa se pueden transformar en estos combustibles (Guimarães et al., 2023). Estos productos energéticos pueden ser gaseosos, como el hidrógeno y el metano, o líquidos, como el metanol, etanol, biodiésel, entre otros.

Además de emplearse como combustibles, los biocombustibles se pueden usar como generadores de energía eléctrica, lubricantes o disolventes industriales, también se emplean en sistemas de calefacción o en uso doméstico (para cocinar).

En el mundo, el biodiésel, bioetanol y biogás son los tipos de biocombustibles renovables más conocidos (Guimarães et al., 2023).

El presente estudio también abordara aspectos transversales de los biocombustibles alternativos, como el aceite vegetal hidrogenerado (HVO), conocido como diésel verde o diésel renovable, el biogás, el biometano y los combustibles sostenibles de aviación (SAF).

Los biocombustibles generados a partir de materias primas renovables logran un mejor balance de emisiones de gases efecto invernadero (GEI), entre lo que generan cuando se queman y lo que remueven cuando se cultivan. Sin embargo, su producción no solo debe ser sostenible, sino que también deben lograr características competitivas con el uso de combustibles fósiles para fomentar la transición energética (Raud et al., 2019).

Cuando se habla de la aplicación directa del biodiésel, se tienen algunas limitaciones y desafíos logísticos por sus propiedades fisicoquímicas y sus características. El biodiésel puede degradar el caucho de las líneas de combustible o disolver el barniz y sedimento de los tanques de diésel de petróleo, tuberías y motores diésel. Además, se gelifica con mayor facilidad que el diésel de petróleo a bajas temperaturas, por tanto, no puede ser almacenado o transportado en los medios regulares de los derivados líquidos del petróleo, por el contrario, debe transportarse por ferrocarril, barco, barcaza o camión (EIA, n.d.).

En la figura 1 se observan los tipos de biocombustibles y sus generaciones.

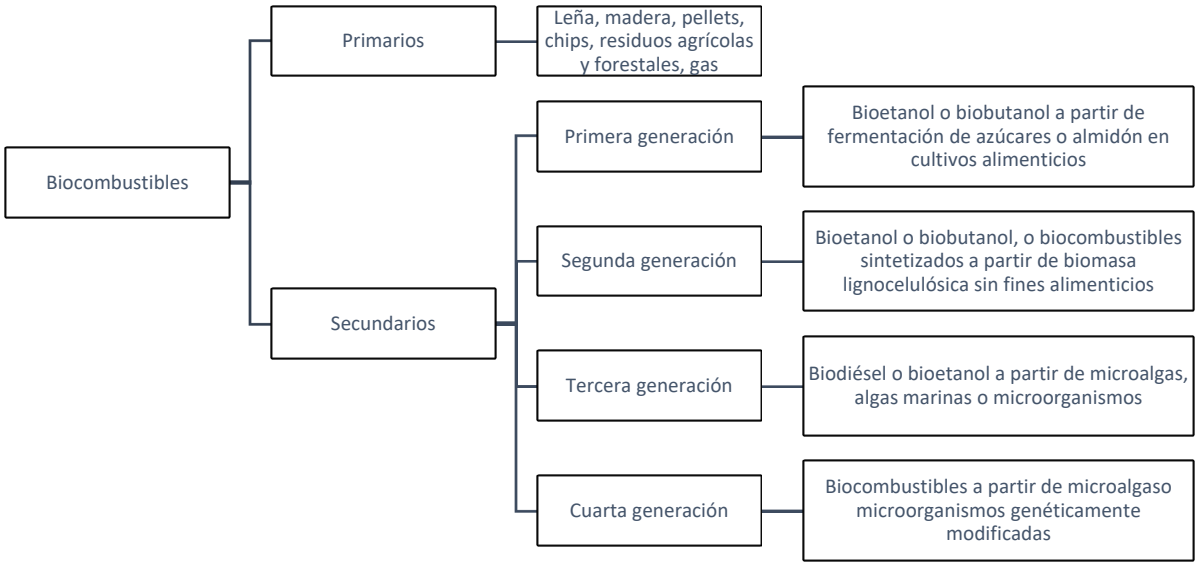


Figura 1. Tipos de biocombustibles

Adaptado de: (Raud et al., 2019)

2.1 Pretratamientos de los precursores de biocombustibles

El pretratamiento es un paso crucial en la utilización de la biomasa lignocelulósica para obtener biocombustibles; refiere a la solubilización y separación de los componentes de la matriz lignocelulósica (celulosa y lignina unidas por cadenas de hemicelulosa), un rompimiento causado para reducir el grado de cristalinidad de la celulosa e incrementar la fracción de celulosa amorfa, sustrato para el ataque enzimático (Sarkar et al., 2012; Wancura et al., 2023).

Un correcto pretratamiento remueve parte de la lignina, reduce el poder recalcitrante de la biomasa y facilita la digestión de la celulosa y hemicelulosa. Su objetivo es formar azúcares directamente por hidrólisis, evitar la pérdida por degradación de azúcares, limitar la obtención de productos inhibitorios reduciendo la demanda energética y el costo de operación (Sarkar et al., 2012; Wancura et al., 2023).

Usualmente, los métodos se dividen en pretratamientos biológicos y no biológicos (físicos, químicos y fisicoquímicos) (Sarkar et al., 2012; Wancura et al., 2023). En la tabla 3, se resumen algunas de las características de estos pretatamientos.

Tabla 3. Tipos de pretratamiento de biomasa en la obtención de biocombustibles

	Pretratamientos biológicos	**Pretratamientos no-biológicos**		
		Físicos	Químicos	Fisicoquímicos
Objetivo	Este método emplea hongos, bacterias y enzimas para romper la lignina de la matriz lignocelulósica.	Reducir el tamaño de la partícula. Incrementar área superficial. Generalmente se combina con otros métodos.	Reducir el poder recalcitrante de la biomasa. Incrementar la conversión y, por ende, el rendimiento de obtención del biocombustible. En estos procesos es importante prestar atención a la formación de productos tóxicos que reducen la formación del biocombustible.	Involucra propiedades fisicoquímicas.
Tipos	Hongos Bacterias Enzimas (celulasas y hemicelulosas)	Molienda Irradiación Ultrasonido Extrusión Pirólisis	Pretratamiento ácido. Pretratamiento alcalino. Pretratamiento con solventes orgánicos. Pretratamiento con sales orgánicas (líquidos iónicos). Pretratamiento con solventes eutécticos profundos (DES).	Explosión de vapor (SE) Agua líquida caliente (LHW) Expansión de fibra de amoníaco (AFEX) Explosión de CO_2
Ventajas	Requiere baja demanda de energía. Baja formación de compuestos tóxicos.	La reducción de tamaño de partícula permite la transferencia de masa. Reducción de la cristalinización de la celulosa. No se requiere o se reduce el consumo de químicos.	Mayor eficiencia y selectividad. Reducción en generación de agentes inhibidores.	Baja formación de elementos tóxicos o inhibitorios. Bajos tiempos de residencia.
Desventajas	Baja eficiencia. Elevado tiempo de operación. Elevado costo (enzimas).	Elevada demanda energética. En la extrusión se restringe la disponibilidad de flujo.	Generación de corrosión de equipos. Elevados costos de mantenimiento. Generación de contaminación y agentes tóxicos.	Elevada demanda de agua y energía. Requerimiento de ambientes controlados.
Referencias	(Guimarães et al., 2023; Wancura et al., 2023)	(Ahmed et al., 2022; Guimarães et al., 2023; Sarkar et al., 2012; Wancura et al., 2023)	(Wancura et al., 2023)	(Sarkar et al., 2012; Wancura et al., 2023)

2.2 Tecnologías de producción de biocombustibles

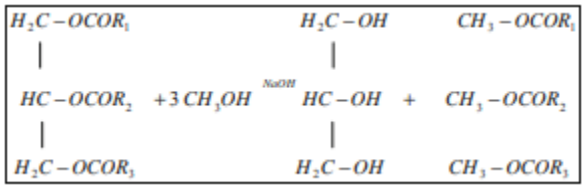
2.2.1 Biodiésel

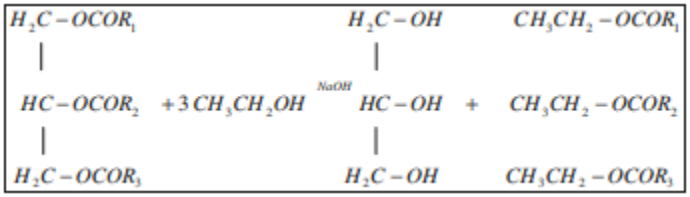
El biodiésel es un líquido obtenido por la reacción de transesterificación entre los ésteres presentes en aceites vegetales, grasa amarilla, aceite usado de cocina o grasa animal y un alcohol en presencia de un catalizador, para obtener glicerina y una mezcla de ésteres. La reacción se muestra a continuación (Romano & Sorichetti, 2011):

$$RCOOR' + R''OH \leftrightarrow R'OH + RCOOR''$$

Donde: *RCOOR'* es un éster, *R"OH* es el alcohol, *R'OH* es la glicerina y *RCOOR"* es la mezcla de ésteres.

A continuación, se muestra la reacción común a partir de metanol y etanol (Romano & Sorichetti, 2011):





El catalizador se usa para acelerar la reacción y dependiendo del catalizador empleado, la transesterificación puede ser ácida, básica o alcalina. Es más frecuente el uso de catalizadores básicos, por otro aldo, los catalizadores ácidos suelen tener gran poder de acidez y se suelen emplear las lipasas como catalizadores enzimáticos (Romano & Sorichetti, 2011).

El proceso general de obtención del biodiésel se resume en la figura 2 (Romano & Sorichetti, 2011):

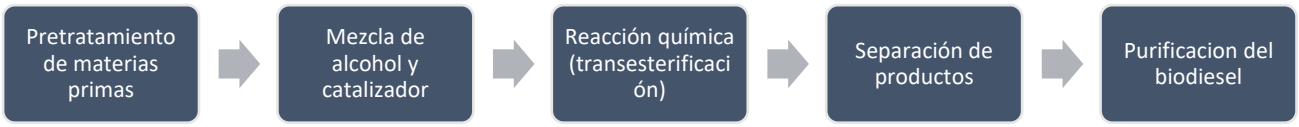


Figura 2. Proceso general de obtención de biodiésel

En la obtención de biodiésel, los aceites naturales tienen entre 10 a 17 veces mayor viscosidad que el diésel de petróleo, lo cual causa daños en los motores. Por tanto, es importante transformar los aceites naturales crudos en biodiésel, a través de la transesterificación o esterificación, previo a su uso (Bergmann et al., 2013).

Para analizar la fuente de extracción del aceite, se debe tener en cuenta que diferentes partes del cultivo pueden ser utilizadas para la obtención del biocombustible, también se debe considerar que la anatomía del cultivo y su contenido de aceite puede cambiar de acuerdo con su locación, además de la especie (Bergmann et al., 2013).

2.2.2 Bioetanol

El proceso general de obtención del bioetanol está en la figura 3 (Devi et al., 2021; Limayem & Ricke, 2012).

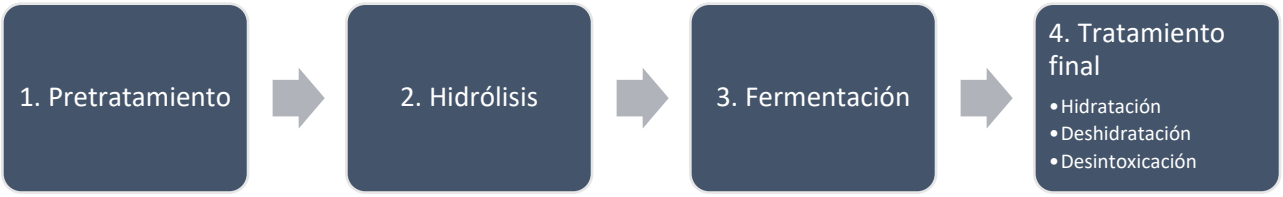


Figura 3. Proceso general de obtención del bioetanol

Adaptado de: (Devi et al., 2021)

El rendimiento en la obtención del bioetanol depende del tipo de biomasa, el bajo contenido de lignina y el elevado contenido de celulosa y hemicelulosa (Jayakumar et al., 2023).

En algunas etapas del proceso se pueden producir sustancias indeseadas en el producto, por tanto, éste es sometido a procesos de desintoxicación en la etapa del tratamiento final. Dichos procesos se describen en la figura 4:

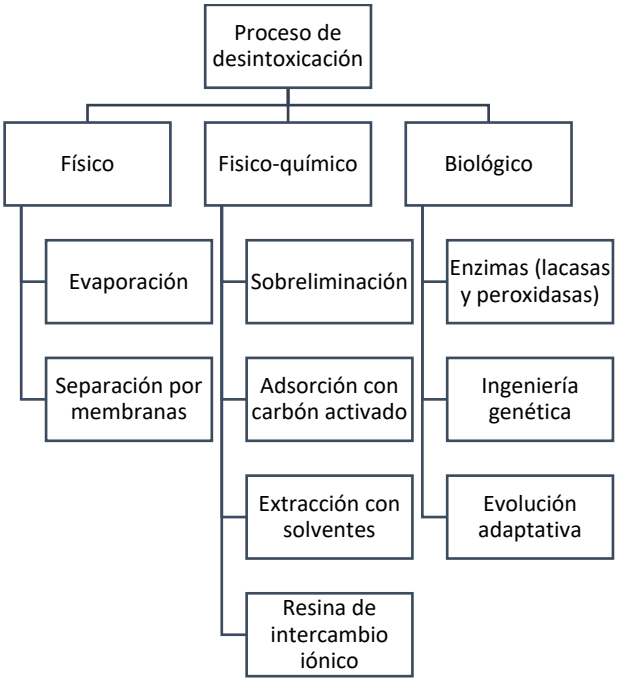


Figura 4. Tipos de procesos de desintoxicación del bioetanol

Tomado de: (Devi et al., 2021; Guimarães et al., 2023)

Como ocurre con la producción general de biocombustibles (véase tabla 4), existen generaciones o tipos de bioetanol producido, dependiendo de la materia prima del que se obtiene. La tabla 4 muestra un resumen de los tipos de generación del bioetanol, con sus ventajas y desventajas.

Tabla 4. Generaciones en la producción de bioetanol

	Primera generación	**Segunda generación**	**Tercera generación**
Precursor o materia prima	Materias primas que contienen azúcar y almidón Usa biomasa comestible	Biomasa lignocelulósica proveniente de cultivos abundantes y renovables Usa biomasa no comestible	Algas
Ejemplo	Maíz, caña de azúcar, cebada, trigo, remolacha azucarera, sorgo	Cáscara de banano, naranja, piña Cascarilla de café Cascarilla de fibra de coco Bagazo de caña Paja de arroz, trigo	*Chorella vulgaris* *Spirulina sp* *Euglena gracilis* *Scenenedesmus obliquus* *Chlamydomona reinhardtii*

	Primera generación	Segunda generación	Tercera generación
		Rastrojo de maíz Residuos de madera	
Ventajas	Domina los estudios de integración. Es más económico que la producción de bioetanol de segunda generación porque la hidrólisis requiere menor inversión.	Mayor sostenibilidad del proceso. Aprovechamiento de materiales de desecho. Menor costo de materias primas. No compite con materiales con fines alimenticios.	Amplia disponibilidad Consumo de CO_2 (reducción de emisiones). Elevada concentración de azúcares. Crecimiento sin requerimiento de tierras de cultivo.
Desventajas	Compensación entre el uso de la materia prima para alimento o para combustible. Elevada explotación de tierras arables. Mayor costo de materias primas (a base de sacarosa y almidón).	La etapa de pretratamiento de componentes lignocelulósicos es más compleja porque requiere mayor cantidad de subprocesos para acceder a los azúcares, por ende, requiere mayor eficiencia. La hidrólisis enzimática en materiales lignocelulósicos es de mayor complejidad que en aquella requerida para materias primas a base de almidón. Este proceso requiere enzimas específicas (celulasas, hemicelulosas), que son mucho más lentas y requieren mayores concentraciones, haciendo que el proceso sea más costoso, que el proceso con amilasas y glicógeno, que pueden convertir el 100 % del algodón en glucosa. Vacíos en la eficiencia y viabilidad económica en el pretratamiento Rendimiento insuficiente en la obtención de azúcares y bioetanol. Producción de agentes tóxicos e inhibitorios	Logística compleja en la producción y recolección. Bajo rendimiento biomásico.

Adaptado de: (Guimarães et al., 2023);(Limayem & Ricke, 2012)

Para cada generación de bioetanol, se tiene un proceso de producción definido, cuyo factor común es la etapa de fermentación, proceso principal en el que los azúcares se transforman a alcohol (bioetanol), como se muestra en la figura 5.

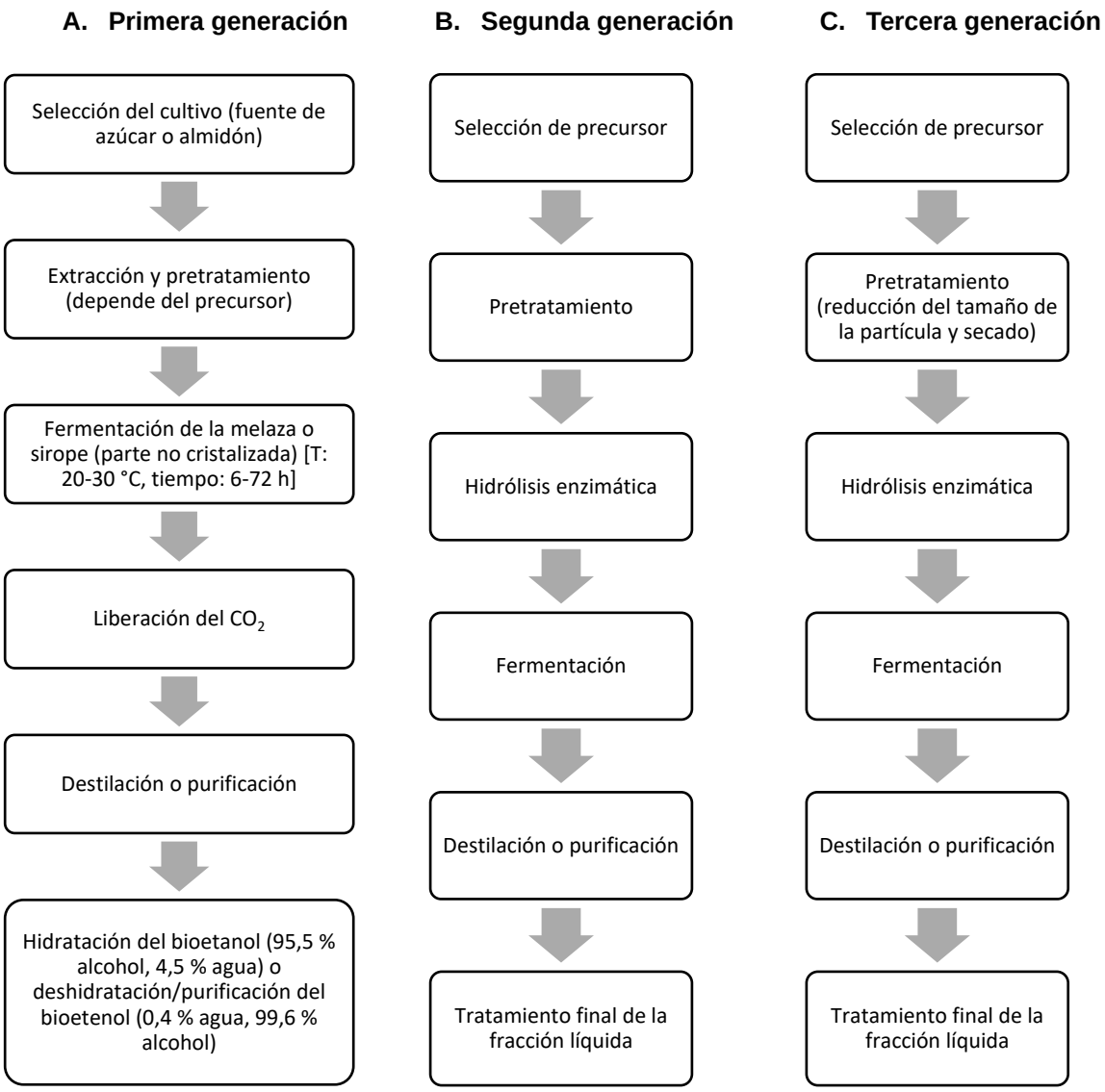


Figura 5. Proceso de obtención de bioetanol de primera, segunda y tercera generación

En el bioetanol de primera generación, inicialmente, se debe seleccionar el cultivo (véase Figura 5). Para aquellos cultivos fuente de azúcares, se extrae el jugo por difusión o presión para separarlo de la fibra (bagazo) y pretratarlo en una etapa de filtración y evaporación para cristalizarlo. La melaza (parte no cristalizada del jugo) se somete a un proceso de fermentación, en el que el principal reto consiste en seleccionar una levadura que resista a las condiciones de reacción y que logre el mayor rendimiento en la obtención del alcohol. Sus condiciones de operación varían de acuerdo con la materia prima seleccionada con temperaturas

entre 25-30 °C y tiempos de duración entre 6-72 h. Luego del proceso de fermentación, continúan dos pasos, uno referente a la liberación de dióxido de carbono y el otro referente a la eliminación de impurezas (destilación). Finalmente, el bioetanol puede ser hidratado o deshidratado (véase figura 5) (Guimarães et al., 2023).

En el caso de las materias primas amiláceas (maíz, trigo, cebada) (véase Figura 6), se requieren pasos más complejos de procesamiento como molienda, cocción, licuefacción o hidrólisis enzimática. Los granos deben someterse a un proceso de molienda para obtener finas partículas y facilitar el proceso de cocción y licuefacción (separación de los granos almidonados no solubles en solución acuosa), que es fundamental para obtener el sirope. Seguidamente, el sirope se somete a hidrólisis enzimática para facilitar el proceso de fermentación y destilación (véase figura 5) (Guimarães et al., 2023).

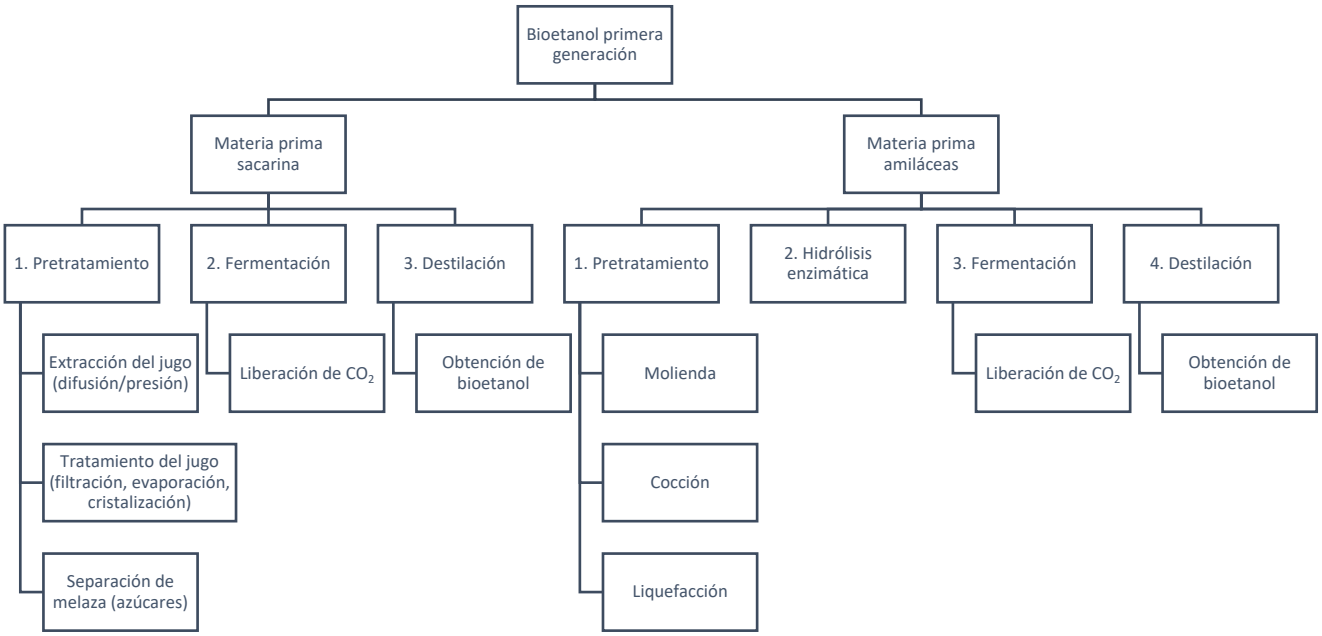


Figura 6. Tipos de procesamiento de bioetanol de primera generación de acuerdo con su precursor

El proceso de obtención de bioetanol de segunda generación inicia con una etapa de pretratamiento para romper la composición química de la planta (es decir, liberar la celulosa y hemicelulosa y remover la lignina en un proceso de

deslignificación) y facilitar el acceso de las enzimas que, en la hidrolisis enzimática, convierten la lignocelulosa pretratada en azúcares fermentables. Posteriormente, ocurre la fermentación, destilación y tratamiento de la fracción líquida (bioetanol) (Guimarães et al., 2023). Para el bioetanol de tercera generación, a partir de algas, el proceso general de obtención del alcohol es igual al proceso de obtención de bioetanol de segunda generación, el cambio radica en la etapa de pretratamiento (véase figura 5) (Guimarães et al., 2023).

Existen diferentes tipos de hidrólisis en la producción del bioetanol que se resumen en la tabla 5 (Jayakumar et al., 2023).

Tabla 5 Tipos de hidrólisis en la producción de bioetanol

Hidrólisis	Descripción	Ventajas	Desventajas
Ácido diluido	Para romper la celulosa requiere 1-3 % de ácido diluido y elevada temperatura: 200-240 °C. Luego ocurre el rompimiento de hexosas y pentosas y elementos más tóxicos como el hidroximetilfurfural (HMF) y fenoles que son inconvenientes para la sacarificación.	Consume menos cantidad de ácido. Proceso simple y rápido.	Requiere elevada temperatura y presión. Causa degradación de azúcares. Genera sustancias inhibitorias.
Ácido concentrado	Es la aplicación más común. Logra elevados rendimientos de obtención de azúcares (90 %), sin producción de agentes inhibidores sustanciales. Sin embargo, requiere grandes cantidades de ácidos, lo que eleva su costo en procesos de reciclaje de ácido.	Elevado rendimiento de reacción. Mayor conversión.	Elevado costo. Problemas de corrosión y toxicidad. Formación de sales. Mayor consumo de ácidos.
Enzimática	Es el método de mayor uso para biomasa lignocelulósica. Posee menor costo que la hidrólisis ácida o alcalina, ya que ocurre a condición ambiente (pH 4,8, 318-323 K).	Requiere menos energía. Minimiza limitaciones de difusión y mezclado.	Requiere elevado tiempo de incubación. Baja reutilización. Más lenta que la hidrólisis ácida.
Referencias	(Jayakumar et al., 2023)	(Jayakumar et al., 2023)	(Jayakumar et al., 2023)

También existen diferentes tipos o procesos de fermentación, cuyo objetivo es a partir de la acción de microrganismos, convertir azúcares, como la glucosa, fructosa y sacarosa, en energía celular, produciendo bioetanol y dióxido de

carbono como subproductos. En la tabla 6, se resumen algunos de los procesos de fermentación (Jayakumar et al., 2023; Suarez-Bertoa et al., 2019).

Tabla 6. Tipos de fermentación en la producción de bioetanol

Tipo de fermentación	Descripción	Ventajas	Desventajas
Bioproceso consolidado	Combinación en un solo esquema de la producción de celulosa, sacarificación y fermentación.	Erradicación de componentes venenosos. Reducción de costos por minimización de cantidad de reactores.	Bajas tasas de producción de etanol.
Fermentación e hidrólisis simultánea	Renovación de los procesos convencionales de hidrólisis y fermentación separados.	Bajo costo. Elevado rendimiento de obtención de bioetanol por la reducción de productos de inhibición en la sacarificación. Reducción de reactores requeridos.	Diferencia en condiciones de operación (temperatura) para la hidrólisis y la fermentación.
Fermentación e hidrólisis por separado	Realiza la liberación de azúcares (hidrólisis) separado de su conversión a etanol (fermentación).	Cada etapa puede ocurrir en sus condiciones óptimas de operación.	Productos de inhibición reducen el rendimiento de obtención del bioetanol. Posible contaminación debido a largos periodos de operación.
Referencia	(Jayakumar et al., 2023; Sarkar et al., 2012; Toor et al., 2020)	(Jayakumar et al., 2023; Sarkar et al., 2012)	(Jayakumar et al., 2023; Sarkar et al., 2012)

2.2.3 Aceite vegetal hidrogenerado (HVO)

El aceite vegetal hidrogenerado (en adelante, HVO, por sus siglas en inglés), también llamado diésel verde o diésel renovable, es una mezcla de hidrocarburos parafínicos (alcanos de bajo peso molecular), libre de azufre y aromáticos, con un elevado número de cetano y baja densidad. Sus propiedades fisicoquímicas son muy similares al diésel de petróleo (Napolitano et al., 2018; Suarez-Bertoa et al., 2019). Este biocombustible se obtiene del hidrotratamiento catalítico de biomasa a base de triglicéridos, como los aceites vegetales, la grasa animal o el aceite usado de cocina (Suarez-Bertoa et al., 2019).

El hidrotratamiento consiste en la remoción total de oxígeno para la obtención de una mezcla de parafinas e isoparafinas de punto de ebullición similar

al gasoil, a través del sometimiento de la fuente de triglicéridos a altas temperaturas y la presión de hidrógeno con un catalizador. En este proceso, el hidrógeno se utiliza para eliminar los átomos de oxígeno y los dobles enlaces de la estructura de los triglicéridos, mediante tres posibles caminos: la descarbonilación, la descarboxilación y la hidrodesoxigenación. El propano, el agua, el monóxido de carbono y el dióxido de carbono son los productos secundarios del proceso (Suarez-Bertoa et al., 2019). La figura 7 muestra el proceso general de la obtención del diésel verde y otros productos con fines energéticos como el *jet fuel* y el biopropano:

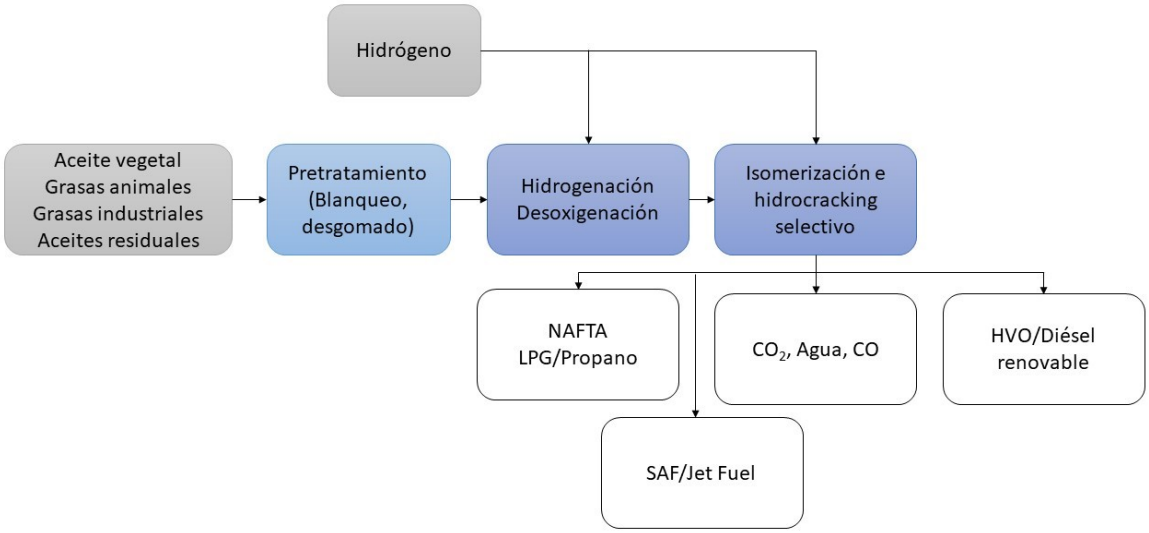


Figura 7. Proceso de producción de HVO o diésel renovable

El hidrotratamiento de grasas vegetales, animales o aceite usado de cocina se impone como alternativa a la transesterificación para producir biocombustibles, ya que produce combustibles de alta calidad, sin requerir grandes modificaciones logísticas, ni exhaustivos procesos de postratamiento que desemboquen en nuevas tecnologías, igualmente, no demanda cambios a la infraestructura de suministro, la cadena cinemática o los motores de los vehículos. Además, puede mezclarse con el diésel convencional (Suarez-Bertoa et al., 2019).

2.2.4 Biogás

Corresponde a una mezcla de metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2) y trazas de otros gases, que puede ser producido por distintas fuentes de materia orgánica, como los desechos agrícolas, alimenticios, estiércol y lodos de aguas residuales.

Esta mezcla de gases puede ser empleada para producir calor y electricidad; o puede ser purificada para producir biometano, que puede ser inyectado en la red de gas natural o empleado como combustible en vehículos.

Se ha identificado como un combustible para motor en las granjas orgánicas en el corto y mediano plazo. Puede ser utilizado como sustituto del gas natural o el propano en calentadores/calderas o para generar electricidad en áreas rurales. Se obtiene de la digestión anaeróbica de la materia orgánica y cuando se usa como combustible, el CO_2 es removido para aumentar el contenido de energía y es almacenado a alta presión.

En la actualidad, el 31 % del biogás se emplea para generación de electricidad, el 33 % para cogeneración, el 27 % para calor en edificios y el 9 % para obtención de biometano (véase figura 8).

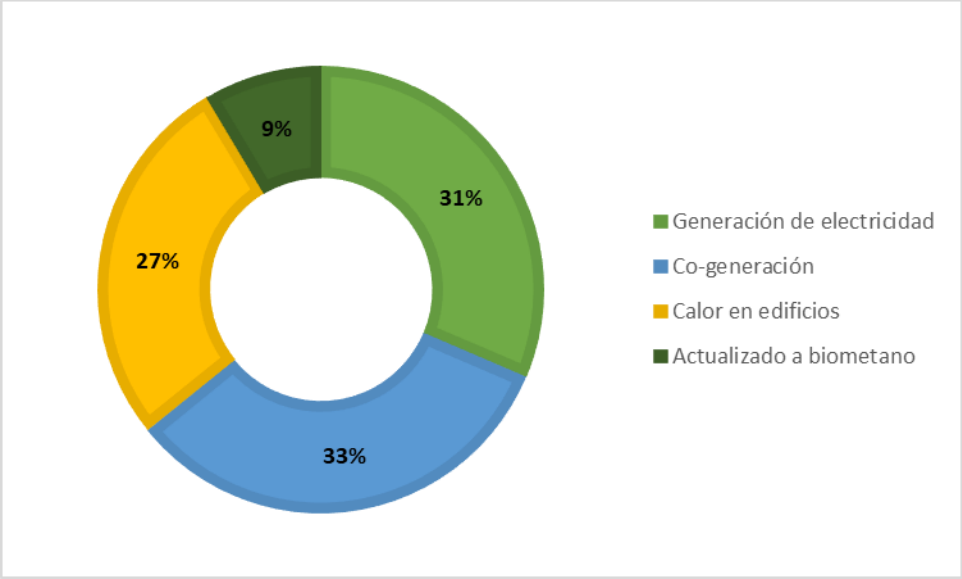


Figura 8. Consumo del biogás por tipo de uso final (2018)

La composición del biogás depende del tipo de materia prima y del método de producción. Las tecnologías principales incluyen (IEA, n.d.):

- Biodigestores: sistemas herméticos (contenedores o tanques) en los que la materia orgánica diluida en agua es descompuesta por microorganismos.
- Sistemas de recuperación de gases de vertederos: en los vertederos se produce la descomposición de residuos sólidos municipales que, en condiciones anaeróbicas, generan biogás; éste se puede capturar mediante tuberías y pozos de extracción con compresores para inducir el flujo a un punto de recolección.
- Plantas de tratamiento de aguas residuales: los lodos de depuradora se pueden emplear como precursores de biogás tratado con un digestor anaeróbico.

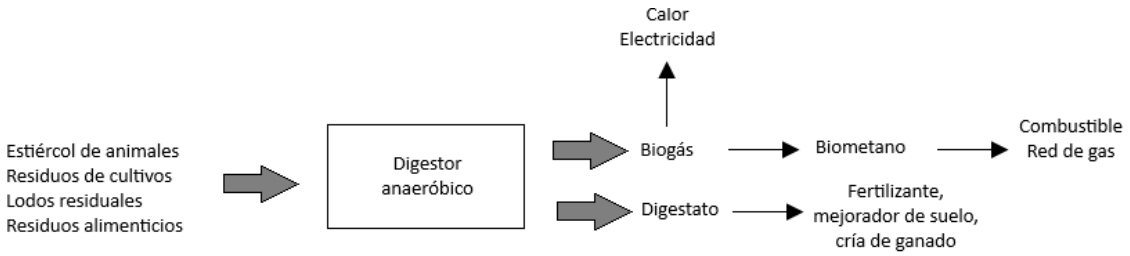


Figura 9. Proceso general de producción de biogás

Elaboración propia a partir de diferentes fuentes de información (EESI, 2017; Hagos et al., n.d.; Pramanik et al., 2019.)

Como se observa en la figura 9, el proceso de biodigestión inicia con el ingreso de las materias primas al reactor de digestión anaeróbica, en él las bacterias presentes degradan la materia orgánica del precursor, en ausencia de oxígeno, y se produce el biogás y un líquido denominado digestato con propiedades fertilizantes. Durante la biodigestión existen tres etapas:

- Hidrólisis: las moléculas grandes se descomponen en sus monómeros. Por ejemplo, los carbohidratos se descomponen en azúcares simples, las proteínas en aminoácidos y los lípidos en ácidos grasos.
- Acidogénesis: los productos de la hidrólisis son transformados a ácidos grasos volátiles, dióxido de carbono, nitrógeno, amoniaco e hidrógeno.
- Metanogénesis: los ácidos grasos volátiles se convierten en metano y dióxido de carbono.

El contenido de metano en biogás oscila entre 45 y 75 % en volumen, la mayor composición es de CO_2. Su poder calorífico inferior está entre 16 y 28 MJ/m^3 (IEA, n.d.).

En la producción de biogás, se pueden emplear diferentes tipos de materias primas, que incluyen residuos de cultivos (residuos de la cosecha de trigo, maíz, arroz, remolacha azucarera, caña de azúcar, soja, etc.), estiércol de animales (ganado vacuno, porcino avícola y ovino), la fracción orgánica de los residuos sólidos municipales, incluyendo los residuos industriales (alimentos y desechos verdes, como hojas y pasto, papel, cartón y madera que no se composta ni recicla) y los lodos de aguas residuales (IEA, n.d.).

2.2.5 Combustibles sostenibles de aviación (SAF)

Los combustibles sostenibles de aviación o SAF, por sus siglas en inglés, son una alternativa inmediata a los combustibles convencionales de aviación, como el queroseno, que logran bajas emisiones de CO_2 para reducir el impacto en el cambio climático del sector (más del 80 % de reducción de emisiones de CO_2). Es una solución inmediata porque las aeronaves no necesitan ser modificadas para su uso, incluso aceptan la mezcla con combustibles convencionales. Además, puede aumentar la eficiencia del combustible entre un 1,5 y 3 %, no causa deforestación tropical y su producción no compite con la seguridad alimentaria.

La biomasa es la fuente principal de este tipo de biocombustibles. Se destacan (Ethanol Fuel Basics, 2023):

- Grano de maíz
- Semillas oleaginosas
- Algas
- Otras grasas y aceites
- Residuos agrícolas
- Residuos forestales
- Residuos de aserraderos de madera

- Flujos de residuos sólidos municipales
- Residuos húmedos (estiércol, lodos de tratamiento de aguas residuales)
- Cultivos energéticos dedicados

También se puede producir sintéticamente con un proceso que captura carbono del aire. Siete vías de producción de SAF están certificadas cuyo rendimiento operativo es equivalente al Jet A1. El combustible de aviación sostenible debe tener las mismas características y cualidades que el combustible de aviación convencional para poder sustituirlo y así evitar ajustes en motores, aviones o en la cadena de suministro; estas características se resumen en la sección de especificaciones técnicas del presente documento (IATA, 2023). Las tecnologías certificadas se resumen en la tabla 7.

Tabla 7. Tecnologías certificadas en la producción de SAF

Tecnología	Sigla	% mezcla máx.	Materias primas	Descripción
Fischer-Tropsch	FT	50	Residuos (residuos sólidos municipales, etc.), carbón, gas, aserrín	Aprobación: ASTM D7566 (2009). En el proceso el carbón, gas natural o biomasa se gasifican en un gas de síntesis compuesto de hidrógeno y CO, este gas se convierte catalíticamente en un componente de mezcla de hidrocarburo líquido en el reactor FT.
Fischer-Tropsch con aromáticos	FT-SKA	50	Residuos (residuos sólidos municipales, etc.), carbón, gas, aserrín	Aprobación: ASTM D7566 (2015). Corresponde a una variación del proceso FT en el que se obtiene un sintético que contiene aromáticos.
Ésteres y ácidos grasos hidroprocesados	HEFA	50	Aceites vegetales: palma, carmelina, jatrofa, aceite usado de cocina	Aprobado: ASTM D7566 (2011). La materia prima lipídica, como aceites de plantas o algas, grasa animal o grasa residual, como el aceite usado de cocina, se desoxigena e hidroprocesa para producir un componente de mezcla de hidrocarburos puros.
Azúcares directos a hidrocarburos produciendo isoparafinas sintéticas	SIP	10	Caña de azúcar, remolacha azucarera	Aprobación: ASTM D7566 (2014). Utiliza un proceso de fermentación para convertir un azúcar en una molécula de hidrocarburo que puede mezclarse con el combustible de aviación convencional.
Alcohol a jet	ATJ	50	Caña de azúcar, remolacha	Aprobación: ASTM D7566 (2016). Emplea desoxigenación, oligomerización e

Tecnología	Sigla	% mezcla máx.	Materias primas	Descripción
			azucarera, aserrín, residuos lignocelulósicos (paja)	hidroprocesamiento para convertir la materia prima alcohólica en componente puro de mezcla de hidrocarburo.
Hidrotermólisis catalítica *jet fuel* o licuefacción hidrotermal	CHJ	50	Aceites residuales o energéticos	Aprobación: ASTM D7566 (2020). El aceite con los ácidos grasos limpios y libres (FFA) se combina con agua pretratada para luego ingresar al reactor CH, allí bajo altas temperaturas y presiones se forma una sola fase de FFA y agua supercrítica en la que los FFA se craquean, isomerizan y son ciclizados en parafinas, isoparafinas cicloparafinas y compuestos aromáticos.
Hidrocarburo hidroprocesado	HH-SPK o HC-HEFA	10	Aceite producido de algas (*Botryococcus braunii*)	Aprobación: ASTM D7566 (2020). Añadido como una alternativa a la producción de *jet fuel*. Describe el hidroprocesamiento de hidrocarburos bioderivados (a diferencia de los ácidos grasos o los ésteres de ácidos grasos que se encuentran en la producción de HEFA) que se obtiene a partir de aceites encontrados en algas específicas (*Botryococcus braunii*).

Adaptado de: (IATA, 2023)

Dentro de los beneficios de usar SAF, se encuentran la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), el fortalecimiento de las comunidades agrícolas con nuevas actividades o productos a desarrollar, la optimización del rendimiento de las aeronaves y la generación de empleo (U. S. Department of Energy, 2023).

2.3 Especificaciones técnicas de los biocombustibles

2.3.1 Biodiésel

La norma ASTM D6751-23a describe los estándares para seis grados de biodiésel B100 para uso como componente de mezclas con destilados medios. Se describen los grados en la tabla 8 y sus especificaciones en la tabla 9.

Tabla 8. Descripción de los grados de biodiésel B100

Grado	Descripción
Grado 1-B S15-A	Ideal para aplicaciones sensibles a la presencia de glicéridos parcialmente reactivos, incluyendo aquellas con requerimiento de baja temperatura de operación. Requiere una composición en mezcla de azufre de 15 ppm máximo.
Grado 1-B S15-LM-A	Ideal para aplicaciones sensibles a la presencia de glicéridos parcialmente reactivos, incluyendo aquellas con requerimiento de baja temperatura de operación. Requiere una composición en mezcla de azufre de 15 ppm máximo y de sodio, potasio, calcio y magnesio de 4 ppm máximo. LM indica *low metal* o bajo en metales, ideal para aplicación en motores diésel.
Grado 1-B S500-A	Ideal para aplicaciones sensibles a la presencia de glicéridos parcialmente reactivos, incluyendo aquellos con requerimiento de baja temperatura de operación. Requiere una composición en mezcla de azufre de 500 ppm máximo.
Grado 2-B S15-A	Requiere una composición en mezcla de azufre de 15 ppm máximo.
Grado 2-B S15-LM	Requiere una composición en mezcla de azufre de 15 ppm máximo y de sodio, potasio, calcio y magnesio de 4 ppm máximo. LM indica *low metal* o bajo en metales, ideal para aplicación en motores diésel.
Grado 2-B S500-A	Requiere una composición en mezcla de azufre de 500 ppm máximo.

Tomado de: (ASTM, n.d.-a)

Tabla 9. Especificaciones estándar para el combustible biodiésel mezcla B100 para destilados medios

Propiedad	Unidad	Grado 1-B S15, S15 LM	Grado 1-B S500	Grado 2-B S15, S15 LM	Grado 2-B S500	Método	Norma / Referencia
Azufre, máx.	ppm	15	500	15	500	D5453	ASTM D6751-23a, (ASTM, 2023)
Filtrabilidad en frío, máx.	segundos	200	200	360	360	D7501	ASTM D6751-23a, (ASTM, 2023)
Contenido de monoglicéridos (masa), máx.	%	0,4	0,4	—	—	D6584	ASTM D6751-23a, (ASTM, 2023)
Metales (Ca, Mg combinados), máx.	ppm (ug/g)	5	5	5	5	EN 14538	ASTM D6751-23a, (ASTM, 2023)
Metales (Na, K combinados), máx.	ppm (ug/g)	5	5	5	5	EN 14538	ASTM D6751-23a, (ASTM, 2023)

Propiedad	Unidad	Grado 1-B S15, S15 LM	Grado 1-B S500	Grado 2-B S15, S15 LM	Grado 2-B S500	Método	Norma / Referencia
Metales (Na, K, Ca, Mg combinados), máx.	ppm (ug/g)	4	—	4	—	EN 14538	ASTM D6751-23a, (ASTM, 2023)
Punto de inflamación, mín.	°C	93	93	93	93	D93	ASTM D6751-23a, (ASTM, 2023)
Control de alcohol - Contenido de metanol (masa), máx.	%	0,2	0,2	0,2	0,2	EN 14110	ASTM D6751-23a, (ASTM, 2023)
Control de alcohol - Punto de inflamación, mín.	°C	130	130	130	130	D93	ASTM D6751-23a, (ASTM, 2023)
Agua y sedimento (vol), máx.	%	0,05	0,05	0,05	0,05	D2709	ASTM D6751-23a, (ASTM, 2023)
Viscosidad cinemática (40 °C)	mm^2/s	1,9-6,0	1,9-6,0	1,9-6,0	1,9-6,0	D445	ASTM D6751-23a, (ASTM, 2023)
Ceniza sulfatada (masa), máx.	%	0,02	0,02	0,02	0,02	D874	ASTM D6751-23a, (ASTM, 2023)
Corrosión de lámina de cobre, máx.	—	n.º 3	n.º 3	n.º 3	n.º 3	D130	ASTM D6751-23a, (ASTM, 2023)
Número de cetano	—	45	45	45	45	D613	ASTM D6751-23a, (ASTM, 2023)
Punto de enturbiamiento (nube)	°C	Reporte	Reporte	Reporte	Reporte	D2500	ASTM D6751-23a, (ASTM, 2023)
Carbono residual (masa), máx.	%	0,05	0,05	0,05	0,05	D4530	ASTM D6751-23a, (ASTM, 2023)
Índice de acidez, máx.	mg KOH/g	0,5	0,5	0,5	0,5	D664	ASTM D6751-23a,

Propiedad	Unidad	Grado 1-B S15, S15 LM	Grado 1-B S500	Grado 2-B S15, S15 LM	Grado 2-B S500	Método	Norma / Referencia
							(ASTM, 2023)
Glicerina libre (masa), máx.	%	0,02	0,02	0,02	0,02	D6584	ASTM D6751-23a, (ASTM, 2023)
Glicerina total (masa), máx.	%	0,21	0,21	0,21	0,21	D6584	ASTM D6751-23a, (ASTM, 2023)
Contenido de P (masa), máx.	%	0,001	0,001	0,001	0,001	D4951	ASTM D6751-23a, (ASTM, 2023)
Temperatura de destilación, máx.	°C	360	360	360	360	D1160	ASTM D6751-23a, (ASTM, 2023)
Estabilidad de oxidación, mín.	h	3	3	3	3	EN 15751	ASTM D6751-23a, (ASTM, 2023)

En el trabajo de Giraldo y otros, se resume el estándar tenido en cuenta en Brasil de acuerdo con la Asociación Brasilera de Normas Técnicas, en comparación con el estándar americano (ASTM) y europeo para el biodiésel B100 (tabla 10).

Tabla 10. Características para B100 norma brasilera (ABNT NBR) *vs.* norma americana (ASTM), europea/internacional (EN/ISO)

Característica	Unidad	Límite	ABNT NBR	ASTM D	EN/ISO
Densidad específica	kg/m^3	850-900	7148, 14065	1298, 4052	3675, 12185
Viscosidad cinemática	mm^2/s	3,0-6,0	10441	445	3104
Contenido de agua máx.	mg/kg	500	—	6304	12937
Punto de inflamación (mín.)	°C	100	14598	93	3879
Contenido de éster (mín.)	% masa	96,5	13542	—	14103
Carbono residual	% masa	0,05	—	4530	—
Cenizas	% masa	0,02	8294	874	3987

Característica	Unidad	Límite	ABNT NBR	ASTM D	EN/ISO
sulfatadas (máx.)					
Azufre total	mg/kg	50	—	5453	20846, 20884
Na + K (máx.)	mg/kg	5	15554, 15553, 15555	—	14108, 14109, 14538
Ca + Mg (máx.)	mg/kg	5	15558, 15553	—	14538
P (máx.)	mg/kg	10	15556, 15553	4951	14107
Número cetano	—	—	—	613, 6890	5165
Glicerina total (máx.)	% masa	0,26	15344	6584	14105

Tomado de: (Giraldo Zuniga et al., 2011)

El Comité Europeo de Estandarización establece la norma técnica EN 14214 para el FAME, el tipo más común de biodiésel, que es homónimo al estándar americano ASTM D6751 (tabla 11).

Tabla 11. Especificaciones técnicas para biodiésel FAME según estándar europeo (EN 14214)

Propiedad	Unidad	Límite inferior	Límite superior	Método de ensayo
Contenido de ésteres	% (m/m)	96,5	—	EN 14103
Densidad a 15°C	kg/m³	860	900	EN ISO 3675 / EN ISO 12185 / EN12185
Viscosidad a 40°C	mm²/s	3,5	5,0	EN ISO 3104 / EN 14105
Punto de inflamación	°C	> 101	—	EN ISO 2719 / EN ISO 3679.
Contenido de sulfuro	mg/kg	—	10	EN ISO 20846 / EN ISO 20884.
Número cetano	—	51	—	EN ISO 5165
Contenido de cenizas sulfatadas	% (m/m)	—	0,02	ISO 3987
Contenido de agua	mg/kg	—	500	EN ISO 12937
Contaminación total	mg/kg	—	24	EN 12662
Estabilidad de oxidación, 110°C	hora	8	—	EN 14112
Índice de acidez	mg KOH/g	—	0,5	EN 14104
Índice de yodo	—	—	120	EN 14111
Metil éster acido linoleico	% (m/m)	—	12	EN 14103
Metil éster polinsaturado (>= 4 doble enlace)	% (m/m)	—	1	EN 14103
Contenido de metanol	% (m/m)	—	0,2	EN 14110
Contenido monoglicérido	% (m/m)	—	0,7	EN 14105
Contenido diglicérido	% (m/m)	—	0,2	EN 14105
Contenido triglicérido	%	—	0,2	EN 14105

Propiedad	Unidad	Límite inferior	Límite superior	Método de ensayo
	(m/m)			
Glicerina libre	% (m/m)	—	0,02	EN 14105 / EN 14106
Glicerina total	% (m/m)	—	0,25	EN 14105
(Na+K)	mg/kg	—	5	EN 14108 / EN 14109 / EN 14538
(Ca+Mg)	mg/kg	—	5	EN 14538
P	mg/kg	—	4	EN 14107

2.3.2 Bioetanol

La norma ASTM D4806-21a muestra las especificaciones para el etanol desnaturalizado nominalmente anhidro, destinado a mezclarse con gasolina sin o con plomo (1-15 % vol.), en motores de encendido por chispa de automoción (Tabla 12).

Tabla 12. Especificaciones estándar del combustible desnaturalizado etanol para mezclas con gasolina para uso como combustible para motores de encendido por chispa de automoción (ASTM D4806-21a)

Propiedad	Unidad	Bioetanol	Método	Referencia
Etanol (vol.), mín.	%	92,1	D5501	(ASTM, 2021)
Metanol (vol.), máx.	%	0,5	D5501	(ASTM, 2021)
Contenido de goma lavada con disolvente, máx.	mg/100 mL	5	D381	(ASTM, 2021)
Agua (vol.), máx.	%	1	D7923, E203 o E1064	(ASTM, 2021)
Cloruro inorgánico, máx.	mg/kg	6,7	D7319 o D7328	(ASTM, 2021)
Cobre, máx.	mg/kg	0,1	D1688	(ASTM, 2021)
Acidez (como ácido acético CH_3COOH), máx.	mg/kg	70	D7795	(ASTM, 2021)
pH	—	6,5-9,0	D6423	(ASTM, 2021)
Azufre, máx.	mg/kg	30	D2622, D3120, D5453 o D7039	(ASTM, 2021)
Sulfato existente, máx.	mg/kg	4	D7318, D7319 o D7328	(ASTM, 2021)
Densidad, máx.	kg/L	0,7915	D1298, D4052	(ASTM, 2021; Department of Energy & Republic of Philippines, 2013; Devi

Propiedad	Unidad	Bioetanol	Método	Referencia
				et al., 2021; Toor et al., 2020)
Punto de ebullición	°C	78,3		(Devi et al., 2021; Toor et al., 2020)
Punto de inflamación	°C	13,5		(Devi et al., 2021; Toor et al., 2020)
Temperatura de autoignición	°C	423		(Devi et al., 2021)
Valor calorífico	kJ/kg MJ/L	29700 23		(Devi et al., 2021; Toor et al., 2020)
Número de cetano	NA	5-8		(Devi et al., 2021; Toor et al., 2020)
Número de octanaje de investigación	NA	107-111		(Devi et al., 2021)
Número de octanaje motor	NA	94		(Devi et al., 2021)

El estándar europeo EN 15376 establece los requisitos y métodos de ensayo para bioetanol como combustible de automoción para vehículos con motor de gasolina, de conformidad con los requisitos de la norma EN 228, con máximo porcentaje en mezcla del 5 %. La tabla 13 resume sus características.

Tabla 13. Especificaciones técnicas para bioetanol según estándar europeo (EN 15376)

Propiedad	Unidad	Límite mínimo	Límite máximo	Método de ensayo
Contenido de etanol + alcoholes saturados superiores	% masa	98,7	—	EC/2870/2000 – Método I, Apéndice II, Método B
Contenido de monoalcoholes saturados mayores (C3-C5)	% masa	—	2,0	EC/2870/2000 – Método III
Contenido de metanol	% masa	—	1,0	EC/2870/2000 – Método III
Contenido de agua	% masa	—	0,3	EN 15489
Contenido de cloruro inorgánico	mg/l	—	20,0	EN 15484 EN 15492
Contenido de cobre	mg/kg	—	0,1	EN 15488
Acidez total	% masa	—	0,007	EN 15491
P	mg/l	—	0,5	EN 15487
Contenido materia involatil	mg/ml	—	10	EC/2870/2000 – Método II
Contenido de azufre	mg/kg	—	10	EN 15485 EN 15486

Para Brasil, también existe una especiación para el uso de bioetanol como biocombustible que se resume en la tabla 14, en comparación con la norma americana (Noel et al., 2014).

Tabla 14. Especificaciones técnicas para bioetanol en Brasil (ABNT/NBR)

Característica	Unidad	Método		Especificación
		ASTM	ABNT/NBR	
Acidez total	mg/L	D 1613	9866	30 máx.
Conductividad eléctrica	us/m	D 1125	10547	500 máx.
Masa específica a 20 °C	kg/m^3	D4052	5992	791,5 máx.
Grado alcohólico	INPM	—	5992	99,3 máx.
Grado de hidrocarburos	% vol.	D 512	13993	3 máx.
Ion cloruro	mg/kg	D 5501	10894/10895	1,1
Grado de etanol	% vol.	—	—	99,3 mín.
Contenido de agua, máximo*	% vol.	E1064	-	0.5
Ion sulfato	mg/kg	—	10894/12120	4,3 máx.
Hierro	mg/kg	—	113331	5,5 máx.
Sodio	mg/kg	—	10422	2,2 máx.
Cobre	mg/kg	—	10893	0,07 máx.

Se incluye parámetro, especificaciones tomadas de resolución 0789 MME, parámetros y requisitos de calidad del etanol anhidro combustible y etanol anhidro combustible desnaturalizado utilizado como componente oxigenante de gasolinas.

2.3.3 HVO o diésel verde

Químicamente el diésel verde o también llamado *renewable diesel*, *green diesel* o *hidrotreated vegetable oil* (HVO) es un biocombustible que tiene las mismas características que el diésel de petróleo, pero que ha sido producido a partir de aceites vegetales y/o grasas animales.

El trabajo de Roque et al. (2023) muestra las metodologías y valores de propiedades fisicoquímicas del diésel verde o HVO en comparación al diésel de petróleo (véase tabla 15).

Tabla 15. Propiedades para diésel verde en comparación con diésel convencional y la normativa que rige cada método

Biocombustible	Unidad	Diésel	HVO o diésel verde	Norma
Fórmula molecular aproximada	—	C14.22H26.24O0.19	C14H30	—
H/C relación	—	1,84	2,14	Calculado
C	% másico	85,33	84,6	ASTM D5191
H	% másico	13,12	15,39	ASTM D5191
O	% másico	1,55	0	ASTM D5191
S	% másico	0,001	0	ISO 20884
Viscosidad cinemática	mm^2/s	2,88	2,82	ASTM D445
Densidad	kg/m^3	846,6	780	ASTM D4052
LHV	MJ/kg	41,03	44,1	ASTM D240
Número cetano	—	50,5	76,3	ASTM D613
País	Brasil			

2.3.4 Biogás

La ISO 20675:2018 define y describe términos y clasificaciones relacionadas con la producción de biogás mediante digestión anaeróbica, gasificación a partir de biomasa y energía a gas a partir de fuentes de biomasa, acondicionamiento de biogás, mejora y utilización de biogás con una perspectiva de seguridad, medio ambiente, rendimiento y funcionalidad durante el diseño.

En India, se emplea el estándar IS 16087:2013 para especificar los requerimientos para el biometano (tabla 16).

Tabla 16. Especificaciones de biometano en India según IS 16087:2013

Característica	Requerimiento	Método de ensayo
CH_4, %, mín.	90	IS 15130
Humedad, mg/m^3, máx.	16	IS 15641
H_2S, mg/m^3, máx.	30,3	ISO 6326-3
$CO_2+N_2+O_2$, %, máx.	10	IS 15130
CO_2, %, máx.	4	IS 15130
O_2, %, máx.	0,5	IS 15130

Adaptado de: (Indian Standards, 2013; Van Der Veen, 2018)

En España, se encuentra el estándar UNE-EN 16723-2:2018 (tabla 17), con las especificaciones del combustible de automoción para gas natural y biometano en transporte y biometano en la inyección en la red de gas natural.

Tabla 17. Requisitos para biometano acorde con UNE-EN 16723-2:2018

Parámetro	EN 16723-1	EN 16723-2
Silicona	≤ 0,3-1 mg/m^3	≤ 0,5 mg/m^3
Fracción de hidrógeno	EN 16726	≤ 2%
Punto de rocío de hidrocarburos	EN 16726	≤ –2 °C
Fracción de oxígeno	EN 16726	≤ 1%
Contenido de azufre	≤ 20 mg/m^3	≤ 5 mg/m^3
Número de metano	EN 16726	≤ 65-80
Impurezas en polvo	—	≤ 10 mg/L
Contenido de aminas	≤ 10 mg/m^3	≤ 10 mg/m^3
Punto de rocío de agua	EN 16726	≤ –10 °C Clase A
Fracción CO	≤ 0,1%	—
Concentración amoniaco	≤ 10 mg/m^3	—

Adaptado de: (ASTM, n.d.-c; Van Der Veen, 2018)

Por otro lado, la ASTM D8080-21 define los requerimientos mínimos de calidad para los combustibles gaseosos compuestos principalmente por metano para ser usados en motores de combustión interna en vehículos (gas natural comprimido [CNG], gas natural licuado [LNG] o biogás) (ASTM, n.d.-c; IATA, 2023).

2.3.5 Combustibles sostenibles de aviación (SAF)

Teniendo en cuenta que el combustible para las aeronaves puede abastecerse en diferentes países, se han adoptado especificaciones internacionales para los *jets fuels*, las más comunes son la ASTM D1655 (estándar americano) y el DEF STAN 91-91 (estándar de defensa en el Reino Unido). La norma que regula la certificación técnica de los SAF es la ASTM D7566 (IATA, 2023).

Los SAF se producen en las biorrefinerías y pueden mezclarse hasta el límite máximo de mezcla certificado. Una vez liberada la mezcla, se puede certificar bajo la ASTM D1655 y a partir de ese momento se considera Jet A o Jet A1

convencional (EIA, n.d.; IATA, 2023). En la figura 10 se muestra el esquema a seguir.

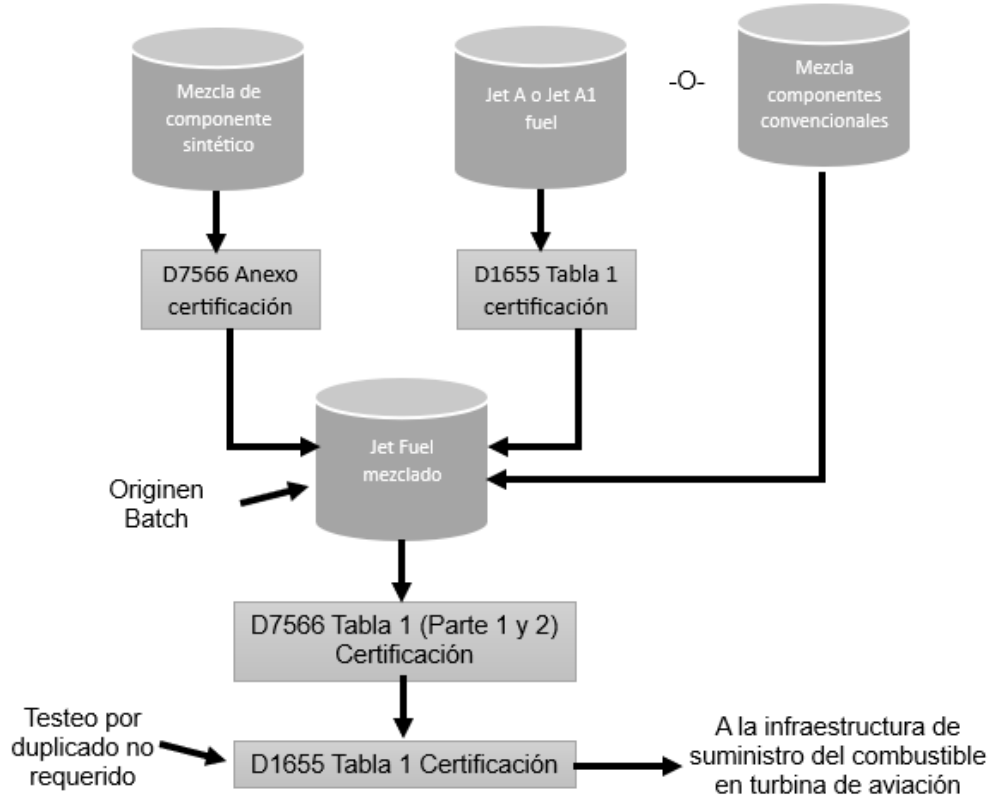


Figura 10. Esquema de certificación para usar los SAF en mezcla con combustibles convencionales

Adaptado de: (ASTM, n.d.-a)

En la tabla 18 se muestran los requerimientos detallados para los combustibles de turbinas de aviación que contienen hidrocarburos sintetizados, acorde con lo reportado en la ASTM D7566-22a.

Tabla 18. Especificaciones para los combustibles de turbina de aviación con hidrocarburos sintetizados según ASTM D7566-22a

Propiedad		Jet A o Jet A1	Método de ensayo
PARTE 1 – REQUERIMIENTOS BÁSICOS			
COMPOSICIÓN			
Acidez total, máx.	Mg KOH/g	0,1	D3242/IP 354
Aromáticos: Uno de los requerimientos debe ser conocido			
1. Aromáticos, máx.	% vol.	25	D1319, IP 156, D8305

Propiedad		Jet A o Jet A1	Método de ensayo
2. Aromáticos, máx.	% vol.	26,5	D6379, IP 436
Azufre mercaptano, máx.	% másico	0,003	D3227, IP 342
Azufre total, máx.	% másico	0,30	D1266, D2622, D4294, D5453, IP 336
VOLATILIDAD			
Temperatura de destilación	°C		D86, D2887/IP 406, D7344, D7345, IP 123
10 % recuperado, T10, máx.	°C	205	
50 % recuperado, T50, máx.	°C	Reportar	
90 % recuperado, T90, máx.	°C	Reportar	
Punto de ebullición final, máx.	°C	300	D56, D3828, D7236, IP 170, IP 523, IP 534
Densidad a 15 °C	kg/m^3	775-840	D1298, IP 160, D4052, IP 365
FLUIDEZ			
Punto de congelación, máx.	°C	–40 Jet A –47 Jet A1	D5972, IP435, D7153, IP 529, D7154, IP 528, D2386, IP 16
Viscosidad –20 °C, máx.	mm^2/s^k	8,0	D445, IP 71, D7042, D7945
COMBUSTIÓN			
Calor neto de combustión, mín.	MJ/kg	42,8	D4529, D3338, D4809, IP 12
CORROSIÓN			
Lámina de cobre, máx.		n.º 1	D130, IP154
PARTE 2 – REQUERIMIENTOS EXTENDIDOS			
COMPOSICIÓN			
Aromáticos, mín.	% vol.	8-8,4	D1319, IP 156, D8305, D6379, IP436
LUBRICIDAD			
Lubricidad, máx.	mm	0,85	D5001

Adaptado de: (ASTM, 2022). Para más información y detalle puede consultar: ASTM D1655-23a. (ASTM, 2023a)

La norma ASTM D7566-22a contiene además de los requerimientos descritos en la tabla 18, los requerimientos detallados para los aditivos en combustibles de turbina de aviación y los requerimientos en procesamiento Batch para los combustibles SAF, obtenidos por cada una de las tecnologías aprobadas descritas en la tabla 7.

2.4 Porcentajes de mezclas

El biodiésel está aprobado para mezclarse con diésel de petróleo o destilado de petróleo de acuerdo con *The American Society for Testing and Meterials Specifications* ASTM D6751 (EIA, n.d.; Ethanol Fuel Basics, 2023).

La norma ASTM internacional desarrolla especificaciones para el diésel convencional (ASTM D975), la cual permite concentraciones de hasta el 5 % (B5), en las que el combustible aún se denomina como "*diésel fuel*". Es decir, que esta norma es aplicable a mezclas de biodiésel de bajo nivel (< 5 %), cuyo uso es aprobado para cualquier motor de encendido por compresión, diseñado para funcionar con diésel de petróleo (coches, camiones diésel ligeros y pesados, tractores, barcos y generadores eléctricos) (U.S. Department of Energy, 2023).

De otro lado, el bioetanol al mezclarse usualmente con la gasolina acelera su proceso de combustión, mejorando el rendimiento del motor y reduciendo las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI).

La tabla 19 resume una descripción de los biocombustibles más comunes en el mundo.

Tabla 19. Descripción de biocombustibles

Mezcla	Tipo	Descripción	Referencia
B100	Biodiésel	Biodiésel puro obtenido a partir de biomasa, aceites vegetales, grasa animal, aceite usado de cocina y algas.	(Targray, 2023)
B5	Biodiésel	Mezcla con 5 % de biodiésel, 95 % de diésel. Es la mezcla más común en Estados Unidos cuyo uso es mandatorio en algunos estados.	(Targray, 2023)
B7	Biodiésel	Mezcla con 7 % de biodiésel. También se rige por la ASTM D7467, su uso es mandatorio en Alemania (uso vial) y Malasia (uso industrial).	(Targray, 2023)
B10	Biodiésel	Mezcla con 10 % de biodiésel. Común al sureste de Asia, principalmente por políticas en Tailandia y Malasia.	(Targray, 2023)
B20	Biodiésel	Mezcla de alto nivel de biodiésel (20 %), cuyo uso es permitido en la mayoría de los carros y camiones diésel en Estados Unidos.	(Targray, 2023)
B99	Biodiésel	Mezcla de alto nivel de biodiésel con entre 0,1 y 1% de diésel, este tipo de mezcla es mucho más distribuida en Estados Unidos que el B100.	(Targray, 2023)
E10	Bioetanol	Mezcla que contiene 10 % de bioetanol y 90 % de gasolina. Esta es la mezcla de biocombustible más común en Estados Unidos.	(Targray, 2023)
E15	Bioetanol	Mezcla que contiene 15 % de bioetanol. La Agencia de Protección Ambiental aprobó el uso de E15 para vehículos modelo 2001 y más modernos.	(Targray, 2023)
E85	Bioetanol	Es una mezcla de alto nivel que contiene entre el 51 y 83 % de bioetanol. Es usada solo en vehículos FFV (vehículos de uso flexible de combustibles).	(Targray, 2023)

En la tabla 20 se describen los porcentajes de mezcla para los países seleccionados en este documento.

Tabla 20. Porcentajes de mezcla por países para los biocombustibles

País	% biodiésel	% bioetanol
Estados Unidos	5-20	10
Francia	8	8,6
India	5	20
Argentina	10	12
Brasil	11	27

Dependiendo de la región, la disponibilidad de las materias primas, instalaciones, capacidades técnicas y tecnológicas, y la legislación, cada país tiene niveles de mezcla mandatorios en la producción de biocombustibles. Algunos niveles de mezcla mandatorios, para los países seleccionados, se resumen en la tabla 21.

Tabla 21. Mandatos para mezclas de biocombustibles por país.

PAÍS	% BIODIÉSEL	% BIOETANOL	MANDATORIO	LEY O POLÍTICA
Estados Unidos	5-20	10,5	Sí	Política energética
Brasil	11-12	18-27	Sí	Ley 13576 de 2017
Argentina	5-10	6-12	Sí	Ley 27640 de 2021
Francia	8	8,60	Sí	Política de transición energética
India	5	10-20	Sí	Política Nacional de Biocombustibles

En el *Atlas de los biocombustibles* se encuentran mandatos para otros países, entre ellos (IICA et al., n.d.):

Tabla 22. Mandatos de mezcla de Bioetanol y Biodiésel para otros países no incluidos en el presente estudio.

País	%Bioetanol	Biodiésel
Alemania	5,29	8,0
Bélgica	6,5	6,5
Canadá	5,0	2,0
China	1,9	0,2
Dinamarca	7,6	7,6
España	9,6	9,6
Finlandia	21	21
Indonesia	0	30
Irlanda	12,36	12,36

Japón	1,8	0
Noruega	24,5	24,5
Países Bajos	17,5	17,5
Paraguay	25	4
Reino Unido	10,67	10,67
Suecia	6,34	29,79
Tailandia	10	10

De la información anterior, se resalta que países nórdicos, como Dinamarca, Finlandia, Noruega y Suecia, junto con Irlanda, Países Bajos y Reino Unido, tienen mandatos de mezcla para biodiésel y bioetanol superiores al 10 %. Brasil, Paraguay y Finlandia tienen los mayores porcentajes de mezcla para bioetanol (24-27 %) e Indonesia, Suecia, Noruega y Finlandia poseen los mayores mandatos de mezcla con biodiésel (21-30 %). Llama la atención que países desarrollados como China y Japón tienen unos mandatos de mezcla inferiores al 2 %.

Las proporciones de mezcla de los biocombustibles en los combustibles fósiles influencia directamente el potencial de reducción de emisiones de estos. Si se emplean en su forma pura pueden reducir hasta el 100 % de las emisiones en comparación con sus homólogos derivados del petróleo. En mezcla, el potencial de reducción de emisiones puede ser de hasta el 90 %, dependiendo del tipo de biocombustible, su precursor y tecnología y condiciones de obtención.

2.5 Emisiones de gases efecto invernadero (GEI)

A continuación, se expone un resumen de los últimos reportes de los informes bienales de actualización con la información oficial más reciente presentada ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC). También se incluye un resumen de los potenciales de reducción de emisiones de algunos biocombustibles en el mundo. Se resalta la información correspondiente a los países seleccionados en este estudio.

2.5.1 Estatus de emisiones de gases de efecto invernadero por país y por sectores IPCC

En la Tabla 23, se observa el resumen de las emisiones netas y por sectores según el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) en los países seleccionados. Respecto de las primeras, Estados Unidos, India y Brasil tienen la mayor participación en el conjunto seleccionado. Pero a nivel mundial, los países con mayor impacto en las emisiones de gases efecto invernadero son China (12,9 millones de Gg CO_2eq), Estados Unidos (5,2 millones de Gg de CO_2eq) e India (2,5 millones de Gg de CO_2eq) (Bank, 2020). Sobre los segundos, los sectores principales a los cuales se hace referencia son: (i) energía, (ii) agricultura, silvicultura y otros usos de la tierra (AFOLU), (iii) procesos industriales y uso de productos (IPPU) y (iv) desechos o residuos.

Tabla 23. Emisiones de gases efecto invernadero por país y por sectores IPCC en el último año de estimación de la serie temporal de los informes bienales de actualización

País	Último reporte de actualización de INGEI	Periodo	Emisiones netas (Gg CO_2eq)	Emisiones sector Energía (Gg CO_2eq)	Emisiones sector AFOLU (Gg CO_2eq)	Emisiones sector IPPU (Gg CO_2eq)	Emisiones sector Residuos (Gg CO_2eq)	Referencia
Estados Unidos	NC 8 BUR 5 (2022)	1990-2020	5.222.400	4.854.700	–164.200	376.000	156.000	(U.S Government, 2022)
Francia	BUR 5 (2023)	1990-2020	384.792	270.511	56.025	40.284	17.972	(Ministerio de la transición energética, 2023)
India	BUR 3 (2021)	1994-2016	2.531.068	2.129.428	100.001	226.407	75.232	(Ministry of Environment & Government of India, 2021)
Brasil	BUR 4 (2020)	1990-2016	1.400.960	425.719	801.398	91.229	82.613	(Ministry of Foreign Affairs & Ministry of Science, 2020)
Argentina	BUR 4 (2021)	1990-2018	365.889	185.492	143.195	20.769	16.431	(Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de

País	Último reporte de actualización de INGEI	Periodo	Emisiones netas (Gg CO_2eq)	Emisiones sector Energía (Gg CO_2eq)	Emisiones sector AFOLU (Gg CO_2eq)	Emisiones sector IPPU (Gg CO_2eq)	Emisiones sector Residuos (Gg CO_2eq)	Referencia
								Argentina, 2021)

2.5.2 Potencial de reducción de emisiones de los biocombustibles

El impacto en la generación de emisiones, durante todo el ciclo de vida de obtención de biocombustibles (desde el cultivo y la extracción de materiales hasta la fabricación, distribución, comercialización, uso y destino final), juega un papel importante a la hora de decidir el tipo de biocombustible a obtener, a partir de qué material, con qué proceso productivo y el uso específico.

Los biocombustibles generan menores emisiones promedio de CO_2 por MJ de combustible consumido contemplando su ciclo de vida (desde la generación de la materia prima, su transporte, transformación). En la tabla 24 se resumen los valores de emisión promedio por tipo de bicombustible consumido en comparación con la nafta y el gasoil, en ella se observa que la emisión de combustibles líquidos fósiles se reduce aproximadamente un 70 % con el uso de biocombustibles:

Tabla 24. Generación de emisiones por MJ de combustible consumido

Combustible	Emisión promedio (g CO_2/MJ)
Biocombustibles	
Biodiésel	25,07
Bioetanol de maíz	24,64
Bioetanol de caña de azúcar	25,3
Combustible Sostenible de Aviación SAF	16,8*
Combustibles fósiles líquidos	
Nafta	78,74
Gasoil	81,82

Adaptado de: (Bolsa de Comercio de Rosario., n.d.; Hilbert, n.d.)

*Fuente: IATA

La reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) se asocia al proceso y conversión del material inicial al biocombustible y a la proporción de este en las mezclas con combustibles fósiles. Las operaciones agrícolas, en la

producción de cultivos para obtener bioetanol de primera generación, contribuyen a la generación de emisiones. Mientras que los biocombustibles de segunda generación se asocian a los procesos de reducción al aprovechar residuos forestales o agrícolas. De igual forma, en la obtención de biocombustibles de tercera generación se absorbe CO_2 de la atmósfera, en los procesos de cultivo de algas, promoviendo la reducción de emisiones (Guimarães et al., 2023; Rahmaditio & Gardian, 2023).

Investigaciones sobre la viabilidad económica de bioetanol celulósico revelaron que éste puede lograr una reducción de emisiones de 86 %. El bioetanol, producido a partir de maíz como fuente de almidón, reduce las emisiones entre 39-52 %.

En Argentina, acorde con su capacidad de producción de biodiésel y bioetanol, estos pueden aportar a la reducción de sus emisiones entre 4,5 y 8 % (10 y 19,9 $MtCO_2eq$) al 2030 (Bolsa de Comercio de Rosario, 2021). Este combustible puede reducir un 20 % la emisión directa de partículas por el tubo de escape de vehículos y puede reducir las emisiones de CO en un 78 %.

Por otro lado, Indonesia proyecta una reducción del 29 % de sus emisiones GEI en el año 2030 en su contribución determinada a nivel nacional (NDC, por sus siglas en inglés), para ello, en el documento de implementación del Ministerio de Ambiente y Forestación, se estipula que el uso de biocombustible, y en mayor medida el biodiésel, será el mayor contribuidor a la reducción de emisiones en el sector transporte del país, puesto que la sustitución de combustibles fósiles estima una reducción de entre 20-30 millones de toneladas de CO_2eq/año, entre 2021 y 2030 (Rahmaditio & Gardian, 2023).

De igual forma, el Departamento de Energía de Estados Unidos afirma que el uso de biodiésel reduce emisiones de GEI. El B100 puede reducir más del 75 % de las emisiones comparado con el diésel de petróleo y el B20 alrededor del 15 % (U.S. Department of Energy, 2023).

En la Unión Europea, la sustitución de diésel con biodiésel y HVO pueden reducir las emisiones en aproximadamente un 40 %, contemplando los cambios indirectos en el uso de la tierra, y un 76 %, excluyendo los cambios indirectos en el

uso de la tierra. Además, la sustitución de petróleo con bioetanol o bio-ETBE puede lograr reducciones entre el 65 y 75 %, respectivamente. Y la sustitución de gas natural comprimido por biogás puede lograr reducciones entre el 78 y 80 % (European Environment Agency & European Topic Centre Climate Change Mitigation, 2022). El HVO logra reducciones importantes en monóxido de carbono (70-80 %) y en hollín (50 y 65 %), en comparación con el diésel (Bhardwaj et al., 2013).

Para el caso de los combustibles SAF, su potencial de reducción de emisiones GEI oscila entre el 65 y 85 %, en comparación con Jet A1 fuel (Bioplat, 2021; IRENA & OIT., 2022a). Según la IATA, el SAF reduce las emisiones de CO_2 en hasta el 80 %.

3. Contexto internacional del sector de los biocombustibles

En el marco de la construcción de la hoja de ruta de la transición energética justa en Colombia y en pro de cumplir la contribución determinada a nivel nacional (NDC, por sus siglas en inglés), junto con otros compromisos para contrarrestar los efectos del cambio climático, el Gobierno Nacional busca desarrollar la Hoja de Ruta de los Biocombustibles, una fuente energética con potencial para sustituir los hidrocarburos y derivados del petróleo, en diferentes usos, con capacidad para impulsar el sector manufacturero, agrícola, ambiental y social del país.

La transición energética hacia fuentes de energía menos intensivas en carbono se hace inminente, luego del recrudecimiento de la crisis energética causado por la pandemia del COVID-19 y la guerra entre Rusia y Ucrania (IEA, 2022a), que ha encarecido los precios de los combustibles convencionales y agravado problemas socioeconómicos y ambientales (IEA, 2022a; IRENA, 2023). Sin embargo, el mundo debe superar barreras en infraestructura, políticas y regulación y de creación de capacidades técnicas e institucionales para potenciar el desarrollo de los biocombustibles (IRENA & OIT, 2023).

En el año 2017, la soja, la palma y la canola se consideraban las principales materias primas para la obtención de biodiésel, cuya principal producción se daba en Indonesia, Malasia, China y Estados Unidos. Gracias a sus características, este biocombustible puede mezclarse con combustibles fósiles o usarse puro en algunos motores modificados (Souza et al., 2018).

El principal precursor de biodiésel en Estados Unidos es la soja (53 %), al igual que en Brasil (77 %) y Argentina (100 %); mientras que la canola es fuente principal en Francia (> 50 %) y Alemania (> 50 %); la palma lo es en Indonesia (100 %) y Tailandia (77 %) (Limayem & Ricke, 2012; Souza et al., 2018).

En el mundo, el 89 % de la producción de bioetanol se da en Estados Unidos (maíz) y Brasil (caña de azúcar) (Limayem & Ricke, 2012).

Estudios demuestran que las fuentes principales en la obtención de etanol son la paja de arroz, maíz y trigo y el bagazo de caña (Guimarães et al., 2023;

Limayem & Ricke, 2012; Sarkar et al., 2012). Su principal ventaja radica en que son residuos de bajo costo, renovables y de elevada disponibilidad. En Asia se obtiene mayor producción de paja de arroz y trigo; mientras que en América se obtiene mayor producción de bagazo y paja de maíz (Sarkar et al., 2012).

El establecimiento de medidas, iniciativas y políticas juegan un papel crucial en el proceso de superar la crisis energética, que en gran medida se relacionan con los objetivos climáticos globales. Dependiendo del tipo de gobierno y del país, las políticas varían, pero en muchas instancias se centran en acelerar la inversión en energías limpias, es decir, un impulso a las energías renovables en la generación de energía eléctrica, el uso en procesos industriales, transporte y calefacción (IEA, n.d.).

El informe de la Agencia Internacional de Energía (IEA, por sus siglas en inglés), titulado World Energy Outlook 2022, presenta una proyección de la demanda energética en diferentes escenarios. El primero refiere al escenario de políticas de Estado (STEPS, por sus siglas en inglés), el siguiente al de promesas anunciadas (APS, por sus siglas en inglés) con enfoque en el año 2030 y el tercer con el horizonte 2050 de cero emisiones netas (NZE, por sus siglas en inglés). Esta proyección está directamente influenciada por el elevado comportamiento de los precios y la necesidad de políticas para garantizar la seguridad energética, que ralentiza el crecimiento proyectado previamente de la demanda energética en concordancia con la reducción del crecimiento del PIB a 2030 (IEA, n.d.).

De acuerdo con la figura 11, en el escenario de políticas de Estado (STEPS), algunos sectores energéticos vuelven a tendencias anteriores; mientras que otros avanzan en sus procesos de descarbonización con energías renovables. En este escenario, se prevé un incremento anual de la energía primaria del 1 % hasta el 2030, cubierto con el uso incremental de energías renovables. En el escenario de promesas anunciadas (APS), los esfuerzos de los gobiernos, empresas y sociedad civil deben estar alineados con las metas climáticas de largo plazo. En este sentido, la demandada de energía en el escenario APS aumentará anualmente 0,2 % hasta 2030 (IEA, n.d.).

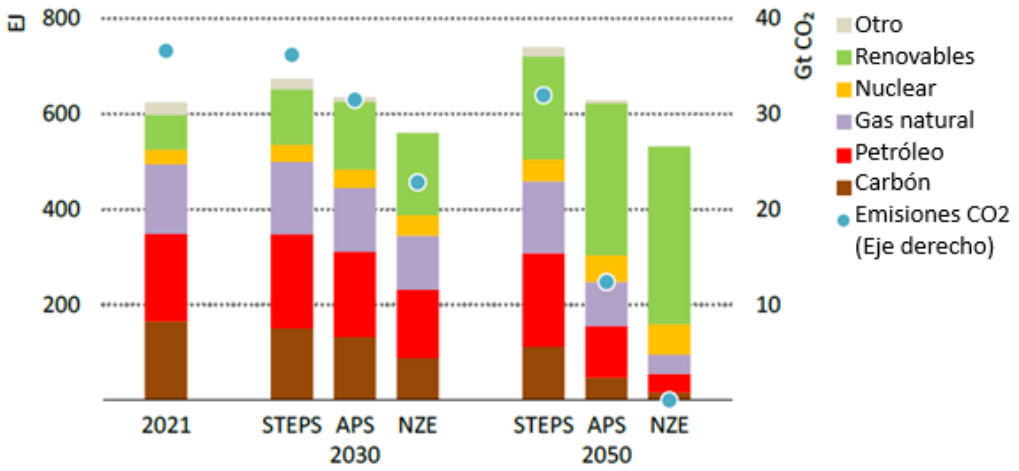


Figura 11. Suministro de energía total por combustible y emisiones de CO_2 por escenario

Nota: EJ = exajulio; Gt CO_2 = giga toneladas de dióxido de carbono; STEPS = escenario de políticas de Estado; APS = escenario de compromisos anunciados; NZE = escenario emisiones netas cero.

Tomado de: (IEA, 2022a)

Siguiendo con la figura 11, se espera una tendencia creciente de emisiones de dióxido de carbono con un pico máximo en 2025 en el escenario STEPS, para luego caer a 36 Gg CO_2 en 2030 y menos de 35 Gg CO_2 en 2050. En el escenario APS, las emisiones máximas se alcanzán antes del 2025, siendo de 32 Gg CO_2 en 2030 y menos de 15 Gg CO_2 en 2050.

En la Tabla 25. Demanda de combustibles mundial (mb/d), se observa que entre el año 2021 y 2022 la demanda de combustibles líquidos ha crecido en 6.7 miles de barriles día, la gasolina tuvo un crecimiento de 1,7 miles de barriles día y el diésel en 1,5 miles de barriles día, los biocombustibles tuvieron un crecimiento mucho menor, con un aumento de 0,2 miles de barriles día.

Tabla 25. Demanda de combustibles mundial (mb/d)

	Histórico		STEPS		APS	
	2020	**2021**	**2030**	**2050**	**2030**	**2050**
Demanda total combustibles líquidos	90,9	96,7	105,8	107,6	98,7	69,6
Biocombustibles	2,0	2,2	3,4	5,3	5,5	9,2
Combustibles a base de hidrógeno	0,0	0,0	0,0	0,2	0,2	3,2
Combustibles derivados del petróleo	88,9	94,5	102,4	102,1	93,0	57,2

	Histórico		STEPS		APS	
	2020	**2021**	**2030**	**2050**	**2030**	**2050**
GLP y etano	13,3	13,6	15,6	15,8	14,4	10,4
Gasolina	21,9	23,6	23,2	19,3	20,6	8,8
Diésel	25,0	26,5	28,2	28,2	25,0	12,6

Adaptado de: (IEA, 2022a)

En los escenarios de proyección, tomando como referencia el año 2021, para el año 2030 se espera un incremento en la demanda de combustibles de entre el 2 y 9 %; mientras que para el 2050 se espera un incremento del 11 % en escenario STEPS y una reducción del 28 % en el escenario optimista (APS).

Los escenarios de proyección contemplan un incremento en la demanda de biocombustibles, siendo entre el 55 y 150 % para el 2030 y entre el 141 y 318 % para el 2050. De igual forma, se contempla la participación moderada de combustibles derivados del hidrógeno.

De otro lado, se espera una reducción en la demanda de combustibles fósiles, potenciando el uso de combustibles menos carbono intensivos. Así, para el GLP y etano se proyecta un incremento en demanda entre el 6 y 15 % en 2030, aunque en el escenario APS se espera una reducción del 24 %. Para la gasolina, una reducción en demanda de entre el 2 y 14 % en 2030 y 18 y 63% en 2050. La demanda de diésel espera incrementarse un 6 % en el escenario STEPS y reducirse entre un 6 y 53 % en el escenario APS.

La Agencia Internacional de Energía Renovable (IRENA, por sus siglas en inglés), en su reporte World Energy Transitions Outlook 2023: 1.5 °C Pathway, enfatiza en la relación directa entre los esfuerzos mundiales para lograr la transformación del sistema energético, con estrategias como la producción y uso de energías renovables en el sector de transporte, industria y edificaciones, con la meta global de limitar el incremento de la temperatura de la tierra en 1,5 °C en el mediano (2030) y largo plazo (2050) (IRENA & OIT, 2022a).

En dicho escenario, la generación de electricidad se triplicará en el 2050 en relación al 2020 (27 PWh a 90 PWh, respectivamente), con un incremento del suministro por parte de las fuentes renovables del 28 al 91 % (véase figura 12).

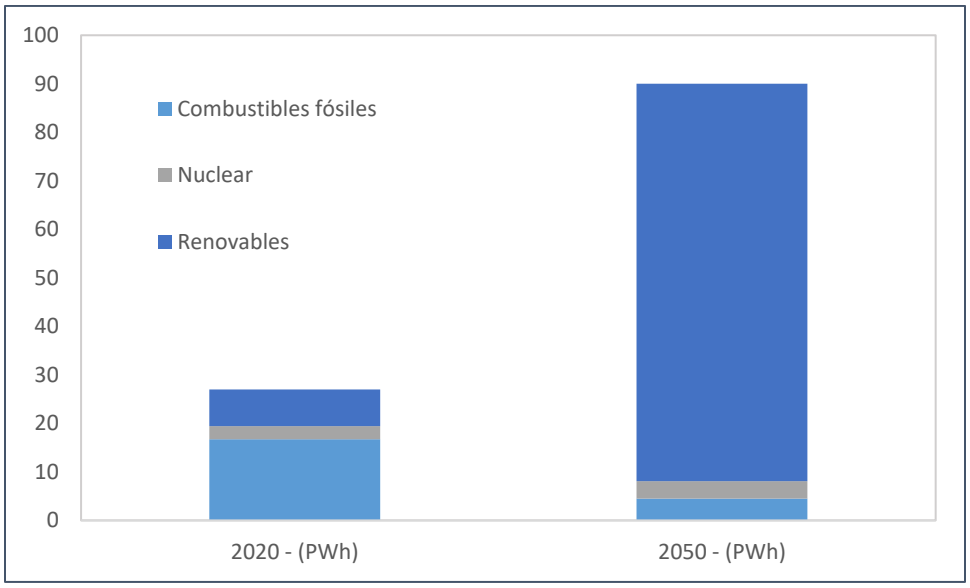


Figura 12. Producción de electricidad bruta (PWh)

Adaptado de: (IRENA, 2023)

En ese mismo sentido, IRENA proyecta el suministro y consumo de bioenergía en diferentes escenarios. En 2020, la bioenergía suplía el 9,1 % del total de la energía, dominada por el uso moderno de biomasa sólida (43 %), seguida por el uso tradicional de biomasa con fines de cocinar y calentar en países desarrollados (39 %) y, finalmente, para biogás y como materia prima de biocombustibles (18 %). Como se observa en la figura 13, en el escenario 1,5 °C, el suministro de biomasa debe incrementar a 86 EJ en 2030 y 135 EJ en 2050 (desde 56 EJ en 2020), esto incluye reducir el uso ineficiente y tradicional de biomasa en cocinar y calentar.

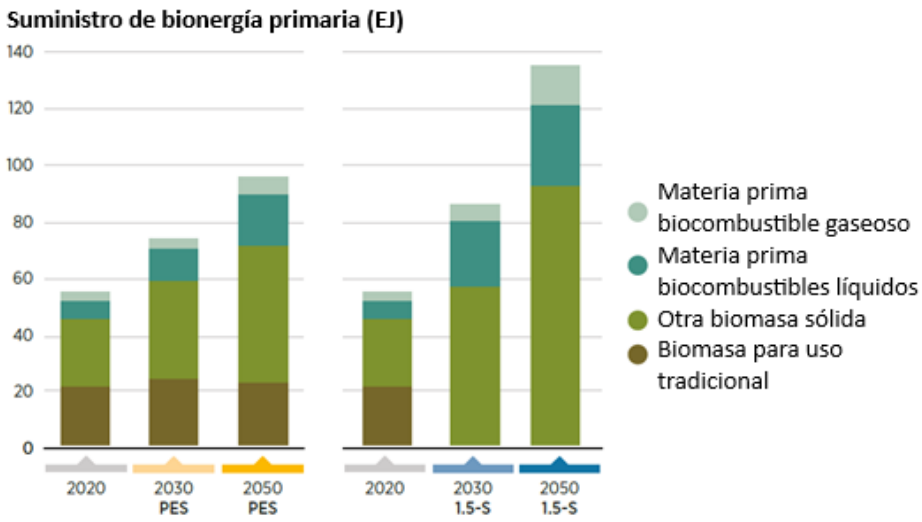


Figura 13. Suministro de bioenergía primaria en 2020, 2030 y 2050 bajo escenario PES y 1.5-S

Nota: 1.5-S = escenario 1,5 °C; EJ = exajulios; PES = escenario de planeación energética

Tomado de: (IRENA, 2023)

En 2020, la bioenergía correspondió al 11 % de la energía consumida en el mundo, distribuida en uso tradicional de la biomasa (51 %), usos modernos en industria (22 %), edificaciones (17 %), transporte (9 %) y otros consumos (1 %) (véase figura 14). Dado que el uso convencional de la biomasa acarrea en problemas de contaminación del aire y, por ende, problemas severos en la salud pública, además de la degradación forestal y generación de emisiones de gases efecto invernadero, la proyección del consumo bioenergético contempla la mitigación de su uso, potenciando en su lugar usos modernos de la biomasa en la industria y edificaciones y en transporte (por carretera, aviación y envíos).

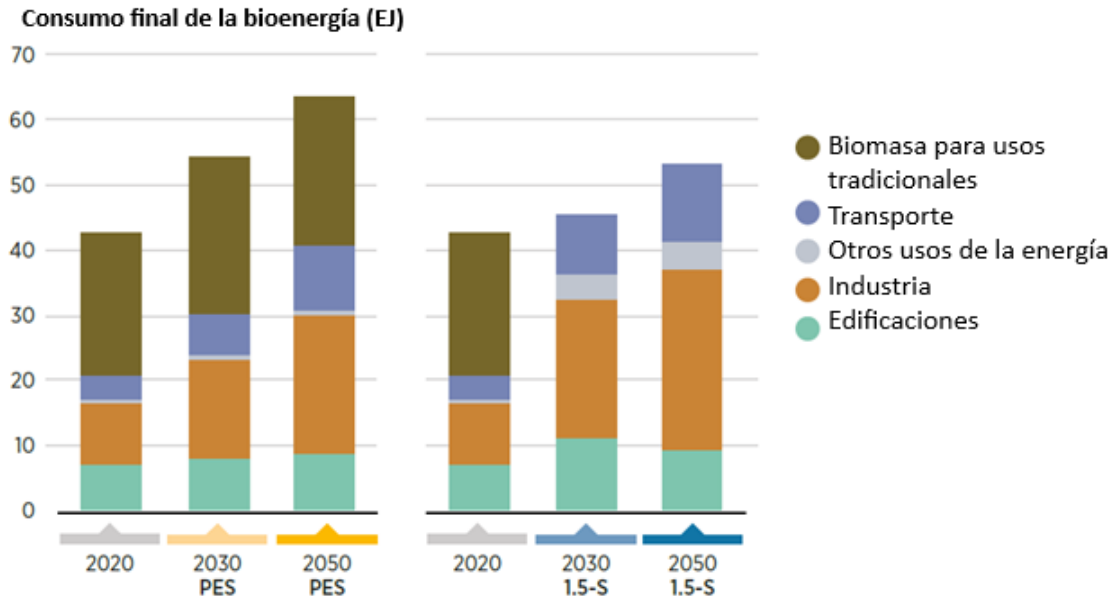


Figura 14. Consumo final de bioenergía por sector en 2020, 2030 y 2050 bajo escenario PES y 1.5-S

Nota: 1.5-S = escenario 1,5 °C; EJ = exajulios; PES = escenario de planeación energética

Tomado de: (IRENA & OIT., 2022a)

El informe de la Agencia Internacional de Energía (IEA) también proyecta el consumo energético por región y país para 2030 y 2050 (IEA, 2022a), como se muestra en la tabla 26.

Tabla 26. Consumo energético histórico y proyectado a 2030 y 2050

	Histórico			STEPS		APS	
	2010	**2020**	**2021**	**2030**	**2050**	**2030**	**2050**
Mundo	383,2	417,5	439,1	484,5	543,6	450,8	432,7
Norteamérica	76,6	73,7	77,5	78,5	75,1	73,8	57,7
Estados Unidos	63,8	61,6	65,1	64,8	60,2	60,9	46,3
América central y sur	19,2	19,3	20,4	23,3	29,1	21,9	22
Brasil	9,1	9,5	10	11,1	13,4	10,5	10,4
Europa	63,1	57,2	60	57,4	51,6	53,4	39,7
Unión Europea	45,9	3. 41,3	43,5	40,5	34	37,6	26,1
África	20,9	25,3	26,2	31,8	47,4	27,4	37
Medio Oriente	19,2	23,1	24,1	29,6	40	27,9	34,2
Eurasia	23,8	27	28,5	28,2	30,7	27,3	27,6
Rusia	19,2	22,1	23,3	22,1	22,5	21,5	21

	Histórico			STEPS		APS	
	2010	2020	2021	2030	2050	2030	2050
Asia Pacífico	145,4	179,5	188,4	215,6	241,2	199,7	191,6
China	76,3	100,2	105,7	114	111,2	107,8	91
India	19	25,8	27,5	37,3	53,8	32,2	39,6
Japón	14,2	11,8	12,1	11,1	9,3	10,5	7,3
Sudeste de Asia	16,1	19,3	19,8	26,5	34,7	24,5	27,1

Tomado de: (IEA, 2022a)

La tabla 26 permite observar que, regionalmente, Asia continuará demandando mayor energía, sobre todo en China e India. Seguida por América, principalmente contemplando a Estados Unidos y Brasil como grandes consumidores. Sin embargo, en el escenario de compromisos ambientales ya adquiridos (APS), se espera una reducción del consumo energético del 1,6 % a 2050, con reducciones en Estados Unidos, Unión Europea, China y Japón (respecto al 2021).

En el año 2022, la producción mundial de biocombustibles fue de 4274 PJ, Norte América ocupó el 39 % de la producción total, seguida por Sur y Centroamérica con el 25 %, Europa con el 16 % y Asia con el 20 % (véase Figura 15). Es decir que el continente americano comprende el 64 % de la producción de biocombustibles a nivel mundial (Institute, n.d.).

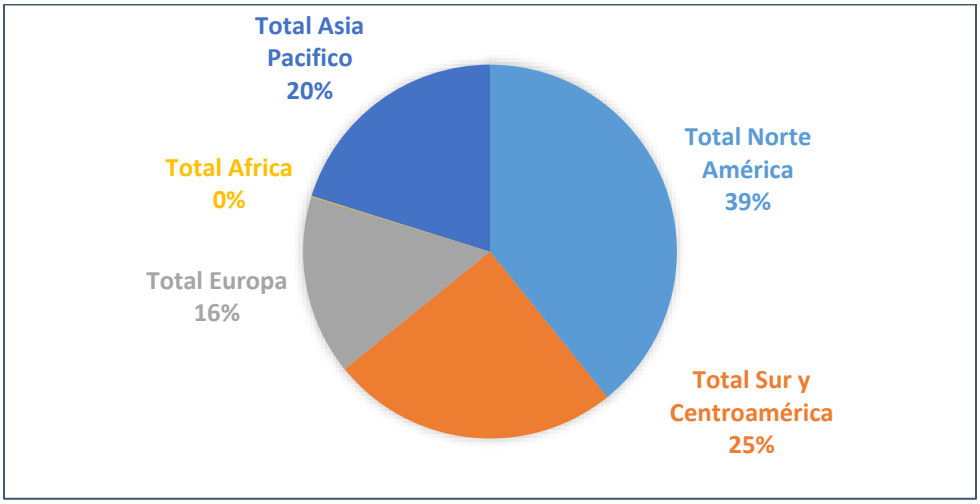


Figura 15. Producción mundial de biocombustibles por región, 2022

Adaptado de: (Institute, n.d.)

La figura 16 muestra la producción mundial de biocombustibles por países en el año 2022. Estados Unidos (38 % - 1627 PJ), Brasil (21 % - 914 PJ), Indonesia (9 % - 390 PJ) y China (3,5 % - 148 PJ) lideran la producción de estos combustibles renovables (Institute, n.d.).

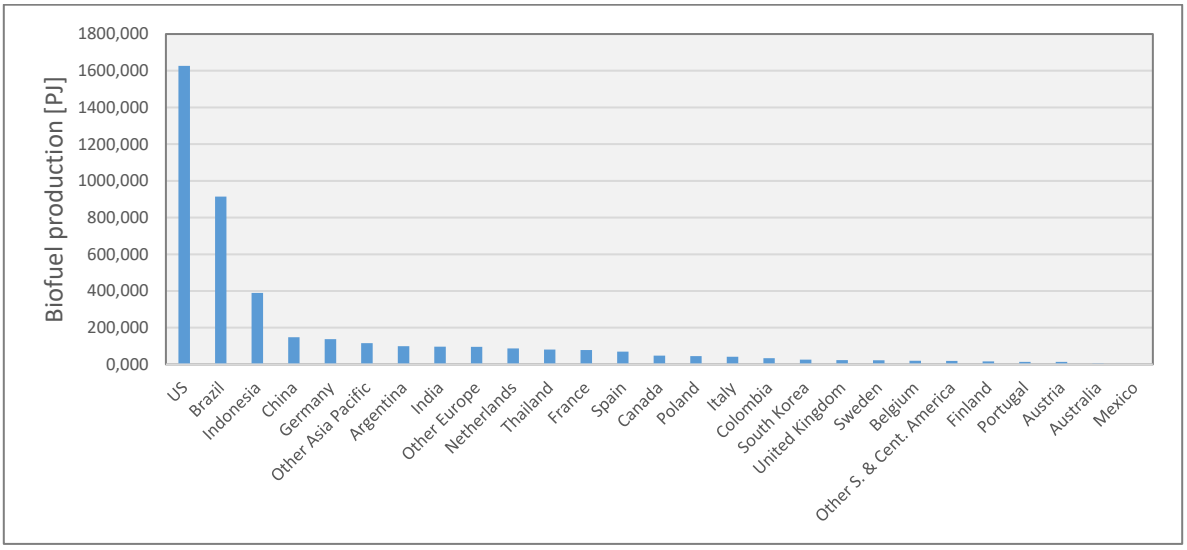


Figura 16. Producción mundial de biocombustibles por países, 2022

Adaptado de: (Institute, n.d.)

La producción de biodiésel se da principalmente en Asia y Europa, sin embargo, países como Estados Unidos y Brasil tienen mayor proporción de participación como países. Así mismo ocurre con la producción de biogasolina, en los que son principales productores (véase figura 17).

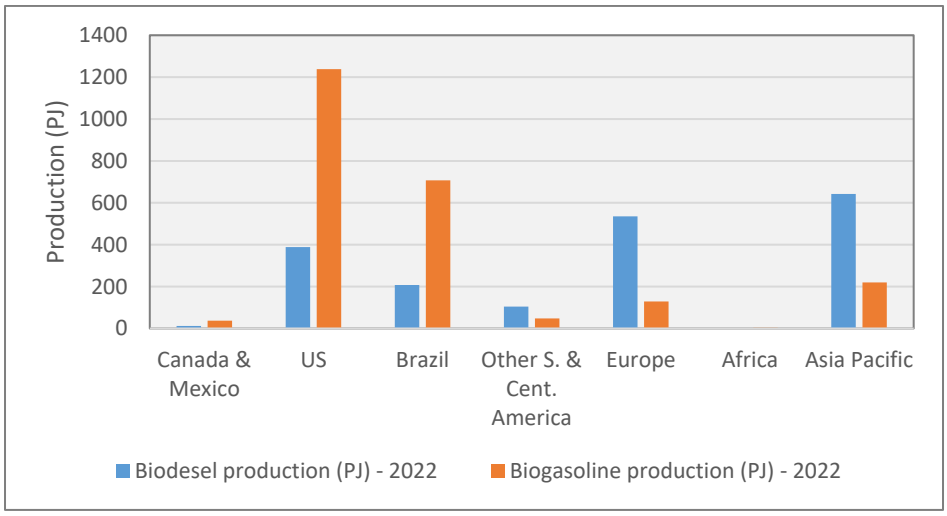


Figura 17. Producción de biodiésel y biogasolina, 2022

Adaptado de: (Institute, n.d.)

De acuerdo con el informe del *Atlas de los biocombustibles líquidos 2021-2022* del Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA), en el año 2021 los principales productores de biodiésel [52.628 miles de m^3] fueron Indonesia (18 %), Estados Unidos (18 %), Brasil (8 %) y Francia (5 %). Mientras que en la producción de bioetanol [104.530 miles de m^3] fueron Estados Unidos (54 %), Brasil (29 %), China (3 %) e India (3 %) (A. Torroba & IICA, 2022).

De otro lado, las regiones con mayor consumo de biocombustibles en 2022 son Norteamérica (39 %), Sur y Centroamérica (23 %), Europa (20 %) y Asia (18 %) (véase figura 18). Siendo el consumo total mundial de 43,18 PJ (Institute, n.d.).

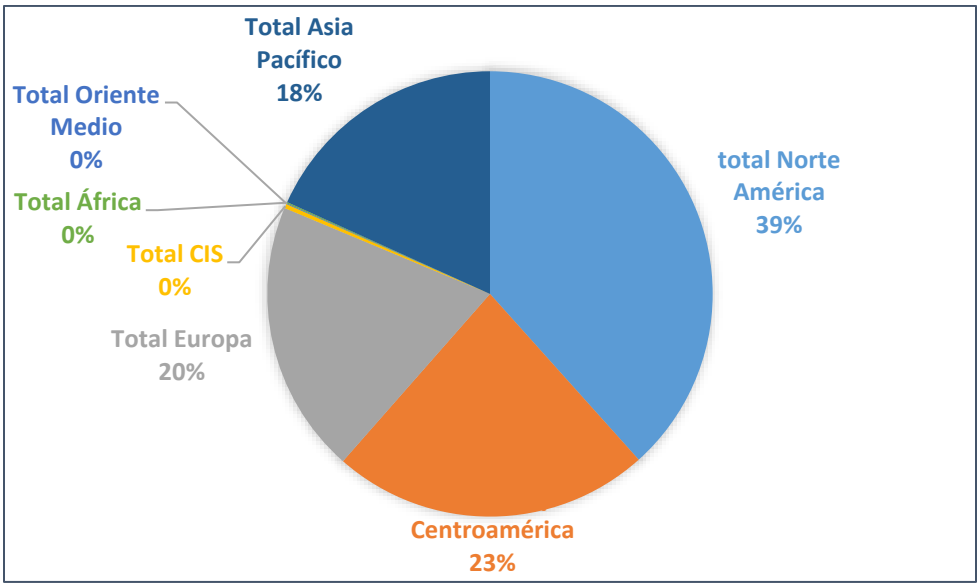


Figura 18. Consumo de biocombustibles por región, 2022

Adaptado de: (Institute, n.d.)

Los países con mayor consumo de biocombustibles en el año 2022 son Estados Unidos (36 % - 1562 PJ), Brasil (20 % - 871 PJ), Indonesia (8 % - 348 PJ) y Francia (3,5 % - 149 PJ) (Institute, n.d.) (véase figura 19).

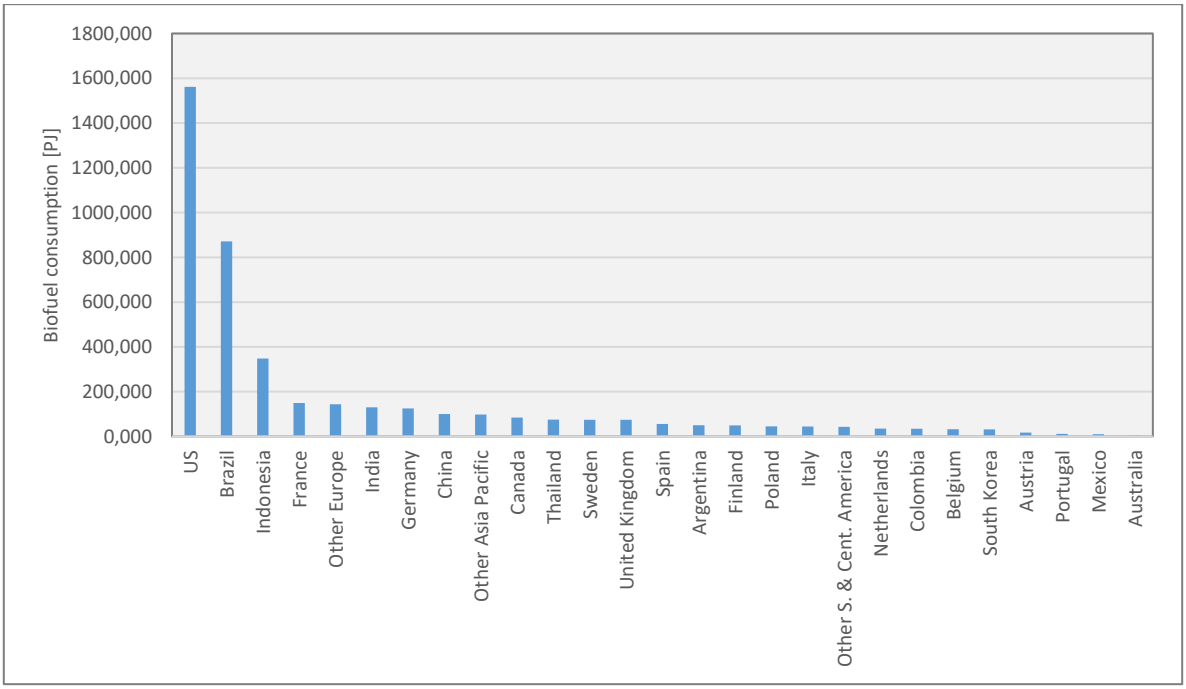


Figura 19. Consumo de biocombustibles por países, 2022

Adaptado de: (Institute, n.d.)

De acuerdo con el informe del *Atlas de los biocombustibles líquidos 2021-2022* del IICA, en el año 2021 los principales consumidores de biodiésel [51.315 miles de m^3] fueron Estados Unidos (21 %), Indonesia (19 %), Brasil (14 %), Francia (7 %) (véase Tabla 27). Mientras que los principales consumidores de bioetanol [100.697 miles de m^3] fueron Estados Unidos (53 %), Brasil (28 %), India (3 %) (véase Tabla 28) (A. Torroba & IICA, 2022).

Tabla 27. Consumo de biodiésel en 2021

	Consumo biodiésel (miles m^3)	%
Total	51315	
Estados Unidos	10776	21
Indonesia	9750	19
Brasil	7184	14
Francia	3592	7
Alemania	3079	6
Resto del mundo	16934	33

Adaptado de: (A. Torroba & IICA, 2022)

Tabla 28. Consumo de bioetanol en 2021

	Consumo bioetanol (miles m^3)	%
Total	100697	
Estados Unidos	53369	53
Brasil	28195	28
India	3021	3
Canadá	3021	3
China	2014	2
Resto del mundo	11077	11

Adaptado de: (A. Torroba & IICA, 2022)

En el año 2021, el comercio exterior de biodiésel representó el 17 % del consumo mundial con 8,8 millones de m^3. En relación con las exportaciones de este biocombustible, Singapur (18 %), China (17 %), Argentina (16 %), la Unión Europea (15 %) y Estados Unidos (10 %) son los principales exportadores. Mientras que la Unión Europea se consolida como importadora neta (43 %), seguida por Estados Unidos (27 %), Reino Unido (10 %), Canadá (10 %) y China (2 %) (véanse figura 20 y figura 21).

Por otro lado, el comercio exterior de bioetanol representó el 8,6 % del consumo mundial con 8,6 millones de m^3. Estados Unidos es el principal exportador de bioetanol (54 %), seguido de Brasil (14 %). Mientras que Reino

Unido y la Unión Europea consolidan el (26 %) de las importaciones, seguidos por Canadá (18 %), Japón (11 %), China (10 %) (véanse figura 22 y figura 23).

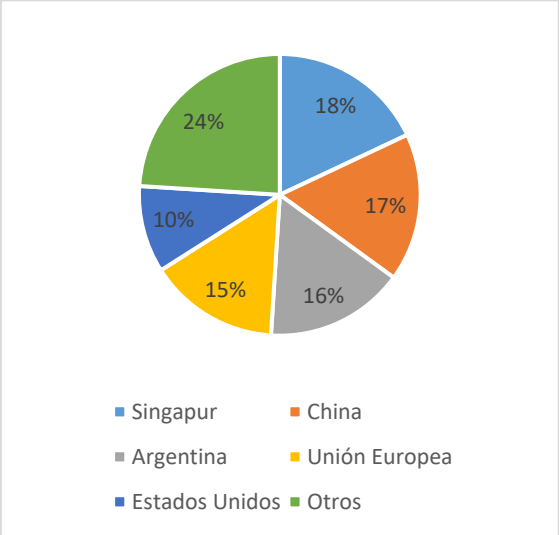


Figura 20. Exportaciones de bioediésel mundiales 2021

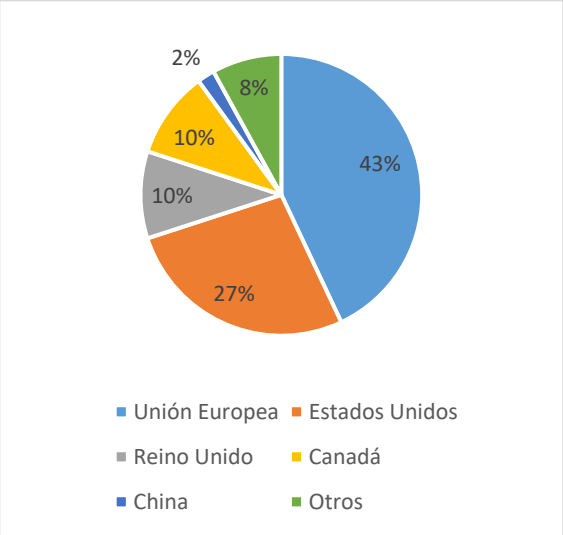


Figura 21. Importaciones de bioediésel mundiales 2021

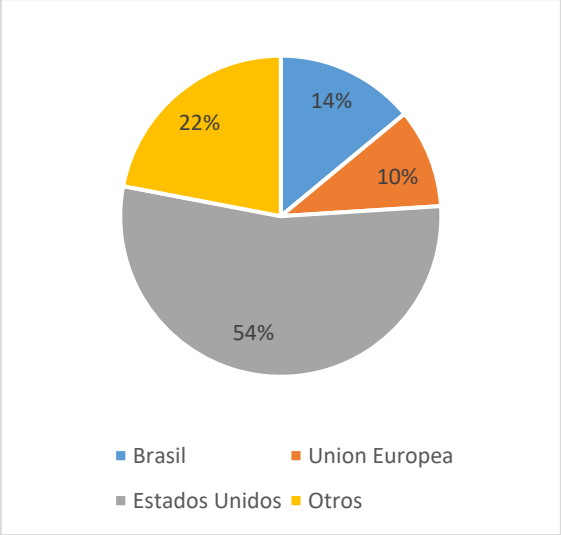


Figura 22. Exportaciones de bioetanol mundiales 2021

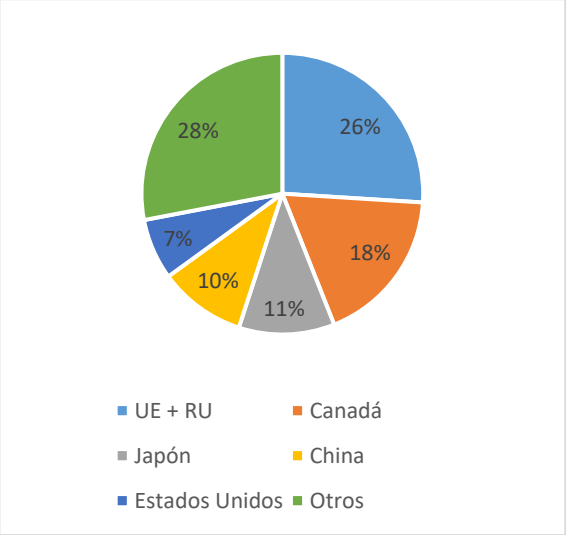


Figura 23. Importaciones de bioetanol mundiales 2021

La siguiente tabla Tabla 32 muestra la distribución de producción de biogás a nivel mundial.

Tabla 29. Distribución de la producción de biogás a nivel mundial etanol en 2021

Regiones / Países	Porcentaje de producción
Europa, China, Estados Unidos	90
Tailandia, India, Argentina y Brasil.	10

Adaptado de: (IEA, n.d.).

Del 90 por ciento de la producción mundial, la siguiente tabla XXX muestra las vías de producción de biogás

Tabla 30. Vías productivas de biogás

País	Observaciones
Alemania	Mayor participación en el mercado comprende dos tercios de las plantas del continente. - fuentes de generación: residuos de cultivo, desechos ganaderos y captura de metano en vertedero
Estados Unidos	90 % de la producción de biogás se da por la recolección de gas de vertedero
China	70 % de la capacidad instalada de biogás se da con digestores domésticos

Adaptado de: (IEA, n.d.).

(IEA, n.d.).

En el mundo, la mayor parte de la prodcción actual de biogás proviene de los cultivos y el estiércol animal, siendo liderada por Europa (Alemania abarca 2/3 de las plantas de producción de biogás del continente), mientras China y Estados Unidos abarcan el 90 % de dicha producción. El resto del mundo corresponde, principalmente, a Tailandia, India, Argentina y Brasil (véase figura 24).

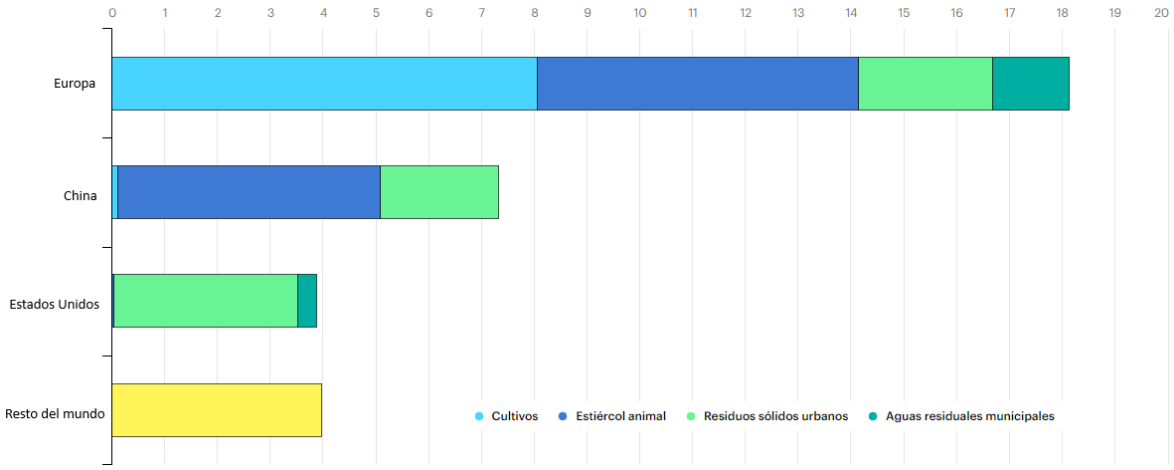


Figura 24. Producción de biogás por región y por tipo de materia prima (2018)

Adaptado de: (IEA, n.d.)

En el mundo, la participación en el consumo de biogás y biometano es solo una pequeña parte del consumo de la bioenergía, puesto que representan el 3 % de la demanda total de bioenergía y solo el 0,3 % de la demanda energética primaria. Sin embargo, son combustibles con un potencial en la transformación del sistema energético mundial, ya que presentan beneficios como (IEA, n.d.):

- Favorecer la economía de descarbonización al reducir emisiones, al emplear gases de efecto invernadero en su composición y aprovechar material de desecho.
- Proporcionar beneficios al sistema de gas natural (almacenamiento, flexibilidad, calor a alta temperatura).
- El biogás es un suministro sostenible de calor y energía útil para las comunidades que buscan fuentes locales o descentralizadas
- Aportar beneficios en materia de seguridad energética en los procesos de transporte a largas distancias.
- Aportar beneficios externos a las comunidades como evitar el uso de leña para generar calor o electricidad, generación de empleo, gestión de desechos, optimización de tiempo.

A febrero de 2023, las principales empresas productoras de combustible sostenible de aviación SAF son Gvo, Fulcrum, Alder Fuels y Shell, en su mayoría

estas empresas con norteamericanas y una de ellas es británica (Statista, 2023). De acuerdo con el *Atlas de los biocombustibles líquidos 2021-2022* de la IICA, en el año 2007 se presentaron los primeros consumos regulares de biojet y a partir del 2020 se potenció su producción por el aumento de capacidad instalada y el establecimiento de políticas de promoción. En la figura 25 se muestra la evolución de la producción de SAF.

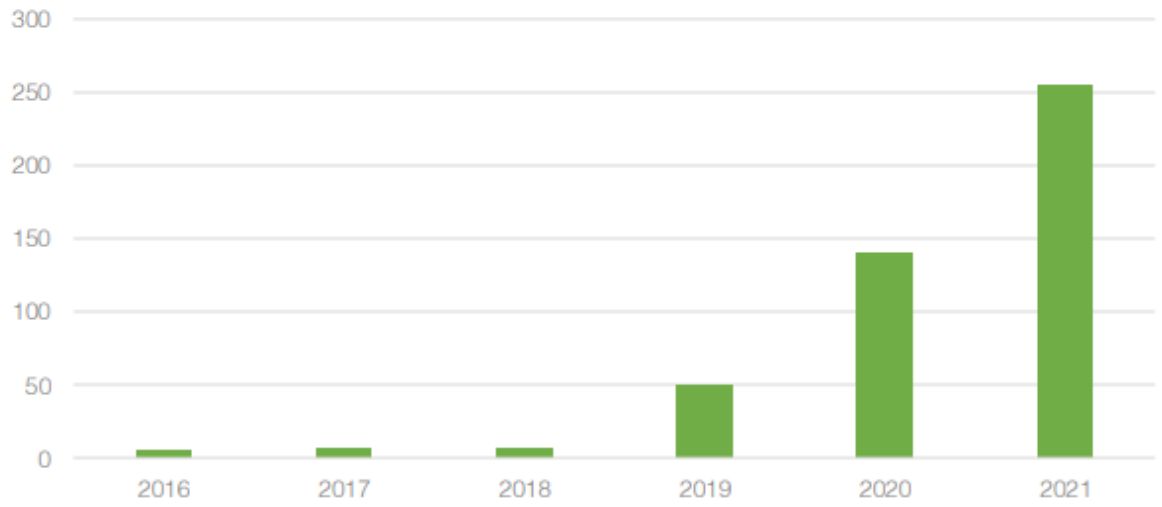


Figura 25. Evolución de la producción de combustibles sostenibles de aviación SAF (miles de m^3)

Tomado de: (IICA et al., n.d.)

Dicho informe también menciona que la producción de aceite vegetal hidrogenerado (HVO), diésel verde o diésel renovable presenta un aumento de la producción del 272 % en los últimos diez años (respecto a 2021), con un incremento del 20 %, entre 2020 y 2021. Mientras que el consumo de este biocombustible presentó un incremento del 325 % en la última década, con un crecimiento del 10 % entre 2020 y 2021 (IICA et al., n.d.).

La Directiva de Energías Renovables de la Unión Europea determinó un *target* agregado del 20 % de combustibles renovables en cualquier uso y el 10 % para transporte en la Unión. En consideración con la flota europea, la participación del biodiésel y los ésteres metílicos de ácidos grasos (FAME, por sus siglas en inglés), el HVO es el biocombustible más importante de la región, representando el 8 % del mercado de biocombustibles en el sector transporte (3870 kton/año en

2020). Su producción también es importante en Estados Unidos (1155 kton/año) (Lorenzi et al., 2019; Suarez-Bertoa et al., 2019).

Para garantizar la calidad de los biocombustibles, se emiten estándares internacionales como los referidos en la Sociedad Americana para Testeo de Materiales (ASTM, por sus siglas en inglés) y los estándares de las Normas Europeas (EN), que establecen las metodologías de análisis y las características que debe tener cada producto energético. Estas se describen con mayor exactitud en la sección de aspectos transversales.

4. Desarrollo del sector de los biocombustibles en los países de referencia para la hoja de ruta

4.1 Caso Estados Unidos

Los inicios de los biocombustibles en los Estados Unidos se remontan a finales del siglo XIX, donde Henry Ford utilizó de forma experimental el etanol en su primer automóvil llamado “Quadricycle” en el año de 1986, esto no pasó de ser un experimento ya que finalmente Ford, prefirió el uso de la gasolina dado que brindaba un mayor contenido energético por unidad de volumen versus el etanol.

Durante la mayor parte del siglo XX, el etanol no fue usado como combustible en los Estados Unidos, solo en un periodo específico entre 1973 y 1979 en el cual se presentó una escases de petróleo, el etanol fue considerado nuevamente como combustible y fue mezclado con gasolina para extender las reservas de combustibles. Solo hasta 1978 el gobierno de los Estados Unidos promulgó la primera ley específica para los biocombustibles, la cual fue llamada, ley de impuesto a la energía conocida en inglés como Energy Tax Act. Bajo este marco legislativo fueron aprobadas más leyes referentes a los biocombustibles en la finalización del siglo XX e inicios del siglo XXI.

De acuerdo con el documento, elaborado por el Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA), *Estado de los biocombustibles líquidos en las Américas 2022*, con una superficie de 9.147.593 km^2 y una población de más de 331 millones de habitantes, los Estados Unidos de América es uno de los países en donde se encuentra fuertemente concentrada la producción de biocombustibles líquidos. En efecto, es su principal productor, pues ocupa el segundo lugar en la producción de biodiésel y el primero en la de bioetanol.

Es por ello, que los programas de renovación de combustibles de los Estados Unidos constituyen la principal referencia a nivel mundial, ello a raíz de la madurez que ha logrado dicho sector, con una trayectoria que se remonta a la década de los años setenta y que, actualmente, lo consolida como el principal productor de biocombustibles en el mundo, generando el 38 % de la producción global. Igualmente, es el mayor consumidor de estos combustibles renovables,

demandando el 21 % de biodiésel producido en el mundo y el 53 % de bioetanol. Igualmente, sobresale por tener leyes y políticas que promueven la producción y el uso de los biocombustibles.

4.1.1 Actores oficiales

— *Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA)*

De acuerdo con el portal oficial de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA, por sus siglas en inglés) (2023), la EPA es la responsable de desarrollar e implementar regulaciones para los combustibles destinados al transporte vendidos en los Estados Unidos. Es la encargada de regular las operaciones en las instalaciones de producción de etanol, bajo programas de licenciamientos de aire, agua y almacenamiento, así como de prevención de derrames, gestión de riesgos y respuesta a emergencias en las instalaciones, entre los cuales se encuentran:

a) Programa de estándares de combustibles renovables (RFS). Hace referencia al programa que promueve que las compañías petroleras mezclen volúmenes cada vez mayores de combustibles renovables con gasolina y diésel, culminando con 36 mil millones de galones en 2022.
b) Reglamentos E15. Implementa los reglamentos relacionados con el uso de mezclas que contienen 15 % de etanol en gasolina para su uso en automóviles de pasajeros, camionetas livianas y vehículos de servicio mediano para vehículos con modelo del año 2001 en adelante.
c) Programa de Normas de Combustible y Emisiones de Vehículos de Nivel 3. Este programa de Nivel 3 busca reducir los impactos de los vehículos motorizados en la calidad del aire y la salud pública. El programa considera el vehículo y su combustible como un sistema integrado, estableciendo nuevos estándares de emisiones de vehículos y reduciendo el contenido de azufre de la gasolina a partir de 2017. Los productores de etanol pueden descargar este documento RFA (norma) para ayudar a cumplir con la regla:

Estándares de combustible para vehículos motorizados *Tier3* para etanol combustible desnaturalizado.

— *Departamento de Transporte de Estados Unidos (DOT)*

Según la descripción general de la acción climática del Departamento de Transporte (DOT, por sus siglas en inglés) (2023), este es el responsable de regular el transporte seguro de etanol por vía terrestre y férrea, para lo cual ha generado los siguientes reglamentos:

a) Reglamentos para el envío por carretera de materiales peligrosos
b) Reglamentos para el envío ferroviario de materiales peligrosos

— *Administración de Alimentos y Medicamentos de Estados Unidos (FDA)*

La Administración de Alimentos y Medicamentos (FDA, por sus siglas en inglés) del Departamento de Salud y Servicios Humanos es la responsable de proteger la salud pública, garantizando la seguridad, eficacia y protección de los medicamentos humanos y veterinarios, productos biológicos, dispositivos médicos, así como el suministro de alimentos, cosméticos y otros (U.S. Food & Drug Administration, 2023).

Establece que las plantas productoras de etanol deberán estar registradas ante la FDA y deberán cumplir con las buenas prácticas de fabricación, así mismo, contar con un plan de seguridad alimentaria donde deberán detallar un análisis de peligros y controles preventivos (U.S. Food & Drug Administration., 2023).

— *Comisión Federal de Comercio (FTC)*

La Comisión Federal de Comercio (FTC, por sus siglas en inglés) es la responsable de asegurar que el mercado de consumo sea eficiente y no tenga restricciones, para lo cual emite las reglas para la regulación del comercio, entre las cuales se encuentra la Regla para la clasificación, certificación y publicación de combustible para automóviles. En ella se indica cómo debe hacerse la venta y transferencia de combustibles líquidos para automóviles y determina las clasificaciones en las etiquetas de las estaciones de servicio, cómo se calculan los niveles de octanaje y ayuda a informar a los consumidores sobre el combustible adecuado para sus vehículos (Comisión Federal de Comercio FTC., n.d.).

4.1.2 Actores privados

Las firmas que lideran el mercado del etanol en Estados Unidos son: Poet Biorefining, Valero Renewable Fuels, Green Plains Renewable Energy, Aventine Renewable Energy, Flint Hills Resources, Abengoa Bioenergy, Big River Resources, The Andersons Ethanol y Cargill.

4.1.3 Marco regulatorio y económico

Estados Unidos ha implementado de forma general diferentes políticas en torno a la temática energética y de forma específica políticas relacionadas con los biocombustibles líquidos, lo que ha permitido una alta producción y consumo de estos tanto interna como externamente.

4.1.3.1 Mapa normativo

Actualmente, dos leyes federales fundamentales se destacan como relevantes para todos los estados. Estas leyes específicas desarrollan el marco general de la regulación de la producción, comercialización y consumo de las energías alternativas y son:

- Ley Pública 108-357 (Public Law 108-357 - American Jobs Creation Act of 2004) y
- Ley Pública 109-58, sobre políticas energéticas (Public Law 109-58 - Energy Policy Act of 2005).
- Norma de Combustibles Renovables (Renewable Fuels Standard [RFS]), se creó en el año 2005 y establece objetivos de consumo de biocombustibles.

Se estableció como meta obligatoria en el RFS para el año 2012, la incorporación de 7.5 mil millones de galones (28.4 mil millones de litros) de biocombustibles a la gasolina. También dio incentivos fiscales para la producción y uso de biocombustibles, al pequeño productor de etanol (*small ethanol producer tax credit*), al igual que al pequeño productor de agrobiodiesel (*small agri-biodiesel producer tax credit*), también incluye un crédito a la compra de equipos surtidores de combustibles alternativos.

El RFS fue ampliado en 2007 (RFS2) por la Ley de Seguridad e Independencia Energética (Public Law 110-140; EISA) con el objetivo de reducir

las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y la dependencia del petróleo extranjero mediante el aumento gradual de los volúmenes de biocombustibles en el transporte.

A partir del RFS, se clasificaron los biocarburantes en cuatro importantes categorías: (i) biocarburantes convencionales, (ii) biocarburantes avanzados, (iii) diésel a partir de biomasa y (iv) biocarburantes celulósicos. En este sentido, los biocombustibles avanzados y el diésel de biomasa deben reducir en un 50 % las emisiones de gases de efecto invernadero durante su ciclo de vida, los biocombustibles celulósicos deben reducirlas en un 60 %, mientras que los biocombustibles convencionales, en los que predomina el etanol de maíz, deben reducirlas en un 20 %. De acuerdo con esta clasificación, una vez que los productores de biocarburantes superan los umbrales del 20, 50 o 60 %, no reciben ningún crédito adicional por mejorar la intensidad de carbono del biocarburante (Herbstritt, 2023).

Este mandato requiere que el combustible para el transporte vendido o introducido en el comercio en los Estados Unidos contenga un volumen creciente de un conjunto predeterminado de combustibles renovables. Se requirió de 4.0 mil millones de galones de combustible renovable en 2006, ascendiendo a 36.0 mil millones de galones requeridos en 2022.

A partir de 2015, el RFS limitó las cantidades de biocombustibles convencionales, mientras aumentaba la necesidad de biocombustibles avanzados. Por ejemplo, el requisito de biocombustibles avanzados en el RFS aumentó progresivamente, pasando de aproximadamente el 7 % en 2010 al 58 % en 2022.

La Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA) supervisa el cumplimiento del RFS a través de un sistema de crédito negociable. Las partes obligadas, generalmente las refinerías, deben presentar créditos conocidos como “números de identificación renovable” (RIN, por sus siglas en inglés) a la EPA. El RFS proporciona definiciones para cuatro categorías de combustibles renovables.

El biocombustible convencional se refiere al etanol de almidón de maíz; mientras que el biocombustible avanzado, a un combustible renovable, con emisiones de gases de efecto invernadero, durante el ciclo de vida de al menos un

50 % menos que las emisiones de gases de efecto invernadero del ciclo de vida de su contraparte de gasolina o diésel.

A partir de los años 2000, el Congreso de los Estados Unidos incrementó la actividad legislativa sobre los biocombustibles, algunas de estas leyes y mandatos se mencionan en la tabla 31.

Tabla 31. Resumen actividad legislativa sobre biocombustibles, congreso de los Estados Unidos en la década de los 2000

Año	Nombre	Contenido de la ley
2004	Ley de Creación de Empleos Estadounidenses (American Jobs Creation Act, Public Law)	Título III subtítulo A, se establece el crédito sobre impuestos al contenido volumétrico de etanol (Volumetric Ethanol Excise Tax Credit, VEETC)
2005	Ley de Política Energética (Energy Policy Act, EPAct)	Sección 1501 establece una norma sobre combustibles renovables (Renewable Fuel Standard, RFS)*
2006	Crédito al Vehículo Automotor Alternativo Calificado (Qualified Alternative Fuel Motor Vehicle Tax Credit)	Incentivo económico para los compradores de vehículos que utilicen biocombustibles o cualquier otra fuente de energía renovable.
2007	Ley de Seguridad e Independencia Energéticas (Energy Independence and Security Act)	La sección 202 estipula los porcentajes mínimos de mezcla de combustibles fósiles con biocombustibles, se reformula la norma RFS de 2005.

Elaboración propia: adaptado de (Maciel, 2009)

Para finalizar la década, en el año 2009, el gobierno federal estableció un plan de inversiones a 10 años de 150 mil millones de dólares en investigación y desarrollo de tecnologías energéticas orientadas a disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero, dentro de los cuales hace parte el desarrollo de los biocombustibles (Maciel, 2009).

— *Regulación de precios y principales incentivos*

Los precios de los biocombustibles están determinados por la dinámica de la oferta y la demanda. En una comparativa de la demanda de biocombustibles frente al combustible convencional, se evidencia que hay un aumento exponencial en la demanda de biocombustibles, puesto que, los precios constantemente bajos de la energía contribuyen a este factor.

Al igual que en Brasil, en Estados Unidos no existen cuotas de comercialización máximas. Las empresas productoras de etanol producen lo que deseen. El RFS impone volúmenes mínimos de etanol para mezclar con nafta fósil, no máximos.

Existen limitaciones como la producción de las materias primas, dado que se compite con la producción de materia prima para el sector alimentario. En productos como los aceites vegetales y etanol, se evidencia la dificultad de cumplir con la producción de materias primas para procesamiento y transformación.

Los principales incentivos específicos del sector de biocombustibles en Estados Unidos son los siguientes:

- **Inclusión de arancel tipo *ad valorem***. Se aplica un arancel del 2,5 %, calculado en función de un derecho de importación por galón de etanol. El propósito de este arancel es asegurar que los beneficios del crédito fiscal interno de los Estados Unidos para el etanol no sean aprovechados por los productores extranjeros (Estados Unidos, Ley Pública 108-357, n.d.).
- **Crédito fiscal federal por galón de etanol.** Este incentivo está disponible para las refinerías que lo produzcan. Si el etanol se produce a partir de al menos el 50 % de materia prima agrícola cultivada, será libre de impuestos. Si el contenido de materia prima local es menor, se aplicarán limitaciones a la cantidad de etanol libre de impuestos. La cantidad de etanol que se puede importar libre de impuestos y que se produce a partir de materias primas agrícolas está restringida a 60 millones de galones (Estados Unidos, Ley Pública 108-357, n.d.). Este crédito fiscal volumétrico sobre la producción de etanol, el cual es un crédito al impuesto especial sobre el consumo de alcohol y biodiésel, y una extensión del crédito al impuesto sobre la renta para combustibles de alcohol, adicionalmente es también un crédito fiscal sobre la renta para biodiésel para los productores.
- **Disposiciones crediticias para el almacenamiento de etanol**. Estas disposiciones incluyen un impuesto especial más bajo para el etanol en comparación con el combustible líquido derivado del petróleo, mediante el

uso de reservas estratégicas (Estados Unidos, Ley Pública 109-58, 2005, n.d.).

— *Regulaciones establecidas para gestionar adecuadamente el aceite usado*

Las regulaciones que rigen la gestión de aceites usados en Estados Unidos se encuentran detalladas en el Code of Federal Regulations (CFR), título 40, capítulo I, subcapítulo I, parte 279. Estas regulaciones destacan la prohibición del confinamiento superficial, lo que significa que no está permitido disponerlo en embalses superficiales o pilas de desechos, ni su uso como supresor de polvo. Se permite la incineración en unidades particulares para la recuperación de energía, pero solo en los siguientes dispositivos: hornos industriales identificados, calderas industriales para transformar nuevos productos a través de procesos mecánicos o químicos, calderas de servicios públicos utilizadas para producir energía eléctrica, vapor, aire calentado o enfriado u otros gases o fluidos para la venta, calentadores de ambiente de aceite usados siempre que cumplan con los requisitos establecidos en la sección 279.23, e incineradores de desechos peligrosos que están sujetos a regulaciones específicas bajo la subparte O, de las partes 264 o 265, de este mismo capítulo (Muñoz, 2020).

— *Políticas vigentes de mandatos de mezcla*

En Estados Unidos, se han implementado de forma general diferentes políticas en torno a la temática energética y de forma específica relacionadas con los biocombustibles líquidos. En ese sentido, resulta importante indicar que algunos estados han diseñado una legislación específica para sus mezclas; por ejemplo, en Hawái, la mezcla corresponde al 10 % de bioetanol; Luisana cuenta con una mezcla del 2 % para el biodiésel y bioetanol; Massachusetts posee una mezcla de 15 % para biodiésel; en Minnesota, la mezcla es del 10 % para el bioetanol y del 20 % para el biodiésel; en Misuri, la mezcla corresponde al 10 %; en Nuevo México, se encuentra un 5 % la mezcla biodiésel; Oregón cuenta con el 10 y 5 % para la mezcla de bioetanol y biodiésel, respectivamente; y, en Washington, la mezcla es del 2 % para el bioetanol y biodiésel (Torroba et al., 2022).

Lo que significa que cada estado se rige por la ley general y tiene su propia legislación para sus mezclas de acuerdo con su producción. Para tener una mayor claridad frente lo anterior, se presenta en forma tabulada (tabla 32) y graficada (figura 26).

Tabla 32. Legislación específica para mezclas según estado

ESTADO	% BIOTENOL	%BIODIÉSEL
Hawái	10	
Luisiana	2	2
Massachusetts		15
Minnesota	10	20
Misuri	10	
Nuevo Mexico		5
Oregón	10	5
Washington	2	2

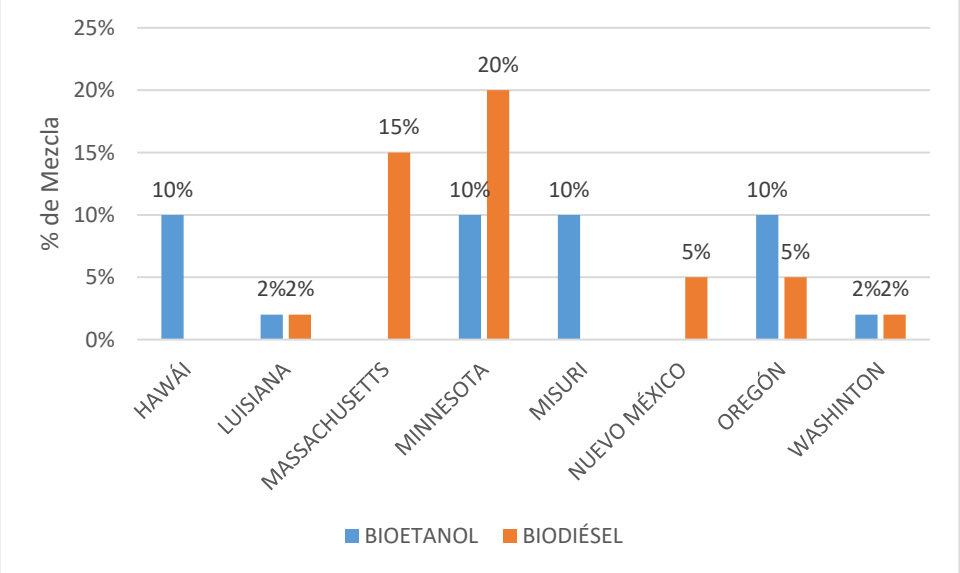


Figura 26. Legislación específica para mezclas según estado

— *Normas que rigen el consumo*

De acuerdo con la Naciones Unidas (2006), en Estados Unidos se han promulgado leyes recientes que tienen un impacto significativo en el consumo de biocombustibles. Estas leyes incluyen, la Ley de Seguridad Agraria e Inversiones Rurales de 2002 (Public Law 107-171), la Ley de Creación de Empleos Americanos de 2004 (American Jobs Creation Act of 2004) y la Ley de Política Energética de 2005 (Public Law 109-58), citada. Cada una de estas leyes tiene objetivos específicos relacionados con el consumo de biocombustibles y el fomento de la energía limpia.

Por ejemplo, en la Ley de Seguridad Agraria e Inversiones Rurales, por ejemplo, se establecen nuevos programas y subvenciones para la adquisición de productos biológicos para el desarrollo de las biorrefinerías, para sensibilizar al público sobre las ventajas de la utilización del biodiésel como combustible; y para prestar asistencia a los agricultores, ganaderos y pequeños empresarios rurales en la compra de sistemas de energías renovables. Esta ley también prevé pagos a los productores que reúnen las condiciones con el fin de promover la compra de materias primas con miras al aumento de la producción de bioenergía y la creación de nueva capacidad de producción.

— *Normas que rigen la comercialización*

El acuerdo de Estados Unidos, Iniciativa de la Cuenca del Caribe (ICC), permite que los países cubiertos por la ICC exporten bioetanol, producido a partir *feedstock* foráneo (por ejemplo, azúcar de otro país), a Estados Unidos libre de tarifa hasta un 7 % de la producción total de bioetanol estadounidense. Una vez alcanzado el umbral del 7 %, se permite la importación libre de tarifa de 35 millones de galones adicionales, provisto que al menos un 30 % del bioetanol se derive de *feedstock* “locales” (Región Caribe). Cualquier importación por sobre los 35 millones de galones será libre de tarifas, si al menos un 50 % del bioetanol se deriva de *feedstock* locales. Recientemente, la Comisión Comercial Internacional de Estados Unidos estableció un límite a las importaciones libres de impuesto provenientes de la ICC en 240,4 millones de galones para el año fiscal 2005 (Dufrey, 2006).

— Regulación del comercio exterior

Según Dufey (2006), la regulación del comercio exterior de biocombustibles en Estados Unidos se basa en la clasificación de estos biocombustibles y sigue diversas normativas y acuerdos internacionales. A continuación, se describen las regulaciones aplicadas:

- Bienes industriales. Cuando los biocombustibles se consideran bienes industriales, como el biodiésel, su comercio está sujeto a las reglas del Acuerdo General sobre Aranceles Aduaneros y Comercio (GATT) y el Acuerdo sobre Subsidios y Medidas Compensatorias (Acuerdo SCM). El Acuerdo SCM supervisa el uso de subsidios para reducir o eliminar las distorsiones en el comercio.
- Productos agrícolas. En el caso que los biocombustibles se clasifiquen como productos agrícolas, como lo es el bioetanol, su comercio se rige por el Acuerdo sobre Agricultura (AoA) de la Organización Mundial del Comercio (OMC).
- Regulación técnica. El Acuerdo sobre Obstáculos Técnicos al Comercio (TBT, por sus siglas en inglés) asegura que las regulaciones, estándares, pruebas y procedimientos de certificación no creen barreras innecesarias al comercio. Mientras que las regulaciones siguen las disposiciones del Acuerdo TBT, su anexo incluye el Código de Buenas Prácticas para estándares internacionales, como aquellos elaborados por la Organización Internacional de Estandarización (ISO). Los estándares administrados por el sector privado y otras entidades no gubernamentales estarían fuera del alcance de las reglas de la OMC.
- Comercio de bienes y servicios ambientales. En la Declaración Ministerial de Doha de la OMC, en noviembre de 2001, los países miembros acordaron una negociación acelerada para la liberalización del comercio de los bienes y servicios ambientales. Los biocombustibles derivados de prácticas agrícolas sustentables poseen numerosos atributos que los harían calificar como bienes ambientales. De hecho, varios países miembros de la OMC han sugerido que las tecnologías de energía

renovables se incluyan debido a su positivo potencial ambiental y económico.

Es de anotar que, en el año 2007, el presidente de los Estados Unidos George W. Bush y el presidente de Brasil Luiz Inácio Lula da Silva, establecieron un acuerdo bilateral con el fin de instaurar una asociación energética cuyo objetivo fue promover el uso del etanol y el biodiésel en Norteamérica y América del Sur. Compartiendo esfuerzos entre instituciones gubernamentales de ambos países, al igual que en universidades, el sector empresarial y sociedades químicas con el fin de fomentar la investigación y desarrollo en estos biocombustibles en particular. El propósito de ambos gobiernos es convertir al etanol en un commodity mundial.

4.1.3.2 Variables económicas en la producción de biocombustibles

— *Subsidios en la cadena de biocombustibles*

Estados Unidos tiene el flete verde, una reducción en el costo de las operaciones de las agencias de transporte. Cuenta con el RIN (Renewable Identificación Numbers), con el cual permitieron reducir el precio de venta al consumo debido a su alto costo de elaboración (Aapresid, 2023).

— *Impuestos en la cadena de biocombustibles*

De acuerdo con Risso (2021), en el caso de los Estados Unidos, el etanol actualmente no posee ninguna rebaja impositiva en los impuestos a la venta de combustibles. Existió desde 1975 hasta 2011 un crédito fiscal de hasta 0,60 USD por galón que abarataba el precio del etanol, sin embargo, fue discontinuado. El único impuesto vigente para el etanol es un arancel tipo *ad valorem* del 2,5 % al etanol importado.

— *Papel del Gobierno en la cadena de los biocombustibles*

El Gobierno de Estados Unidos desempeña un papel central en la cadena de los biocombustibles, y su participación abarca varios aspectos clave:

- **Regulación y política**. El Gobierno establece regulaciones y políticas que afectan directamente a la producción, el uso y la comercialización de los biocombustibles. Esto incluye mandatos de mezcla (como el Renewable

Fuels Standard), regulaciones de calidad y la promulgación de incentivos fiscales para fomentar la producción y el consumo de biocombustibles.

- **Apoyo financiero**. El Gobierno brinda apoyo financiero al sector de los biocombustibles a través de subvenciones, créditos fiscales y préstamos para proyectos relacionados con la producción y distribución de biocombustibles. Estos incentivos financieros ayudan a reducir los costos iniciales y promover la inversión en el sector.
- **Investigación y desarrollo**. El Gobierno promueve la investigación y el desarrollo en el campo de los biocombustibles. Esto incluye la inversión en proyectos de investigación que buscan mejorar la eficiencia de la producción, explorar nuevas fuentes de materias primas y desarrollar tecnologías de conversión más avanzadas.
- **Regulación de importaciones y exportaciones**. El Gobierno regula las importaciones y exportaciones de biocombustibles para garantizar que cumplan con los estándares de calidad y seguridad. También participa en acuerdos comerciales internacionales relacionados con los biocombustibles.
- **Fomento de la producción agrícola**. Para abastecer la producción de materias primas utilizadas en la fabricación de biocombustibles, el Gobierno puede implementar políticas que fomenten la producción agrícola, como la promoción de cultivos específicos destinados a la producción de biocombustibles.
- **Objetivos energéticos y ambientales**. El Gobierno establece objetivos energéticos y ambientales que incluyen aumentar la participación de los biocombustibles en la matriz energética para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y promover fuentes de energía más sostenibles.

— *Papel del sector privado en la cadena de los biocombustibles*

El sector privado en Estados Unidos desempeña un papel esencial en la cadena de biocombustibles. Invierte en tecnología para la producción y comercialización de biocombustibles, tanto a nivel nacional como internacional, respondiendo a las

fuerzas del mercado, como la oferta y la demanda. Además, el sector privado juega un papel clave en la determinación de los costos del producto final. Su participación y su enfoque en la eficiencia son fundamentales para el desarrollo y crecimiento de la industria de biocombustibles en el país.

En 2001, la empresa GreenFuel Technologies, patentó un proceso de secuestro de CO_2 y producción de biodiésel basado en algas verdes.

— *Generación de ingresos a nivel nacional y de empleos*

Para medir el impacto económico de la industria a nivel nacional, se tuvo en cuenta su impacto a nivel de generación de ingresos y de empleabilidad. Al respecto, Un estudio reciente realizado por LMC International para CFAA midió el impacto de los biocombustibles y, principalmente, del biodiésel en los Estados Unidos con base en los siguientes factores (LMC International, 2022):

- Impacto económico: mide el valor a la economía de Estados Unidos por la cadena de valor del biodiésel.
- Impacto en el empleo: mide el número estimado de empleos de tiempo completo generados por la producción, procesamiento y distribución de biocombustibles.
- Impacto en los salarios: evalúa el monto total pagado en salarios a trabajadores empleados en la cadena de valor de los biocombustibles.
- Impacto temporal: en el que se analiza el impacto en la economía, el empleo y los salarios para la construcción de nuevas instalaciones para biodiésel.

A continuación, se presentan los principales resultados.

- **Datos generales.** De los 3,1 billones de galones producidos (tabla 33), 2,5 billones son para consumo interno de los Estados Unidos y 0,6 son importados. Resalta LMC International que, en caso de que los 3,1 billones de galones se hubieran producido en los Estados Unidos, el impacto económico de la industria habría crecido hasta los 29,7 billones de dólares y 4,4 billones en salarios pagados (LMC International, 2022).

Tabla 33. Aportes de los biocombustibles en Estados Unidos

Galones producidos	Empleos generados
3.1 billones	72.200
Salarios pagados (USD)	**Total impacto económico (USD)**
3.6 billones	23.3 billones

Elaboración propia. Fuente: (Clean Fuel Alliance of America. Clean Fuels, n.d.)

- **Datos por eslabón en la cadena de valor.** El análisis realizado también tuvo en cuenta el estudio de la cadena de valor para la producción y distribución del biodiésel, en este sentido, incluyó los eslabones de producción, recolección y procesamiento de materias primas como semillas oleaginosas, grasas animales y desperdicios de aceites, así como la producción, distribución, importación y exportación de biodiésel, agrupándolo en las siguientes categorías.



Figura 27. Aportes económicos de los biocombustibles por eslabón en la cadena de valor

Elaboración propia. Fuente:(LMC International, 2022)

El sector de producción es el que mayor impacto genera, comparado con los datos generales a nivel de impacto económico (41 %), seguido por el sector agrícola (30 %), frente al 21 % del sector del procesamiento. En cuanto a empleabilidad, el sector agrícola es el que mayor empleo formal genera, seguido por el de la producción. Finalmente, en cuanto a salarios, el sector agrícola es el que más salarios paga, seguido por el de producción (LMC International, 2022). Es importante recalcar que el sector encargado de la trituración es el más pequeño pues está en el medio de la cadena y es sólo un pequeño paso para la transformación del bien final.

- **Proyecciones futuras.** Asimismo, de acuerdo con el estudio de LMC International para la CFAA, a futuro, se espera que se incremente la producción de biodiésel y diésel renovable y como consecuencia de esto se produzcan:
    - 187.000 empleos directos.
    - Pago de salarios por 8,8 billones de dólares.
    - Un impacto económico total de 61,6 billones de dólares.

A su vez, se espera que a nivel indirecto se espera que genere:

- 144.500 empleos en materia de construcción de nuevas instalaciones relacionadas con el biodiésel. Esto atendiendo a la necesidad de acomodar la producción adicional.
- 5,8 billones de dólares en salarios.
- Un impacto económico total de 4,3 billones de dólares (LMC International, 2022).

De acuerdo con la consultora, estos datos se estiman teniendo en cuenta la división real de producción/importación de Estados Unidos en 2021, que el 80 % de biodiésel es producido a nivel nacional y el 20 % de biodiésel es importado. Por tanto, los mismos se calculan suponiendo que el 100 % del biodiésel se produce internamente en Estados Unidos, es decir, no se importa biodiésel, junto con el impacto temporal de construir la capacidad adicional de biodiésel que se requeriría para producir seis mil millones de galones a nivel nacional (es decir, 7,5 mil

millones de galones de capacidad con una tasa de utilización del 80 %) (LMC International, 2022).

Por su parte, de acuerdo con datos de la Renewable Fuels Association (RFA), a 2018 la industria del etanol generó:

- Cerca de 25.000 millones de dólares de ingresos para los hogares estadounidenses.
- Un estimado de 4.800 millones de dólares de ingresos fiscales para el Tesoro Federal y 4.000 millones de dólares para los gobiernos estatales y locales.
- Más de 71.000 puestos de trabajo directos y casi 29.000 puestos de trabajo indirectos. Esto principalmente en los estados de Iowa, Nebraska e Illinois.

4.1.3.3 Contratos en firme

En los Estados Unidos, el etanol está hecho principalmente de maíz, con más de 210 plantas de etanol repartidas por el cinturón maicero estadounidense (conformado principalmente por los estados del norte y medio oeste), siendo capaz de producir más de 15.5 mil millones de galones (58.7 mil millones de litros) de etanol por año. Esto es más de lo que los consumidores y la industria de los Estados Unidos pueden usar, proporcionando una amplia oferta para la exportación (U.S. Grains, 2023).

De acuerdo con Noticias Puente (2023), los contratos de maíz en la Bolsa de Chicago cerraron la sesión con baja significativa en los precios, el mercado tuvo sus contratos más recientes presionados por la débil demanda en Estados Unidos para la producción de etanol. Según un análisis de XP Investimentos, las buenas exportaciones brasileñas de maíz y soja presionaron los precios internacionales, influyendo también en este movimiento a la baja. La debilidad del dólar frente a otras monedas y el buen comportamiento del petróleo en Nueva York, por el contrario, limitaron una nueva caída y ofrecieron apoyo a los contratos más lejanos, que registraron avances.

La producción de etanol de maíz en Estados Unidos cayó un 3,91 % en la semana terminada el 25 de agosto, alcanzando 1007 mil barriles por día, frente a 1048 mil barriles de la semana anterior (18), según datos de la AIE (Administración

de Información Energética). Los *stocks* de etanol en Estados Unidos pasaron de 22.790 millones de barriles a 21.609 millones de barriles en el mismo periodo comparativo, cayendo un 5,18 %. Cada barril equivale a 159 litros. Los contratos para entrega en diciembre de 2023 bajaron 6,00 centavos, o un 1,23 %, para cotizar a 4,80 USD 3/4 el bushel. Los contratos para entrega en marzo de 2024 cayeron 4,75 centavos, o un 0,94 %, para cotizar a 4,97 USD el bushel. (LMC International, 2022; Noticias Puente, 2023).

Tabla 34. Producción de etanol

SEMANAS	% PRODUCCIÓN	BARRILES PRODUCIDOS POR DIA	*STOCKS* DE BARRILES	% PÉRDIDA
Semana del 18 de agosto	3,92	1007	22.790	
Semana del 25 de agosto	3,91	1048	21.609	5,18

Tabla 35. Pérdida frente a los contratos

CONTRATOS	PÉRDIDA EN CENTAVOS	PÉRDIDA EN PORCENTAJE	PRECIO DE COTIZACIÓN DÓLARES
Contratos para entregar diciembre 2023	6,00	1,23	4,8
Contratos para entregar marzo 2024	4,75	0,94	4,97

La mayoría del bioetanol producido en Estados Unidos es para consumo propio, considerando que de los 15,35 mil millones de galones producidos se consumen 13,98 lo que corresponde al 91 % del etanol producido en el país, el restante, correspondiente a aproximadamente a 1,35 mil millones de galones, los cuales son exportados por el país y se importan alrededor de 69 millones de galones a Estados Unidos, convirtiéndose en el biocombustible de menor importación en el país y mayor productor y consumidores a nivel mundial (EIA, n.d.).

Existen créditos en determinados estados, así como programas que impulsan la investigación y el desarrollo con el fin de incluir a los biocombustibles a la matriz energética del área trasporte (Goldstein, 2010). Sin embargo, los contratos de

maíz no son significantes, existe una débil demanda en Estados Unidos para la producción de etanol.

Estados Unidos está desarrollando mecanismos y métodos de producción de biocombustibles lo que no permite tener acuerdos en firme, sin embargo, en los distintos tratados de libre comercio se incluyen la comercialización de biocombustibles.

4.1.4 Aspectos técnicos relacionados con la producción

4.1.4.1 Descripción de materias primas, pretratamiento, procesamiento, rendimiento, costo

El biodiésel es un combustible renovable que puede ser producido a base de aceites vegetales o grasas animales por lo general, el cual se produce a través de un proceso químico denominado transesterificación, que convierte la materia prima en un combustible que se puede utilizar en motores diésel sin ninguna modificación. La producción estadounidense de diésel renovable es del alrededor de los 3785 millones de litros al año, y podría alcanzar los 19.000 millones de litros para el año 2024, considerando que más del 30 % de la producción de aceite de soja de Estados Unidos se utiliza para fabricar biocombustibles, a pesar de tener un bajo contenido de aceite, en comparación con la mayoría de las materias primas. Sin embargo, los altos costos de producción de biodiésel, con relación al bioetanol, a partir del aceite de soja, que tiene un costo más elevado que los otros aceites, y que conlleva que la materia prima sea más costosa para el productor de biodiésel, han determinado, entre otros factores, como el mayor costo tecnológico para la instalación de plantas de biodiésel, que el principal biocombustible usado en Estados Unidos como materia prima para la producción de etanol sea el maíz, llegando a industrializar el 40 % de la producción para la generación del biocombustible y exportando aproximadamente el 31 % del maíz producido.

De acuerdo con la Renewable Fuels Association, Estados Unidos es el principal productor de bioetanol con un 55 % de la producción mundial (Renewable Fuels Association, 2023), que para el año 2022 alcanzó los 15.400 millones de galones, que ayudan a proteger la independencia energética del país americano,

al desplazar más de 600 millones de barriles de petróleo crudo. Asimismo, a la par de producir biocombustible, se genera alimento para animales a base de concentrados, donde un tercio de cada fanega procesada por una planta se utiliza para fabricar alimento para animales.

Los estados de Iowa, con 41 instalaciones de biorrefinerías de etanol, Nebraska, con 24, Minesota, con 19. y Dakota del Sur, con 16, son los principales estados donde hay mayor concentración de producción de etanol, considerando que se registran en Estados Unidos aproximadamente 118 industrias en expansión y 199 refinerías en operación, como se ilustra en la figura 28.

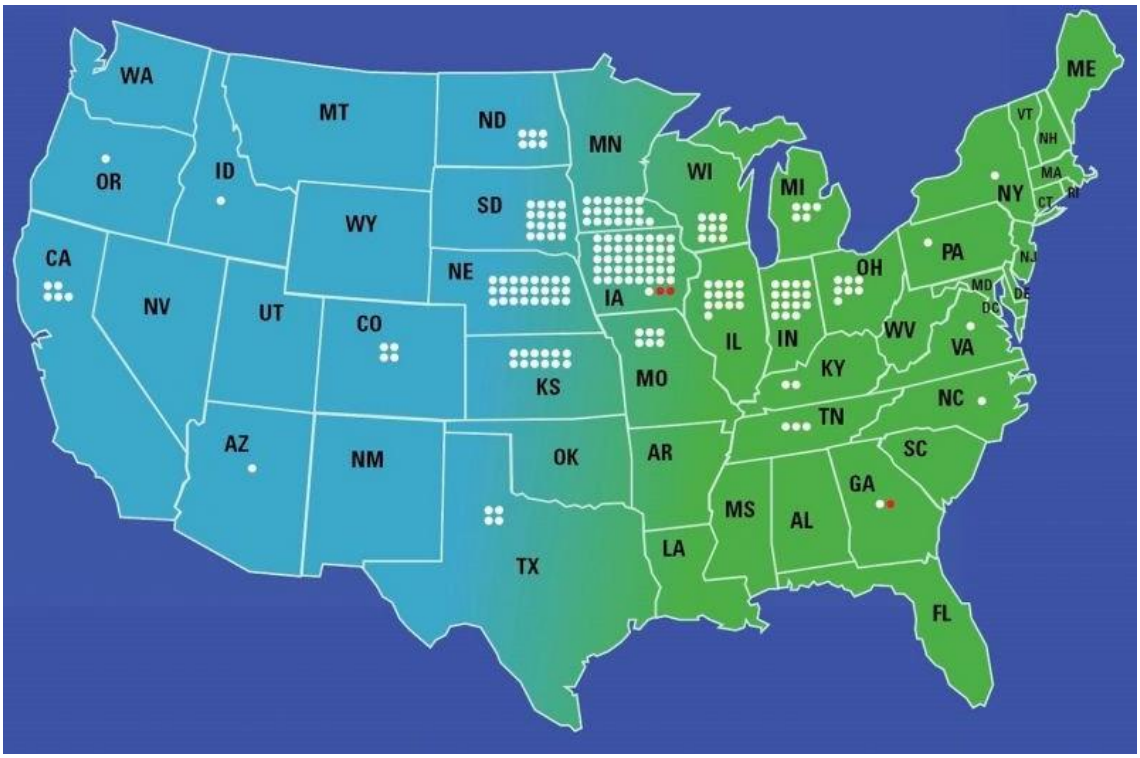


Figura 28. Biorrefinerías de etanol en Estados Unidos, 2022

Tomado de: (Renewable Fuels Association, n.d.-b)

La industria de combustibles renovables funciona de manera muy similar a una refinería química, convirtiendo el grano, la biomasa celulósica y otros productos llamados materias primas en etanol de alta eficiencia.

Al contrario de otras materias primas para la obtención de bioetanol, como la caña de azúcar, donde el rango de consumo de la caña no suele exceder los 60 km, desde su punto de producción hasta sus plantas de producción; que para el

caso de la materia prima a base de maíz, los costos logísticos de traslados a puertos para exportación en grano pueden resultar más costoso de lo que induce positivamente el industrializar el cereal en forma de bioetanol (Torroba et al., 2020), percibiéndose, en forma positiva, la obtención de otros coproductos, lo cual beneficia otros sectores, como la ganadería, por la producción de alimento para animales.

También se han venido desarrollando rutas alternativas de obtención de etanol, concentrándose en los métodos de segunda y tercera generación, los cuales consisten en la obtención del biocombustible partiendo de la hidrolisis enzimática de la celulosa proveniente de pastos y plantas fibrosas de gran presencia y adaptación en los Estados Unidos. El cultivo de caña de azúcar no es apto para el territorio estadounidense debido al clima, salvo algunos estados del sur, por ello no es contemplado como materia prima para la obtención de etanol.

Para el caso de Estados Unidos, aproximadamente el 90 % del etanol producido hoy proviene del proceso de molienda seca del grano y el resto de molinos húmedos. Según Álvarez Macien en el 2008 las plantas productoras de etanol por molienda seca constituían el 80 %.

La producción de etanol de primera generación tiene como base de materia prima al maíz, a partir de este precursor se desarrollaron varias líneas tecnológicas de las cuales dos son las más usadas actualmente. La principal diferencia entre ambos está en el tratamiento inicial del grano.

La primera de ellas, proceso conocido como molienda seca, es la predominante y consiste en la obtención de harina a partir de la molienda de los granos de maíz, a la que se le añade agua y enzimas para su cocción, posteriormente se le agrega levadura para fermentar la mezcla de harina, agua y enzimas, finalmente se obtiene el etanol por destilación.

La segunda línea tecnológica se conoce como molienda húmeda, implica la separación de la proteína del almidón mediante la cocción del grano de maíz en agua caliente, la fracción que contiene el almidón es molida para aislar el almidón para posterior secado. El almidón obtenido es usado en la obtención de azucares que una vez fermentados generan el etanol, esta vía productiva fue la primera en

desarrollarse, pero su uso esta declinando debido a su menor productividad, si se compara con la obtención a partir de molienda seca.

— *Proceso de etanol de molino seco*

Para el caso de la molienda en seco, como se ilustra en la figura 29, primero se muele todo el grano hasta obtener una harina, que luego se mezcla con agua para formar una *maza* o *pure* a la que se le añaden enzimas para convertir el almidón en azúcar que, posteriormente, se enfría y se transfiere a fermentadores. El paso siguiente es el de añadir levadura que convierte el azúcar en alcohol. Después de la fermentación, el producto resultante se separa del resto mediante un proceso de destilación, es decir, el etanol se destila y deshidrata, para posteriormente mezclarlo con aproximadamente un 2 % de gasolina para dar un uso netamente industrial y finaliza su proceso de producción para su posterior distribución. Adicionalmente, mediante una centrífuga se separan los sólidos de los solubles obteniéndose otros productos que se utilizan en la industria de alimento para animales.

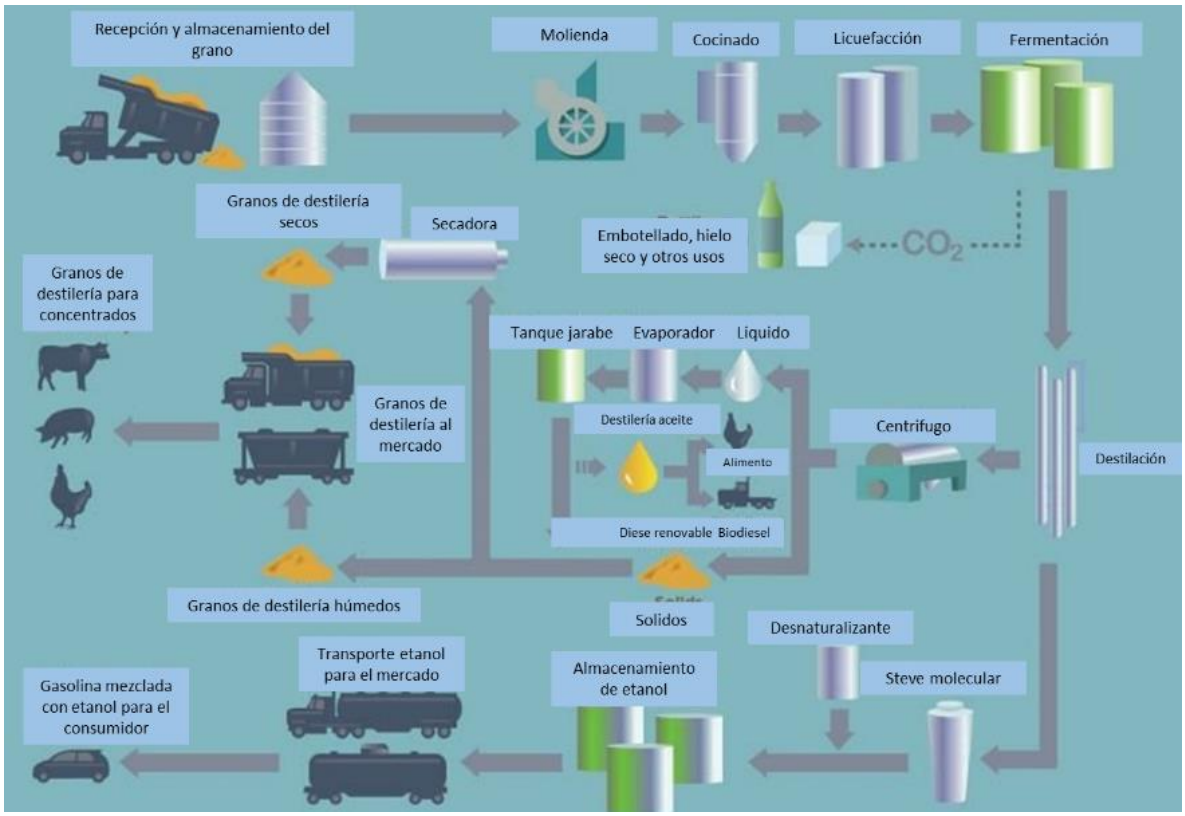


Figura 29. Proceso de etanol de molino seco

Tomado de (Renewable Fuels Association, n.d.-a)

— *Proceso de etanol de molino húmedo*

Para el caso de la molienda en húmedo, como se ilustra en la figura 30, el grano se separa primero de sus otros componentes mediante un remojo o empapado donde, a partir de la suspensión de los sólidos, se procesan a través de molinos para separar el germen del maíz de los componentes restantes, como la fibra, el gluten y el almidón. Este último se fermenta para obtener el etanol, mediante un proceso similar al proceso de molienda en seco, y el componente del gluten (proteína) se filtra y se seca para producir alimento para animales.

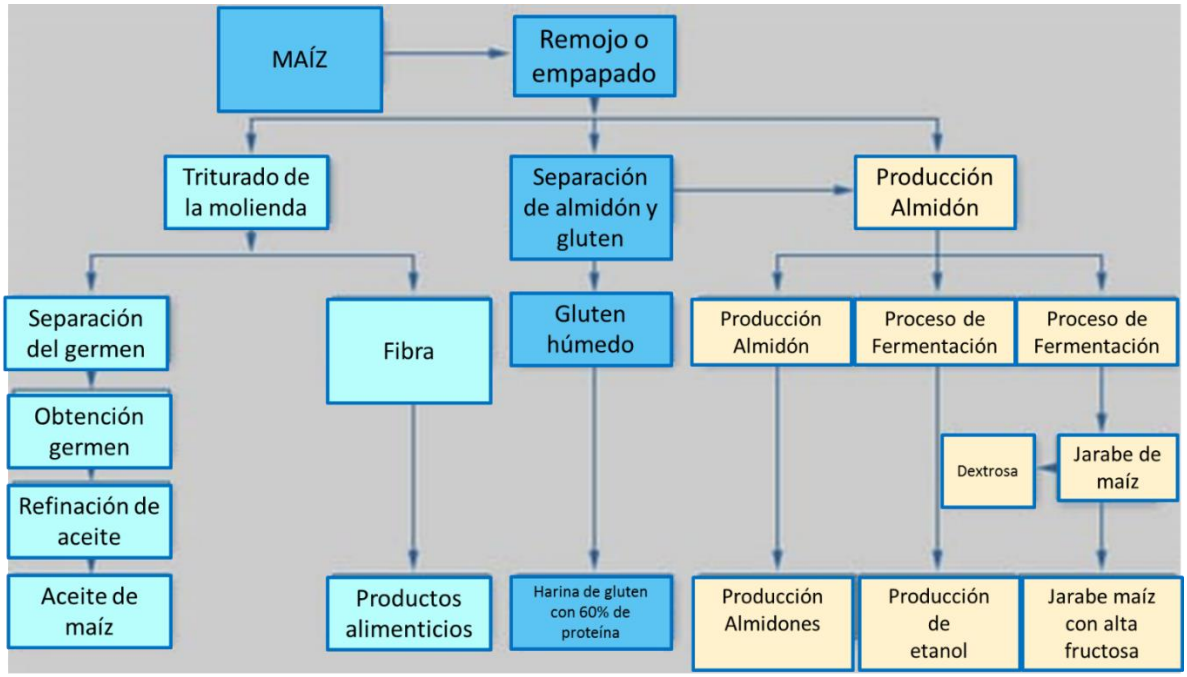


Figura 30. Proceso de etanol de molino húmedo

Tomado de: (Renewable Fuels Association., n.d.-a)

— *Cultivo de maíz*

De acuerdo con las condiciones climáticas, el cultivo del maíz en Estados Unidos se realiza entre 10 de abril y la primera semana de junio. En general, la mayoría de las variedades de maíz tienen un ciclo de vida de 100 a 120 días desde la siembra hasta la cosecha. Su cultivo se realiza en zonas de llanura y de forma

mecanizada con uso de tractor para la preparación del suelo; la sembradora deposita las semillas con la separación deseada y a una profundidad uniforme, consiguiendo una distribución adaptada a las necesidades de todo tipo de granos; la abonadora facilita la distribución de fertilizantes tanto orgánicos como químicos para lograr una producción con mejores resultados; cosechadora y segadora que permite llevar a cabo varias funciones poniendo fin al ciclo de la producción mediante la recolección de los productos.

La siembra del maíz se realiza generalmente a través de surcos apareados o en doble fila (*twin rows* en inglés), técnica que permite aumentar la densidad de plantas de maíz, sin perjudicar el desarrollo radicular y el crecimiento de las plantas, con distancias alrededor de 22 cm entre líneas y las cuales se separan con distancias de alrededor de 27 cm entre las plantas, disponiendo las semillas en zigzag, también conocido como tresbolillo. La separación entre los centros de líneas apareadas es de unos 0,72 m, logrando una mayor ocupación por parte de la superficie foliar y evitando competencia por luz solar, con lo cual se logra una densidad de 100.000 plantas por hectárea, pero que conlleva asimismo una mayor fertilización de alrededor del 20 % comparado con un sistema de siembra tradicional, con lo cual se ha generado una producción promedio de grano, en la última década, de aproximadamente 10 a 11 toneladas por hectárea.

— *Producción de maíz*

Con relación a la producción de maíz en Estados Unidos, para el periodo 2018 a 2023, la mayor cantidad de área plantada con 38.391.657 ha y un área cosechada de 35.246.445 ha. Con referencia a la producción de alcohol combustible a base de maíz, para el año 2018, se reporta la mayor cantidad con 195.688.228 m^3 y una posterior disminución llegando a 183.513.259 m^3 al año 2022. Con relación al rendimiento medio obtenido de producir alcohol combustible a base de maíz, para los años 2018 y 2021, se reportó el mayor rendimiento promedio con 15,4 m^3/ha, y para el año 2023, se prevé un rendimiento medio de 15,1 m^3/ha, como se relaciona en la tabla 36.

Tabla 36. Área plantada y cosechada y rendimiento del cultivo de maíz 2018 a 2023

Referencia	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Área plantada (ha)	35.964.761	36.318.455	36.685.505	37.737.686	35.846.593	38.391.657
Área cosechada (ha)	32.891.178	32.915.864	33.310.836	34.526.915	32.053.885	35.246.445
Alcohol combustible (m^3)	195.688.228	187.871.548	168.300.266	181.402.655	183.513.259	
Rendimiento medio (m^3/ha)	15,4	14,6	14,9	15,4	15,1	15,1

Tomado de: (National Agricultural Statistics Service, n.d.)

El nivel de contenido de humedad del grano de maíz es el principal indicador para determinar el momento de cosecha que preferiblemente debe ser menor al 30 o 35 % o incluso alrededor del 25 %, lo que permite una máxima acumulación de materia seca y menores costos de secado, como el reducir pérdidas por el uso de maquinaria al lograr un secado natural de las mazorcas en campo. Asimismo, esperar demasiado tiempo para cosechar el grano puede aumentar el riesgo de que los tallos se sequen y aumenten las pérdidas de rendimiento antes y durante la cosecha mecánica. En concreto, cuando la humedad del grano cae por debajo del 15 %, las pérdidas de la máquina aumentan en un 13 % (Stringfield & Anderson, 1954).

Con relación a la calidad de la materia prima, que para el caso del maíz como se indicó anteriormente, está dado por el manejo de la humedad del grano para la obtención de etanol y donde una alta concentración de almidón es un indicador de buenas condiciones de desarrollo del grano, pero inversamente proporcional a la concentración de proteína. De acuerdo con el décimo informe de la Calidad del Maíz para Exportación de 2020/2021, del U.S. Grains Council (USGC), como un organismo de consejo dedicado al fomento de la seguridad alimentaria mundial y al beneficio económico mutuo, la concentración de almidón promedio en Estados Unidos fue de 72,1 %, menor que en el periodo 2019/2020 con un 72,2 % y en el periodo 2018/2019 con un 72,3 % (U.S. Grains Council, n.d.).

Es de mencionarse asimismo, que con relación al tipo de materia prima que tiene el mayor potencial para producir biocombustibles con un balance energético positivo, una de las preocupaciones y controversias acerca de los agrocombustibles está relacionada con la eficiencia de la bioenergía, frecuentemente expresada como el balance neto de energía y que es la proporción entre la energía contenida en una unidad de agroenergía y la energía fósil requerida para producir esa unidad, para lo cual el etanol de maíz tiene, comparativamente, un desempeño bastante pobre con un rendimiento energético anual promedio de 70 GJ por hectárea y un balance energético neto de 1,5 frente al de la caña de azúcar y remolacha, que registra un rendimiento energético anual promedio de 120 y 140 GJ por hectárea y un balance energético neto de 8 y 2, respectivamente. (Pimental, 2005).

Asimismo, la eficiencia energética de convertir glucosa a etanol es de alrededor del 51,4 %, mientras que 48,6 % se atribuye a la producción de dióxido de carbono. La eficiencia de la producción del etanol del almidón sin humedad es de alrededor del 56,7 % (Saskatchewan Agriculture and Food, 1993).

Sin embargo, considerando que de una tonelada de maíz procesada se producen hasta 420 litros de etanol, en comparación con los 83 litros de etanol aproximadamente que se producen con una tonelada de caña de azúcar procesada, para el caso de Estados Unidos, esta desventaja se mitiga con las subvenciones que incentivan a los granjeros a cultivar más maíz que son específicas para los productores agrícolas primarios y/o para la rama de producción estadounidense de maíz, para lo cual, de acuerdo a la denominada Agriculture Improvement Act, de 2018, se cuenta con un presupuesto que se prevé alcance los 428 mil millones de dólares en cinco años, para programas de agricultura y nutrición, y 867 mil millones de dólares en diez años en materia de desembolsos a los productores, a través de programas de crédito por la conservación agrícola, el desarrollo rural, el comercio, la agricultura orgánica y la silvicultura, entre otros.

Estas subvenciones se pueden agrupar en tres grandes grupos, que condensan gran parte de los desembolsos en: programas de seguros agrícolas

con 38 mil millones de dólares en 5 años, programas específicos para commodities con 31 mil millones de dólares y programas de conservación con 29 mil millones de dólares, para lo cual en octubre de 2022, el Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA, por sus siglas en inglés) lanzó una herramienta web de asistencia para préstamos, con acceso a crédito a aproximadamente 115.000 productores que no pueden obtener suficiente crédito comercial a través de préstamos agrícolas directos y brindando alivios a prestatarios en dificultades, en coordinación entre la USDA y otras agencias federales, anunciando hasta 65 millones de dólares en subvenciones disponibles para el Programa Piloto de Protección y Estabilización del Trabajo Agrícola denominado Programa FLSP.

Asimismo, dentro de la estrategia de acuerdos con cooperativas agrícolas de la Agencia de Servicios Agrícolas (Farm Service Agency, FSA) asigna una porción de sus fondos a productores agrícolas y ganaderos principiantes que no pueden obtener financiación de prestadores comerciales (USDA, n.d.). Dentro de sus principales programas, se cuenta con:

- **Asistencia para Cultivos de Biomasa (Biomass Crop Assistance Program, BCAP)** que es un programa voluntario para propietarios y operadores de terrenos agrícolas y forestales, para la producción y uso de cultivos de biomasa para su posterior transformación en bioenergía, o para el desarrollo de productos de base biológica. El programa BCAP puede incluir: (a) áreas de proyecto, apoyando el establecimiento y mantenimiento de cultivos aptos durante hasta cinco años para cultivos anuales y perennes no leñosos, o durante hasta quince años para cultivos perennes leñosos para su posterior transformación en bioenergía o productos de base biológica. El apoyo puede incluir pagos anuales de hasta el 50 % de los costos para establecer cultivos aptos; y (b) equiparación de pagos, ayudando a los propietarios y operadores de terrenos agrícolas y forestales para la recuperación y traslado de residuos aptos agrícolas y forestales a una instalación de conversión de biomasa.

- **Programa de préstamos de conservación (Conservation Loan, CL)** para implementar técnicas que ayuden a conservar los recursos naturales mediante prácticas de conservación aprobadas por el Servicio de Conservación de Recursos Naturales (Natural Resources Conservation Service, NRCS); por ejemplo, para la instalación de estructuras de conservación, el establecimiento de la cubierta forestal, la aplicación de medidas de conservación del agua, el establecimiento o mejora de pasturas permanentes, la implementación de sistemas de gestión de abono y la adaptación de otras prácticas, técnicas o tecnologías de conservación emergentes o existentes.
- **Programa de Conservación de Reservas (Conservation Reserve Program, CRP)** que es un programa voluntario disponible para los productores agrícolas que planten, en tierras de cultivo sensibles desde el punto de vista ambiental, hierbas o árboles que ayuden a conservar los recursos en el largo plazo, con el fin de purificar la calidad del agua, controlar la erosión del suelo y mejorar el hábitat de la vida silvestre. A cambio, la FSA les ofrece a los participantes pagarles una renta y ayudarlos compartiendo los costos. La duración del contrato es de entre 10 y 15 años.

4.1.4.2 Tecnologías de producción (características técnicas, costo/beneficio ambiental y rendimiento técnico y energético)

Otro de los biocombustibles de producción en los Estados Unidos es el biodiésel, este se puede obtener a partir de diversos aceites vegetales, dentro de ellos de uso mayoritario el aceite de soja y en menor cantidad el aceite de maíz. La obtención de biodiésel de primera generación se realiza mediante el proceso llamado transesterificación, el cual a partir de aceite vegetal refinado, al hacerlo reaccionar con metanol, en un medio ácido o básico que funciona como catalizador, se obtienen los ésteres metílicos de ácidos grasos (FAME, *fatty acid methyl ester*) producto conocido como biodiésel. También se genera glicerina como subproducto, la cual es posteriormente separada. Una vez obtenido el biodiésel puro, puede ser mezclado con diésel de origen fósil (mezcla Bx) o ser usado 100 % puro (B100).

En el año 2000, fue establecida la Ley de Investigación y Desarrollo de la Biomasa (Biomass Research and Development Act) en la que se establece, a nivel federal, la coordinación de actividades encaminadas hacia la investigación y desarrollo de biocombustibles y los subproductos asociados a la transformación de biomasa, a cargo de los departamentos gubernamentales de energía (U.S. Department of Energy, DOE) y de agricultura (U.S. Department of Agriculture, USDA).

En 2022 y principios de 2023, comenzaron la producción de las siguientes ocho nuevas refinerías de diésel renovables (EIA, 2023):

- Planta de CVR Energys en Wynnewood, Oklahoma.
- Planta Diamond Green Dieseliess en Port Arthur, Texas.
- Planta de HollyFrontier en Artesia, Nuevo México.
- Planta de HollyFrontier en Cheyenne, Wyoming.
- Planta de energías renovables de Montana en Great Falls, Montana.
- Nueva planta Renewables Rise en Reno, Nevada.
- Planta de Seaboard Energy en Hugoton, Kansas.
- Planta de Shell en Norco, Louisiana.

La capacidad de producción actualmente programada para comenzar a operar podría permitir que el diésel renovable contribuya a una mayor proporción del consumo de diésel de la costa oeste, región marcada históricamente como al de mayor consumo y donde los productores pueden aprovechar créditos, como el RIN del RFS y créditos estatales de los programas estatales que apoyan los combustibles renovables. Un promedio de 520,000 b/día de fueloil destilado se consumió en la costa oeste en 2021.

También es la región importadora de diésel renovable más grande de los Estados Unidos, pronto podría satisfacer la mayoría de sus necesidades de combustible destilado del diésel renovable para 2025, si la capacidad doméstica de diésel renovable aumenta, de hecho, según lo programado.

Los datos más recientes sobre el consumo de energías renovables se presentan en la tabla 37.

Tabla 37. Consumo de energías renovables en Estados Unidos (miles de millones de Btu)

Fuente	2015	2016	2017	2018
Energía hidroeléctrica	2.321	2.472	2.767	2.667
Geotérmico	0.212	0.210	0.210	0,209
Solar	0,427	0,570	0.777	0,917
Viento	1.777	2.096	2.343	2.486
Biomasa de madera	2.312	2.224	2.278	2.360
Biocombustibles	2.153	2.287	2.304	2.283
Aguas residuales	0,518	0,503	0,495	0,487
Total	**9.720**	**10.362**	**11,173**	**11,409**

Fuente: Revisión Mensual de Energía, Producción y Consumo de Energía Renovable por Fuente

El biodiésel es considerado como uno de los más importantes biocombustibles a nivel mundial, sobre todo por su uso en la sustitución mediante mezcla con el diésel de origen mineral. El biodiésel se mezcla con el diésel mineral hasta en un 7 %. También se utiliza en labores de calefacción doméstica y en calderas específicas para biodiésel, entre otras. Se obtiene mediante un proceso químico en el que el aceite reacciona con un alcohol en presencia de un catalizador.

En función de la cantidad de biodiésel, incluida en la composición de un combustible, se utiliza una nomenclatura compuesta por la letra **B** y un número que indica la proporción de biodiésel en la mezcla con diésel derivado del petróleo. Así, pueden encontrarse desde el B2 (que contiene un 2 % de biodiésel) hasta el B100, que sería la forma pura de este biocarburante.

Al revisar los costos de producción de biodiésel, el aceite de soja tiene un costo más alto que los otros aceites, porque el cebo para procesarlo cuesta más. El costo de una planta de biodiésel depende de la capacidad de esta, la ubicación,

el diseño, el costo de los equipos y esto varía dependiendo del tipo de aceite que se utilice.

Para estimar los costos de instalación de una planta de biodiésel, es necesario considerar el costo estimado por galón de capacidad anual, es decir, que a manera de ejemplo, para una planta con capacidad de 5 millones de galones se tendría un costo de instalación que corresponderá a este costo estimado por galón, multiplicándolo por cinco millones de capacidad (en el ejemplo dado); sin embargo, siempre habrá que tener en cuenta la disminución de costos por la habilitación de las economías de escala, ya que los costos de instalación disminuirán significativamente, en la medida en que el tamaño de la planta aumente el número de galones en su capacidad final.

Los costos de procesamiento, sumando los costos de materiales, por mano de obra, de energía, depreciación de la planta e intereses, que pueden corresponder al 50 % del costo estimado por galón para esa planta con capacidad de 5 millones de galones al año del ejemplo considerado.

El costo de la materia prima generalmente se ha considerado como el gasto más alto para el productor de biodiésel. Por ejemplo, para aceites, puede llegar a calcularse alrededor del 115 % del costo estimado para el proceso industrial de un galón de biodiésel, multiplicado por el número de galones de la capacidad construida (y teniendo en cuenta las economías de escala), lo que finalmente resulta en un costo total de producción, en el que hay que sumar los costos de capital de aproximadamente 2,45 con relación al costo estimado por galón multiplicado por la capacidad de galones de la planta.

Si se consideran, por un lado, el retorno de la inversión al inversionista y por el otro, el mercadeo, el precio al detal de 100 % biodiésel, B100, puede llegar a ser de más de tres (3) veces el costo por galón estimado, por el número total de galones de capacidad, lo que, en este ejemplo, daría un margen de ganancia equivalente al 55 % o superior. Esto en Estados Unidos, con un Gobierno y una moneda estable.

Ahora bien, de acuerdo con la investigación adelantada por Cortés Sánchez et al., en su documento *Biocombustibles: tipos y estrategias de producción*, la

producción de bioetanol se ha desarrollado de acuerdo con la disposición de materia prima, lo que ha llevado a la aparición de tres generaciones diferentes atendiendo al tipo de materia prima usada:

- **Primera generación**

El maíz y la caña de azúcar se utilizan como materia prima para el bioetanol principalmente en los Estados Unidos y Brasil, mientras que el trigo y la remolacha azucarera se utilizan comúnmente en Europa.

La desventaja principal del etanol de primera generación es que la utilización de recursos alimenticios como combustible puede amenazar el suministro de alimentos a gran parte de la población, mientras que, por otro lado, también podrían aumentar los precios de los alimentos (*Biocombustibles: tipos y estrategias de producción)*.

- ***Segunda generación***

Se produce a partir de biomasa lignocelulósica, que incluye residuos forestales, residuos agrícolas y desechos urbanos, como pueden ser los lodos de depuradoras. El componente principal de estos residuos es la celulosa, aunque también aparecen otros compuestos como la lignina y la hemicelulosa. La compleja estructura de la hemicelulosa determina que su hidrólisis requiera múltiples hemicelulasas que cooperen entre sí. Para la producción de bioetanol a partir de material lignocelulósico es necesario realizar, por tanto, un pretratamiento, cuyo objetivo es el de degradar las largas cadenas de polisacáridos en cadenas más cortas y sencillas para su posterior hidrólisis enzimática.

Estos pretratamientos pueden ser:

- *Mecánicos o físicos:* trituración mecánica y ultrasonido.
- *Térmico:* explosión de vapor y agua líquida a alta temperatura (LHW).
- *Fisicoquímicos:* proceso de explosión de fibra con amoniaco (AFEX) y explosión con CO_2.
- *Químicos:* hidrólisis ácida, oxidación húmeda y tratamientos con ozono.

- *Biológicos:* tratamiento con hongos y tratamiento con biosolventes orgánicos.

A estos pretratamientos le sigue la hidrólisis enzimática, que es un proceso catalizado por celulasas. Esta hidrólisis es llevada a cabo por diversos tipos de bacterias y hongos.

Entre los organismos conocidos con mayor capacidad de hidrólisis de celulosa se encuentran *Caldicellulosiruptor bescii* y *Trichoderma reesei*.

Tras la hidrólisis comienza el proceso de fermentación, el cual puede presentar dos problemas principales: la producción de diversas moléculas inhibidoras del crecimiento de los organismos fermentadores durante el pretratamiento y la liberación de xilosa, subproducto poco asimilable de la degradación de la hemicelulosa. *Saccharomyces cerevisiae* es el microorganismo que se suele utilizar para esta fase debido a su alta tolerancia a los inhibidores, su alta tasa de crecimiento y su capacidad para utilizar pentosas como la xilosa en la fermentación.

- **Tercera generación**

Para superar las desventajas de las dos generaciones anteriores, se planteó el uso de algas tanto micro como macroscópicas para la producción de bioetanol. Esto se debe a que las algas suponen una fuente renovable que posee diversas ventajas, entre las que destacan la rápida generación de biomasa en tiempos cortos y que su cultivo puede realizarse en tierras no destinadas al cultivo de vegetales comestibles.

El proceso de obtención de bioetanol a partir de algas es similar al que se sigue en el caso de los residuos lignocelulósicos. Sin embargo, aquí el pretratamiento no es necesario, ya que su estructura es degradable directamente mediante una hidrólisis ácida para posteriormente realizar el proceso de fermentación mediante *Saccharomyces cerevisiae*.

La segunda generación es actualmente la más estudiada. La ventaja de este proceso es que presenta una huella nula, incluso negativa, de CO_2. La materia prima más utilizada, es el residuo lignocelulósico procedente de la industria maderera y de residuos agroindustriales.

Este residuo representa una de las fuentes biológicas más infrautilizadas e infravaloradas, y se ve como una fuente prometedora de biocombustibles en los Estados Unidos y algunos otros países.

El 75 % de la biomasa vegetal se compone de polisacáridos. Hay un depósito de azúcares enorme que no se aprovecha dentro de la agricultura, ya que la fracción de azúcares que se aprovecha para la alimentación es ínfima en comparación con los polisacáridos que se presentan en la pared celular del resto de la planta, es decir, de las partes no comestibles.

Desde el punto de vista más simple, esta materia puede quemarse para generar calor y electricidad.

— *Otras tecnologías a partir de biomasa*

Hay dos rutas principales para la obtención de biocombustibles líquidos a partir de biomasa: La primera involucra procesos termoquímicos, que presenta la ventaja de convertir prácticamente toda la materia en bioetanol. La segunda es la bioquímica. Como desventaja de esta última, hay que mencionar que solo puede convertir una fracción de los polisacáridos, siendo así el rendimiento muy bajo.

- **Torrefacción**

El concepto de torrefacción normalmente se interpreta como un asado o pirólisis leve. En este proceso se somete a la lignocelulosa a unas temperaturas de entre 230 y 300 °C. Esto tiene como resultado una evaporación de agua y de compuestos volátiles, que permite un mejor aprovechamiento de la energía en los procesos posteriores; por esto también recibe el nombre de pretratamiento.

Este proceso por sí solo obtiene un rendimiento muy bajo en la producción de biocombustibles.

- **Licuación**

En este proceso se aplican temperaturas de entre 280 y 370 °C a altas presiones (4-22 MPa) en presencia de agua. No se conocen del todo los mecanismos responsables, pero se cree principalmente que los procesos de hidrólisis y descomposición de las moléculas son los que favorecen la producción de biocombustibles. En la hidrólisis las moléculas se rompen en monómeros de

azúcares sencillos gracias a las altas temperaturas, presión y presencia de agua. En la descomposición se pierden las moléculas de agua, provocando deshidratación, descarboxilaciones y la volatilización del grupo amino de algunas proteínas.

El problema principal de esta técnica es el ambiente oxidante que se genera. Así, se crean radicales libres que acaban polimerizando entre sí, creando una red extensa continua de carbono, que deriva en la formación de carbón. Para evitarlo, se emplean agentes reductores (donadores de hidrógeno), siendo los más usados son compuestos orgánicos.

Se llegan a conseguir concentraciones aproximadamente del 50 % de biocombustibles líquidos.

- **Pirólisis**

La característica principal de este proceso es la ausencia de oxígeno. Normalmente se emplea a presión atmosférica y muy altas temperaturas (de 400 a 700 ºC). Se subdivide en dos procesos: pirólisis lenta y pirólisis rápida. La lenta, está enfocada a la producción de carbón a temperaturas un poco más bajas. La rápida, se centra en la producción de biocombustibles a más altas temperaturas. El mecanismo de acción responsable es la descomposición radical, generando compuestos altamente reactivos ricos en oxígeno. Es por esta razón que los biocombustibles de primera línea producidos en esta técnica no puedan usarse como tal, ya que su poder calorífico es bajo.

Primero deben sufrir un tratamiento con catalizadores oxidorreductores, como zeolitas o algunos basados en metales, que eliminen el oxígeno de los biocombustibles. Normalmente, estos procesos requieren de una fuente adicional de hidrógeno para su reducción. Lo más usual es el uso de compuestos orgánicos reductores.

- **Gasificación**

Como su nombre indica, la gasificación convierte directamente la biomasa, pretratada o no, en *syngas* (término inglés proveniente de las siglas *synthesis gas*,

“gas de síntesis”), que es un gas con unas concentraciones relativamente constantes de metano, monóxido de carbono, dióxido de carbono e hidrógeno.

Hay varios tipos de gasificación, pero el más usado es aquel que emplea agua supercrítica. Normalmente ocurre a temperaturas de entre 700 y 900°C a muy altas presiones. La gasificación es una prolongación de los procesos anteriormente descritos, en la cual el carbón y el biocombustible generado se siguen degradando a moléculas más pequeñas, generando rápidamente el syngas.

La razón de obtener *syngas* es la utilización de éste para, posteriormente, sintetizar metanol mediante la reacción de síntesis de Fischer Tropsch.

— *Producción de bioetanol a partir de lodos de depuradoras*

Debido a que el proceso de obtención a partir de materiales lignocelulósicos tiene un coste elevado por la necesidad de pretratar la materia prima, se plantea la búsqueda de nuevas materias primas. Éstas deben ser residuos abundantes, pero que no genere competencia con otros sectores. Por ello, algunos estudios se centran en la obtención de bioetanol a partir de lodos de depuradoras, que es un residuo continuo, con idea de proponer una bioeconomía circular. En concreto, los estudios se centran en determinar cuáles son las condiciones óptimas para la producción de bioetanol a partir de lodos de depuradora.

Para el estudio de las condiciones óptimas, primero realizan un pretratamiento de los lodos, donde son secados, troceados en partículas de menos de 3 mm y posteriormente pasadas por un tamiz para asegurar la uniformidad del tamaño de las partículas. A continuación, los lodos son humedecidos con agua destilada hasta alcanzar un 40 % en humedad y a un proceso de autoclave para eliminar cualquier microorganismo presente. Posteriormente, se inoculan 3 ml de *Bacillus flexus*.

La incubación con dicho microorganismo durará 48 h a 30 °C. Esto es así para que se produzca la sacarificación, algo totalmente necesario para la posterior fermentación con *S. Cerevisiae*. Al hidrolizado que se obtiene después de la incubación con *B. flexus* se le tiene que añadir una serie de nutrientes que

ayudarán al proceso de fermentación, además de la levadura, que es la responsable de la producción de bioetanol.

Los factores más importantes que afectan a la producción son: el periodo de incubación, la temperatura, el pH, la concentración de glucosa y la concentración de levadura (inóculo). Por esto, hay que prestar gran atención a los parámetros mencionados y estudiar qué ocurre si existen variaciones.

De acuerdo con lo investigado por Cortés Sánchez et al., quienes estudiaron estas condiciones por separado, incubando a distintas temperaturas (15-45 °C), a diferentes concentraciones de la levadura (2-10 % v/v) y glucosa, pH y durante diferentes tiempos (10-70 h), para luego centrifugar el medio y determinar la concentración de bioetanol y los azúcares reductores, se comprobó que el tiempo de incubación óptimo fue de 10 horas (tiempo medio), debido a que tiempos demasiado largos dan concentraciones altas de bioetanol que acaban siendo tóxicas para *S. Cerevisiae* y que además disminuye la concentración de nutrientes.

Respecto a la temperatura, a altas temperatura el microorganismo comienza a estresarse e incluso se da la desnaturalización de proteínas, perdiendo así la capacidad enzimática, mientras que a bajas temperaturas la actividad enzimática no se efectúa. Por ello, determinan que la temperatura es un factor crítico que debe mantenerse a 30 °C.

Del mismo modo, con relación al pH, la fermentación es sensible a los cambios de pH porque los iones H+ pueden cambiar la carga de la membrana plasmática, produciendo una bajada de la permeabilidad de los nutrientes en la levadura. El pH óptimo es de 6,5.

Por otro lado, la concentración de la glucosa también es importante, ya que es un metabolito esencial para la fermentación. A mayor concentración más bioetanol se producirá, pero llegados a cierto punto la producción disminuye drásticamente debido a efectos inhibidores de la glucosa a altas concentraciones.

La concentración óptima de glucosa es del 80 %. Por último, la concentración óptima de la levadura se determinó en un 6 %.

— *Proceso de transesterificación para la producción de biocombustibles*

La transesterificación (alcoholisis) es la reacción de una grasa o aceite (aceite de girasol) con un alcohol (metanol) para formar ésteres (biodiésel) y glicerol. Actualmente, la transesterificación es el proceso más utilizado para la producción de biodiésel a partir de aceite de girasol. Se utilizan catalizadores para mejorar la reacción, como puede ser KOH, consiguiendo una mejora en la velocidad y en el rendimiento. Debido a que la reacción es reversible, un exceso de etanol hace que se desplace el equilibrio hacia los productos (biodiésel y glicerol). El coproducto, glicerol, es recuperado debido a su valor como producto químico de gran valor industrial.

Respecto a las condiciones necesarias para que se lleve a cabo de manera óptima la transesterificación, el catalizador debe estar a 0,28 % p/p, la temperatura debe ser de 70 °C y deben presentarse dos lavados, uno con agua ligeramente ácida gracias a la presencia de ácido fosfórico y el otro con agua pura.

Aún no se puede llevar a cabo la producción industrial de biodiésel a partir de aceite de girasol, ya que aún no se han superado las limitaciones que se presentan en las investigaciones adelantadas.

Hay equipos de investigación que optan por la mezcla de aceites de avellana junto con el de girasol para obtener una mayor cantidad de materia prima.

— *Proceso de gasificación para la producción de biogás*

El biogás es un gas rico en energía producido por descomposición anaeróbica o conversión termoquímica de biomasa. El biogás está compuesto principalmente de metano (CH_4), el mismo compuesto en gas natural, y dióxido de carbono (CO_2). El contenido de metano del biogás crudo (no tratado) puede variar desde 40-60 %, con CO_2 constituyendo la mayor parte del resto junto con pequeñas cantidades de vapor de agua y otros gases.

El biogás se puede quemar directamente como combustible o tratar para eliminar el CO_2 y otros gases para su uso como el gas natural. El biogás tratado puede llamarse gas natural renovable o biometano.

La descomposición anaeróbica de la biomasa ocurre cuando las bacterias anaeróbicas —bacterias que viven sin la presencia de oxígeno libre— comen y se descomponen, o digerir biomasa y producir biogás. Las bacterias anaeróbicas ocurren naturalmente en los suelos, en cuerpos de agua como pantanos y lagos, y en el tracto digestivo de humanos y animales.

El biogás se forma y se puede recolectar de vertederos municipales de desechos sólidos y estanques de retención de estiércol de ganado. El biogás también se puede producir en condiciones controladas en tanques especiales llamados digestores anaeróbicos. El material que queda después de que se completa la digestión anaeróbica se llama digestato, que es rico en nutrientes y se puede usar como fertilizante.

La conversión termoquímica de biomasa en biogás se puede lograr a través de gasificación. El Departamento de Energía de Estados Unidos apoya la investigación sobre gasificación de biomasa para producción de hidrógeno.

El biogás puede calificar como combustible renovable para la generación de electricidad según los estándares de cartera renovable para cada estado. También califica bajo los estándares federales de Estados Unidos.

Casi todo el biogás que ahora se consume en los Estados Unidos se produce a partir de la descomposición anaeróbica y se usa para la generación de electricidad.

- **Sobre la recolección y uso de biogás de vertederos**

Los vertederos de residuos sólidos municipales son una fuente de biogás. El biogás es producido naturalmente por bacterias anaeróbicas en vertederos de residuos sólidos municipales y se llama gas de vertedero.

El gas de vertedero como tiene un alto contenido de metano puede ser peligroso para las personas y el medio ambiente, porque el metano es inflamable. El metano también es un gas un responsable generador del efecto invernadero. El biogás contiene pequeñas cantidades de sulfuro de hidrógeno, un compuesto nocivo y potencialmente tóxico cuando se encuentra en altas concentraciones.

En Estados Unidos, los agricultores han entendido por mucho tiempo la necesidad de cuidar el aire, tierra y agua. Saben que las granjas son más

productivas y eficientes cuando se las cuida adecuadamente. La protección de los recursos naturales protege sus resultados y también puede mejorarlos.

Los agricultores siempre están buscando formas de ganarse la vida y ser buenos administradores de la tierra, por lo que la industria emergente del biogás es tan importante para la América rural. En todo el país, los sistemas de biogás que capturan el metano de las operaciones agrícolas y lo utilizan para generar energía renovable actualmente proporcionan suficiente energía renovable para alimentar el equivalente a casi 70.000 hogares estadounidenses promedio.

Por ejemplo, en el condado de Kewaunee, Wisconsin, donde la agricultura es el tercer empleador líder de los residentes del condado, hay dos digestores anaeróbicos, tanto en granjas lecheras como en tres parques eólicos en operación.

Colectivamente, estos sistemas generan suficiente energía para apoyar y mantener a 8000 hogares. Con un total de 8900 hogares ubicados en el condado, la energía renovable está prácticamente alimentando a todo el condado.

El potencial para la industria del biogás está bien demostrado, pero todavía hay relativamente pocos sistemas de biogás en uso en granjas en todo el país. La investigación indica que otras 8000 operaciones ganaderas son candidatas para apoyar proyectos de biogás, además de los 239 digestores anaeróbicos que operan actualmente en granjas en todo el país.

Si se realizara todo su potencial, una industria de biogás rentable podría producir suficiente energía del sector ganadero para alimentar un millón de hogares estadounidenses promedio.

Es por eso por lo que la “Hoja de ruta de oportunidades de biogás”, publicado hoy por la Administración de Obama, es muy crítico. Es compatible con el Plan de acción climática: estrategia para reducir las emisiones de metano y describe acciones voluntarias para apoyar la expansión de la industria estadounidense del biogás y ayudarla a alcanzar su máximo potencial.

Un plan integral para enfrentar el cambio climático debería abordar el metano y las emisiones de carbono. El metano es el segundo gas de efecto invernadero más frecuente emitido en los Estados Unidos a partir de actividades humanas,

responsable de aproximadamente el 9 % de las emisiones de gases de efecto invernadero de los Estados Unidos.

El uso de biogás reduce las emisiones de metano, reduce las emisiones asociadas con la quema de combustibles fósiles y respalda la estrategia energética “todo lo anterior” de la Administración norteamericana.

La Hoja de Ruta de Oportunidades se basa en el progreso realizado hasta la fecha para abordar algunas de las barreras que actualmente limitan el desarrollo de biogás y apoya los esfuerzos voluntarios para reducir las emisiones de metano que ya están en marcha en todo el país. También refleja el compromiso de continuar trabajando con las partes interesadas de la industria en la identificación de pasos para expandir la industria del biogás, incluso a través del desarrollo de nuevas tecnologías.

El secretario de Agricultura y la industria láctea de Estados Unidos renovaron una asociación en apoyo de un objetivo voluntario de la industria para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero de las granjas lecheras en un 25 % para 2020. Los sistemas de captura de metano son un componente importante de este esfuerzo, y los agricultores se benefician significativamente por el avance de esta tecnología.

Es importante señalar que la intensidad de las emisiones de la producción de carne y leche en los Estados Unidos es mucho menor hoy que hace algunas décadas. Un informe reciente de la FAO mostró que la producción de leche y carne de vacuno en América del Norte se encuentra entre las más eficientes del mundo en términos de emisiones de GEI por unidad de producción. Con el despliegue de tecnología rentable para utilizar biogás, las operaciones podrían capturar mayores ingresos con emisiones reducidas y otros beneficios, ofreciendo un “gana-gana” para agricultores, comunidades y el país.

La Hoja de Ruta de Oportunidades también establece un plan para los Estados Unidos. El Departamento de Agricultura, Departamento de Energía, etc., y la Agencia de Protección Ambiental (EPA, n.d.) utilizarán los programas existentes para mejorar el uso de sistemas de biogás en los Estados Unidos mediante la realización de investigaciones para acelerar el desarrollo de productos de base

biológica a partir de sistemas de biomasa y el fortalecimiento de programas que apoyan a los agricultores estadounidenses mientras instalan estos sistemas en sus operaciones, entre otras cosas.

Los agricultores estadounidenses tienen una larga historia de innovación y un fuerte compromiso con la conservación. Estos esfuerzos son más importantes que nunca, a medida que enfrentamos los desafíos planteados por una variabilidad climática y climática cambiante. Apoyar y expandir la industria del biogás, utilizando el plan descrito en la Hoja de Ruta de Oportunidades de Biogás, ayudará a fortalecer esos esfuerzos al tiempo que apoya nuevas oportunidades para los agricultores estadounidenses, fortaleciendo la economía americana y, en última instancia, contribuye a que Estados Unidos sea más seguro al aumentar la independencia energética.

— *Proceso de purificación para la producción de biocombustibles*

En medio de la creciente demanda mundial de energía y los apremiantes problemas ambientales, hay un creciente interés en la producción de combustibles y productos químicos a partir de recursos renovables. La biomasa celulósica es una fuente sostenible de combustibles orgánicos, productos químicos y materiales. Será el recurso en última instancia barato y abundante para producir biocombustibles y productos químicos.

El obstáculo central que impide la utilización generalizada de la biomasa celulósica es la ausencia de una tecnología de procesamiento de bajo costo. La consolidación de procesos y los avances en la ingeniería metabólica pueden conducir potencialmente a un nuevo avance en la conversión bioquímica basada en la tecnología de biocombustibles celulósicos de hidrólisis enzimática.

En Estados Unidos están surgiendo proyectos que buscan desarrollar un nuevo proceso integrado para la producción de biocombustibles a partir de biomasa celulósica, implementando una nueva estrategia de consolidación. Los nuevos microorganismos que se utilizarán en el proceso se diseñarán mediante ingeniería metabólica.

Los objetivos para desarrollar un nuevo proceso que potencialmente puede reducir el costo de la producción de biocombustibles a partir de biomasa celulósica

es el desarrollo de nuevos biocatalizadores para la producción de biocombustibles a partir de biomasa celulósica y estudiar la dinámica del proceso.

Los métodos de proyecto de la ingeniería metabólica se utilizan para crear los microorganismos diseñados. Los principios de ingeniería de procesos, como la ingeniería de reactores, la transferencia de masa y calor se utilizan para optimizar el proceso.

En Estados Unidos, de acuerdo con la información publicada por la Universidad de California Davis, en el desarrollo de un nuevo proceso integrado para la producción de biocombustibles a partir de biomasa celulósica (proyecto patrocinado por el Instituto Nacional de Alimentación y Agricultura de los Estados Unidos de América), se están usando además métodos estadísticos para diseñar experimentos y procesar datos experimentales por parte de estudiantes, los cuales son el público objetivo, ya que este proyecto proporciona una plataforma de capacitación e investigación para ellos.

En una escala mayor, las industrias emergentes de biorrefinería y toda la comunidad de biocombustibles son también el principal público objetivo, ya que se están generando nuevas tecnologías y nuevos conocimientos que sientan las bases para la ciencia y la ingeniería de la bioconversión en Estados Unidos. Los cambios planteados a los problemas evaluados han planteado este cuestionamiento: ¿Qué oportunidades de formación y desarrollo profesional ha brindado el proyecto? La subvención proporcionó oportunidades de capacitación para dos estudiantes graduados, cinco estudiantes universitarios y un investigador postdoctoral.

¿Cómo se han difundido los resultados a las comunidades de interés? Se han disimulado los resultados mediante la publicación de manuscritos en revistas revisadas por pares, presentaciones y carteles en conferencias internacionales y reuniones de la junta de productos básicos.

¿Qué se planea hacer durante el próximo periodo de informe para lograr los objetivos? Respuesta que en Estados Unidos actualmente se construye con el apoyo económico por parte del Instituto Nacional de Alimentación y Agricultura de Estados Unidos (fuente de financiación: Proyecto Escotilla).

4.1.4.3 Implicaciones de carácter agrario

Con relación a las implicaciones de carácter agrario del uso del suelo y asociados al desarrollo de los biocombustibles alternativos en la matriz energética de Estados Unidos, el debate alrededor de la industria de los biocombustibles se centra en relación a la producción de alimentos o combustibles, donde a la producción de etanol a base de maíz se le atribuye un aumento de los precios de los alimentos, considerando que a partir de la implementación del RFS y la Ley de Seguridad e Independencia y Energéticas (EISA, Energy Independence and Security Act), en 2005 y 2007, se produjo un mayor volumen de producción de maíz para etanol en lugar de que para alimentos.

Esta situación fue criticada en 2008 por la organización Global Humanitarian and Development Organization y Oxfam International, que señalaron que los agricultores destinaban una mayor producción de maíz para la generación de etanol, dado que les representaba mayores utilidades (Minnesota Bio-Fuels Association, 2023). En contraposición a este debate, con base a datos más recientes del Departamento de Agricultura de Estados Unidos, el uso de maíz para etanol para el periodo 2021-2022, correspondió aproximadamente a 49.5 mil millones de galones, y se esperaba que el suministro total de maíz alcanzará los 152.39 mil millones de galones, con un 32 % de destinación de la producción a la fabricación de etanol (USDA, 2022).

En este mismo sentido, la Universidad de Minnesota, en su informe Economic Contribution of Minnesota’s Ethanol Industry, estimó para el estado de Minnesota que se convirtieron 4227.3 millones de galones de maíz en 2021 en 1,27 mil millones de galones de etanol, 332,2 millones de libras de aceite de maíz y 3,7 millones de toneladas de DDG suficientes para alimentar a 1,8 millones de vacas, 2,2 millones de cerdos y 55,5 millones de pavos y pollos, comparado con el potencial de las granjas de Minnesota que tienen 2,3 millones de bovinos, 9,5 millones de cerdos y 49,5 millones de aves de corral (Tuck, 2022), datos que controvierte la teoría con relación a la destinación de producción de maíz para etanol.

Asimismo, un informe de ABF Economics, indicó al respecto, que con relación al análisis de los precios de los alimentos medidos por el índice de precios al consumidor de los Estados Unidos, los precios minoristas de los alimentos aumentaron a un ritmo más lento desde que entró en vigor el Estándar de Combustibles Renovables (RFS), comparado con datos de cinco años antes de la aplicación del RFS y donde la demanda de etanol no es el factor que más contribuye al aumento de los precios del maíz, como si lo es el aumento de los precios de la gasolina y la mayor demanda mundial de alimentos y productos agrícolas, considerando que los altos precios de la gasolina impactan el costo de la agricultura, mientras que los costos de fertilizantes y transporte están más correlacionados con los precios del petróleo y estos sí impactan los precios de los alimentos (Urbanchuk, 2013).

4.1.4.4 Estrategias de recolección, tratamiento y transporte de materias primas (experiencia y gestión en aprovechamiento de aceite usado de cocina)

El aceite usado de cocina (*used coocking oil*, UCO), que se ha utilizado para la producción de biodiésel, conlleva una logística para su generación, que implica su recolección, transporte y tratamiento en la cadena y mercado de este producto dentro de la economía circular y de las energías renovables, como una materia prima con oportunidad para la producción del denominado diésel renovable.

Con referencia a la etapa de recolección, esta conlleva los mayores desafíos, ya que no se ha avanzado con estrategias eficientes para impulsar su adecuada disposición, y que generalmente consisten en contenedores de recolección UCO según la capacidad de producción, los cuales posteriormente son transportados a las industrias procesadoras.

El tratamiento del aceite usado de cocina, para su reutilización, conlleva el ser sometido a un tratamiento especial porque contiene partículas de comida y agua hasta un 50 % y que puede disminuir el contenido de ácidos grasos libres (AGL). Para el caso de Estados Unidos, se registran empresas como Western Mass Rendering Co., INC, G.A. Wintzer & Son Co, Kruger Commodities, Inc., DAR PRO Solutions, Mendota Agri-Products e Inc. Headquarters, las cuales desarrollan

este tipo de procesos (Emyle Lucia Britton et. al, 2017). Estas empresas por lo general desarrollan su actividad a partir de la firma de una autodeclaración o contrato con el generador por la recolección del aceite de cocina usado de pequeños restaurantes, grandes cadenas de restaurantes, establecimientos de preparación de alimentos e instalaciones de procesamiento, entre otras, para lo cual se estima que cada año, se generan anualmente alrededor de 10 millones de toneladas de aceite de cocina usado provenientes de aceite de origen vegetal (Gui, 2008).

De manera general el procedimiento de recolección del UCO consiste en:

- La empresa recolectora entrega un contenedor de grasa que se adapta a sus necesidades.
- El servicio se programa automáticamente con frecuencia según la capacidad del tanque y el volumen de aceite de cocina usado.
- El material se transporta y se procesa para su reutilización en una planta de procesamiento para la producción de biocombustibles de combustión limpia.

Dentro de los procedimientos normativos y estándares de calidad que deben desarrollar este tipo de industrias, está el mantener un plan de análisis de peligros y puntos críticos de control (plan HACCP es un plan operativo para controlar y gestionar los peligros en la industria alimentaria), para garantizar que los productos estén libres de contaminantes y sean seguros de usar. Además, deben certificarse dependiendo del estado, por la Industria de Productores de Proteínas Animales (APPI, Animal Protein Producers Industry), según el Código de Prácticas de la Industria del Rendering, el Departamento de Bioseguridad de la Industria del Rendering y la Asociación Estadounidense de la Industria de Piensos (AFIA), el Programa de Certificación de Alimentos Seguros, e inspeccionados anualmente por la Administración de Medicamentos y Alimentos de los Estados Unidos (U.S. Food & Drug Administration., 2023) y el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA, 2022).

Dentro de las diferencias y ventajas, entre biodiésel y diésel renovable, como se considera al UCO, se pueden mencionar:

- A diferencia del biodiésel, se produce de una manera que produce un biocombustible químicamente idéntico al diésel de petróleo.
- A diferencia del biodiésel, el UCO o diésel renovable no tiene problemas de flujo de frío ni restricciones de transporte.
- Facilidad de transportar porque puede introducirse en el oleoducto existente para distribuirlo a los minoristas de diésel o venderse como una alternativa baja en carbono al diésel de petróleo.
- Se beneficia de su mayor índice de cetano, entre 75 y 90, frente a 48 y 55 del diésel de petróleo.
- El cetano del biodiésel varía dependiendo de si proviene de aceites de cocina o grasas animales, con una puntuación de entre 46 y 60.
- El diésel renovable se quema de manera más limpia y completa que el diésel de petróleo y es una alternativa superior al biodiésel.

4.1.4.5 Porcentaje de mezclas de biocombustibles

— Sobre las mezclas de diésel

En Estados Unidos, la mayoría del biodiésel se consume en mezclas con diésel en las siguientes relaciones (EIA, 2022a):

- B2: 2 % de biodiésel en mezcla
- B5: 5 % de biodiésel en mezcla
- B20: 20 % de biodiésel en mezcla
- B100: 100 % de biodiésel

Algunos vehículos de flota usan biodiésel neto (B100). Gran parte del diésel de petróleo se vende en el país con hasta 1 % de biodiésel por sus propiedades lubricantes que ayudan a prolongar la vida útil de algunos componentes del motor. Éste solo se añade al derivado del petróleo en las terminales de mezcla de los camiones cisterna para distribución local (EIA, n.d.).

De las mezclas de biodiésel, B20 (20 % de biodiésel en mezcla) es la más común porque su uso representa un balance en los costos, emisiones (20 % de reducción de emisiones respecto a B100), rendimiento en clima frio y

compatibilidad con motores convencionales. Las flotas reguladas que usan B20 o superior pueden optar a créditos por uso de biodiésel acorde con la política energética de 1992. La mezcla B20 debe seguir las especificaciones de calidad prescritas en la norma ASTM 7467 (U.S. Department of energy, 2023), que corresponde al estándar para mezclas de diésel de petróleo y biodiésel (B6 a B20).

Los usuarios de biodiésel deben consultar las declaraciones de garantía de sus vehículos y motores previo a su uso. Los motores que funcionan con B20 tienen consumo de combustible, potencia y torque similar a los que usan diésel, tienen entre el 1 y 2 % menos energía por galón que el diésel, pero la mayoría de los usuarios dice no notarlo (U. S. Department Of Energy, 2023).

Mezclas de alto nivel, como el B100, tienen menor frecuencia de uso como combustibles en el sector transporte por falta de incentivos regulatorios y precios. Este biocombustible tiene propiedades como disolvente, permitiendo limpiar el sistema de combustión de un vehículo y liberar los depósitos acumulados que luego pueden obstruir los filtros (U. S. Department Of Energy, 2023).

Al emplear mezclas de alto nivel, se deben considerar los siguientes aspectos (U. S. Department Of Energy, 2023):

- El biodiésel puro tiene menos energía volumétrica que el diésel. Cuanto mayor sea el porcentaje de biodiésel en la mezcla (> 20 %), menor será el contenido energético por galón.
- Pueden afectar las garantías de los motores.
- Se puede gelificar a bajas temperaturas.
- Se pueden presentar problemas de almacenamiento únicos.
- Puede aumentar las emisiones de óxidos nitrosos, aunque reduce en gran medida otras emisiones.
- Requiere manipulación especial y modificaciones en los equipos.
- Para evitar problemas en los motores B100, debe cumplir con las especificaciones de la ASTM 6751 (incluye características para biodiésel grado 1-B y 2-B, el grado 1-B es especial para aplicaciones a bajas temperaturas).

— *Sobre las mezclas de etanol*

En el caso del bioetanol, la proporción en la mezcla con gasolina varía según la región y la estación durante el año. En general, la mezcla no excede el 10 % (en volumen) de etanol en gasolina (E10). El uso de E85 se da en el medio oeste de Estados Unidos y existen alrededor de 4180 estaciones públicas de E85 en el país (EIA, n.d.).

Todos los modelos de vehículos en Estados Unidos pueden usar E10, solo los vehículos ligeros con modelo 2001 o posterior pueden usar mezclas superiores y los vehículos de combustible flexible pueden usar E85, estos tienen una identificación o placa con términos como E85, *flex fuel* o FFV (EIA, n.d.).

Sin embargo, el uso de etanol en mezclas resulta en una menor economía de combustible (millas recorridas por galón), en relación con la gasolina pura porque el etanol contiene el 67 % del contenido energético del combustible fósil por galón. Para contrarrestarlo, el Gobierno ha desarrollado diferentes políticas para impulsar el uso del etanol en mezclas con gasolina (EIA, n.d.).

El 98 % de la gasolina estadounidense contiene hasta un 10 % de etanol para aumentar el octanaje, cumplir los requisitos de calidad del aire o satisfacer la Norma de Combustibles Renovables (U. S. Department Of Energy, 2023).

El mandato de mezclas para biodiésel y bioetanol en Estados Unidos se resume en la Tabla 2020.

4.1.4.6 Mecanismos de producción

Los mecanismos de producción de bioetanol más utilizados en Estados Unidos son:

— *Proceso de hidrólisis*

De acuerdo con lo expresado por los ingenieros químicos, Oscar Julián Sánchez y Carlos Ariel Cardona, en su investigación *Producción biotecnológica de alcohol carburante I: obtención a partir de diferentes materias primas* (Publicación de la Asociación Interciencia), para obtener etanol a partir de almidón es necesario romper las cadenas de este polisacárido para conseguir jarabe de glucosa, el cual se puede convertir en etanol (EtOH) mediante las levaduras. Por ello, se debe

incluir una etapa adicional de hidrólisis (rompimiento, degradación) de este biopolímero. De cada 100 g de almidón se pueden obtener teóricamente 111 g de glucosa, lo que implica una relación estequiométrica de 9:10.

En Estados Unidos, los mencionados ingenieros expresan que el etanol se obtiene en mayor medida a partir de almidón de maíz. El almidón fue tradicionalmente hidrolizado mediante ácidos, pero la especificidad de las enzimas, sus condiciones suaves de reacción y la ausencia de reacciones secundarias han hecho que las amilasas sean los catalizadores usados para esta tarea.

Para la hidrólisis del almidón, se usa la a-amilasa obtenida de bacterias termorresistentes como *Bacillus licheniformis* o *B. amyloliquefaciens*, lo que la hace ideal para la primera etapa de la hidrólisis de las suspensiones de almidón que tienen que ser llevadas a altas temperaturas (90-110 °C) para el rompimiento de los gránulos de almidón, condición necesaria para el tratamiento enzimático.

El producto de esta etapa o licuefacción es una solución de almidón que contiene dextrinas (oligosacáridos compuestos por varias unidades de glucosa) y pequeñas cantidades de glucosa. El almidón licuado se somete a sacarificación a menores temperaturas (60-70 °C) con glucoamilasa obtenida de *Aspergillus niger* o de especies de *Rhizopus* (Nigam & Singh, 1995), la cual hidroliza las dextrinas hasta glucosa, de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$(C_6H_{10}O_5)_n \xrightarrow[\text{á-amilasa}]{} \text{Dextrinas} \xrightarrow[\text{glucoamilasa}]{} nC_6H_{12}O_6$$

Almidón — Glucosa

En la molienda húmeda se obtiene del grano, además de almidón, fibra, gluten, germen y aceite, que son subproductos de alto valor. Los rendimientos de etanol pueden llegar a 403,1L/ton (Gulati et al., 1996). Por otro lado, en la molienda en seco no se fracciona el grano en sus componentes por lo que todos sus nutrientes entran al proceso y son concentrados en un subproducto de destilación empleado para alimentación animal llamado granos secos de destilería (DDG, por sus siglas en inglés), lo que compensa, en cierta medida, los costos del proceso (McAloon et al., 2000).

Cuando los granos secos de destilería se mezclan con solubles concentrados provenientes de la evaporación de las vinazas ligeras se obtienen los granos secos de destilería con solubles (Sánchez & Cardona, 2005). Los rendimientos de alcohol para la molienda en seco son de 419,4-460,6 L/ton (Gulati et al., 1996).

Los ingenieros Sánchez y Cardona colocan como ejemplo a Francia, aunque se obtiene alcohol a partir de melazas de remolacha azucarera, también se produce a partir de trigo alcanzando rendimientos de 0,357L EtOH/kg de trigo mediante el proceso Biostill (Ehnstroem, 1984).

Se ha reportado la producción de etanol a partir de otros vegetales que ofrecen una alta concentración de almidón como sorgo (du Preez et al., 1985), papa, papa dulce, yuca (Nigam & Singh, 1995; Hosein & Mellowes, 1989), harina de yuca y ñame (Hosein y Mellowes, 1989). La yuca representa una importante fuente alternativa de almidón no sólo para la producción de etanol sino para la obtención de jarabes glucosados, considerando además que es uno de los diez cultivos tropicales más importantes.

Se ha propuesto la hidrólisis de la harina de yuca para obtener soluciones de glucosa mediante un reactor enzimático de membrana de fibra hueca con conversiones de 97,3 % (López-Ulibarri & Hall, 1997). Uno de los cultivos más perspectivos es el sorgo dulce, el cual produce granos con altos contenidos de almidón, tallos con altos contenidos de sacarosa y hojas y bagazo con alto contenido de lignocelulosa. Esta planta se puede cultivar tanto en países templados como tropicales, requiere 1/3 del agua necesaria para el cultivo de la caña de azúcar y la mitad de la cantidad necesaria para el maíz, y es muy resistente a la sequía, a las inundaciones y a condiciones de salinidad alcalina (Winner Network, 2002; du Preez & Prior, 1985).

— *Proceso de fermentación*

Hay varias formas de fabricar biocombustibles, pero generalmente utilizan reacciones químicas, fermentación y calor para descomponer los almidones, azúcares y otras moléculas de las plantas. Los productos resultantes se refinan para producir un combustible que puedan utilizarlos coches u otros vehículos.

Gran parte de la gasolina de Estados Unidos contiene uno de los biocombustibles más comunes: el etanol. Fabricado mediante la fermentación de los azúcares de plantas como el maíz o la caña de azúcar, el etanol contiene oxígeno que ayuda al motor del automovil a quemar el combustible de forma más eficiente, reduciendo la contaminación del aire. En Estados Unidos, donde la mayor parte del etanol se obtiene del maíz, el combustible suele contener un 90 % de gasolina y un 10 % de etanol. En Brasil, segundo productor de etanol por detrás de Estados Unidos, el combustible contiene hasta un 27 % de etanol, siendo la caña de azúcar la principal materia energética.

4.1.4.7 Capacidad de producción y consumo de biocombustibles

De acuerdo con el informe de la Administración de Información Energética de Estados Unidos (U.S. Energy Information Administration, EIA), del 22 de agosto de 2022, la mayoría de la capacidad de producción de combustible de etanol de los Estados Unidos, a principios de 2022, estaba en el medio oeste (figura 31).

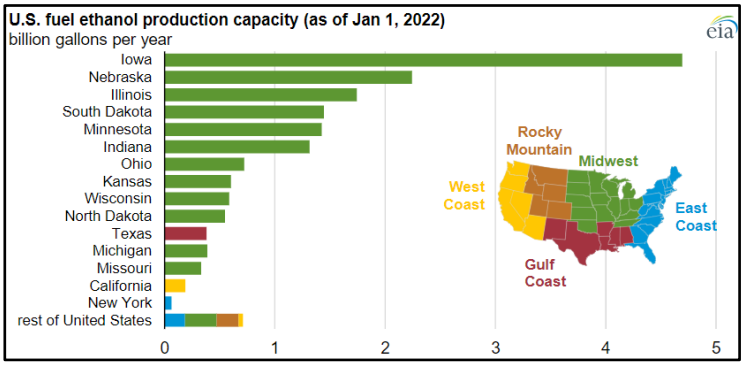


Figura 31. Capacidad de producción de etanol combustible de Estados Unidos

Fuente de datos. Administración de Información Energética de Estados Unidos, Capacidad de producción de etanol combustible de Estados Unidos en 2022.

A partir del 1º de enero de 2022, la capacidad de producción de plantas de biocombustibles en los Estados Unidos alcanzó los 21 mil millones de galones por año (gal/año) de 275 instalaciones activas. Más de cuatro quintos de la capacidad de producción fue para combustible de etanol. De los trece (13) estados con mayor capacidad de producción de combustible de etanol, doce (12) se

encuentran en el medio oeste. Y de los tres (3) estados que sobresalen por su mayor capacidad de producción (Iowa, Nebraska e Illinois), contienen la mitad de la capacidad total de producción de etanol del país.

Sobre la capacidad de producción de bioetanol en los Estados Unidos, para el 1º de enero de 2022 se totalizó en 17.400 millones de galones, según lo informado por 192 productores del país, presentándose una disminución de 0,200 millones de galones al compararlo desde principios de 2021.

Los productores de biodiésel operan 72 plantas en todo el país. En enero de 2022, la capacidad de producción de biodiésel en los Estados Unidos totalizó 2.300 millones de galones, presentándose también una disminución de 0,200 millones de galones desde enero de 2021.

Más de la mitad de la capacidad de producción de biodiésel en territorio americano se encuentra en el medio oeste, principalmente en Iowa, Misuri e Illinois. El resto se encuentra principalmente en las costas del golfo y el oeste (figura 32).

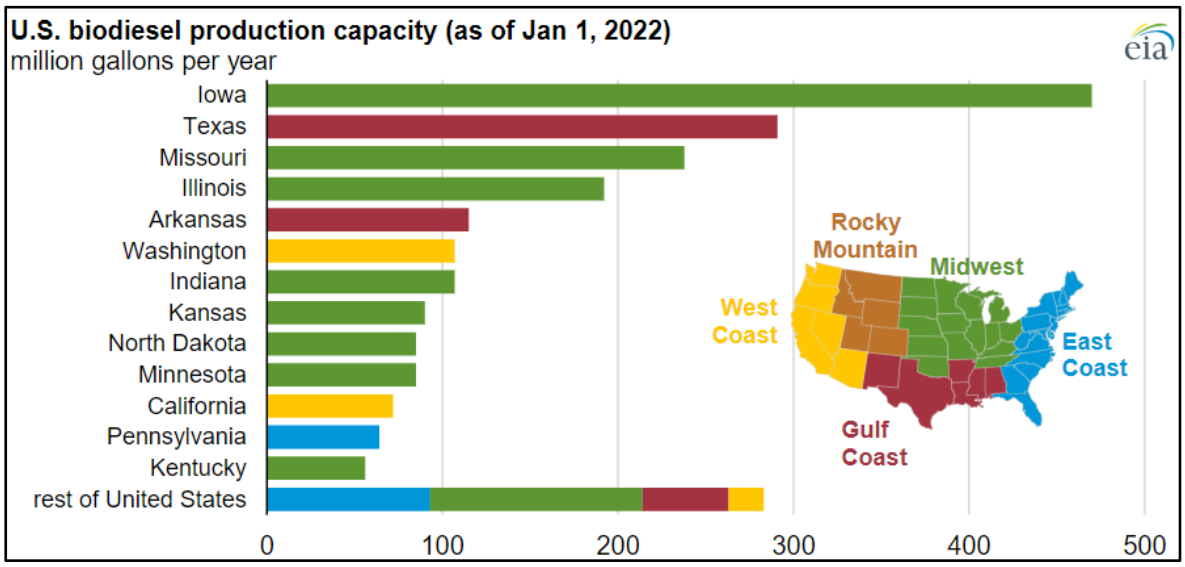


Figura 32. Capacidad de producción de biodiésel de Estados Unidos (al 1º de enero de 2022) (millones de galones por año)

Fuente. Administración de Información Energética de Estados Unidos, Capacidad de producción de plantas de biodiésel 2022

En otra categoría mucho más pequeña de producción de biocombustibles, once (11) productores de combustible renovable estaban operando en los Estados Unidos a partir del 1º de enero de 2022. Las instalaciones producen combustible diésel renovable, combustible para calefacción renovable, combustible para aviones renovables, nafta renovable, gasolina renovable y otros biocombustibles y productos biointermedios. Su capacidad de producción combinada totaliza 1800 millones de galones, más del doble de lo que era a principios de 2021 (figura 33).

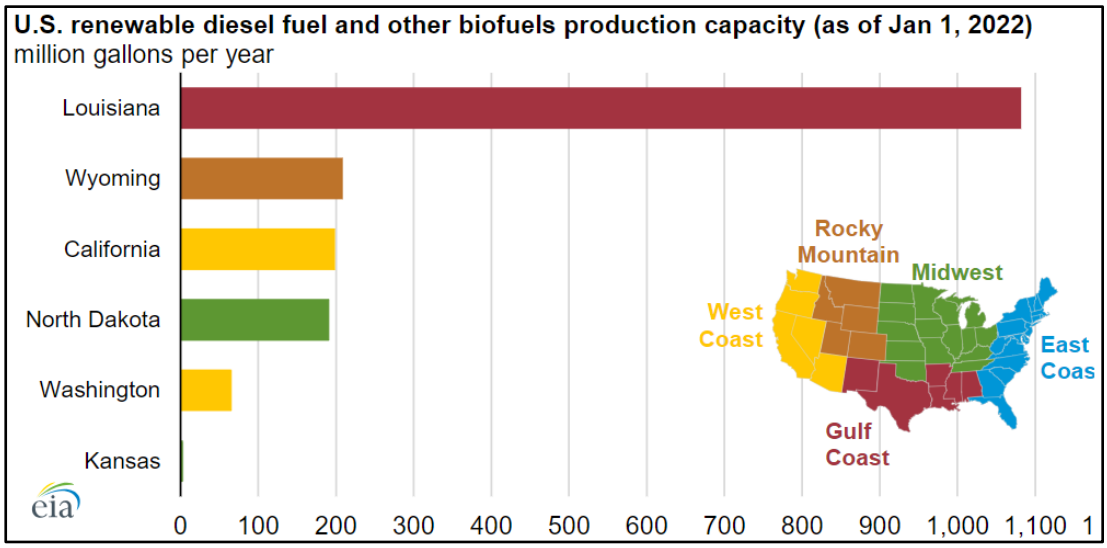


Figura 33. Capacidad de producción de combustible diésel renovable y otros biocombustibles de Estados Unidos (al 1º de enero de 2022) (millones de galones por año)

Fuente de datos. Administración de Información Energética de Estados Unidos, 2022. Capacidad de producción de plantas de combustible diésel renovable y otros biocombustibles en Estados Unidos

Los productores de combustible de etanol representaron el 81 % de la capacidad total de producción de biocombustibles de los Estados Unidos, seguidos por los productores de biodiésel con el 11 % y por los productores de combustible diésel renovable y otros biocombustibles con el 8 %.

Por otro lado, anteriormente, el 8 de agosto de 2022, la Administración de Información Energética de Estados Unidos (EIA, por sus siglas en inglés) publicó los otros dos informes anuales sobre la capacidad de producción de plantas de biodiésel y de combustibles diésel renovables y otras plantas de biocombustibles. El informe sobre el etanol se publicó el 22 de agosto, ya citado.

En resumen, estos tres informes incluyen la capacidad de producción de biocombustibles para plantas operativas a partir del 1º de enero de 2022. Los nombres de las plantas informadoras están organizados por estado y región.

En la actualidad, el mundo globalizado ha entendido la necesidad de aumentar la utilización de los biocombustibles, en razón de la prioridad que significa para la humanidad la urgente reducción de la huella de carbono, sobre todo para los subsectores de la producción agraria, el transporte y la industria, subsectores que han aprovechado el concepto de la “transición energética” (entendida como el sistema planificado y regulado de generar acciones de corto y mediano plazo, con un máximo de cinco años, que encarnen un cambio significativo en la forma de producir, distribuir y consumir las diversas formas de energía utilizadas históricamente, con el objetivo último de implementar acciones de investigación aplicada en torno a disminuir y/o evitar las emisiones GEI, utilizando modelos de producción más limpia y eficiencia energética, entre todos los actores de la producción).

En este sentido, en los Estados Unidos, la prioridad ha seleccionado aquellos subsectores cuya descarbonización, desde el punto de vista científico y tecnológico, sea un importante desafío para sus connacionales, subsectores importantes para la producción nacional, como el transporte de mercancías por carretera y los subsectores marítimo y aéreo, el agro y la industria, en general.

Los combustibles fósiles han soportado el desarrollo de estas actividades, pero sus efectos en relación con el cambio climático y la salud pública han sido, según algunos reconocidos investigadores, catastróficos para la Tierra y sus habitantes. Por esto, desde el descubrimiento y posterior auge de los biocombustibles de origen vegetal, en Estados Unidos se han desarrollado el bioetanol, el diésel renovable y el biodiésel, como alternativas reales de mitigación y adaptación al cambio climático.

En enero de 2023, la capacidad de producción estadounidense de diésel renovable y otros biocombustibles alcanzó los 3 mil millones de galones por año, superando por primera vez la capacidad de producción de biodiésel en Estados Unidos. Los crecientes objetivos de los programas estatales y federales de

combustibles renovables y la renovación de los créditos fiscales al diésel basado en biomasa están impulsando este crecimiento en la capacidad de diésel renovable en el país.

La recopilación de datos sobre la capacidad estadounidense de diésel renovable (hidrodiésel) y otros biocombustibles, desde 2021, indica que la capacidad de producción de diésel renovable y otros biocombustibles se ha más que triplicado en Estados Unidos. Mientras que, la capacidad de biodiésel disminuyó un 13 %. La razón es porque el diésel renovable es un combustible químicamente equivalente al diésel de petróleo y casi idéntico en sus características de rendimiento. No ocurre lo mismo con el biodiésel, que es químicamente diferente del diésel de petróleo.

La capacidad general de producción estadounidense de biocombustibles, que incluye diésel renovable, biodiésel, etanol y otros biocombustibles, alcanzó los 23 mil millones de galones por año (gal/año) en enero de 2023, un aumento del 6 % en la capacidad de producción total desde enero de 2022. El combustible de etanol representó el 78 % de la capacidad de producción de biocombustibles, el diésel renovable y otros biocombustibles representaron el 13 %, y el biodiésel el 9 % (figura 34).

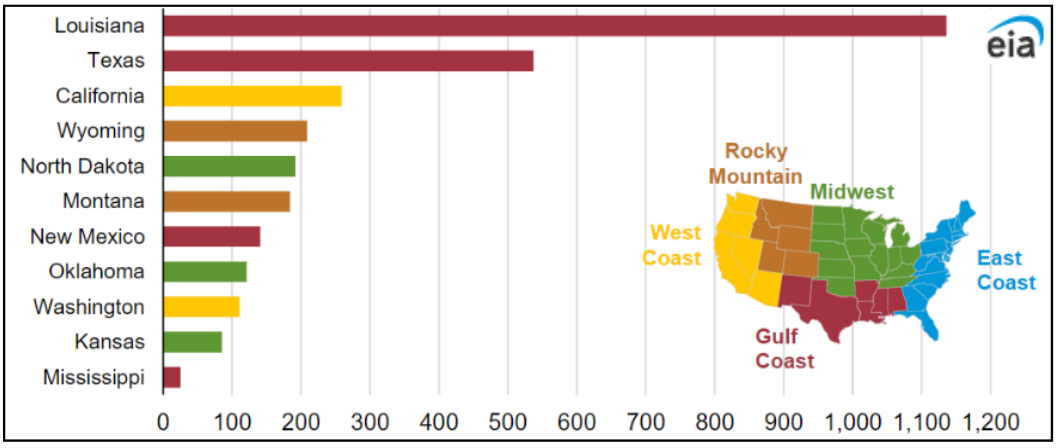


Figura 34. Capacidad de producción de combustible diésel renovable y otros biocombustibles de EE. UU. (a 1º de enero de 2023) (en millones de galones por año)

Fuente de datos: Administración de Información Energética de Estados Unidos. Informe sobre la capacidad de producción de plantas de combustible diésel renovable y otros biocombustibles de 2023.

Entre enero de 2022 y enero de 2023, la capacidad de producción de Estados Unidos para producir diésel renovable y otros biocombustibles aumentó en 1,25 mil millones de galones por año, un aumento del 71 % con respecto a 2022.

En enero de 2023, once (11) estados informaron sitios con capacidad de producción de diésel renovable y otros biocombustibles, frente a seis (6) estados en 2022. Un ejemplo de un estado con capacidad nueva y creciente es Texas, que no tenía capacidad de diésel renovable y otros biocombustibles en enero de 2022.

Para enero de 2023, Texas tenía 537 millones de gal/año de capacidad, la segunda más alta después de Luisiana. A diferencia del etanol y el biodiésel, donde los estados del medio oeste poseen la mayor parte de la capacidad nacional, más del 60 % de la capacidad de producción de diésel renovable y otros biocombustibles de Estados Unidos se encuentra en la costa del golfo.

El biodiésel representa actualmente la proporción más pequeña de la capacidad de biocombustibles de Estados Unidos, 2100 millones de gal/año en enero de 2023.

La capacidad de biodiésel disminuyó en 169 millones de gal/año desde enero de 2022 a enero de 2023. El medio oeste tiene el 70 % de la capacidad de biodiésel de Estados Unidos, que se encuentra principalmente en Iowa, Misuri, Illinois e Indiana. Los productores de etanol combustible de esa región siguen teniendo la mayor capacidad en el mercado de biocombustibles del país americano.

La capacidad de etanol combustible aumentó en 283 millones de gal/año entre 2022 y 2023. Más del 90 % de la capacidad de etanol estadounidense se encuentra en el medio oeste, donde se cultivan las materias primas para etanol (maíz), principalmente, en Iowa, Nebraska, Illinois y Dakota del Sur.

El Informe de capacidad de producción de plantas de combustible diésel renovable y otros biocombustibles de 2023 (U.S. Renewable Diesel Fuel and Other Biofuels Plant Production Capacity Report) (EIA, n.d.) incluye la capacidad de producción de biocombustibles para las plantas operativas al 1º de enero de

2023, con los nombres de las plantas informantes organizados por estado y región. Una de las conclusiones específicas que se consolidó fue que casi todo el diésel renovable estadounidense se consume en California; la mayoría no se hace allí.

California representa casi todo el consumo de diésel renovable en los Estados Unidos, pero la mayor parte no se fabrica en ese estado. El consumo de diésel renovable de California fue más de ocho (8) veces la cantidad producida allí en 2021. En cambio, la mayor parte del diésel renovable de California se produjo en otros estados o se importó, principalmente de Singapur.

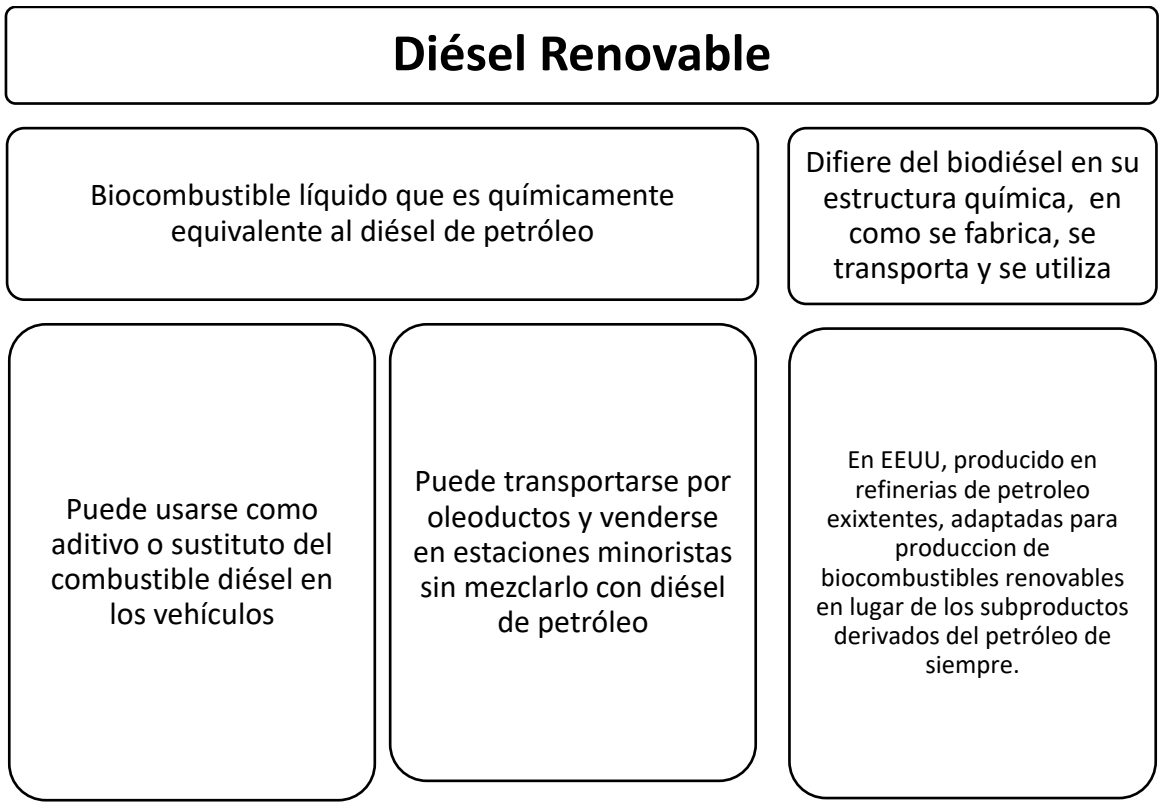


Figura 35, Algunas características del diésel renovable

El consumo de diésel renovable de California creció sustancialmente después de que su estándar de combustible bajo en carbono (LCFS, por sus siglas en inglés), entró en vigor en 2011. Entre 2011 y 2021, el consumo creció de

1 millón de barriles a 28 millones de barriles por año, más de dieciocho (18) veces su volumen original.

El LCFS de California exige que los combustibles para el transporte utilizados en el estado se mezclen con biocombustibles para reducir su intensidad de carbono. California es el único estado que ofrece un reembolso a los clientes que compran diésel renovable específicamente, aumentando el uso de diésel renovable en el estado a medida que se vuelve más competitivo económicamente con el biodiésel.

Otros estados tienen varias leyes e incentivos para el biodiésel. Oregón fue el único otro estado donde se consumió diésel renovable en 2021, pero representó menos del 1 % del total de Estados Unidos. Oregón exige que el combustible diésel de petróleo vendido en el estado se mezcle con biodiésel o diésel renovable.

A partir de 2023, Washington también comenzó a exigir que el diésel de petróleo se mezcle con biodiésel o diésel renovable, pero no informó ningún consumo de diésel renovable en 2021. Seis (6) estados (Luisiana, Dakota del Norte, California, Wyoming, Washington y Kansas) representaron toda la producción de diésel renovable en los Estados Unidos en 2021.

Muchas de las plantas en los otros estados tienen acuerdos exclusivos para enviar todo el diésel renovable que producen a distribuidores en California.

Luisiana, con su importante infraestructura petrolera, ha sido el estado con mayor producción de diésel renovable desde 2011. En Luisiana, se produjeron más de 9 millones de barriles de diésel renovable en 2021, aproximadamente el 46 % del total de Estados Unidos.

Una planta ubicada en Norco, Luisiana, tiene la mayor capacidad de producción de diésel renovable de Estados Unidos, unos 64.000 barriles diarios. La capacidad de producción de diésel renovable de Estados Unidos podría más que duplicarse para 2025, impulsando la producción nacional. Se espera que tanto la producción como el consumo de diésel renovable sigan creciendo en los Estados Unidos durante los próximos años.

La información sobre el diésel renovable y otros biocombustibles se tomó del Sistema Estatal de Datos Energéticos (SEDS). Recientemente se publicaron nuevas estadísticas de diésel renovable en SEDS, incluidas estimaciones anuales de producción y consumo de diésel renovable por estado para 2011 hasta 2021. Anteriormente, solo se publicaron datos de producción y consumo de diésel renovable a nivel de Estados Unidos.

Otra conclusión indicó que los biocombustibles están desplazando el consumo de fueloil destilado a base de petróleo en la costa oeste (figura 36).

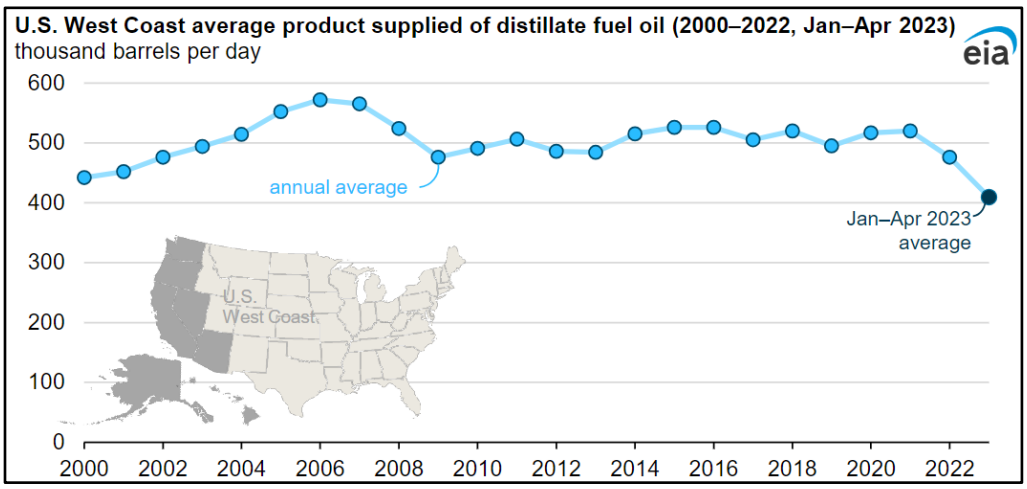


Figura 36. Producto promedio suministrado de aceites combustibles destilados de la costa oeste de EE. UU. (2000-2022, enero-abril de 2023)

Fuente de datos: Administración de Información Energética de EE. UU., Petroleum Supply Monthly

En 2022, el consumo de destilados de la costa oeste de Estados Unidos, medido por el producto suministrado, estuvo en su nivel más bajo desde 2002 y está en camino de caer aún más este año. El creciente uso de biocombustibles en lugar de diésel de petróleo es la principal causa del descenso.

El diésel renovable tiene una participación cada vez mayor en el mercado de combustible diésel de la región porque los programas de combustibles limpios han proporcionado incentivos para su consumo. El diésel y el biodiésel renovables son biocombustibles que pueden utilizarse en lugar del fueloil destilado de petróleo. El

fueloil destilado es un producto de petróleo refinado que se utiliza principalmente como combustible diésel en vehículos.

El diésel renovable es químicamente idéntico al combustible diésel a base de petróleo, pero se elabora con grasas, aceites o grasas en lugar de petróleo. El diésel renovable es un sustituto inmediato del destilado de petróleo; puede utilizarse en motores diésel en cualquier concentración.

Recordemos que el biodiésel se usa de la misma manera que el diésel renovable y se elabora con las mismas materias primas, pero se mezcla (en concentraciones del 20 % o menos) con destilado de petróleo para uso en vehículos porque es químicamente diferente del destilado de petróleo. Por ello, es importante aclarar que tanto el biodiésel como el diésel renovable se utilizan para cumplir con el Estándar de Combustibles Renovables (RFS), un programa federal que requiere que el combustible para transporte vendido en los Estados Unidos contenga al menos un mínimo específico de combustibles renovables. Estos biocombustibles también se utilizan para cumplir con el estándar de combustibles bajos en carbono (LCFS) de California, el programa de combustibles limpios de Oregón y el programa de combustibles limpios de Washington. Los programas tienen como objetivo principal reducir la intensidad de carbono del combustible utilizado para el transporte. En enero de 2022, el consumo de diésel renovable en Estados Unidos superó el consumo del biodiésel producido en ese país por primera vez y ha seguido aumentando desde entonces.

El consumo de diésel renovable ha crecido en relación con el consumo de biodiésel en Estados Unidos, porque:

- El diésel renovable recibe más créditos en el marco del programa RFS que el biodiésel.
- Las refinerías de petróleo pueden convertir sus unidades para producir diésel renovable en lugar de productos derivados del petróleo.
- Las plantas de diésel renovable son más grandes que las de biodiésel y pueden aprovechar las economías de escala.
- El diésel renovable se puede mezclar en cualquier concentración y se comporta mejor en frío que el biodiésel.

- El diésel renovable se puede transportar a través de los mismos oleoductos que el diésel de petróleo.

Casi todo el combustible diésel renovable del país se consume en California, según estimaciones de la Administración de Información Energética de Estados Unidos (EIA, por sus siglas en inglés). Gran parte del diésel renovable que no se consume en California se consume en otros estados con programas de combustibles limpios, como Oregón y Washington. Se resalta que estos tres estados forman parte de la región de la costa oeste de Estados Unidos (figura 37).

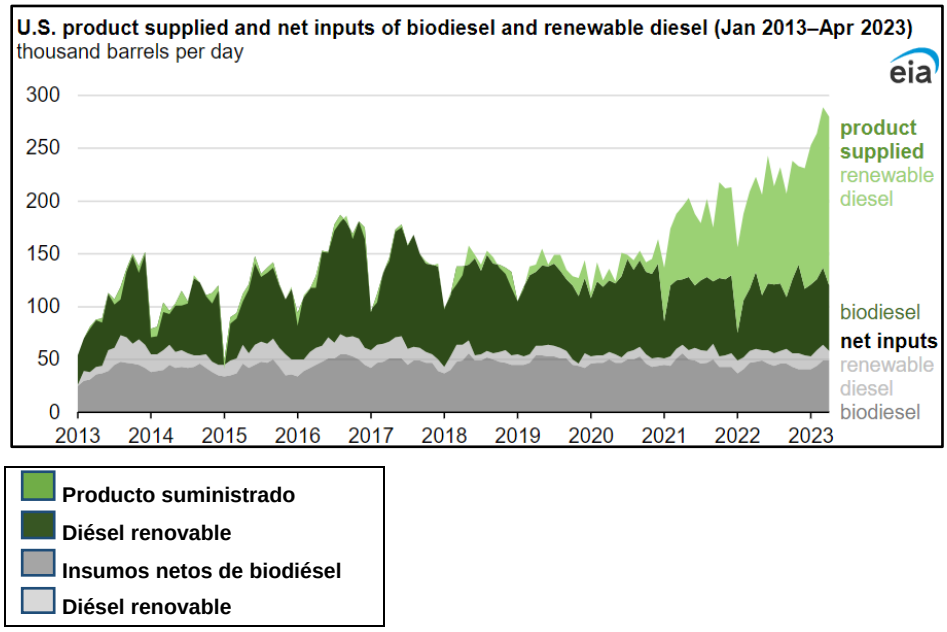


Figura 37. Producto estadounidense suministrado y aportes netos de biodiésel y diésel renovable (enero 2013 - abril 2023)

Fuente de datos: Administración de Información Energética de Estados Unidos, Suministro mensual de petróleo y Revisión mensual de energía.

Nota: Antes de 2021, identificamos las regiones verdes de la figura como ajustes en lugar del producto suministrado.

El crecimiento en el consumo de diésel renovable de los Estados Unidos tuvo un efecto más pronunciado en el consumo de combustible destilado de la costa oeste debido al alto consumo de biocombustibles en California, Oregón, y Washington. La disminución en el consumo de fueloil destilado en 2022 y en los primeros tres meses de 2023 es exclusiva de la costa oeste. En el resto de los

Estados Unidos, el consumo de fueloil destilado aumentó, volviendo a los niveles prepandemia. La discrepancia en el consumo de fueloil destilado entre la costa oeste y el resto de los Estados Unidos demuestra cuánto consumo de biocombustible ha estado desplazando el consumo de fueloil destilado en la costa oeste.

Finalmente, se espera que la capacidad nacional de diésel renovable podría crecer más del doble hasta 2025 (figura 38).

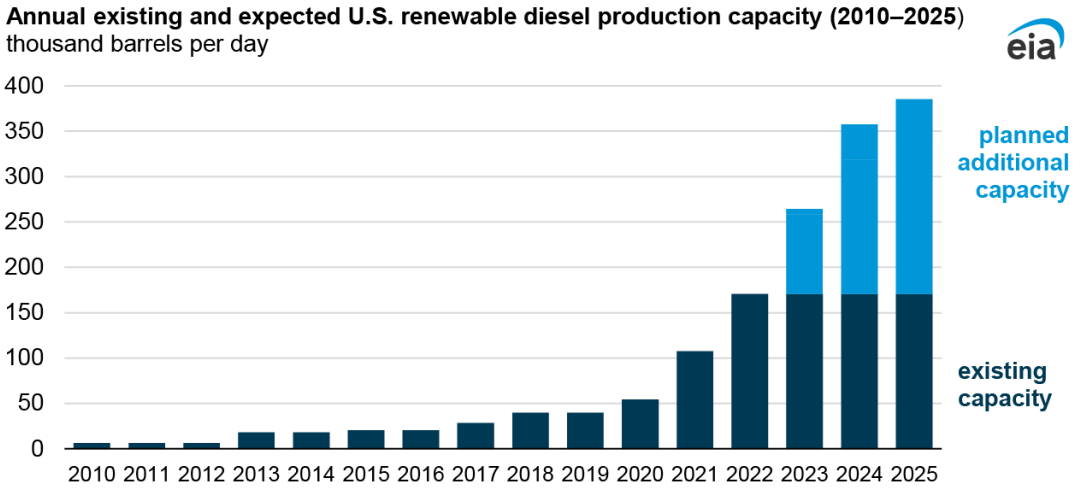


Figura 38. Capacidad anual de producción de diésel renovable existente y prevista en EE. UU. (2010-2025)

Fuente de Datos: Anuncios de las Compañías Productoras de Estados Unidos y Prensa Comercial

La capacidad de producción de diésel renovable en los Estados Unidos podría crecer más del doble de los niveles actuales para fines de 2025, según varios anuncios de proyectos que están en construcción o podrían comenzar a desarrollarse pronto (EIA, n.d.).

Dos factores detrás de la creciente capacidad de diésel renovable de Estados Unidos son los objetivos crecientes para los programas estatales y federales de combustible renovable y créditos fiscales diésel a base de biomasa.

La Ley de reducción de la inflación de 2022 extendió los créditos fiscales de diésel a base de biomasa hasta 2024. Se estima que la capacidad de producción de diésel renovable en los Estados Unidos fue de 170.000 barriles por día (b/día), o 2.6 billones de galones por año (gal/año), a fines de 2022. Aunque se espera que algunos proyectos anunciados se retrasen o cancelen, si todos los proyectos comienzan a operar según lo programado, la capacidad de producción de diésel renovable de Estados Unidos podría alcanzar los 384.000 b/día, o 5.9 mil millones de galones, a finales de 2025.

El diésel renovable es un combustible químicamente equivalente al diésel de petróleo y casi idéntico en sus características de rendimiento. Lo mismo, no es cierto para el biodiésel, que es químicamente diferente del diésel de petróleo. La equivalencia química de los diéseles renovables con el diésel de petróleo le da un par de ventajas sobre el biodiésel.

Una ventaja es que los productores pueden distribuir diésel renovable en tuberías diésel de petróleo.

Una segunda ventaja es que los motores diésel tradicionales pueden consumir cualquier nivel de mezcla de diésel renovable, incluido el diésel renovable puro, sin efectos secundarios significativos. En contraste, el biodiésel solo se puede mezclar en diésel de petróleo entre el 2 % y el 20 % del combustible diésel por volumen.

El diésel renovable tiene algunos de los puntajes de reducción de gases de efecto invernadero (GEI) más altos entre las vías de combustible existentes en programas como el Federal Estándar de Combustible Renovable (RFS), la California Estándar de Combustible de Bajo Carbono (LCFS), el Programa de Combustibles Limpios de Oregón, y el estado de Washington Programa de Combustibles Limpios.

La inversión en nueva capacidad de producción de diésel renovable ha crecido significativamente recientemente en los Estados Unidos debido a la intercambiabilidad de diésel renovable con diésel de petróleo en la infraestructura petrolera existente y debido a los incentivos del gobierno.

4.1.2.8 Experiencias internacionales (requerimientos energéticos) tasa de retorno energético

La tasa de retorno de inversión energética (EROI, por sus siglas en inglés, *energy returned on energy invested*), es un indicador adimensional que fue introducido por ecologista Charles Hall en 1970. A mayor valor del EROI de una tecnología combustible, se genera un mayor valor económico por la obtención de mayor energía útil (Gupta, 2018). Actualmente, se utiliza como herramienta para analizar y comparar diferentes tipos de combustibles. Refiere a la relación de la energía útil retornada durante el ciclo de vida de un sistema y toda la energía invertida requerida para hacer dicha energía útil. Se relaciona con el análisis neto de energía (NEA, por sus siglas en ingles), y el análisis de ciclo de vida (LCA, por sus siglas en inglés, *life cycle assessment*) (Gupta, 2018).

Típicamente el EROI, para procesos hidrotérmicos, se encuentra entre 1 y 3, lo que es favorable en comparación a otros biocombustibles, siendo inferior al indicador para los combustibles derivados del petróleo (Adams, 2017) (véase figura 39).

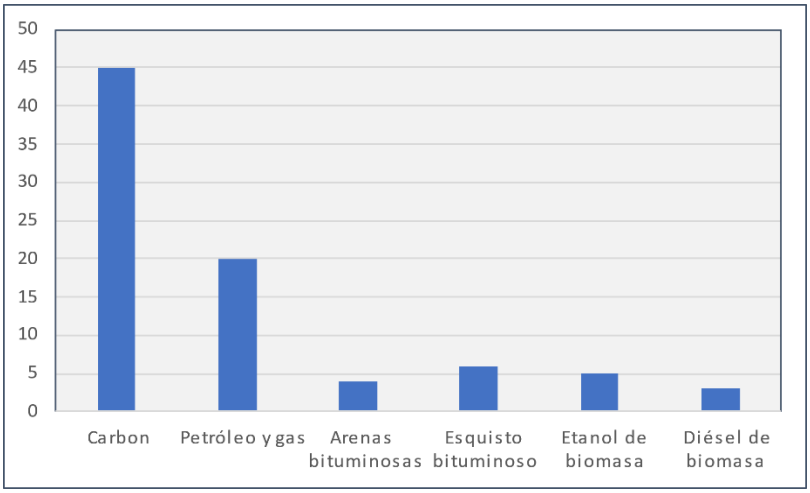


Figura 39. EROI medio para combustibles térmicos

Tomado de: (Gupta, 2018)

En Estados Unidos, el indicador EROI para extracción de petróleo y gas alcanzó un máximo cerca de los años setenta, luego se recuperó en los ochenta

para presentar un modesto descenso en los noventa. Otra cifra interesante es que pasó de 24:1, en 1954, a 11:1 en 2007.

Por otro lago, como resultado de varios análisis, se encontró que existe una relación inversa entre el EROI y la tasa de perforación, sugiriendo que el agotamiento tiene mayor importancia que la tecnología en la industria del petróleo y gas en dicho país (Liu, 2019). Además, existe una relación entre la eficiencia energética y el desarrollo de una sociedad, ya que la energía disponible determina el desarrollo de las actividades humanas, es decir, que la disponibilidad de energía es un indicador de progreso social. El EROI en una escala social ("EROI societal", EROIsoc) relaciona todas las fuentes de combustibles domésticos e importados que una nación usa dando como resultado una eficiencia energética al relacionar el PIB con la energía consumida per cápita. Indica cuantos dólares se producen desde el consumo de una unidad energética (Liu, 2019).

La figura 40 muestra el consumo energético per cápita en el mundo y en algunos países, de acuerdo con EIA de 2017 a 2021. El promedio mundial durante esa serie de tiempo fue de 76,73 MMBtu/persona, siendo el mayor consumo por persona en Estados Unidos, con un promedio de 347,57 MMBtu/Persona.

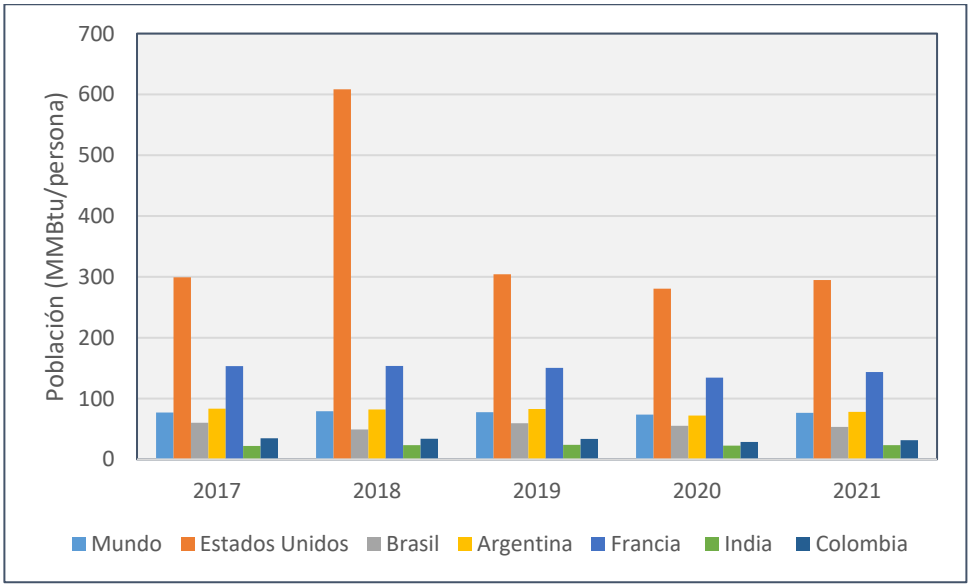


Figura 40. Consumo energético per cápita

Adaptado de: (EIA, n.d.)

De otro lado, la figura 41, muestra la evolución del PIB energético para el mundo y los países seleccionados para el presente estudio. El promedio mundial es de 4,73 1000 Btu/2015$ PIB PPP. Siendo mayor el promedio para Estados Unidos con 4,93 1000 Btu/2015$ PIB PPP.

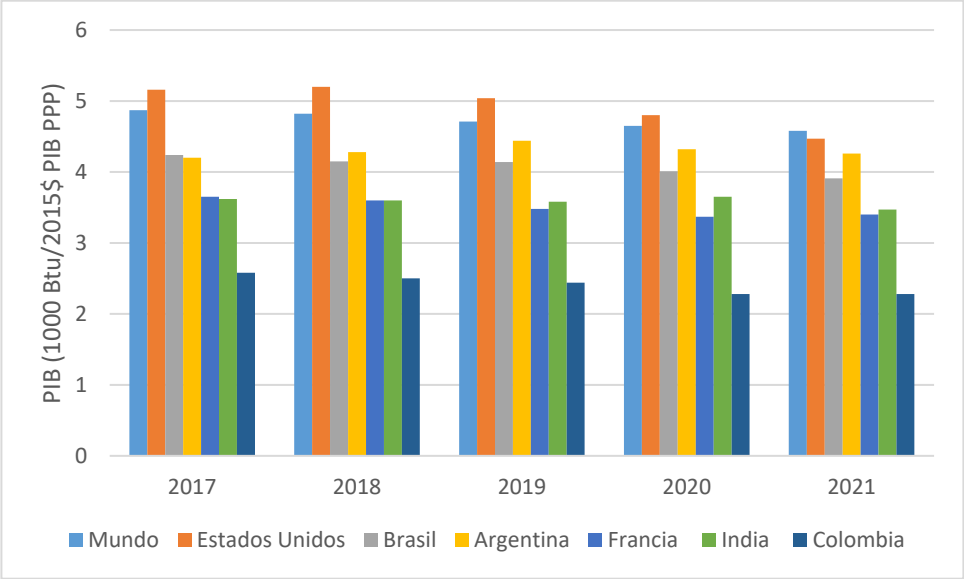


Figura 41. PIB energético

Adaptado de(EIA, n.d.)

En el Anexo A, Indicadores energéticos se encuentran algunos indicadores energéticos de interés para el desarrollo de biocombustibles en diferentes países, entre ellos los seleccionados para el presente estudio. Es importante resaltar que la tasa de retorno energético (EROI) debe ser superior a la unidad y que es mayor para los combustibles fósiles. Esto indica que la energía requerida por el sistema es menor que la energía liberada por el mismo.

De otro lado, en el anexo B, Requerimientos energéticos por etapa de la cadena de suministro de biocombustibles, se encuentran los requerimientos energéticos para el proceso agrícola, el pretratamiento de materias primas, procesamiento de precursores y transporte en la obtención de biocombustibles como el biodiésel, bioetanol, biogás y biojet para diferentes países. Los diferentes autores concuerdan en que la fase agrícola es aquella en la que se requiere mayor cantidad de energía.

4.1.5 Cadena de suministro

Como se ha venido resaltando, Estados Unidos es uno de los países que mayor incursión ha tenido en la producción de biocombustibles líquidos, dada su legislación, incentivos económicos y puesto que la producción y consumo de biocombustibles es una estrategia para el cumplimiento de los diferentes compromisos ambientales y comerciales del país. Esto lo lleva a ser el mayor productor de biocombustibles a nivel global, teniendo como principales al bioetanol, biodiésel y diésel renovable. En 2021, Estados Unidos produjo aproximadamente 17,5 mil millones galones de biocombustibles, consumió alrededor de 16,8 mil millones galones, fue un exportador neto de 800 millones galones de biocombustibles, sobresaliendo el bioetanol con la mayor parte de las exportaciones netas y brutas (EIA, n.d.).

— *Costos*

Teniendo en cuenta los eslabones de la cadena de valor de los biocombustibles en Estados Unidos, el costo de la materia prima proporcionó el 75 % del costo total de producción, los materiales y servicios públicos representaron el 11 % del costo operativo y los costos de mano de obra, mantenimiento, costo de depreciación representaron el 5 %, 5 % y 4 %, respectivamente. Siendo la materia prima, como la soja y el maíz, tres cuartos de los costos de la producción total, excluyendo el aceite de cocina usado, ya que este representa entre el 60-70 % de la producción (Gebremariam, 2018).

4.1.5.1 Cadena de suministro del biodiésel

A continuación, en la figura 42, se describe la cadena de valor, en Estados Unidos, para la producción de biodiésel y sus principales variables, con lo cual se puede definir capacidad de producción, exportación y definición de esquema logístico para el uso de los biocombustibles en el país.



Figura 42. Cadena de valor del biodiésel en Estados Unidos

Adaptado de: (EIA, n.d.) (Agricultural Marketing Resource Center, 2023)

— *Producción primaria*

Los aceites de origen vegetal corresponden alrededor del 75 % de la materia prima para la producción de biodiésel en Estados Unidos (9.62 mil millones de libras), donde el aceite de soja representa más de la mitad de dichos insumos en peso; seguido del aceite de maíz de destilería y aceite de canola. Como se ha mencionado, el aceite de soja y aceite de maíz de destilería son producidos en el medio oeste de Estados Unidos, lugar donde existe mayor capacidad de biocombustibles (EIA). El aceite de soja, al ser la principal materia prima para la producción de biodiésel, representa alrededor del 30 % de la disposición del aceite vegetal del país, dicha producción alcanza los 8.4 mil millones de libras (Mmlb);

seguido del aceite de maíz de destilaría, con una producción de 1 Mmlb; el aceite de canola, con 1.24 Mmlb; y grasas recicladas que corresponden a la mezcla de grasas animales, aceites vegetal y aceites de cocina reciclado y refinado, con 1.05 Mmlb (EIA).

— *Almacenamiento y transporte hasta las plantas de procesamiento*

La producción de la soja se concentra en un 65 % en los estados de Illinois, Lowa, Minnesota, Indiana, Nebraska y Ohio, como se puede evidenciar en la figura 43. Las granjas o cooperativas agrícolas cuentan con silos metálicos para realizar el almacenamiento de la materia prima controlado por los propios agricultores (Licht, 2023), con los equipos de secado de alta temperatura para nivelar los contenedores, inmediatamente después de la cosecha, luego el grano se recolecta y se transporta en camiones hasta las biorrefinerías (U. S. Department Of Energy, 2023).

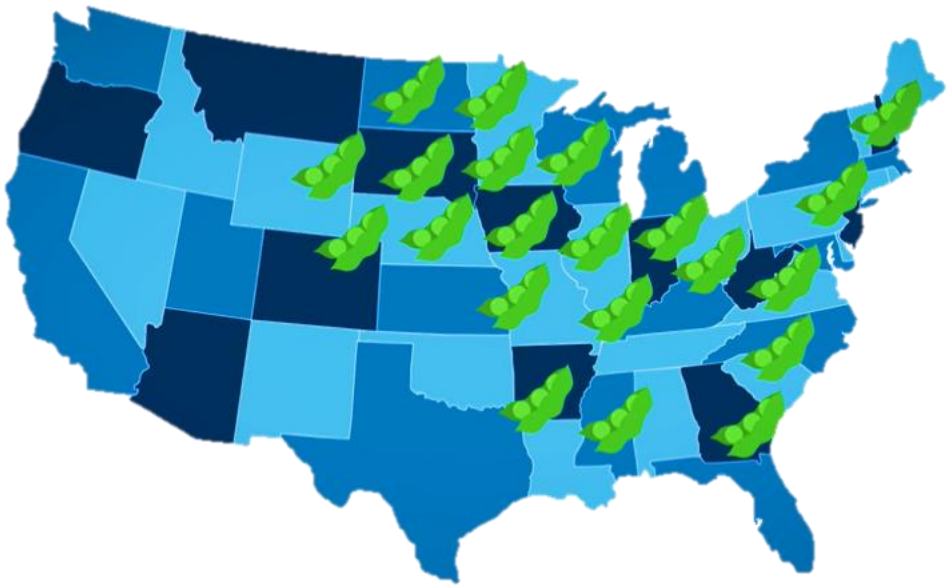


Figura 43. Zonas de producción de soja

Tomado de:(CME Group., 2023)

— *Plantas de procesamiento*

Estados Unidos, a enero del año 2023, contaba con un total de 59 plantas para la producción de biodiésel, con una producción de 2,086 mil millones de galones por

año (Mmgal/año), del cual aproximadamente el 70 % es producido en los estados del medio oeste, con un total de 1,461 Mmgal/año, correspondientes a las 33 plantas productoras; seguido por la costa del golfo, con una producción de 298 Mmgal/año, producidas en sus 9 plantas. Los estados con más plantas de producción son Lowa y Misuri, con un total de 11 y 5 plantas de producción, respectivamente. Los estados del medio oeste (Dakota del Norte, Dakota del Sur, Illinois, Indiana, Iowa, Kansas, Michigan, Minnesota, Misuri, Nebraska, Ohio y Wisconsin), como se muestra en la figura 44, poseen una mayor capacidad de producción porque en ellos hay una mayor producción de aceite de soja y aceite de maíz de destilería, materia prima esencial del proceso.

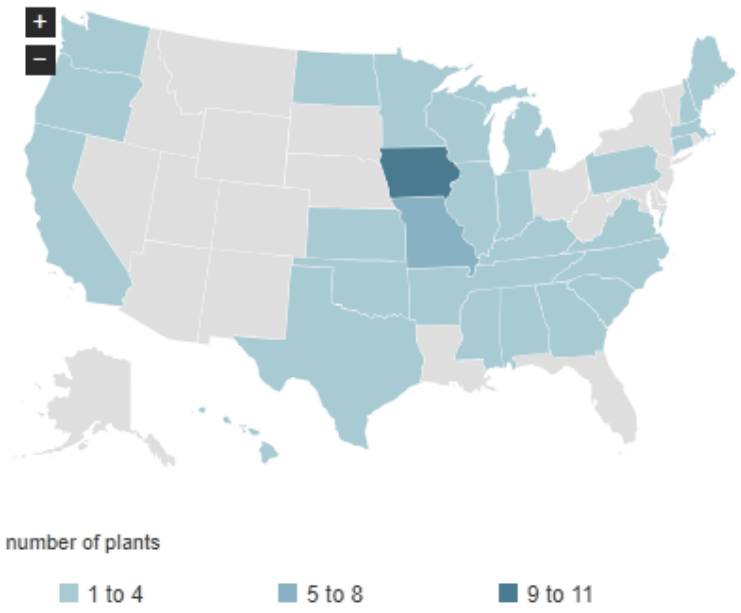


Figura 44. Plantas de biodiésel en EE.UU. por estado

Tomado de: (U. S. Energy Information Administration, 2023)

Adicionalmente, en Estados Unidos, la trituración de soja produce aproximadamente un 80 % de harina y un 20 % de aceite. La harina resultante, posteriormente, se procesa para obtener diversos productos alimenticios y no alimenticios (EIA, n.d.).

— *Producción de biodiésel y comercialización*

Luego de la transformación de la materia prima, el biodiésel se distribuye desde el punto de producción hasta las terminales de combustible y mayoristas por camión,

tren o barcaza y, en ocasiones, el B5 se transporta por tuberías. El transporte de la soja a nivel nacional se distribuye así: 13 % en ferrocarril, 2 % en barcaza y 84 % en camión (U. S. Department of Energy, 2023).

El consumo de biodiésel, en Estados Unidos, es mayor a su producción; específicamente, para el año 2021, el consumo de biodiésel correspondió a 1,65 mil millones de galones; mientras que su producción, a 1,64 mil millones de galones. Respecto a las importaciones de dicho biocombustible, para el año 2021 se importaron un total de 200 millones de galones y se exportaron 180 millones de galones de biodiésel, siendo el segundo biocombustible que más se produce y consume en el país (EIA, n.d.).

— *Ventas y exportación*

La mayor parte del biodiésel producido en Estados Unidos se consume en mezclas con diésel de petróleo en proporciones del 2 % (B2), 5 % (B5) o 20 % (B20). Sin embargo, existen en el país flotas de vehículos que utilizan B100 (biodiésel puro). La mayoría del combustible diésel de petróleo que se consume en el país americano contiene hasta un 1 % de biodiésel debido a sus cualidades lubricantes que prolongan la vida útil de ciertos componentes de los motores. La mayoría de los consumidores de biodiésel compran mezclas B20 o de menor porcentaje a sus distribuidores convencionales de combustibles o sus comercializadores de biodiésel, representando la segunda mayor proporción de producción y consumo de bicombustibles en los Estados Unidos, con 11 % de producción y 12 % de consumo en el año 2021. El comportamiento del biodiésel se puede ver reflejado en la tabla 38 (EIA, n.d.).

Tabla 38. Comportamiento biodiésel en Estados Unidos, 2021

	Cantidad dada en mil millones de galones
Consumo	1,65
Producción	1,64
Importación	0,2
Exportación	0,18

Adaptado de: (Energy Information Administration, 2022)

El transporte interno para la exportación de la soja está distribuido así:

- 49 % en barcaza
- 32 % en ferrocarril
- 19 % en camión

El transporte en su gran mayoría se da hasta la costa del golfo de Misisipi y en ferrocarril hasta noroeste del Pacífico, cuando es exportada hacia Asia. Y desde las costas, la soja es exportada vía flete marítimo. Por otro lado, el transporte aéreo que se realiza es de las semillas de soja desde Argentina y Brasil a Estados Unidos (CME Group., 2023).

— *Aceite de cocina usado*

Actualmente, el biodiésel generado por aceites de cocina usado representa el 13 % de las materias primas empleadas. Las empresas Valley Proteins, Inc., Restaurant Technologies Inc., Baker Commodities, Inc., Darling Ingredients Inc. abarcan el 75 % de la participación en el mercado de reciclaje de aceite de cocina usado. Estas empresas recolectan en las zonas del sudeste, oeste y el Atlántico medio del país americano, ya que es donde se concentra la mayor parte de la población. Lo recolectan en su mayoría de restaurantes y empresas de servicios alimenticios. Despúes de la recolección, lo venden en los mercados que se encargan de procesar la grasa en biodiésel o lo entregan procesado para ofrecerlo a otros mercados directamente (Ibis World, 2023).

Para la recolección domiciliaria, cuentan con estaciones de servicio. Además, el gobierno local o el coordinador de reciclaje manejan los centros de recogida sectoriales. Incluso, hay disponible un sitio web especializado (www.earth911.com), el cual permite buscar los centros de acopio por tipo de material y código postal (Earth 911., n.d.).

Hay que resaltar, que cada estado establece sus propias políticas, por ejemplo:

- California está actualizando su programa de estándar de combustibles bajo en carbono.
- Oregón amplió su programa de combustibles limpios en 2022.

- El estado de Washington adoptó su primer programa de combustibles limpios en 2022.

Todos con diferentes incentivos y campañas de concientización, proporcionan información al público para alentar a la comunidad a reciclar su aceite de cocina usado, involucran a las empresas locales, realizan presentaciones educativas con folletos y volantes, incentivando a los jóvenes a implementar el reciclaje de aceites usado (Loizides, 2019).

Luego de la recolección, se realiza un pretratamiento con el fin de eliminar las impurezas sólidas y reducir el contenido de agua, seguido a esto pasa por un proceso de transesterificación, donde el aceite reacciona con un alcohol que cumple la función de disolvente y catalizador. El biodiésel obtenido con glicerol se separa y se purifica, para finalmente llevarlo a las principales plantas para realizar la mezcla correspondiente (Suzihaque, 2022).

4.1.5.2 Cadena de suministro del bioetanol

A continuación, en la figura 45, se describe la cadena de valor en Estados Unidos para la producción de bioetanol y sus principales variables, con lo cual se puede definir capacidad de producción, exportación y definición del esquema logístico para el uso de los biocombustibles en el país.

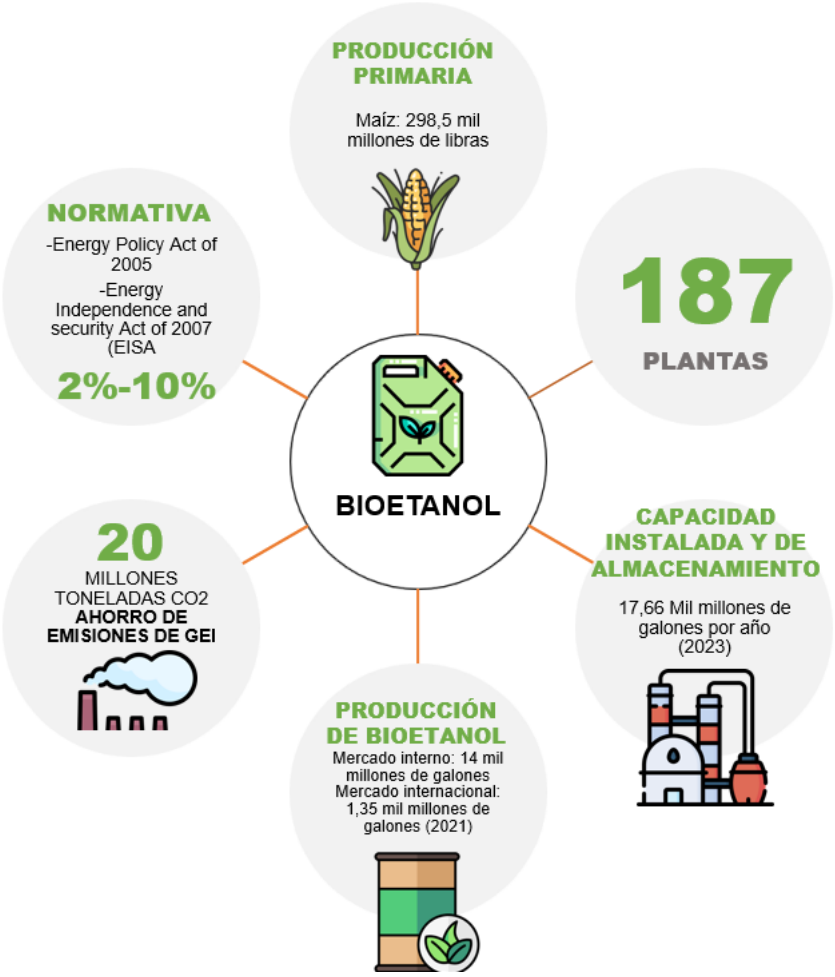


Figura 45. Cadena de valor del bioetanol en Estados Unidos

Adaptado de: (United Nations Industrial Development Organization, 2022; U.S Department of Energy, 2023a)

— *Producción primaria*

En Estados Unidos la principal materia prima para la producción de etanol es el maíz, cuya producción corresponde a 298,5 mil millones de libras (United States Department of Agriculture, 2022). El etanol producido con los cultivos de maíz cumple con la categoría de combustible renovable según el RF), lo cual garantiza que exista suficiente materia prima para la demanda alimenticia humana, alimentación de ganado y exportación. El 94 % del biocombustible producido se obtiene a partir del cultivo del maíz, dicho biocombustible demuestra un balance energético positivo, es decir, que el proceso de producción del etanol no requiere más energía que la energía que contiene el biocombustible. El porcentaje restante

de la materia prima utilizada en la producción de etanol corresponde a materias primas celulósicas, las cuales no son de origen alimentario, son residuos de cultivos, residuos de madera, desechos de cultivos dedicados y desechos industriales, entre otros (U. S. Department Of Energy, 2023).

— *Almacenamiento y transporte hasta las plantas de procesamiento*

La producción del maíz se concentra en la parte central del país que corresponde al llamado cinturón del maíz, como se puede evidenciar en la figura 46.

El maíz va desde el campo hasta el centro de acopio en camión y luego en tren a las plantas de transformación.

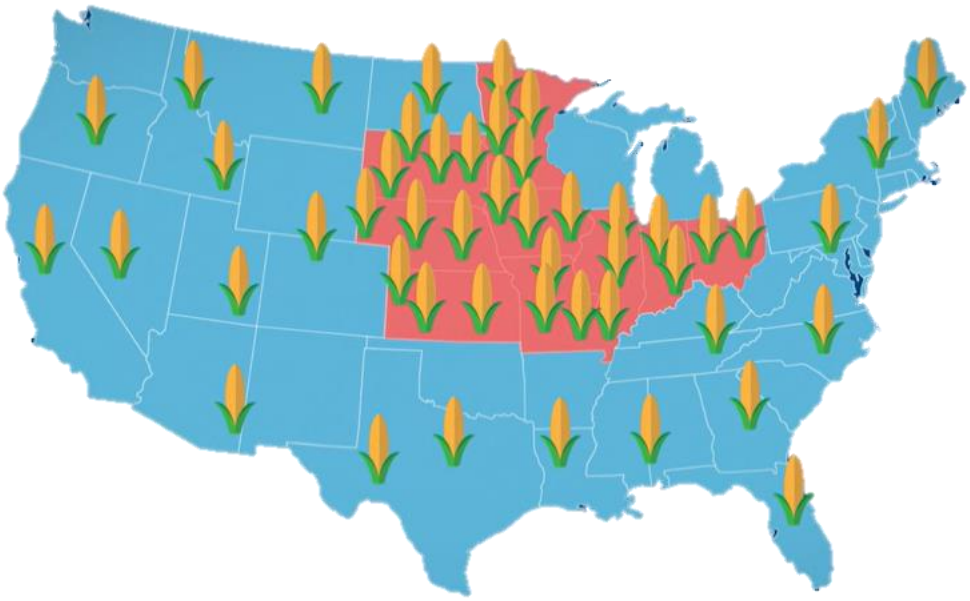


Figura 46. Zonas de producción de maíz

Tomado de: (CME Group, n.d.)

— *Plantas de procesamiento*

Estados Unidos, a enero del año 2023, contaba con un total de 187 plantas para la producción de bioetanol, las cuales producen 17,66 mil millones de galones de etanol al año, lo que representa la mayor producción de biocombustible en el país. De igual forma que el biodiésel, la producción de bioetanol se realiza en mayor medida en los estados del medio oeste del país, con un total de 173 plantas y una producción de 16,65 mil millones de galones de etanol al año, lo que representa,

aproximadamente, el 94 % de la producción de etanol en el país, con mayor presencia en los estados de Iowa y Nebraska, con un total de 41 y 24 plantas cada uno, seguidos por Minnesota y Dakota del Sur. Dicha preferencia se da por su capacidad de producción de cultivos de maíz (EIA, n.d.).

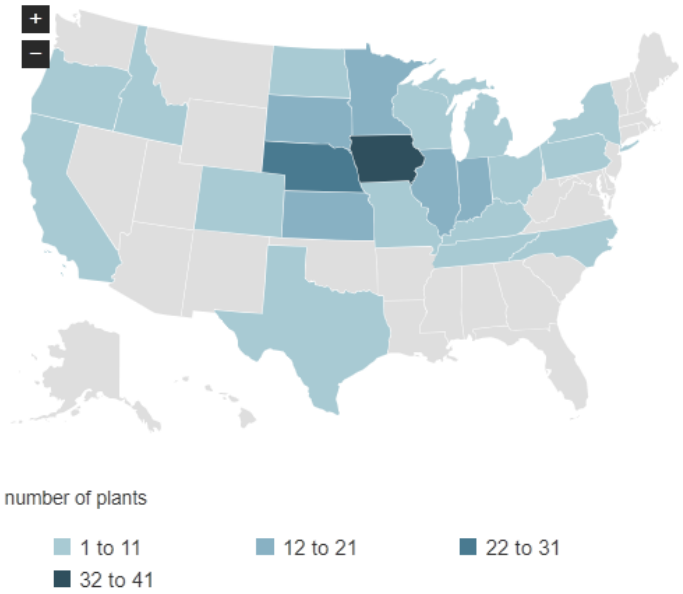


Figura 47. Plantas de producción de etanol en Estados Unidos por estados, 2023

Tomado de: (EIA, n.d.)

La mayoría de las plantas de etanol de Estados Unidos se encuentran en el medio oeste, pero su consumo se da mayormente en las costas este y oeste, por lo cual el 90 % del etanol se transporta en tren o en camión. Un camión cisterna en Estados Unidos tiene la capacidad para transportar entre 8000 y 10.000 galones de etanol y un vagón de tren tiene una capacidad de 30.000 galones. El etanol restante es transportado en barcazas; por último, un muy poco porcentaje en oleoductos, puesto que necesita de tuberías específicas para su transporte (Energy Efficiency & Renewable Energy., n.d.). La figura 48 evidencia la logística empleada para la producción de bioetanol.

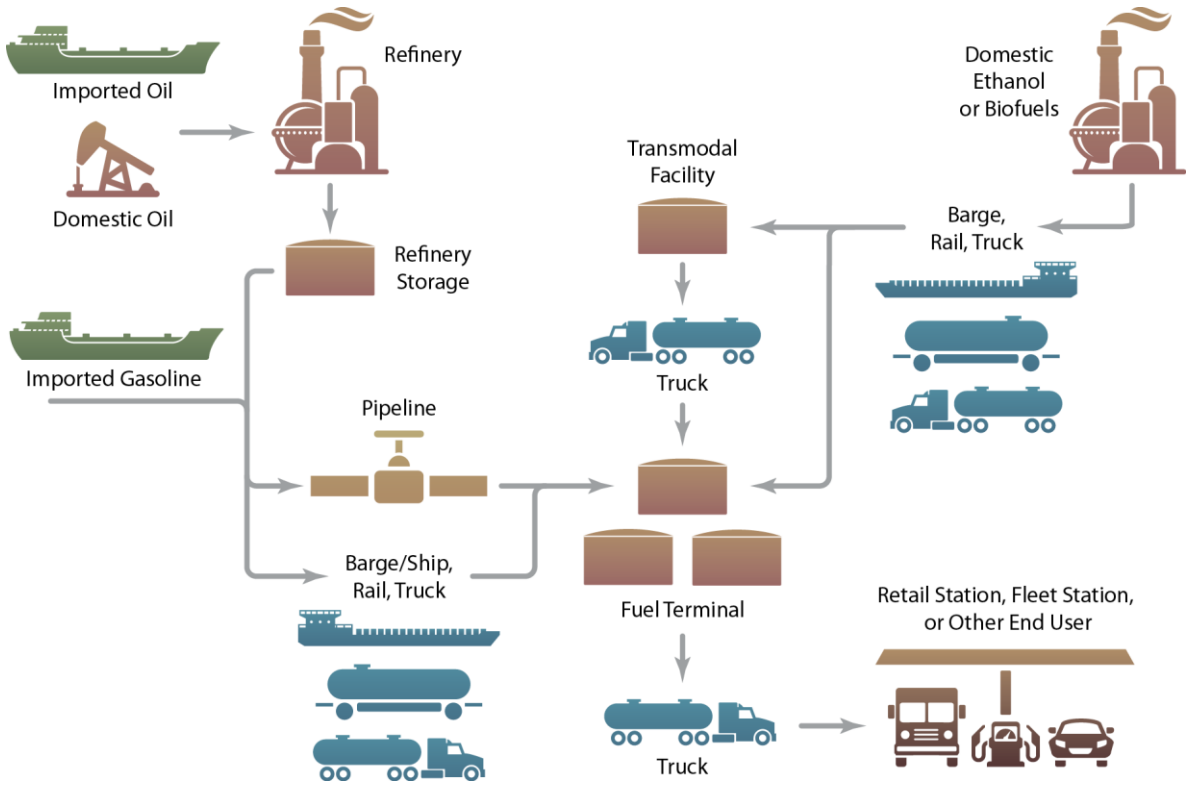


Figura 48. Distribución del bioetanol en EE. UU.

Tomado de: (Energy Efficiency & Renewable Energy., n.d.)

— *Producción de bioetanol y comercialización*

El etanol se encuentra presente en más del 98 % de la gasolina de Estados Unidos. Este biocombustible es utilizado, principalmente, para oxigenar el combustible. Normalmente se encuentra en una mezcla del 10 % de etanol y un 90 % de gasolina (E10), aunque también está disponible como E85, el cual contiene una mezcla de etanol hasta en un 83 %, y es utilizada en vehículos de combustión flexible (U. S. Department of Energy, 2023).

— *Ventas y exportación*

La mayoría del bioetanol producido en Estados Unidos es para consumo propio, considerando que de los 15,35 mil millones de galones producidos se consumen 13,98, lo que corresponde al 91 % del etanol producido en el país; el restante, aproximadamente, 1,35 mil millones de galones, es exportado. Por otro lado, alrededor de 69 millones de galones se importan, convirtiéndose en el biocombustible de menor importación, siendo el mayor productor y consumidor a

nivel mundial. El comportamiento del bioetanol se puede ver reflejado en la tabla 39 (EIA, n.d.).

Tabla 39. Comportamiento del bioetanol en Estados Unidos, 2021

	Cantidad en mil millones de galones
Consumo	13,98
Producción	15,35
Importación	0,069
Exportación	1,35

Adaptado de: (EIA, n.d.)

4.1.5.3 Cadena de suministro del biogás

La cadena de suministro de la producción de biogás en Estados Unidos inicia con la recolección de sustratos orgánicos, que pueden ser residuos agrícolas, desechos alimentarios o industriales, y recursos hídricos. Estos materiales son procesados en digestores anaeróbicos, con microorganismos eficientes que descomponen la materia orgánica, para la generación de biogás, compuestos principalmente por metano y dióxido de carbono.

Posteriormente, se lleva a cabo la captura y acondicionamiento del biogás para eliminar impurezas. La energía resultante se emplea para generar electricidad y/o calor, o se inyecta en la red de gas natural. La distribución y almacenamiento se encarga de llevar la energía producida a los usuarios finales, durante todo el proceso se realiza un monitoreo constante para asegurar eficiencia y seguridad (Mordor Intelligence, 2023).

De acuerdo con la Asociación Mundial de Biogás (WBA, por sus siglas en inglés, World Biogas Association), el biogás tiene el potencial de disminuir las emisiones globales de gases de efecto invernadero (GEI) en un rango de 10 a 13 %. Adicionalmente, puede ofrecer una fuente de energía renovable a partir de una amplia variedad de fuentes (materia prima), que incluyen los residuos alimentarios a nivel mundial, los desechos de la producción industrial, los insumos agrícolas y las aguas residuales (*Mordor Intelligence*, 2023).

— *Producción primaria*

La producción principal de biogás en los Estados Unidos se basa en la digestión anaeróbica, un proceso en el que los microorganismos descomponen materiales orgánicos en ausencia de oxígeno, produciendo una mezcla de metano y dióxido de carbono como componentes gaseosos principales. Los sustratos utilizados provienen de una variedad de fuentes, incluidos desechos agrícolas, como el estiércol y los cultivos energéticos, así como desechos orgánicos de la industria alimentaria, y las aguas residuales municipales e industriales. La tecnología de digestión anaeróbica, que puede usar una variedad de configuraciones, es esencial para este proceso porque permite maximizar la producción de biogás.

— *Almacenamiento y transporte*

El sustrato utilizado para producir biogás se almacena y transporta de diferentes maneras dependiendo de su naturaleza. Antes de ser utilizados en el proceso de digestión anaeróbica, los desechos agrícolas, como el estiércol y otros materiales sólidos, se guardan en establos o pilas al aire libre. Sin embargo, los desechos sólidos de la comida son recolectados y almacenados en recipientes o áreas específicas que evitan la emisión de olores.

En el caso de sustratos líquidos, como aguas residuales y lodos, se almacenan antes de ingresar al proceso de digestión en tanques de sedimentación. Estos sustratos pueden transportarse en camiones o contenedores especialmente diseñados, lo que garantiza un manejo seguro y hermético. En algunos casos, el transporte de biomasa acuática o lodos de plantas de tratamiento puede requerir tuberías o sistemas de tuberías. Para cumplir con las regulaciones ambientales y prevenir la contaminación, es esencial realizar un manejo y almacenamiento adecuado (Mordor Intelligence, 2023).

— *Plantas de procesamiento*

En Estados Unidos hay más de 2400 instalaciones que se dedican a la producción de biogás, distribuidas a lo largo de los 50 estados. De estas, 473 corresponden a digestores anaeróbicos ubicados en explotaciones agrícolas, mientras que 1269 se refieren a instalaciones de recuperación de recursos hídricos que emplean

dicha tecnología. Además, se registran 102 sistemas autónomos especializados en la digestión de residuos alimentarios y 566 proyectos dedicados a la extracción de gas en vertederos (American Biogas Council, 2023) (figura 49).

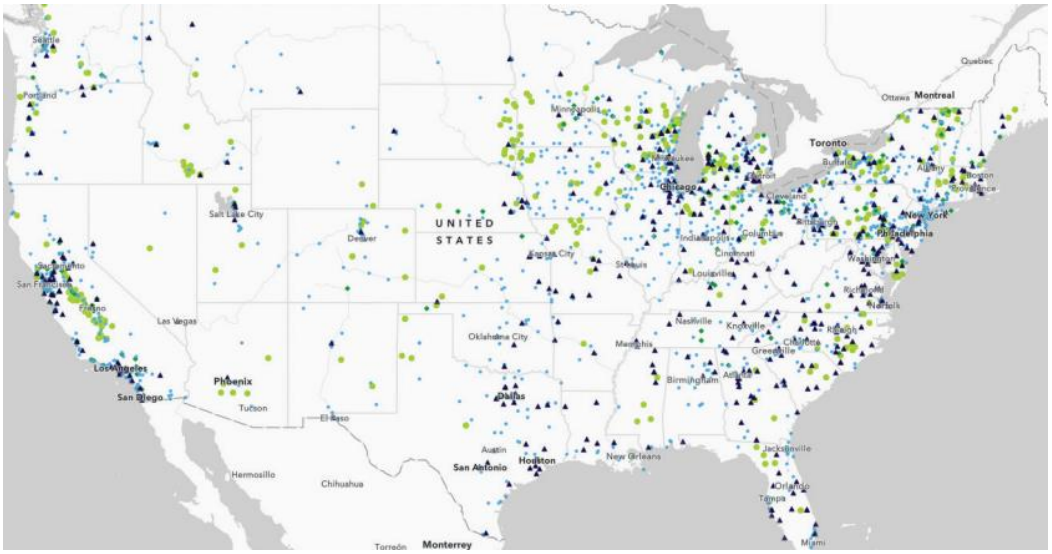


Figura 49. Sitios de producción de biogás en EE. UU.

Obtenido de: (American Biogas Council., 2023)

La infraestructura del biogás en Estados Unidos tiene el potencial de generar anualmente 100 teravatios-hora (TWh) de electricidad, equivalente a la demanda de energía de 9,3 millones de hogares. Además, puede producir 33 billones de unidades térmicas británicas (BTU) de calor renovable por hora, suficiente para abastecer a 4,3 millones de hogares. Asimismo, podría proporcionar combustible para vehículos en una cantidad equivalente a 15,4 mil millones de galones al año lo que sería suficiente para abastecer a 32 millones de vehículos (Mordor Intelligence, 2023).

— *Distribución y comercialización*

Una vez se realizan los pasos de purificación y refinamiento, el biogás puede ser inyectado en la red de gas natural o utilizado para producir energía eléctrica y calor en instalaciones ubicadas en las proximidades del lugar de producción. La conversión del biogás en biometano también es posible. Este biometano puede

cumplir con los estándares de calidad del gas natural e inyectarse directamente en la red de distribución de gas.

En cuanto a la comercialización, las empresas que producen biogás pueden vender este recurso a través de contratos con empresas de servicios públicos o a compradores industriales que buscan fuentes de energía más sostenibles. Además, existen programas de incentivos y certificaciones que pueden aumentar la competitividad del biogás en el mercado (American Biogas Council, 2020).

4.1.5.4 Cadena de suministro de SAF

— *Producción primaria*

Se estima que cada año se pueden recolectar de manera sostenible mil millones de toneladas secas de biomasa en los Estados Unidos, de esta manera se logran producir de 50 a 60 mil millones de galones de biocombustibles bajos en carbono. Las principales materias primas empleadas son: aceites y grasas, semillas oleaginosas, residuos agrícolas, forestales, solidos municipales, algas, granos, estiércol y lodos de tratamiento de aguas residuales y cultivos energéticos (U. S. Department of Energy, 2023).

— *Almacenamiento y transporte*

Al ser tan diversa la materia prima empleada para la producción de SAF, su almacenamiento y transporte hasta las plantas de procesamiento está a cargo de cada productor-recolector. El transporte se realiza en un 98 % en tractocamiones (Undavalli, 2023).

— *Plantas de procesamiento*

Debido al creciente interés en los combustibles de aviación sostenibles (SAF) y los incentivos gubernamentales para su producción, las plantas de procesamiento de SAF en Estados Unidos varían en tamaño y tecnología, y su número ha estado en constante crecimiento (U. S. Department of Energy, 2023). Algunas de las plantas que operan actualmente se describen en la tabla 40.

Tabla 40. Plantas de procesamiento de SAF

Nombre	Ubicación	Descripción
AltAir Fuels	Paramount, California	Es una de las primeras plantas en producir SAF a partir de aceites vegetales usados y suministra a aerolíneas comerciales.
Gevo, Inc.	Luverne, Minnesota	Utiliza tecnología de fermentación para convertir materias primas como el maíz y la caña de azúcar en SAF.
Red Rock Biofuels	Lakeview, Oregón	Se especializa en la producción de SAF a través de la biomasa forestal y otros residuos. Distribuyen el SAF a la fuerza aérea de Estados Unidos y las compañías de United Airlines Y FedEx.
Fulcrum BioEnergy	Nevada	Utiliza residuos municipales para producir SAF.
Velocys	Misisipi	La planta produce SAF a partir de residuos municipales y biomasa lignocelulósica utilizando la tecnología Fischer-Tropsch.

Adaptado de: paginas oficiales de cada planta.

— *Distribución y comercialización*

Una vez que se transforma y se produce el SAF, se transporta a los aeropuertos haciendo uso de camiones cisterna y, en algunos casos, de ferrocarriles o barcazas para el transporte a granel; posteriormente, en algunos casos, se almacena el SAF en terminales de productos petroleros donde se realiza la respectiva mezcla con los combustibles convencionales. Una vez que el SAF está listo para su uso, se distribuye hasta los aeropuertos nuevamente en camiones cisterna.

Los aeropuertos cuentan con sistemas de almacenamiento especial para los combustibles de aviación o cuentan con estaciones de servicio dedicadas al suministro de combustible a los aviones, los suministran a las aeronaves mediante camiones de abastecimiento antes de los vuelos. A veces, las aerolíneas pueden optar por cargar SAF puro o mezclado en sus aeronaves, dependiendo de la disponibilidad y la compatibilidad con sus motores. En la figura 50 se evidencian los aeropuertos a los que se suministra SAF (Energy Efficiency & Renewable Energy, n.d.).



Figura 50. Aeropuertos con sumunistro SAF en EE. UU.

Obtenido de: (Mapa Aeropuertos de Estados Unidos - Mapa de Estados Unidos, 2022)

4.1.6 Aspectos ambientales

4.1.6.1 Análisis de ciclo de vida

Estados Unidos produce más de 66,2 billones de litros de biocombustibles, principalmente bioetanol a base de maíz (89 % de los biocombustibles) y biodiésel a partir de soja (9 % de los biocombustibles) para la industria del transporte. De otro lado, la producción de diésel renovable se ha incrementado en los últimos años, igualando en el 2022 la producción de biodiésel, además sus características son similares al diésel convencional, mientras que la producción y participación del bioetanol se ha mantenido constante en la última década (Smith et al., 2023).

La industria de los biocombustibles posee una estructura compleja, compuesta por diferentes granjas, centros de distribución y plantas de procesamiento, cada una con características e interacciones únicas, lo cual dificulta el análisis ambiental para determinado tipo de biocombustible (Smith et al., 2023).

Smith et al. (2023) realizaron un estudio de sostenibilidad integrando un análisis tecnoeconómico y geoespacial y un análisis de ciclo de vida (ACV) para la industria de los biocombustibles en Estados Unidos. El estudio resume una emisión de gases efecto invernadero de 99,5 millones Mg CO_2eq (95,3 % para bioetanol a partir de maíz y 4,7 % para biodiésel a partir de soja), que corresponde al carbono intensidad combinada de 65,3 g CO_2eq/MJ, una significativa mejora comparado con el indicador para la gasolina convencional (93 g CO_2eq/MJ). Sin embargo, estos biocombustibles generan impactos en otras categorías comparadas con los derivados del petróleo, como en áreas del uso del agua, la tierra e intensidad de nitrógeno (Smith et al., 2023).

El análisis de ciclo de vida, empleado por Smith, limitó el sistema a un análisis de eficiencia "pozo a rueda" (*well-to-wheels*) para determinar los indicadores de impactos ambientales (*GHGi*: impacto de GEI – gCO_2eq/MJ, *WDP*: potencial de agotamiento del agua – m^3/MJ, *EUT*: eutrofización – kg N_{eq}/MJ, *RE*: efectos respiratorios – $PM_{2.5\text{-}eq}$/MJ, *ALOP*: ocupación de tierras agrícolas – m^2a/MJ) con 1 MJ de combustible líquido para transporte como unidad funcional. Empleando la base EcoInvent 3.8 en OpenLCA 1.11 con el método de impacto TRACI v2.1 y ReCiPe. En las figura 51 y figura 52 se resume el inventario empleado para el análisis de ciclo de vida y los límites del sistema.

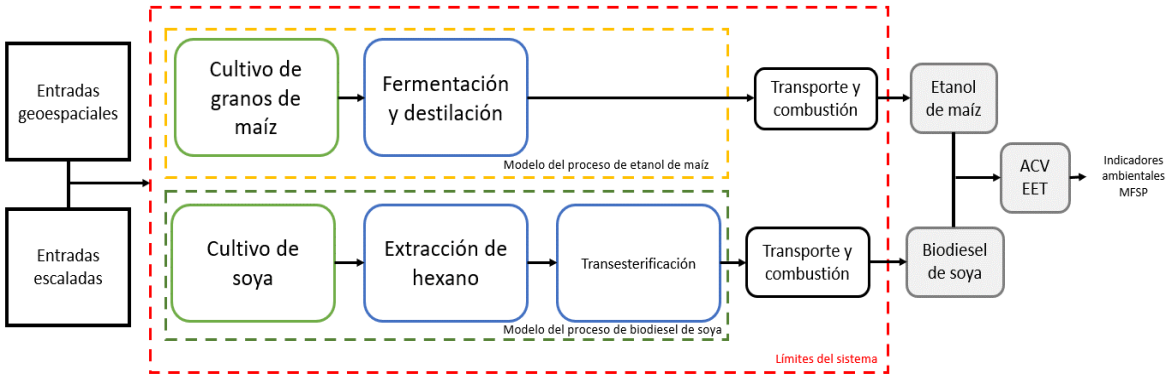


Figura 51. Límites del sistema para el análisis de ciclo de vida

Adaptado de: (Smith et al., 2023)

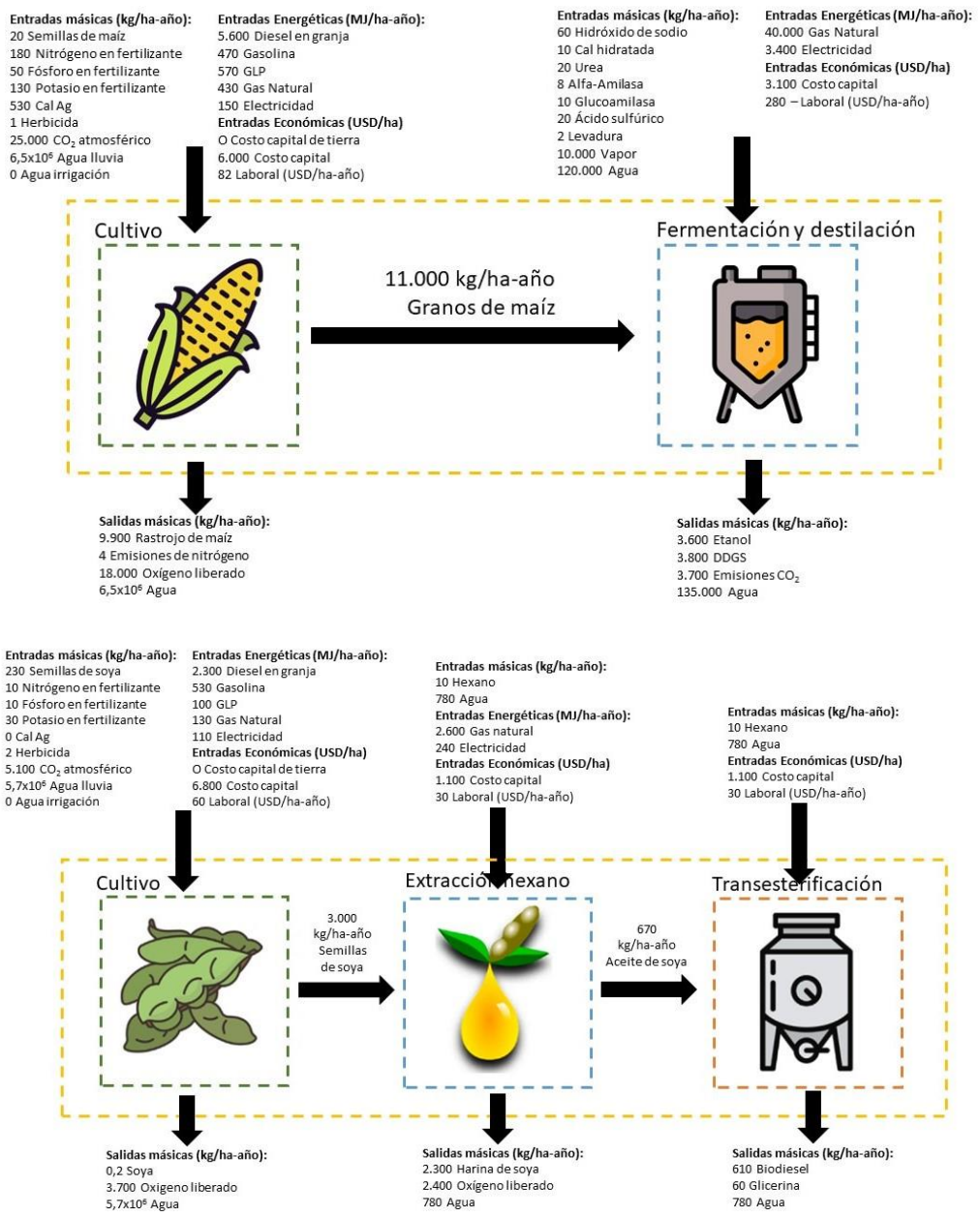


Figura 52. Inventario general para la construcción del análisis de ciclo de vida para biodiésel (soja) y bioetanol (maíz)

Adaptado de: (Smith et al., 2023)

El análisis de sostenibilidad es altamente sensible a las entradas geoespaciales (rendimiento del área de cultivo, uso de fertilizantes nitrogenados, emisiones por cambios directos en uso de la tierra, tasa de irrigación) (véanse Figura 53, Figura 54, Figura 55 y Figura 56,). El precio mínimo de venta del

combustible (MFSP) y la ocupación de suelos agrícolas (ALOP) se relaciona con los rendimientos de cultivo; el impacto en GEI (GHGi) se relaciona con las emisiones por cambios en uso de la tierra; el potencial de agotamiento del agua (WPD) se relaciona con la tasa de irrigación.

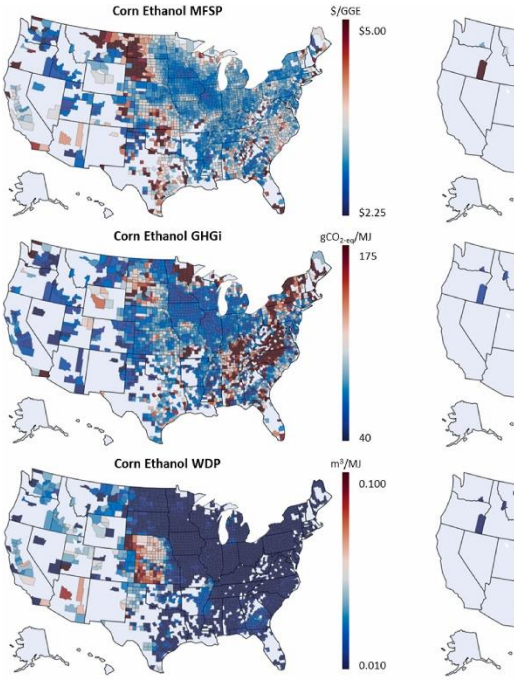


Figura 53. Resultados económicos y ambientales para bioetanol (maíz) y biodiésel (soja) [Precio mínimo de venta del combustible MFSP, Impacto GEI (GHGi), Potencial de agotamiento de agua WDP] por estado en los que se encuentra información disponible

Tomado de: (Smith et al., 2023)

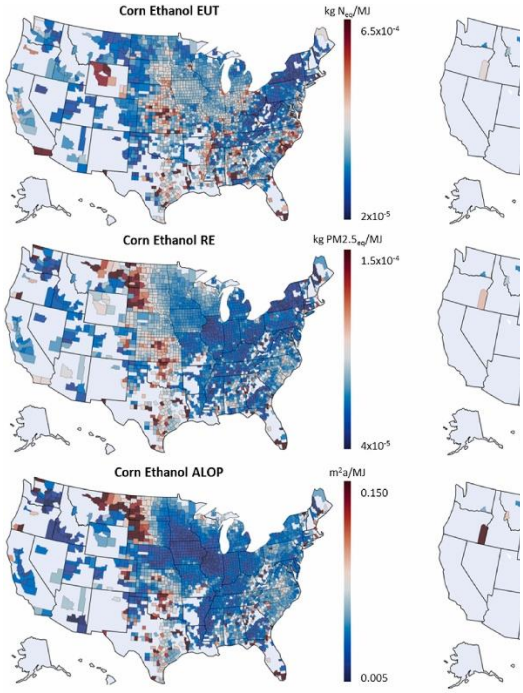


Figura 54. Resultados económicos y ambientales para bioetanol (maíz) y biodiésel (soja) [Eutrofización EUT, Efectos respiratorios RE, Ocupación de tierras agrícolas ALOP] por estado en los que se encuentra información disponible

Tomado de: (Smith et al., 2023)

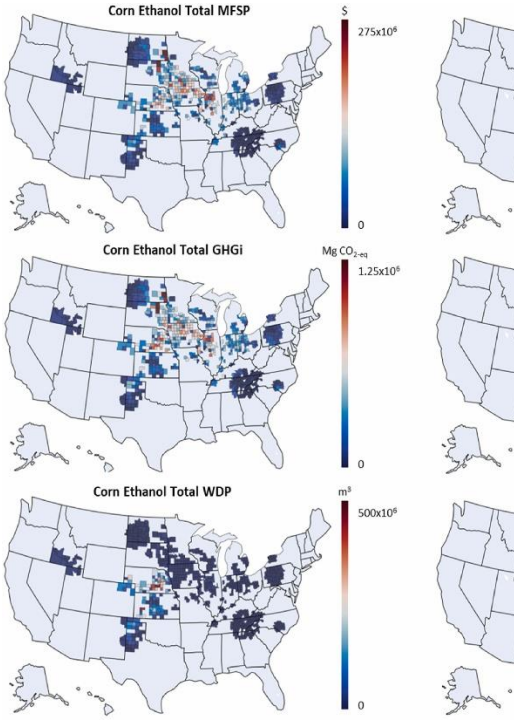


Figura 55. Impacto total y económico para bioetanol (maíz) y biodiésel (soja) [Precio mínimo de venta del combustible MFSP, Impacto GEI (GHGi), Potencial de agotamiento de agua WDP]

Tomado de: (Smith et al., 2023)

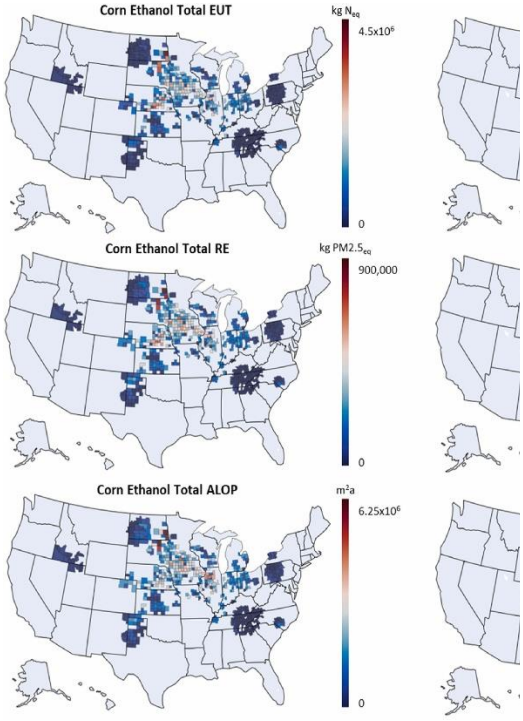


Figura 56. Impacto total y económico para bioetanol (maíz) y biodiésel (soja) [Eutrofización EUT, Efectos respiratorios RE, Ocupación de tierras agrícolas ALOP]

Tomado de: (Smith et al., 2023)

La tabla 41 soporta la información totalizada reportada en la figura 56 y figura 57.

Tabla 41. Resumen de resultados totalizados para Estados Unidos

	Bioetanol de maíz	Biodiésel de soja
Producción nacional	$14{,}1x10^{11}$ MJ	$1{,}1x10^{11}$ MJ
Costo total estimado	34 billones USD	4 billones USD
Emisiones totales (GEIi)	94,8 MMT CO_2eq	4,7 MMT CO_2eq
Potencial de agotamiento de agua (WPD)	$147x10^8$ m^3	$0{,}35x10^8$ m^3
Eutrofización (EUT)	$447x10^6$ kg N_{eq}	$10{,}8x10^6$ kg N_{eq}
Efectos respiratorios (RE)	$94x10^6$ kg $PM_{2.5eq}$	$5x10^6$ kg $PM_{2.5eq}$
Ocupación de tierra agrícola	$70x10^9$ m^2a	$14x10^9$ m^2a

Adaptado de: (Smith et al., 2023)

Al normalizar los datos para la producción nacional de biocombustibles, la información nacional se refleja en la tabla 42.

Tabla 42. Resumen de resultados normalizados para Estados Unidos en comparación con la gasolina

	Bioetanol de maíz	Biodiésel de soja	Gasolina
MFSP (USD/MJ)	0,0239	0,0361	0,0207
GEIi (gCO2eq/MJ)	67	42	93
WDP (m^3/MJ)	0,0104	$3{,}2x10^{-4}$	$0{,}27x10^{-4}$
EUT (kg N_{eq}/MJ)	$3{,}16x10^{-4}$	$9{,}8x10^{-5}$	$0{,}57x10^{-4}$
RE (kg $PM_{2.5eq}$/MJ)	$6{,}69x10^{-5}$	$4{,}38x10^{-5}$	$8{,}71x10^{-5}$
ALOP (m^2a/MJ)	0,052	0,089	$1{,}3x10^{-4}$

Adaptado de: (Smith et al., 2023)

Aunque el precio promedio puede ser competitivo con el de la gasolina, el uso de biocombustibles como el bioetanol de maíz y el biodiésel de soja reduce considerablemente las emisiones de GEI y la emisión de material particulado que causa enfermedades respiratorias, sin embargo, puede causar un mayor impacto en otros aspectos como el consumo de agua o el uso del suelo.

En relación con lo anterior, la figura 57 muestra el costo evitado por las emisiones no causadas (AGC) en las áreas donde la producción de biodiésel y bioetanol está concentrada. El costo evitado por las emisiones no causadas para Estados Unidos es de 147 USD/Mg CO_2eq evitado (126 USD/Mg CO_2eq evitado

para bioetanol de maíz y 287 USD/Mg CO_2eq evitado para bioediésel de soja), un costo competitivo con otras tecnologías de emisiones negativas que oscilan entre 50-500 USD/Mg CO_2eq evitado.

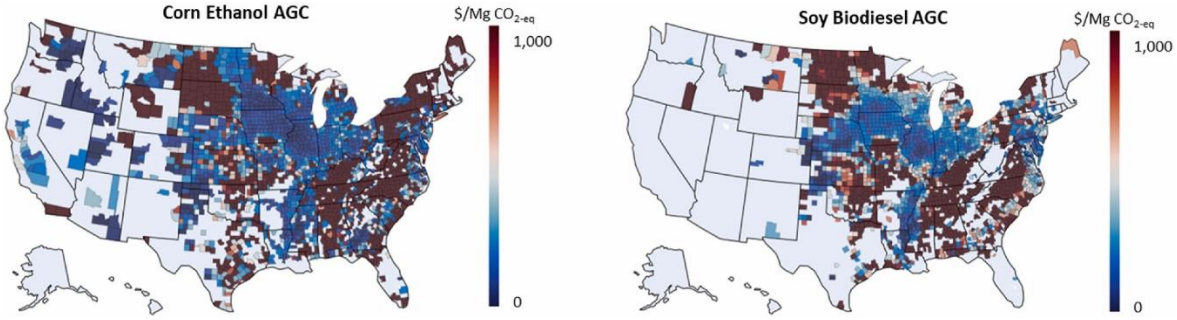


Figura 57. Coste evitado de las emisiones de gases de efecto invernadero para el bioetanol de maíz y el biodiésel de soja

Tomado de: (Smith et al., 2023)

Los resultados muestran el coste efectivo de las emisiones de gases de efecto invernadero evitadas en comparación con los combustibles convencionales derivados del petróleo (es decir, la gasolina) en USD/Mg CO_2-eq evitado.

4.1.6.2 Emisiones de gases de efecto invernadero

Para Estados Unidos, de acuerdo con su último informe bienal de actualización (BUR-5), el sector con mayor participación en las emisiones netas es el sector de energía, seguido por agricultura y el de procesos industriales y uso de productos (IPPU, por sus siglas en inglés) (véase tabla 43).

Tabla 43 Emisiones por sectores IPCC para Estados Unidos, BUR-5, en MMT CO_2eq

Sector IPCC	1990	2020	% variación	% participación 2020 (EN)

Sector IPCC	1990	2020	% variación	% participación 2020 (EN)
Energía	5341,1	4854,7	–9,1	93,0
IPPU	346,2	376,4	8,7	7,2
Agricultura	551,9	594,7	7,8	11,4
Residuos	214,2	155,6	–27,4	3,0
Emisiones totales (fuente)	6453,5	5981,4	–7,3	NA
LULUCF sector emisiones netas	–860,6	–758,9	–11,8	-14,5
Emisiones netas (fuentes y sumideros)	5592,8	5222,4	–6,6	100,0

Adaptado de: (IEA, 2023).

Dentro del sector energía y en las emisiones de CO_2, el 92 % corresponde a emisiones por combustión de combustibles fósiles, teniendo la mayor participación el sector de generación de potencia eléctrica (38 %), el sector transporte (31 %) y el sector industrial (18 %). La segunda participación en las emisiones de CO_2 se da por el uso no energético de los combustibles (2,57 %). Y la mayor participación en el sector de procesos industriales y uso de productos (IPPU) se da con la industria del cemento y la producción de hierro, acero y coque metalúrgico (véase tabla 44) (IEA, 2023).

En el caso de las emisiones de CH_4, la principal fuente de emisiones es la fermentación entérica (27 %), seguido por los sistemas de gas natural (25 %) y los vertederos (17%). Mientras que para las emisiones de N_2O, la principal fuente es la gestión de suelos agrícolas (74 %), seguido por el tratamiento de aguas residuales (6 %) y la combustión estacionaria (5 %) (véase tabla 44) (IEA, 2023).

Tabla 44. Principales fuentes de emisiones por GEI 1990-2020, BUR-5, MMT CO_2eq

Gas	Fuente	1990	2020	% Participación combustión fósil	% Participación por GEI	% Variación (1990-2020)
CO_2	Total, en CO2eq	5122,5	4715,7			–7,94
CO_2	Combustión fósil	4731,2	4342,7		92,09	–8,21
CO_2	*Transporte*	*1468,9*	*1572*	*31,05*		*7,02*
CO_2	*Sector Electricidad*	*1820*	*1439*	*38,47*		*–20,93*
CO_2	*Industrial*	*853,7*	*766,3*	*18,04*		*–10,24*
CO_2	*Residencial*	*338,6*	*315,8*	*7,16*		*–6,73*
CO_2	*Comercial*	*228,3*	*226,8*	*4,83*		*–0,66*
CO_2	*Territorios US*	*21,7*	*22,7*	*0,46*		*4,61*
CO_2	Uso no energético del combustible	112,2	121		2,57	7,84
CO_2	Producción de cemento	33,5	40,7		0,86	21,49
CO_2	Producción de hierro, acero y coque metalúrgico	104,7	37,7		0,80	–63,99
CO_2	Sistema de gas natural	31,9	35,4		0,75	10,97
CO_2	Sistema de petróleo	9,6	30,2		0,64	214,58
CO_2	Producción petroquímica	21,6	30		0,64	38,89
CO_2	Incineración de residuos	12,9	13,1		0,28	1,55
CO_2	Producción de amoniaco	13	12,7		0,27	–2,31
CO_2	Producción de cal	11,7	11,3		0,24	–3,42
CO_2	*Biomasa leñosa, etanol y biodiésel consumo*	*219,4*	*291,6*		NA	32,91
CO_2	*Bunkers internacionales*	*103,6*	*69,6*		NA	–32,82
CH_4	Total en CO_2eq	780,8	650,4			–16,70
CH_4	Fermentación entérica	163,5	175,2		26,94	7,16
CH_4	Sistema de gas natural	195,5	164,9		25,35	–15,65
CH_4	Vertederos	176,6	109,3		16,81	–38,11
CH_4	Gestión de estiércol	34,8	59,6		9,16	71,26
CH_4	Minería de carbón	96,5	41,2		6,33	–57,31
CH_4	Sistema de petróleo	47,8	40,2		6,18	–15,90
CH_4	Tratamiento de agua residual	20,3	18,3		2,81	–9,85
CH_4	Cultivo de arroz	16	15,7		2,41	–1,88
CH_4	Combustión estacionaria	8,6	7,9		1,21	–8,14
N_2O	Total, en CO_2eq	450,5	426,1			–5,42
N_2O	Gestión de suelo agrícola	316	316,2		74,21	0,06
N_2O	Tratamiento de agua residual	16,6	23,5		5,52	41,57
N_2O	Combustión estacionaria	25,1	23,2		5,44	–7,57
N_2O	Gestión de estiércol	13,9	19,7		4,62	41,73
N_2O	Combustión móvil	44,6	17,4		4,08	–60,99
N_2O	Producción de ácido nítrico	12,1	9,3		2,18	–23,14

Gas	Fuente	1990	2020	% Participación combustión fósil	% Participación por GEI	% Variación (1990-2020)
N_2O	Producción de ácido adípico	15,2	8,3		1,95	–45,39
HFCs	Total en CO_2eq	46,5	178,8			284,52
SF6	Total en CO_2eq	28,8	5,4			–81,25
NF3	Total en CO_2eq	0	0,6			NA

Adaptado de: (IEA, 2023).

4.1.6.3 Compromisos ambientales en reducción de GEI

- Reducir del 50 al 52 % en la contaminación por GEI con respecto a los niveles de 2005 en 2030.
- Transformar el sistema energético.
- Transformar el sistema de transporte.
- Transformar el sistema de construcción.
- Proteger y restaurar los sistemas naturales y la agricultura.
- Transformar el sistema productivo industrial.
- Avanzar en la economía circular para una mejora en la gestión de residuos (Whitehouse, n.d.).

4.1.6.4 Sector agrícola

— Perfil geográfico

Estados Unidos está bordeado por el océano Atlántico al este, océano Pacífico al oeste, Canadá en el norte y México y el Golfo de México al sur. Es un país grande y diverso con 9.192.000 km^2. Sus ecosistemas comprenden desde tundra ártica de Alaska, bosques secos tropicales de Hawái, territorios de ultramar, bosques pluviales templados del noreste del Pacífico, paisajes mediterráneos, desiertos del sureste, montañas rocosas con ecosistemas alpinos en el centro, extensas praderas, franjas agrícolas, bosques templados caducifolios y de coníferas hasta pantanos y humedales. Cuenta con el mayor sistema de agua dulce del mundo (The Great Lakes), grandes ríos como el Misisipi y el Misuri. El 60 % del territorio es propiedad privada, el 28 % es del Gobierno (incluyendo zonas protegidas), 8 % de la tierra es propiedad y está gestionada por los gobiernos locales y estatales y el 3 % está en manos de la Oficina de Asuntos Indígenas (Administration for Native Americans) (IEA, 2023).

— Perfil climático

El perfil climático de Estados Unidos es diverso. La temperatura anual promedio decrece dramáticamente de sur a norte, mientras la variabilidad de estaciones se incrementa. De forma similar, las precipitaciones varían en cantidad y estacionalidad (IEA, 2023).

En 2021, la agricultura batió un récord de 177 billones de dólares (18 % más que en 2020 y 14,6 % más que en 2014). Además, es la mayor fuente de empleo, con un incremento del 9 % del 2010 al 2020 (IEA, 2023).

En este mismo año, había aproximadamente 2,01 millones de granjas y ranchos que cubren más o menos 362 millones de hectáreas. El 85 % de las granjas tienen ventas menores a 100.000 dólares y el 4 % mayores o iguales a un millón de dólares. El tamaño promedio de las granjas es de 180 hectáreas (IEA, 2023).

La agricultura corresponde al 11,4 % de las emisiones del país que está realizando esfuerzos para reducirlas y promover el secuestro del carbono en relación con el uso del suelo en tierras agricultoras y ganado (IEA, 2023).

El sector agricultor comprende las emisiones por diferentes fuentes, incluyendo cultivos, suelos orgánicos, uso de fertilizantes nitrogenados, fermentación entérica, gestión de estiércol y producción de arroz. La ampliación de fertilizantes es la mayor fuente de emisiones de óxido nitroso (N_2O) en 2019, sin embargo, los suelos también tienen la capacidad de secuestrar y almacenar gran cantidad de carbono, por tanto, una oportunidad radica en reducir las emisiones con el manejo de suelos, la mejora en la eficiencia en el uso de fertilizantes y reducir las emisiones de metano provenientes del ganado y la producción de arroz (IEA, 2023).

De otro lado, el sector de uso de la tierra, cambios en uso de la tierra y silvicultura (LULUCF) contribuye a las emisiones atmosféricas, pero éstas son compensadas por el carbono absorbido por los bosques, vegetación y suelos. En 2020, los sumideros equivalieron al 13 % de las emisiones del país. Cabe resaltar que Estados Unidos posee la cuarta mayor área forestal del mundo, con 310 millones de hectáreas (IEA, 2023).

Durante el periodo 1990-2020, las emisiones netas del sector agricultor incrementaron un 7,8 %, mientras que los sumideros en el sector de uso de la tierra, cambios en uso de la tierra y silvicultura decrecieron un 9 % (IEA, 2023).

— *Políticas e iniciativas*

El Departamentode Agricultura de Estados Unidos (USDA, por sus siglas en inglés) desarrolló una estrategia llamada Climate-Smart Agriculture and Forestry Strategy para reducir las emisiones y promover el secuestro de carbono a través de iniciativas de conservación, obtener bioproductos y combustibles sostenibles y reducir el riesgo de incendios forestales (IEA, 2023).

El IRA está realizando inversiones históricas para apoyar a granjeros, rancheros, propietarios de tierras en el desarrollo de prácticas inteligentes para reducir las emisiones GEI e incrementar el almacenamiento de carbono (IEA, 2023).

El gobierno de Biden tiene la meta de restaurar el 30 % de las tierras y aguas al 2030 con el soporte a escala local. Para ello está desarrollando el American Conservation and Stewardship Atlas para medir el progreso en los esfuerzos de conservación y restauración. En 2022, emitió una Orden Ejecutiva para fortalecer los bosques nacionales, comunidades y economías locales para salvaguardar los bosques maduros y viejos, incrementar el apoyo en reforestación y avanzar más rápido en soluciones basadas en la naturaleza. El Gobierno también promueve iniciativas para preservar el Bosque Nacional Tongass que posee la mayor capacidad de almacenamiento de carbono que cualquier otro bosque nacional (IEA, 2023).

4.1.6.5 Sector producción y transformación

El sector industrial es la columna vertebral del desarrollo económico de Estados Unidos. Corresponde a un tercio de las emisiones GEI del país y es un sector de difícil descarbonización. Es el tercer mayor contribuyente, precedido por el sector transporte y la generación de electricidad. Si se incluyen las emisiones directas e indirectas asociadas al sector, su contribución corresponde al 30 % de las emisiones (IEA, 2023).

Durante 1990-2020, las emisiones del sector de procesos industriales y uso de productos (IPPU) crecieron un 8,7 % (IEA, 2023). Desde 1990, el total de emisiones del sector industrial (directas e indirectas) presenta un decrecimiento del 22 % como resultado de medidas estructurales, mejoras en la eficiencia energética y la producción de materiales menos intensivos en carbono (IEA, 2023) (véase figura 58).

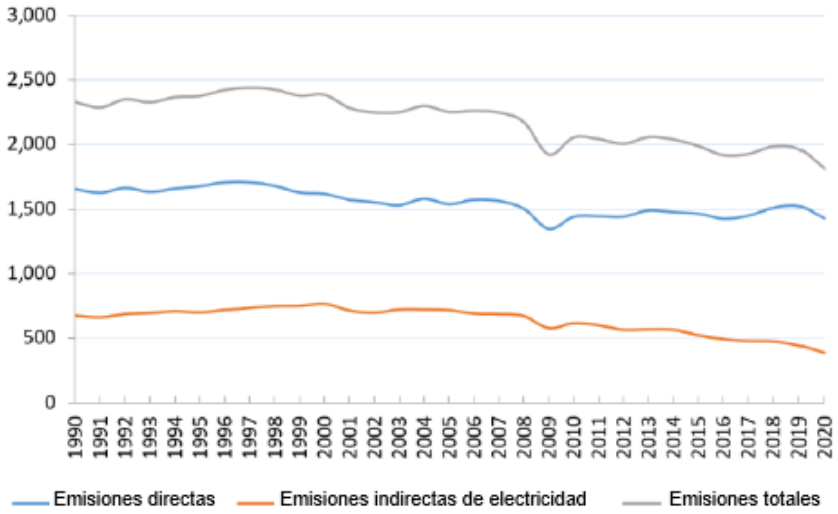


Figura 58. Emisiones del sector Industrial en Estados Unidos (MMt CO_2eq)

Tomado de: (IEA, 2023).

— *Políticas e iniciativas*

Biden lanzo una iniciativa federal Buy Clean para promover materiales bajos en carbono en construcción, despliegue de tecnologías de captura, utilización y secuestro de carbono (CCUS) y el compromiso de negociar con la Unión Europea el primer acuerdo sectorial basado en comercio de emisiones del acero y aluminio (IEA, 2023).

Con el fin de avanzar en la nueva generación de manufactura limpia, el Departamento de Energía (DOE, por sus siglas en inglés) publicó el primer plan para construir una línea base del sector energético industrial, la Ley de Reducción de la Inflación de 2022 (IRA, Inflation Reduction Act), la cual creó el programa Advanced Industrial Facilities Deployment Program que provee asistencia financiera para sectores industriales con emisiones intensivas (hierro y acero,

cemento, químicos) para usar electrificación, combustibles bajos en carbono, captura de carbono y otros procesos de manufactura avanzados (IEA, 2023).

El crédito fiscal para la producción de hidrógeno limpio aprovecha las inversiones para impulsar la producción de hidrógeno limpio y su posterior uso en la industria pesada. De forma similar, la ampliación y mejora de los créditos fiscales para la aplicación industrial de captura y almacenamiento de carbono (CCS) impulsa las inversiones de la Ley Bipartidista de Infraestructura (BIL) en captura y almacenamiento de carbono e infraestructura de transporte de CO_2 para abatir emisiones industriales (IEA, 2023).

— *Otros programas de agencias federales*

- La Ley de Reducción de la Inflación de 2022 (IRA, Inflation Reduction Act) también provee soporte a la manufactura limpia, incluyendo una expansión del Advanced Energy Project Credit para el reequipamiento industrial o facilidades para reducir emisiones. También creó un nuevo Advanced Manufacturing Production Credit para apoyar la manufactura de componentes de la cadena de suministro de módulos solares, turbinas de viento, células de baterías, minerales críticos, etc.
- La Ley Bipartidista de Infraestructura (BIL, Bipartistian Infrastructure Law) fundó el programa Advanced Energy Manufacturing and Recycling Grant Program para ayudar a pequeños y medianos productores a elaborar o reciclar productos energéticos limpios o emplear equipos que ayuden a reducir emisiones (IEA, 2023).
- Para promover el liderazgo voluntario, el Departamento de Energía (DOE) tiene el programa Better Plants el cual involucra más de 270 manufactureros para acelerar la adopción de prácticas más efiientes energéticamente.
- La Ley Bipartidista de Infraestructura (BIL) destina 550 millones de dólares al DOE para expandir el programa Industrial Assessment Centers Program para entrenar estudiantes de ingeniería para brindar una asesoría técnica a pequeños y medianos empresarios en guardar energía, mejorar la productividad y reducir desechos (IEA, 2023).

- Para acelerar la innovación en tecnologías clave, el DOE lanzó el Industrial Heat Shot para desarrollar tecnologías de descarbonización competitivas en costo con al menos un 85 % de reducción de emisiones GEI en 2035.
- El DOE está desarrollando el Clean Energy Manufacturing Innovation Institute para desarrollar tecnologías de electrificación industrial que reduzcan las emisiones en sinergia entre la academia, la industria y el Gobierno (IEA, 2023).
- El gobierdo de Biden está tomando más de 50 acciones para reducir las emisiones de metano sobre todo en el sector de petróleo y gas, agricultura, desechos, minería (IEA, 2023).
- En 2020, bajo el American Innovation and Manufacturing Act (AIM Act), se le exigió a la Agencia de protección Ambiental (EPA) abandonar la producción y consumo de hidrofluorocarbonos (HFC) en línea con la enmienda de Kigali del Protocolo de Montreal, para ello promueve iniciativas que evitan la importación ilegal de estas sustancias y el uso de alternativas avanzadas que sustituyen su producción y consumo (IEA, 2023).

4.1.6.6 Sector transporte y consumo

Las actividades del sector transporte corresponden al 36,2 % de las emisiones de CO_2 de la combustión de combustibles fósiles en 2020 (38,5 % transporte de pasajeros, 26,3 % camiones de carga). Entre 1990 y 2020, el sector transporte incrementó sus emisiones un 7 %; mientras que, entre 2019 y 2020, se redujeron un 13,3 %, esto asociado a las restricciones de la pandemia por COVID-19 (IEA, 2023).

El incremento en las emisiones del sector transporte se debe, principalmente, al incremento en la demanda de viajar (IEA, 2023). En 2020, la mayoría de las emisiones procedían de vehículos ligeros (57 %), camiones medianos y pesados (26 %), aviones (8 %), ferrocarril (2 %), barcos y buques (2 %) y otras fuentes como autobuses y motocicletas (5 %) (IEA, 2023).

Mientras el consumo de combustibles fósiles continúa dominando el sector transporte, iniciativas federales como el programa RFS promueve el crecimiento de fuentes alternativas, por ejemplo, con dicho programa el consumo de biodiésel pasó de 10 millones de galones en 2001 a 2 billones de galones en 2016 (IEA, 2023) (véase figura 59).

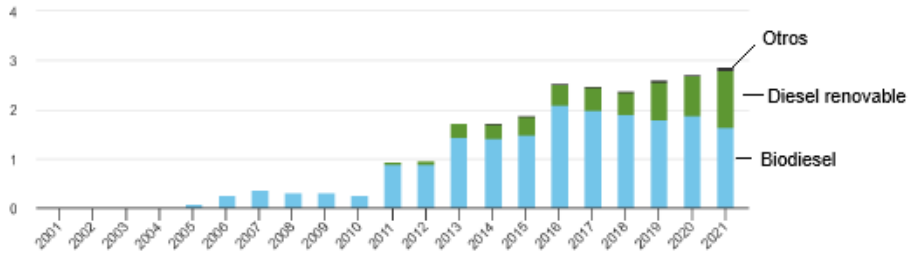


Figura 59. Consumo de biodiésel, diésel renovable y otros biocombustibles en Estados Unidos (billones de galones)

Tomado de: (IEA, 2023).

De igual forma, la venta de vehículos eléctricos se está incrementando rápidamente como resultado de los nuevos modelos, las mejoras en infraestructura, incentivos de crédito y reducción de costos (IEA, 2023).

— *Políticas e iniciativas*

La administración de Biden ha lanzado nuevas iniciativas para acelerar la descarbonización del sector transporte.

En 2021, se emitió una Orden Ejecutiva para fortalecer el liderazgo americano en carros y camiones limpios, con el objetivo nacional de que el 50 % de todos los carros de pasajeros y camiones ligeros vendidos en 2030 sean cero emisiones (incluidos vehículos eléctricos de batería, híbridos enchufables o de pila de combustible).

También existe la iniciativa para fortalecer la cadena de suministro de baterías para vehículos eléctricos y otros usos.

El U. S. Aviation Climate Action Plan busca lograr un sector de aviación neto cero en 2050.

El Sustainable Aviation Fuel Grand Challenge busca reducir costos, promover el desarrollo de combustibles de aviación sostenibles con una meta de 3 billones de galones por año para 2030.

Recientemente se firmó el Global Memorandum of Understanding on Zero-Emission Medium and Heavy-Duty Vehicles con el objetivo de obtener un 30 % de nuevas ventas de cero emisiones en 2030 (IEA, 2023).

La BIL prevé las mayores inversiones para mejorar el transporte público (despliegue de una red nacional de vehículos eléctricos públicos y de ferrocarril de pasajeros, despliegue de una red nacional de cargadores eléctricos, refuerzo de cadenas de suministro de baterías, cambio de flotas de autobuses y escolares a modelos de bajas o nulas emisiones (IEA, 2023).

El Inlfation Reduction Act provee créditos fiscales para acelerar la adopción de carros limpios, soportar la manufactura de baterías, instalar equipos de carga en comunidades rurales de renta baja a moderada, facilitar el uso de combustibles limpios, incluido el biodiésel, diésel renovable, biocombustibles avanzados y combustibles sostenibles de aviación. También incluye programas de apoyo a tecnologías de vehículos avanzados, como también vehículos de reparto y puertos más limpios (IEA, 2023).

Cuatro agencias federales (Department of Energy, Department of Housing and Urban Development, Department of Transportation, and the Environmental Protection Agency) firmaron un memorando de entendimiento para desarrollar un proyecto enfocado en lograr la descarbonización generalizada y equitativa del sector transporte. Algunos de los programas clave de las iniciativas de las agencias federales incluyen (IEA, 2023):

- Establecimiento de estándares de bajas emisiones y combustibles eficientes para carros, camiones y vehículos de carga pesada: EPA-2021 y NHTSA-2022
- Inversión en infraestructura y manufactura de vehículos cero emisiones: Electric Vehicle Charging Action Plan (despliegue de recursos de la BIL) y The Advanced Technology Vehicle Manufacturing Loan Program.
- Soportar el desarrollo orientado al tránsito.

- Ayudar a los estados a reducir las emisiones de transporte mediante el Carbon Reduction Program creado por la BIL.
- Afrontar las emisiones en aviación: El programa CLEEN acelera el desarrollo de nuevas tecnologías de aeronaves y motores que reduzcan el consumo de combustibles, emisiones y ruido.
- Expandir la infraestructura de biocombustibles: Higher Blends Infrastructure Incentive Program (HBIIP) de USDA, incrementa las ventas y uso de mezclas de bioetanol y biodiésel al expandir la infraestructura de combustibles renovables derivados de productos agrícolas.
- Existen estándares no federales para vehículos de bajas emisiones o cero emisiones, siendo el más reconocido el estándar de California adoptado por diferentes estados y distritos.

4.1.6.7 Política ambiental

Existe una gran de variedad de políticas, iniciativas y programas para la preservación del ambiente y la salud de los americanos.

En 2015, 196 Estados partes, entre ellos Estados Unidos, firmaron el Acuerdo de París para contrarrestar conjuntamente los efectos del cambio climático y el incremento de la temperatura de la Tierra. El gobierno de Trump (2017-2021) fue escéptico al tema y en 2021 Biden (2021-2025) ratificó el compromiso del país en trabajar en la reducción de emisiones GEI.

Las contribuciones determinadas a nivel nacional de Estados Unidos (NDC, por sus siglas en inglés) son el núcleo del Acuerdo de París y de la consecución de los objetivos NDC a largo plazo: “To achieve an economy-wide target of reducing its net greenhouse gas emissions by 50-52 percent below 2005 levels in 2030” (United States of America, 2021)

En 2021, el gobierno Biden creó una Orden Ejecutiva enfocada en enfrentar la crisis climática movilizando las capacidades federales en reducción de emisiones nacionales con la creación de puestos de trabajo bien remunerados, impartiendo justicia ambiental y protegiendo la salud pública. Entre las estructuras e iniciativas creadas se encuentran (IEA, 2023):

- Creación del primer Nacional Climate Task Force, que reúne lideres de las agencias federales para luchar contra el cambio climático.
- Creación de la iniciativa Justice40 Initiative, para obtener el 40 % de los beneficios de las inversiones federales en clima, energías limpias y relacionados para las comunidades más desfavorecidas.
- Creación de la Interagency Working Group (IWG) on coal and power plant communities and economic revitalization para beneficiar a las comunidades con generación de empleo, limpieza de contaminación y otras oportunidades que brinda la economía de la energía limpia.

La administración Biden ha promovido medidas para reducción de emisiones GEI como (IEA, 2023):

- Acelerar proyectos de energías limpias (eólica, solar, etc.).
- Acelerar el transporte eléctrico, estableciendo una meta de ventas de vehículos cero emisiones de 50 % en 2030. Finalizar el estándar más fuerte para emisiones GEI en transporte de pasajeros y fortalecer las cadenas de suministro de baterías.
- Hacer frente a los súper contaminantes a través del U. S. Methane Emissions Reduction Action Plan que cubre la industria del petróleo y gas, agricultura, edificaciones y más. La ratificación de la enmienda de Kigali al Protocolo de Montreal para sustancias agotadoras de la capa de ozono y la eliminación progresiva de los HFC.
- Soportar la descarbonización industrial, impulsando el primer instrumento de comercialización basado en carbono y medidas Buy Clean para promover la producción baja en carbono de materias primas como el acero y avanzar en la investigación, desarrollo, demostración y despliegue de tecnologías como el hidrógeno limpio.
- Reducir las emisiones y costes energéticos en edificaciones, fortaleciendo los estándares de eficiencia federales para aparatos y equipos y estableciendo alianzas público-privadas para avanzar en la modernización y electrificación de edificios.

- Mejorar el secuestro de carbono, lanzando la iniciativa America the Beautiful para conservar el 30 % de las tierras y aguas a 2030. Promulgar una Orden Ejecutiva para reforzar los bosques, otras soluciones basadas en la naturaleza y apoyar la agricultura inteligente.
- Priorizar la innovación, identificando tecnologías para lograr emisiones netas nulas en 2050, priorizando 5 de ellas para que reciban apoyo federal de inmediato.
- A través del Plan federal de sostenibilidad, reducir las emisiones en 300.000 edificios, 600.000 vehículos y 650 billones de dólares en poder adquisitivo anual en el gobierno federal.

Biden también promulgó dos leyes transformadoras (IEA, 2023):

- La Ley Bipartidista de Infraestructura (BIL Bipartistian Infraestructure Law) proporcionará inversión en proyectos fundacionales para la economía de energía limpia en Estados Unidos.
- La Ley de Reducción de la Inflación de 2022 (IRA, Inflation reduction act) espera un impacto diez veces mayor que cualquier otra legislación de orden climático en Estados Unidos. Provee 370 billones de dólares para la reducción de emisiones, justicia ambiental y resiliencia climática.

Sobre el programa federal de la Agencia de Protección Ambiental (EPA), el RFS1 estableció el uso de 4 billones de galones de biocombustible en combustibles de petróleo en 2006, que se acercó a los 7,5 billones de galones en 2012, fue parte del Energy Policy Act of 2005 y se extendió por el Energy Independence and Security Act of 2007 (EISA) (Das, 2020).

Por su parte, el RFS2 partió del EISA haciéndose efectivo desde diciembre 19 de 2007. Sugería el uso de 9 billones de galones de biocombustibles en 2008 y alcanzó los 36 billones de galones en 2022 (Das, 2020).

La política establecía un contenido de biocombustibles entre 8-11 % de 2010 a 2017 y clasificarlos en 4 categorías, cada una con una materia prima y una

intensidad de carbono (CI) reducida (bicombustible convencional, biocombustible avanzado, diésel basado en biomasa y biocombustible celulósico, con reducciones respectivas de CI mínima de 20, 50, 50 y 50 % en relación con los derivados del petróleo) (Das, 2020).

— *Iniciativas de materias primas para biocombustibles avanzados (Das, 2020)*

El programa Biomass Crop Assistance Program (BCAP) provee asistencia financiera a dueños de tierras y operadores que establecen, producen y entregan cultivos de materias primas para biocombustibles avanzados. Pueden optar por un reembolso del 50 % del coste del establecimiento de un cultivo, así como pagos anuales de hasta 5 años para materias primas herbáceas y de hasta 15 años para materias primas leñosas. Ofrece pagos de contrapartida de 1 USD/ton seca hasta 20 USD/ton seca (Das, 2020).

El programa Biorefinery Assistance Program ofrece garantías de préstamos para el desarrollo, construcción y modernización de biorefinerías a escala comercial que produzcan biocombustibles avanzados. La garantía de préstamo máxima es de 250 millones de dólares y la subvención máxima es del 50 % de los costes del proyecto (Das, 2020).

Existen diferentes iniciativas para fomentar la investigación o la educación como el Advance Energy Research Project Grants, Biodiesel Education Gants, Biomass Research and Development Initiative. Igualmente, se pueden encontar iniciativas voluntarias como el Clean Construction and Agriculture, Voluntary Airport Low Emissions Program cuyo enfoque se basa en la reducción de emisiones (Das, 2020).

4.1.7 Aspectos sociales

Según informes publicados por las Naciones Unidas, en Estados Unidos existen más de 100 fábricas de etanol, concentradas en pocas empresas de gran tamaño, de las cuales 5 representan el 30 % de la producción total del país. A nivel económico, la industria de biocombustibles genera un impacto de 23,3 billones de dólares y más de 72.200 empleos en la cadena de valor, comprendida por los sectores agrícola, de trituración y de producción y comercialización, siendo el

sector agrícola el que mayores empleos genera (28.236) y el sector de la producción el que mayor impacto económico tiene y mejores salarios paga.

Asimismo, puede destacarse en Estados Unidos un efecto positivo documentado de los biocombustibles en la salud, relacionado con la prevención de enfermedades, ausentismo laboral, muertes prematuras y la carga que esto tiene frente al sistema de salud.

En cuanto a las implicaciones por el uso de los suelos, existe un debate frente al mecanismo de medición de estas, sobre todo respecto a los conflictos directos, (*direct land use conflict*, DLUC) e indirectos (*indirect land use conflicts*, ILUC).

A continuación, se presentan los principales efectos respecto de los Estados Unidos.

4.1.7.1 Seguridad alimentaria

Uno de los efectos secundarios del desarrollo de la industria de biocombustibles es el alza de los precios de las materias primas para el desarrollo de esta industria, esto como consecuencia del alejamiento de la producción de alimentos y la conversión de tierras, principalmente de bosques tropicales y pastizales, y en cultivos, lo que ha derivado en un alza en el precio de los alimentos.

De acuerdo con la EPA, diferentes modelos económicos muestran que, en Estados Unidos, el uso de biocombustibles puede dar lugar a un aumento de los precios de los cultivos. Señala la agencia que un estudio de 2013 encontró proyecciones para el efecto de los biocombustibles en los precios del maíz en 2015, que oscilaron entre un aumento del 5 y el 53 % (Zhang et al. 2013). El informe del 2011 del Consejo Nacional de Investigación sobre el RFS incluyó varios estudios que establecieron un aumento del 20 al 40 % en los precios del maíz de los biocombustibles entre 2007 y 2009. Un documento de trabajo del Centro Nacional de Economía Ambiental (NCEE) resaltó un aumento del 2 al 3 % en los precios del maíz a largo plazo, por cada aumento de cada galón en la producción de etanol de maíz en promedio a través de 19 estudios (Condon et al., 2013). El aumento de los precios de los cultivos conduce a un aumento de los

precios de los alimentos, aunque se espera que los impactos en los alimentos al por menor en los Estados Unidos sean pequeños (NRC 2011).

Documentan Michael Lim y Yanfeng Ouyang (2013) que el grano de maíz en Estados Unidos aumentó de un mínimo de 1,5 dólares por bushel en el año 2000 a un máximo de 7,1 dólares por bushel en 2013, periodo en el que el maíz fue una de las principales materias primas para la producción de bioetanol (Lim, 2013).

Frente a esta problemática, señala la Clean Fuel Foundation que los aumentos significativos en la productividad agrícola de Estados Unidos han llevado a que se produzcan más calorías por acre y a una menor necesidad de tierras de cultivo, no afectando la seguridad alimentaria en los Estados Unidos. La producción de más cereales para la alimentación del ganado, así como el cambio gradual del ganado vacuno a las aves de corral, han reducido la necesidad de tierras de pastoreo. Estas tendencias tienen implicaciones para el cambio inducido en el uso de la tierra (ILUC), que pueden no ser capturadas completamente por los sistemas de modelado actuales (Clean Fuel Foundation, 2018) y teniendo efectos positivos frente a la seguridad alimentaria en el país.

Ahora bien, respecto a las implicaciones que tiene la industria de los biocombustibles en Estados Unidos respecto de los países en desarrollo, de acuerdo con un reporte de ActionAid International USA, desde el año comercial 2005-2006 hasta 2010-2011, la expansión del etanol en Estados Unidos costó a los países importadores netos de maíz 11.600 millones de dólares en precios más altos del maíz, y más de la mitad de ese costo, 6600 millones de dólares, corrió a cargo de los países en desarrollo.

Los países en desarrollo que importan la mayor parte de sus alimentos son particularmente vulnerables a la crisis alimentaria. Muchos de estos países sólo se han vuelto fuertemente dependientes de fuentes externas de alimentos básicos en los últimos 25 años. Estos países en desarrollo, importadores netos de alimentos (INFIDC), experimentaron costos relacionados con el etanol de 2100 millones de dólares en 6 años (Oatway et al., 2012).

4.1.7.2 Uso de la tierra e impacto a comunidades locales, agrícolas e indígenas

— Usos de la tierra

De acuerdo con Scott Malcolm y Marcel Aillery, la demanda de maíz y otras materias primas para la producción de biocombustibles tienen el potencial de transformar el paisaje agrícola al aumentar la demanda por productos agrarios, la conversión de la tierra para el uso en la producción de cultivos y un uso más intensivo de fertilizantes y otros insumos, aumentando el potencial de degradación ambiental (Malcolm & Aillery Marcel, 2009).

En este sentido, se espera que las tierras de cultivo se expandan en todas las regiones de Estados Unidos, pero principalmente en las regiones tradicionales productoras de maíz, las llanuras del norte, los estados de los Lagos, incluso en tierras inscritas en el Programa de Reserva de Conservación (CRP) del USDA y que los agricultores planten maíz de forma continua, en lugar del maíz con soja u otros cultivos. Los datos de la Agencia de Servicios Agrícolas de USDA indica que el total de tierras inscritas en el CRP disminuyó de 36.7 millones de acres en 2007 a 22,6 millones acres en 2018 (Wang & Khanna Madhu., 2023).

Refieren Scott Malcolm y Marcel Aillery que, en la medida que se cultive más tierra y que los agricultores ejecuten patrones de cultivo y prácticas de producción, es probable que cambie el impacto del sector agrícola en el suelo y el agua. Destacan que el cambio a maíz ha desplazado la soja y los cultivos de grano pequeño que son menos intensivos en uso de insumos de riego y en el uso de químicos que mejoran el rendimiento de los cultivos, pudiendo afectar zonas que son altamente erosionables (Malcolm & Aillery Marcel, 2009).

La producción de materias primas para biocombustibles también podría derivar en mayores emisiones de gases de efecto invernadero como consecuencia de cambios en la labranza y de la conversión de la tierra en cultivo, lo que puede reducir el carbono almacenado en el suelo (Malcolm & Aillery Marcel, 2009).

En Estados Unidos también se presenta la discusión respecto del potencial de los biocombustibles frente al cambio directo e indirecto en el uso de la tierra. Esto con consecuencias relacionadas con la generación de mayores emisiones de

gases de efecto invernadero (GEI), intensificación de la erosión del suelo y reducción del hábitat de los animales salvajes. Este debate se ha visto potenciado frente a la mayor demanda de biodiésel, el cual puede generar una presión para aumentar la producción de palma, tanto por el uso directo de biodiésel como por la sustitución de aceite de palma por aceite de soja que se desplaza para producir biodiésel derivado de soja (Taheripour, 2018).

En Estados Unidos se han utilizado dos fuentes de análisis para la medición de las implicaciones por el cambio inducido en el uso de la tierra (ILUC):

- GTAP-BIO (Global Trade Analysis Project): Permite evaluar las respuestas mediadas por el mercado al aumento de las necesidades de biocombustibles, incluida la respuesta de las implicaciones por cambio inducido en el uso de la tierra (ILUC) que puede ocurrir si la demanda de biocombustibles en una región induce a los cambios de la tierra en otra región para compensar la pérdida de materias primas para biocombustibles. Los impactos de GEI de dichas ILUC mediados por el mercado se estiman acoplando los factores de emisión de GEI (del modelo AEZ-EF, *agro-ecological zone emission factor model*) con la cantidad de conversión de tierras que ocurre en cada tipo de zona AEZ para calcular una intensidad de emisión de carbono (IC) de ILUC, expresada en unidades de g CO_2eq por MJ de combustible producido.
- El Modelo de Gestión Global de la Biosfera del IIASA (IIASA Global Biosphere Management Model) (GLOBIOM) se utiliza para analizar la competencia por el uso de la tierra entre la agricultura, la silvicultura y la bioenergía, que son los principales sectores productivos basados en la tierra. El modelo de equilibrio parcial representa diversas actividades basadas en el uso de la tierra, incluidos los sectores agrícolas, forestal y de bioenergía. El modelo se construye siguiendo una configuración ascendente basada en información detallada en unas celdas de una cuadrícula con la información agrícola, proporcionando datos de costos biofísicos y técnicos. Esta estructura detallada permite tener en cuenta un rico conjunto de parámetros ambientales. Su enfoque de modelado de

equilibrio espacial representa el comercio bilateral basado en la competitividad de costos.

Si bien es cierto, que existe preocupación por los impactos del aumento de cultivos para biocombustibles en los Estados Unidos, de acuerdo con los resultados del taller sobre cambios en el uso de la tierra realizado por la Clean Fuels Foundation en 2018, los aspectos relacionados con el cambio indirecto (o inducido) del uso de la tierra (ILUC) sigue siendo un asunto complejo y controvertido en los Estados Unidos y a nivel mundial, por lo que no se cuentan con datos fiables.

— *Impacto a comunidades locales*

- **Impacto en los productores de cultivos:** La producción de biocombustibles y las normas de fomento ha llevado a un incremento de los costos de las materias primas agrícolas utilizadas para esta industria, con ganancias subsecuentes para los agricultores. Reporta el International Council on Clean Transportation que para 2015 se generaron 14.100 millones de dólares en ganancias para el sector agrícola (International Council on Clean Transportation, 2021).
- **Incremento de insumos para otras industrias:** Se han identificado conflictos relacionados con el incremento de los insumos para la ganadería. Al respecto, del estudio realizado por Selfa, Theresa L, Goe, Richard, Kulcsar, Laszlo, Middendorf, Gerad, & Bain, Carmen señaló que diversos agricultores y ganaderos locales tenían frustración debido a que las plantas de etanol no les vendían, de acuerdo a su compromiso, los granos secos de destilería (los cuales eran vendidos en el mercado nacional o internacional a quien les ofreciera un mejor precio), un subproducto de la producción de etanol que se utiliza como alimento para animales y que hubiera podido aportar a los ganaderos locales y al desarrollo económico al alentar otros productos de la ganadería como lácteos (Selfa et al., 2013).
- **Sobrecarga en la infraestructura local:** De acuerdo con el estudio The Biofuels Revolution: Understanding the Social, Cultural and Economic Impacts of Biofuels Development on Rural Communities, la industria de los

biocombustibles, principalmente la del etanol, generó una sobrecarga de la infraestructura local imponiendo costos a las comunidades locales como consecuencia del aumento de camiones pesados en las carreteras, lo que afecta las vías y la infraestructura de transporte vial. Esta carga la sienten con mayor intensidad los condados rurales, ya que son los responsables del mantenimiento de la mayor parte de esta infraestructura y ya están sobrecargados (Selfa et al., 2013).

- **Afectación sobre el recurso hídrico y el aire:** Asimismo, se identifican impactos sobre el recurso hídrico como consecuencia de la actividad de riego para los cultivos de maíz o para el uso o contaminación de este recurso en los procesos productivos. El documento de Selfa et al. se identifican conflictos en Kansas frente a la producción de materias primas para biocombustibles, en la zona circundante al acuífero de Ogallala, los cuales se incrementan en época de sequías (Selfa et al., 2013). También documenta impactos a la salud relacionados con la contaminación del agua y el aire en Iowa y Kansas, señala que 21 de las 26 plantas en Iowa han tenido diversas citaciones por infracciones a las normas ambientales.

  También se destaca la afectación en el recurso hídrico como consecuencia del uso de fertilizantes, los cuales tienen el potencial de afectar el agua debido a la lixiviación de nutrientes y la escorrentía de nitrógeno y fósforo, la cual es una fuente importante de contaminación. Para Malcolm Scott y Marcel Aillery, se estima que la escorrentía de nitrógeno a las masas de agua superficial en los Estados Unidos tendría un aumento de 26.500 toneladas para 2016, o un 2,5 % por encima de los niveles de referencia estimados. El aumento proyectado en la escorrentía de nitrógeno es más que proporcional al aumento del 1,5 % en la superficie plantada de Estados Unidos, lo que refleja el cambio a la superficie de maíz y la expansión adicional de las tierras de cultivo en tierras marginales (Malcolm & Aillery Marcel, 2009).

  A su vez, los autores citados señalan que la calidad del agua también se vería afectada por la erosión del suelo en las tierras de cultivo, con

aumentos más altos probables en las llanuras del norte, los estados de los Lagos y el delta.

- **Afectación sobre los ecosistemas locales y la biodiversidad:** La conversión de tierras para la producción de cultivos también puede afectar los recursos locales de vida silvestre, reducir sus hábitats, afectar a especies de peces entre otras, como resultado de la conversión de tierras de usos menos intensivos como pastizales nativos, tierras forestales en tierras de cultivo.

4.1.7.3 Salud pública

Asimismo, se identifican impactos positivos. En este entendido, la Clean Fuels Alliance America desarrolló en conjunto con la consultora Trinity un estudio sobre los impactos de los biocombustibles, principalmente del biodiésel, en la salud que pueden ser medidos en reducción de costos médicos. Dichos beneficios se dan como consecuencia de reducir la contaminación de los mercados que son más difíciles de descarbonizar: el transporte pesado y la calefacción residencial (Clean Fuel Alliance of America, n.d.).

El estudio utilizó herramientas estándar de modelado de dispersión del aire de la EPA, junto con evaluaciones de riesgos para la salud y valoraciones de beneficios bien establecidas, para calcular los beneficios para la salud pública y los ahorros económicos resultantes del cambio del combustible diésel al 100 % biodiésel (B100) en usos de transporte y calefacción. Las comunidades estudiadas incluyeron Phoenix, Las Vegas, Houston, Detroit, Minneapolis-St. Paul, Chicago, San Louis, Indianápolis, Cleveland-Akron-Canton, Ohio, Boston, Búfalo, Nueva York, Puerto de Elizabeth, Nueva York-Nueva Jersey, Charlotte, Carolina del Norte, Filadelfia y el Distrito de Columbia, la mayoría de las cuales figuran entre las “ciudades más contaminadas” de la Asociación Estadounidense del Pulmón. Entre sus resultados concluyó los siguientes beneficios (Clean Fuel Alliance of America, n.d.):

- Prevención de más de 456.000 casos de asma.
- Prevención de más de 142.000 días de enfermedad.

- Prevención de más de 910 muertes prematuras.
- Ahorro de más de 7,5 billones de dólares en materia de costos de salud.
- Reducción del 45 % en el riesgo de cáncer por uso de biodiésel puro en camiones y de un 86 % cuando se usa biocombustible para calefacción doméstica.

4.1.7.4 Condiciones laborales y de seguridad y salud en el trabajo

— Características de la población empleada

De acuerdo con información del Departamento de Energía de los Estados Unidos recogidos en *Biomass Magazine*:

- El 11 % de los trabajadores del sector de bioenergía están cubiertos por un acuerdo sindical, siendo mayor que el promedio nacional, que es del 6 %. El porcentaje de trabajadores sindicales en etanol de maíz es del 7 %.
- El 69 % de los trabajadores del sector son hombres, frente al 53 % del promedio nacional. Para el etanol, el 69 % eran hombres. Para otros biocombustibles el porcentaje de hombres era del 66 %.
- El 29 % de trabajadores son no blancos, un porcentaje mayor al promedio nacional que es del 22 %.
- El 11 % de los trabajadores del sector de bioenergía son veteranos, en comparación con el 6 % a nivel nacional. Los veteranos representan el 16 % de la fuerza laboral del etanol de maíz, una mayor concentración de veteranos que cualquier otra tecnología energética. Para otros biocombustibles, los veteranos representaron el 8 %

— Puestos de trabajo temporales

Una de las principales quejas o dificultades que evidencian las comunidades respecto de la industria de los biocombustibles es que la generación de empleos es de carácter temporal, sobre todo en lo que tiene que ver con la construcción de plantas o biorrefinerías, las cuales inicialmente emplean una gran cantidad de mano de obra. No obstante, una vez construida son pocos los empleos permanentes y normalmente son calificados (Institute of Medicine, 2014).

— *Principales riesgos en materia de seguridad y salud en el trabajo*

De acuerdo con los datos de The Nexus of Biofuels, Climate Change, and Human Health Workshop Summary, aunque se han llevado a cabo una gran cantidad de investigaciones sobre el ciclo de vida y las evaluaciones económicas para la producción de biocombustibles, hay muy poca información publicada sobre la investigación o los programas que abordan la salud y la seguridad ocupacional en los biocombustibles en los Estados Unidos.

Al respecto, destaca dicho estudio que se ha identificado una amplia variedad de peligros potenciales en la industria de los biocombustibles, incluidos los peligros biológicos, químicos y físicos. Las posibles exposiciones a estos peligros son bastante variables y dependen de la tecnología específica, la etapa de desarrollo y el tamaño de la operación. Asimismo, se sabe que varios tipos de enfermedades ocupacionales están asociados con la exposición a los materiales orgánicos que se utilizan como materias primas de los biocombustibles. Los vínculos más explorados son entre el polvo orgánico y los trastornos respiratorios, pero también hay estudios que han relacionado la dermatitis de contacto, las enfermedades infecciosas y otros problemas con tales exposiciones (Institute of Medicine, 2014).

4.2 Caso Brasil

Brasil constituye una referencia obligada para el diseño de una nueva hoja de ruta de biocombustibles en cualquier país, dado que ha logrado posicionarse como el gran líder mundial de producción de etanol de caña de azúcar.

En Brasil, se han emitido políticas y regulaciones que promueven el uso de los biocombustibles en el marco de una estrategia de energía renovable. En la actualidad, se ubica en el segundo lugar del escalafón de producción mundial de biocombustibles, con una participación del 21 %.

4.2.1 Actores oficiales

Según el Decreto n.º 83.700, del 5 de julio de 1979, en su artículo 3º los actores oficiales son:

- Ministerio de Hacienda;
- Ministerio de Agricultura;
- Ministerio de Industria y Comercio;
- Ministerio de Minas y Energía;
- Ministerio del Interior;
- Secretaría de Planificación de la Presidencia de la República.

Dentro del mismo artículo 3º, citado, se dispone que el Consejo Nacional de Alcohol estará integrado por los siguientes miembros:

- Ministro de Industria y Comercio, quien será el presidente.
- Secretario general del Ministerio de Industria y Comercio.
- Secretario general de la Secretaría de Planificación de la Presidencia de la República.
- Secretario general del Ministerio de Hacienda.
- Secretario general del Ministerio de Agricultura.
- Secretario general del Ministerio de Minas y Energía.
- Secretario general del Ministerio del Interior.
- Secretario general del Ministerio de Transportes.
- Secretario general del Ministerio del Trabajo.
- Subjefe de Asuntos Tecnológicos del Estado Mayor General de las Fuerzas Armadas.
- Representante de la Confederación Nacional de Agricultura.
- Representante de la Confederación Nacional de Comercio.
- Representante de la Confederación Nacional de la Industria.

En 1997, se crearon otros organismos importantes para enfrentar la crisis por el exceso de producción. Estos organismos fueron: el Consejo Nacional de Política Energética (CNPE), el Consejo Interministerial del Azúcar y Alcohol (CIMA) (compuesto por el Ministerio de Agricultura, Ganadería y Abastecimiento [MAPA], el Ministerio de Minas y Energía [MME], el Ministerio de Desarrollo, Industria y Comercio [MDIC] y el Ministerio de Hacienda [MF]) y la Agencia Nacional de

Petróleo, Gas Natural y Biocombustibles (ANP). Igualmente, se creó un marco reglamentario para el alcohol combustible.

Una de las funciones de estos organismos son, por ejemplo, el CIMA delibera sobre la participación de la caña de azúcar en la matriz energética nacional, los mecanismos económicos para la autosuficiencia del sector, el desarrollo científico y tecnológico, así como las mezclas de etanol/gasolina. La adición de alcohol anhidro a la gasolina C puede oscilar entre un 20 y 25 %, y está fijada actualmente en un 25 %.

Por otro aldo, la Agencia Nacional del Petróleo, Gas Natural y Biocombustibles (ANP) es la responsable, en relación con el etanol carburante, de especificar la calidad del producto, regular, autorizar y controlar las actividades de distribución, venta y comercialización, así como de organizar y mantener los datos técnicos relativos a dichas actividades. El transporte del etanol no lo autoriza la Agencia, ya que no lo dispone así la Ley n.º 9.478/97, ni las disposiciones reglamentarias expedidas por la Agencia Nacional del Petróleo, Gas Natural y Biocombustibles (ANP, 2007).

4.2.2 Actores privados

Según la revista *Mordor Intelligence* (2023), una publicación económica especializada en el mundo energético, los principales actores económicos privados del mercado de las energías alternativas, en Brasil, en su orden son:

- BP Plc.
- Bunge Limited.
- Odebrecht Agroindustrial S.A.
- Cosan S.A.
- Shell Plc.

4.2.3 Marco regulatorio y económico

4.2.3.1 Mapa normativo

— Regulación de precios y principales incentivos

Para la estructura del precio de los biocombustibles, el Gobierno brasilero expidió el mencionado Decreto n.º 83.700, del 5 de julio de 1979, el cual indica que los

precios del alcohol destinado a combustible, a nivel de distribuidor y de consumidor, serán propuestos por el Consejo Nacional del Petróleo (CNP) y fijados por el Consejo Nacional de Alcohol (CNA), previa aprobación del ministro de Hacienda.

Brasil exime al etanol del impuesto estadual a los combustibles (CIDE, por sus siglas en portugués, Contribuições de Intervenção no Domínio Econômico), tanto el etanol hidratado (es decir, combustible 100 % etanol), como el etanol anhidro empleado en el corte con nafta fósil. Y, además, a nivel nacional existen dos impuestos que se cobran a la venta de combustibles, el programa de integración social-programa de formación del patrimonio público (PIS-PASEP) y la contribución de financiamiento de la seguridad social (COFINS), ambos impuestos tienen alícuotas distintas según sea combustible fósil o etanol. En el caso del combustible fósil, se cobra 0,80 BRL por litro (ambos impuestos) y para el etanol 0,33 BRL por litro (Risso, 2021).

De acuerdo con Risso (2021), “En Estados Unidos igual que en Brasil no existen cuotas de comercialización máximas, las empresas productoras de etanol producen lo que deseen. Sí existe el Renewable Fuels Standard que impone volúmenes mínimos de etanol para mezclar con nafta fósil, no máximos”.

A partir del Decreto n.º 83.700, el Consejo Nacional del Petróleo (CNP) pasó a controlar las exportaciones y a garantizar la paridad de precios. Los precios de adquisición tanto en las distribuidoras como en las estaciones de servicio los proponía el Consejo Nacional del Petróleo (CNP) y los aprobaba el Consejo Nacional de Alcohol (CNA).

A partir del Decreto n.º 94.541, del 1º de julio de 1987, pasó a ser el Consejo Nacional del Petróleo (CNP) el responsable de establecer la demanda de etanol para cada cosecha. El etanol se facturaba directamente a Petrobras y se determinaba la creación de reservas de, como mínimo, dos meses de consumo de etanol anhidro e hidratado.

Con la promulgación de la Constitución de 1988, la producción de etanol continuó siendo competencia de iniciativa privada.

En 1975, se creó el Programa Nacional de Alcohol (Proálcool) con el objetivo principal de reducir la dependencia externa del petróleo, una cuestión estratégica de seguridad nacional, así como en propiciar una mejora en la balaza de pagos y reducir desigualdades regionales de renta, aumentar la producción de bienes de capital y crear puestos de trabajo. Los incentivos específicos establecidos por el Proálcool, se encontraban los siguientes:

- Precio del etanol inferior al de la gasolina.
- Remuneración garantizada para el productor.
- Reducción de impuestos para los vehículos propulsados por alcohol hidratado.
- Financiación para los productores que aumenten la capacidad de producción.
- Los puestos de venta están obligados a comercializar el etanol.
- Mantenimiento de las reservas estratégicas de etanol.

Adicionalmente:

- Un crédito que cubre el 30 % de los costos de almacenamiento del azúcar.
- Exenciones tributarias sobre vehículos que usen bioetanol o FFV.
- Una reducción de impuestos al uso de biocombustibles.
- Mandato para usar biocombustibles en flotas gubernamentales.
- Reducción de impuestos a la producción de biocombustibles.
- Un apoyo del Gobierno de 8.7 billones de euros de ingresos destinados desde 1976.

A continuación, se presentan los principales actos jurídicos de la Agencia Nacional del Petróleo, Gas Natural y Biocombustibles (ANP) relacionados con el etanol carburante:

- *Ley n.º 11.097/2005.* Introduce los biocombustibles dentro de las competencias de la ANP, que pasa a regular, autorizar y controlar las actividades relacionadas con el abastecimiento nacional de combustible de etanol, garantizando el suministro adecuado.

- *Instrucción de la ANP n.º 116/2000.* Regula la venta al por menor de combustible de automoción.
- *Resolución de la ANP n.º 7/2007*. Regula el límite de ventas entre distribuidores y el cumplimiento de este.

Durante el Proálcool, Petrobras tenía varias competencias en distintos segmentos de la cadena del etanol:

- *Comercialización.* Exportar el excedente de etanol a distintos países, especialmente a Estados Unidos.
- *Distribución.* Inicio de la instalación de estaciones de etanol en los puestos de venta del combustible.
- *Compra de etanol.* Compra y almacenamiento de etanol (mantenimiento de las reservas) para garantizar el flujo de caja para los productores.

Petrobras continúa desempeñando un papel importante en la venta interna y en las exportaciones del producto al mercado internacional.

— *Normativas y regulaciones en el procesamiento de la materia prima*

En Brasil, las leyes y regulaciones se relacionan con el procedimiento y uso de biocombustibles, tal y como las menciona Trejo (2007):

- **Ley 737/1938**: por medio de esta ley se establece la obligatoriedad de adicionar alcohol anhidro a la gasolina.
- **Decreto n.º 3.866-2001**: este decreto reglamenta el inciso II-A, del parágrafo 2, del artículo 2 de la Ley n.º 8.001, del 13 de marzo de 1990; y la Ley n.º 993, del 24 de julio de 2004; por medio de las cuales se dispone que los recursos previstos en las disposiciones que se reglamentan y que provienen de la explotación de recursos minerales, serán destinados al sector de ciencia y tecnología, en los términos que se indican.
- **Ley 11.116:** en esta ley se menciona el Registro Federal de Productor o Importador de Biodiésel y se establece el procedimiento para el registro del productor o importador de biodiésel ante la Secretaria de Renta Federal del Ministerio de Hacienda.

- **Resolución ANP n.º 36/2005 (Reglamento Técnico ANP n.º 07/2005):** establece las especificaciones del alcohol etílico anidro (AEAC) y del alcohol etílico hidratado (AEHC) comercializados por los diversos agentes económicos en todo el país, de acuerdo con las disposiciones contenidas en el Reglamento Técnico ANP n.º 7/2005 del 7 de diciembre de 2005.

— *Regulaciones establecidas para gestionar adecuadamente el aceite usado*

En Brasil, desde el año 2005, las regulaciones para gestionar adecuadamente el aceite usado se basan en la Resolución CONAMA n.º 09/93, la cual prohíbe la combustión de los aceites usados y solo acepta la re-refinación como única opción para su disposición (Muñoz, 2020).

— *Políticas vigentes de mandatos de mezcla*

En Brasil, por medio de la Resolución n.º 3 del 20 de marzo de 2023 se derogó la Resolución CNPE n.º 16 del 29 de octubre de 2018, la cual dispone sobre la evolución y adición de biodiésel en el diésel vendido al consumidor final, en cualquier parte del territorio nacional, y en otras provincias. En este sentido, el Consejo Nacional de Política Energética de Brasil determinó unos nuevos porcentajes de mezclas para el biodiésel en territorio nacional con un crecimiento progresivo. A continuación, se presentan los porcentajes de mezcla establecidos para cada año:

- 2023: 12 %
- 2024: 13 %
- 2025: 14 %
- 2026: 15 %

— Principales normativas específicas relacionadas con el sector de los *biocombustibles*

El sector de los biocombustibles está regulado por una serie de normativas específicas, las cuales se mencionan a continuación:

- **Ley 11.097:** esta ley introduce el biodiésel en la matriz energética brasilera y reforma las leyes 9.478, 9.847 y 10.636. Además, al introducir al biodiésel en la matriz energética brasilera, fija los porcentajes de adición al aceite combustible (óleo diésel) (Trejo, 2007).
- **Programa Proálcool (Bioetanol-1975):** este programa fue patrocinado por el Gobierno de Brasil. Es el mayor programa comercial del mundo relacionado con biomasa, para la producción de etanol a partir de caña de azúcar y el desarrollo de la tecnología necesaria (Naciones Unidas, 2006).

— *Normas específicas que rigen la producción de biocombustibles*

Las regulaciones específicas relacionadas con la producción de biocombustibles en Brasil, mencionadas anteriormente, incluyen la Ley 11.116, el Reglamento Técnico ANP n.º 5/2005 y la Resolución n.º 3 del 20 de marzo de 2023, que establece un mandato progresivo de mezcla de biodiésel. Estas normativas son fundamentales para garantizar la producción y el uso de biocombustibles de manera segura y en cumplimiento con las políticas y estándares nacionales, fomentando la sostenibilidad y la reducción de emisiones en Brasil.

— *Normas específicas que rigen el consumo de biocombustibles*

En Brasil, existen normas específicas que regulan el consumo de biocombustibles. Estas normativas incluyen un crédito que cubre el 30 % de los costos de almacenamiento del azúcar, exenciones tributarias aplicables a vehículos que utilizan bioetanol o vehículos flexibles (FFV), así como reducciones de impuestos relacionadas con el uso de biocombustibles. Además, se ha implementado un mandato que exige el uso de biocombustibles en las flotas gubernamentales.

— *Normas específicas que rigen la comercialización de biocombustibles*

La Resolución ANP n.º 36/2005 (Reglamento Técnico ANP n.º 07/2005) establece las especificaciones del alcohol etílico anidro (AEAC) y del alcohol etílico hidratado (AEHC) comercializados por los diversos agentes económicos en todo el país.

La Resolución de la ANP n.º 5/2006 establece el registro electrónico de unidades productoras, el envío a la Agencia Nacional del Petróleo, Gas Natural y Biocombustibles de datos de comercialización de combustible de etanol de los productores y normas de comercialización que deben adoptar las plantas.

Igualmente, la Agencia Nacional del Petróleo, Gas Natural y Biocombustibles (ANP) es la responsable, en relación con el etanol carburante, de especificar la calidad del producto, regular, autorizar y controlar las actividades de distribución, venta y comercialización, así como de organizar y mantener los datos técnicos relativos a dichas actividades.

El transporte del etanol no lo autoriza la Agencia Nacional del Petróleo, Gas Natural y Biocombustibles, ya que no lo dispone así la Ley n.º 9.478/97, ni las disposiciones reglamentarias expedidas por la Agencia (ANP, 2007).

La instrucción de la ANP n.º 116/2000 regula la venta al por menor de combustible de automoción y la Resolución de la ANP n.º 07/2007 regula el límite de ventas entre distribuidores y el cumplimiento de este.

Ahora bien, en el ámbito de la comercialización internacional el Reglamento Técnico ANP n.º 4/2004 (Resolución ANP n.º 42/2004) establece la especificación de biodiésel que podrá ser adicionado al óleo diésel en proporción del 2 % del volumen y comercializado por los diversos agentes económicos autorizados en todo el territorio nacional.

Además, la Ley n.º 11.097/05, por la que se creó el Programa Nacional de Biodiésel, amplió la competencia administrativa de la ANP que, desde entonces, pasó a denominarse Agencia Nacional del Petróleo, Gas Natural y Biocombustibles. A partir de la publicación de la Ley n.º 11.097, la ANP asumió la competencia de regular y controlar las actividades relativas a la producción, el control de calidad, la distribución, la venta, la gestión de reservas, la comercialización y el control del biodiésel y de la mezcla de combustible diésel-

biodiésel. Asimismo, se modificó la Ley n.º 9.478/97 para contemplar las nuevas competencias del organismo regulador.

La Ley 11.116 sobre el registro especial para el productor o importador de biodiesel establece el procedimiento para el registro, ya sea productor o importador de biodiésel, en la Secretaría de Renta Federal del Ministerio de Hacienda. La ANP regula la exportación del excedente de etanol a distintos países,
especialmente a Estados Unidos.

— *Programa RenovaBio de Brasil*

El programa RenovaBio de Brasil es la política nacional de biocombustibles, establecida por la Ley n.º 13.576/2017, y tiene los siguientes objetivos:

- Proporcionar una importante contribución al cumplimiento de los compromisos determinados por Brasil en el Acuerdo de París.
- Promover la adecuada expansión de los biocombustibles en la matriz energética, con énfasis en el suministro regular de combustibles.
- Garantizar la previsibilidad del mercado de combustibles, induciendo ganancias en eficiencia energética y reducción de emisiones de gases de efecto invernadero en la producción, comercialización y uso de biocombustibles.

4.2.3.2 Variables económicas en la producción de biocombustibles

— *Subsidios en la cadena de biocombustibles*

Crédito que cubre el 30 % de los costos de almacenamiento del azúcar, exenciones tributarias aplicables a vehículos que utilizan bioetanol o vehículos flexibles (FFV), así como reducciones de impuestos relacionadas con el uso de biocombustibles. Además, se ha implementado un mandato que exige el uso de biocombustibles en las flotas gubernamentales.

— *Impuestos en la cadena de biocombustibles*

Según *Euronews* (2023), el Gobierno de Brasil decidió poner fin a una exención fiscal a las importaciones de etanol con efecto inmediato, según un informe publicado a última hora del miércoles en el sitio web del Ministerio de Agricultura

del país. La medida perjudicará sobre todo a la industria del etanol de Estados Unidos, que representa casi la totalidad de las importaciones brasileras del combustible. A partir de ahora, las importaciones de etanol pagarán un impuesto del 16 % para entrar en Brasil, hasta finales del año 2023. Ese gravamen subirá al 18 % en 2024, según la nota.

En la cadena de biocombustibles en Brasil, se aplican tres impuestos federales sobre el combustible de alcohol etílico (hidratado y anhidro), estos impuestos son:

- La Contribución al PIS/PASEP (Programas de Integración Social/Programa de Formación del Patrimonio del Servidor Público).
- La CIDE (Contribución para la Intervención del Dominio Económico) .
- La COFINS (Contribución para la Financiación de la Seguridad Social).

La tributación federal del etanol se modificó hace poco y, actualmente, está regulada por el Decreto n.º 6.573, del 19 de septiembre de 2008, que establece el coeficiente para la reducción de las proporciones específicas de la Contribución al PIS/PASEP y la COFINS que inciden sobre los ingresos brutos obtenidos de la venta de etanol y determina los valores de los créditos de dichas contribuciones, que pueden deducirse en la adquisición de alcohol anhidro para su adición a la gasolina.

De acuerdo con el decreto mencionado, el coeficiente de reducción de la parte proporcional de la Contribución al PIS/PASEP y de la Contribución para la Financiación de la Seguridad Social (COFINS) se fijó en 0,6333 para el productor, importador o distribuidor. Las partes proporcionales de la Contribución al PIS/PASEP y la COFINS, con la utilización del coeficiente determinado en el decreto, se fijaron, respectivamente, en:

- 8,57 BRL (ocho reales con cincuenta y siete centavos) y 39,43 BRL (treinta y nueve reales con cuarenta y tres centavos) por metro cúbico de alcohol, en el caso de la venta realizada por el productor o importador.
- 21,43 BRL (veintiún reales con cuarenta y tres centavos) y 98,57 BRL (noventa y ocho reales con cincuenta y siete centavos) por metro cúbico de alcohol, en caso de la venta realizada por el distribuidor.

En el caso de la adquisición de alcohol anhidro para su adición a la gasolina, los valores de los créditos de la Contribución al PIS/PASEP y la COFINS se fijaron, respectivamente, en:

- 3,21 BRL (tres reales con veintiún centavos) y 14,79 BRL (catorce reales con setenta y nueve centavos) por metro cúbico de alcohol, en el caso de la venta realizada por el productor o importador.
- 16,07 BRL (dieciséis reales con siete centavos) y 73,93 BRL (setenta y tres reales con noventa y tres centavos) por metro cúbico de alcohol, en caso de la venta realizada por el distribuidor.

— *Papel del Gobierno en la cadena de los biocombustibles*

En la cadena de biocombustibles en Brasil, el Gobierno desarrolla un papel importante por medio de la Agencia Nacional del Petróleo, Gas Natural y Biocombustibles (ANP). La Agencia es la entidad responsable, en relación con el etanol carburante, de especificar la calidad del producto, regular, autorizar y controlar las actividades de distribución, venta y comercialización, así como de organizar y mantener los datos técnicos relativos a dichas actividades. El transporte del etanol no lo autoriza la Agencia, ya que no lo dispone así la Ley n.º 9.478/97, ni las disposiciones reglamentarias expedidas por la misma Agencia (ANP, 2007). A continuación, se presentan los principales actos jurídicos de la ANP relacionados con el etanol carburante:

- *Ley n.º 11.097/2005.* Introduce los biocombustibles dentro de las competencias de la ANP, que pasa a regular, autorizar y controlar las actividades relacionadas con el abastecimiento nacional de combustible de etanol, garantizando el suministro adecuado.
- *Instrucción de la ANP n.º 116/2000.* Regula la venta al por menor de combustible de automoción.
- *Resolución de la ANP n.º 36/2005*. Define las características del alcohol anhidro y del alcohol hidratado destinado a la automoción, así como la obligación de la adición de colorante al alcohol anhidro.
- *Resolución de la ANP n.º 5/2006.* Establece el registro electrónico de unidades productoras, el envío a la ANP de datos de comercialización de

combustible de etanol de los productores y normas de comercialización que deben adoptar las plantas.

- *Resolución de la ANP n.º 7/2007.* Regula el límite de ventas entre distribuidores y el cumplimiento de este. Durante el Proálcool, Petrobras tenía varias competencias en distintos segmentos de la cadena del etanol: gestión logística, inversiones, comercialización, distribución, compra de etanol, inversiones en investigación y desarrollo.

— *Papel del sector privado en la cadena de los biocombustibles*

En Brasil, el sector privado desempeña un papel fundamental en la cadena de los biocombustibles. Esto incluye su participación en la producción de biocombustibles, así como en la inversión en investigación tecnológica y desarrollo en esta industria. Además, el sector privado, a través de instituciones financieras y bancos, ofrece créditos diferenciales para apoyar la investigación, la tecnología y la producción de biocombustibles. Esta inversión y apoyo del sector privado son esenciales para el crecimiento y la sostenibilidad de la industria de biocombustibles en Brasil, así como para el avance de tecnologías más eficientes y sostenibles en este campo.

— *Generación de ingresos a nivel nacional*

En cuanto ingresos por las actividades de los biocombustibles, de acuerdo con datos de la Agencia Nacional de Petróleo, Gas Natural y Biocombustibles (ANP), consolidada a 2020, el sector tuvo un ingreso superior a 26,2 billones de reales. Esto principalmente por los productos de biodiésel, RenovaBio y etanol (*Resultados Biocombustíveis 2020, Ministério de Minas e Energia*, n.d.).

— *Generación de empleos*

De conformidad con datos del Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA), a 2020 Brasil encabezaba el listado de países con mayor empleo en biocombustibles, con 832.000 personas (IICA, 2020).

Estos datos son similares a los referidos por IRENA y OIT respecto del país, en el cual se destaca que en Brasil se produjeron a 2022, cerca de 874.200 empleos por biocombustibles líquidos, distribuidos así:

- 168.400 en el sector agrícola, principalmente caña de azúcar.
- 167.800 en el procesamiento de alcohol y etanol.
- 200.000 en la manufactura de equipos
- 326.900 en la producción de biodiésel (IRENA & OIT., 2022b).

Asimismo, según datos referidos por Elisa Vargas, en el documento del Décimo Congreso Ambiental, la industria de los biocombustibles y, en específico, la generación de biomasa, para su producción emplea a más de 500.000 personas (Vargas Amelin, n.d.).

Si bien es cierto, existe un impacto positivo respecto de la creación de empleo, esto contrasta con la situación en Brasil relacionada con los (Nimer, 1989; Vargas Amelin, n.d.).

4.2.3.3 Contratos en firme

Con objeto de estimular la producción de biodiésel, cuando su mezcla con combustible diésel no era todavía obligatoria (hasta enero de 2008), la Agencia Nacional de Petróleo estableció concursos públicos de adquisición. Sobre el particular, dichos concursos públicos estaban regulados por instrumentos emitidos por los organismos competentes: CNPE, MME y ANP. La Orden n.º 483/2005, del Ministerio de Minas y Energía, establece las directrices para la realización, por parte de la ANP, de concursos públicos de adquisición de biodiésel.

De acuerdo con las directrices referenciadas en la Asociación Iberoamericana de Entidades Reguladoras de Energía (ARIAE, 2023), podrán licitar como proveedores de biodiésel en el concurso público:

• Aquellos productores de biodiésel poseedor del Sello de Combustible Social.

• La sociedad adjudicataria del proyecto de producción de biodiésel reconocido por el Ministerio de Desarrollo Agrario (MDA), que cumpla los requisitos necesarios para la obtención del Sello de Combustible Social.

Así mismo, se menciona que la compra y venta de biodiésel están condicionadas por los mandatos que para tal fin establezca la ANP, a saber:

• La autorización de la ANP para ejercer la actividad de producción de biodiésel en el país, en los términos de la Resolución de la ANP n.º 41, del 24 de noviembre de 2004.

• El registro especial en la Receita Federal de Brasil (Agencia Tributaria de Brasil), constituido por la Ley n.º 11.116, de 18 de mayo de 2005.

• El Sello de Combustible Social cuyo certificado se expide a los productores de biodiésel que adquieren materias primas de pequeños agricultores, dentro de límites mínimos que varían según la región.

Cabe agregar que, según la Ariae (2023), los concursos públicos serán financiados por el Banco de Brasil. Sin embargo, se propone un nuevo modelo para estos concursos, que consistiría en dos etapas:

• Las plantas o centrales harán la primera propuesta, incluyendo cantidad y precio; los precios más bajos ofertados en la primera etapa pasarán a la segunda etapa (hasta un volumen un 30 % superior a lo previsto).

• Las plantas o centrales no conocerán las otras propuestas, lo cual contribuirá para la reducción de la competencia feroz entre los productores.

4.2.4 Aspectos técnicos relacionados con la producción

4.2.4.1 Descripción de materias primas (pretratamiento, procesamiento, rendimiento, costo)

La producción de biodiésel en Brasil se da básicamente a partir de la materia prima del cultivo de soja, que cubre el 55 % de la producción de biodiésel; también está el ricino que representa el 20 %, y el resto se divide entre otras oleaginosas. Aunque el cultivo de soja que tiene características físicas no tan deseables para el biodiésel, dado que sus granos rinden escasamente alrededor del 18 % de aceite, resultando en una producción de 700 l/ha, si se compara con el aceite de ricino con 47 % de aceite que alcanza un rendimiento de 1200 l/ha, y del girasol con el 40 %, que alcanza un rendimiento de 800 l/ha. Sin embargo, las ventajas del

cultivo de la soja están relacionadas con el paquete tecnológico ya desarrollado por la agroindustria para esta especie en el proceso de producción del aceite.

Por otro lado, por las ventajas de ubicación geográfica y disponibilidad de áreas de siembra, se ha impulsado el cultivo de la caña de azúcar, aunado a la necesidad global de utilizar más energía limpia y renovable en la producción de bioetanol. Así, el cultivo de caña de azúcar en Brasil se ha ido expandiendo por todo su territorio, al ser una leguminosa de ciclo corto, ocupando el tercer renglón en términos de superficie plantada, detrás de la soja y el maíz.

En el caso de la caña de azúcar, existen tres características biofísicas que hacen ventajoso su cultivo, desde el punto de vista económico: (i) es altamente productivo, caracterizado por una verdadera “planta de energía biológica” (Cabral, 2016); (ii) permite la utilización de manera eficiente de los insumos como el agua, agroinsumos y mano de obra, y (iii) puede procesarse localmente en diversos productos de valor agregado (azúcar, melaza, etanol y energía) (Moore & Botha, 2013; Nimer, 1989).

Como ocurre con cualquier cultivo, la época de siembra determina las condiciones ambientales de germinación y desarrollo inicial de la planta, a partir de los esquejes sembrados. Para crecer, la caña de azúcar necesita mucho sol y agua. El mejor momento para plantar es creado por las condiciones de alta temperatura y humedad (generalmente, en verano), ideal para el desarrollo de cogollos; además, para reducir la incidencia de enfermedades en los asentamientos.

El sistema de cultivo más común es aquel en el que se permite un ciclo vegetativo de dieciocho meses, denominado caña de azúcar de año y medio. Un segundo sistema de cultivo utiliza un ciclo de sólo doce meses, lo que resulta ventajoso en el caso de grandes superficies de plantación, ya que facilita la gestión y optimiza el uso de máquinas y mano de obra. En este caso, es costumbre plantar, entre octubre y noviembre, para cosechar al año siguiente. Después del primer corte, los cañaverales se pueden cosechar nuevamente durante varios años seguidos. El número de cosechas varía de una región a otra,

entre un mínimo de dos o tres, hasta diez, en zonas especialmente productivas, estos renuevos cosechados se llaman caña de soca.

En Brasil, la principal variable regional que influye en el periodo de siembra de la caña de azúcar es estacionalidad de las precipitaciones, aunque también se consideran los cambios de temperatura. El territorio brasileño, dada su variabilidad espacial y condiciones climáticas, le confiere una ventaja comparativa con otros países, ya que el territorio permite dos patrones de cosecha principales; uno anual, de mayo a diciembre, en el centro-sur y de septiembre a abril, en las regiones norte y nordeste; mientras que en el noreste oriental, las precipitaciones máximas se producen en otoño y principios de invierno, en la región sudeste, donde el pico de precipitaciones ocurre en el verano (Nimer, 1989).

Asimismo, es de contemplarse que la deficiencia hídrica moderada y estacional puede ser beneficiosa para el cultivo de la caña de azúcar, ya que sirve como detonante ambiental para la interrupción del crecimiento vegetativo y el inicio de la concentración de sacarosa en los tallos. Sin embargo, cuando el déficit hídrico anual supera el 180 mm, el riego es necesario para asegurar el rebrote de los cañaverales, conocido como soca; cuando el déficit supera los 400 mm anuales, es necesario un riego intensivo (Carvalho & Furtado, 2013); Zullo, 2010). Los estudios experimentales indican que el riego aumenta, considerablemente, la productividad de los campos de caña de azúcar, especialmente en las zonas del Cerrado, es decir, la meseta central de Brasil (Gava et al., 2011). Sin embargo, datos del Censo Agropecuario de 2006, muestran que la mayoría de los establecimientos de caña de azúcar en todo Brasil no utilizaron riego.

Otras prácticas intensivas del cultivo de caña de azúcar incluyen la fertilización y el uso de pesticidas, la primera corrige ciertos atributos del suelo, con el objetivo de aumentar su fertilidad utilizándose la caliza, el yeso y el fosfato, sustancias añadidas al suelo en el periodo seco previo al inicio de plantación (Cesar Vitti & Antonio Mazza, n.d.). Además de la aplicación de estos productos químicos, se utilizan fertilizantes y productos orgánicos producidos como residuos en la fabricación de azúcar y alcohol (etanol), que aportan fósforo y calcio,

aumentando la productividad de la caña de azúcar (de Fravet et al., 2010; Da Silva, 2014).

De acuerdo a la Compañía Nacional de Abastecimiento (CONAB, Companhia Nacional de Abastecimento, 2023), que reporta información para que el Gobierno Federal gestione las políticas públicas dirigidas al sector agrícola y apoye la toma de decisiones de los agentes del mercado, considerando la importancia estratégica y económica para Brasil, para el caso del sector de la caña de azúcar y la producción de etanol, para la cosecha 2023-2024, se estimó un aumento en la producción de caña de azúcar, en comparación con la cosecha 2022-2023, con un crecimiento del 6,9 %, con una producción de 652,9 millones de toneladas de caña de azúcar, con una superficie destinada de 8288,3 mil hectáreas para cosecha, con un rendimiento medio de 78.7 toneladas por hectárea, a pesar de la reducción de superficie de siembra de 0,1 %, en relación a la última cosecha, según las condiciones climáticas registradas, como se referencia en la tabla 45 por cada una de las regiones de Brasil.

Tabla 45. Superficie, productividad y producción de caña de azúcar

REGIÓN	ÁREA (en millones de ha)			PRODUTIVIDAD (en kg/ha)			PRODUCCIÓN (en millones de toneladas)		
	Cifra 2022/23	Cifra 2023/24	VAR. %	Cifra 2022/23	Cifra 2023/24	VAR. %	Cifra 2022/23	Cifra 2023/24	VAR. %
Norte	47,3	48,4	2,4	80.862	83.211	2,9	3.823,0	4.029,0	**5,4**
Nordeste	875,5	896,2	2,4	64.950	65.329	0,6	56.866,5	58.547,7	**3,0**
Centro-oeste	1.767,5	1.793,2	1,5	74.347	79.601	7,1	131.406,8	142.740,4	**8,6**
Sudeste	5.127,1	5.057,4	(1,4)	75.629	81.495	7,8	387.755,3	412.151,2	**6,3**
Norte-nordeste	922,8	944,6	2,4	65.765	66.246	0,7	60.689,5	62.576,7	**3,1**
Centro-sur	7.369,9	7.343,7	(0,4)	74.643	80.391	7,7	550.115,3	590.370,5	**7,3**
TOTAL BRASIL	8.292,7	8.288,3	(0,1)	73.655	78.779	7,0	610.804,8	652.947,2	**6,9**

Tomado de: Adaptado de* (CONAB, Companhia Nacional de Abastecimento, 2023), *estimación en agosto 2023

La producción de caña de azúcar, para el periodo 2023-2024, se estima en 40,9 millones de toneladas, con un aumento del 11,1 %, respecto a la cosecha anterior. En todas las regiones se proyecta una mayor producción de azúcar, en comparación con la cifra 2022-2023, considerando un mercado favorable para el edulcorante y la mayor producción de caña de azúcar, ubicando la actual cifra como la segunda mayor producción de azúcar en la serie histórica, según la CONAB, como se referencia en la la tabla 46 por cada una de las regiones de Brasil.

Tabla 46. Productos de la industria azucarera y alcohólica. Estimación de la producción de azúcar cosecha 2022-2023 y 2023-2024

REGIÓN	Produccion de caña de azúcar (en millones de toneladas)						
	Cifra 2022-2023 (a)	Cifra 2023-2024 Dato anterior (b)	Cifra 2023-2024 Dato actual (c)	Variación		Variación	
				Absoluta (c-a)	% (c/a)	Absoluta (c-b)	% (c/b)
Norte	72,3	92,7	93,7	21,4	29,6	1,0	1,1
Nordeste	3.204,8	3.530,7	3.576,4	371,6	11,6	45,7	1,3
Centro-oeste	4.165,0	4.514,3	4.949,1	784,1	18,8	434,8	9,6
Sudeste	27.146,0	28.138,4	29.754,8	2.608,8	9,6	1.616,4	5,7

Sur	2.218,8	2.495,5	2.519,4	300,6	13,6	23,9	1,0
Norte-nordeste	3.277,1	3.623,4	3.670,1	393,0	12,0	46,7	1,3
Centro-sur	33.529,8	35.148,2	37.223,3	3.693,5	11,0	2.075,1	5,9
BRASIL	36.806,9	38.771,6	40.893,4	4.086,5	11,1	2.121,8	5,5

Tomado de: **(CONAB, Companhia Nacional de Abastecimento, 2023)*, estimación en agosto 2023***

Asimismo, se espera que la producción de etanol para el periodo 2023-2024, incluido el producido a partir de caña de azúcar y maíz, aumente un 9,2 % en comparación con la cifra 2022-2023. Cuando se analiza sólo el etanol procedente de la molienda de la caña de azúcar, el aumento es más discreto, y estaría alrededor del 4,5 %. El principal responsable del aumento de la producción de biocombustibles, con relación a la última cosecha, es el etanol de maíz, que se espera que incremente la producción en un 37,2 %. La estimación prevé, por tanto, la producción de 33,83 mil millones de litros de etanol, producido a partir de caña de azúcar y maíz. De este total, 14,22 mil millones de litros serán de etanol anhidro y 19,61 mil millones de litros de etanol hidratado, como se referencia en la tabla 47 por cada una de las regiones de Brasil.

Tabla 47. Estimación de la producción total de etanol a partir de la caña de azúcar, comparación cosecha 2022-2023 y 2023-2024

REGIÓN	Producción de etanol de caña de azúcar (en m^3)						
	Cifra 2022-2023 (a)	Cifra 2023-2024 Dato anterior (b)	Cifra 2023-2024 Dato actual (c)	Variación		Variación	
				Absoluta (c-a)	% (c/a)	Absoluta (c-b)	% (c/b)
Norte	263.151,00	269.506,00	257.714,00	−5.437,00	−2,1	−11.792,00	−4,4
Nordeste	2.074.997,60	2.098.187,50	2.094.763,50	19.765,90	1	−3.423,90	−0,2
Centro-oeste	8.264.530,20	8.452.350,70	8.757.180,80	492.650,60	6	304.830,10	3,6
Sudeste	14.828.334,10	15.475.659,50	15.378.058,20	549.724,10	3,7	−97.601,30	−0,6
Sur	1.091.807,00	1.236.092,30	1.233.792,30	141.985,30	13	−2.300,00	−0,2
Norte-nordeste	2.338.148,60	2.367.693,50	2.352.477,50	14.328,90	0,6	−15.215,90	−0,6

REGIÓN	Producción de etanol de caña de azúcar (en m^3)						
	Cifra 2022-2023 (a)	Cifra 2023-2024 Dato anterior (b)	Cifra 2023-2024 Dato actual (c)	Variación		Variación	
				Absoluta (c-a)	% (c/a)	Absoluta (c-b)	% (c/b)
Centro-sur	24.184.671,30	25.164.102,50	25.369.031,30	1.184.360,00	4,9	204.928,80	0,8
BRASIL	**26.522.819,90**	**27.531.796,00**	**27.721.508,80**	**1.198.689,00**	**4,5**	**189.712,90**	**0,7**

Tomado de: Adaptado de* (CONAB, Companhia nacional de abastcimento., 2023)*, estimación en agosto 2023

Con base a esta producción estimada, se espera que el etanol anhidro aumente un 2,9 %, en comparación con la cosecha 2022-2023, con una producción total de 27,72 mil millones de litros de combustible a partir de caña de azúcar, divididos en 16,08 mil millones de litros de etanol hidratado y 11,64 mil millones de litros de etanol anhidro.

La creciente producción de etanol a partir de maíz es resultado de la planificación y las inversiones, especialmente en la región centro-oeste, pero expandiéndose a otras regiones, en modernas unidades productivas. Se espera otro récord en la producción de biocombustibles, estimada en 6,11 mil millones de litros, seindo un aumento del 37,2 % con respecto a la cosecha 2022-2023. La mayor parte es etanol hidratado con 3,53 mil millones de litros, mientras se espera que el etanol anhidro produzca 2,58 mil millones de litros, como se referencia en la tabla 48 por cada una de las regiones de Brasil.

Tabla 48. Estimación de producción de etanol a partir de maíz, cosecha 2022-2023 y 2023-2024

REGIÓN	Etanol anidro (en mil l)				Etanol hidratado (en mil l)				Etanol total (en mil l)			
	Cifra 2022/23	Cifra 2023/24	Varición		Cifra 2022/23	Cifra 2023/24	Variación		Cifra 2022/23	Cifra 2023/24	Variación	
			Absoluta	%			Absoluta	%			Absoluta	%
Nordeste	-	-	-	-	1,3	30,0	28,7	2.207,7	1,3	30,0	28,7	2.207,7
Centro-oeste	1.524.075,8	2.547.455,0	1.023.379,2	67,1	2.903.921,1	3.529.552,0	625.630,9	21,5	4.427.996,8	6.077.007,0	1.649.010,2	37,2

REGIÓN	Etanol anidro (en mil l)				Etanol hidratado (en mil l)				Etanol total (en mil l)			
	Cifra 2022/23	Cifra 2023/24	Varición		Cifra 2022/23	Cifra 2023/24	Variación		Cifra 2022/23	Cifra 2023/24	Variación	
			Absoluta	%			Absoluta	%			Absoluta	%
Norte-nordeste	-	-	-	-	1,3	30,0	28,7	2.207,7	1,3	30,0	28,7	2.207,7
Centro-sur	1.538.210,8	2.576.069,0	1.037.858,2	67,5	2.911.147,1	3.529.599,0	618.451,9	21,2	4.449.357,8	6.105.668,0	1.656.310,2	37,2
BRASIL	**1.538.210,8**	**2.576.069,0**	**1.037.858,2**	**67,5**	**2.911.148,4**	**3.529.629,0**	**618.480,6**	**21,2**	**4.449.359,1**	**6.105.698,0**	**1.656.338,9**	**37,2**

Tomado de: (CONAB, Companhia Nacional de abastecimento, 2023), estimación en agosto 2023

Con referencia al sistema de cosecha, la estimación para la cifra 2023-2024, según la Compañía Nacional de Abastecimiento (CONAB), trae datos sobre una mayor mecanización del corte de caña de azúcar en el país. La proyección es que el 92,4 % de la cifra será mecanizada; confirmando lo observado en los últimos años, donde Brasil ha evolucionado desde el sistema tradicional de cosecha manual de la caña entera, con quema previa, hasta el sistema mecanizado de cosecha.

En la cosecha manual, la pre-quema de la hojarasca facilita la tarea de corte y aumenta la cantidad diaria de caña cortada, en comparación con la cosecha sin quema, además de reducir el esfuerzo físico invertido en el trabajo. Sin embargo, es una práctica que provoca una amplia discusión sobre sus efectos en la salud de la población aledaña a la zona productora, requiriendo soluciones para esta situación.

Los temas ambientales asociados al sistema de corte de la caña de azúcar, ya sea manual o mecanizado, están abordados en la agenda de discusión en varios estados. Así, además de la relevancia de la topografía del relieve en la decisión sobre el tipo de cosecha, también es importante considerar la legislación

estatal vigente, así como aspectos socioeconómicos, oferta de mano de obra y/o sistema de carga a utilizar. Las leyes y los programas de incentivos, que exigen la no utilización del fuego como práctica de gestión, ayudaron a esta evolución. Además, gran parte de las áreas cultivadas del país son aptas para la cosecha mecanizada, con terrenos de baja pendiente, especialmente en la región centro-sur.

La mecanización de la cosecha surge de una visión de largo plazo, y hoy es una realidad en todos los estados productores. En menos de veinte años, el número de recolectores en el país saltó de 1221, en la cifra 2007-2008, a los 4876 actuales, además de un mayor número de máquinas que son más eficientes.

Tabla 49. Cosecha manual y mecanizada (en %), cosechas 2022-2023 y 2023-2024

Región/UF	Cifra 2022-2023		Cifra 2023-2024	
	Manual	Mecanizada	Manual	Mecanizada
Norte	-	100,0	-	100,0
Nordeste	74,0	26,0	73,0	27,0
Centro-oeste	0,6	99,4	0,6	99,4
Sudeste	1,9	98,1	1,6	98,4
Sur	1,6	98,4	1,6	98,4
Norte/nordeste	70,2	29,8	68,0	32,0
Centro-sur	1,5	98,5	1,4	98,6
BRASIL	9,2	90,8	7,6	92,4

Tomado de: (CONAB, Companhia Nacional de Abastcimento, 2023), estimación en agosto 2023

4.2.4.2 Tecnologías de producción (características técnicas, costo/beneficio ambiental y rendimiento técnico y energético)

— *Tecnologías utilizadas en la producción de biodíesel*

Brasil es uno de los principales productores de biodiésel a nivel mundial, y cuenta con diversas tecnologías de producción que han contribuido a su desarrollo en el sector.

Una de las principales tecnologías utilizadas en la producción de biodiésel en Brasil es el proceso de transesterificación. Este proceso consiste en la reacción

química entre un alcohol, generalmente metanol, y un lípido vegetal o animal, como el aceite de soja, girasol o sebo, para obtener biodiésel y glicerina como subproducto. Este proceso puede llevarse a cabo a través de la transesterificación homogénea (en presencia de un catalizador alcalino) o la transesterificación heterogénea (en presencia de un catalizador ácido o enzimático).

En Brasil, existen varias tecnologías para el proceso de transesterificación utilizadas en la producción de biodiésel. Algunas de las tecnologías más comunes incluyen:

- Transesterificación alcalina: es el método más comúnmente utilizado en Brasil. Consiste en mezclar el aceite vegetal o grasa animal con un alcohol, generalmente metanol, en presencia de un catalizador alcalino como el hidróxido de sodio o el hidróxido de potasio. Esta reacción química produce ésteres metílicos de ácidos grasos (FAME), que son los componentes principales del biodiésel. La transesterificación alcalina es un proceso relativamente rápido y eficiente.
- Transesterificación ácida: en este método, se utiliza un catalizador ácido como el ácido sulfúrico o el ácido clorhídrico en lugar de un catalizador alcalino. La transesterificación ácida tiene la ventaja de ser menos sensible a los contaminantes presentes en el aceite o la grasa, lo que permite utilizar materias primas con mayor concentración de ácidos grasos libres.
- Transesterificación enzimática: esta tecnología utiliza enzimas lipasas como catalizadores en lugar de catalizadores químicos. La transesterificación enzimática se considera más suave y respetuosa con el medio ambiente, ya que no requiere altas temperaturas ni presiones. Sin embargo, las enzimas lipasas son mucho más costosas que los catalizadores químicos, lo que limita su aplicabilidad a gran escala.
- Transesterificación supercrítica: en este proceso, se utiliza un solvente supercrítico como el metanol o el dióxido de carbono, que tiene propiedades intermedias entre un líquido y un gas, como medio de reacción. La transesterificación supercrítica tiene varias ventajas potenciales, como tiempos de reacción más cortos y menor consumo de

energía. Sin embargo, es una tecnología más compleja y costosa de implementar.

En resumen, Brasil utiliza, principalmente, tecnologías de transesterificación alcalina y ácida para la producción de biodiésel, aunque también se están investigando y desarrollando tecnologías enzimáticas y supercríticas. Cada tecnología tiene sus propias ventajas y desafíos, y la elección de la tecnología depende de factores como la disponibilidad de materias primas, el costo, la eficiencia y la sostenibilidad ambiental. Brasil cuenta con numerosas plantas de transesterificación para la producción de biodiésel. Algunas de las principales plantas de biodiésel en Brasil están localizadas en los estados de Mato Grosso, Paraná, Rio Grande do Sul, São Paulo, Santa Catarina y Goiás.

Otra tecnología utilizada en la producción de biodiésel en Brasil es el proceso de esterificación. Este proceso es utilizado para la producción de biodiésel a partir de aceites o grasas de bajos niveles de ácidos grasos libres, lo que dificulta su transesterificación.

En este caso, se realiza una esterificación previa para convertir los ácidos grasos libres en ésteres metílicos o etílicos, los cuales pueden ser posteriormente transesterificados para obtener biodiésel.

En Brasil, existen varias tecnologías de proceso de esterificación para la producción de biodiésel. Algunas de las tecnologías más utilizadas son:

- Proceso de esterificación ácida: este proceso utiliza ácido sulfúrico como catalizador para convertir los ácidos grasos presentes en los aceites vegetales en ésteres metílicos o etílicos. Se lleva a cabo a temperatura y presión moderadas, y es relativamente sencillo de implementar.
- Proceso de esterificación enzimática: en este proceso, se utilizan enzimas como catalizadores para llevar a cabo la esterificación de los ácidos grasos. Las enzimas pueden ser de origen vegetal, animal o microbiano. Este método es más suave y sostenible que la esterificación ácida, ya que no requiere de productos químicos fuertes.
- Proceso de esterificación supercrítica: este proceso utiliza CO_2 supercrítico como solvente y catalizador para llevar a cabo la esterificación de los

ácidos grasos. El CO_2 supercrítico tiene propiedades únicas que permiten realizar la esterificación de manera más eficiente y selectiva. Sin embargo, este método es más costoso y requiere de equipos más avanzados.

- Proceso de transesterificación: aunque no es estrictamente una esterificación, la transesterificación es otro proceso comúnmente utilizado en la producción de biodiésel. En este proceso, se utilizan alcoholes (generalmente, metanol o etanol) como reactivo para convertir los triglicéridos presentes en los aceites vegetales en ésteres metílicos o etílicos. Este proceso requiere de un catalizador, como el hidróxido de sodio o el hidróxido de potasio, y se lleva a cabo a temperatura y presión moderadas.

Estas son solo algunas de las tecnologías de proceso de esterificación utilizadas en Brasil para la producción de biodiésel. El uso de una tecnología u otra depende de factores como la disponibilidad y costo de los insumos, el grado de pureza deseado, la escala de producción y los criterios de sostenibilidad.

La localización de las plantas de esterificación para la producción de biodiésel puede variar dependiendo de varios factores, como la disponibilidad de materia prima, la cercanía a las fuentes de aceite vegetal o grasa animal, y la demanda de biodiésel en la región. Algunas plantas de esterificación se encuentran en zonas agrícolas donde hay una gran cantidad de cultivos oleaginosos, como la soja, colza, palma, girasol, entre otros. Estas plantas se benefician de la proximidad a las materias primas necesarias para la producción de biodiésel. Además, es común encontrar plantas de esterificación cerca de las fuentes de aceite vegetal residual y grasa animal, como los mataderos o las plantas de procesamiento de alimentos. Estas fuentes de materia prima pueden ser utilizadas para la producción de biodiésel, lo que reduce los costos de transporte y aumenta la eficiencia del proceso.

En términos de demanda, las plantas de esterificación de biodiésel suelen ubicarse cerca de los centros de consumo de combustible. Esto permite una distribución más eficiente del biodiésel a los consumidores finales y reduce los costos de transporte. En resumen, la localización de las plantas de esterificación

para la producción de biodiésel se basa en la disponibilidad de materia prima, la cercanía a las fuentes de aceite vegetal o grasa animal y la demanda de biodiésel en la región.

Además de estas tecnologías convencionales, Brasil también ha desarrollado tecnologías de producción de biodiésel a partir de fuentes no convencionales, como el aceite de palma y el aceite de macaúba. Estos aceites se obtienen de fuentes autóctonas y se producen en pequeña escala, pero se espera que su producción se incremente en el futuro.

En Brasil, diversas tecnologías se utilizan para la producción de biodiésel a partir de fuentes no convencionales como **el aceite de palma** y **el aceite de macaúba**. Estas tecnologías incluyen:

- Transesterificación: es el proceso químico más comúnmente utilizado para producir biodiésel. Consiste en la reacción del aceite vegetal con un alcohol en presencia de un catalizador, generalmente hidróxido de sodio o potasio. Este proceso convierte el aceite en ésteres metílicos o etílicos, que son los componentes principales del biodiésel.
- Esterificación: en esta tecnología, el aceite de palma o de macaúba se esterifica con ácidos grasos libres presentes en su composición. Esto es necesario cuando el contenido de ácidos grasos libres es alto, ya que de lo contrario interferiría con la eficiencia de la transesterificación.
- Hidrólisis: en este proceso, los aceites son hidrolizados en glicerol y ácidos grasos. El glicerol obtenido como subproducto puede ser utilizado para otros fines industriales o refinado para obtener glicerina.
- Tecnología enzimática: se utiliza en algunos casos como alternativa a la transesterificación convencional. En este proceso, se utilizan enzimas para catalizar la reacción de transesterificación. Esta tecnología puede ser más eficiente y menos energéticamente intensiva en comparación con la transesterificación convencional.
- Tecnología supercrítica: esta tecnología utiliza un fluido supercrítico, como dióxido de carbono, para extraer el aceite de la biomasa. Este método

permite una extracción eficiente y selectiva del aceite de palma o macaúba, que luego puede ser utilizado para la producción de biodiésel.

Todas estas tecnologías se han utilizado con éxito en Brasil para la producción de biodiésel a partir de fuentes no convencionales como el aceite de palma y el aceite de macaúba. El país es uno de los principales productores de biodiésel a nivel mundial y ha promovido activamente el uso de biocombustibles como una alternativa sostenible al petróleo.

Según datos actualizados, Brasil produce biodiésel principalmente a partir de fuentes convencionales como la soja, pero también utiliza algunas fuentes no convencionales como el aceite de palma y el aceite de macaúba.

Con relación al **aceite de palma**, Brasil comenzó a producir y utilizar este recurso en la producción de biodiésel a partir de 2010. Sin embargo, su participación en la producción total de biodiésel en Brasil es relativamente pequeña en comparación con la soja. No se dispone de información específica sobre la cantidad de plantas que utilizan aceite de palma para la producción de biodiésel en Brasil, pero se sabe que están ubicadas principalmente en las regiones norte y nordeste del país, donde se cultivan palmas aceiteras.

En cuanto al **aceite de macaúba**, es otra fuente no convencional utilizada para la producción de biodiésel en Brasil. La macaúba es una palmera nativa de Brasil y sus frutos contienen aceite que puede ser utilizado para este propósito. Al igual que con el aceite de palma, no hay información específica sobre la cantidad de plantas que utilizan aceite de macaúba para la producción de biodiésel en Brasil, pero se encuentran principalmente en los estados de Minas Gerais, Goiás y Mato Grosso.

En Brasil, las plantas de producción de biodiésel a partir de fuentes no convencionales como el **aceite de palma** y el **aceite de macaúba** se encuentran en diferentes regiones del país. Algunas ubicaciones destacadas son:

- Estado de Mato Grosso: esta región es conocida por su producción de aceite de palma y alberga varias plantas de biodiésel que utilizan esta materia prima. Cuiabá, la capital del estado, es uno de los principales centros de producción de biodiésel de aceite de palma.

- Estado de Pará: ubicado en la región norte de Brasil, Pará es otro importante productor de aceite de palma y alberga plantas de biodiésel que utilizan esta fuente. Ciudades como Belém y Santarém son conocidas por su actividad en la producción de aceite de palma y biodiésel.
- Estado de Bahía: esta región del noreste de Brasil es conocida por su gran cantidad de plantaciones de palma aceitera. Salvador, la capital del estado, y las ciudades cercanas como Alagoinhas y Candeias son lugares donde se encuentran plantas de producción de biodiésel a partir de aceite de palma.

En cuanto al aceite de macaúba, que también se utiliza para producir biodiésel en Brasil, su producción se concentra en algunos estados, como Minas Gerais, Goiás y Mato Grosso do Sul. En estas regiones, es posible encontrar plantas de producción de biodiésel que utilizan el aceite de macaúba como materia prima.

En cuanto a la producción de biodiésel a partir de algas, Brasil también ha invertido en investigaciones y proyectos piloto para el desarrollo de esta tecnología. El uso de algas como materia prima para la producción de biodiésel tiene varias ventajas en los estados brasileños, como su alta tasa de crecimiento y su capacidad de absorber grandes cantidades de dióxido de carbono (CO_2), lo que contribuye a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero permitiendo de esta manera, cumplir con los compromisos internacionales sobre la materia.

En Brasil, se han investigado varias tecnologías para la producción de biodiésel a partir de **algas**. Algunas de las tecnologías más comunes son las siguientes:

- Cultivo abierto de algas: esta tecnología consiste en cultivar las algas en estanques o lagunas abiertas, permitiendo que las algas crezcan de manera natural aprovechando la luz solar. Este método es relativamente barato y sencillo, pero puede verse afectado por contaminantes externos, cambios climáticos y otras condiciones ambientales.
- Fotobiorreactores cerrados: esta tecnología utiliza fotobiorreactores cerrados, que son recipientes transparentes en los que se cultivan las algas

y se controlan y optimizan las condiciones de cultivo (temperatura, luz, pH, etc.). Esta tecnología permite un mayor control sobre el proceso de producción y evita la contaminación externa, pero suele ser más costosa y requiere una mayor inversión inicial.

- Cultivo mixotrófico: en esta tecnología, en Brasil se utilizan no solo la luz solar como fuente de energía para las algas, sino también otras fuentes de carbono, como el dióxido de carbono liberado por las centrales termoeléctricas o los residuos orgánicos utilizados para el proceso. Esto ha permitido un mayor crecimiento de las algas y un aumento en la producción del biodiésel brasileño.
- Cultivo de algas *offshore*: esta tecnología se basa en el cultivo de algas marinas en el océano o en grandes cuerpos de agua. La ventaja de esta tecnología es que no compite con tierras agrícolas y utiliza agua de mar, evitando así la escasez de agua dulce. Sin embargo, aún se están investigando las mejores técnicas y tecnologías para implementar este tipo de cultivo de algas a gran escala.

Estas son solo algunas de las tecnologías que se han estudiado y utilizado en Brasil para la producción de biodiésel a partir de algas. Cada una tiene sus ventajas y desventajas, y su viabilidad dependerá de factores como el costo, la disponibilidad de recursos y la capacidad de escalar la producción de biocombustibles.

Brasil cuenta con varias plantas de biodiésel a partir de algas en diferentes ubicaciones. La producción de biodiésel a partir de algas está en etapas iniciales de desarrollo y todavía no se ha alcanzado una escala significativa en Brasil.

En Brasil, hay varias plantas que se dedican a la producción de biocombustibles a partir de algas. Algunas de las ubicaciones más destacadas incluyen:

- AlgaPark: localizada en la ciudad de Ilhéus, en el estado de Bahía, AlgaPark es el mayor polo de biotecnología de algas de América Latina. La planta está enfocada en la producción de biodiésel y biogás a partir de algas marinas.

- Algas Marinas: ubicada en la ciudad de São Sebastião, en el estado de São Paulo, Algas Marinas se especializa en la investigación y producción de biocombustibles a partir de microalgas. La planta utiliza tecnología de fotobiorreactores para cultivar y procesar las algas.
- Agroenergia: localizada en la ciudad de Piracicaba, en el estado de São Paulo, Agroenergia es una planta que se dedica a la producción de biodiésel a partir de microalgas. La empresa utiliza técnicas avanzadas de cultivo y extracción para maximizar la eficiencia del proceso.

Estas son solo algunas de las plantas destacadas en Brasil para la producción de combustibles a partir de algas. El país cuenta con una gran diversidad de recursos naturales y una capacidad técnica importante en el área de la biotecnología, lo cual ha impulsado el desarrollo de este tipo de proyectos.

Brasil cuenta con diversas tecnologías de producción de biodiésel, que van desde procesos convencionales como la transesterificación y esterificación, hasta el desarrollo de tecnologías para la producción de biodiésel a partir de fuentes no convencionales y el uso de algas. Estas tecnologías han contribuido al crecimiento de la industria del biodiésel en el país y a su posicionamiento como uno de los principales productores a nivel mundial, logrando desarrollar este sector como un negocio que permite cumplir los compromisos sociales, ambientales y económicos con los que Brasil se ha comprometido.

— *Tecnologías utilizadas en la producción de bioetanol*

Brasil es uno de los líderes mundiales en la producción de bioetanol a partir de biomasa, especialmente de caña de azúcar. El país ha desarrollado varias tecnologías de producción de bioetanol que lo hacen eficiente y económicamente viable.

- Fermentación alcohólica: el proceso más común utilizado en Brasil para la producción de bioetanol es la fermentación alcohólica. En este proceso, la caña de azúcar es triturada y se extrae el jugo, que contiene azúcares fermentables. Luego, se agrega levadura al jugo para convertir los azúcares en etanol y dióxido de carbono. El etanol se separa del líquido y se purifica antes de ser utilizado como combustible.

- Destilación: después de obtener el etanol a través de la fermentación alcohólica, se realiza un proceso de destilación para aumentar su pureza. El etanol se calienta y se evapora, y luego se condensa y se recolecta en forma líquida. La destilación se realiza varias veces para obtener un etanol de alta calidad que cumpla con los estándares de pureza requeridos.
- Deshidratación: el etanol producido en Brasil generalmente tiene un contenido de agua del 5 al 6 %, lo cual no es adecuado para su uso como combustible. Por lo tanto, se lleva a cabo un proceso de deshidratación para eliminar la mayor parte del contenido de agua. Esto se puede lograr mediante métodos de destilación adicionales o mediante tecnologías de deshidratación como la adsorción o la extracción.
- Cogeneración de energía: la producción de bioetanol en Brasil también se ha integrado con la generación de energía. Durante el proceso de producción, los subproductos de la caña de azúcar, como las hojas y los residuos fibrosos, se utilizan como combustible para generar electricidad y calor. Esto permite que las plantas de producción de bioetanol sean autosuficientes en términos de energía, reduciendo los costos y el impacto ambiental.
- Innovaciones tecnológicas: Brasil continúa desarrollando nuevas tecnologías para mejorar la eficiencia y la rentabilidad de la producción de bioetanol. Esto ha incluido la investigación, innovación y desarrollo tecnológico en procesos de fermentación mucho más eficientes, con el desarrollo de variedades de caña de azúcar más productivas y resistentes a enfermedades, y el uso de enzimas para aumentar el rendimiento de azúcar en el jugo de caña.

4.2.4.3 Implicaciones de carácter agrario

Aunque los biocombustibles son considerados social y ambientalmente como un atenuante para enfrentar los efectos del cambio climático, el desarrollo de cultivos para extraer materias primas a partir de biomasa genera impactos asociados sobre la disminución de ecosistemas naturales y su biodiversidad, la competición

para la producción de alimentos, y los conflictos sociales por el desplazamiento de poblaciones rurales, entre otras.

En este sentido, según Terci et al. (2006) las transformaciones en la estructura productiva y la comprensión de la relación cambio/permanencia de los modos de producción de diferentes grupos sociales en la expansión de la caña de azúcar en Brasil, es facilitada por un mercado de tierras poco ordenado jurídica y socialmente, lo que acarrea reflejos positivos en los costos de producción, a la vez que concentra la propiedad agraria y hace inviable los usos practicados por la agricultura campesina.

Asimismo, el aumento de producción en la agroindustria de la caña está relacionado a la expansión del cultivo en nuevas áreas, eso ocasiona una nueva configuración del espacio geográfico y una presión sobre modos de vida y actividades rurales tradicionales. Al mismo tiempo, el arrendamiento de tierras ha provocado el aumento de la deforestación, ya que los bosques presentes en las propiedades son derrumbados para dar lugar a la homogeneización de los cañaverales (Zucarelli, 2007).

Las prácticas de arrendamiento de tierras como principal estrategia utilizada por el sector para expansión de los cultivos de caña a expensa de fábricas de alcohol ya dominan grandes extensiones de tierra, con alternancia en el paisaje entre haciendas de ganado y extensos cañaverales. El arrendamiento de tierras representa la base para la ampliación de los cultivos de caña y desencadena una compleja alteración en los tipos de producción, en la disponibilidad de empleos, en el flujo migratorio para ciudades, en la oferta de alimentos y en la posibilidad de demarcación de tierras para una reforma agraria (Zucarelli, 2007).

Con relación a los impactos en la generación de empleo y condiciones de trabajo, la modernización de la agricultura no se limita al avance de las transformaciones técnico-económicas, pero comprende alteraciones en la estructura social y en las relaciones de empleo. En ese sentido, la mecanización asevera los niveles de explotación y el desempleo en la agroindustria de la caña de azúcar generando un problema social (Gonçalves, 2005; Veiga, 2006).

A partir de esos cambios, ocurre un reordenamiento en las actividades de la agroindustria de la caña y el empleo de mano de obra pasa a comprender las siguientes fases: producción de mudas, combate de hormigas, conservación de carreteras rurales, operación de máquinas, cosecha manual y retirada de sobras. De todas esas actividades, la de mayor demanda por mano de obra es la cosecha manual, siendo responsable por más de un 60 % del contingente de trabajadores (Gonçalves, 2005).

La llegada de la agroindustria de la caña en pequeños y medios municipios en zonas de Brasil ha alterado toda la dinámica urbana y creado nuevas demandas por servicios públicos, tales como salud, educación, seguridad, abastecimiento de agua, tratamiento de cloacas, saneamiento básico, habitación, entre otros. El flujo de trabajadores seducidos por esos proyectos presiona la infraestructura existente, a la vez que exige mayores inversiones por parte de los gobiernos municipales. La deterioración de las carreteras y vías rurales es otro problema asociado a la actuación de la agroindustria de la caña. El peso excesivo transportado por los camiones que realizan el recorrido del campo a la fábrica reduce los costos de producción, a la vez que arruinan las vías asfaltadas y las vías que hacen la conexión entre comunidades rurales (Zucarelli, 2007).

Con relación a los problemas ambientales que ha ocasionado la producción de caña de azúcar, se denota la destrucción de áreas con vegetación nativa, contaminación de suelos, nacientes y ríos, contaminación de la atmósfera por la quema de cañaverales, destrucción de la biodiversidad, entre otros más. El problema ambiental más visible son las prácticas de quema en cañaverales, que acontecen aproximadamente, en un 80 % de las áreas plantadas. La utilización de esa técnica reduce cerca de un 80 a 90 % el volumen de paja de la caña, a la vez que facilita el corte manual, disminuye los costes de transporte y compensa pérdidas de hasta un 20 % en la cosecha (Zucarelli, 2007).

4.2.4.4 Estrategias de recolección, tratamiento y transporte de materias primas (experiencia y gestión en aprovechamiento de UCO)

En Brasil se consumen alrededor de 3 mil millones de litros de aceite por año y por cada 4 litros consumidos, uno se desecha incorrectamente, lo que representa 700 millones de litros por año que se vierten de manera irregular.

Dentro de las etapas para reciclar el aceite usado de cocina (UCO), la fase de recolección se realiza por empresas que se han venido especializando para que el producto sea aprovechado correctamente, tanto áreas residenciales como los establecimientos comerciales, como una estrategia basada en mitigar impactos al ambiente.

Las empresas que brindan este tipo de servicios de recolección de aceite de cocina usado (UCO) deben actuar de acuerdo con los estándares vigentes establecidos y contar con la aprobación de los ayuntamientos para permitir la emisión de un certificado de destino correcto.

Para el almacenamiento del aceite de cocina usado (UCO), las empresas cuentan con contenedores de diferentes tamaños, utilizados para la decantación, y de maquinaria adecuada, como la centrífuga, que realiza análisis para identificar la presencia de impurezas y humedad en el aceite, y, posteriormente, se realiza los procesos para eliminar las impurezas detectadas y otras acciones necesarias para que el producto vuelva a ser apto para su uso.

Para el caso donde el generador acude a la empresa recolectora, no existe por lo general una cantidad mínima de recogida de aceite vegetal usado, lo que supone una gran ventaja para empresas más pequeñas o clientes residenciales. En los casos donde las empresas ofrecen el servicio de recogida fuera de la sede, sí se cuenta con una cantidad mínima de 10 litros para dar el servicio, pudiendo alcanzar volúmenes aproximados de 30 toneladas y donde el generador puede optar por recibir el pago en efectivo, por el aceite suministrado o en productos de limpieza, lo que es beneficioso por este producto que ya no sirve y que es desechado generalmente de forma incorrecta. El proceso de cobro se realiza con los siguientes pasos:

- Entrega o recogida de aceite.
- Análisis del material frente al cliente.
- Emisión del resultado del análisis.
- Pago al momento del análisis;
- Prestación de certificación del destino final del material.

Para posibilitar la recolección de aceite de cocina, los generadores residenciales o industriales cuentan con sus propios contenedores de almacenamiento, como tanques y galones, en algunos casos, son proveídos y tras un almacenamiento considerable, se determina un día para retirar el volumen producido.

5.2.4.5 Porcentaje de mezclas de biocombustibles

La Política Nacional de Biocombustibles de Brasil (RenovaBio Programme) empezó a ser efectiva en 2020 y busca reducir las emisiones en un 10 % al 2028, en concordancia con el Acuerdo de París. También busca crear un mercado de créditos de carbono y examinar el volumen agregado de las transacciones de petróleo de cada distribuidor para otorgar certificados de descarbonización (Das, 2020).

El mandato actual establece una proporción de 27 % de bioetanol en gasolina y 11 % de biodiésel en diésel; el 83 % de los carros vendidos en 2006 fueron *flex fuel* (Das, 2020).

4.2.4.6 Experiencias internacionales (requerimientos energéticos) tasa de retorno energético

El carbón brasilero es un productor neto de energía con una tasa de retorno de inversión energética (EROI) entre 30 a 57, dependiendo de la fuente de información. Esto significa que, por cada unidad de energía invertida por la sociedad para obtener carbón, su rendimiento es de entre 30 y 57 unidades de energía después de su extracción, procesamiento y trasporte (Oliveira et al., 2019).

De acuerdo con la Figura 40, el consumo per cápita promedio en Brasil para los años 2017 a 2021 fue de 55,46 MMBtu/persona, mientras que el PIB energético promedio fue de 4,09 1000 Btu/2015$ PIB PPP (véase Figura 41

Brasil representa alrededor del 7 % de la producción de energías renovables del planeta con una capacidad del 84 %, superior a la media mundial del 38 %. Gracias a las inversiones masivas, la participación de la energía solar en la matriz energética del país alcanzó el 6,9 % y el 10,9 % para la energía eólica.

Entre 2019 y 2021, el sector energético recibió 500 mil millones de reales (85 mil millones de dólares) para inversión en generación y transmisión de electricidad y nuevas fuentes de energía.

En el Anexo A, Indicadores Energéticos, se encuentran algunos indicadores energéticos de interés para el desarrollo de biocombustibles en diferentes países, entre ellos los seleccionados para el presente estudio. Es importante resaltar que la tasa de retorno energético (EROI) debe ser superior a la unidad y que es mayor para los combustibles fósiles. Esto indica que la energía requerida por el sistema es menor que la energía liberada por el mismo.

De otro lado, en el Anexo B, Requerimientos energéticos por etapa de la cadena de suministro de biocombustibles, se encuentran los requerimientos energéticos para el proceso agrícola, el pretratamiento de materias primas, procesamiento de precursores y transporte en la obtención de biocombustibles como el biodiésel, bioetanol, biogás y biojet para diferentes países. Los diferentes autores concuerdan en que la fase agrícola es aquella en la que se requiere mayor cantidad de energía.

4.2.5 Cadena de suministro

En Brasil, existe una política nacional de biocombustibles instituida por la Ley 13.576 de 2017, con los objetivos de:

- Contribuir con el cumplimiento de las normas adoptadas por Brasil del Acuerdo de Paris.
- Promover la adecuada expansión de los biocombustibles en la matriz energética.

- Los incentivos están dados principalmente por la legislación estatal con el fin de alcanzar los objetivos de descarbonización de los combustibles e incentivar la mayor participación de los biocombustibles.

4.2.5.1 Cadena de suministro del biodiésel

A continuación, en la figura 60, se describe la cadena de valor para la producción de biodiésel y sus principales variables, con lo cual podemos definir capacidad de producción, capacidad de exportación y definición de esquema logístico para el uso de los biocombustibles.

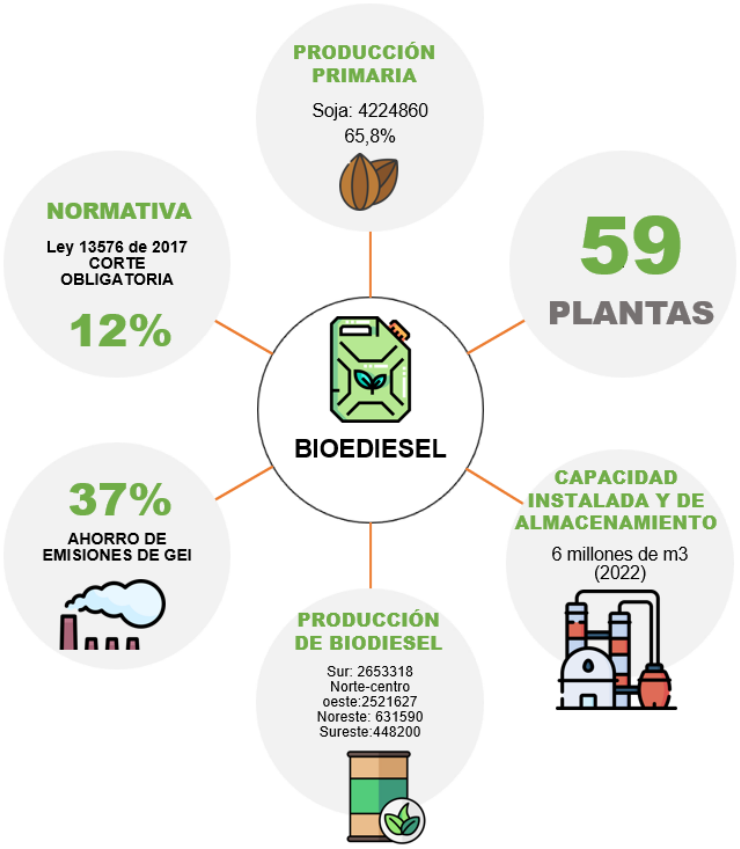


Figura 60. Cadena de valor del biodiésel en Brasil

Adaptado de: datos presentados en el Ministerio de Minas y Energía

— *Producción primaria*

Brasil cuenta con una gran variedad de materias primas y/o biomasas para transformar y generar algún tipo de biocombustible, sin embargo, para el presente

documento es de relevancia la soja, por ende, la producción de soja para el año 2022 fue de 4.224.860 m^3 y de las diferentes materias primas que fueron utilizadas para generar biodiésel, la soja, representó el 65,8 %, como se puede evidenciar en la figura 61.

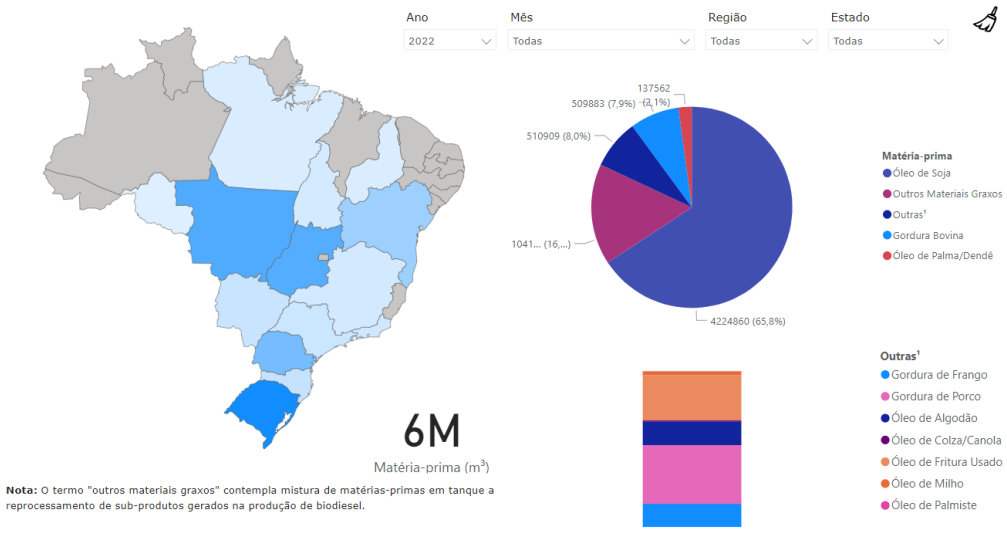


Figura 61 Distribución de materias primas y/o biomasas en Brasil

Fuente: Anp, Mapa dinámico

— *Almacenamiento y transporte hasta las plantas de procesamiento*

Al obtener la materia prima, esta sale de los campos por carretera y el almacenamiento de la materia prima se realiza en silos. Este almacenamiento lo realizan terceros y no los propios agricultores, luego atraviesa varias ciudades hasta llegar a las diferentes plantas de transformación.

Actualmente, la matriz de transportes de materias primas en Brasil está dada de la siguiente manera:

- Carretera 61,1%
- Ferrocarril 20,7 %
- Hidrovía 13,6 %
- Ductoviario 4,2 %
- Aéreo 0,4 % (Calzada & Rozadilla, 2019)

— *Plantas de procesamiento*

El biodiésel es un combustible renovable que se obtiene a partir de un proceso químico llamado transesterificación. Mediante este proceso, los triglicéridos presentes en los aceites y grasas animales reaccionan con un alcohol primario, metanol o etanol, generando dos productos: éster y glicerina. El primero es el utilizado como biodiésel tras pasar por procesos de purificación para adaptarse a las especificaciones de calidad.

A julio de 2023, se reportaron 59 empresas que transforman la soja en biodiésel como se puede evidenciar en la figura 62.

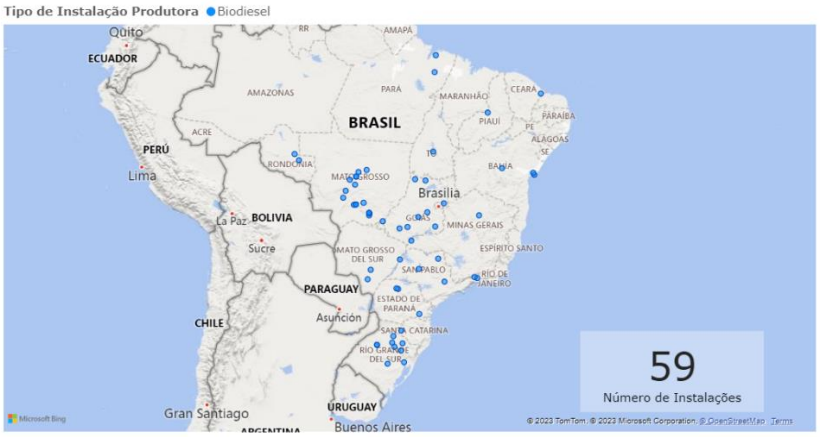


Figura 62 Plantas productoras de biodiésel

Fuente: Anp, Mapa dinámico

— *Comercialización*

Para el año 2022, de acuerdo con la cantidad de materias primas, se obtuvieron 6 millones de m^3 de biodiésel (véase figura 63). La distribución de la producción del biodiésel se encuentra mayormente localizada en el sur, norte-centro oeste del país con 2.653.318 m^3 y 2.521.627 m^3, respectivamente.

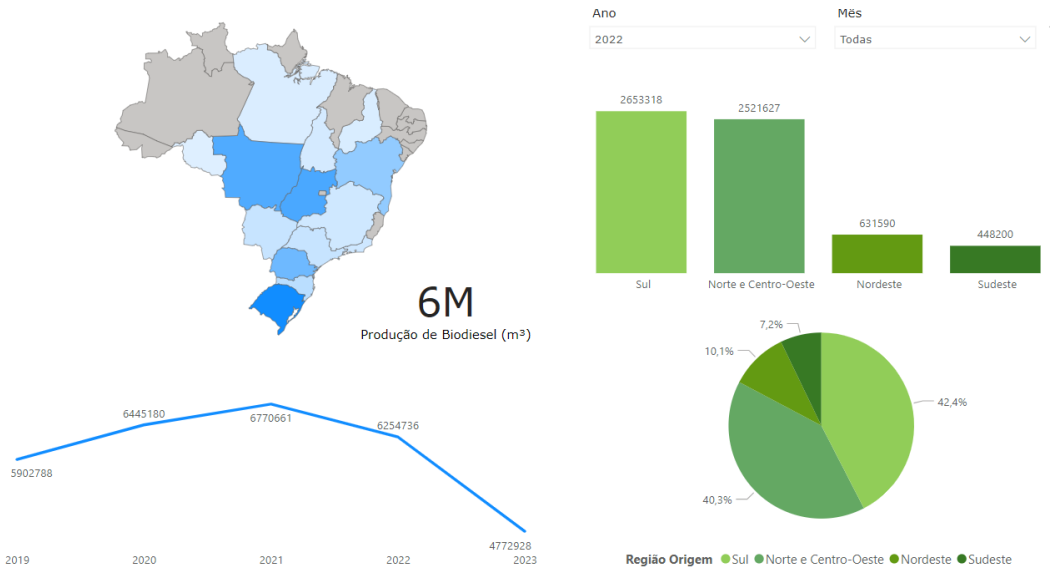


Figura 63 Producción de biodiésel en Brasil

Fuente: Anp, Mapa dinámico

Finalmente, la comercialización se realiza a todo el país, sin embargo, al norte-centro oeste y sur del país se presenció el mayor número de tanqueos con 1.986.679 m^3 y 1.858.189 m^3, respectivamente (véase figura 64).

Ya que el océano Atlántico rodea al país en su costado derecho, se aprovecha para realizar el transporte de las materias primas en barcos hasta los puertos.

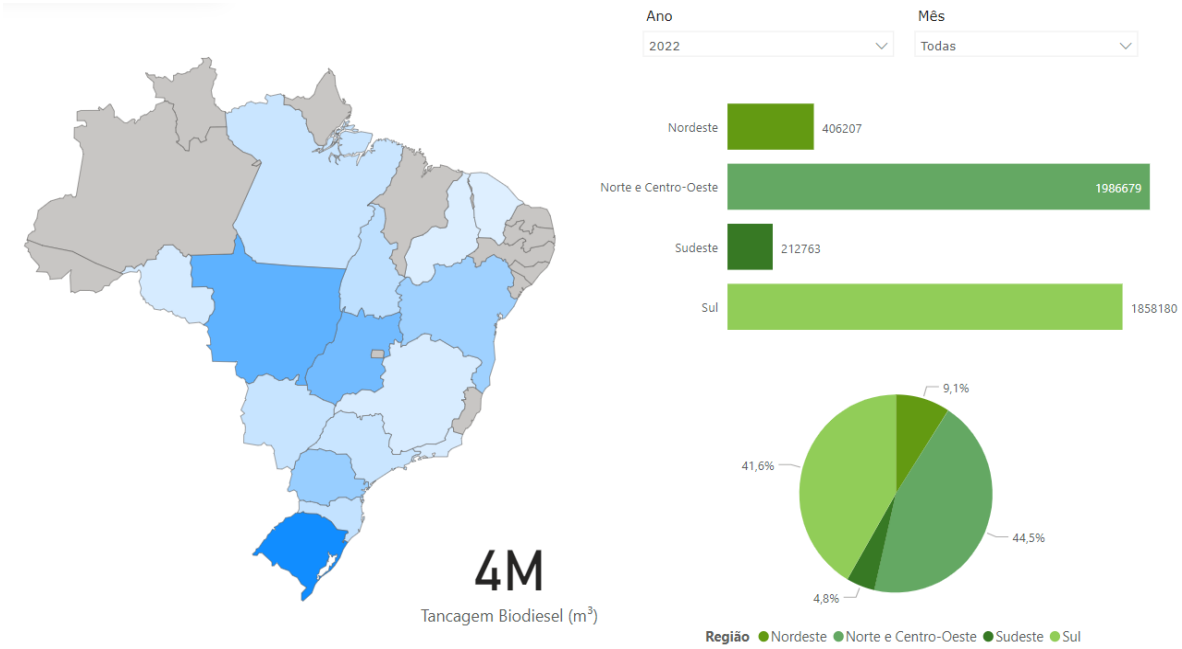


Figura 64. Tanqueo

Fuente: Anp, Mapa dinámico

— *Ventas y exportación*

El Ministerio de Minas y Energía del Brasil, a través de su Agencia Nacional de Petróleo, Gas Natural y Biocombustibles, presenta una venta de 6 millones de m^3 teniendo origen, mayormente, en el norte-centro oeste y sur con 2.500.420 y 2.605.833 m^3, respectivamente, y con destino principal el sureste brasilero con 2.263.028 m^3.

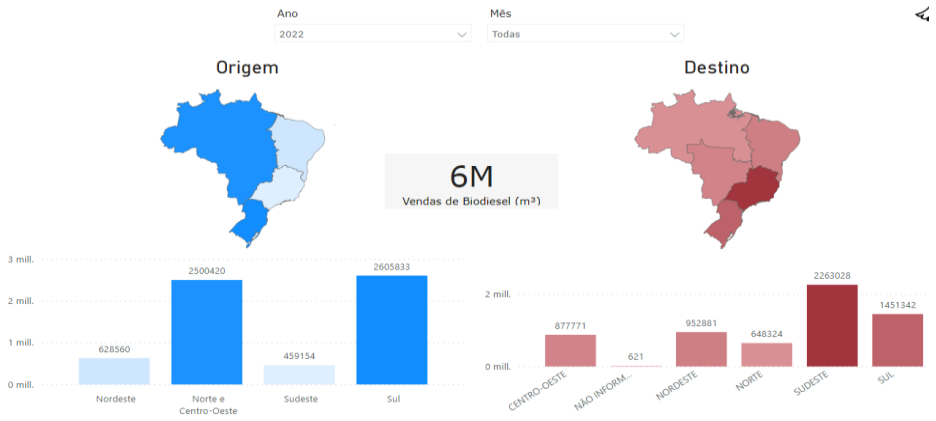


Figura 65. Ventas de biodiésel

Fuente: Anp, Mapa dinámico

Para la exportación del biodiésel, se utiliza el corredor del río Madeira y el río Amazonas porque la alternativa es la más viable para transportarlo hasta los puertos de Itacoatiara en Amazonas y en Santarem en Para; siendo la última etapa por barco hasta el destino final, Estados Unidos, Europa o Asia (Do Globo Rural, n.d.).

— *Aceite de cocina usado*

A parte de la soja, para la producción del biodiésel se vienen implementando estrategias para la recolección del aceite de cocina usado. En Brasil, existe un programa llamado Liza, el método empleado por el programa para la recolección es directo en los restaurantes y cadenas de preparación de alimentos o aquellas cadenas que generen aceite usado, y, por otro lado, están los sitios dispuestos para que cada persona disponga su aceite y allí lo recolectan para luego realizar los procesos de transformación (Liza, n.d.).

Existen cientos de puntos en las diferentes cadenas de supermercados y restaurantes para que puedan llevar el aceite usado y depositarlo en uno de los recolectores, cuentan con más de 5000 puntos de recolección, adicionalmente en la página web de Liza pueden ingresar la localización para que indique el lugar más cercano. Liza cuenta con uno de los programas de logística inversa de aceites vegetales usados más grandes del país, son 23 empresas que participan en la recolección de aceite usado en los 19 estados (Liza, n.d.).

Luego de la recolección, se realiza un pretratamiento con el fin de eliminar las impurezas sólidas y reducir el contenido de agua, seguido a esto pasa por un proceso de transesterificación, donde el aceite reacciona con un alcohol que cumple la función de disolvente y catalizador, el biodiésel obtenido con glicerol se separa y se purifica (Miranda et al., 2017).

Liza esta aliada con más de 500 escuelas apoyadas por el Programa de Acción Renovar el Medio Ambiente, en el cual promueven las acciones de sostenibilidad y temática ambiental. Se realizan charlas, intervenciones públicas, dinámicas y otras acciones para promover la conciencia ambiental (Liza, n.d.).

4.2.5.2 Cadena de suministro del bioetanol

A continuación, en la Figura 66, se describe la cadena de valor para la producción de bioetanol y sus principales variables, con lo cual podemos definir capacidad de producción, capacidad de exportación y definición de esquema logístico para el uso de los biocombustibles.

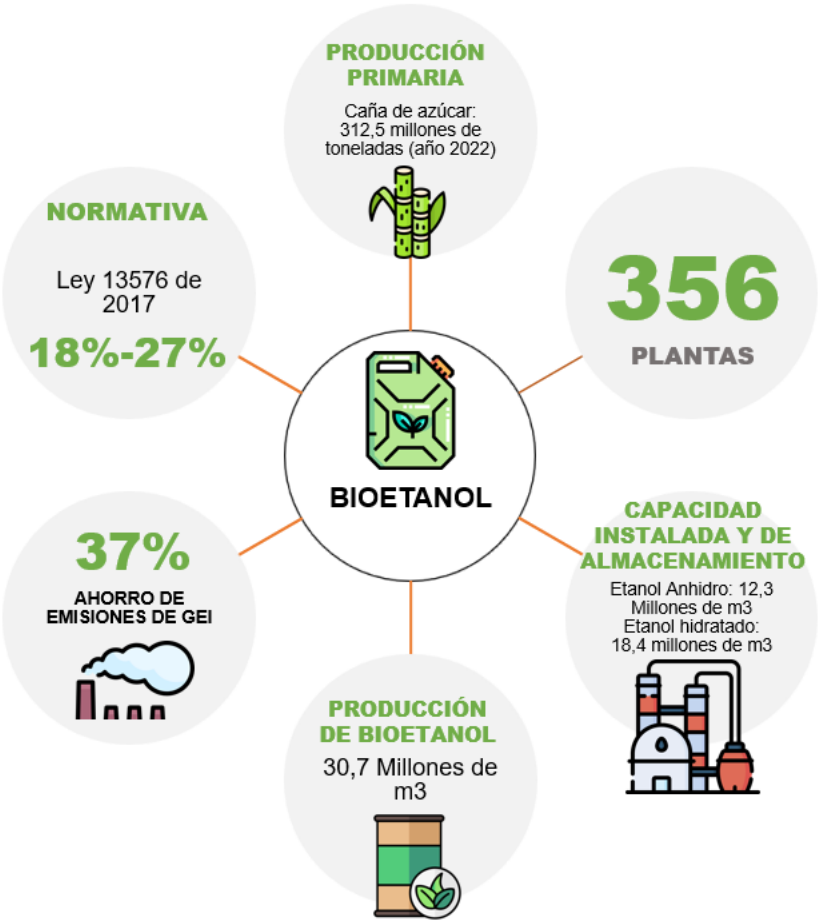


Figura 66. Cadena de valor del bioetanol en Brasil

Adaptado de: elaboración propia de acuerdo con los datos presentados en el Ministerio de Minas y Energía

— *Producción primaria*

La producción de bioetanol en Brasil se basa, principalmente, en el procesamiento de caña de azúcar. Para el año 2022, la producción de caña fue de 291 mil millones, representando el 93 % de la materia prima empleada, el restante se da de acuerdo con otros insumos como se presenta en la figura 67.

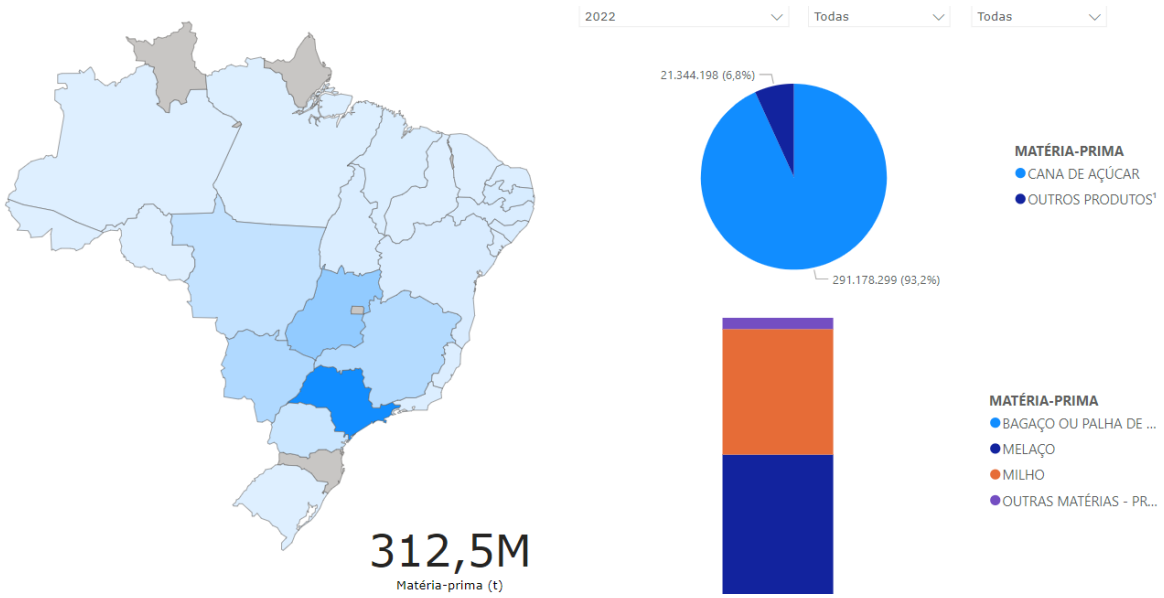


Figura 67. Producción de caña de azúcar en Brasil

Tomado de: Anp, Mapa dinámico

— *Almacenamiento y transporte hasta las plantas de procesamiento*

Al obtener la materia prima, esta sale de los campos por carretera en camiones y el almacenamiento de la materia prima se realiza en silos, este almacenamiento lo realizan terceros y no los propios agricultores, luego atraviesa varias ciudades hasta llegar a las diferentes plantas de transformación.

— *Plantas de procesamiento*

Luego de obtener la materia prima, se transporta hasta las diferentes instalaciones. Al año 2023, se reportaron 356 empresas que transforman la caña de azúcar en bioetanol, concentradas en la zona sur del país (véase figura 68).

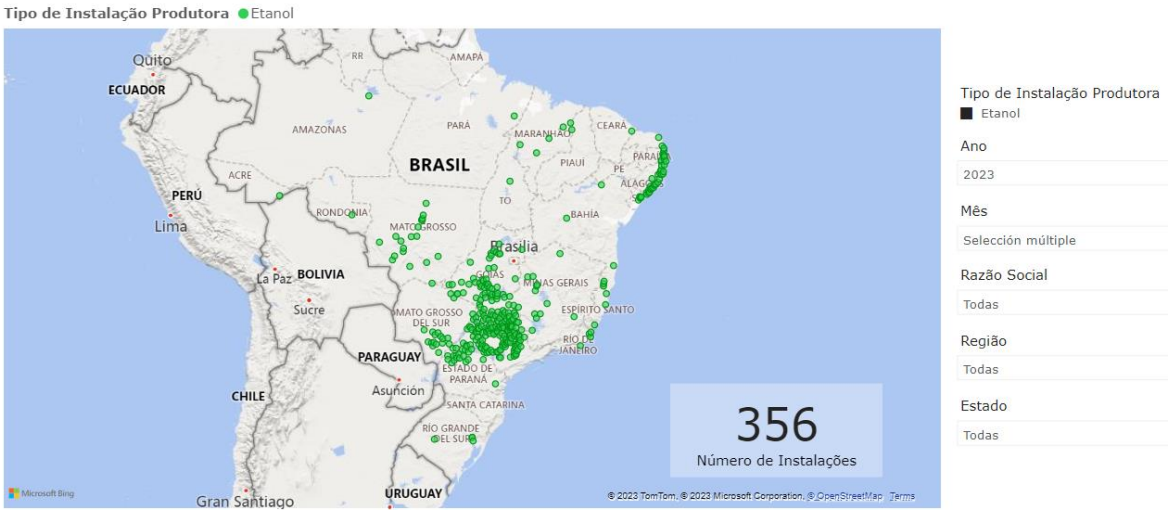


Figura 68. Plantas de procesamiento de bioetanol

Tomado de: Anp, Mapa dinámico

— *Producción y comercialización*

Posterior a la transformación del etanol, se traslada a centros de acopio para su almacenamiento. En ocasiones, el producto puede transferirse directamente a la base de distribución (primaria o secundaria). Este transporte se realiza principalmente por carretera; luego de la recepción en el centro de acopio, el etanol es transportado a las bases de distribución y, posteriormente, desde las bases al mercado interno o a los puertos. El producto destinado al mercado interior (gasolineras o distribuidores minoristas) se envía, en general, por carretera, el 100 % de los combustibles líquidos en Brasil se transportan por carretera, incluso para distancias superiores a 500 km. La producción de bioetanol para el año 2022 fue de 30,7 millones de m^3.

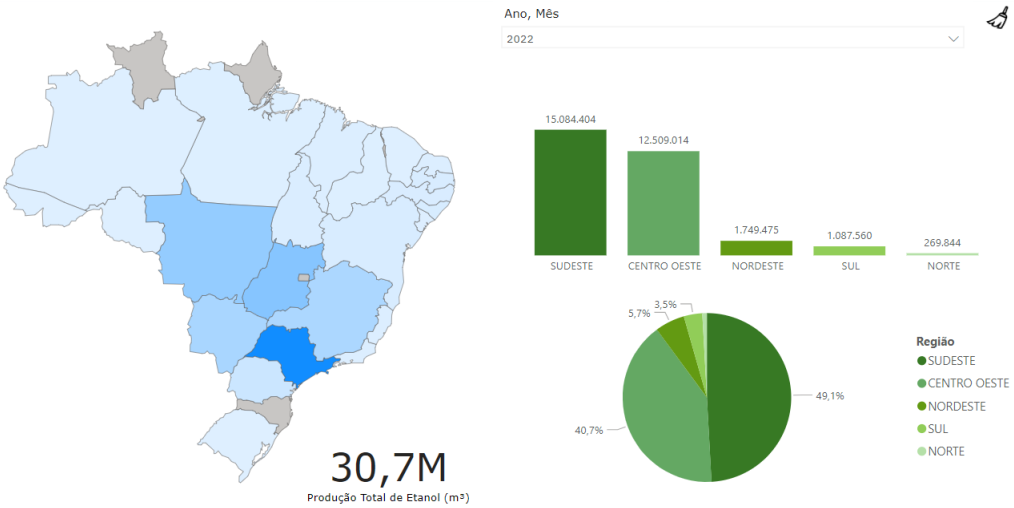


Figura 69 Producción de bioetanol en Brasil

Fuente: Anp, Mapa dinámico

— *Ventas y exportación*

Para el año 2022, el tanqueo de bioetanol fue de 28 millones de m^3, lo que es traducido como el consumo anual para ese año (Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura [IICA], 2022).

Según la Agencia Nacional de Petróleo, la exportación estuvo sobre 2,3 millones de m^3 y la importación fue de 400.000 m^3 (Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura [IICA], 2022).

— *Costos*

El costo de la materia prima o insumo en el costo total es más de las tres cuartas partes, representando el 75,8 %, los costos de producción le siguen con un 6,93 % y costos variables con un 5,74 %, seguido del costo de transporte del biocombustible a los centros de distribución con un 5,32 %, el costo del transporte de las materias primas a las plantas de transformación con un 3,47 % y, por último, el costo a la construcción de las plantas con un 2,72 % (Artur & Peixoto, n.d.).

4.2.5.3 Cadena de suministro del biogás

La cadena de suministro de biogás en Brasil se inicia con la recolección de sustratos orgánicos, que abarcan residuos agrícolas, desechos alimentarios y

lodos depuradores. En instalaciones especializadas, estos materiales se someten a un proceso de digestión anaeróbica donde los microorganismos descomponen la materia orgánica. Es posible utilizar la energía generada para producir electricidad y/o calor a través de motores o turbinas, o inyectarla en la red de gas natural.

— *Producción primaria*

El potencial agroindustrial de Brasil ha impulsado la producción principal de biogás, lo que ha provocado un aumento significativo del 21,3 % en la producción de biogás en 2022. La utilización de la caña de azúcar como una de las principales fuentes de materia prima para la generación de biogás en Brasil es un componente esencial de esta producción (JBS avanza en la producción de biogás en Brasil - H2, n.d.).

— *Plantas de procesamiento*

Brasil ofrece un significativo potencial para la producción de biogás, principalmente atribuible al robusto sector agroindustrial. En consecuencia, el país experimentó un notable incremento del 21,3 % en su producción de biogás durante el año 2022. Este avance se vio respaldado por la implementación o modernización de 56 instalaciones de biogás, complementando las 755 ya existentes, según datos proporcionados por CIBiogas. La información de la Empresa de Pesquisa Energética (EPE) revela que la participación del biogás en la matriz energética brasilera ha experimentado un incremento. En el año 2021, el último periodo con datos disponibles, este representó el 1,4 % de la generación total de energía en el país, registrando un crecimiento anual de aproximadamente el 9,5 % desde el año 2019 (JBS avanza en la producción de biogás en Brasil - H2, n.d.) (véase figura 70).

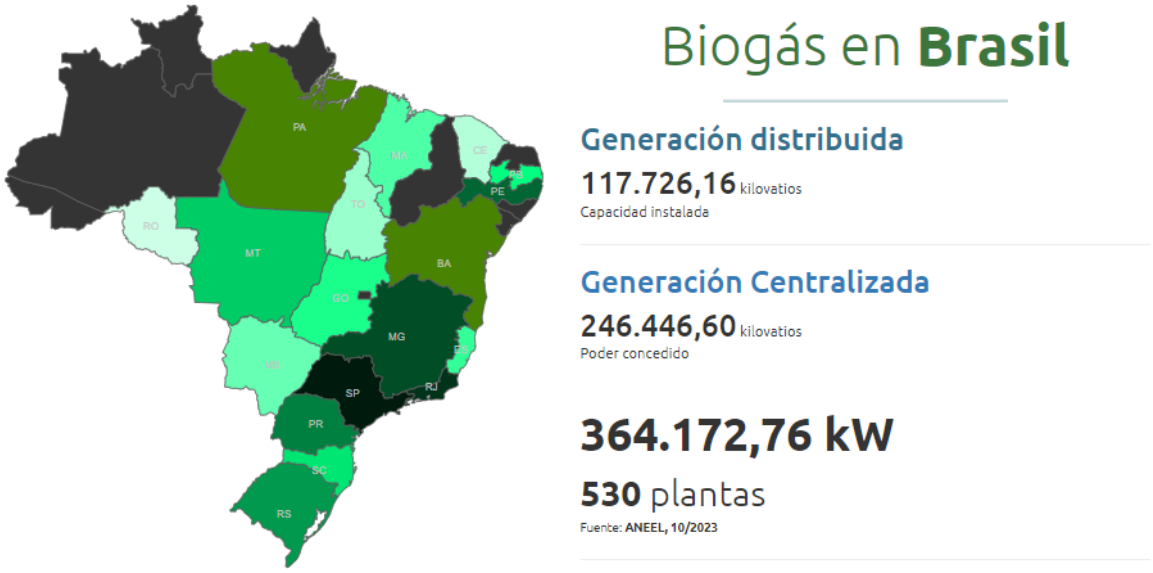


Figura 70. Panorama de la generación de energía eléctrica con la fuente biogás

Fuente. Consultado el 12/2023, tomado de: https://energiaebiogas.com.br/biogas-no-brasil

— *Distribución y comercialización*

El 86 % del biogás producido en Brasil se destinaría a la producción de energía eléctrica, seguida de energía térmica (10 %), producción de biometano (3 %) y energía mecánica (1 %) (Engie, 2021).

4.2.5.4 Cadena de suministro de SAF

— *Producción primaria*

Brasil se destaca como un referente en la producción de biocombustibles, y como consecuencia, emplea una amplia gama de materias primas en la fabricación de combustibles de aviación sostenibles (SAF), algunas son: etanol de caña de azúcar, aceites vegetales, biodiésel, residuos de biomasa y algas.

— *Almacenamiento y transporte*

Para el almacenamiento de las materias primas empleadas para el SAF, se hace uso de silos ubicados en cada lugar en el que se produce. El transporte de cada materia prima se describe en la tabla 50.

Tabla 50. Transporte de la materia prima a las plantas de transformación

Materia prima	Transporte
Caña de azúcar	Se transporta desde las plantaciones en camión o ferrocarril dependiendo la ubicación, hasta las destilerías y plantas de procesamiento de etanol.
Aceites vegetales	Se transportan desde las instalaciones de extracción de aceite a las plantas de procesamiento de SAF. Involucra camiones cisterna para su desplazamiento.
Biomasa agrícola	Los desechos de cosecha se recolectan en el campo y se transportan en camiones a las instalaciones de procesamiento de biomasa.
Materias primas de origen forestal	Las materias primas, tales como la madera y los desechos de la industria maderera, son extraídas en zonas forestales y posteriormente se trasladan a las instalaciones de procesamiento mediante vehículos terrestres, ferrocarriles o embarcaciones fluviales, en función de la accesibilidad a las vías de agua.
Materias primas de origen industrial	Los desechos de origen industrial, que comprenden aceites ya utilizados y subproductos generados por la actividad industrial, son recolectados en las propias instalaciones industriales y luego son trasladados a las instalaciones de procesamiento correspondientes.

Adaptado de:(Sbpe, 2021)

— *Plantas de procesamiento*

En Brasil, las instalaciones de procesamiento destinadas a la fabricación de combustibles de aviación sostenible (SAF) pueden diferir en dimensiones y tecnología, y su cantidad ha experimentado un crecimiento constante, algunas de estas plantas se describen en la tabla 51.

Tabla 51. Plantas de procesamiento de SAF en Brasil

Nombre	Ubicación	Descripción
Raízen	São Paulo	Raízen es una empresa brasilera que produce SAF a partir del etanol de la caña de azúcar.
Granbio	Alagoas	Granbio produce SAF a partir de biomasa forestal y agrícola.
Amyris	Brotas, São Paulo	Amyris es una compañía que aprovecha la biotecnología para la fabricación de combustibles de aviación sostenibles (SAF) a partir de recursos renovables, como la caña de azúcar.
Petrobras	Rio de Janeiro	Esta petrolera ha estado involucrada en investigaciones y desarrollos en cuanto al SAF, es por esto por lo que realiza su producción a partir de caña de azúcar.

Adaptado de: paginas oficiales de cada planta.

— Distribución y comercialización

Una vez que se completa la producción de combustibles de aviación sostenibles (SAF), se inicia su traslado desde las instalaciones de producción a través de una red de transporte que puede comprender camiones cisterna y sistemas de oleoductos. Brasil dispone de una infraestructura de transporte sólidamente desarrollada para facilitar el movimiento de biocombustibles y de SAF a lo largo del territorio nacional.

Estos SAF se almacenan en terminales especializadas para productos petroleros y en aeropuertos, dentro de tanques de almacenamiento diseñados específicamente para combustibles de aviación. Una vez se encuentra en los aeropuertos, el suministro de SAF a las aeronaves se efectúa mediante camiones de abastecimiento de combustible que proceden a la carga de los tanques de las aeronaves antes de su despegue. En la Figura 71, se evidencian los aeropuertos a los que se suministra SAF (Agência Nacional de Aviação Civil [ANAC], 2019).

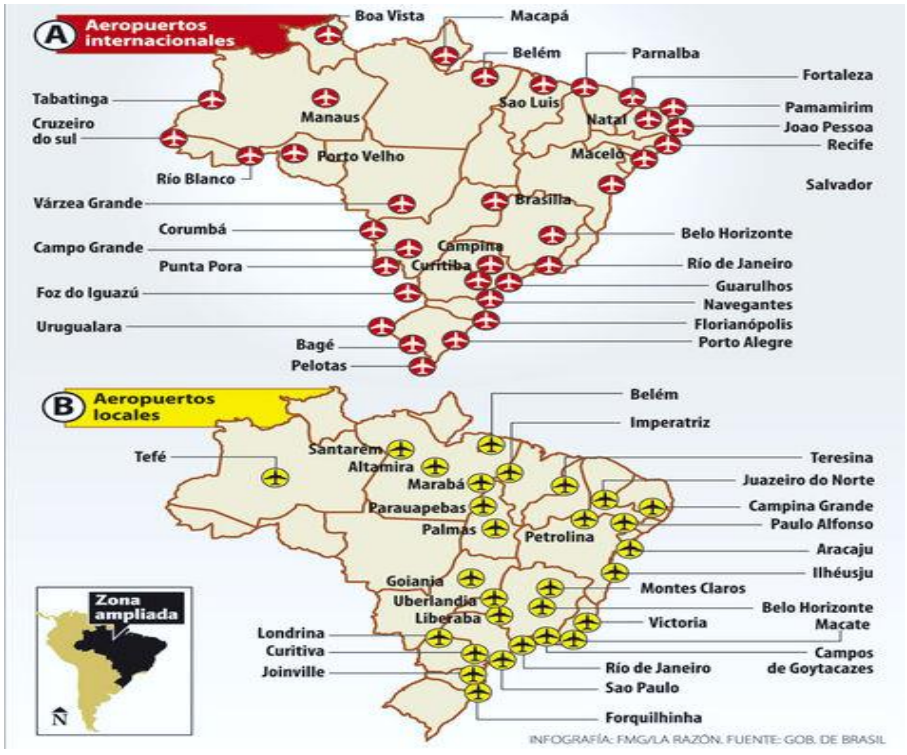


Figura 71 Aeropuertos internacionalesy locales en Brasil

Obtenido de: (Aviação Civil, n.d.)

4.2.6 Aspectos ambientales

4.2.6.1 Análisis de ciclo de vida

Peñarrubia Fernandez et al. (2017) desarrollaron un estudio para comparar el proceso tradicional de catálisis alcalina con la catálisis enzimática en la producción de biodiésel empleando tres casos:

- Caso 1: producción de 1 tonelada de biodiésel de soja con catálisis alcalina con hidróxido de sodio.
- Caso 2: producción de 1 tonelada de biodiésel de soja con catálisis enzimática con lipasa inmovilizada como enzima catalizadora.
- Caso 3: producción de 1 tonelada de biodiésel de aceite usado de cocina (UCO) con catálisis enzimática lipasa inmovilizada como enzima catalizadora.

El enfoque de este análisis de ciclo de vida es de la cuna a la puerta (*cradle-to-gate*), como se muestra en la figura 72, cada caso involucra cuatro etapas: (i) la recolección de la materia prima (producción agrícola o recolección en hogares, según sea el caso), (ii) el transporte de la materia prima al lugar de procesamiento, (iii) el pretratamiento de la materia prima (molienda y refinamiento o pretratamiento UCO) y (iv) el proceso de transformación a biodiésel, que es la transesterificación catalítica (Peñarrubia Fernandez et al., n.d.).

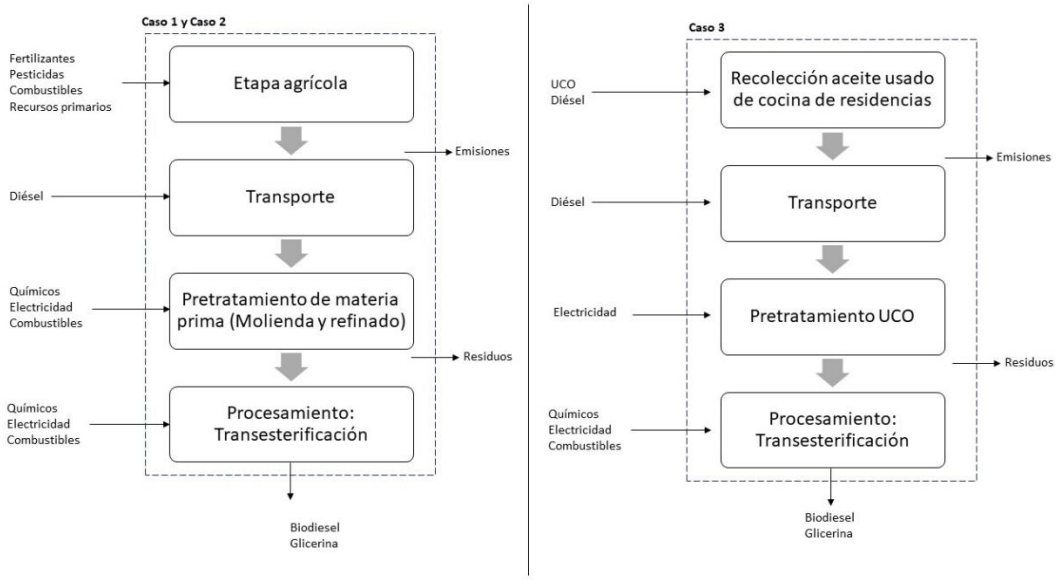


Figura 72. Límites del sistema para el ACV en la producción de biodiésel por transesterificación catalítica

Adaptado de: (Peñarrubia Fernandez et al., n.d.)

Los resultados muestran que la tecnología (catálisis enzimática) y el precursor (UCO) pueden mejorar los impactos ambientales causados. Aunque la transesterificación sigue siendo la ruta más común para obtener biodiésel, el uso de catalizadores optimiza el proceso. La catálisis ácida y alcalina son las más comunes en Brasil, sin embargo, presentan desventajas ambientales respecto a la catálisis enzimática (disposición de residuos, consumo de agua, formación de jabón, purificación, etc.). De acuerdo con la Figura 73, el uso de UCO como precursor del biodiésel y el proceso de transesterificación con la lipasa como catalizador (caso 3), reduce considerablemente los impactos ambientales e, incluso, la producción de biodiésel a partir de soja; pero con la transesterificación enzimática (caso 2) también logra considerables reducciones respecto a la transesterificación alcalina (caso 1) (Peñarrubia Fernandez et al., n.d.).

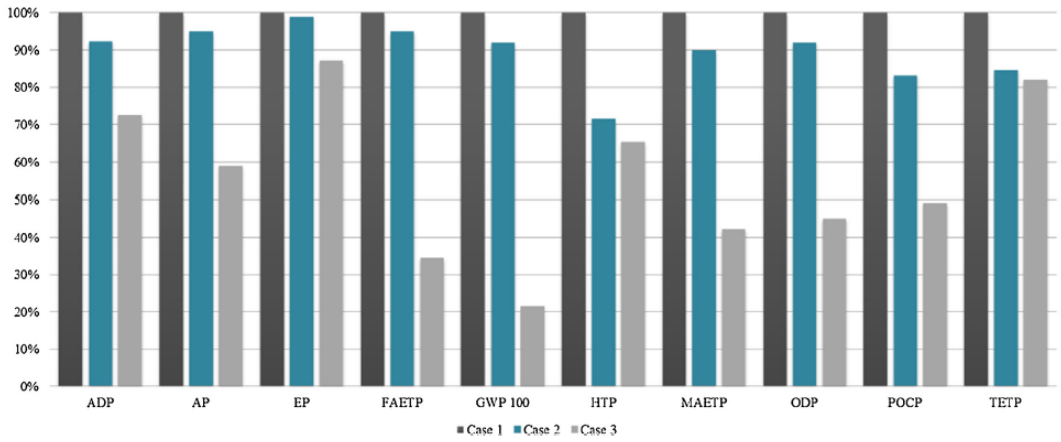


Figura 73. Resultados ACV para biodiésel en Brasil

[Potencial de agotamiento abiótico (ADP), Potencial de calentamiento global (GWP), Potencial de agotamiento de la capa de ozono (ODP), Potencial de toxicidad humana (HTP), Potencial de ecotoxicidad de agua fresca (FAETP), Potencial de ecotoxicidad de agua marina (MAETP), Potencial de ecotoxicidad terrestre (TETP), Potencial de creación fotoquímica de ozono (POCP), Potencial de acidificación (AP) y Potencial de Eutrofización (EP)]

Tomado de: (Peñarrubia Fernandez et al., n.d.)

Por otro lado, el diésel verde o aceite vegetal hidrotratado (HVO) se ha llevado especial atención por su similitud con el diésel convencional, su funcionamiento en motores diésel y su baja generación de emisiones (Roque et al., 2023).

El estudio de Roque et al. (2023) presenta un análisis de ciclo de vida (ACV) en el uso de petrodiésel, HVO derivado del aceite de palma y de soja y bioetanol en diferentes condiciones de operación en un motor diésel para generar electricidad en pequeña escala en aplicaciones estacionarias (Roque et al., 2023).

El ACV fue realizado en el *software* Simapro 9, con las bases de datos Ecoinvent 3 y Agro-footprint, y el método de impacto ReCiPe 2016 Midpoint. La Figura 74 muestra la delimitación del sistema.

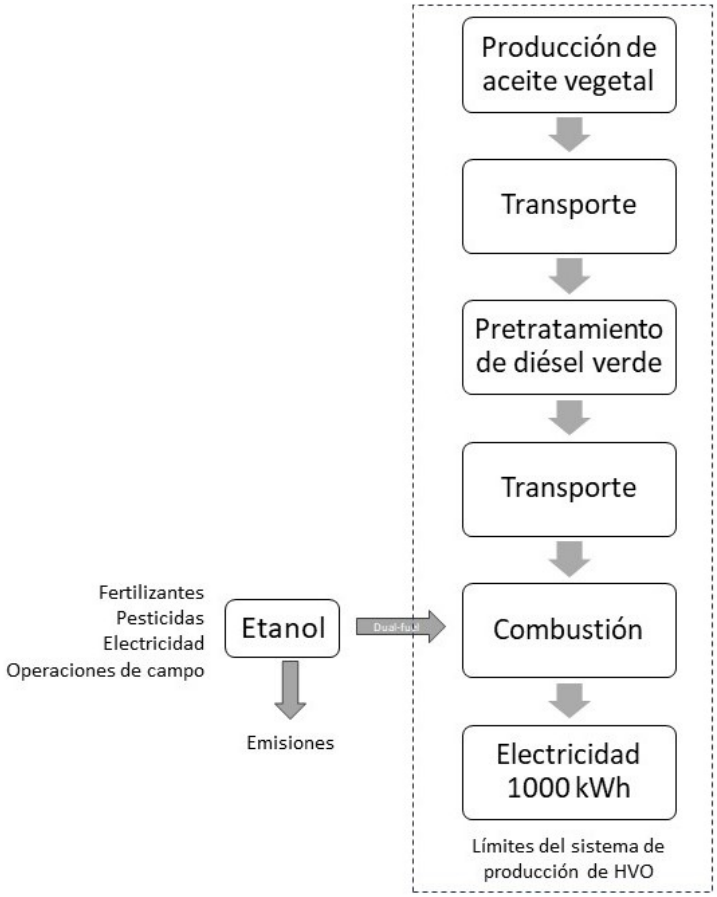


Figura 74. Delimitación del sistema para el ACV

Tomado de: (Roque et al., 2023)

Los resultados al emplear HVO puro, muestran reducciones en emisiones de NOx, HC, CO y material particulado (30 %, 75 %, 81 % y 55,2 %, respectivamente) y 4,36 % de eficiencia comparado con el uso del diésel. La aplicación dual de combustibles presenta reducciones significativas en emisiones de CO_2, NOx y material particulado, pero decrece la eficiencia del motor en 9,4 % (Roque et al., 2023).

El ACV muestra que el HVO a partir de aceite de palma tiene un mejor efecto ambiental que el HVO a partir de aceite de soja, y logra reducir el potencial de calentamiento global un 75 %. El aceite de palma logra reducir el impacto en categorías como acidificación terrestre, formación de ozono y consumo de

recursos no renovables en comparación con el diésel. Mientras que el impacto ambiental en la aplicación dual de combustibles logra reducciones en el potencial de calentamiento global, agotamiento de los recursos fósiles y la formación de ozono (Roque et al., 2023).

4.2.6.2 Emisiones de gases de efecto invernadero

En las emisiones de Brasil, en el año 2016, al igual que en la mayoría de los países de América Latina, el sector de energía y de AFOLU (agricultura, silvicultura y otros usos de la tierra) causan el mayor impacto en las emisiones. En emisiones de CO_2, los sectores con mayor participación son la combustión, LULUCF (uso de la tierra, cambios en uso de la tierra y silvicultura), la industria del cemento y la industria del hierro y el acero. También se logran emisiones considerables en las emisiones fugitivas en la extracción y transporte de petróleo y gas natural (Ministry of Foreign Affairs & Ministry of Science, 2020).

4.2.6.3 Compromisos ambientales en reducción de GEI

RenovaBio es la política nacional de biocombustibles y busca:

- Reducir las emisiones de GEI en un 37 % para 2025 y en un 43 % para 2030.
- Reducir gradual la destrucción de bosques en un15 % anual entre 2022 y 2024, aumentando a una reducción del 40 % en 2025 y 2026, hasta alcanzar la deforestación cero en 2028 (Presidencia de la República de Brasil, 2022).

4.2.7 Aspectos sociales

4.2.7.1 Seguridad alimentaria

En el caso de Brasil, el debate respecto de la seguridad alimentaria y los biocombustibles tiene varios matices. Actualmente, y debido a las políticas de industrialización agrícola que ha tenido el país, este se ha convertido en una de las principales despensas agrícolas, principalmente la zona del Cerrado, la cual tiene una alta degradación ambiental, como consecuencia de la industria agrícola y de biocombustibles, como veremos más adelante.

A su vez, de conformidad con el análisis realizado por Forest & Forest (2014), Brasil cuenta con una posición estratégica en la producción de productos alimenticios. Si bien el sector de los biocombustibles ha tenido diversos impactos a nivel de uso de suelos, el cual es uno de los factores que potencian las dificultades en materia de seguridad alimentaria, la misma no se ve afectada, esto debido al porcentaje de concentración de los cultivos que se usaban como materia prima para los agrocombustibles (Da Silva, 2014; Forest & Forest, 2014).

Asimismo, del estudio realizado por Alexandre Navarro Da Silva, en el cual se analiza el impacto de los biocombustibles sobre la seguridad alimentaria de la población brasilera, y la posibilidad de estimar el índice de masa corporal (BMI) de la población, a través de la Encuesta de Presupuestos Familiares (POF), que es una encuesta de presupuesto familiar, y la Encuesta Nacional de Muestra de Domicilios (PNAD), que es una encuesta doméstica nacional, utilizando técnicas de redes neurales artificiales (ANN), se concluyó que la seguridad alimentaria en las cinco principales regiones del país no estuvieron amenazadas durante el periodo analizado (Da Silva, 2014).

También concluyó el precitado estudio que si la producción en materia de biocombustibles en Brasil siguiera creciendo de la misma manera a como se ha venido presentando en las últimas décadas, tampoco habría un empeoramiento respecto de la seguridad alimentaria relacionada con los biocombustibles (Da Silva, 2014).

Ahora bien, esto contrasta frente a las cifras con los datos del Instituto Brasileño de Geografía y Estadística, citado por Mendonça (2014), que 14 millones de personas pasan hambre en el Brasil y más de 72 millones viven en situación de inseguridad alimentaria como consecuencia de la concentración de la riqueza y la tierra (Mendonça, 2009).

4.2.7.2 Uso de la tierra, impacto a comunidades locales, agrícolas e indígenas, y afectación a los recursos naturales

— Usos de la tierra

Tanto el cultivo de soja como la caña de azúcar han generado diversos conflictos sociales en Brasil, principalmente como consecuencia de la extensión de los

monocultivos de estas dos materias primas. De acuerdo con información recolectada por Miguel Altieri, el total de tierras destinadas a la producción de soja en Brasil se incrementó en un 3,2 % anual (320.000 hectáreas por año). Hoy la soja, junto a la caña de azúcar, ocupan un territorio mayor que cualquier otro cultivo en Brasil, con un 21 % del total del área cultivada del país. El territorio total utilizado en el cultivo de soja se ha multiplicado 57 veces desde 1961, y el volumen de producción se ha multiplicado 138 veces (Altieri & Bravo, n.d.).

Existe una tendencia a la producción de materia prima para los biocombustibles bajo la modalidad de monocultivo, esto ha incrementado el desplazamiento de poblaciones, la competencia por el suelo y las condiciones sociales (Vargas, p. 11). Al respecto, destaca Marcos Zucarelli que la presencia de este tipo de monocultivos afecta el modelo de la agricultura familiar y genera cambios en el esquema de producción agrícola, principalmente sobre la pequeña y mediana propiedad rural que ven imposibilitada la realización de sus usos agrarios (Zucarelli, 2007).

Asimismo, refiere Zucarelli que el modelo de monocultivos también se ha visto beneficiado por la práctica de arrendamiento de tierras para la expansión de cultivos de caña, lo que altera los tipos de producción, la disponibilidad de empleos, el flujo migratorio hacia las ciudades, la oferta de alimentos y la posibilidad de demarcación de tierras para procesos de reforma agraria. El autor pone como ejemplo, entre otros, la situación del Mato Grosso do Sul, donde la expansión de la caña se ha realizado sobre áreas dedicadas a la producción de soja, maíz y ganado y ha ocupado áreas consideradas improductivas, con destinación a la reforma agraria, a través de arrendamientos para el cultivo de caña. Dicha situación generó acciones de resistencia por la propiedad y el uso del territorio en dicha zona (Zucarelli, 2007).

Algunos expertos señalan que si bien el auge de estos cultivos también ha puesto en peligro la sabana tropical brasilera, la cual alberga el 5 % de las especies del planeta. Un caso emblemático es el del Cerrado, el cual ha perdido más de 105.000 kilómetros cuadrados de cobertura nativa desde 2008, 50 % más que la deforestación observada en el mismo periodo de tiempo en la Amazonia (el

cual es un bioma tres veces más grande), es decir, la zona del Cerrado está desapareciendo cuatro veces más rápido que la selva tropical.

— *Impacto a comunidades locales*

Los principales impactos a las comunidades locales se dan como consecuencia de la presencia de monocultivos, en el caso de Brasil, primordialmente de caña, la cual se ha relacionado con expulsión de la población rural de sus tierras y cambios en los modelos de producción, desempleo y reducción de la producción de alimentos, que es realizada, en su mayoría, por pequeños y medianos agricultores (Mendonça, 2009), con consecuencias que se verán en los aspectos analizados a continuación.

Sobre las comunidades étnicas, Zucarelli documenta que dichos conflictos por el uso de la tierra se han extendido respecto de aquellas tierras que son de uso para demarcación de tierras indígenas (Zucarelli, 2007).

Resalta también Zucarelli que la creciente producción de la caña ha generado preocupaciones entre las comunidades indígenas, como consecuencia de la expansión de dichos monocultivos en áreas circundantes a sus territorios colectivos y territorios ancestrales junto con los impactos que tiene sobre los mismos (Zucarelli, 2007).

Tal como señala el portal The Conversation, desde principios de la década de 2000, los conflictos por tierras se han intensificado en Brasil, generando incluso casos de genocidios y desplazamiento de comunidades, principalmente de los kaiowá y los guaraníes. Estos conflictos se generan por el crecimiento de la industria agrícola y las porciones de tierra para intensificar esta actividad a nivel industrial y mecanizada, favoreciendo los monocultivos. Esto genera procesos de desplazamiento de las comunidades, como se verá más adelante, el cual se agrava debido a las condiciones de desprotección de las comunidades rurales, la falta de acceso a agua potable, los impactos de la contaminación agroquímica, la falta de condiciones para plantar, cazar o pescar.

Casos similares se dan también en la región del Cerrado y la Amazonía, donde se han presentado cerca de 4785 conflictos relacionados con comunidades indígenas y locales por la expansión de agronegocios en territorios tradicionales.

— *Afectación sobre el recurso hídrico*

Uno de los principales impactos que tiene la industria de los biocombustibles en Brasil, de acuerdo con Vargas Amelin, está relacionado con el etanol y el excesivo consumo de agua que requiere la caña de azúcar. Este recurso no solo se usa para el crecimiento del cultivo, sino también en la limpieza de la caña una vez cosechada y en el enfriamiento de los procesadores. Destaca la precitada autora que este tipo de cultivos no se está dando en zonas donde hay excedentes de agua para satisfacer las necesidades agrícolas. Este uso intensivo de agua se ve reflejado en un descenso en los caudales naturales, afectando los ecosistemas acuáticos, conflictos sociales por la disponibilidad del agua y afectaciones a la recarga natural de los acuíferos (Vargas Amelin, n.d.).

— *Deforestación y pérdida de biodiversidad*

Otro de los impactos que se presentan es la extensión de cultivos a zonas no cultivadas, centradas al noreste de Brasil, genera presión sobre la región amazónica, deforestación y pérdida de la biodiversidad y afectación a ecosistemas con importancia ambiental y socioeconómica para las comunidades locales. Esto, en palabras de Vargas Amelin, puede suponer pérdidas económicas y un coste de oportunidad para otras actividades económicas como la venta de bonos de carbono (Vargas Amelin, n.d.).

4.2.7.3 Procesos de desplazamiento o relocalización de comunidades

Otro de los fenómenos sociales asociados a la extensión de los monocultivos de caña y soja en Brasil es el desplazamiento de los agricultores. Documentan Altieri y Bravo, que en Brasil un cultivo de soja desplaza a once trabajadores de la agricultura por cada trabajador que emplea. Señalan que, desde 1970, cerca de 2,5 millones de personas han sido desplazadas por la producción de soja en el Paraná y cerca de 300 mil en el Río Grande do Sul, lo que tuvo afectación en los bosques primarios de la Amazonia, lugar donde se asentaron dichas personas (Altieri & Bravo, n.d.-b).

A su vez, las grandes extensiones de monocultivos han generado una afectación de la dinámica urbana en las zonas aledañas a estos, como

consecuencia de la demanda por servicios públicos, tales como salud, educación, seguridad, abastecimiento de agua, tratamiento de cloacas, saneamiento básico, habitación, entre otros. Esto pone presión sobre la infraestructura existente a nivel municipal y genera conflictos con las comunidades presentes en dichos lugares como consecuencia del incremento en el costo de vida (Zucarelli, 2007).

4.2.7.4 Condiciones laborales y de seguridad y salud en el trabajo

Una de las principales problemáticas a nivel de la cadena de valor de los biocombustibles en Brasil se da en el eslabón de la producción de materias primas, principalmente de caña de azúcar, donde las condiciones de los trabajadores están por debajo de los mínimos legales.

Refiere Kohlhepp (2010) que las condiciones laborales en muchas plantaciones de caña de azúcar son problemáticas. Los cortadores trabajan a través de contratos temporales, deben cortar una media de 10-12 t/día en São Paulo y 6-15 t/día en Ribeirão Preto; mientras que en los años de 1980 se les exigía de 5 a 8 t/día. Por 12 horas de trabajo/día en una semana de seis días, el pago en São Paulo es de 320 euros/mes, y el salario real por tonelada de caña de azúcar es pequeño.

Al respecto, señala Mendonça, existe un bajo cumplimiento de la legislación de seguridad y salud en el trabajo, esto deriva en casos de intoxicaciones de trabajadores por productos químicos, muerte de trabajadores por inhalación de gases cancerígenos, problemas respiratorios como consecuencia de la quema, la cual libera gas carbónico, ozono, gases de nitrógeno y de azufre (responsables de las lluvias ácidas), además de hollín (que contiene sustancias cancerígenas) (Mendonça, 2009).

4.3 Caso Argentina

Para empezar, se resalta que Argentina es uno de los mayores productores y exportadores de biodiésel basado en el aceite de soja. Las políticas y normas que rigen al sector de los biocombustibles en Argentina se articulan con una estrategia para promover fuentes renovables de energía y reducir la dependencia de los hidrocarburos en el sector del transporte.

Por un lado, la industria del biodiésel cuenta con 36 plantas de producción, tiene una capacidad instalada de 4.5 millones de toneladas por año y con una producción total de 2.5 millones de toneladas, de las cuales exporta el 55 %. Por el otro lado, en relación al etanol, Argentina produce al año 57 millones de toneladas de bioetanol de maíz y 21.5 toneladas de caña de azúcar y cuenta con 19 plantas de producción cuyo destino es el consumo interno.

En Argentina, los biocombustibles en general (biodiésel y bioetanol), vienen impactando directamente en la economía de este país, ya que participan de manera influyente en la sostenibilidad de la matriz energética nacional gracias a la mezcla autorizada con combustibles fósiles, lo que ha permitido, por un lado, mitigar la emisión de los gases efecto invernadero como medida de adaptación al cambio climático y, por otro, impulsar la generación de empleo a nivel general (empleos y oficios).

Para este país el desarrollo industrial y agrícola en torno a los biocombustibles, ha significado la aparición de un nuevo sector de la producción con reales beneficios de triple impacto (social, ambiental y productivo), pero que, además, se abre espacio rápidamente en el mercado de las exportaciones.

De conformidad con los datos del informe “Estado de los biocombustibles líquidos en las Américas”, Argentina es el primer exportador mundial de aceite de soja, el segundo exportador mundial de maíz y cuenta con una importante producción de caña de azúcar y otras materias primas (IICA, 2022, p. 13).

4.3.1 Actores oficiales

De acuerdo con Marín, Stubrin y Kababe (2014), los actores oficiales son:

- La Secretaría de Energía del Ministerio de Economía.
- La Comisión Nacional Asesora para la Promoción de la Producción y Uso Sustentables de los Biocombustibles, creada con la Ley 26.093/2006, en cuyoa rtículo 3º especifica que su “función será la de asistir y asesorar a la autoridad de aplicación. Dicha Comisión estará integrada por un representante de cada uno de los siguientes organismos nacionales: Secretaría de Energía, Secretaría de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentos, Secretaría de

Ambiente y Desarrollo Sustentable, Secretaría de Hacienda, Secretaría de Política Económica, Secretaría de Comercio, Industria y de la Pequeña y Mediana Empresa, Secretaría de Ciencia, Tecnología e Innovación Productiva, y Administración Federal de Ingresos Públicos y todo otro organismo o instituciones públicas o privadas —incluidos los Consejos Federales con competencia en las áreas señaladas— que pueda asegurar el mejor cumplimiento de las funciones asignadas a la autoridad de aplicación y que se determine en la reglamentación de la presente ley".

- La Comisión Especial de Biocombustibles.

4.3.2 Actores privados

La industria de biodiésel en Argentina está compuesta por 24 empresas productoras. En perspectiva internacional, esta puede considerarse relativamente pequeña en términos de la cantidad total de plantas, pero de un tamaño relativamente grande en términos de la producción promedio por planta. Dentro de la industria podemos diferenciar tres tipos de empresas:

- **Las grandes empresas productoras de aceite vegetal.** Se encuentran estratégicamente localizadas cerca de las zonas portuarias, están orientadas al mercado externo (Marín, 2014). Las empresas de este tipo que han establecido plantas de biodiésel son: Vincentin, Louis Dreyfus Commodities Argentina (Dreyfus), Bunge Argentina, Cargill SACI y Molinos Río de La Plata. Algunas de estas empresas también se han aliado a fin de crear empresas mixtas dedicadas exclusivamente a la producción de biodiésel. Tal es el caso de Renova (empresa resultante de la alianza entre Vincentin y Oleaginosa Moreno) y Ecofuel (resultante de la alianza entre AGD y Bunge Argentina).

- **Las grandes empresas independientes.** Estas firmas, a diferencia de las anteriores, adquieren la materia prima en el mercado. Pero, al igual que las anteriores, tienen un gran capital invertido, altos grados de eficiencia en el proceso productivo, tecnología de última generación y orientación al

mercado externo. Ejemplos de este tipo de empresas son: Unitec Bio, Explora, Patagonia Bioenergía y Bioenergía Rosario.

- **Las empresas medianas y pequeñas.** Poseen una capacidad de producción de hasta alrededor de 40 mil toneladas por año, utilizan tecnología de fabricación nacional y están típicamente ubicadas lejos de los puertos. En general, tienen una situación de desventaja con respecto al volumen en comparación con las grandes empresas del sector, pero son flexibles y capaces de obtener productos secundarios, como la glicerina. Algunas de ellas son: Soyenergy, Biomadero, Derivados San Luis, Pitey y Energías Renovables Argentinas. Las empresas más pequeñas de este grupo producen solo para el autoconsumo (Marín, 2014).

Tomando la actividad de biodiésel, en su conjunto pareciera que el crecimiento del negocio de biodiésel en Argentina impacta en los distintos actores que participan de la actividad productiva de manera diferente. Las empresas vinculadas a la producción de aceite vegetal tienen una posición muy fuerte en el mercado (explicando el mayor porcentaje de la producción) dado que (i) poseen los vínculos con el sector agrícola proveedor de la materia prima, (ii) cuentan con canales de comercialización y distribución desarrollados, (iii) tienen experiencia exportadora, y (iv) son líderes mundiales en el campo de la producción de aceite vegetal, el cual se encuentra estrechamente vinculado tecnológicamente a la producción de biodiésel de primera generación. Sin embargo, estas destinan todo (o gran parte) de su producción al mercado externo. Las empresas medianas y pequeñas, en tanto, son más beneficiadas por el incremento en la demanda de biocombustibles en el mercado doméstico (Marín, 2014).

4.3.3 Marco regulatorio y económico

4.3.3.1 Mapa regulatorio de biocombustibles

El Gobierno argentino desempeña un papel relevante en la cadena de biocombustibles. Dentro de las principales normativas específicas relacionadas con el sector de los biocombustibles, está la Ley n.º 27.640 de 2021, mediante la cual se aprueba el marco regulatorio de biocombustibles, el cual comprende todas las actividades de elaboración, almacenaje, comercialización y mezcla de

biocombustibles, con vigencia hasta el 31 de diciembre de 2030. Se destaca que, al ser una ley de año 2021, abarca la totalidad de la regulación argentina, en torno a los biocombustibles.

Por otro lado, en atención a la Resolución 614/2023, la Secretaria de Energía convoca a la presentación de nuevos proyectos o ampliaciones de los ya existentes para la elaboración de bioetanol, combustible elaborado a base de caña de azúcar o de maíz.

El Ministerio de Economía y la Subsecretaría de Hidrocarburos son las entidades encargadas de asistir a la Secretaría de Energía en el ejercicio de sus atribuciones de Autoridad de Aplicación del marco regulatorio del gas y del régimen jurídico de los hidrocarburos y otros combustibles cualquiera sea su origen, e intervenir en las acciones de control y fiscalización de las diversas actividades involucradas. Por otro lado, la Subsecretaría de Energía Eléctrica tiene como objetivo participar en la elaboración de las propuestas sectoriales y de la política nacional en materia de recursos renovables aplicables a la producción de energía eléctrica, así como en el control de su ejecución.

Igualmente, la Secretaría de Energía a través de Resoluciones Generales, establece, en el caso del etanol destinado al consumo interno, cuotas máximas de comercialización.

La Ley n.º 27.640/2021 le confiere al Estado argentino la competencia para determinar las políticas relacionadas con la comercialización de biocombustibles. Por medio de estas se exige que los comerciantes se encuentren debidamente registrados, cumplan con las calidades de mezclas exigidas y respeten las fórmulas implementadas para el cálculo del precio. Además, esta misma ley permite establecer porcentajes de mezcla diferentes y/o tratamientos particulares por región geográfica y/o para periodos o meses del año de consumo y/o tratamientos particulares.

Con la Ley n.º 26.093/2006 se establece el régimen de regulación y promoción para la producción y uso sustentables de los biocombustibles. Esta regulación sobre la comercialización de biocombustibles, tuvo como objetivo que toda la producción de los productores beneficiados bajo el Régimen de Promoción

sea despachada a las plantas mezcladoras en el país para que luego la mezcla sea suministrada al mercado interno.

También a través de la Ley n.º 26.093 se crea la Comisión Nacional Asesora, se habilitan las plantas productoras, se determina el mezclado de biocombustibles con combustibles fósiles, se determinan los sujetos beneficiarios del Régimen Promocional, las infracciones y sus sanciones.

— *Regulación de precios y fórmula para calcular el precio*

Se resalta que una de las funciones de la autoridad de aplicación, según la Ley n.º 26.093 es publicar periódicamente precios de referencia de los biocombustibles.

Por otro lado, mediante la Ley n.º 27.640, en su artículo 13, se estipula la determinación del precio, así: “La adquisición de las cantidades de biodiésel para el cumplimiento de la mezcla obligatoria con gasoil y/o diésel oil, y de los volúmenes de bioetanol comprendidos en los incisos a) y b) del artículo 12 de la presente ley, deberá ser llevada a cabo por las empresas encargadas de las mezclas a los precios que establezca la autoridad de aplicación de acuerdo con las metodologías de cálculo que esta determine para cada uno de los productos en cuestión”.

En Argentina, según Risso (2021), la Secretaría de Energía estableció la siguiente fórmula para el cálculo del precio de un litro de etanol:

$$\$\ litro = 0{,}110 * Precio\ promedio\ litro\ Gasoil + 0{,}104 * Precio\ Hora\ Hombre + 0{,}36 * Precio\ m3\ de\ Gas\ Natural + 0{,}382 * (1 + Var\ \%\ del\ ICC1) * (1{,}313)$$

Las empresas encargadas de llevar a cabo las referidas mezclas obligatorias podrán adquirir libremente biocombustibles para obtener mezclas superiores a las del porcentaje obligatorio vigente, pactando en tal caso el precio y el aprovisionamiento de los productos con las empresas elaboradoras de los mismos, al igual que en los casos en que se lleve a cabo la comercialización de biocombustibles que no tenga por destino la mezcla obligatoria con combustibles fósiles (Marín, 2014).

— *Régimen promocional, sujetos beneficiarios y beneficios promocionales*

Según la Ley n.º 26.093/2006, en su artículo 13 se determinan los sujetos beneficiarios del régimende promoción relacionado con las industrias de biocombustibles. Se resalta a todos aquellos que se instalen en el territorio argentino, sean sociedades comerciales, privadas, públicas o mixtas, o cooperativas, y estén en condiciones de producir biocombustibles.

Por otro lado, el artículo 15 de la citada ley determina los beneficios promocionales así:

a) En lo referente al impuesto al valor agregado y al impuesto a las ganancias, será de aplicación el tratamiento dispensado por la Ley n.º 25.924 y sus normas reglamentarias, a la adquisición de bienes de capital o la realización de obras de infraestructura correspondientes al proyecto respectivo, por el tiempo de vigencia del presente régimen.

b) Los bienes afectados a los proyectos aprobados por la autoridad de aplicación no integrarán la base de imposición del impuesto a la ganancia mínima presunta establecido por la Ley n.º 25.063, o el que en el futuro lo complemente, modifique o sustituya, a partir de la fecha de aprobación del proyecto respectivo y hasta el tercer ejercicio cerrado, inclusive, con posterioridad a la fecha de puesta en marcha.

c) El biodiésel y el bioetanol producidos por los sujetos titulares de los proyectos aprobados por la autoridad de aplicación, para satisfacer las cantidades previstas en los artículos 7º, 8º y 12 de la presente ley, no estarán alcanzados por la tasa de infraestructura hídrica establecida por el Decreto n.º 1381/01, por el impuesto sobre los combustibles líquidos y el gas natural establecido en el capítulo I, título III de la Ley n.º 23.966, texto ordenado en 1998 y sus modificaciones, por el impuesto denominado “Sobre la transferencia a título oneroso o gratuito, o sobre la importación de gasoil”, establecido en la Ley n.º 26.028, así como tampoco por los tributos que en el futuro puedan sustituir o complementar a los mismos.

d) La autoridad de aplicación garantizará que aquellas instalaciones que hayan sido aprobadas para el fin específico de realizar las mezclas deberán adquirir los productos definidos en el artículo 5º a los sujetos promovidos en esta ley hasta agotar su producción disponible a los precios que establezca la mencionada autoridad.

e) La Secretaría de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentos promoverá aquellos cultivos destinados a la producción de biocombustibles que favorezcan la diversificación productiva del sector agropecuario. A tal fin, dicha Secretaría podrá elaborar programas específicos y prever los recursos presupuestarios correspondientes.

f) La Subsecretaría de Pequeña y Mediana Empresa promoverá la adquisición de bienes de capital por parte de las pequeñas y medianas empresas destinados a la producción de biocombustibles. A tal fin elaborará programas específicos que contemplen el equilibrio regional y preverá los recursos presupuestarios correspondientes.

g) La Secretaría de Ciencia, Tecnología e Innovación Productiva promoverá la investigación, cooperación y transferencia de tecnología, entre las pequeñas y medianas empresas y las instituciones pertinentes del Sistema Público Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación. A tal fin elaborará programas específicos y preverá los recursos presupuestarios correspondientes.

— *Normativa y regulaciones en el procesamiento de la materia prima*

Argentina cuenta con un marco regulatorio sólido para el procesamiento de materias primas en la producción de biocombustibles, con dos leyes clave: la Ley n.º 26.093, que establece un régimen de regulación y promoción para la producción y uso sustentables de biocombustibles y la Ley n.º 27.640, la cual es el marco regulatorio de los biocombustibles.

— *Regulaciones establecidas para gestionar adecuadamente el aceite usado*

Por medio de la Resolución 368 de 2019, Argentina autoriza el uso de aceites usados para la producción de combustión de energía de manera sustituta en procesos industriales.

— *Políticas vigentes de mandatos de mezcla*

Todo combustible líquido caracterizado como nafta —en los términos del artículo 4º de la Ley n.º 23.966/1991, título III, de impuesto sobre los combustibles líquidos y el gas natural, texto ordenado en 1998, y sus modificaciones, o en el que prevea la legislación nacional que en el futuro lo reemplace— que se comercialice dentro del territorio argentino, deberá ser mezclado por aquellas instalaciones que hayan sido aprobadas por la autoridad de aplicación para el fin específico de realizar esta mezcla, con la especie de biocombustible denominada “bioetanol”, en un porcentaje del cinco por ciento (5 %) como mínimo de este último, medido sobre la cantidad total del producto final. Esta obligación tendrá vigencia a partir del primer día del cuarto año calendario siguiente al de promulgación de la presente ley.

La autoridad de aplicación tendrá la atribución de aumentar el citado porcentaje, cuando lo considere conveniente en función de la evolución de las variables de mercado interno, o bien disminuir el mismo ante situaciones de escasez fehacientemente comprobadas.

En la Ley n.º 27.640/2021 se establece el régimen de mezcla obligatoria de biocombustibles con combustible fósiles, de la siguiente manera:

- Todo combustible líquido clasificado como gasoil o diésel oil debe contener un porcentaje obligatorio de biodiésel de 5% en volumen sobre la cantidad total del producto final.
- Todo combustible líquido clasificado como nafta debe contener un porcentaje obligatorio de bioetanol de 12% en volumen sobre la cantidad final del producto.

Se resalta que la legislación argentina ha impuesto el uso de biocombustibles en mezcla con combustibles fósiles entre 5 a 10 % en el sector transporte (Pieragostini et al., n.d.).

— *Principales incentivos específicos del sector de los biocombustibles*

Por medio de la Resolución 947/2023 publicada en el Boletín Oficial, se estableció la creación de un programa de financiamiento para el sector de biocombustibles en Argentina, en cumplimiento de la Ley n.º 27.640 que regula dicha industria en el país. Este programa tiene como objetivo proporcionar condiciones financieras ventajosas para la adquisición de los insumos necesarios en la producción de biodiésel destinado a la mezcla obligatoria con el gasoil. La resolución enfatiza la importancia de asegurar un suministro constante de biodiésel con el fin de reducir la dependencia de las importaciones de gasoil y cumplir con los objetivos de desarrollo económico y autoabastecimiento en la industria de hidrocarburos. Además, se reconoce la situación financiera desafiante que afrontan las empresas del sector, y se proponen medidas preventivas destinadas a evitar problemas relacionados con los precios y los cortes obligatorios de biodiésel. Estas acciones se orientan a impulsar la producción y el uso sostenible de biocombustibles alineándose con los objetivos energéticos y económicos del país argentino.

— *Normas específicas que rigen la producción de biocombustibles*

En Argentina, la Ley n.º 26.093 de abril de 2006 se constituye como la piedra basal del marco regulatorio de los biocombustibles, la cual es aplicable a las actividades de producción, mezcla, distribución, comercialización, consumo y autoconsumo de biocombustibles.

Cabe mencionar que, las plantas habilitadas para la producción y mezcla de biocombustibles deben inscribirse en un registro público que funciona en la órbita de la Secretaría de Energía de la Nación. Esta obligación de registro también incluye la obligación de actualizar la información oportunamente presentada con relación a tales plantas.

Además, las empresas involucradas en la producción, mezcla y/o comercialización de biocombustibles están sujetas a abonar la tasa de fiscalización prevista en el artículo 74, inciso b) de la Ley 25.565, actual artículo 83, inciso b) de la Ley n.º 11.672, Complementaria Permanente de Presupuesto (T.O. 2005).

Es preciso mencionar que, la tasa de fiscalización constituye “una tasa de control de calidad de combustibles de hasta tres diez milesimos de pesos ($ 0,0003) por litro comercializado en el mercado interno”. El artículo 9º de la Ley n.º 26.093 aclara que dicha tasa se aplicará para cada litro de biocombustible comercializado tanto en el mercado interno como en el externo.

De otra parte, la Resolución 324/2023 la norma fijó en 307.226 ARS por tonelada el precio de adquisición del biodiésel destinado a su mezcla obligatoria con gasoil para las operaciones correspondientes a mayo de 2023, al tiempo que también determinó un valor de 318.455 ARS para junio de 2023.

— *Normas específicas que rigen el consumo de biocombustibles*

Por medio de la Ley n.º 27.640, en su artículo 17, a los fines de desarrollar la sustitución de importación de combustibles, la autoridad de aplicación, teniendo en cuenta el sector consumidor, podrá establecer porcentajes de mezcla diferentes y/o tratamientos particulares por región geográfica y/o para periodos o meses del año de consumo y/o tratamientos particulares.

— *Normas específicas que rigen la comercialización de biocombustibles*

La citada Ley n.º 27.640 confiere al Estado argentino la competencia para determinar las políticas relacionadas con la comercialización de biocombustibles. Por medio de la autoridad de aplicación, establecerá requisitos y condiciones de comercialización para los volúmenes de biocombustibles, totales o parciales, segmentados por productos, materias primas o regiones productivas.

— *Normas específicas que rigen la regulación de la exportación e importación de biocombustibles*

La regulación de la comercialización internacional de biocombustibles ha estado sujeta a una serie de normativas y resoluciones que han ido cambiando a través del tiempo. Las Resoluciones n.º 125 y n.º 126 son ejemplo de regulaciones que han tenido un impacto directo en la producción agrícola y sus derivados.

Por un lado, la Resolución n.º 125 estableció un sistema de retenciones moviles a las exportaciones de granos como la soja, el maíz y el trigo. Por su parte, la Resolución n.º 126 aumentó los derechos de exportación al biodiésel,

elevándolos del 5 % al 20 %. Sin embargo, el Decreto n.º 1025/2017 deregó esta resolución y fijó los derechos de exportación en un 8 %.

Estas resoluciones, que nacieron en respuesta a un contexto internacional que se presentaba favorable para las actividades primarias (altos precios externos) y podían significar un importante nicho de ingresos para el fisco —ya que la Resolución n.º 125 permitía incrementar las retenciones con el precio de los granos, que entonces se hallaban en pleno auge de crecimiento—, tuvieron destinos disímiles.

— *Plan Nacional de Adaptación y Mitigación al Cambio Climático al 2030*

En Argentina no existe un programa específico de biocombustibles, sin embargo, existe el Plan Nacional de Adaptación y Mitigación al Cambio Climático al 2030, el cual sintetiza las políticas para limitar las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y generar respuestas coordinadas que se adapten a los territorios, ecosistemas, sectores y comunidades vulnerables ante los impactos del cambio climático y en ellas se incluyen los biocombustibles como uno de esos caminos a la mitigación.

Dentro de las líneas estratégicas del plan, se destacan:

- **Transición energética:** promoción de la eficiencia energética y la transición hacia una matriz energética más limpia y resiliente.
- **Transición productiva:** desarrollo de cadenas de valor nacionales, economía circular, gestión del riesgo climático en la planificación productiva e impulso a la innovación de procesos.
- **Movilidad sostenible:** adaptación de la infraestructura y operación del transporte al cambio climático, planificación de la movilidad urbana, eficiencia energética y transición gradual de combustibles fósiles.
- **Territorios sostenibles y resilientes:** fortalecimiento de la sostenibilidad de la vivienda, resiliencia de la infraestructura, prevención de eventos climáticos extremos y mejoras en la gestión de residuos y efluentes.
- **Conservación de la biodiversidad y bienes comunes:** fortalecimiento del papel de los ecosistemas en la mitigación y absorción de GEI,

ordenamiento ambiental del territorio y restauración y conservación de ecosistemas.

- **Gestión sostenible de los sistemas alimentarios y bosques:** promoción de la conservación de suelos, uso sostenible de bosques nativos, diversificación y eficiencia productiva, y gestión de riesgos climáticos en la agricultura, silvicultura y pesca.

Además, el plan incorpora enfoques transversales que abordan cuestiones de género y diversidades, gestión integral del riesgo, salud y una transición laboral justa.

4.3.3.1 Variables económicas en la producción de biocombustibles en Argentina

— *Subsidios en la cadena de biocombustibles*

En Argentina, se han implementado programas de financiamiento para el sector de biocombustibles, como el que se dispone por medio de la Resolución 497/2023, el cual tiene por objeto dar condiciones favorables de financiamiento para la adquisición de insumos para la producción que cumplan con la mezcla obligatoria. A través de este tipo de subsidios, se busca apoyar a los eslabones de la cadena de los biocombustibles al ofrecer opciones de financiamiento que faciliten la producción y el cumplimiento de las regulaciones relacionadas con la mezcla de biocombustibles.

— *Impuestos en la cadena de biocombustibles*

De acuerdo con la Ley n.º 27.640/2021, en su artículo 22, el biodiésel y el bioetanol no estarán gravados por el impuesto a los combustibles líquidos (ICL), ni por el impuesto al dióxido de carbono (ICO2), establecidos en el título III, capítulos I y II, respectivamente, de la Ley n.º 23.966/1991, alcanzando el citado tratamiento a todas sus etapas de producción, distribución y comercialización. En el caso de la mezcla de dichos biocombustibles con combustibles fósiles, el gravamen recaerá solo por el componente de combustible fósil que integre la mezcla. Se destaca que el tratamiento impositivo previsto en el presente artículo regirá hasta la fecha de finalización del régimen, y corresponderá en tanto y en cuanto las materias primas

principales utilizadas en los respectivos procesos productivos sean de origen nacional.

— *Papel del Gobierno en la cadena de los biocombustibles*

El Gobierno argentino desempeña un papel relevante en la cadena de biocombustibles, ya que fomenta la industria de los biocombustibles mediante exenciones impositivas, con un corte obligatorio y un régimen diferenciado de retenciones a la exportación. Existe una importante intervención estatal en la industria de los biocombustibles con prioridad hacia el mercado interno (Mónica Buraschi, Los biocombustibles y la política económica en Argentina, *Revista Latinoamericana de Estudios Socioambientales*, N.° 17, marzo 2015, pp. 131-156, 2015).

— *Papel de sector privado en la cadena de los biocombustibles*

El sector privado desempeña un papel importante en la cadena de biocombustibles participando en la producción de los biocombustibles y desde la banca ofreciendo créditos diferenciales para la investigación tecnológica y la producción de los biocombustibles.

— *Generación de ingresos a nivel nacional*

De acuerdo con las cifras disponibles, el sector de los biocombustibles facturó en el 2018, 2100 millones de dólares, y en el 2017, 3300 millones de dólares, generando un valor agregado anual estimado de alrededor de 400 millones de dólares.

Señala Bisang et al. que el impacto económico en Argentina es más significativo desde el punto de vista sectorial, sobre todo en el caso de las cadenas referidas a la caña de azúcar, el maíz y la soja, donde los biocombustibles participan con valores que van de un 5 % a un 7 % del valor agregado con una fuerte incidencia en el PIB provincial (Bisang et al., 2021).

Según datos recogidos por Hilbert et al. (2012), el complejo sojero argentino es uno de los sectores más dinámicos de la economía del país, generando cerca del 33 % de las divisas por exportaciones (INDEC, 2016), las cuales representan el 30 % del PBI del sector agroindustrial. Destacan dichos autores que el biodiésel

contribuye a la balanza comercial argentina, con un 2 % de las divisas (Bolsa de Comercio de Rosario, 2018), según datos del año 2016. Al respecto, señala Bisang et al. (2021), en materia de exportaciones, que el biodiésel llegó a alcanzar la cifra de los 2 mil millones de dólares, siendo de mil millones de dólares para el año 2019.

— *Generación de empleos*

Con base en datos presentados por las cámaras del sector, infiere Bisang et al. (2021) que la generación de empleo directo oscila entre los 4000 y 5000 puestos de trabajo; mientras que el empleo indirecto e inducido podría aproximarse, en la actualidad, a los 15.000 y 18.000 puestos de trabajo.

Señalan Epifanio y Ernst que la mayoría del empleo directo generado (52 %), se encontraba en plantas medianas y pequeñas, aunque estas representaran menos del 25 % de la producción total. Esto significa que, en Argentina, la cantidad de empleados es inversamente proporcional a la capacidad de producción instalada; las plantas pequeñas tienen el mayor coeficiente de generación de empleos por producto (un empleo cada 825 ton/año de biodiésel), las medianas generan un empleo cada 1192 ton/año y las grandes presentan un mínimo de 4000 ton/año de biodiésel por cada empleo generado (Epifanio & Ernst, 2019).

Ahora bien, cabe resaltar que en el eslabón de producción de la cadena de valor (cultivo de insumos), los trabajadores están más expuestos a la informalidad laboral, a trabajos temporales y a peores condiciones en materia de salud y seguridad en el trabajo. Por su parte, los trabajos industriales y de procesamiento son generalmente formalizados y no son temporales (Epifanio & Ernst, 2019).

4.3.3.2 Contratos en firme

No se encontró información completa y/o consolidada con relación a los contratos mediante los cuales se están comercializando los combustibles alternativos, más allá de unos convenios internacionales con los Estados Unidos para el intercambio de estos.

4.3.4 Aspectos técnicos

4.3.2.1 Descripción de materias primas (pretratamiento, procesamiento, rendimiento, costo)

En la Argentina, el **biodiésel** es producido principalmente a partir del cultivo de soja (*Glycine max*) con una producción anual de 55.3 millones de toneladas de materia prima y principal insumo en la fabricación de este biocombustible, mediante un proceso químico denominado *transesterificación*, a través del cual el aceite se combina con alcohol, y se obtienen ésteres metílicos, es decir biodiésel, una vez que pasan por varias fases que incluyen la separación, la purificación y la estabilización.

La industria del biodiésel ha sido una de las actividades económicas con mejor desempeño relativo durante los últimos años en Argentina, ya que a partir del año 2007 surgió como un sector totalmente nuevo que agregaba un eslabón adicional de valor a la cadena productiva soja/harina y aceite de soja, fortaleciendo el desarrollo productivo del país. Para que ello fuese posible, la capacidad productiva de la industria aceitera se expandió notoriamente desde los años noventa y fundamentalmente a partir del año 2000.

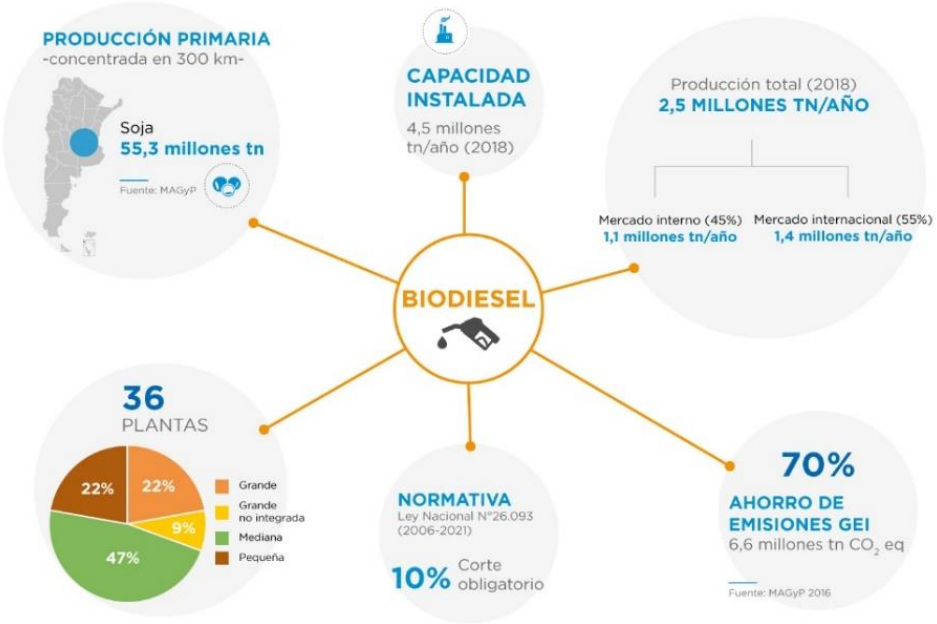


Figura 75. Producción de biodiésel en la Argentina. Tomado de: (Secretaría de Agricultura Ganadería y Pesca. Argentina., 2023)

Asimismo, con relación a la producción de **bioetanol**, este se produce a partir de caña de azúcar (*Sacharum officinarum L.*) con una producción de 21,5 millones de toneladas y de cereales como el maíz (*Zea mays*), con una producción de 57 millones de toneladas y el cual fue incorporado con posterioridad a la caña de azúcar como materia prima en la Argentina.

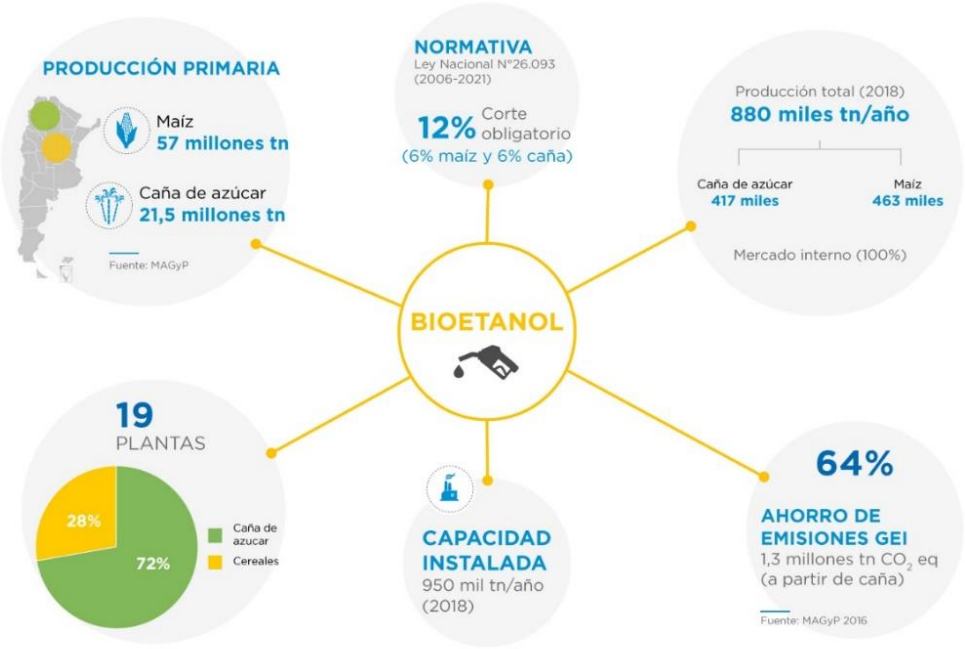


Figura 76. Producción de bioetanol en la Argentina.

Tomado de: tomado de (Secretaría de Agricultura Ganadería y Pesca. Argentina, 2023)

La producción de **bioetanol** a base de caña de azúcar comenzó en el 2008 y tuvo su antecedente a través del Programa Alconafta a fines de los años setenta. La producción de bioetanol a base del procesamiento de maíz se registra a mediados del año 2012, creciendo a ritmo sostenido y llegando a superar, para el año 2014, a la producción a base de caña de azúcar (Donadoni et al., 2017).

De acuerdo al Departamento de Estudios Económicos de la Bolsa de Comercio de Rosario (BCR), la producción argentina de bioetanol en el año 2022 alcanzó los 1,17 millones de metros cúbicos, superior a los 1,01 millones de metros cúbicos de 2021, jalonado por la mayor demanda de combustibles dado al

crecimiento económico registrado en el año 2021; donde el volumen de bioetanol, a partir de maíz, subió 32 % en 2022 a 710.000 m^3, y la producción a base de caña de azúcar se redujo ligeramente a 460.000 m^3 en 2022, consecuencia de la sequía que afectó a partes del país.

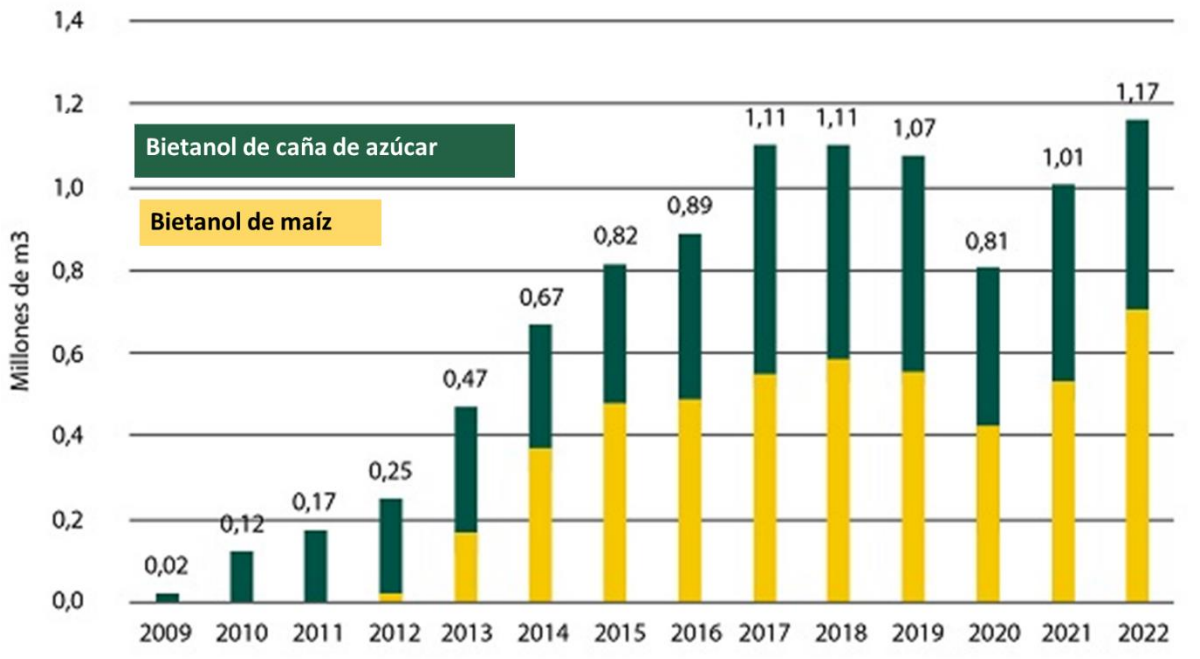


Figura 77. Producción de bioetanol en la Argentina.

Tomado del Departamento de Información y Estudios Económicos en base a la Secretaría de Energía

— *Cultivo de soja*

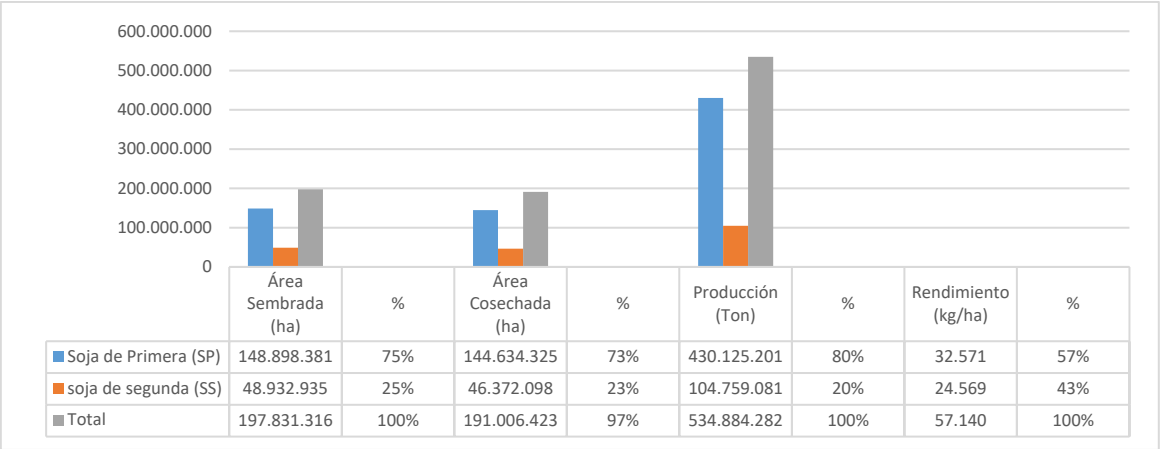
Actualmente, el cultivo de la soja en la Argentina se desarrolla en una amplia franja que se va desde los 23º de latitud norte (en el extremo norte) hasta los 39º de latitud sur (región pampeana argentina).

Con relación a la producción de **biodiésel de primera generación** a partir del aceite de soja, los cultivos con mayor producción se centran en la región del noreste en las provincias de Tucumán, Salta y Santiago del Estero, como en la región de Cuyo, principalmente en la provincia de Mendoza.

El cultivo de **soja** no solo ocupa el primer lugar por el grado de producción, sino por la cantidad de área destinada para su cultivo que representa, aproximadamente 37 millones de hectáreas (el 55 % de las áreas cultivada en el

país), seguida por los cultivos de maíz y trigo que, en conjunto, representan el 26 % del total. Este cultivo es principalmente estival o con siembra durante la primavera durante los meses de octubre a noviembre, se le denomina soja de primera (SP) y en rotaciones posteriores con cultivos de maíz, sorgo o girasol, y cuyo ciclo de crecimiento dura aproximadamente seis (6) meses; y una segunda siembra o denominada soja de segunda (SS), que se realiza en los meses de diciembre a enero, precedido con rotación de cultivo de trigo, que se cosecha pocos días antes de su siembra. Para ambos casos, por lo general, se utiliza un sistema de siembra directa (SD), con el desarrollo de prácticas de fertilización y manejo integrado plagas (Asociación Argentina de Productores en Siembra Directa, 2012), pero que implica un mayor uso de herbicidas comparado con el sistema convencional.

De acuerdo a la Dirección de Estimaciones Agrícolas, del Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca de la Argentina, durante el periodo de 2012 a lo reportado para el 2023, se ha contado con una superficie cultivada de soja de 197.831.316 hectáreas, con un área de cosecha de 191.006.423 hectáreas, correspondientes a una producción neta del 97 %, de las cuales el 75 % (148.898.381 ha), corresponden al cultivo de soja de primera (SP) y de las cuales se cosecharon 144.634.325 hectáreas (73 %), a través del sistema de siembra directa (SD), con las cuales se logró una producción de 430.125.201 toneladas (80 % del total), con un rendimiento de 32.6 toneladas por hectárea, y el restante 25 % (48.932.935 ha) se cultiva mediante el sistema de soja de segunda (SS), de las cuales se cosecharon 46.372.098 hectáreas (23 %), con las cuales se logró una producción de 104.759.081 toneladas (20 % del total) con un rendimiento de 24.6 toneladas por hectárea (véase figura 78).



	Área Sembrada (ha)	%	Área Cosechada (ha)	%	Producción (Ton)	%	Rendimiento (kg/ha)	%
Soja de Primera (SP)	148.898.381	75%	144.634.325	73%	430.125.201	80%	32.571	57%
soja de segunda (SS)	48.932.935	25%	46.372.098	23%	104.759.081	20%	24.569	43%
Total	197.831.316	100%	191.006.423	97%	534.884.282	100%	57.140	100%

Figura 78. Superficie sembrada, cosechada, producción y rendimiento del cultivo de soja para el periodo 2012-2023.

Tomado de: (Dirección Nacional de Agricultura - Dirección de Estimaciones Agrícolas, 2016)

Los cultivos de **soja** de primera (SP), mediante el sistema de siembra directa (SD), en condiciones de secano, se desarrollan principalmente en las provincias Tucumán, Salta, Santiago del Estero, las cuales pertenecen a las regiones de las Yungas (Tucumán) y Chaqueña (Salta y Santiago del Estero). Asimismo, estos cultivos, pero con técnicas de riego por pivote central o por canal discontinuo, se desarrollan principalmente en la provincia de Mendoza, en la región del Monte.

El sistema de riego por pivote central se basa en un sistema automatizado integrado por un brazo regador que gira sobre un punto describiendo un círculo que permite regar hasta 120 hectáreas. Este movimiento de traslación se efectúa por medio de motores eléctricos ubicados en cada torre. Funciona a través de la aplicación de una lluvia controlada, más o menos intensa y uniforme, con el objetivo de que el agua infiltre en el mismo punto donde cae. Entre las principales ventajas del sistema se destacan la uniformidad, la alta eficiencia (ahorro de mano de obra, agua y energía), y la maximización del uso de la tierra.

El sistema de riego por canal discontinuo es una técnica de riego por superficie que requiere de una presurización leve para el correcto manejo de los caudales de agua en los tiempos de aplicación y sus volúmenes. El sistema busca lograr rápidamente un mismo y menor valor posible de la capacidad de infiltración del terreno con el fin de asegurar la aplicación de una lámina de riego uniforme a lo largo y ancho del lote. Las principales ventajas de este sistema es la mayor

eficiencia en el uso del agua (que podría alcanzar hasta un 80 % respecto de un riego tradicional), la baja presión de bombeo que permite ahorrar energía, baja incidencia de la mano de obra, y bajo costo de inversión inicial y de mantenimiento (Di Paola, 2018).

Cada uno de estos esquemas de producción determinará los flujos de entrada y salida al sistema producto: las labores agrícolas, la maquinaria utilizada, el tipo y las dosis de agroquímicos, el consumo de combustible y energía, el consumo de agua, la superficie ocupada (y transformada) de suelo, y las emisiones al ambiente, entre otros (Piastrellini et al., 2016).

4.3.2.2 Tecnologías de producción de biocombustibles en Argentina (características técnicas, costo/beneficio ambiental y rendimiento técnico y energético)

En la Argentina, tanto el biodiésel como el etanol son las tecnologías utilizadas para la producción de biocombustibles. Ambas presentan beneficios ambientales en términos de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero. Sin embargo, es importante tener en cuenta el rendimiento energético y los costos asociados a estas tecnologías para evaluar su viabilidad a largo plazo.

Con base en la investigación adelantada por la Cámara Argentina de Biocombustibles, (CARBIO) y el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria de la Argentina (INTA), en marzo de 2023 fue aprobado el informe sobre los valores de emisiones típicas de gases efecto invernadero (GEI), del cultivo de soja por provincia para la República Argentina. Dicho informe confirmó que el país cumple con todos los estándares de calidad técnica, económica, social y ambiental, situación que le ha permitido a este país darle un mayor impulso a un convenio, inicial por cinco (5) años, de exportación de biocombustibles aplicando programas de apoyo financiero y fomento del uso de la energía renovable.

En este sentido, Jorge Hilbert, uno de los referentes de bioenergía más importantes de Europa, expresó que “Argentina posee la industria de biodiésel más moderna del mundo, que cumple con los estándares de calidad más altos en términos técnicos, económicos y ambientales”. Es una industria articulada

interinstitucionalmente, lo que le asegura una producción certificada y sustentable de biodiésel.

La investigación desarrollada por los argentinos ha permitido conseguir información trazable y certificable sobre las emisiones atmosféricas emitidas por los **cultivos de soja** en cada una de las provincias productoras de la Argentina, incluyendo el volumen de soja producido para la industria y el biodiésel exportado (casi el 100 %), consideradas como zonas homogéneas económicamente NUTS.

En este sentido, se concluyó que del 100 % de las emisiones atmosféricas generadas en la cadena productiva del biodiésel, el 48 % de ellas corresponden a la industria fabricante, el 40 % por las prácticas agrícolas y el 12 % por causa del transporte interno del biodiésel producido y de sus materias primas. Con base en estas conclusiones emitidas por el Jorge Hilbert, Argentina ha logrado acceder a algunos beneficios fiscales de la unión europea, al demostrar una reducción de al menos un 60 % de GEI (utilizando metodologías contempladas en el Estándar Europeo), en este proceso de producción de biodiésel.

En términos de capacidad teórica de molienda de toneladas de soja por día, la Argentina tiene el segundo complejo industrial oleaginoso más importante del mundo (Gran Rosario), muy reconocido por ser un complejo industrial, localizado en una región relativamente pequeña, pero con una gran densidad de grandes fábricas, concentradas a lo largo de 70 km de costa, sobre el río Paraná.

— *Tecnologías utilizadas para la producción del biodiésel*

El biodiésel se produce a partir de aceites vegetales o grasas animales mediante un proceso de transesterificación. En Argentina, se utiliza principalmente como materia prima el aceite de soja, debido a la gran producción nacional de este cultivo.

El proceso de producción del biodiésel implica la extracción del aceite de soja, su refinado y posterior reacción química con alcohol (metanol o etanol) en presencia de un catalizador para obtener el biodiésel y glicerina como subproducto.

El biodiésel tiene varias características técnicas favorables, como ser compatible con los motores diésel convencionales, tener un alto poder calorífico y

producir menos emisiones contaminantes en comparación con el diésel convencional. Sin embargo, su rendimiento energético es menor, ya que la producción de biodiésel requiere energía para los procesos de extracción, refinación y transesterificación.

En cuanto al costo/beneficio ambiental, el biodiésel es considerado una fuente de energía renovable y contribuye a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero, ya que se obtiene a partir de recursos vegetales renovables. Además, su producción promueve el desarrollo de la industria agrícola y genera empleo en el sector.

En Argentina, las principales tecnologías de producción de biodiésel se dividen fundamentalmente en tres tipos:

- **Transesterificación**

Argentina es uno de los principales productores de biodiésel en el mundo y utiliza este proceso, que es el más común en la producción de biodiésel, a partir de aceites vegetales o grasas animales. Como ya se ha anotado, consiste en reaccionar un triglicérido (aceite vegetal) con un alcohol (generalmente metanol) en presencia de un catalizador (como el metóxido de sodio) para obtener ésteres de ácidos grasos, que son los principales componentes del biodiésel.

En Argentina, el proceso de transesterificación se realiza a gran escala en plantas de producción de biodiésel. Estas plantas utilizan tecnología de última generación y cumplen con las estrictas regulaciones ambientales y de calidad existentes en el país para garantizar un producto final seguro y eficiente.

La producción de biodiésel ha experimentado un crecimiento significativo en los últimos años, debido a la disponibilidad de materia prima asequible y a políticas gubernamentales que fomentan su producción y uso como combustible renovable. El biodiésel producido en Argentina se utiliza tanto para consumo interno como para exportación. Según datos del Ministerio de Energía y Minería de Argentina en el año 2018, había alrededor de 40 plantas de transesterificación para la producción de biodiésel en el país.

Estas plantas se encuentran localizadas en diferentes provincias de Argentina, como Buenos Aires, Santa Fe, Entre Ríos, Córdoba, Tucumán, San Juan, y Mendoza, entre otras. Algunas de las 5 principales plantas, son:

- Planta de biodiésel de Campana, Provincia de Buenos Aires.
- Planta de biodiésel de San Lorenzo, Provincia de Santa Fe.
- Planta de biodiésel de Puerto San Martín, Provincia de Santa Fe.
- Planta de biodiésel de Ingeniero White, Provincia de Buenos Aires.
- Planta de biodiésel de Río Cuarto, Provincia de Córdoba.

Estas son solo algunas de las plantas de transesterificación para la producción de biodiésel que existen en Argentina. Cabe destacar que el país ha experimentado un rápido crecimiento en la producción de biodiésel en los últimos años y se espera que el número de plantas continúe aumentando en el futuro.

- **Estolisis**

Esta tecnología utiliza un proceso térmico en lugar de la transesterificación para descomponer los triglicéridos en ácidos grasos libres y glicerina. Los ácidos grasos libres obtenidos pueden ser utilizados directamente como biodiésel o pueden ser sometidos a un proceso adicional para obtener ésteres metílicos o etílicos de ácidos grasos.

Al proceso de esterificación y transesterificación para la producción de biodiésel en Argentina se le conoce como **proceso de estolisis**. Los pasos principales de este proceso son:

- *Pretratamiento del aceite vegetal*: el primer paso es someter el aceite vegetal crudo a un pretratamiento para eliminar impurezas como agua, sólidos y compuestos no glicerídicos.
- *Esterificación*: en esta etapa, el aceite vegetal pretratado se mezcla con un catalizador ácido, como el ácido sulfúrico, y se calienta a una temperatura de alrededor de 60-70 °C. La reacción de esterificación convierte los ácidos grasos libres presentes en el aceite en ésteres metílicos o etílicos, que son más adecuados para la producción de biodiésel.
- *Transesterificación*: en la etapa de transesterificación, los ésteres metílicos o etílicos producidos en la etapa anterior se mezclan con un catalizador

alcalino, como el hidróxido de potasio, y se calientan a una temperatura de alrededor de 60-70 °C durante un tiempo determinado. Durante esta reacción, los ésteres metílicos o etílicos se descomponen en glicerina y biodiésel.

- *Separación de la glicerina*: después de la reacción de transesterificación, se permite que la mezcla se siente para que se separe en dos fases: la fase superior contiene biodiésel y la fase inferior contiene glicerina. La fase de glicerina se retira y se trata posteriormente para obtener glicerina pura como subproducto.
- *Lavado y secado del biodiésel*: la fase de biodiésel se somete a varias etapas de lavado y secado para eliminar cualquier impureza residual y humedad.
- *Purificación del biodiésel*: el biodiésel se somete a un proceso de purificación para eliminar cualquier impureza adicional, como ácidos grasos libres, monoglicéridos y diglicéridos.
- *Almacenamiento y distribución*: finalmente, el biodiésel purificado se almacena y se distribuye para su uso como combustible.

Es importante tener en cuenta que el proceso de estolisis puede variar dependiendo de los equipos e instalaciones utilizados, así como de las condiciones específicas de producción de cada planta de biodiésel. Hasta el año 2020, había alrededor de 29 plantas de estolisis para la producción de biodiésel en Argentina. Una de las más importantes plantas de producción de biodiésel por el proceso de estolisis, está ubicada en la localidad de Puerto General San Martín, en la provincia de Santa Fe. Esta sola planta tiene una capacidad de producción de 330.000 toneladas anuales de biodiésel.

- **Hidrogeneración**

Esta tecnología utiliza hidrógeno para reaccionar con los triglicéridos, convirtiéndolos en hidrocarburos más livianos, que se utilizan como biodiésel renovable. Este proceso es más complejo y costoso que la transesterificación y la estolisis, pero puede producir un biodiésel de muy alta calidad.

La mayoría de las plantas de producción de biodiésel utilizan tecnologías de transesterificación, ya que es la más establecida y rentable. Sin embargo, se espera que la tecnología de hidrogeneración gane relevancia en los próximos años debido a su capacidad para producir un biodiésel renovable de mejor calidad y con propiedades similares al diésel convencional de petróleo, sobre todo al tener en cuenta que el hidrodiésel se puede transferir tecnológicamente en gran escala a los Estados Unidos, con unos resultados altamente competitivos y sobre todo ambientales.

La **hidrogeneración** es un proceso químico que implica la transformación de aceites vegetales o grasas animales en biodiésel a través de la hidrogenación catalítica. Este proceso consta de varias etapas:

- *Pretratamiento*: en esta etapa, se eliminan los residuos sólidos y se purifica el aceite vegetal o la grasa animal mediante filtración y centrifugación. Esto garantiza que el material de alimentación esté libre de impurezas que puedan afectar la eficiencia del proceso.
- *Hidrogenación*: en esta etapa, el aceite o la grasa se mezclan con un catalizador, generalmente a base de níquel o cobalto, y se someten a un proceso de hidrogenación. Durante este proceso, se añade hidrógeno al material de alimentación bajo condiciones de alta presión y temperatura. Esto provoca la reacción química de hidrogenación, en la que los ácidos grasos insaturados presentes en el aceite o la grasa se convierten en ácidos grasos saturados.
- *Separación*: una vez completada la reacción de hidrogenación, la mezcla de reacción se enfría y se separa en dos fases; una fase de glicerina y una fase de ésteres metílicos o ésteres etílicos, que es el biodiésel. La glicerina se utiliza como subproducto en otras aplicaciones industriales.
- *Lavado y refinado*: el biodiésel producido en la etapa anterior contiene impurezas y restos de catalizador. Por lo tanto, se somete a un proceso de lavado y refinado para eliminar estas impurezas. El proceso de lavado se realiza utilizando agua y otros productos químicos, como ácido cítrico, para

eliminar los restos de catalizador. Luego, el biodiésel se somete a un proceso de secado para eliminar cualquier traza de agua residual.

- *Almacenamiento y distribución*: una vez que el biodiésel ha pasado por todas las etapas anteriores y ha alcanzado los estándares de calidad requeridos, se almacena y se distribuye para su uso como combustible renovable en el transporte.

En Argentina entre las más importantes plantas de hidrogeneración para la producción de biodiésel, se encuentran:

- Planta de Cargill en Villa Gobernador Gálvez, Provincia de Santa Fe.
- Planta de Aceitera General Deheza (AGD) en General Deheza, Provincia de Córdoba.
- Planta de Vicentin en San Lorenzo, Provincia de Santa Fe.
- Planta de Renova en Timbúes, Provincia de Santa Fe.
- Planta de Terminal 6 en San Lorenzo, Provincia de Santa Fe.

Es de destacar que el proceso de hidrogeneración para la producción de biodiésel en Argentina está regulado por normativas y estándares de calidad establecidos por el Gobierno y organismos competentes, como el Instituto Argentino de Normalización y Certificación (IRAM) y el Ministerio de Energía y Minería. Estas regulaciones aseguran la calidad del hidrodiésel producido y su compatibilidad con los motores de los vehículos.

— *Tecnologías utilizadas para la producción del bioetanol*

El etanol se obtiene a partir de la fermentación de cultivos ricos en azúcares o almidón, como la caña de azúcar, el maíz o la remolacha azucarera. En Argentina, el cultivo de caña de azúcar es la principal fuente de materia prima para la producción de etanol. El proceso de producción de etanol implica la fermentación del azúcar presente en la caña de azúcar, seguida de la destilación y deshidratación para obtener etanol puro.

El etanol se caracteriza por ser un combustible de alta octanaje, lo que mejora el rendimiento de los motores de combustión interna. Sin embargo, su rendimiento energético es también inferior al de la gasolina convencional, ya que

su proceso de producción también requiere energía para la fermentación, destilación y deshidratación.

En términos de costo/beneficio ambiental, social y productivo, el etanol también es considerado una fuente de energía renovable y ayuda a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. Además, su producción promueve el desarrollo de la industria azucarera y genera empleo en el sector.

Las tecnologías de producción de bioetanol se basan principalmente en dos procesos: la fermentación de biomasa lignocelulósica y la fermentación de caña de azúcar.

En el caso de la fermentación de biomasa lignocelulósica, se utilizan residuos de cultivos como el maíz, trigo, cebada, sorgo, entre otros, así como también residuos de la industria papelera y forestal. Estos materiales se someten a un proceso de pretratamiento que incluye la trituración y la aplicación de enzimas para descomponer la celulosa y la hemicelulosa en azúcares fermentables. Luego, los azúcares son fermentados por levaduras específicas para producir etanol. Este proceso requiere de tecnologías especializadas y de alta eficiencia para optimizar la producción de etanol a partir de estos residuos.

La **fermentación de biomasa lignocelulósica** es una alternativa interesante para generar combustibles renovables y reducir la dependencia de los combustibles fósiles. La biomasa lignocelulósica se compone principalmente de residuos agrícolas, como la paja de trigo, el bagazo de maíz, el tallo de girasol, entre otros.

El proceso de fermentación implica varias etapas:

- *Pretratamiento de la biomasa*: la biomasa lignocelulósica debe someterse a un tratamiento previo para liberar los azúcares presentes en su estructura. Esto suele incluir procesos físicos, químicos o biológicos, como la hidrólisis ácida, la hidrólisis enzimática o la vaporización.
- *Hidrólisis de los azúcares*: una vez pretratada, la biomasa lignocelulósica se somete a un proceso de hidrólisis para convertir los azúcares en azúcares simples, como la glucosa. Algunos de los métodos más comunes incluyen el uso de enzimas o ácidos diluidos.

- *Fermentación:* los azúcares producidos en la etapa anterior se fermentan utilizando microorganismos, generalmente levaduras, que los convierten en etanol. Este proceso puede llevarse a cabo en condiciones aeróbicas o anaeróbicas, dependiendo del tipo de microorganismo utilizado.
- *Destilación y purificación:* el etanol producido en la fermentación se destila y purifica para obtener un producto final de alta concentración y calidad.

En Argentina, la producción de bioetanol a partir de biomasa lignocelulósica se encuentra en etapas iniciales de desarrollo. Sin embargo, el país cuenta con una importante cantidad de biomasa lignocelulósica disponible, lo que representa una gran oportunidad para su aprovechamiento como fuente de energía renovable.

El bioetanol producido a partir de biomasa lignocelulósica tiene varias ventajas, como su capacidad para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, su origen renovable y su potencial para impulsar el desarrollo rural al aprovechar residuos agrícolas. Sin embargo, también existen desafíos para su implementación a gran escala, como el alto coste de los procesos y la necesidad de desarrollar tecnologías más eficientes y económicas. Existen varias plantas de fermentación de biomasa lignocelulósica para la producción de bioetanol. A continuación, se detallan algunas de ellas:

- Planta de bioetanol de segunda generación en Baradero: esta planta, ubicada en la Provincia de Buenos Aires, es operada por la empresa Bioceres y tiene una capacidad de producción de 7 millones de litros de bioetanol anual. Utiliza como materia prima residuos agrícolas y forestales.
- Planta de bioetanol en San Lorenzo: esta planta, también operada por Bioceres, se encuentra en la Provincia de Santa Fe. Tiene una capacidad de producción de 5 millones de litros de bioetanol anual y utiliza como materia prima residuos de la industria agropecuaria.
- Planta de bioetanol en Río Cuarto: esta planta, operada por la empresa ECOCOS, está ubicada en la provincia de Córdoba. Tiene una capacidad de producción de 4 millones de litros de bioetanol anual y utiliza como materia prima biomasa de residuos agrícolas y forestales.

Por otro lado, la **fermentación de caña de azúcar** es la tecnología más utilizada en Argentina. La caña de azúcar se somete a un proceso de molienda para extraer el jugo rico en azúcares fermentables. Luego, el jugo es fermentado por levaduras que convierten los azúcares en etanol. A continuación, se realiza una destilación para purificar el etanol y obtener un producto de alta calidad. Este proceso es más sencillo y menos costoso que la fermentación de biomasa lignocelulósica, pero depende de la disponibilidad y precio de la caña de azúcar.

La fermentación de caña de azúcar para la producción de bioetanol es una actividad importante en Argentina. El país es el tercer mayor productor de bioetanol en el mundo, y gran parte de este se obtiene a través de la fermentación de la caña de azúcar. Además, la producción de bioetanol a partir de la caña de azúcar se utiliza principalmente como biocombustible para mezclar con gasolina, con el objetivo de reducir la dependencia del país de los combustibles fósiles y disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero, ayudando a reducir la contaminación ambiental y contribuye a la producción sostenible de energía. Otro de los resultados positovos es que ha impulsado el desarrollo de la industria azucarera, generando empleo en las regiones productoras de caña de azúcar.

El país argentino cuenta con un total de nueve plantas de fermentación de caña de azúcar para la producción de bioetanol. Estas plantas se encuentran ubicadas en las siguientes provincias:

- Tucumán: La Concepción, Lules, Famaillá, San Miguel de Tucumán y Río Grande.
- Salta: San Martín, Campo Santo y Las Higueras.
- Jujuy: San Pedro.

El porcentaje de mezcla para el bioetanol ha producido que el corte en maíz para la producción de bioetanol continué creciendo con muy buena proyección, también debido a la caída de producción de la caña de azúcar por falta de materia prima por temas de sequía, cubierta con el aumento de la producción de bioetanol de maíz (figura 79).

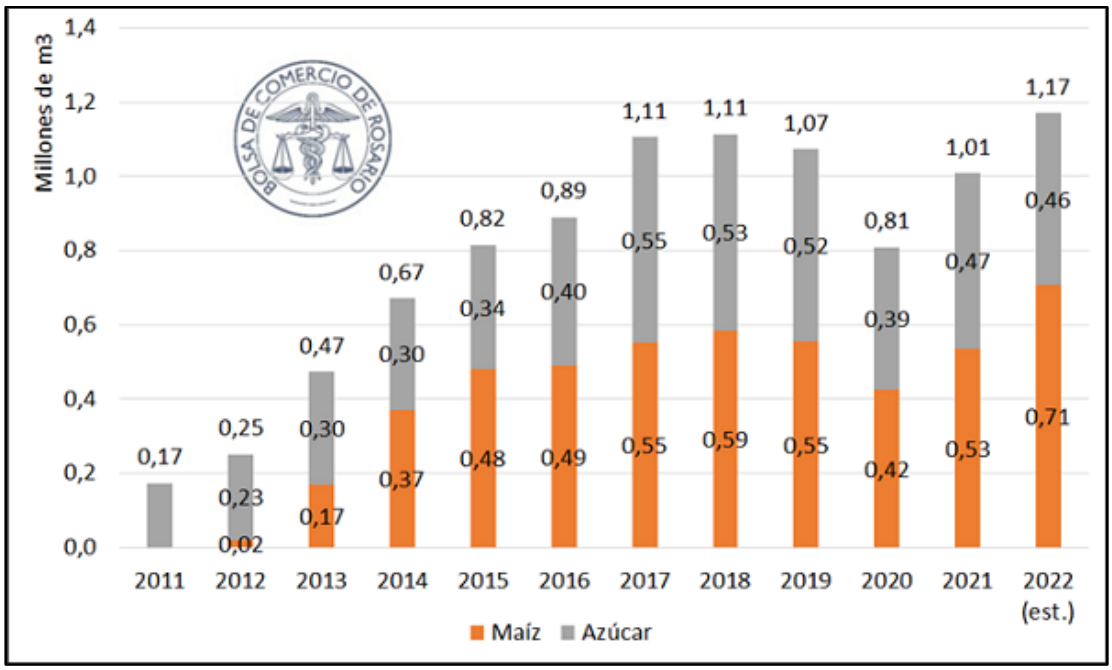


Figura 79 Producción de bioetanol en Argentina a base de maíz y caña de Azúcar a 2022

De acuerdo con la gráfica, el bioetanol de maíz viene ganado peso en la producción de Bioetanol argentino y se espera que el bioetanol a base de caña de azúcar se recupere y aumente la producción.

En concordancia con todo lo anterior, se puede afirmar que ambas tecnologías son utilizadas en Argentina para producir bioetanol utilizado como aditivo en combustibles fósiles, principalmente en la industria del transporte. El país se ha convertido en uno de los principales productores y exportadores de bioetanol en América Latina, gracias a su alto potencial agrícola y a las políticas gubernamentales que promueven su producción y uso como parte de una estrategia de desarrollo sostenible y reducción de emisiones de gases de efecto invernadero.

4.3.2.3 Implicaciones de carácter agrario

Como un antecedente para el caso de la Argentina, es de mencionarse el conflicto agrario de 2008, el cual se trató de una confrontación entre los productores agropecuarios de la región pampeana y el Gobierno Nacional por el intento de parte de este último de aplicar un nuevo esquema de retenciones móviles a las exportaciones de soja, trigo, maíz, girasol y sus subproductos. El origen del

conflicto fue el anuncio del cambio en los derechos de exportación en la Argentina denominados comúnmente retenciones agropecuarias por parte del ministro de Economía a través de la Resolución n.º 125/2008 que establecía un sistema de movilidad de las alícuotas que se iban a ajustar según la variación de los precios internacionales (Barsky & Dávila, 2008)

Este tipo de conflictos en la Argentina tienen como explicación común la profundidad de la inserción del agro pampeano en la economía nacional, en la medida que se trata de un sector económico decisivo para la generación de divisas a través de exportaciones, el aporte de recursos fiscales para el Estado y la provisión de alimentos para el mercado interno, determinando en gran medida el nivel de salarios y, en consecuencia, afectando los índices inflacionarios. De esta forma, el agro pampeano motivó dos tipos de conflictos. Los que tienen que ver con el costo de los alimentos en el mercado interno en relación a las oscilaciones internacionales de los precios, contraponiendo claramente los intereses de los consumidores con los de los productores agropecuarios, y los que enfrentan a los productores con el Estado nacional en función de la captura de los excedentes que éste procura vía impuestos (Barsky & Dávila, 2008)

Los cambios tecnológicos experimentados por la actividad agropecuaria y su creciente integración con complejos agroindustriales han permitido generar un considerable aumento de la producción total a través de la expansión de la superficie agrícola como del aumento de la productividad y de las cantidades exportadas, convirtiendo al sector agropecuario pampeano en un sector estratégicamente decisivo tanto en la provisión de divisas y de recursos fiscales, así como en la generación de empleo y alimentos (Barsky & Dávila, 2008).

Desde el punto de vista de la estructura agraria, la distribución de la tierra en la Argentina no es en absoluto equitativa, donde el 2 % de las explotaciones agropecuarias controlan el 50 % de la tierra en el país, mientras que el 57 % de las explotaciones agropecuarias controlan el 3 % de la tierra. Al respecto, es de considerarse que existen explotaciones de más de 5000 hectáreas que son minifundios en algunas áreas del país, frente a explotaciones de menos de 25 hectáreas que tienen un elevado nivel de capitalización y desarrollo (Sili, 2011).

Desde el punto de vista de la tenencia de la tierra, la mayor proporción de tipos de tenencia corresponde a la propiedad personal con el 75 % del total. El arrendamiento es muy significativo con el 12 % de la superficie; en tercer lugar, las sucesiones indivisas constituyen, asimismo, un porcentaje importante. Las aparcerías, los contratos accidentales, las ocupaciones con permiso y las ocupaciones de hecho suman en conjunto un 7 % de la superficie. En este sentido, existe una alta proporción de tierras y de productores con situaciones muy precarias e informales en la tenencia de tierra. En un total de 173 millones de hectáreas, el 12 % padece situaciones precarias de tenencia, si consideramos como precarias las sucesiones indivisas, los contratos accidentales o la ocupación con permiso y de hecho. Las cifras globales de tenencia irregular (22 millones de hectáreas) no son relevantes en términos de superficie, pero sí constituyen un problema muy serio teniendo en cuenta que aproximadamente el 85 % de esas situaciones de tenencias irregulares afecta a pequeños agricultores que no tienen posibilidad de alcanzar la titularidad de las tierras que trabajan, en muchos casos después de décadas de ocupación por varias generaciones familiares (Sili, 2011).

Asimismo, un tema crítico es el descenso porcentual y absoluto de los bosques naturales, especialmente en toda la franja chaqueña, en la diagonal árida y en la Provincia de Misiones, que tiene que ver con el reemplazo del bosque por cultivos anuales, especialmente de soja y girasol, y por nuevos bosques introducidos (Sili, 2011).

4.3.2.4 Estrategias de recolección, tratamiento y transporte de materias primas (experiencia y gestión en aprovechamiento de UCO)

La recolección del aceite de cocina usado (UCO) se realiza de forma directa, desde un generador residencial, gastronómico o industrial, a través de un punto limpio o un centro de acopio regional, almacenado en contenedores y transportado, preferiblemente, antes de 60 días, a las plantas industriales para su posterior tratamiento.

Por lo general, los generadores residenciales aportan los envases de recolección, pero para generadores gastronómicos o industriales, las empresas les proveen de contenedores apropiados para la correcta disposición, sin costo y en

función de los volúmenes de producción y concertación de la frecuencia de recolección.

Dentro de la trazabilidad del proceso para el aprovechamiento del aceite de cocina usado (UCO), desde la recolección hasta la disposición final del residuo, se tienen en cuenta los siguientes pasos:

- La confección del manifiesto de recolección.
- La descarga del UCO en planta es controlada contrastándola con la información de los manifiestos.
- En planta, la trazabilidad del UCO recolectado y el UCO procesado resultante, se realiza a través de un sistema de balance de masas.

Asimismo, es de considerarse que todo generador de aceite de cocina usado (UCO) es responsable por la correcta disposición de este residuo y en algunas jurisdicciones, como en el Distrito de Buenos Aires, se tiene la obligación de inscribirse en un registro de generadores y utilizar los servicios de transporte y operación de empresas debidamente autorizadas para la disposición de UCO, con sanciones por incumplimiento que van desde multas a clausuras de locales.

Para el tratamiento del aceite de cocina usado (UCO), se realizan análisis y la verificación de su calidad previos a la descarga y almacenamiento en tanques especiales, para posteriormente ingresar a la planta donde sufre distintos procesos: de bombeo, centrifugado, conversión, absorción, dosificación y mezcla para finalmente analizarse en laboratorio y concluir así el proceso de tratamiento, para ser utilizado en la producción de bioenergía de segunda generación.

4.3.2.5 Porcentaje de mezclas de biocombustibles

La ley argentina sobre biocombustibles (Ley n.º 26.093/2006) estableció entre 2006 y 2010 una mezcla mandataria de biodiésel en diésel de 5 % y bioetanol en gasolina de 5 %. Desde 2016, la política estableció 10 % de biodiésel en diésel y 12 % de bioetanol en gasolina. También establece incentivos tributarios para productores de estos biocombustibles únicamente en uso doméstico (Das, 2020).

En agosto de 2021, la ley de biocombustibles de Argentina, aprobó los porcentajes de mezclas, cuyo mandato actual corresponde al 7,5 % de biodiésel y el 12 % para el bioetanol.

En la tabla 21, se resumen los mandatos para los principales biocombustibles en Argentina.

— *Ensayos de durabilidad B20*

Se llevaron a cabo ensayos de mezclas al 20 % de biodiésel en gasoil B20 en motores diésel de amplia difusión, con el asesoramiento de prestigiosos técnicos e instituciones del ámbito automotor (Caso Oreste Berta S. A.). Estas pruebas de factibilidad del B20 consistieron en el rodaje en bancos de pruebas sometiendo al motor a diferentes tipos de cargas y regímenes de rpm, representativos de condiciones de durabilidad para este tipo de pruebas, demostrando la factibilidad técnica del uso de mezclas superiores al 10 % tanto en transporte general como maquinaria.

Ante esto, en la mirada de las cámaras empresarias del sector, se propone que más allá del corte obligatorio del 7,5 %, las empresas mezcladoras puedan usar biodiésel hasta un máximo del 20 %.

Las empresas argentinas, encargadas de llevar a cabo las mezclas obligatorias, deberían poder adquirir libremente ese adicional de biodiésel, pactando en tal caso el precio y el aprovisionamiento de los productos con cualquiera de las empresas productoras de biodiésel registradas en Argentina. Todo esto para asegurar el abastecimiento en las mejores condiciones posibles de calidad y precio para el consumidor.

4.3.2.6 Requerimientos energéticos y tasa de retorno energético

Argentina realizó un estudio de análisis de ciclo de vida en la obtención de bioenergía a partir de biomasa herbácea lignocelulósica comparando escenarios usuales (BAU) con escenarios alternativos (ASp y ASh). En los escenarios usuales (BAU) existen pérdidas energéticas netas, es decir, la entrada energética es mayor que las salidas energéticas en los procesos productivos. Mientras que, en los escenarios de energías renovables (los escenarios alternativos), el EROI se incrementa a 4 y 15, respectivamente (Jozami et al., 2022).

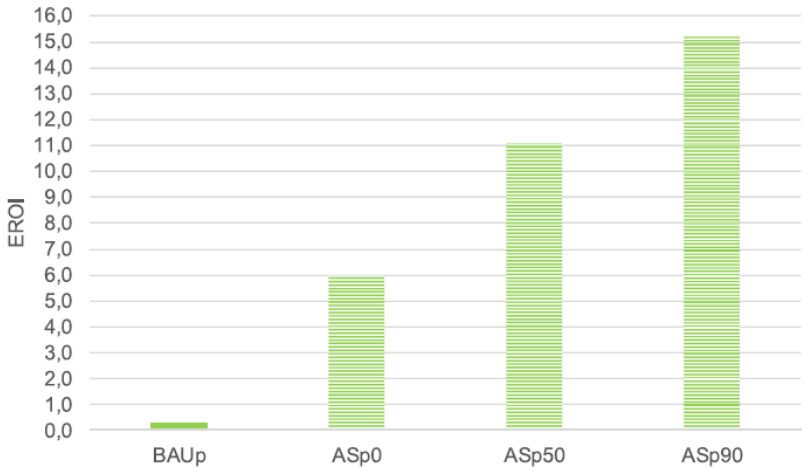


Figura 80. EROI para ASp y BAUp

Tomado de: (Jozami et al., n.d.)

Esto implica, por ejemplo, para el escenario ASh que por cada MJ invertido, se generan 4 MJ al emplear *S. argentinensis* como materia prima. Que es inverso a los escenarios BAU (a base de combustibles fósiles) en los que por cada MJ producido, se requieren de 1 a 3 MJ invertidos (Jozami et al., 2022).

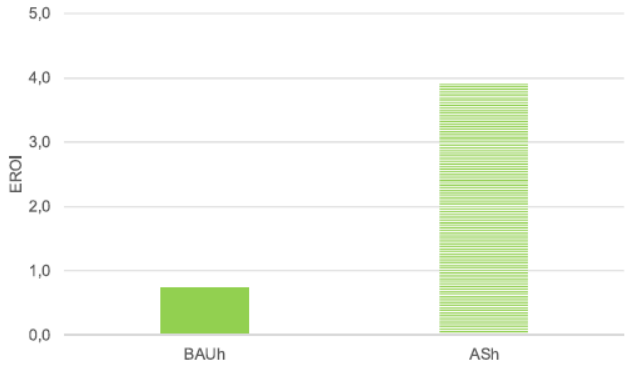


Figura 81. EROI para ASh y BAUh

Tomado de: (Jozami et al., n.d.)

De otro lado, el estudio de Piastrellini et al. (2017), evalúa el análisis de ciclo de vida energético para el biodiésel a partir de soja enfocado en la labranza y el manejo del agua. Cada esquema agrícola requiere diferentes insumos, necesidades de transporte y maquinaria, en consecuencia, el EROI es diferente (Piastrellini, 2016):

- 1,77 para la siembra directa temprana.

- 3,10 para la siembra directa tardía.
- 1,86 para la siembra directa de regadío.
- 2,83 para la labranza temprana.

La contribución relativa para cada entrada y salida en términos energéticos se resume en la Figura 82 (Piastrellini, 2016):

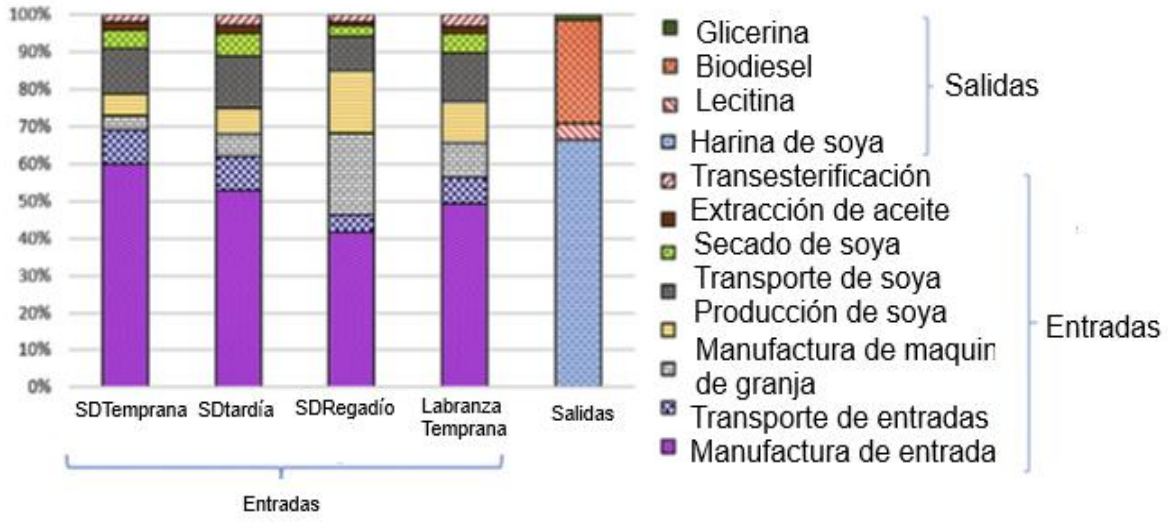


Figura 82. Contribuciones energéticas de entradas y salidas al EROI en la producción de biodiésel a partir de soja en Argentina

Tomado de: (Piastrellini, 2016)

La mayor cantidad de energía se consume durante la producción de las entradas (40-60 % del total). En relación con las salidas energéticas, el 72 % se relaciona con los coproductos. Su estudio también realiza un análisis de sensibilidad para determinar el efecto del origen de los agroquímicos e industria química empleados en el sistema sobre el EROI. Para ello analiza tres escenarios, el primero sobre entradas domésticas y de importación, involucra las distancias reales de transporte de los productos importados; el segundo se centra en los productos agrícolas e industriales de origen argentino; y, el tercero, que ignora el efecto del uso de estos agroquímicos y químicos industriales. De acuerdo con la figura 84, la energía incorporada al metanol, glifosato y fertilizantes corresponde el 52 % de la energía consumida en la producción de biodiésel. Por lo tanto,

descartar el uso de productos químicos de los límites del sistema incrementa el EROI (entre un 66 y 135 %, dependiendo del tipo de labranza).

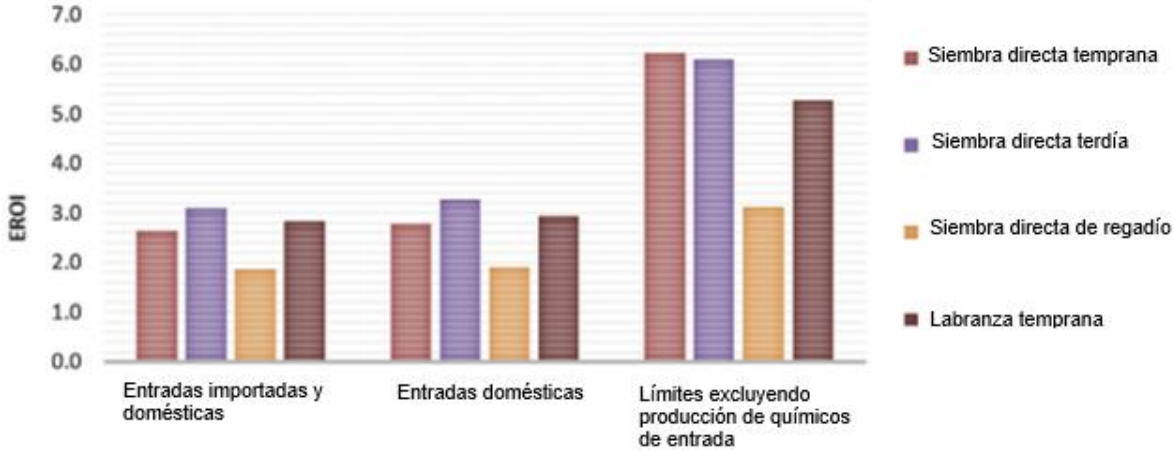


Figura 83. EROI para biodiésel a partir de soja usando diferentes sistemas de frontera

Tomado de: (Piastrellini, 2016)

Por otro aldo, recordamos que de acuerdo con la figura 40, el consumo per cápita promedio en Argentina para los años 2017 a 2021 fue de 79,64 MMBtu/persona, mientras que el PIB energético promedio fue de 4,3 1000 Btu/2015$ PIB PPP (véase figura 41).

En el Anexo A, Indicadores energéticos, se encuentran algunos indicadores energéticos de interés para el desarrollo de biocombustibles en diferentes países, entre ellos los seleccionados para el presente estudio. Es importante resaltar que la tasa de retorno energético (EROI) debe ser superior a la unidad y que es mayor para los combustibles fósiles. Esto indica que la energía requerida por el sistema es menor que la energía liberada por el mismo.

De otro lado, en el anexo B, Requerimientos energéticos por etapa de la cadena de suministro de biocombustibles, se encuentran los requerimientos energéticos para el proceso agrícola, el pretratamiento de materias primas, procesamiento de precursores y transporte en la obtención de biocombustibles como el biodiésel, bioetanol, biogás y biojet para diferentes países. Los diferentes autores concuerdan en que la fase agrícola es aquella en la que se requiere mayor cantidad de energía.

4.3.5 Cadenas de suministros

4.3.5.1 Cadena de suministro del biodiésel

A continuación, en la Figura 84, se describe la cadena de valor para la producción de biodiésel y sus principales variables, con lo cual podemos definir capacidad de producción, capacidad de exportación y definición de esquema logístico para el uso de los biocombustibles.

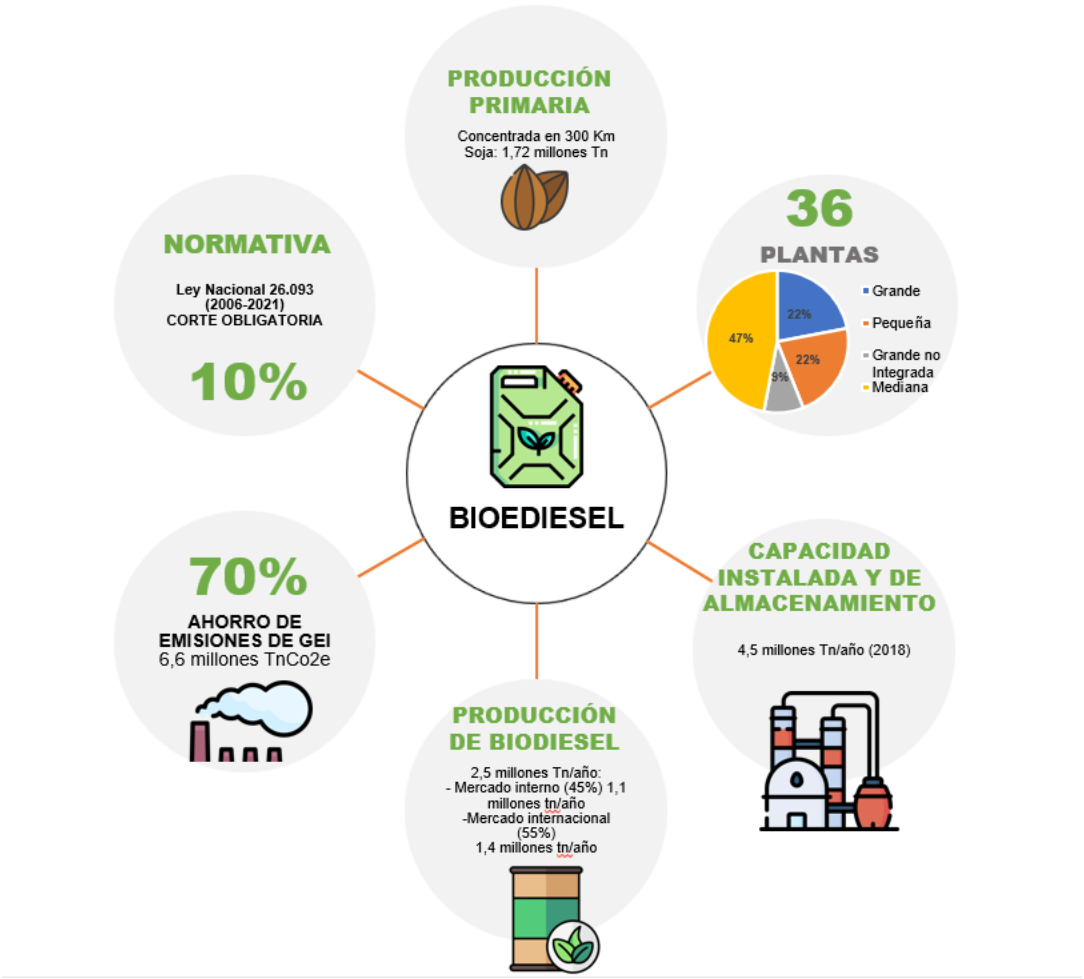


Figura 84. Cadena de valor del biodiésel en Argentina

Adaptado de: Secretaria Agricultura, Ganadería y Pesca

— *Producción primaria*

Actualmente, se tiene una producción de 1,72 millones de toneladas de soja, las cuales son producidas principalmente en el norte de Argentina por las condiciones climáticas apropiadas para este cultivo.

— *Almacenamiento y transporte hasta las plantas de procesamiento*

Luego de su producción en las fincas, se transporta en camión hasta el silo, allí se almacena y se condiciona para luego ser transporta hasta las plantas.

La totalidad de la actividad industrial y portuaria se localiza en la Provincia de Santa Fe, por lo que las plantas procesadoras se aprovisionan de soja en un radio de menos de 300 km. El 80 % del transporte de granos se realiza en camión y el restante se da en ferrocarril. Para distancias inferiores a 300 km, el transporte más adecuado es el camión; para recorridos superiores se hace uso del ferrocarril (Dirección Nacional de Alimentos, n.d.).

— *Plantas de procesamiento*

La materia prima es transportada e introducida en el complejo aceitero, allí se extrae el aceite de soja y se genera un proceso de transesterificación, el producto se purifica y se estabiliza para obtener el biodiésel. Las distancias entre las plantas de producción y las terminales de distribución son uno de los mayores retos ya que no se cuenta con una red de ferrocarril y un sistema de oleoductos. Sin embargo, se cuentan con otras plantas en donde la producción agrícola y el procesamiento se encuentran en el mismo sitio.

Actualmente, Argentina cuenta con una distribución de plantas productoras distinguidas por el nivel de producción alcanzado: grandes integradas o no integradas, medianas y pequeñas.

- **Grandes integradas:** estas incluyen todas las plantas con una producción superior a 100 mil toneladas por año con capacidad para producir granos y aceite de soja. Estas empresas tienen posicionamientos estratégicos en términos de logística, económicos, acceso a los puertos más importantes y la distribución internacional que manejan (Organización Internacional del Trabajo [OIT], 2019).
- **Grandes no integradas:** estas incluyen todas las plantas con una producción superior a 100 mil toneladas, sin embargo, la diferencia radica en que reciben el aceite de soja de proveedores externos. Adicionalmente,

en estas industrias están adelantando estudios para la implementación de biocombustibles de segunda y tercera generación.

- **Medianas y pequeñas:** en este grupo se encuentran todas las plantas que generan entre 30 mil y 50 mil toneladas anuales (medianas) y menos de 30 mil (pequeñas). En estas encontramos que el biodiésel es distribuido dentro del territorio nacional ya que no cuentan con el acceso a las redes de distribución internacional, a financiamientos, ni materia prima.

De acuerdo, a los datos suministrados en la página del Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca, para el total de productores se tiene una capacidad instalada y de almacenamiento de 4,5 millones de tonelada-año.

El 85 % de las instalaciones están ubicadas en la Provincia de Santa Fe, específicamente en las ciudades de Puerto General San Martín, San Lorenzo y Rosario. Estas ciudades constituyen el principal polo aceitero de Argentina, con infraestructura específicamente diseñada para la exportación a través de la hidrovía Paraná-Uruguay. Debido a esta concentración, la distancia promedio desde la zona de producción hasta el puerto de embarque es de aproximadamente 300 kilómetros. Además, al utilizar puertos privados construidos en terrenos de plantas de aceite y biodiésel y equipados con instalaciones naturales para el transporte, se puede reducir el consumo de energía y la mano de obra del transporte de carga (Cámara Argentina de Biocombustibles, n.d.).

Según la Secretaria de Agricultura, Ganadería y Pesca, actualmente, Argentina cuenta con 36 plantas para la transformación de biodiésel (véase figura 85).

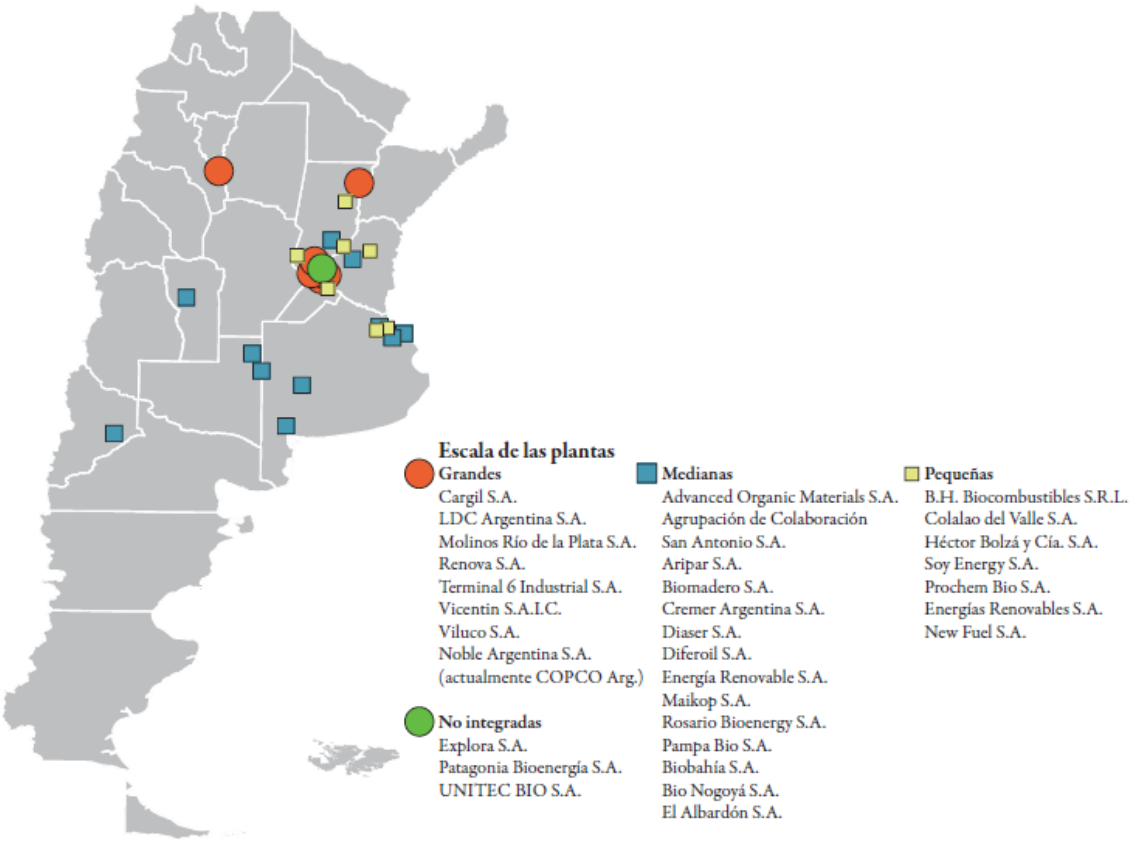


Figura 85. Localización de plantas de biodiésel

Tomado de: (Organización Internacional del Trabajo (OIT), 2019)

Adicionalmente a la producción del biodiésel, a partir de la soja se obtiene: aceite, concentrados y harinas proteínicas. Es necesario considerar, en términos generales, que de la soja se aprovecha un 77 % como harinas para alimentación animal con un elevado aporte proteico, por lo que la proporción destinada a la producción de biodiésel es la menor, representando hoy en la Argentina solo un 15 % del volumen de producción de aceite de soja.

— *Producción y comercialización*

La industria petrolera compra y mezcla el biodiésel nacional con el gasoil. Distribuyendo un 55 % a exportación (1,4 millones de toneladas) y un 45 % para uso nacional (1,1 millones de toneladas) (Organización Internacional del Trabajo [OIT], 2019).

— *Ventas y exportación*

Argentina actualmente realiza un proceso de venta nacional y exportación del biodiésel. Desde el año 2011, se ha establecido una capacidad ociosa o proyección que varía entre el 52 y 61 %, para lo cual solo para el año 2020 se superó en cifras, en un 72 %, siendo el año de menor ventas y en exportación de biodiésel, alcanzando una producción de 0,48 y 0,60 millones de toneladas, respectivamente, esto debido principalmente a la contingencia presentada a nivel mundial por el COVID-19. Desde ese año, se han incrementado las ventas y exportación, para el año 2022 se tuvieron ventas nacionales de 0,73 millones de toneladas y 1,25 millones de toneladas de exportación (datos obtenidos de D'Angelo & Calzada, n.d.).

El río Paraná es la principal vía de salida de las exportaciones de oleaginosas del país en buques tipo Panamax (Comunelli & Del Canto, n.d.; Gauthier & Placci, n.d.).

Las exportaciones que realizó Argentina de biodiésel para el año 2022 fueron:

- Países Bajos: 1.206.540 toneladas (1.789.366.585 USD)
- Bélgica: 29.640 toneladas (42.563.040 USD)
- China: 21 toneladas (33.947 USD)
- Taiwán: 209 toneladas (332.135 USD)

Argentina no realiza importaciones.

Asimismo, las principales empresas que producen biodiésel y su producción anual son las establecidas en la tabla 52:

Tabla 52.Cantidad de biodiésel producido por empresa

Empresa	Biodiésel (toneladas)
Ypf S.A.	638.147
Shell Cap S.A.	143.368
Oil Combustibles S.A.	54.001
Petrobras Argentina S.A.	50.990
AXION (ex ESSO)	118
Dapsa	25
Refineria del Norte S.A.	16.386

Fuente: (Comunelli & Del Canto, n.d.)

El biodiésel se utiliza en su mayoría para el sector automotriz, distribuido en las estaciones de servicio del país.

Las estadísticas en Argentina auguran que el negocio del biodiésel, como un importante producto para colocar en los mercados internacionales, presenta una proyección que aún no ha determinado sus límites (figura 86).

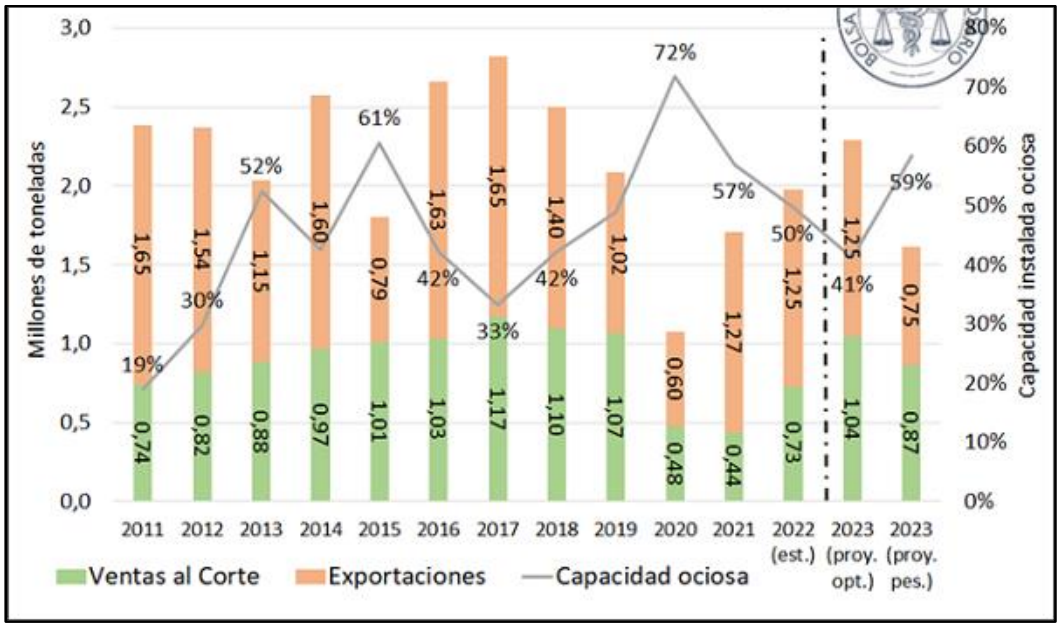


Figura 86. Biodiésel en Argentina. Ventas al corte y exportaciones, 2023

Fuente: (D'Angelo & Calzada , 2022)

— *Aceite de cocina usado*

El Programa Nacional de Recuperación de Aceites Vegetales Usados, dispuesto desde al año 2022 por los diputados de Argentina, promueve a los gobiernos locales a implementar con participación pública o privada la recuperación de aceites usados tanto de la actividad industrial, comercial como domiciliaria (Diputados Argentina, 2022).

Este establece: “concientizar e instar a participar a los ciudadanos en la gestión ambientalmente adecuada de los aceites vegetales usados, a fin de mejorar la calidad de vida y el medio ambiente a través de programas de difusión y de educación en la materia, particularmente destinadas a generadores domiciliarios” (Diputados Argentina, 2022).

Así que por medio de esta ley se crea la RBA Ambiental, una empresa recolectora de aceite de cocina usado de pequeños, medianos y grandes gastronómicos e industriales. Se debe realizar una inscripción de la empresa y la RBA Ambiental establece la frecuencia y cantidad de contenedores para realizar la gestión. Se establecen unos puntos limpios y centros de acopio primario disponibles en cada municipio, y allí pasan las flotas de camiones. También se realiza la recolección en centros de acopio regionales, como organismos públicos, empresas, ONG o instituciones sin fines de lucro. De igual manera, hay una página web que ofrece la localización de los puntos más cercanos de recolección de acuerdo al consultante (RBA Ambiental, 2023).

4.3.5.2 Cadena de suministro del bioetanol

A continuación, en la Figura 87, se describe la cadena de valor para la producción de bioetanol y sus principales variables, con lo cual podemos definir la capacidad de producción, capacidad de exportación y el esquema logístico para el uso de los biocombustibles.

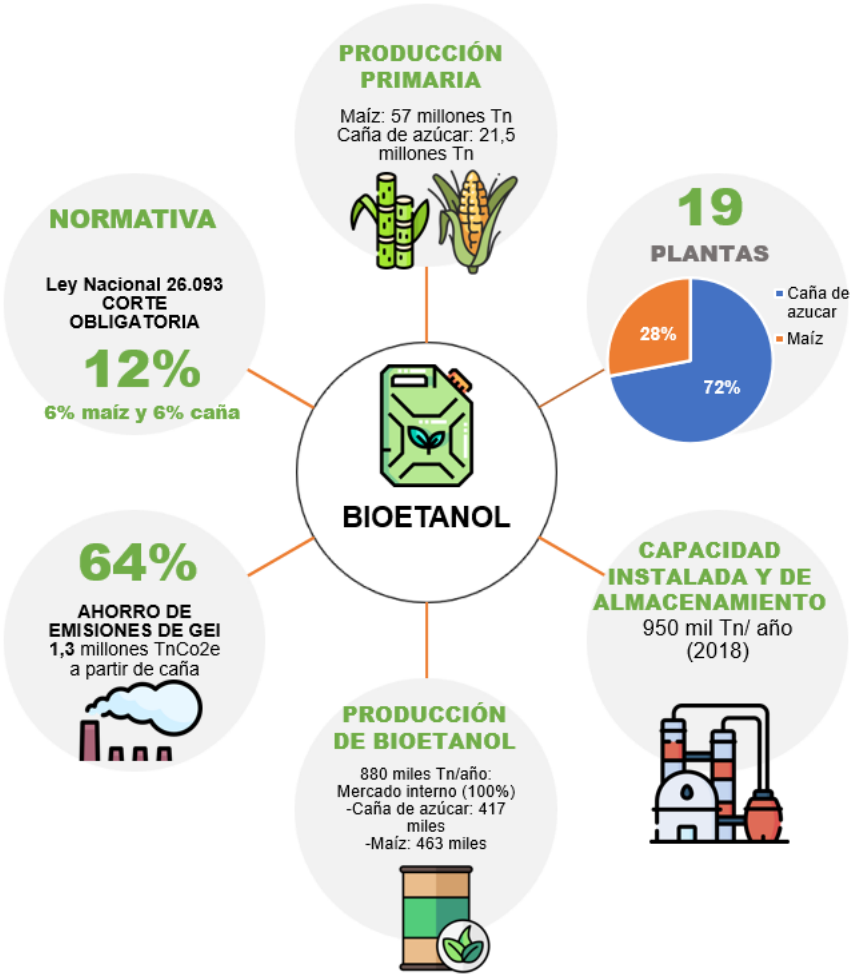


Figura 87. Cadena de valor del bioetanol en Argentina

Fuente: Secretaría de Agricultura, Ganadería y Pesca

— *Producción primaria*

La producción de bioetanol en la Argentina se elabora en base a la melaza, un subproducto de fabricación de azúcar, de jugo directo de caña de azúcar, y de los cereales, principalmente el maíz, el cual fue incorporado con posterioridad a la caña. Se tiene una producción de 57 millones de toneladas de maíz y 21,5 millones de toneladas de caña de azúcar.

— *Almacenamiento y transporte hasta las plantas de procesamiento*

Luego de su producción en las fincas, se transporta en camión hasta el silo, allí se almacena y se condiciona para luego ser transportado hasta las plantas.

La totalidad de la actividad industrial y portuaria se localiza en la Provincia de Santa Fe, por lo que las plantas procesadoras se aprovisionan de materias primas en un radio de menos de 300 km. El 80 % del transporte de granos se realiza en camión y el restante en ferrocarril. Para distancias inferiores a 300 km, el transporte más adecuado es el camión; para recorridos superiores se hace uso del ferrocarril (Dirección Nacional de Alimentos, n.d.).

— *Plantas de procesamiento*

Existen plantas de bioetanol en Tucumán, Jujuy, Salta, San Luis, Santa Fe y Córdoba. Asimismo, la mayor capacidad instalada de bioetanol se ubica en el Up River (Gran Rosario), en la Provincia de Santa Fe. Además existen plantas de este biocombustible en Entre Ríos, La Pampa y Buenos Aires; actualmente, Argentina cuenta con 19 plantas para la transformación de bioetanol. (Calzada & Rozadilla, n.d.).

Para el año 2022 se obtuvieron 0,71 millones de m^3 de bioetanol de maíz y 0,46 millones de m^3 de caña, para un total de 1,17 millones de m^3 de bioetanol producido.

Por otro lado, las principales empresas que producen bioetanol con su producción anual se relacionan en la tabla 53.

Tabla 53.Cantidad de bioetanol producido por empresa

Empresa	Bioetanol (toneladas)
YPF S.A.	340.745
Shell Cap S.A.	119.890
Oil Combustibles S.A.	23.817
Petrobras Argentina S.A.	25.560
Refineria del Norte S.A.	14.038

Fuente (Comunelli & Del Canto, 2016)

El bioetanol obtenido a partir de la caña de azúcar es un subproducto de fabricación de azúcar, del jugo directo de caña de azúcar, por lo que los diferentes productos se generan antes de la generación del bioetanol. Es así que, después de extraer el aceite de maíz, queda la harina de germen de maíz como un coproducto para alimentos balanceados. La fracción de salvado también se separa y se utiliza como un alimento alto en fibra, principalmente para rumiantes.

— *Producción de bioetanol y comercialización*

La logística para la comercialización se realiza a través de dos oleoductos operados por YPF, los cuales conectan Puerto Hernández (Neuquén) y Lujan de Cuyo, en un recorrido de 580 km, y Puerto Rosales (Punta Alta-Buenos Aires) y la Plata, en un recorrido de 700 km. Adicionalmente, la logística de los productos se realiza a través de poliductos que conectan Lujan de Cuyo, San Lorenzo, La Matanza y la Plata. Se incluyen 3 puertos de carga, 16 terminales (10 con puerto), 6 plantas de GLP, 54 aeroplantas y más de 1500 camiones.

— *Ventas y exportación*

La Secretaría de Energía públicó a inicios del año 2023 las ventas que han realizado en m^3 desde el año 2020 hasta inicios del año 2023, relacionándose así:

- Año 2020: venta de 374,844 m^3 de caña y 389,484 m^3 de maíz.
- Año 2021: venta de 475,902 m^3 de caña y 522,606 m^3 de maíz.
- Año 2022: venta de 454,625 m^3 de caña y 659,985 m^3 de maíz.

En la actualidad Arg entina no realiza exportación ni importación de bioetanol.

Por último, se presenta un mapa de la República de Argentina indicando la localización de las refinerías con sus respectivas rutas de oleoductos, poliductos y gasoductos (figura 88).

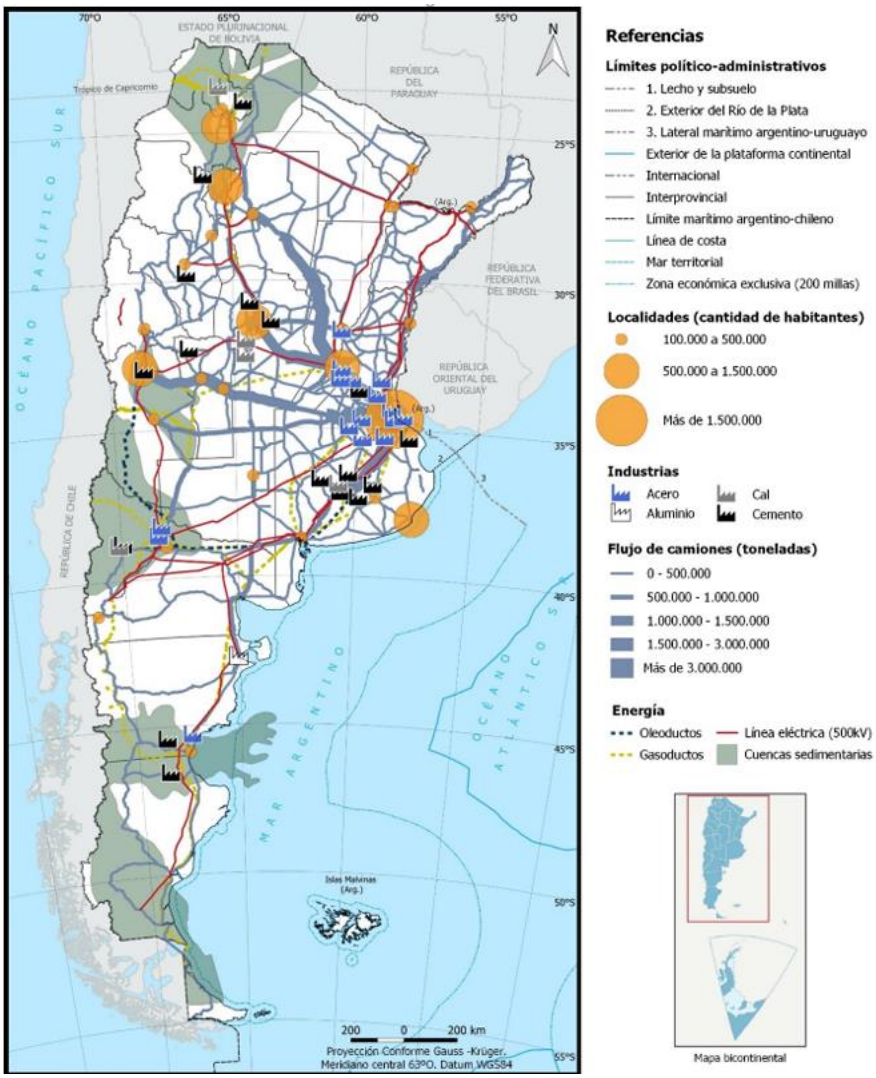


Figura 88. Mapa de Argentina con la localización del transporte empleado para los biocombustibles

Fuente: (MAyDS, n.d.)

— *Costos*

El desglose de los costos para la cadena productividad de los biocombustibles con almacenamiento en silo es:

- Transporte vial finca-silo de campo: 13 %
- Servicios en silo de campo: 16 %
- Transporte vial silo de campo-planta de transformación: 42 %
- Gastos de *marketing*: 8 %
- Impuestos y otros gastos: 20 %

Por otro lado, el desglose de los costos para la cadena de productividad de los biocombustibles sin almacenamiento y con transporte directo es (Gauthier & Placci, n.d.):

- Transporte vial finca-silo de campo: 0 %
- Servicios en silo de campo: 0%
- Transporte vial silo de campo-planta de transformación: 61%
- Gastos de *marketing*: 11 %
- Impuestos y otros gastos: 27 %

4.3.5.3 Cadena de suministro del biogás

De acuerdo con una investigación expuesta en la Conferencia 2018 del Consorcio Italiano de Biogás, en Argentina se identifica un potencial de generación de 14,4 billones de metros cúbicos de biometano. Este se desglosa en 10,53 billones de derivados de cultivos secuenciales, 2,84 billones de residuos agrícolas, 0,86 billones de efluentes ganaderos y 0,14 billones de subproductos agroindustriales, de acuerdo con el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA, 2018).

— *Producción primaria*

La producción primaria de biogás en Argentina se basa en la rica diversidad de materias primas orgánicas disponibles en el país. Esto incluye los efluentes porcinos, subproductos industriales y agrícolas, silaje de maíz, estiércol, residuos de frigoríficos y vinaza, entre otros (TN30, 2023). La producción de biogás depende en gran medida de la industria agropecuaria argentina, ya que brinda una gran cantidad de sustancias nutritivas para este proceso.

El Gobierno de Argentina ha llevado a cabo estrategias y proyectos que promueven la generación de biogás como una forma de obtención de energía renovable. Esto ha ayudado a expandir el negocio y ha colocado al país como un actor importante en la producción de biogás en la región.

— *Almacenamiento y transporte*

El almacenamiento y transporte de los sustratos para la producción de biogás en Argentina involucra una logística especializada. Los sustratos, que incluyen residuos agrícolas, estiércol, desechos alimentarios y efluentes ganaderos, son

recolectados y preparados para su procesamiento en plantas de digestión anaeróbica. El almacenamiento se lleva a cabo en instalaciones adecuadas, como silos o depósitos, garantizando condiciones óptimas para el desempeño anaeróbico.

El transporte de estos sustratos se realiza mediante diversos medios, como camiones y contenedores diseñados específicamente para su movilización, desde su origen hasta las plantas de producción de biogás.

— *Plantas de procesamiento*

Según el Relevamiento Nacional de Biodigestores 2019 (Mathier et al., 2019), Argentina cuenta con un total de 105 biodigestores, de los cuales el 26,6 % utilizan desechos de origen ganadero como materia prima. Esto incluye efluentes avícolas, estiércol de caballo, estiércol vacío, purín de cerdo y mezclas de estiércol. Específicamente, las provincias de Córdoba, Santa Fe, Entre Ríos, Buenos Aires y La Pampa destacan por su potencial para la implementación de esta tecnología, dada su posición de liderazgo en la cría de ganado bovino (principalmente, en la Provincia de Buenos Aires), porcino (principalmente, en Santa Fe y Buenos Aires) y avícola (principalmente, en Buenos Aires, Entre Ríos y Córdoba). En particular, el potencial de producción de biogás en instalaciones que emplean ganado bovino supera los 500 millones de metros cúbicos anuales, de acuerdo con datos proporcionados por el Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca (Agricultura & Pesca, n.d.).

En la figura 90 se grafica la distribución geográfica de las instalaciones de biogás por provincia. Un notable 90 % de estos se encuentran en la Provincia de Buenos Aires, seguida por Córdoba y Santa Fe, en términos de concentración. En cuanto a la clasificación por zonas (rural, urbana o industrial), aproximadamente el 80 % se sitúan en áreas rurales, lo cual guarda relación con el predominio de actividades de producción primaria en estas regiones.

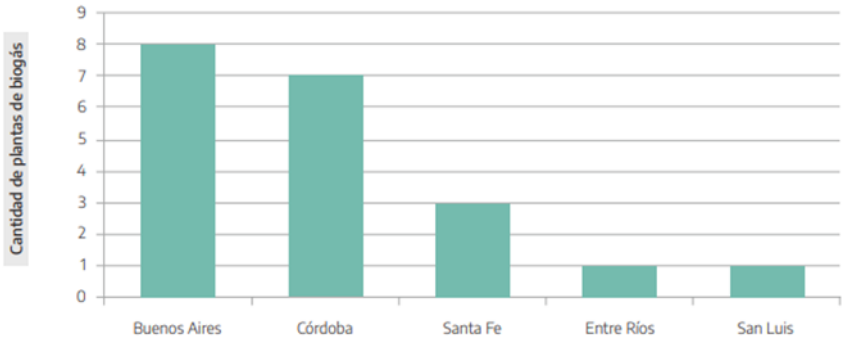


Figura 89. Distribución geográfica de las plantas de biogás

Obtenido de: (Ministerio de Agricultura y Pesca, 2021)

La producción de biogás creció un 10,58 % interanual en 2022, al pasar de 378 a 418 GWh, y batió el récord de la última década, con una fuerte demanda de productos agroindustriales para su elaboración, según destacó un informe de la Bolsa de Cereales de Córdoba (BCCBA) (Ministerio de Agricultura y Pesca, 2021).

— *Distribución y comercialización*

La distribución y comercialización de biogás se enfoca en dos principales vertientes: inyección en la red de gas natural y generación de electricidad. El biogás purificado, principalmente compuesto de metano, puede ser integrado en la red de gas natural para abastecer a consumidores comerciales e industriales. También puede ser empleado para la producción de electricidad en plantas de cogeneración. En el sector agropecuario, el biogás es utilizado para cubrir las necesidades energéticas de explotaciones ganaderas y agrícolas.

Aunque la industria de biogás en Argentina está en una etapa inicial de desarrollo, se observa un creciente interés y una mayor inversión en tecnologías relacionadas con el biogás. Además, existen incentivos gubernamentales y programas de financiamiento que promueven la adopción de esta fuente de energía renovable (Secretaría de Agricultura, Ganadería y Pesca, Argentina, 2023).

4.3.5.4 Cadena de suministro de SAF

— *Producción primaria*

Argentina, actualmente, utiliza diversas materias primas para la producción de combustibles de aviación sostenible (SAF). Algunas materias primas empleadas

son: aceite de soja, aceite de colza, jatropha, residuos de biomasa, microorganismos y algas.

— *Almacenamiento y transporte*

Las materias primas, que abarcan aceites vegetales (como el aceite de soja), residuos agrícolas, biomasa forestal, entre otras, generalmente se resguardan en primer lugar en las instalaciones de origen. Estas instalaciones pueden comprender silos, almacenes o tanques de almacenamiento, adaptados a las especificidades de cada tipo de materia prima. Dependiendo del tipo, es factible que sea preciso llevar a cabo un proceso de preparación previo antes de su transporte. Por ejemplo, en el caso de los aceites vegetales, puede ser necesario realizar operaciones de filtrado y acondicionamiento antes de proceder con el traslado (Airwaigs, n.d.).

A diferencia de otros países, Argentina, tiene una mayor variedad en el transporte de las materias primas para SAF como se evidencia a continuación:

- **Transporte por carretera:** en el caso de las materias primas ubicadas en áreas terrestres, como aceites vegetales, residuos agrícolas y similares, la principal modalidad de transporte se realiza a través de vehículos terrestres, especialmente camiones cisterna y otros tipos de vehículos, de acuerdo con las especificaciones de cada materia prima.
- **Transporte ferroviario:** en algunas circunstancias, el transporte ferroviario puede representar una opción eficaz para el desplazamiento de materias primas a largas distancias, particularmente cuando se trata de volúmenes considerables.
- **Transporte marítimo o fluvial:** cuando las materias primas se localizan en áreas cercanas a vías fluviales o puertos, el transporte marítimo o fluvial se convierte en una alternativa viable, especialmente para el traslado de biomasa y otros productos forestales (Airwaigs, n.d.).

— *Plantas de procesamiento*

En Argentina, se observa un continuo progreso en la producción de combustibles de aviación sostenibles (SAF), y múltiples empresas y plantas de procesamiento participan en la generación de SAF a partir de recursos renovables, estas plantas se describen en la tabla 54.

Tabla 54. Plantas de procesamiento de SAF en Argentina

Nombre	Descripción
YPF	YPF es la principal empresa petrolera, ha estado investigando la producción de combustibles de aviación sostenibles (SAF) a partir de recursos renovables, como aceites vegetales y residuos de biomasa.
Bunge	La empresa Bunge se ha involucrado en la producción de biocombustibles y ha explorado la fabricación de SAF utilizando aceites vegetales como materia prima.
Plantas de procesamiento de biodiésel	Varias plantas de procesamiento de biodiésel han considerado la posibilidad de ampliar sus operaciones para incluir la producción de SAF. El biodiésel se puede utilizar como materia prima en la producción de SAF.

Adaptado de: página oficial de cada empresa.

— *Distribución y comercialización*

La producción sostenible de combustibles de aviación (SAF) comienza a transportarse desde las instalaciones de producción a través de una red de transporte proporcionada por camiones cisterna. Estos SAF se almacenan en tanques de almacenamiento especiales para combustibles de aviación en aeropuertos y terminales especializadas para productos petroleros. Los camiones de abastecimiento de combustible proporcionan el suministro de SAF a las aeronaves una vez que llegan a los aeropuertos, donde se cargan los tanques de las aeronaves. En la figura 90 se evidencian los aeropuertos a los que se suministra SAF.



Figura 90. Aeropuertos en Argentina

Obtenido de: (Maps, 2021)

4.3.6 Aspectos ambientales

4.3.6.1 Análisis de ciclo de vida

El estudio de Pieragostini et al. (2014) analiza el impacto ambiental causado por la producción de bioetanol anhidro de maíz en la Provincia de Santa Fe empleando un esquema de la cuna a la puerta ("*cadle-to-gate*") con la tecnología de molienda en seco con 1 MJ de bioetanol anhidro en biorrefinería como unidad funcional. El sistema es subdividido en dos subsistemas, el agrícola y el de refinería, incluyendo el tratamiento de vinaza y el uso de coproductos, sin incluir el uso o aplicación del biocombustible (Pieragostini et al., n.d.).

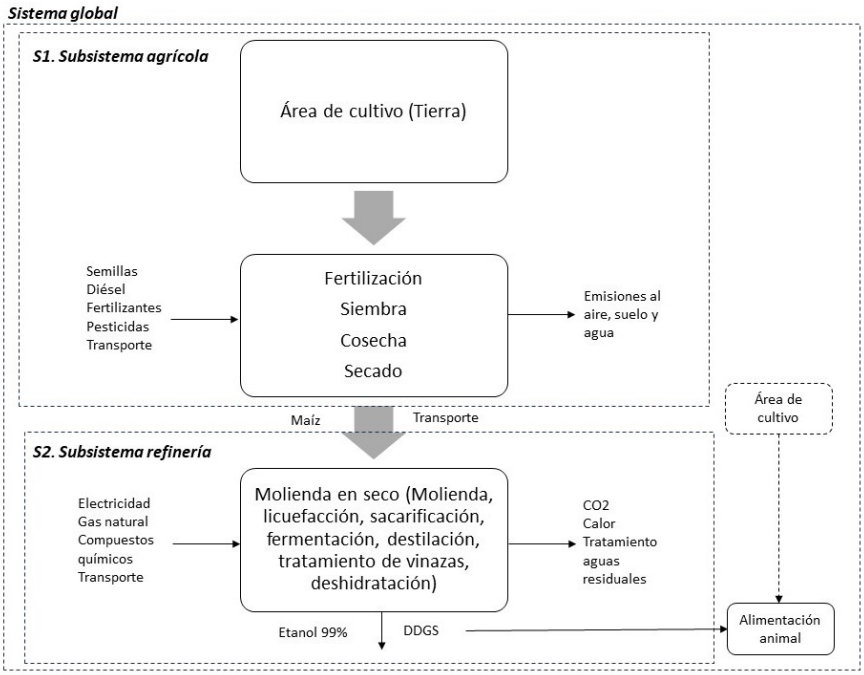


Figura 91. Límites del sistema para el ACV del bioetanol a partir de maíz en Argentina

Tomado de: (Pieragostini et al., n.d.)

Para el ACV se empleó el *software* Simapro con los métodos de impacto Eco-indicador 99 y ReCiPe. Ambos métodos identificaron los mismos procesos relevantes. Para el subsistema agrícola, los procesos más importantes son el uso de fertilizantes y recursos, producción de semillas, procesos de cosecha, secado de maíz, producción de fertilizantes y compuestos anílidos. Para el subsistema de refinería, las principales contribuciones se logran en la producción de maíz, calor suplido y gas natural quemado. El uso de destilados de los granos secos (coproducto) con solubles resulta en un impacto ambiental positivo (véanse figura 92 y figura 93).

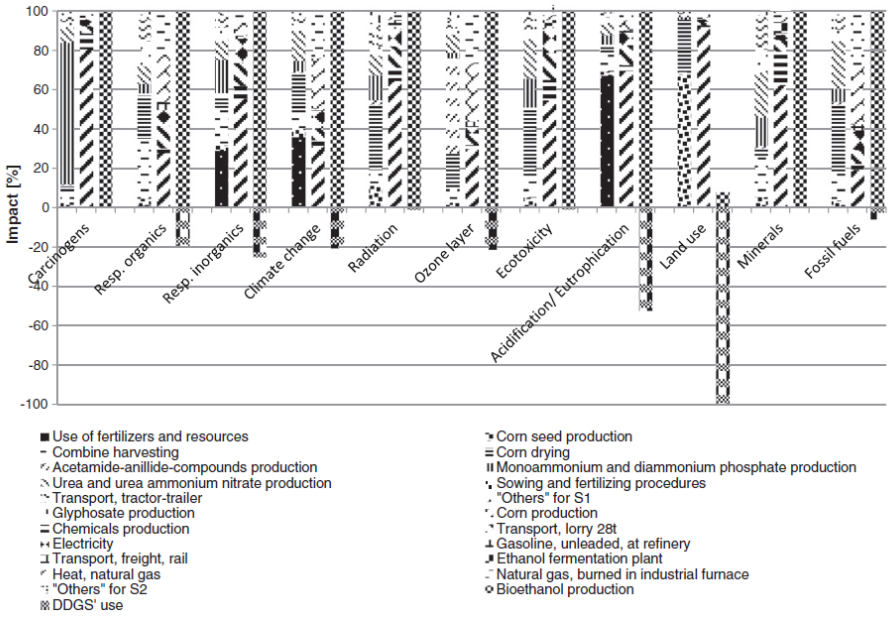


Figura 92. Resultados ACV para bioetanol de maíz en Argentina con Eco-indicador 99

Tomado de: (Pieragostini et al., n.d.)

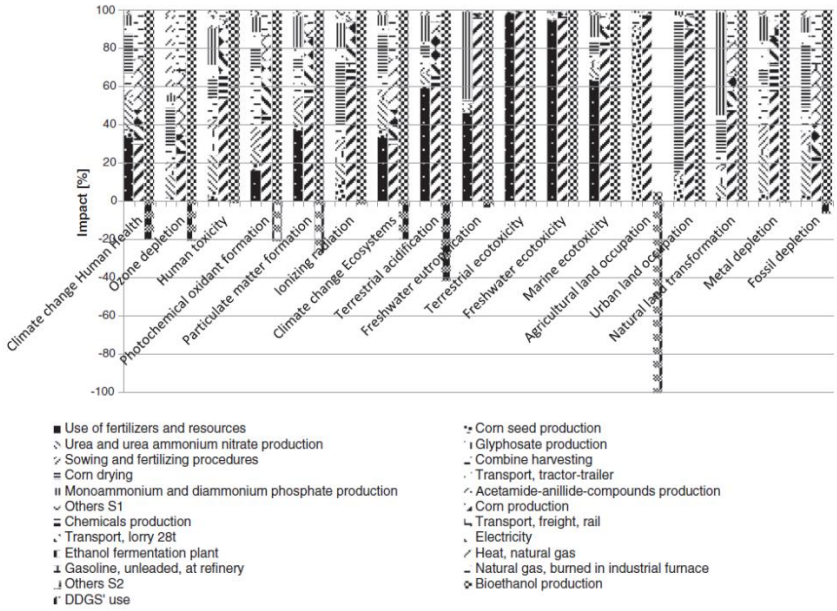


Figura 93. Resultados ACV para bioetanol de maíz en Argentina con ReCiPe

Tomado de: (Pieragostini et al., n.d.)

De forma similar, Amores et al. (2012) realizan un análisis de ciclo de vida para el bioetanol a partir de caña de azúcar en Tucumán, Argentina, con un sistema de producción dividido en subsistemas (S1-Producción de caña de azúcar,

S2-Proceso de molienda, S3-Producción de azúcar, S4-Produccion de bioetanol a partir de molasas, miel o jugo de caña de azúcar), que involucran el procesamiento agrícola y la transformación de la materia prima extraída de la tierra (Amores et al., n.d.).

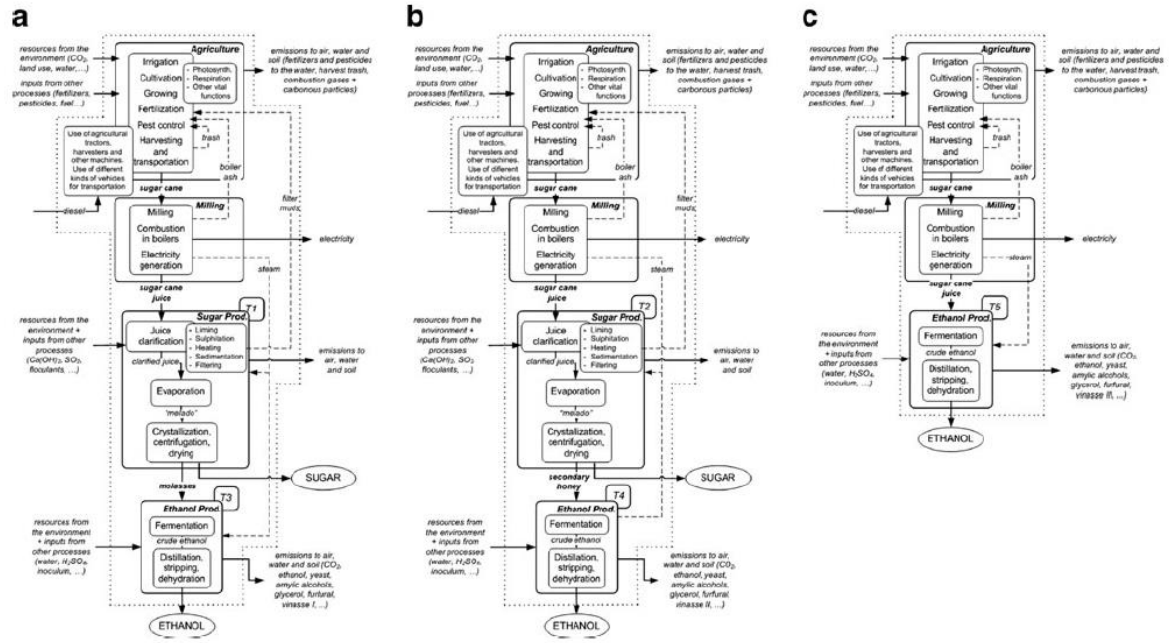


Figura 94. Límites de los sistemas empleados en el ACV de bioetanol a partir de caña de azúcar en Argentina

Tomado de: (Amores et al., 2013)

El mayor impacto se logra con el potencial de calentamiento global, siendo para la producción de 1 kg de bioetanol, 22,5 kg CO_2 para bioetanol a partir de molasas de la caña de azúcar, 19,2 kg CO_2 para bioetanol a partir de miel de caña de azúcar y 15 kg CO_2 para bioetanol a partir de los jugos de la caña de azúcar (Amores et al., 2013). De acuerdo con la figura 95, el mayor impacto ambiental en la producción de bioetanol se logra en la fase de agricultura.

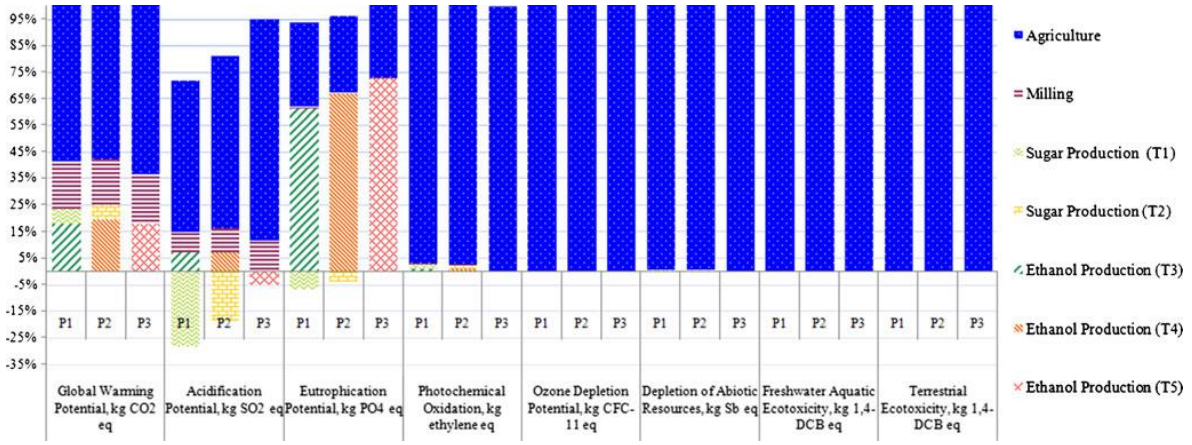


Figura 95. Resultados del ACV para bioetanol a partir de caña de azúcar en Argentina

Tomado de: (Amores et al., 2013)

4.3.6.2 Emisiones de gases de efecto invernadero

En Argentina, la mayor participación en las emisiones netas del país en el año 2018, se logran en el sector de energía y el de agricultura, silvicultura y otros usos de la tierra (AFOLU) (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, n.d.).

En el sector energético, la mayor participación se tiene en la industria de la energía (principalmente, por la producción de electricidad y calor), el transporte (sobre todo por el transporte por carretera y la aviación civil) y las industrias manufactureras (principalmente, en la industria de hierro y acero, alimentos y bebidas, minerales no metálicos y la industria química). Mientras que en el sector de procesos industriales y uso de productos (IPPU), las mayores emisiones son causadas en la industria de los minerales (por la industria del cemento y cal), la industria de los metales (por la industria del hierro y el acero, y el aluminio) y el uso de sustancias sustitutas de las sustancias agotadoras de la capa de ozono (SAO) (Ministerio de Ambiente y Desarrollo sostenible, n.d.).

Se destacan importantes experiencias a nivel nacional que muestran la factibilidad técnico-ambiental y social y los beneficios en salud pública en Argentina:

- **Ensayo CLIBA B100:** ensayos por la empresa CLIBA en el periodo de un año con biodiésel puro (B100) en camiones de recolección de residuos urbanos, arrojaron una disminución de emisión de gases

contaminantes superior al 80 %. La emisión de dióxido de sulfuro, uno de los principales contaminantes del aire por el uso de combustibles fósiles se redujo a cero.

- **Ómnibus Urbanos BioBus Rosario y otros**: más de 1300 ómnibus de pasajeros urbanos en ciudades como Rosario, Santa Fe, Buenos Aires, Córdoba, Salta, etc., funcionaron con B100 sin problemas y reduciendo las emisiones de gases efecto invernadero en un 70 %.

4.3.6.3 Compromisos ambientales en reducción de GEI

- No exceder las 349 $MtCO_2eq$ de GEI al año 2030.
- Limitar las emisiones de gases de efecto invernadero a un nivel 25,7 %.
- Fortalecer la educación ambiental, a la transición justa con equidad de género y a la federalización como ejes rectores (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible Argentina, 2020).
- Transformar el sistema energético.
- Transformar el sistema de transporte.
- Transformar el sistema alimentario y forestal.
- Proteger y restaurar los sistemas naturales.
- Transformar el sistema productivo industrial y turístico.
- Transformar el sistema urbano (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2021).

4.3.7 Aspectos sociales

A nivel económico, los biocombustibles representan para Argentina, una facturación anual entre 2100 y 3300 millones de dólares, con un valor agregado de 400 millones de dólares. En cuanto a empleabilidad, genera:

- Puestos de trabajo directo: entre 4000 y 5000.
- Puestos de trabajo indirecto: entre 15000 a 18000.

Entre las principales implicaciones sociales pueden destacarse:

- Desaparición de unidades productivas familiares por desplazamiento de sus modelos económicos por monocultivos.

- Dependencia de los pequeños y medianos productores respecto de las empresas proveedoras de semillas fitoresistentes.
- Desplazamiento de actividades menos rentables a más intensivas en trabajo.
- Afectación de suelos y ecosistemas por agroquímicos y monocultivos.

4.3.7.1 Seguridad alimentaria

En Argentina también se ha presentado la discusión de los biocombustibles frente a la seguridad alimentaria, sobre todo se argumenta que la utilización de insumos agrícolas para la fabricación de combustibles trae como consecuencia un incremento en los precios de los alimentos, lo que perjudica, particularmente, a los sectores más vulnerables. Este factor se ha visto potenciado por el avance de la frontera agrícola que ha desplazado a otras actividades, principalmente en zonas de humedales como la región delta del Paraná, y ha generado la desaparición de más de 150.000 pequeños y medianos productores en los últimos 20 años, quienes fueron incapaces de adaptarse con la industria generada alrededor del monocultivo de soja, afectando la capacidad de producción alimenticia. Situación que, como resalta Herrera et al (2013), se dio de la mano de un proceso de concentración de la tierra, deterioro de los humedales y pérdida de sus bienes y servicios, marginando a muchos habitantes de estas regiones cuyos medios de vida dependen de estos recursos (Herrera & Panigatti, 2013).

Sin embargo, de acuerdo con los comentarios realizados por el Gobierno ante la FAO (2013), Argentina no hace parte de los países respecto de los cuales la producción de biocombustibles ponga en riesgo la seguridad alimentaria. Al respecto, se destaca que Argentina produce en grandes cantidades tanto alimentos como biocombustibles, por lo que considera a la producción y exportación de estos últimos un factor que agrega valor a su cadena productiva, generando empleo e innovación.

La composición del grano de soja es de aceite (18 %), proteína (78 %) y otros (4 %). Lo que se utiliza para la producción de biodiésel es solamente el 18 % del grano y su producto principal, la harina proteica, es alimento animal para la producción de alimentación humana (carnes, etc.). En este sentido, la producción

de biodiésel es un subproducto de la producción de proteínas para la producción de alimentos, por lo que no amenaza a la seguridad alimentaria (FAO, 2013).

4.3.7.2 Acceso a la tierra e impacto a comunidades locales, agrícolas e indígenas

— *Usos de la tierra*

Se ha presentado un impacto en la industria de los biocombustibles relacionado con la afectación a suelos y ecosistemas, vinculado principalmente a la etapa primaria de la industria agrícola. Al respecto, se han documentado afectaciones principalmente relacionadas al cultivo de la soja, como: desmontes, deforestación, destrucción de selvas y humedales, expansión de malezas resilientes, pérdida de la biodiversidad, entre otras. Muchas de estas, causadas por el uso de agroquímicos y plaguicidas, lo que afecta a los alimentos y sistemas biofísicos locales.

A su vez, la siembra de soja, con variedades transgénicas y bajo un modelo de monocultivo, ha generado que se reemplacen muchas especies por una sola y, por ende, el desplazamiento y reducción de la superficie de cultivo dedicada a otras variedades y a la ganadería bovina. Asimismo, hace que los cultivos sean más susceptibles frente al cambio climático (Epifanio & Ernst, 2019).

— *Impacto a comunidades locales*

El principal impacto respecto de las comunidades locales se presenta por la desaparición de unidades productivas de familiares y la relación de dependencia de pequeños y medianos productores con empresas proveedoras de semillas fitoresistentes. De acuerdo con las notas hechas a Sánchez (2012), en el estudio de la OIT, el modelo de cultivo de soja se caracteriza por ser de gran escala, intensivo en capital, basado en el uso de semillas transgénicas y de grandes cantidades de herbicidas para el control de plagas y por la organización de *pools* de siembra, que comprenden fondos de inversión particulares que contratan tierras de pequeños y medianos productores para explotar grandes superficies. Esto ha traído como consecuencia la desaparición de unidades productivas familiares y relaciones de dependencia de pequeños y medianos productores con las empresas que proveen las semillas fitoresistentes o que constituyen los

referidos *pools*, ha excluido a empresas pymes del mercado, entre otros conflictos relacionados con el uso de la tierra (Epifanio & Ernst, 2019).

Destaca Herrera & Panigatti (2013), que alrededor de 400.000 personas que dependen de la agricultura, no solo para la alimentación sino también para mantener su identidad cultural, han migrado a las grandes ciudades o han permanecido en la pobreza en su propia tierra.

Asimismo, se ha presentado desplazamiento de actividades menos rentables a actividades más intensivas de trabajo. Señala Sánchez (2012), citado por la OIT, que la actividad sojera ha desplazado actividades menos rentables, pero más intensivas en trabajo: un cultivo de 1000 hectáreas de soja emplea 15 trabajadores; mientras que la misma superficie dedicada a cítricos, por ejemplo, requiere 1500 personas. Esto ha generado el desplazamiento de las comunidades rurales hacia las ciudades, con la consecuente generación de desempleo y pobreza (Epifanio & Ernst, 2019).

— *Afectación sobre el recurso hídrico*

De acuerdo con Herrera & Panigatti (2013), en las regiones con cultivos intensivos, los humedales se ven afectados, directamente, por la entrada de agroquímicos, como los plaguicidas, e indirectamente porque a menudo los nutrientes entran en los humedales adheridos a partículas de suelo erosionado provenientes de tierras agrícolas. La escorrentía es una de las principales fuentes de contaminación no puntual por plaguicidas en los cursos de agua. También destaca que debido a las características de la expansión a gran escala y la adopción de ciertos manejos en la producción de soja, se aumenta el potencial de erosión de los suelos y hay una mayor probabilidad de contaminación de los humedales.

4.3.7.3 Condiciones laborales y de seguridad y salud en el trabajo

De acuerdo con Epifanio & Ernst (2019), la localización geográfica y el eslabón de la cadena son factores clave en cuanto a la calidad de los empleos. En las etapas base de la cadena, como el cultivo de los insumos, los trabajadores son más

expuestos a situaciones de informalidad; mientras que los empleos en las etapas industriales y de procesamiento son formalizados y no temporales.

También resaltan dichos autores que en las etapas industriales de procesamiento y conversión de la soja en biodiésel, llevadas a cabo por las industrias aceitera y petrolera, son intensivas en capital y requieren de trabajos especializados; solamente el 10 % de los puestos de trabajos no son calificados, mientras que el 12 % son profesionales, el 50 % son técnicos y el 28 % requiere de calificación operativa; mientras que frente al tipo de vinculación, el 80 % es empleado y el restante 20 % es cuentapropista o trabajador subcontratado y solo un 12 % de la mano de obra es femenina.

4.4 Caso Francia

Francia ocupa un lugar importante en el ámbito de los biocombustibles en Europa y a nivel global, su principal motivación se centra en la diversificación de su matriz energética, en aras de reducir su dependencia de los combustibles fósiles en el sector del transporte. El Gobierno francés ha implementado políticas y regulaciones para promover la producción y elconsumo de los biocombustibles, convirtiéndose en uno de los principales productores de biodiésel en Europa, usando como materia prima básicamente el **aceite de colza**, en este mismo sentido también produce bioetanol a partir del **trigo** y de **remolacha azucarera**.

4.4.1 Actores oficiales

Quienes están involucrados como actores oficiales son:

- La Comisión Europea
- El Comité Económico y Social Europeo
- El Gobierno francés

4.4.2 Actores privados

Dentro del desarrollo económico de los biocombustibles, se requiere de actores privados, siendo los principales actores económicos del sector de los biocombustibles o combustibles alternativos los siguientes:

- Tate & Lyle (de trigo)

- BCE (de trigo)
- BENP (de trigo)
- BENP en Lillebonne (a partir de trigo)
- Cristanol en Bazancourt (a partir de remolacha azucarera y trigo)
- AB Bioenergy en Lacq (a partir de maíz)
- Roquette en Bernheim (a partir de trigo)
- Tereos (de trigo)
- Lillebonne y Soufflet en Le Meriot (de trigo)

4.4.3 Marco regulatorio y económico

4.4.3.1 Mapa normativo

— Regulación de precios

El Gobierno de Francia ofrece desgravaciones fiscales para una cantidad limitada de biocombustibles producidos y vendidos en el mercado francés. El Gobierno impone un impuesto ambiental (Taxe Generale Sur les Activites Polluantes, o TGAP) a los distribuidores de combustible que no cumplan con una tasa de incorporación de biocombustible.

La Unión Europea (UE) es la llamada a regular el precio de los biocombustibles, específicamente la Comisión Europea tiene como política que los precios de la energía reflejen todos los costos externos de la producción y el consumo energéticos, incluidos cuando proceda los costos medioambientales, sociales y sanitarios.

Particularmente en Francia, las energías renovables como el etanol, el metano, los biocombustibles y la turba están exentas de impuesto, con lo que se concluye que existe una política de responsabilidad ecológica y medioambiental creando actores responsables de la vigilancia y control de las políticas de importación, exportación, precios y costos.

— Fórmula para calcular el precio

No se encontró información con relación a la existencia de una fórmula que permita determinar el precio de la comercialización de los biocombustibles en Francia. Lo que indica que los precios de los biocombustibles aun no se

encuentran regulados. Van de la mano con los mandatos previstos en la Unión Europea.

— *Principales normativas específicas relacionadas con el sector de los biocombustibles*

- El Código Aduanero francés, en su artículo 266, establece que los sujetos pasivos del impuesto especial sobre la energía, mencionado en el artículo L312-1 del código fiscal francés, sobre bienes y servicios recaudados sobre los productos comprendidos en las categorías impositivas de gasóleo, gasolina y combustible para aviones están sujetos a un impuesto de incentivo relativo al uso de energías renovables en el transporte.
- Decreto n.º 2019-570 de junio de 2019, implementa los incentivos fiscales para la incorporación de biocombustibles.
- El Código Fiscal de Bienes y Servicios de Francia: artículo L312-79, estipula la implementación de algunas de las tasas impositivas para los biocombustibles.
- La Directiva de Energías Renovables 2018/2001/UE (RED II) es la legislación que establece el marco para el uso de energías renovables en la Unión Europea.

— *Principales incentivos específicos del sector de los biocombustibles*

El Decreto n.º 2019-570 del 7 de junio de 2019 se refiere el impuesto de incentivo relacionado con el uso de energías renovables en el transporte. La definición de impuesto de incentivo se entiende según lo dispuesto en el Código Aduanero.

Por otro lado, se otorga un impuesto especial sobre la energía, mencionado en el artículo L312-1 del Código Fiscal sobre Bienes y Servicios.

Existen también incentivos a los productos que contienen energía producida a partir de fuentes renovables y que pueden transformarse en combustibles sujetos al impuesto o incorporarse a dichos combustibles.

— *Normas específicas que rigen la producción de biocombustibles en Francia*

Para los biocombustibles basados en cultivos, límite de cultivos a niveles de consumo de 2020 en transporte por carretera y ferrocarril, más 1 % de flexibilidad

dentro de un límite del 7 %, como en RED II, artículo 26. Se fija un límite separado para el uso de residuos de la extracción de azúcar y de la transformación del almidón (1,0 %).

Los biocombustibles elaborados a partir de residuos de la extracción de azúcar deben contar el 50 % de su contenido energético, hacia el límite de cultivo, y el 50 % hacia el límite separado del 1 %. Se fija un límite para el uso de tall oil (0,1%).

— *Normativas y regulaciones en el procesamiento de la materia prima*

La Directiva de Energías Renovables 2018/2001/UE (RED II) es la legislación que establece el marco para el uso de energías renovables en la Unión Europea. Dispone un objetivo general vinculante de energía renovable del 32 % para 2030, y un objetivo específico para el uso de energía renovable en el transporte para cada Estado miembro del 14 %, incluidos subobjetivos mínimos para los biocombustibles avanzados, es decir, biocombustibles elaborados a partir de materias primas incluidas.

— *Regulaciones establecidas para gestionar adecuadamente el aceite usado*

Como parte de la revisión del proyecto de ley de compra de energía, los diputados franceses de la Asamblea Nacional adoptaron una enmienda que permite el uso de aceite de cocina o aceite de cocina usado como sustituto del combustible diésel para ciertos tipos de automóviles. La enmienda propone la posibilidad de utilizar aceite usado como alternativa al combustible para determinados tipos de automóviles, especialmente los antiguos modelos diésel. La idea es reutilizar el aceite usado de girasol (Hespress, 2022).

— *Políticas vigentes de mandatos de mezcla*

En Francia, el Código de la Energía, en su artículo L641-6, indica que el Estado deberá crear las condiciones para que la proporción de energía producida a partir de fuentes renovables utilizadas en todos los modos de transporte, en 2020, sea igual al menos al 10 % del consumo de energía final en el sector del transporte y al menos al 15 % en el 2030.

En el porcentaje mínimo, la contribución de los biocombustibles avanzados y del biogás producido a partir de las materias primas enumeradas en la parte A del anexo IX de la Directiva (UE) 2018/2001, como porcentaje del consumo final de energía en el sector del transporte, es de al menos el 0,2 % en 2022, del 1 % en 2025 y del 3,5 % en 2030.

Para la aplicación del artículo L641-6, citado, solo se aceptarán los productos que verifiquen los criterios de sostenibilidad definidos en los artículos L. 281-5 a L. 281-10, en los términos que reglamentariamente se establezcan.

— *Normas específicas que rigen el consumo de biocombustibles en Francia*

La Directiva 2009/28/CE, sobre el fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables, es la directiva que enmienda y deroga las Directivas 2001/77/CE y 2003/30/CE anteriores, establece un conjunto común de normas para el uso de energías renovables en la Unión Europea con el objetivo de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y promover un transporte más limpio.

Establece objetivos nacionales vinculantes para todos los países de la Unión Europea con el propósito general de lograr que las fuentes de energía renovable representen para 2020 el 20 % de la energía de la Unión Europea y el 10 % de la energía específicamente en el sector del transporte (en ambos casos, se calcula en términos de consumo final bruto de energía, es decir, el consumo total de energía procedente de todas las fuentes, incluidas las renovables) (EUR-Lex, n.d.).

— *Programa de promoción de uso de biocombustibles y sus características específicas*

Actualmente existe una política de reglamentación para el desarrollo del mercado y el apoyo a los biocombustibles, la cual está compuesta por:

- Planes de acción de energías renovables.
- Promoción de los biocombustibles en Francia.

Transición energética para el *croissance verte* (Etip Bioenergy, s.f.).

4.4.3.2 Variables económicas en la producción de biocombustibles

— Generación de ingresos a nivel nacional

De acuerdo con las cifras reportadas por la Agencia de la Transición Ecológica (ADEME) y Establecimiento Nacional de Productos Agrícolas y Mariscos (FranceAgriMer) (2019), el sector de los biocombustibles convencionales, con cifras medidas a 2010, tuvo un impacto en la economía francesa de 900 a 1800 millones de euros y de ingresos fiscales para el Estado francés de 260 y 80 millones de euros por el bioetanol y el biodiésel, respectivamente (ADEME-FranceAgriMer et al., 2019).

La tabla 55 contiene algunas de las principales implicaciones a nivel económico del sector de biocombustibles en Francia.

Tabla 55. Implicaciones a nivel económico

Categoría	Indicador	Biodiésel	Bioetanol
Margen bruto de las explotaciones agrícolas (volumen de negocios-costes)		En todos los biocombustibles de primera generación se produjeron 596 millones de euros al año por 796 mil hectáreas de cultivos extensivos movilizados en Francia a 2018	
Valor añadido o agregado para el sector (en millones de euros)	Valor añadido directo (datos a 2013, 2014)	1044	345
	Valor añadido indirecto (datos a 2013, 2014)	567	264
Valor añadido o agregado para Francia (en millones de euros)	Valor añadido inducido (datos a 2013, 2014)	273	207
	Valor añadido total (datos a 2013, 2014)	1884	816
	Valor agregado para el Estado (datos a 2010, 2015)	80	260 a 330
Balance comercial (en millones de euros)	Balanza de comercio exterior (datos a 2014, 2017)	–357 (promedio 2010-2015)	400

Fuente: (ADEME-FranceAgriMer et al., 2019)

— Generación de empleos

El sector de los biocombustibles genera empleos directos, indirectos e inducidos. ADEME-FranceAgriMer, dentro del análisis que hacen a la Ley de transición energética para el crecimiento verde (LTECV) de 2015, presentan unos datos interesantes en el documento titulado “Evaluation des impacts de 3 scénarios de

développement de biocarburants pour la LTECV" relacionados con la empleabilidad del sector de los biocombustibles:

- **Empleos directos vinculados:** estos se encuentran vinculados con la transformación de biomasa, la producción de biodiésel y de bioetanol.
- **Empleos involucrados:** recopila los empleos en todo el sector desde agricultores hasta el procesamiento.

Tabla 56. Total empleos

Indicador	Biodiésel	Bioetanol
Número de empleos agrícolas	9050 a 10.000	3500
Número de empleos directos en biocombustibles	1400	1150
Número de empleos indirectos en biocombustibles	4050	1540
Número de empleos inducidos	3800	2875
Número total de empleos	**19.900**	**8895**

Fuente. (ADEME-FranceAgriMer et al., 2019)

4.4.3.3 Contratos en firme

No se encontró información con relación a la existencia de contratos en firme a la forma en cómo se vienen ejecutando a fin de promover la industria de los biocombustibles en Francia.

4.4.4 Aspectos técnicos

4.4.2.1 Descripción de materias primas (pretratamiento, procesamiento, rendimiento, costo)

En Francia, los cultivos destinados a la producción de bioetanol como combustible representan aproximadamente el 3 % de la superficie agrícola total francesa de cereales y azucareros (Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté alimentaire, 2023).

Las materias primas utilizadas para la producción de etanol en Francia están referidas principalmente al trigo, maíz y remolacha, como se relaciona en la figura 96.

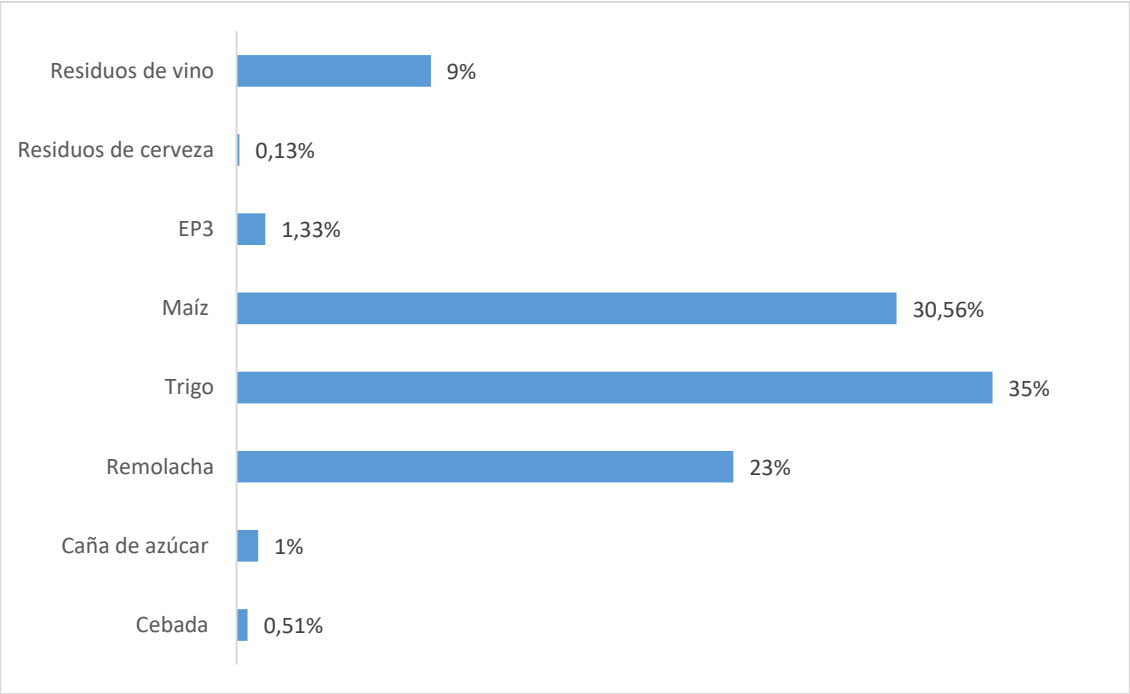


Figura 96. Materias primas utilizadas en la producción de etanol en 2019

Tomado de (Ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des Territoires & Ministère de la Transition énergétique, 2023)

Francia emite la Estadística Agrícola Anual (EAA) con el fin de proporcionar estimaciones de superficie y rendimiento en función del avance del calendario agrícola según la época del año. Utiliza los resultados de los estudios de tierras cultivables a partir de febrero, con relación a la superficie sembrada de remolacha, maíz y trigo, materia prima para la obtención de etanol. Para el caso de la remolacha del año 2017 a 2022, se denota una diminución del área cultivada, ya que se reportó a septiembre de 2023, un área sembrada de escasamente 378.748 hectáreas, comparada con el promedio de 1.321.171 hectáreas cultivas anualmente en el periodo 2017 a 2022 (Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté alimentaire, 2023).

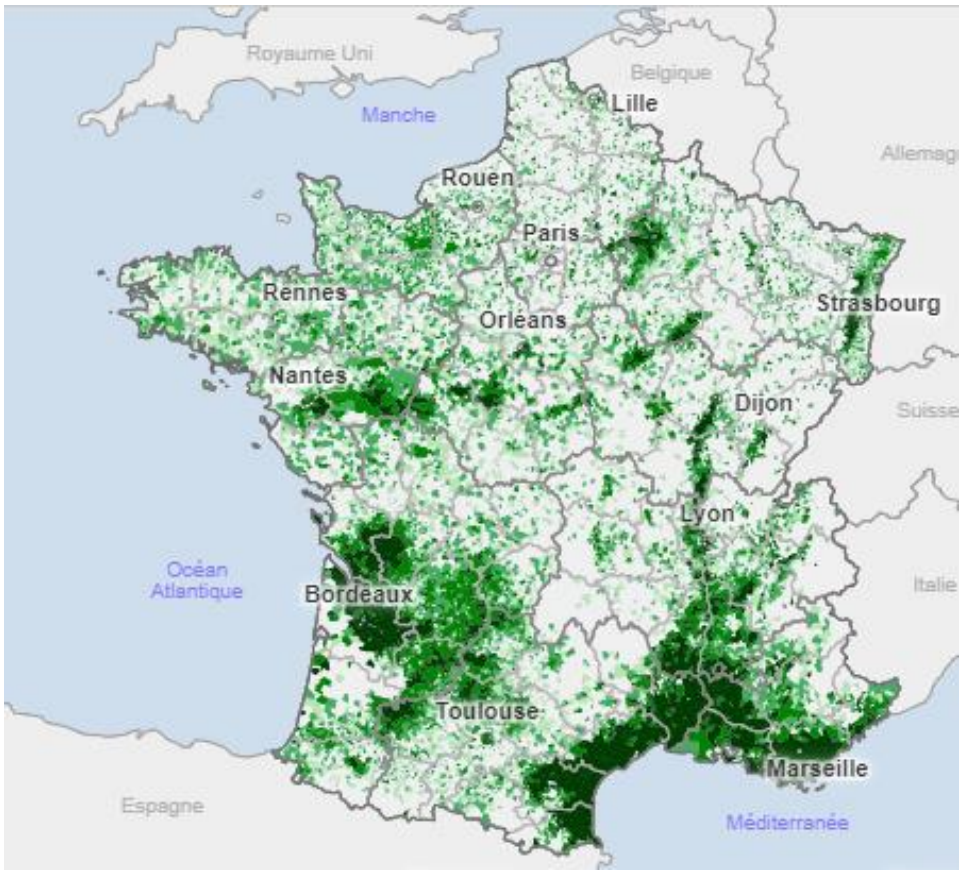
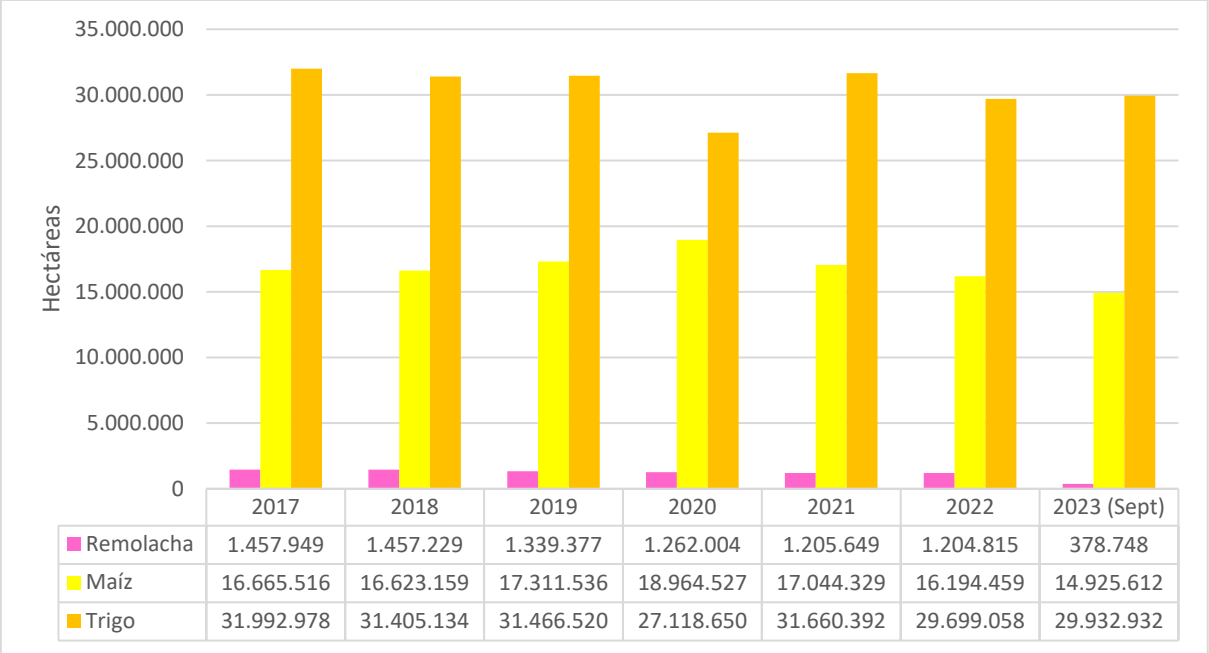


Figura 97. Proporción de cultivos permanentes en la superficie agrícola utilizada (SAU) en 2020

Tomado de: (Ministère de l'Agriculture, 2023b)

Para el caso del **área sembrada de maíz**, en términos generales, se ha mantenido una superficie sembrada promedio de 17,3 millones de hectáreas y que para el año 2023, la superficie sembrada correspondió a 14.925.612 de hectáreas. Para el caso del área sembrada de trigo, en términos generales se ha mantenido una superficie sembrada promedio de 30,5 millones de hectáreas y que para el año 2023 la superficie sembrada correspondió a 29.932.932 de hectáreas.

En la figura 99 se observan las cifras comparativas y por años (2017-2023 [sep.]) de cada materia prima en relación a las hectáreas cultivadas (Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté alimentaire, 2023).



	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023 (Sept)
Remolacha	1.457.949	1.457.229	1.339.377	1.262.004	1.205.649	1.204.815	378.748
Maíz	16.665.516	16.623.159	17.311.536	18.964.527	17.044.329	16.194.459	14.925.612
Trigo	31.992.978	31.405.134	31.466.520	27.118.650	31.660.392	29.699.058	29.932.932

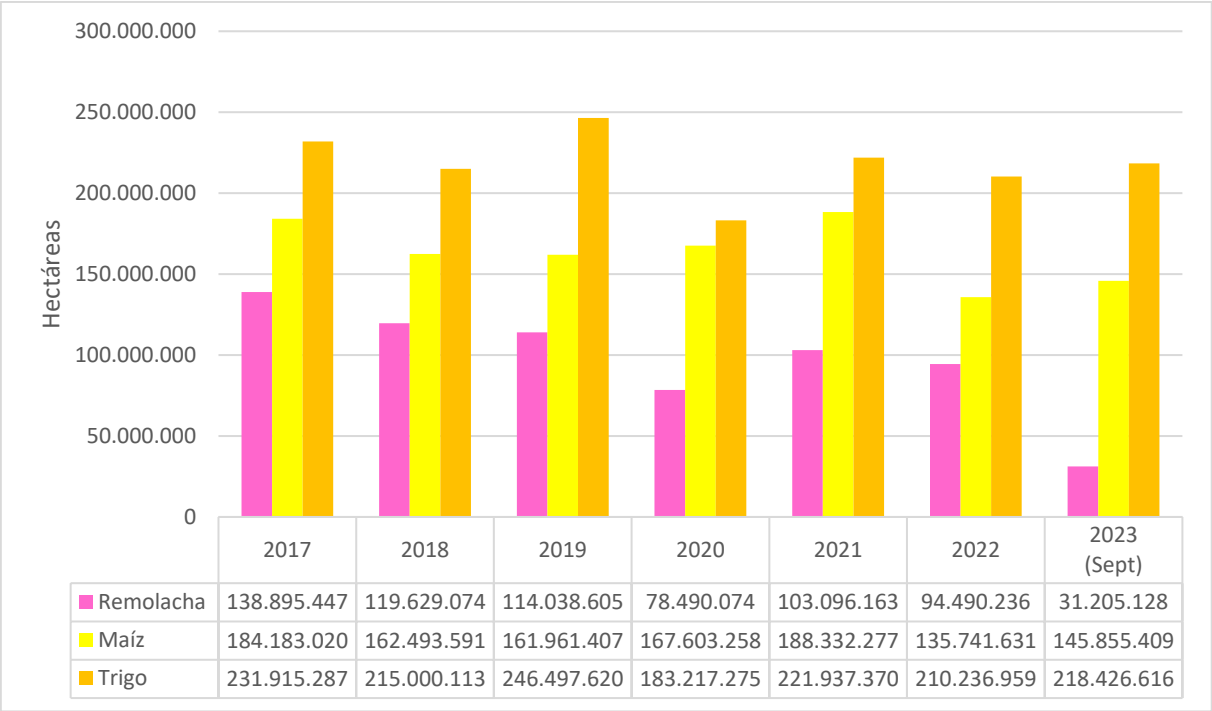
Figura 98. Superficie sembrada de remolacha, maíz y trigo, para el periodo 2017 a 2023 (septiembre)

Tomado de: (Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté alimentaire, 2023)

Con referencia a producción industrial de remolacha, en la misma tendencia de la superficie sembrada, con relación a la producción registrada en 2017, se evidencia una disminución pasando de 138.897.447 toneladas a 78.490.074 toneladas en el año 2020. Por otro lado, para los años 2021 y 2022, se registra un repunte con un promedio de 98,7 millones de toneladas; y para lo transcurrido del 2023 se registra una producción de 31.205.128 de toneladas.

Para el caso de la producción de trigo, a diferencia de las 183.217.275 de toneladas registradas en el año 2020, se ha mantenido un promedio de 224.0002.327 para el resto de los años evaluados.

En la figura 99 se observan las cifras comparativas y por años (2017-2023 [sep.]) en relación a la producción de remolacha, maíz y trigo (Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté alimentaire, 2023).



	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023 (Sept)
Remolacha	138.895.447	119.629.074	114.038.605	78.490.074	103.096.163	94.490.236	31.205.128
Maíz	184.183.020	162.493.591	161.961.407	167.603.258	188.332.277	135.741.631	145.855.409
Trigo	231.915.287	215.000.113	246.497.620	183.217.275	221.937.370	210.236.959	218.426.616

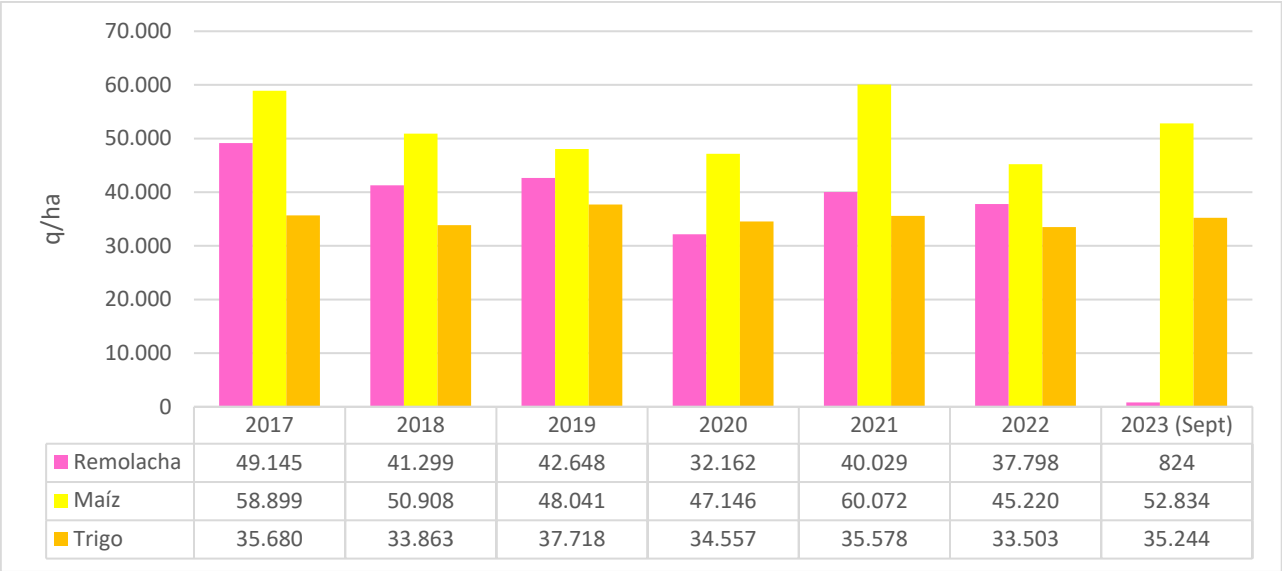
Figura 99. Producción de remolacha, maíz y trigo, para el periodo 2017a 2023 (septiembre).

Tomado de (Ministère de l'Agriculture, 2023a)

Con referencia a los rendimientos obtenidos de la producción industrial de remolacha, en la misma tendencia de la producción, que para los periodos 2017 a 2019, registró un rendimiento promedio de 44.364 q/ha; para el periodo 2020, se registraron mejores beneficios con rendimientos de 32.162 q/ha; para los años 2021 y 2022, se repuntó con un promedio de 38.914 q/ha; y hasta septiembre de 2023, se reporta un rendimiento de 824 q/ha.

Para el caso del maíz, para el periodo 2017 a 2020, se registró una disminución en los beneficios que para el año 2021 alcanzaron su mayor pico con 60.072 q/ha; en el año 2022 se disminuyó con referencia al año anterior, con un rendimiento de 45.220 q/ha; y hasta septiembre de 2023 se reporta un crecimiento en el rendimiento de 52.834 q/ha.

Para el caso del cultivo de trigo, se ha mantenido un rendimiento por encima de 30.000 q/ha, con un promedio para el periodo 2017 a septiembre de 2023 de 35.163 q/ha, como se observa en la figura 101 (Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté alimentaire, 2023).



	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023 (Sept)
Remolacha	49.145	41.299	42.648	32.162	40.029	37.798	824
Maíz	58.899	50.908	48.041	47.146	60.072	45.220	52.834
Trigo	35.680	33.863	37.718	34.557	35.578	33.503	35.244

Figura 100. Rendimiento de la producción de remolacha, maíz y trigo, para el periodo 2017a 2023 (septiembre). Tomado de: (Ministère de l'Agriculture, 2023a)

A medida que comienzan las cosechas de los principales cultivos de otoño, los rendimientos parecen prometedores. El rendimiento del maíz en grano (excluidas las semillas) se estima en 91,3 q/ha en 2023, un aumento significativo en comparación con 2022. A pesar de una nueva caída de la superficie, la cosecha de maíz seguiría aumentando. La primera estimación, antes de la cosecha, de la producción industrial de remolacha es de 31,2 Mt, frente a 31,5 Mt en 2022. El aumento del rendimiento (+5,1 %) no compensaría completamente la caída de la superficie (−5,7 %) (Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté alimentaire, 2023).

— *El cultivo de la remolacha en Francia*

La producción de remolacha para el periodo 2022-2023 se proyectó en aproximadamente 402.000 hectáreas que representarían 4 millones de toneladas de azúcar de remolacha.

El sector azucarero francés lo componen 5 grupos y empresas azucareras, así: Cristal Union con 8 unidades, Saint Louis Sucre con 2 unidades, Lesaffre Frères con 1 unidad, Tereos con 9 unidades y Ouvré et Fils SA con 1 unidad.



Figura 101. El sector azucarero en Francia, campaña 2022-2023. Principales departamentos productores de azúcar

Fuente: (Cultures Sucre, 2023)

Asimismo, se cuenta con 13 destilerías para la producción de alcohol agrícola (bioetanol más alcohol tradicional, excluidos los vinos) con un potencial de 15,5 Mhl, distribuidos en:

- 7,3 Mhl de remolacha (47 %) y 8,2 Mhl de cereales (trigo + maíz).
- 10,3 Mhl para el bioetanol (67 %) y 5,2 Mhl para el alcohol tradicional (33 %).

Los productos resultantes de la transformación de la remolacha azucarera (azúcar, bioetanol, alcohol tradicional, etc.) contribuyen a la independencia alimentaria y energética de Francia. Este sector agrícola representa 23.500 cultivadores, a los que se suman profesiones vinculadas a las semillas, a la investigación agronómica y a los servicios prestados a los agricultores. Los cultivos que se desarrollan en primavera para cosecharlas en otoño se implementan como parte de un plan de rotación de cultivos (alternancia de cultivos y cobertura vegetal) y cumpliendo protocolos agronómicos, sanitarios y medioambientales.

En el campo, el agricultor elige las variedades de remolacha que desea sembrar en función de diferentes criterios: rendimiento por hectárea, relación peso de raíz/azúcar, condiciones edafológicas y climáticas locales, previsiones meteorológicas para el año, etc. De allí depende la elección de la materia prima. Las semillas constituyen el primer eslabón de la cadena de valor del sector de la remolacha, el azúcar y el alcohol pues de allí depende la calidad de la materia prima.

Las semillas son producidas por empresas especializadas que dependen de otras dos categorías de actores: los creadores de variedades y los agricultores multiplicadores de semillas. Los primeros (creadores de variedades), también llamados “mejoradores”, tienen la misión de desarrollar nuevas variedades (selección varietal) e inscribirlas en el catálogo de especies y variedades de plantas cultivadas. Este registro oficial, bajo la responsabilidad del Ministerio de Agricultura, cubre todos los principales cultivos, así como la vid y la horticultura. Cuenta con más de 400 variedades de remolacha azucarera certificada a partir de las cuales los profesionales pueden producir y comercializar semillas denominadas de “línea pura”.

Asimismo, las empresas de semillas seleccionan las variedades de remolacha que mejor se adaptan a las necesidades de los cultivadores (hay más de 400 especies catalogadas). A partir de las semillas del linaje, se cultivan pequeñas remolachas, llamadas “planchones”, que luego se entregan a agricultores multiplicadores que las cultivan de manera que puedan producir semillas en grandes cantidades, logrando así que una hectárea proporcione entre 1,5 a 2 toneladas de semillas que permiten cultivos de hasta de 800 hectáreas. También en este caso la multiplicación de semillas de remolacha azucarera requiere conocimientos especiales debido a las características biológicas que distinguen fuertemente a esta planta de otras plantas de campo.

Las características biológicas de la remolacha azucarera hacen que la producción de semillas se distinga de otras especies como los cereales y las oleaginosas. Efectivamente, la *Beta vulgaris* (su nombre científico) es una planta bienal, lo que significa que completa su ciclo vegetativo a lo largo de dos años. El

primer año se dedica al desarrollo de las hojas gracias a las cuales constituye, mediante la fotosíntesis de clorofila, las reservas de energía que almacena en la raíz en forma de azúcar. Durante el segundo año se desarrollan los tallos, aparecen las flores y se forman las semillas. La plántula completa su ciclo de vida.

La multiplicación de semillas de remolacha requiere conocimientos especiales. De hecho, las variedades de remolacha que se cultivan en Francia son híbridas, resultantes del cruce entre una planta polinizadora masculina y una planta con semillas. Para promover la polinización, el agricultor multiplicador trasplanta las líneas parentales en una alternancia de hileras polinizadoras y no polinizadoras.

Otra particularidad es que la remolacha azucarera necesita mucha luz solar para completar su ciclo de reproducción. Dado que el suroeste de Francia ofrece condiciones ideales, esta región se ha convertido en la cuna histórica de la producción de semillas.

Los ciclos de los cultivos también están escalonados. Para la reproducción, la siembra se realiza en agosto, las plántulas se cosechan en enero-febrero y luego se trasplantan al mes siguiente para cosechar las semillas a finales de julio-principios de agosto. Las remolachas azucareras se siembran en marzo y las raíces se cosechan en otoño.

Dependiendo de las regiones y las condiciones climáticas del año, la campaña azucarera comienza a finales de septiembre o principios de octubre y está en pleno apogeo hasta enero. En estas pocas semanas, los aproximadamente 30 millones de toneladas de remolacha que llegan directamente de los campos deberán ser absorbidos por alrededor de 21 fábricas de azúcar de la Francia continental. Los equipos dedicados a la extracción de azúcar funcionan las 24 horas del día, los 7 días de la semana, y luego, al final de la campaña, la fábrica de azúcar vive otro ritmo donde el mantenimiento y la conservación de las herramientas industriales ocupan un lugar preponderante.

Las intervenciones se llevan a cabo internamente, involucrando equipos extremadamente especializados y diversificados: calderas y máquinas a presión, turbinas y secadores, cintas transportadoras, circuitos eléctricos, redes

informáticas, autómatas, etc. El mantenimiento del difusor, herramienta emblemática del proceso del azúcar, puede requerir de 3000 a 5000 horas de trabajo cada año.

Para no perder su contenido de azúcar, la raíz de remolacha debe utilizarse lo antes posible después de la cosecha. Ésta es una de las razones por las que las fábricas de azúcar están siempre situadas en el corazón de las zonas de producción agrícola, en un radio medio de 30 km.

Después de la cosecha, las semillas pasan a manos del establecimiento semillero, que las preparará para su comercialización y siembra. Las operaciones consisten en eliminar elementos no deseados (polvo, residuos vegetales), clasificar y calibrar las semillas que luego se pulen (para quitar el “corcho” que las envuelve) y luego se lavan con agua caliente. Luego se recubren con turba o arcilla.

Por lo general, las explotaciones cuentan con al menos un tractor y herramientas que se le pueden acoplar. Pero las tareas más pesadas requieren equipos específicos como: sembradoras, remolachadoras, excavadoras, entre otras, que pueden ser compartidas a través de cooperativas o suministradas por empresas de obras agrícolas (ETA), estas máquinas están pilotadas por conductores de maquinaria agrícola y mantenido por maquinistas especializados.

La remolacha azucarera y sus métodos de cultivo son objeto de constantes investigaciones científicas y técnicas, en particular a través de una estructura específica, el Instituto Técnico de la Remolacha de Francia (ITB) y en el seno de los equipos de investigación y desarrollo de las empresas azucareras. Este trabajo se basa en ingenieros y técnicos especializados en las disciplinas correspondientes: agronomía, química, biología, biotecnología, digital, *big data*, entre otros. Al mismo tiempo, estas estructuras ponen a disposición de los agricultores técnicos de campo que les prestan servicios específicos de asesoramiento, análisis de suelos, herramientas de apoyo.

El trabajo de una refinería de azúcar está marcado por la campaña azucarera (desde aproximadamente mediados de septiembre hasta enero). Durante este periodo, los colaboradores se dedicaron a la extracción de azúcar. El resto del

año, es decir, entre dos campañas azucareras, realizan operaciones de mantenimiento y conservación de la herramienta industrial. Esta especificidad repercute en las profesiones de producción. De hecho, todos los empleados tienen habilidades duales: habilidades de gestión del proceso azucarero que ejercen durante la campaña azucarera y habilidades de mantenimiento técnico que ejercen entre campañas. De este modo se contrata a los empleados para su "profesión básica" (calderero, electricista, mecánico, electromecánico, soldador, etc.) y el sector se encarga de formarlos en las profesiones específicas del funcionamiento de la fábrica de azúcar.

Cualesquiera que sean las calificaciones, las fábricas de azúcar ofrecen puestos en cuatro categorías socio-profesionales: trabajadores calificados, empleados, supervisores y ejecutivos. Más allá de las profesiones productivas , los ingenios azucareros ofrecen empleos en funciones transversales y/o administrativas: QHSE (calidad, higiene, seguridad, medio ambiente), laboratorio y análisis, compras, obras, contabilidad-gestión, recursos humanos, entre otros, y para hacer frente a la intensa actividad de la campaña azucarera, los ingenios también emplean un importante contingente de empleados puntuales (contratos temporales y de duración determinada) que ayudan a los equipos de producción y que, en su mayor parte, vuelven de un año por el otro.

Por otro lado, los trabajos de extracción de azúcar son realizados por profesionales especialmente formados para esta actividad y cuyos puestos de trabajo reflejan los niveles de cualificación y experiencia: conductor, jefe de turno, supervisor, jefe de fabricación, ingeniero de procesos, director técnico. La fábrica de azúcar se divide en sectores y talleres con tareas bien definidas, con una distribución de responsabilidades por las etapas que puede variar de un ingenio azucarero a otro.

Desde principios de la década de 2000, el etanol se ha incorporado en pequeñas cantidades a la gasolina sin plomo, pero es desde 2009, cuando se lanzó el SP95-E10 en Francia, como resultado de los compromisos asumidos por el país en el marco de la directiva europea sobre *energías renovables*, con alrededor del 25 % de los volúmenes producidos cada año dentro de la Unión

Europea, que Francia se sitúa muy por delante de Alemania (16 %) y del Reino Unido y España (8 %).

De los 17,9 millones de hectolitros (Mhl) de alcohol producidos por las quince destilerías del área metropolitana en 2019, dos tercios (10,5 Mhl) se utilizan como bioetanol destinado al combustible de automóviles. Producidos a partir de remolacha y cereales cultivados en Francia, así como de residuos de azúcar y almidón, volúmenes que superan las necesidades del mercado interno. De acuerdo con la Unión Nacional de Productores Agrícolas de Alcohol (SNPAA), el bioetanol francés obtiene su fuerza de una visión estratégica compartida por todos sus actores, aprovechando los avances agrícolas e invirtiendo en el desarrollo de herramientas de producción. En términos de recursos, una hectárea de remolacha azucarera cultivada en Francia produce alrededor de 9000 litros de etanol, o 4,6 toneladas de equivalente de petróleo (Teq), frente a 5000 y 8000 litros en condiciones óptimas por 1 ha de azúcar de caña.

4.4.2.2 Tecnologías para la producción de biodiésel

En Francia, las principales tecnologías utilizadas para la producción de biodiésel incluyen:

- **Transesterificación:** es el proceso principal utilizado para producir biodiésel a partir de aceites vegetales o grasas animales. Se mezcla el aceite o la grasa con metanol y se agrega un catalizador para obtener ésteres metílicos, que son los componentes principales del biodiésel.
- **Tecnología de microalgas:** Francia está invirtiendo en la investigación y desarrollo de tecnologías para la producción de biodiésel a partir de microalgas. Estas tecnologías involucran el cultivo y la extracción de aceites de microalgas para su posterior transesterificación.
- **Hidrogenación catalítica:** este proceso convierte los aceites vegetales o grasas animales en parafinas a través de una reacción química en presencia de un catalizador de hidrogenación. El producto resultante se puede utilizar como combustible diésel.
- **Fischer-Tropsch:** esta tecnología convierte el gas de síntesis, que puede ser producido a partir de biomasa o gas natural, en hidrocarburos líquidos,

que se pueden utilizar como combustible diésel. Este proceso implica una serie de reacciones químicas complejas.

Es importante tener en cuenta que la tecnología utilizada puede variar según las necesidades y recursos específicos de cada planta de producción de biodiésel.

— *Producción de biodiésel utilizando la tecnología de transesterificación*

Francia es uno de los países líderes a nivel mundial en la producción de biodiésel utilizando el proceso de transesterificación. Para este proceso se utilizan, principalmente, aceites vegetales como, por ejemplo, el aceite de colza, el aceite de girasol y el aceite de palma para la producción de biodiésel. Estos aceites se obtienen de cultivos agrícolas o de la industria alimentaria.

Francia ha invertido significativamente en la producción de biodiésel utilizando este proceso debido a su compromiso con la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero y la dependencia de los combustibles fósiles. El biodiésel producido se utiliza principalmente en el sector del transporte, tanto en vehículos de pasajeros como en vehículos comerciales. Además de la producción de biodiésel a partir de aceites vegetales, Francia también ha demostrado interés en la producción de biodiésel a partir de residuos orgánicos y aceites usados, lo que contribuye a una mayor sostenibilidad y reducción de residuos. Estas iniciativas forman parte de los esfuerzos de Francia por lograr una mayor independencia energética y reducir su huella de carbono.

— *Localización de las plantas de producción de biodiésel que utilizan la tecnología de transesterificación*

En Francia, existen varias plantas de producción de biodiésel que utilizan la tecnología de transesterificación. A continuación se citas las principales plantas que con sus respectivas localizaciones:

- **GranEnergia Biodiésel en Maizières-lès-Metz:** esta planta de producción de biodiésel es una de las más grandes de Francia y utiliza la tecnología de transesterificación. Está ubicada en la región de Gran Este, cerca de Metz.

- **Diester Industrie en Saint-Nazaire:** esta planta de producción de biodiésel también utiliza la tecnología de transesterificación. Está ubicada en la ciudad de Saint-Nazaire, en la región de Países del Loira.
- **Saipol en Grand-Couronne:** Saipol es una de las principales empresas productoras de biodiésel en Francia y tiene varias plantas en el país. Una de sus plantas, ubicada en la localidad de Grand-Couronne, utiliza la tecnología de transesterificación.
- **Sophia Oléique en Béziers:** esta planta de producción de biodiésel se encuentra en la ciudad de Béziers, en la región de Occitania. Utiliza la tecnología de transesterificación y se especializa en la producción de biodiésel a partir de aceite de colza.

Existen otras plantas distribuidas en diferentes regiones del país que también utilizan esta tecnología para la producción de biodiésel a partir de diferentes materias primas.

— *Producción de biodiésel utilizando la tecnología de microalgas*

La producción de biodiésel utilizando microalgas en Francia ha aumentado en los últimos años debido a su potencial como fuente sostenible de energía renovable. El proceso de producción de biodiésel a partir de microalgas implica el crecimiento de las algas en grandes tanques o estanques que están expuestos a la luz solar y se les suministra nutrientes.

Una vez que las microalgas han alcanzado un nivel óptimo de crecimiento, se recolectan y se procesan para extraer el aceite de las células de las algas. Este aceite se convierte en biodiésel a través de un proceso de transesterificación.

En Francia, varias empresas y centros de investigación están involucrados en la producción de biodiésel a partir de microalgas. Algunas de las empresas más destacadas incluyen AlgoSource Technologies, una empresa dedicada al desarrollo de tecnologías de biotecnología de microalgas, y Fermentalg, una empresa que utiliza microalgas para producir biocombustibles y productos químicos renovables.

La producción de biodiésel a partir de microalgas ofrece varias ventajas en comparación con otras fuentes de biocombustibles. Las microalgas tienen una alta tasa de crecimiento y pueden cultivarse en condiciones controladas para maximizar su producción. Además, las algas pueden cultivarse en tierras no aptas para la agricultura, lo que minimiza la competencia con la producción de alimentos. También absorben dióxido de carbono de la atmósfera durante su crecimiento, lo que ayuda a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. Sin embargo, la producción de biodiésel a partir de microalgas también presenta desafíos.

El proceso de cultivo de algas a gran escala requiere una cantidad significativa de agua y nutrientes, lo que puede aumentar los costos de producción. Además, el procesamiento de las algas y la extracción del aceite también pueden ser costosos. Por lo tanto, en Francia se ha considerado necesario seguir investigando y desarrollando tecnologías para reducir los costos y mejorar la eficiencia en la producción de biodiésel a partir de microalgas.

La producción de biodiésel utilizando el proceso de microalgas está en crecimiento en Francia debido a su potencial como fuente sostenible de energía renovable. Aunque enfrenta desafíos en términos de costos y eficiencia, se espera que esta tecnología continúe desarrollándose y juegue un papel importante en la transición hacia una economía más sostenible y menos dependiente de los combustibles fósiles.

— *Localización de las plantas de producción de biodiésel que utilizan la tecnología de microalgas*

Hay varias plantas de producción de biodiésel que utilizan la tecnología de microalgas en Francia. Algunas de ellas son:

- **AlgoSource:** esta compañía tiene una planta de producción de biodiésel a base de microalgas en la ciudad de Pessac, en el suroeste de Francia. Utilizan la tecnología de cultivo de microalgas en reactores cerrados para producir biodiésel y otros productos a base de algas.
- **Fermentalg:** esta empresa tiene una planta de producción de biodiésel a base de microalgas en Libourne, en la región de Aquitania, en el suroeste

de Francia. Utilizan una tecnología de producción patentada para cultivar microalgas y convertirlas en biodiésel.

- **GreenWatt:** esta empresa tiene una planta de producción de biodiésel a base de microalgas en Les Ulis, en la región de Isla de Francia, en el norte de Francia. Utilizan una tecnología de cultivo de microalgas en fotobiorreactores para producir biodiésel y otros productos a base de algas.

— *Producción de biodiésel utilizando la tecnología de hidrogenación catalítica*

Francia ha sido un país pionero en la producción de biodiésel utilizando el proceso de hidrogenación catalítica. Este proceso consiste en la transformación de los aceites vegetales o grasas animales en biodiésel renovable mediante la adición de hidrógeno bajo la presencia de un catalizador.

La producción de biodiésel renovable a partir de este proceso se ha convertido en una alternativa sostenible para reducir la dependencia de los combustibles fósiles y disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero en el sector del transporte.

En Francia, existen numerosas plantas productoras de biodiésel renovable que utilizan este proceso de hidrogenación catalítica. Estas plantas utilizan materias primas como el aceite de colza, girasol, soja, palma y grasas animales para obtener un biodiésel de alta calidad.

El proceso de hidrogenación catalítica se lleva a cabo en grandes reactores bajo condiciones controladas de temperatura y presión.

Primero, las grasas o los aceites se someten a un proceso de limpieza y desacidificación para eliminar impurezas y ácidos grasos libres. Posteriormente, se realiza la hidrogenación catalítica mediante la adición de hidrógeno y la presencia de un catalizador (generalmente, óxido de níquel). Durante la reacción, los enlaces insaturados presentes en los aceites se saturan con hidrógeno, transformándose en ésteres metílicos o etílicos de ácidos grasos, que conforman el biodiésel renovable.

Una vez finalizada la reacción, se procede a la separación y purificación del biodiésel obtenido. Este proceso incluye la eliminación de impurezas, de agua y de

glicerina residual. El producto final es un biodiésel renovable de muy alta calidad que cumple con las normativas internacionales de calidad y puede ser utilizado como biocombustible en motores diésel sin necesidad de realizar modificaciones.

La producción de biodiésel renovable mediante el proceso de hidrogenación catalítica en Francia ha experimentado un crecimiento significativo en los últimos años, debido a los beneficios ambientales y económicos que ofrece. Además, el Gobierno francés ha implementado políticas y medidas de apoyo a la producción y uso de biocombustibles, lo que ha incentivado aún más su desarrollo en el país.

La producción de biodiésel renovable utilizando el proceso de hidrogenación catalítica en Francia ha sido exitosa y ha contribuido a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero y a la diversificación de las fuentes energéticas en el sector del transporte.

— *Localización de las plantas de producción de biodiésel que utilizan la tecnología de hidrogenación catalítica*

En Francia, existen varias plantas de producción de biodiésel renovable que utilizan la tecnología de hidrogenación catalítica; algunas de ellas son:

- **Total Raffinage Chimie:** esta planta, ubicada en la ciudad de Dunkerque, es una de las más grandes de Francia y cuenta con una capacidad de producción de biodiésel renovable de 500.000 toneladas por año. Utiliza la tecnología de hidrogenación catalítica.
- **Avril Group:** este grupo agroindustrial francés cuenta con varias plantas de producción de biodiésel renovable en todo el país. Una de las plantas más importantes está ubicada en la ciudad de Sète, con una capacidad de producción de 250.000 toneladas por año. También utilizan la tecnología de hidrogenación catalítica en sus procesos de producción.
- **Diester Industrie:** esta empresa es una de las principales productoras de biodiésel renovable en Francia y cuenta con varias plantas de producción en distintas ubicaciones del país, como Le Havre y Montoir-de-Bretagne. Utilizan la tecnología de hidrogenación catalítica para producir biodiésel renovable a partir de aceites vegetales y grasas animales.

Estas son solo algunas de las principales, hay otras plantas más pequeñas ubicadas en diferentes regiones del país.

— *Producción de biodiésel utilizando la tecnología de Fischer-Tropsch en Francia*

La producción de biodiésel utilizando el proceso de Fischer-Tropsch en Francia se encuentra en desarrollo y está ganando cada vez más popularidad entre los investigadores franceses como una alternativa sostenible al combustible fósil.

Mediante este proceso, se pueden convertir materias primas vegetales, como aceites vegetales y grasas animales, en biodiésel de alta calidad. El proceso de Fischer-Tropsch es un proceso de síntesis química que convierte los hidrocarburos en combustibles líquidos a través de una serie de reacciones. En este caso, se utilizan materias primas de origen vegetal que contienen ácidos grasos, los cuales se transforman en hidrocarburos mediante la reacción de Fischer-Tropsch.

Este método de producción de biodiésel ofrece varias ventajas, como la posibilidad de utilizar una amplia gama de materias primas, la mayor eficiencia energética en comparación con otros procesos y la producción de un combustible de alta calidad con bajos niveles de contaminantes. Sin embargo, también existen desafíos asociados con la producción de biodiésel utilizando el proceso de Fischer-Tropsch, como el costo y la disponibilidad de las materias primas, la necesidad de desarrollar y optimizar aún más la tecnología y la garantía de la sostenibilidad y la trazabilidad de las materias primas utilizadas.

En resumen, la producción de biodiésel utilizando el proceso de Fischer-Tropsch en Francia está en aumento y ofrece una alternativa sostenible al combustible fósil. Se espera que esta tendencia continúe en el futuro, ya que el país trabaja con empeño para alcanzar sus objetivos de reducción de emisiones y promueve el uso de biocombustibles especialmente en el sector del transporte público y privado.

— *Localización de las plantas de producción de biodiésel que utilizan la tecnología de Fischer-Tropsch en Francia*

Aunque la información específica sobre las plantas de producción de biodiésel que utilizan la tecnología de Fischer-Tropsch en Francia no está muy consolidada, se

confirma que existen varias plantas que están empleando esta tecnología de punta. Algunas de ellas son:

- **Total**: localizada en La Mède, cerca de Marsella, es una de las principales productoras de biodiésel en Francia. Aunque no se menciona específicamente la tecnología utilizada, es posible que utilicen Fischer-Tropsch en su proceso de producción.
- **Diester Industrie**: es una empresa francesa especializada en la producción de biodiésel. Tienen varias plantas en Francia, incluyendo una en la región de Champagne-Ardenne, que podrían utilizar la tecnología de Fischer-Tropsch.
- **Avril**: es otro importante productor de biodiésel en Francia. Tienen varias plantas de producción en el país, como en la región de Normandía, que podrían utilizar la tecnología de Fischer-Tropsch.

Es importante tener en cuenta que existen otras plantas de biodiésel en Francia que utilizan esta tecnología.

— *Maquinaria tecnológica utilizada en Francia para la producción de biodiésel*

En Francia, existen diversas maquinarias tecnológicas utilizadas en la producción de biodiésel. Algunas de las más comunes incluyen:

- **Reactores de transesterificación:** estos reactores son utilizados para llevar a cabo el proceso de transesterificación, que convierte los aceites vegetales o grasas animales en biodiésel. Los reactores pueden ser de diferentes tamaños y capacidades, dependiendo de las necesidades de producción.
- **Decantadores y centrifugadoras:** estos equipos son utilizados para separar el biodiésel producido de los subproductos y residuos líquidos. Los decantadores se utilizan para dejar reposar la mezcla y que los componentes se separen naturalmente, mientras que las centrifugadoras aceleran el proceso de separación mediante fuerzas centrífugas.
- **Equipos de filtración:** después de la transesterificación, es necesario filtrar el biodiésel para eliminar cualquier impureza o partícula sólida que pueda

afectar su calidad. Los equipos de filtración, como filtros de membrana o filtros de prensa, son utilizados para este propósito.

- **Tanques de almacenamiento**: los tanques de almacenamiento son utilizados para almacenar el biodiésel producido antes de ser transportado o utilizado. Los tanques deben ser construidos con materiales compatibles con el biodiésel, como acero inoxidable o polietileno de alta densidad, para evitar la corrosión o la contaminación del producto.
- **Equipo de análisis:** El control de calidad es fundamental en la producción de biodiésel. Por lo tanto, se utilizan equipos de análisis para medir parámetros como la densidad, el contenido de agua, el contenido de glicerina y el punto de inflamación del biodiésel, entre otros.

En general, estas son solo algunas de las maquinarias de tecnología de punta que se utilizan en Francia para la producción de biodiésel y biodiésel renovable. La elección y el uso de estas máquinas dependerán del tamaño de la planta de producción y de los procesos específicos implementados en cada caso. Es importante destacar que la maquinaria utilizada en la producción de biodiésel puede variar de una planta a otra y dependerá del tamaño y la capacidad de producción de cada instalación. Además, la tecnología utilizada en la producción de biodiésel renovable está en constante evolución, con nuevas innovaciones y mejoras para aumentar la eficiencia y reducir el impacto ambiental.

4.4.2.3 Tecnologías para la producción de bioetanol

En Francia, la producción de bioetanol se realiza en plantas industriales especializadas, que cuentan con tecnología avanzada y cumplen con estrictas normas de seguridad y calidad. Estas plantas operan a gran escala y su producción se destina tanto al mercado interno como a la exportación.

El bioetanol producido en Francia se utiliza principalmente como aditivo en mezclas de combustible, especialmente en gasolina. El bioetanol puede mezclarse en proporciones variables con la gasolina, lo que reduce la dependencia de los combustibles fósiles y disminuye la emisión de gases de efecto invernadero.

Además de su uso como aditivo en combustibles, el bioetanol también se utiliza en la industria química como materia prima para la producción de plásticos, productos farmacéuticos y otros productos químicos.

La producción de bioetanol en Francia tiene un impacto positivo en la economía del país, ya que genera empleo en las zonas rurales donde se cultivan los cultivos utilizados para su producción y contribuye a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero. Sin embargo, la producción de bioetanol de primera generación también plantea algunos desafíos.

El uso de cultivos alimentarios para la producción de biocombustibles ha generado preocupaciones sobre la competencia con la producción de alimentos y el impacto en los precios de los cereales. Además, el proceso de producción de bioetanol requiere grandes cantidades de agua y energía, lo que plantea desafíos en términos de sostenibilidad.

Ante estos desafíos, en Francia se están investigando y desarrollando nuevas formas de producir técnicamente bioetanol de segunda y tercera generación, utilizando biomasa no alimentaria y residuos orgánicos. Estas tecnologías prometen ser más sostenibles y reducir el impacto ambiental de la producción de bioetanol.

La producción de bioetanol utilizando el proceso de fermentación de primera generación en Francia es una industria en crecimiento y con un gran potencial.

Si bien plantea desafíos en términos de sostenibilidad y competencia con la producción de alimentos, el bioetanol sigue siendo una alternativa prometedora como combustible renovable y materia prima para la industria química.

Es importante tener en cuenta que la ubicación de las plantas que se citan a continuación en relación al proceso utilizado puede cambiar con el tiempo, ya que la industria de biocombustibles continúa evolucionando.

En Francia, algunas de las principales tecnologías de punta utilizadas para la producción de bioetanol son:

- **Fermentación de primera generación:** se utiliza principalmente para producir bioetanol a partir de cultivos alimentarios como el maíz y la

remolacha azucarera. Este proceso implica el uso de enzimas para descomponer los azúcares en etanol.

- **Fermentación de segunda generación:** se utiliza para producir bioetanol a partir de biomasa no alimentaria como residuos agrícolas, astillas de madera y cultivos energéticos. Esta tecnología utiliza enzimas y microorganismos para descomponer los azúcares de la biomasa en etanol.
- **Gasificación:** se utiliza para producir bioetanol a partir de biomasa no alimentaria mediante la conversión de materiales sólidos en gas de síntesis. El gas de síntesis se puede convertir en etanol a través de diferentes procesos químicos.
- **Hidrólisis enzimática:** se utiliza para descomponer los carbohidratos de la biomasa en azúcares fermentables utilizando enzimas. Estos azúcares se pueden fermentar y convertir en bioetanol.
- **Destilación y purificación:** una vez que el bioetanol se ha producido, debe ser purificado para eliminar impurezas y obtener un producto final de alta calidad. La destilación se utiliza para separar el etanol del agua y otros compuestos volátiles.

Estas tecnologías se utilizan en diferentes plantas de producción de bioetanol en Francia, dependiendo de la materia prima utilizada y las eficiencias del proceso específico. El uso de tecnologías de segunda generación está aumentando en Francia para reducir la dependencia de los cultivos alimentarios y promover una producción más sostenible de bioetanol.

—*Proceso de fermentación de primera generación*

La producción de bioetanol utilizando el proceso de fermentación de primera generación en Francia es una industria en crecimiento y con un gran potencial. Francia es uno de los mayores productores de bioetanol de Europa, y gran parte de su producción se obtiene a partir de cultivos de cereales, especialmente, maíz y trigo.

El proceso de producción de bioetanol de primera generación consiste en la fermentación de los azúcares presentes en los cultivos, que luego se destilan y se

purifican para obtener el etanol. Este proceso es relativamente sencillo y ha sido utilizado durante décadas en la fabricación de licores y bebidas alcohólicas.

— *Localización de las plantas que utilizan fermentación de primera generación*

Existen varias plantas de producción de bioetanol que utilizan la tecnología de fermentación de primera generación en Francia. Algunas de las principales plantas son:

- **Tereos:** esta empresa tiene varias plantas de producción de bioetanol en Francia, incluyendo las ubicadas en Lillebonne, Arcis-sur-Aube y Origny-Sainte-Benoite.
- **Cristal Union:** esta cooperativa cuenta con varias plantas de producción de bioetanol en diferentes regiones de Francia, como Bazancourt, Pithiviers, Corbeilles-Essonnes y Etrépagny.
- **Roquette:** esta empresa tiene una planta de producción de bioetanol en Beinheim, en el noreste de Francia.
- **Vivescia:** esta cooperativa tiene una planta de producción de bioetanol en Nesle, en la región de Hauts-de-France.
- **Global Bioenergies:** esta empresa tiene una planta de demostración en Pomacle-Bazancourt, donde produce bioetanol a partir de azúcares no alimentarios.

— *Proceso de fermentación de segunda generación*

En Francia, la producción de bioetanol utilizando el proceso de fermentación de segunda generación se basa en tecnologías que aprovechan residuos agrícolas y forestales como materia prima. El uso esta materia prima reduce la competencia con la producción de alimentos y disminuye el impacto ambiental. Estas tecnologías se centran en la producción de etanol a partir de celulosa y hemicelulosa presentes en estos residuos. Por eso se consideran más sostenibles que las tecnologías de fermentación de primera generación que utilizan cultivos alimentarios como maíz o caña de azúcar.

Una de las tecnologías más utilizadas es la hidrólisis enzimática, donde se emplean enzimas para descomponer la celulosa y hemicelulosa en azúcares que

luego pueden ser fermentados en etanol. Este proceso es complejo y requiere de una serie de etapas, como el pretratamiento de la biomasa para romper su estructura y facilitar la acción de las enzimas, la sacarificación donde las enzimas convierten los azúcares complejos en azúcares simples y la fermentación donde las levaduras convierten los azúcares en etanol.

Otra tecnología utilizada es la hidrólisis ácida, que implica la aplicación de ácidos para descomponer la celulosa en azúcares. Luego de la hidrólisis ácida, se realiza una fermentación de los azúcares obtenidos para producir etanol.

En el país también se están desarrollando tecnologías como la fermentación simultánea de sacarificación y fermentación (SSF, por sus siglas en inglés), lo que permite una producción más eficiente y reduce costos. En Francia, estas tecnologías están siendo implementadas en plantas piloto y a pequeña escala, y se espera que en los próximos años se amplíe su uso y se incrementen las inversiones en este sector. El desarrollo y la implementación de tecnologías de producción de bioetanol de segunda generación es una prioridad tanto a nivel nacional como a nivel europeo, con el objetivo de promover la transición hacia una economía más sostenible y reducir la dependencia de los combustibles fósiles.

— *Localización de las plantas que utilizan fermentación de segunda generación*

En Francia, actualmente existen varias plantas de producción de bioetanol que utilizan la tecnología de fermentación de segunda generación. Algunas de estas plantas se encuentran en las siguientes ubicaciones:

- **Pomacle-Bazancourt:** esta planta, operada por la compañía Cristal Union, utiliza la tecnología de fermentación de segunda generación para producir bioetanol a partir de residuos agrícolas, como pajas y bagazos de remolacha azucarera.
- **Toulouse:** en esta ciudad, la compañía Tereos opera una planta de producción de bioetanol de segunda generación que utiliza tecnología de fermentación enzimática. La planta utiliza residuos de la producción de azúcar de remolacha y trigo para producir bioetanol.
- **Pas-de-Calais:** en esta región del norte de Francia, la compañía Roquette Frères opera una planta de producción de bioetanol de segunda

generación. La planta utiliza residuos agrícolas y residuos de la industria alimentaria, como cáscaras de patata y subproductos de almidón, para producir bioetanol.

- **Crespin:** La compañía Cristanol opera una planta de producción de bioetanol en Crespin, utilizando tecnología de fermentación de segunda generación. La planta utiliza residuos agrícolas, como pajas y bagazos de remolacha azucarera, para producir bioetanol.

A medida que la tecnología de fermentación de segunda generación avanza, es probable que se establezcan más plantas en diferentes ubicaciones del país.

— *Proceso de gasificación*

En Francia, se utilizan diversas tecnologías de producción de bioetanol utilizando el proceso de gasificación. Estas tecnologías se basan en la conversión de biomasa, como residuos agrícolas y forestales, en gas de síntesis (una mezcla de monóxido de carbono e hidrógeno). A continuación, el gas de síntesis obtenido se convierte en el bioetanol esperado a través de un proceso de fermentación.

Una de las tecnologías más utilizadas es la gasificación de biomasa a alta temperatura en un gasificador. Este gasificador calienta la biomasa en ausencia de oxígeno, lo que produce gas de síntesis. Este gas se trata y se convierte en bioetanol mediante procesos de purificación y fermentación.

Otra tecnología utilizada es la gasificación en lecho fluidizado. En este proceso, la biomasa se mezcla con un fluido a alta temperatura, que actúa como un lecho fluido. La biomasa se gasifica y se convierte en gas de síntesis, que luego se trata y se convierte en bioetanol. Además, se están desarrollando tecnologías de gasificación avanzadas en Francia, como la gasificación en plasma. En este proceso, la biomasa se expone a un plasma generado mediante un arco eléctrico de alta temperatura. Esto descompone la biomasa en un gas de síntesis, que luego se convierte en bioetanol.

Estas tecnologías de producción de bioetanol mediante gasificación ofrecen importantes ventajas como la utilización de la biomasa residual y la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), en comparación con las

emisiones atmosféricas generadas por los combustibles fósiles. Sin embargo, también presentan desafíos en términos de tecnología, costos y disponibilidad de biomasa.

— *Localización de las plantas que utilizan gasificación*

En Francia, hay varias plantas de producción de bioetanol que utilizan la tecnología de gasificación. Algunas de las localizaciones incluyen:

- **Pomacle-Bazancourt:** esta planta se encuentra en la región de Champaña-Ardenas, al noreste de Francia. Es operada por una empresa llamada Cristal Union y utiliza la tecnología de gasificación para producir bioetanol a partir de residuos agrícolas y forestales.
- **Le Lion-d'Angers:** esta planta está ubicada en la región de Países del Loira, en el oeste de Francia. Es operada por una empresa llamada Tereos y utiliza la tecnología de gasificación para producir bioetanol a partir de residuos de cultivos como el trigo y la remolacha.
- **Lacq:** esta planta se encuentra en la región de Nueva Aquitania, en el suroeste de Francia. Es operada por una empresa llamada Global Bioenergies y utiliza la tecnología de gasificación para producir bioetanol a partir de biomasa lignocelulósica, como la paja y los residuos agrícolas.

Se resalta que es posible que existan otras ubicaciones de este tipo de plantas productoras de bioetanol en el país francés.

— *Proceso de hidrólisis enzimática*

La producción de bioetanol utilizando el proceso de hidrólisis enzimática se ha convertido en una tecnología popular en Francia, ya que permite utilizar diversas fuentes de biomasa para la producción de combustibles renovables. En el país, se utilizan principalmente dos tipos de biomasa para la producción de bioetanol: cereales y remolacha azucarera. En el caso de los cereales, se emplea principalmente el trigo y la cebada, mientras que para la remolacha azucarera se utiliza principalmente el azúcar contenido en esta planta.

El proceso de hidrólisis enzimática implica la descomposición de los carbohidratos presentes en la biomasa en azúcares fermentables utilizando

enzimas. Este proceso se realiza en reactores biológicos donde se añaden las enzimas y la biomasa, y se controlan cuidadosamente las condiciones de temperatura y pH. Una vez que se ha realizado la hidrólisis enzimática, los azúcares fermentables obtenidos se pueden utilizar para la producción de bioetanol a través de la fermentación. Para esto, se añaden levaduras u otros microorganismos que transforman los azúcares en etanol y dióxido de carbono.

La producción de bioetanol utilizando el proceso de hidrólisis enzimática presenta varias ventajas en comparación con otros métodos de producción de bioetanol. En primer lugar, este proceso permite utilizar diferentes fuentes de biomasa, lo que aumenta la disponibilidad de materias primas y reduce la dependencia de los cultivos tradicionales. Además, la hidrólisis enzimática puede ser más eficiente que otros métodos de producción de bioetanol, ya que las enzimas pueden descomponer los carbohidratos de la biomasa de manera más efectiva. Esto puede resultar en una mayor producción de bioetanol por tonelada de biomasa utilizada.

A nivel de políticas públicas, Francia ha incentivado la producción de bioetanol utilizando el proceso de hidrólisis enzimática a través de programas de apoyo y subsidios. Estos programas están diseñados para promover la producción de combustibles renovables y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero.

En resumen, la tecnología de producción de bioetanol utilizando el proceso de hidrólisis enzimática se ha convertido en una opción prometedora en Francia. Esta tecnología permite utilizar diferentes fuentes de biomasa y puede ser más eficiente que otros métodos de producción de bioetanol. A través de políticas de apoyo, Francia ha fomentado el desarrollo de esta tecnología para promover la producción de combustibles renovables.

— *Localización de las plantas que utilizan hidrólisis enzimática*

En Francia, hay varias plantas de producción de bioetanol que utilizan la tecnología de hidrólisis enzimática. Algunas de las principales ubicaciones son:

- **Pomacle-Bazancourt:** ubicada en la región de Grand Est, es la planta de bioetanol más grande de Francia y utiliza tecnología de hidrólisis enzimática. Es operada por el Grupo Tereos.
- **Saint-Nazaire:** ubicada en la región de Países del Loira, esta planta de bioetanol también utiliza la tecnología de hidrólisis enzimática. Es operada por la compañía Cristal Union.
- **La Mède:** ubicada en la región de Provenza-Alpes-Costa Azul, esta planta de producción de bioetanol también utiliza tecnología de hidrólisis enzimática. Es operada por el Grupo Total.

La industria del bioetanol en Francia está en constante expansión y es probable que haya más plantas en diferentes ubicaciones en el país.

— *Proceso de destilación y purificación*

Francia es uno de los principales productores de bioetanol en Europa y utiliza diversas tecnologías de producción que incluyen el proceso de destilación y purificación. El bioetanol se produce a partir de materias primas vegetales como la caña de azúcar, el maíz, el trigo y la remolacha azucarera. Estas materias primas se someten a un proceso de fermentación en el cual las enzimas convierten los azúcares en etanol.

Una vez que se ha producido el bioetanol, se somete a un proceso de destilación para separar el alcohol del resto de los componentes. En este proceso, se utiliza una columna de destilación que separa el etanol del agua y otros compuestos indeseables. La columna de destilación funciona mediante la aplicación de calor y el gradiente de presión para separar los diferentes componentes. Luego una vez separado el etanol, se somete a un proceso de purificación para eliminar los compuestos indeseables y obtener un producto final de alta calidad. Este proceso de purificación incluye la eliminación de impurezas como aldehídos, éteres y alcoholes superiores a través de técnicas como la filtración y la adsorción.

Francia también utiliza tecnologías de producción avanzadas que permiten una mayor eficiencia y reducción de los costos. Por ejemplo, se han implementado

procesos de fermentación enzimática que permiten obtener mayores rendimientos de etanol con menor consumo de energía. Además, se ha desarrollado la producción de bioetanol a partir de residuos agrícolas y forestales, lo que reduce la competencia por alimentos con la producción de biocombustibles.

En resumen, Francia utiliza tecnologías de producción de bioetanol que incluyen el proceso de destilación y purificación para obtener un producto final de alta calidad. Además, se han implementado tecnologías avanzadas que permiten una mayor eficiencia y sostenibilidad en la producción de bioetanol.

— *Localización de las plantas que utilizan destilación y purificación*

Hay varias plantas de producción de bioetanol que utilizan la tecnología de destilación y purificación en Francia. Algunas de las principales plantas son:

- **La planta de Cristanol en Bazancourt:** esta planta, propiedad de Cristal Union, es una de las mayores plantas de bioetanol de Europa. Utiliza tecnología de destilación y purificación para producir etanol a partir de remolacha azucarera.
- **La planta de Téréos en Origny-Sainte-Benoite:** esta planta también utiliza tecnología de destilación y purificación para producir etanol a partir de remolacha azucarera. Téréos es otro de los principales productores de bioetanol en Francia.
- **La planta de Roquette en Lestrem:** esta planta produce bioetanol a partir de trigo y utiliza tecnología de destilación y purificación. Roquette es una empresa líder en la producción de ingredientes y productos químicos derivados de productos agrícolas.

Es importante anotar que xisten otras plantas de menor tamaño localizadas en diferentes regiones del país.

— *Maquinaria tecnológica para la producción de bioetanol*

Francia utiliza una gran variedad de maquinaria tecnológica en la producción de bioetanol. Estas incluyen:

- **Reactores de fermentación:** se utilizan para llevar a cabo la fermentación de los materiales vegetales, como el maíz, la remolacha azucarera o la caña de azúcar, convirtiendo los azúcares en alcohol.
- **Destiladores:** se utilizan para separar el alcohol del líquido fermentado, mediante el proceso de destilación.
- **Centrífugas:** se utilizan para separar los sólidos y líquidos en suspensión durante la etapa de fermentación.
- **Tanques de almacenamiento:** se utilizan para almacenar el bioetanol producido antes de ser enviado a la distribución.
- **Secadores:** se utilizan para eliminar la humedad de los materiales vegetales antes de la fermentación.
- **Preparadores de biomasa:** se utilizan para triturar y preparar la biomasa vegetal, como el maíz o la caña de azúcar, para su posterior procesamiento.
- **Equipos de control y monitoreo:** se utilizan para monitorear y controlar los diferentes parámetros del proceso de producción, como la temperatura, el pH y la presión.

La maquinaria y tecnología utilizada puede variar según la planta de producción y el tipo de biomasa manipulada.

4.4.2.4 Tecnologías para la producción de biogás

En Francia, se utilizan varias tecnologías para la producción de biogás.

Algunas de las más comunes incluyen:

- **Digestión anaerobia:** esta es la tecnología más comúnmente utilizada en Francia para la producción de biogás. Se basa en la descomposición de la materia orgánica en ausencia de oxígeno para producir biogás. Se utiliza para tratar residuos orgánicos, como estiércol, lodos de depuradoras y desechos agrícolas.
- **Plantas de biometanización:** estas plantas utilizan tecnología de digestión anaerobia para convertir los residuos orgánicos en biogás de alta calidad, que luego se purifica para producir biometano. El biometano producido

puede ser utilizado como combustible para vehículos o inyectado en la red de gas natural.

- **Plantas de tratamiento de aguas residuales:** muchas plantas de tratamiento de aguas residuales en Francia utilizan tecnología de digestión anaerobia para el tratamiento de lodos de depuradoras. Esto no solo permite obtener biogás, sino que también reduce la cantidad de lodos que deben ser eliminados.
- **Fermentación en seco:** esta tecnología se utiliza principalmente para tratar residuos agrícolas, como paja, maíz o hierba. Los materiales se tratan de forma anaerobia en un digestor en seco, produciendo biogás que puede ser utilizado como combustible o para generar electricidad en gran escala.

El país tiene una industria creciente en esta área y está invirtiendo en la expansión de la producción de biogás y biometano como fuentes de energía renovable.

— *Proceso de digestión anaerobia*

En Francia, se emplean diversas tecnologías de producción de biogás utilizando el proceso de digestión anaerobia. Algunas de las principales tecnologías más utilizadas en este país europeo incluyen:

- **Plantas de digestión en tanques convencionales:** esta tecnología consiste en la utilización de tanques de acero inoxidable o concreto para la digestión anaerobia de los residuos orgánicos. Los tanques están equipados con sistemas de agitación y control de temperatura para promover la descomposición de los materiales y la producción de biogás.
- **Plantas de digestión en co-digestión:** esta tecnología implica la mezcla de diferentes tipos de residuos orgánicos, como desechos agrícolas, residuos de alimentos y lodos de depuradoras, para incrementar la producción de biogás. Estas plantas suelen ser más eficientes y rentables que las plantas de digestión convencionales.
- **Plantas de digestión de alta carga:** las plantas de digestión de alta carga utilizan tecnologías de pretratamiento de los residuos orgánicos, como la

trituración y la separación sólido-líquido, para aumentar la eficiencia del proceso de digestión anaerobia. Estas plantas suelen utilizarse para el tratamiento de grandes cantidades de residuos orgánicos, como los residuos de alimentos de los supermercados o los residuos de la industria agroalimentaria.

- **Plantas de digestión en sistemas de lecho fluidizado:** en este tipo de plantas, los residuos orgánicos se mezclan con un material inerte, como arena o arcilla, para formar un lecho fluidizado. Este lecho facilita la descomposición de los materiales y permite una mayor producción de biogás.

La elección de la tecnología depende de diversos factores, como el tipo de residuo orgánico a tratar, la escala de producción y los recursos disponibles en el país.

— *Localización de las plantas que utilizan digestión anaerobia*

En Francia, existen varias plantas de producción de biogás que utilizan la tecnología de digestión anaerobia. Algunas de estas plantas incluyen:

- **Planta de biometano de Bessens:** ubicada en la región de Occitania, esta planta es una de las más grandes de Francia y tiene una capacidad de producción de biometano de, aproximadamente, 60 GWh por año.
- **Planta de biogás de Valenton:** situada en la región de Isla de Francia, esta planta convierte los residuos orgánicos en biogás y tiene una capacidad de producción de 8 GWh por año.
- **Planta de biogás de Plessé:** localizada en la región de Países del Loira, esta planta utiliza residuos agrícolas y de la industria agroalimentaria para producir biogás y tiene una capacidad de producción de 2,5 GWh por año.
- **Planta de biogás de Val d'Argent:** situada en la región de Gran Este, esta planta utiliza residuos orgánicos de la industria agroalimentaria para producir biogás y tiene una capacidad de producción de 5 GWh por año.

El país cuenta con diversas instalaciones distribuidas en diferentes regiones, las cuales contribuyen a la producción de energía renovable y a la reducción de los gases de efecto invernadero.

— *Uso plantas de biometanización*

En Francia, existen varias tecnologías de producción de biogás utilizando plantas de biometanización. Algunas de estas tecnologías son:

- **Digestión anaerobia:** esta tecnología es la más común en Francia y consiste en descomponer la materia orgánica en ausencia de oxígeno para producir biogás. Se utilizan digestores en los que los residuos orgánicos se fermentan y se descomponen por bacterias para producir biogás.
- **Fermentación seca:** esta tecnología se basa en la descomposición de los residuos orgánicos por bacterias en condiciones controladas de humedad y temperatura. Los residuos se someten a un proceso de deshidratación para eliminar el exceso de agua y luego se fermentan para producir biogás.
- **Fermentación húmeda:** esta tecnología es similar a la digestión anaerobia, pero se utiliza un mayor contenido de agua en los residuos orgánicos. Los residuos se mezclan con agua y se fermentan en digestores para producir biogás.
- **Codigestión:** esta tecnología consiste en mezclar diferentes tipos de residuos orgánicos, como estiércol, residuos de comida y residuos de cultivos, para obtener una mayor producción de biogás. La codigestión permite aprovechar diferentes fuentes de residuos y maximizar la producción de biogás.

— *Localización de las plantas de biometanización*

Francia cuenta con varias plantas de biometanización para la producción de biogás distribuidas en diferentes regiones del país. Algunas de las localizaciones más destacadas son:

- **Planta de biometanización de Valenton:** ubicada en Valenton, en la región de Isla de Francia, esta planta es una de las más grandes y tiene

una capacidad de producción de biogás de aproximadamente 424 GWh al año.

- **Planta de biometanización de Saorge:** situada en Saorge, en la región de Provenza-Alpes-Costa Azul, esta instalación utiliza residuos orgánicos y vegetales para producir biogás y cuenta con una capacidad de 1,3 GWh al año.
- **Planta de biometanización de Saint-Brieuc:** localizada en Saint-Brieuc, en la región de Bretaña, esta planta es una de las más recientes y tiene una capacidad de producción de biogás de aproximadamente 4 GWh al año.
- **Planta de biometanización de Strasbourg:** ubicada en Strasbourg, en la región de Gran Este, esta instalación utiliza residuos orgánicos y lodos de depuradoras para producir biogás y cuenta con una capacidad de 1,6 GWh al año.
- **Planta de biometanización de Calais:** situada en Calais, en la región de Altos de Francia, esta planta produce biogás a partir de residuos orgánicos y tiene una capacidad de 1 GWh al año.

El uso de biogás como fuente de energía renovable está cada vez más en auge en Francia, contribuyendo a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y promoviendo la transición hacia una economía más sostenible.

— *Uso de plantas de tratamiento de aguas residuales*

En Francia, se utilizan diversas tecnologías de producción de biogás utilizando plantas de tratamiento de aguas residuales. Algunas de las tecnologías más comunes son:

- **Digestión anaeróbica:** esta tecnología consiste en el proceso de descomposición de la materia orgánica en ausencia de oxígeno. Se utiliza en las plantas de tratamiento de aguas residuales para descomponer los lodos orgánicos generados durante el tratamiento y producir biogás.
- **Codigestión:** esta tecnología consiste en la mezcla de diferentes tipos de residuos orgánicos, como lodos de aguas residuales, residuos agrícolas o residuos de la industria de alimentos, con el fin de aumentar la producción

de biogás. Se utiliza en plantas de tratamiento de aguas residuales para aprovechar los residuos orgánicos disponibles en la región.

- **Digestión termofílica:** esta tecnología consiste en realizar el proceso de digestión anaeróbica a una temperatura más elevada que la tradicional, generalmente entre 50 °C y 60 °C. Esto permite una mayor eficiencia en la descomposición de la materia orgánica y una mayor producción de biogás.
- **Digestión en fases:** esta tecnología consiste en dividir el proceso de digestión anaeróbica en varias fases, lo que permite una mayor eficiencia en la producción de biogás y una menor generación de residuos. Se utiliza en plantas de tratamiento de aguas residuales de mayor tamaño.

Cabe destacar que la elección de la tecnología dependerá de diversos factores, como el tamaño de la planta, los recursos disponibles y los objetivos de producción de biogás.

— *Localización de las plantas de tratamiento de aguas residuales*

En Francia, existen varias plantas de tratamiento de aguas residuales que producen biogás. Algunas de estas instalaciones se encuentran en las siguientes ubicaciones:

- **Nantes:** la planta de tratamiento de aguas residuales de Nantes produce biogás a partir del tratamiento de los desechos orgánicos. El biogás se utiliza para generar electricidad y calor.
- **París:** la planta de tratamiento de aguas residuales de Seine Aval, ubicada en la región de París, utiliza los desechos orgánicos para producir biogás que se utiliza como combustible en la planta.
- **Marsella:** la planta de tratamiento de aguas residuales de Marsella también produce biogás a partir de los desechos orgánicos. Este biogás se utiliza para generar electricidad y calor.
- **Estrasburgo:** la planta de tratamiento de aguas residuales de Estrasburgo cuenta con una unidad de digestión anaeróbica que convierte los desechos orgánicos en biogás.

Se resalta que hay muchas otras instalaciones en todo el país que también utilizan esta tecnología.

— *Proceso de fermentación en seco*

En Francia, algunas de las tecnologías de producción de biogás utilizando el proceso de fermentación en seco son:

- **Digestores anaeróbicos de alta carga:** estos equipos permiten la fermentación en seco de los residuos orgánicos, como residuos agrícolas y residuos de alimentos, sin la presencia de oxígeno. Los residuos se descomponen y producen biogás, que luego se puede utilizar para generar electricidad o calor.
- **Reactores UASB (*upflow anaerobic sludge blanket*):** estos reactores de lecho de fango anaeróbico ascendente se utilizan para el tratamiento de aguas residuales y la producción de biogás. Los residuos orgánicos se introducen en el reactor, donde son fermentados por bacterias anaeróbicas y producen biogás.
- **Sistemas de digestión en seco de lotes:** estos sistemas se utilizan para el tratamiento de residuos orgánicos sólidos, como residuos agrícolas, de alimentos y de jardín. Los residuos se introducen en un tanque de fermentación, donde son descompuestos por bacterias anaerobias y se produce biogás.

Además de la generación del biogás, estos sistemas también pueden producir biofertilizantes, que pueden utilizarse para mejorar ostensiblemente la fertilidad de los suelos agrícolas.

— *Localización de las plantas que utilizan la tecnología de fermentación en seco*

La ubicación de las principales plantas de producción de biogás que utilizan la tecnología de fermentación en seco en Francia se muestra a continuación:

- **Planta de biogás de Cestas:** esta planta está ubicada en Cestas, cerca de Burdeos, en la región de Nouvelle-Aquitaine. Es una de las plantas más grandes de Francia y utiliza la tecnología de fermentación en seco para convertir los residuos orgánicos en biogás.

- **Planta de biogás de Saint-Pierre-Montlimart:** esta planta se encuentra en Saint-Pierre-Montlimart, en la región de Países del Loira. También utiliza la tecnología de fermentación en seco y se dedica, principalmente, al tratamiento de residuos agrícolas y lodos de estaciones depuradoras de aguas residuales.
- **Planta de biogás de Val de Moder:** esta planta está ubicada en Val de Moder, en la región de Alsacia. Utiliza la tecnología de fermentación en seco y procesa principalmente residuos de alimentos y estiércol para producir biogás.

Estas son solo algunos ejemplos, hay varias plantas más en todo el país que utilizan esta tecnología para convertir los residuos orgánicos en energía renovable.

— *Maquinaria tecnológica utilizada para la producción de biogás*

En Francia, la maquinaria tecnológica utilizada en la producción de biogás incluye los siguientes equipos:

- **Reactor anaeróbico:** este es el corazón del sistema de producción de biogás. Es donde ocurre la descomposición de la materia orgánica mediante la acción de bacterias anaeróbicas. Existen diferentes tipos de reactores anaeróbicos, como los digestores de flujo continuo, los UASB (*upflow anaerobic sludge blanket*) y los de mezcla completa.
- **Alimentador de biomasa:** este equipo se encarga de suministrar la materia orgánica al reactor anaeróbico de manera continua. Puede ser un sistema de alimentación automatizado que dosifica y transporta la biomasa al reactor.
- **Sistema de agitación:** para asegurar una mezcla homogénea en el reactor anaeróbico, se utilizan dispositivos de agitación, como bombas y agitadores. Esto es importante para mantener las condiciones óptimas de temperatura y pH en el reactor y garantizar una buena degradación de la biomasa.
- **Sistema de recolección de biogás:** el biogás producido en el reactor anaeróbico debe ser recolectado de forma eficiente. Para ello, se utilizan

sistemas de recolección de biogás que consisten en tuberías y colectores que captan el gas en el reactor y lo dirigen hacia su posterior procesamiento y utilización.

- **Unidad de purificación del biogás:** el biogás producido contiene impurezas, como agua, dióxido de carbono y compuestos sulfurosos. Estas impurezas deben ser eliminadas para obtener un biogás de calidad que pueda ser utilizado como combustible o para la generación de electricidad. Para ello, se utilizan sistemas de purificación, como el proceso de lavado con agua y el proceso de absorción con aminas.
- **Generador de electricidad:** el biogás purificado se puede utilizar para generar electricidad a través de un generador de gas. Este equipo convierte la energía química del biogás en electricidad, la cual puede ser utilizada para alimentar la red eléctrica o ser autoconsumida en la planta de producción de biogás.

Cabe destacar que en Francia la elección de la maquinaria puede variar dependiendo del tamaño y tipo de planta de biogás, así como de los requerimientos específicos de cada proyecto de investigación, innovación y desarrollo tecnológico.

4.4.2.5 Implicaciones de carácter agrario

Las enfermedades fitosanitarias que afectan los cultivos de remolacha en Francia ha desembocado en la posibilidad de utilizar pesticidas neocotinoide para su tratamiento, esto se ha dado en contravía de sectores ecologistas, porque el cultivo de la remolacha representa un sector importante de la agricultura de país, considerando que Francia es el principal productor de azúcar de remolacha en Europa, con más de 26.000 productores que representan alrededor de 46.000 puestos de trabajo.

La discusión al respecto se ha dado por lo nocivo de estos agroquímicos para el ambiente y la salud, que ha provocado indignación de las organizaciones ecologistas y de los apicultores por afectación a los polinizadores, por lo que el sector de la remolacha tuvo que presentar un plan de prevención para proteger a

los polinizadores y tendrán que reducir el uso de neonicotinoides en los recubrimientos de semillas en un 25 %, en comparación con prácticas anteriores. A pesar de las numerosas oposiciones, el Gobierno se basó en el artículo 53 del reglamento europeo sobre productos fitosanitarios, que permite excepciones a la prohibición cuando existe *un peligro que no puede controlarse por otros medios razonables*. En ese sentido, el ministro de Agricultura francés anunció créditos de investigación para afrontar el reto de la transición y encontrar soluciones alternativas (Tounoux, 2020).

La industria azucarera y los productores de remolacha franceses han visto como la única manera de salvar el sector la utilización del insecticida conocido como los neonicotinoides, amenazado por la proliferación de un pulgón (*Myzus persicae*) y del virus amarillo (*virus de la jaunisse*), para evitar una fuerte caída de los rendimientos, hasta del 50 % de las cosechas, suficientes para amenazar la sostenibilidad de la industria azucarera francesa y sus 46.000 puestos de trabajo, buena parte de los cuales están en fábricas de transformación, estimó el Ministerio de Agricultura (Le Monde, 2020).

A pesar de la fuerte subida del precio del azúcar, el alcohol y el etanol que hizo que sus ventas se dispararan en el último trimestre de 2022, alrededor del 34 %, Tereos, segundo productor mundial de azúcar de remolacha (Béghin Say), cerró dos de sus nueve plantas, y como consecuencia se detuvo la actividad azucarera en Escaudoeuvres, al norte de Francia, con 123 puestos, y en su destilería Morains, en Marne, con 26 puestos. Estos cierres se dan como consecuencia de la caída de los volúmenes de remolacha esperados, que se explica principalmente por motivos agronómicos referentes a la rotación de cultivos, sequía y problemas fitosanitarios.

En tal sentido, la Confederación General de Productores de Remolacha (CGB) indicó que está sucediendo exactamente lo que se temía, referente a que las superficies para el cultivo de remolacha han disminuido alrededor de un 7 % en Francia y todo el sector está ahora en peligro, desde los productores hasta las fábricas de azúcar (La Croix, 2023), a pesar que el Ministerio de Agricultura anunció, desde inicios de 2023, que todas las posibles pérdidas para los

productores de remolacha serán compensadas si se afectan por problemas fitosanitarios en 2023.

Asimismo, es de mencionarse, con relación a subsidios gubernamentales, que en año 2020, los productores de remolacha franceses se enfrentaron a una crisis en la producción por el ataque del denominado virus amarillo (*virus de la jaunisse*), transmitido por pulgones y desarrollado masivamente en todas las regiones productoras francesas que tuvo un impacto muy fuerte en la producción de remolacha azucarera. Esta enfermedad provocó pérdidas de rendimiento de alrededor del 30 % en promedio, y dependiendo del manejo, podría superar el 60 % localmente. En este contexto, el Ministerio de Agricultura y Alimentación decidió crear un sistema para compensar las pérdidas de rendimiento, basado en la compensación de la pérdida entre el rendimiento de 2020 y el promedio de los tres mejores años, entre 2015 y 2019. Este sistema, estuvo disponible del 8 de marzo al 23 de abril de 2021, con el objetivo de permitir la continuidad de la actividad de plantación de remolacha azucarera (Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté alimentaire, 2023).

Asimismo, ante la afectación por episodios climáticos que destruyen las cosechas, se puso en marcha un "instrumento de estabilización de ingresos" (ISR), con el objetivo de proteger a los agricultores contra caídas significativas de sus ingresos. Esta herramienta, descrita en la normativa europea, permite compensar las pérdidas de ingresos en cuanto superan el 20 % respecto a una media histórica, gracias a un reglamento europeo general, que empezó a ser implementado en Francia en 2022, con la idea de que el Estado se hiciera cargo de los seguros. Esto da como resultado una financiación más allá de la agricultura y a través de un fondo de solidaridad nacional se pueden combinar aportes privados y fondos públicos hasta un máximo del 70 %, con un presupuesto de alrededor de 600 millones de euros al año (Desanti, 2022).

4.4.2.6 Estrategias de recolección, tratamiento y transporte de materias primas (experiencia y gestión en aprovechamiento de UCO)

El total del aceite de cocina usado en Francia se estima representa 66 millones de litros, de los cuales solo el 5 % se recicla y revaloriza en biocombustible.

Actualmente, la recolección de aceites comestibles usados en Francia se estima en alrededor de las 45.000 toneladas anuales, con un potencial estimado de más de 100.000 toneladas.

Aunque el aceite usado de cocina (UCO) está catalogado por el código medioambiental como un residuo no peligroso, está prohibido rigurosamente la eliminación a través de la red de agua o evacuación de residuos, ya que, con demasiada frecuencia, se arroja por el fregadero obstruyendo las redes de aguas residuales de los hogares. El incumplimiento de esta norma podrá dar lugar a una sanción de 2 años de prisión y una multa de 75.000 euros (artículo L216-6). El umbral previsto en el artículo R543-225, del Código de Medio Ambiente, aplicable a los residuos de aceites comestibles, fijó desde el 1º de enero de 2016 la obligación de aplicar políticas de reciclaje a generadores de más de 60 litros por año.

Para tal fin, los generadores deben elegir un operador debidamente registrado, los cuales deben cumplir con las obligaciones legales de recolección en los denominados centros de reciclaje. En términos generales, el servicio de recogida y reciclaje de aceite usado de cocina (UCO) es gratis para todos, ya sea residencia, comercial o industrial.

El ciclo para el manejo este aceite usado parte de forma general con la recogida en recipientes que son transportados para su posterior filtración y decantación, para luego procesarlo y generar la producción de biodiésel. Las grasas vegetales y animales, los aceites de cocina usados y el contenido de grasa se encuentran a una temperatura óptima de procesamiento y se bombean mediante una centrífuga de separación trifásica. Luego se separa el agua, el aceite y las partículas sólidas.



Figura 102. Recuperación de aceites comestibles usados

Fuente: (Suez., n.d.)

4.4.2.7 Porcentaje de mezclas de biocombustibles

En Francia, el bioetanol se usa como mezcla en la gasolina comercial en las siguientes proporciones (Ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des Territoires, n.d.):

- De manera sistemática en los supercarburantes SP95-ES (mezcla con 5 % de bioetanol) y SP95-E10 (mezcla con 10 % de bioetanol).
- En un nivel superior, el super etanol E85, que contiene entre 65 y 85 % de bioetanol. Este biocombustible está disponible en las estaciones de servicio desde 2007 y se destina a vehículos específicos (*flex fuel*).
- También se puede usar en forma de ED95, carburante con 95 % de bioetanol, destinado a vehículos con motores diésel, específicamente diseñados para este combustible y a flotas con una logística específica de suministro y mantenimiento.

El contenido de biocombustibles en los combustibles de automoción está fijado por ley en (Ministry of ecological and solidarity transition, 2023):

- Euro-super 95: máximo 5 % de etanol.
- Diésel: máximo 7 % en volumen de FAME (biodiésel).
- Gasoil: máximo 7 % en volumen de FAME (biodiésel).

Sin embargo, los mandatos se pueden actualizar. De acuerdo con la USDA, 2022, para los miembros de la Unión Europea existe un reporte voluntario en el que se muestra que para Francia la mezcla objetivo para 2020 de bioetanol era de

8,2 %, con una actualización a 8,6 % en horizonte al 2030, mientras que para el biodiésel es de 8 % (USDA, n.d.).

El artículo 32 de Finance Act de 2005 involucra un impuesto llamado *taxe incitative relative à l'incorporation de biocarburants*, que penaliza a operadores que liberan biocombustibles inferiores a los objetivos de incorporación (USDA, n.d.).
El 24 de febrero de 2021 el Consejo de Estado francés confirmó la prohibición del aceite de palma en los biocombustibles (USDA, n.d.).

En la Tabla 20, se resumen los mandatos actuales para Francia.

4.4.2.8 Experiencias internacionales, requerimientos energéticos y tasa de retorno energético

De acuerdo con la figura 40, el consumo per cápita promedio en Francia para los años 2017 a 2021 fue de 147,1 MMBtu/persona, mientras que el PIB energético promedio fue de 3,5 1000 Btu/2015$ PIB PPP (véase figura 41).

En 2019 en Francia, el 71 % de la matriz energética estuvo representada por la energía nuclear. Tiene previsto modernizar sus parques nucleares para lograr las metas al largo plazo (2050). El país está invirtiendo en energías renovables con rendimientos de 178,2 % frente al −20,7 % de las inversiones en combustibles fósiles, sin embargo, el despliegue tecnológico bajo en emisiones no es lo suficientemente rápido para que el Gobierno pueda cumplir sus objetivos energéticos y climáticos (EIA, n.d.).

Lograr una eficiencia energética es el pilar de la estrategia nacional baja en carbono en Francia, que pretende reducir a la mitad el consumo energético entre 2021 y 2050 (IEA, 2021).

En el anexo A, Indicadores energéticos, se encuentran algunos indicadores energéticos de interés para el desarrollo de biocombustibles en diferentes países, entre ellos los seleccionados para el presente estudio. Es importante resaltar que la tasa de retorno energético (EROI) debe ser superior a la unidad y que es mayor para los combustibles fósiles. Esto indica que la energía requerida por el sistema es menor que la energía liberada por el mismo.

De otro lado, en el anexo B, Requerimientos energéticos por etapa de la cadena de suministro de biocombustibles, se encuentran los requerimientos energéticos para el proceso agrícola, el pretratamiento de materias primas, procesamiento de precursores y transporte en la obtención de biocombustibles como el biodiésel, bioetanol, biogás y biojet para diferentes países. Los diferentes autores concuerdan en que la fase agrícola es aquella en la que se requiere mayor cantidad de energía.

4.4.5 Cadena de suministro

4.4.5.1 Cadena de suministro del biodiésel

A continuación, en la Figura 103, se describe la cadena de valor para la producción de biodiésel y sus principales variables, con lo cual podemos definir capacidad de producción, capacidad de exportación y definición de esquema logístico para el uso de los biocombustibles.

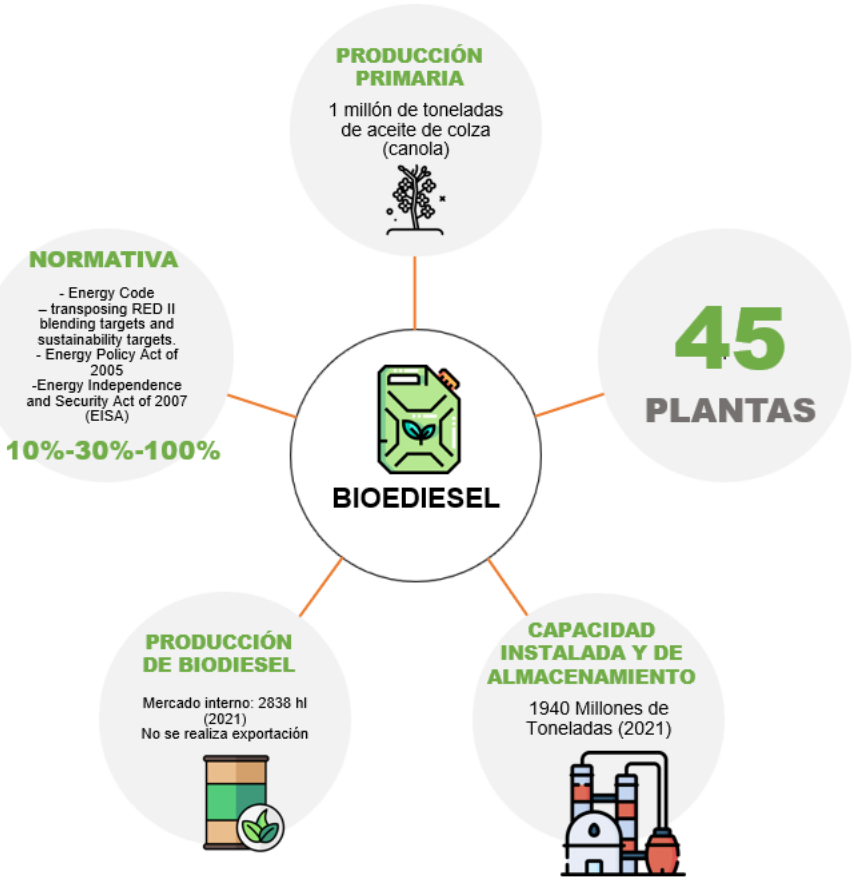


Figura 103. Cadena de valor del biodiésel en Francia

Adaptado de: (Ministére de la Transition énergétique, 2023b)

— *Producción primaria*

En Francia, el biodiésel incluye diferentes productos, clasificados según la materia prima de fabricación, las cuales son cultivos de plantas oleaginosas, grasas animales o aceites usados. Para la producción de biodiésel se utilizan principalmente ésteres metílicos de ácidos grasos (FAME), los cuales se pueden obtener a partir de aceites vegetales extraídos de plantas como la colza (canola) y girasol, que se denominan éster metílico de aceite vegetal (EMHV), las que se obtienen a partir de las grasas animales (EMHA), los que se obtienen a partir de aceites vegetales usado (EMHU) y los que se obtienen a partir de residuos grasos o residuos industriales (POME). Siendo la colza o canola la materia prima más utilizada con un total de un millón de toneladas en 2019 (*Ministére de la Transition énergétique*, n.d.).

— *Almacenamiento y transporte*

La producción de soja en Francia se reparte entre dos regiones de Francia: el suroeste (con riego) y el este (desde Ródano-Alpes hasta Alsacia), de allí se transporta en camiones hasta las plantas de producción, y luego se distribuye en vehículos de carga pesada. El transporte terrestre representa el 88,4 %, el ferroviario 9,6 % y el transporte fluvial apenas el 2 %

— *Plantas de procesamiento*

La colza es el cuarto cultivo más común en Francia, representando casi el 80 % de la producción total de semillas oleaginosas, estos granos se trituran para así poder extraer sus aceites y tras esta extracción se genera un residuo denominado torta oleaginosa, la cual puede ser utilizada para la alimentación de animales.

La producción de colza abarca dos grandes mercados, el primero de ellos es la producción de aceite comestible refinado, este aceite es principalmente utilizado para el consumo humano; otro es la producción de biocombustibles, para esto se

realiza un proceso de semirefinado y se combina con alcohol o metanol para formar un biodiésel.

Por otra parte, en términos de costos, es mayor para la producción de biodiésel a base de colza en comparación de con la producción de combustibles fósiles, por lo que para el caso del biodiésel se hace necesario el apoyo del público incentivando el consumo y la transición energética (ESTERIFRANCE, 2022). En la figura 105, se encuentra la ubicación de las 45 plantas encargadas del procesamiento y producción de biodiésel en Francia.

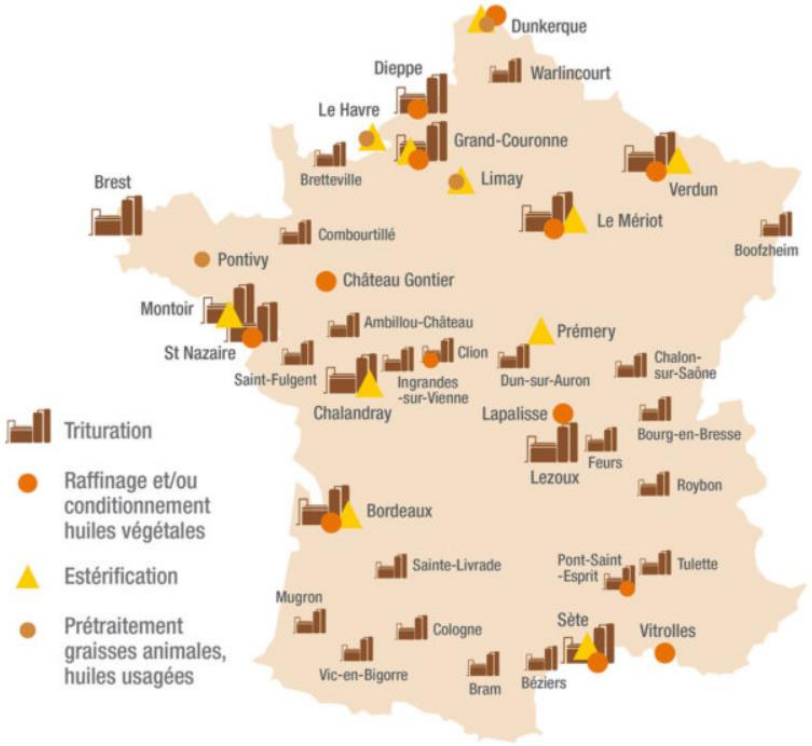


Figura 104. Industrias dedicadas a la producción de biodiésel

Fuente: (ESTERIFRANCE, 2022)

— *Ventas y exportación*

Para 2021, se comercializaron 2838 millones de toneladas y para el 2023 no se contó con una cantidad suficiente de biodiésel que lograra suplir la demanda del producto en el mercado (Francia, n.d.).

El tráfico de mercancía se da entre cinco cuencas fluviales: Seine, Rhin, Nord, Moselle y Rhone-Saone que representa 4100 km de vías navegables para realizar la exportación.

— *Aceite de cocina usado*

Desde enero de 2022, el sector de recuperación y valorización de aceites minerales y sintéticos opera según los principios de Responsabilidad Ampliada del Productor (REP). En concreto, esto significa que la implementación operativa y financiera del sector de los aceites usados es ahora responsabilidad de los productores, importadores y comercializadores de aceites nuevos en Francia, que cumplirán estas nuevas obligaciones a través de un “organismo ecológico”. Es en este contexto que productores y distribuidores crearon la eco-organización CYCLEVIA , (Agriculture, n.d.)

Bajo esta organización existen diferentes empresas recolectoras de aceite de cocina usado de pequeñas, medianas y grandes empresas generadoras de aceite usado de cocina, por lo que la logística inicial es realizar una inscripción de la empresa con el fin de establecer la frecuencia y cantidad de barriles para realizar la gestión del aceite en las empresas.

Para el aceite de cocina usado de los domicilios se cuentan con 25.000 puntos de recogida, repartidos por toda Francia, disponibles en cada municipio, allí pasan las flotas de camiones y realizan el correcto transporte (Metro, n.d.).

Finalmente, la política determina que para tener éxito en la recolección de aceite de cocina usado se debe establecer un diálogo, realizar campañas de sensibilización y formación con las partes interesadas como: Gobierno Nacional, autoridades regionales, fabricantes, asociaciones, sindicatos, medios de comunicación, ONG, universidades, colegios, entre otros (UNEP., n.d.).

4.4.5.2 Cadena de suministro del bioetanol

A continuación, en la figura 105, se describe la cadena de valor para la producción de bioetanol y sus principales variables, con lo cual podemos definir capacidad de producción, capacidad de exportación y definición de esquema logístico para el uso de los biocombustibles.

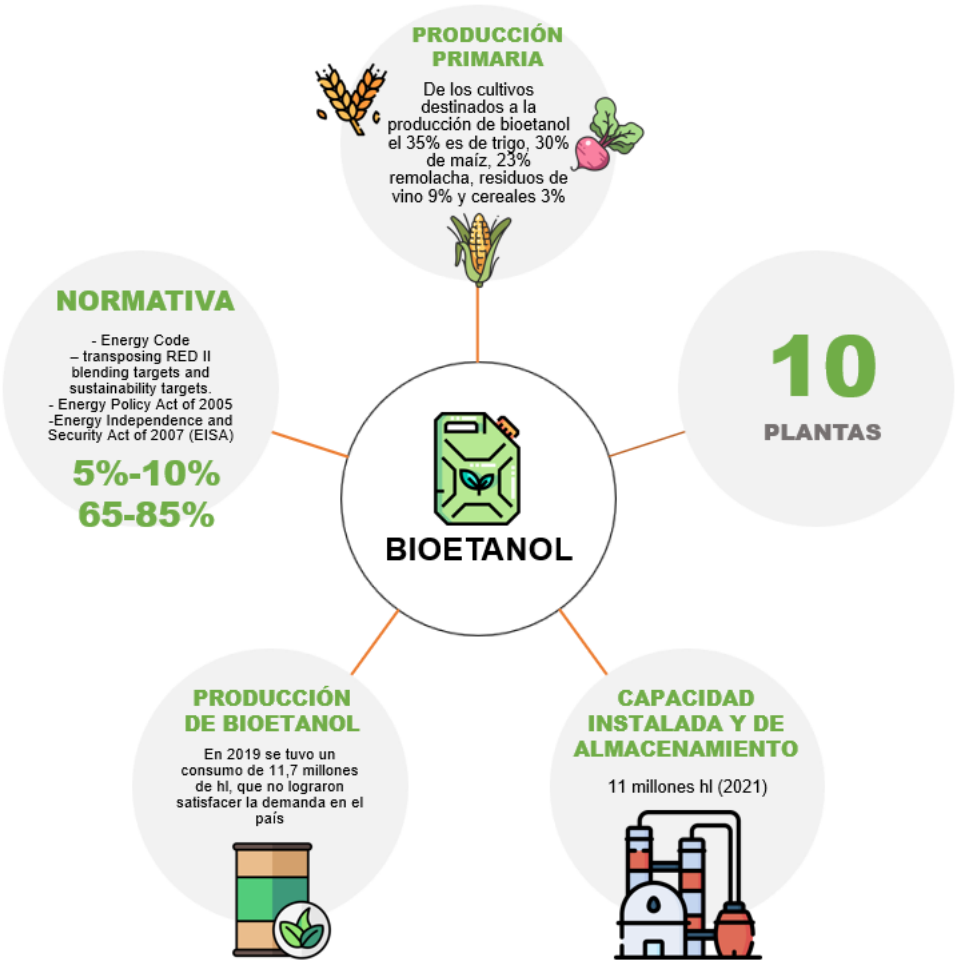


Figura 105. Cadena de valor de bioetanol en Francia

Adaptado de: (Établissment National Des Produits de L'agriculture et de la Mer, 2021b; Ministére de la Transition énergétique, 2023a)

— *Producción primaria*

Los cultivos destinados a la producción de bioetanol en Francia corresponden a aproximadamente al 3 % de la superficie agrícola total del país de cereales y azucareros. La distribución de las materias primas utilizadas para la producción de bioetanol en el territorio francés, al año 2019, fueron principalmente trigo (*blé*), maíz (*maïs*) y remolacha (*betterave*), con un 35 %, 30% y 23%, respectivamente, seguido por los residuos de vino con un 9 %. Para el año 2019, el 83 % de la materia prima destinada a producción de bioetanol en el país fue de origen francés, el porcentaje restante se obtuvo por importación (Ministére de la Transition Énergétique, n.d.).

— Plantas de procesamiento

Con una producción de 11,4 mililitros de bioetanol producidos en el año 2019, Francia es el primer productor de bioetanol de la Unión Europea, superando a países como Alemania con una producción de 7 mililitros, así mismo se convierte en el sexto productor mundial de bioetanol por detrás de grandes potencias como Estados Unidos y Brasil, con producciones de 597 mililitros y 327 mililitros de bioetanol, respectivamente (Établissment National des Produits de L'Agriculture et de la Mer, n.d.).

Para la producción de bioetanol, se cuenta con destilerías de cereales y de remolacha, así mismo se cuenta con 5 plantas nuevas que buscan aumentar la producción en el país, como se evidencia en la figura 106.



Figura 106. Ubicación de plantas de bioetanol en Francia

Fuente:(Bioéthanol Robulons Plus Vert et moind cher, n.d.)

— *Ventas y exportación*

El consumo interno de bioetanol en Francia fue de 11,7 mililitros en 2019, lo que representó un aumento del 29 %, respecto al consumo del año 2018, aun así, los volúmenes producidos e importados de bioetanol en el año 2019 no pudieron satisfacer la demanda del biocombustible, por lo cual no se alcanzó el umbral de autosuficiencia en el país.

4.4.5.3 Cadena de suministro del biogás

En 2011, Francia inauguró su primer sitio para la inyección de biometano en la red de gas, lo que marcó el inicio de un movimiento significativo.

Hasta entonces, el biogás producido a partir de materia orgánica fermentable (como efluentes agrícolas, residuos de cultivos y desechos municipales) solo podía emplearse para la generación de calor y electricidad a través de la cogeneración. No obstante, los avances en técnicas de purificación han facilitado su integración en las redes de gas. De hecho, una vez purificado (es decir, con el dióxido de carbono separado), el biogás que ahora se ha convertido en biometano puede olorizarse y luego inyectarse en los gasoductos (Terega, n.d.)**.**

— *Producción primaria*

La producción primaria de biogás en Francia se centra en la metanización de materia orgánica fermentable, que incluye efluentes agrícolas, residuos de cultivos y desechos municipales (véase la Figura 107).

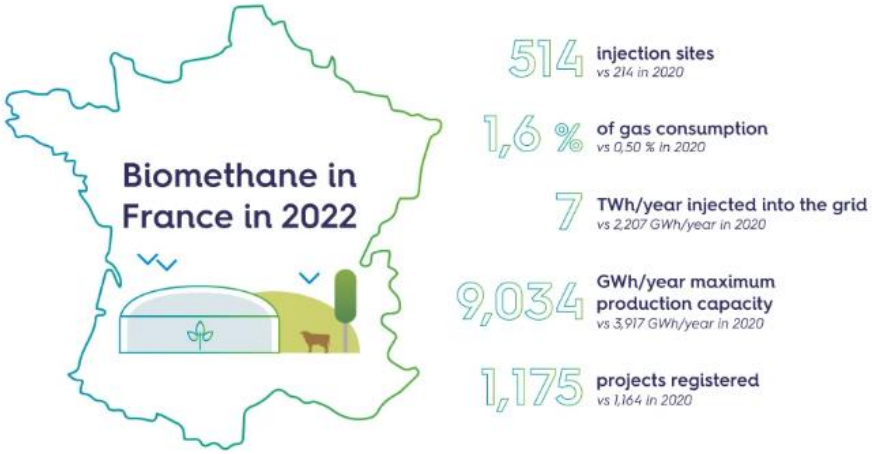


Figura 107. Biometano en Francia en 2022

Obtenido de: (Terega, n.d.)

— *Almacenamiento y transporte*

En Francia, se requiere una logística especializada para el almacenamiento y transporte de sustratos destinados a la producción de biogás. Los efluentes agrícolas, los desechos de cultivos y los desechos municipales son recolectados y preparados para su procesamiento en las plantas de metanización. El almacenamiento se lleva a cabo en las instalaciones adecuadas, como silos o depósitos, que brindan las condiciones ideales para la fermentación anaeróbica.

El transporte de estos sustratos se lleva a cabo a través de una variedad de vehículos, incluidos camiones y contenedores, especialmente diseñados para transportarlos desde su origen hasta las plantas de producción de biogás. Para garantizar que los sustratos estén disponibles en las cantidades y condiciones necesarias para el proceso de metanización, es necesaria una gestión eficiente del almacenamiento y el transporte. Esto contribuye a la producción sostenible de biogás en Francia.

— *Plantas de procesamiento*

Al cierre del año 2022, Francia disponía de 1,705 instalaciones de producción de biogás, de las cuales 514, es decir, un 30 %, estaban orientadas a la producción de biometano destinado a la inyección en la red, en comparación con las 214 registradas a finales de 2020. Este dato resalta la notable dinámica que caracteriza al sector, señaló Lionel Lalanne, director del Departamento de Desarrollo Territorial. “La creación de 300 instalaciones en tan solo dos años representa una aceleración significativa en la puesta en marcha de estos proyectos. No solo contamos con una gran cantidad de proyectos en cartera, sino que también la industria ha logrado su industrialización” (Terega, n.d.).



Figura 108. Producción total de biometano de las plantas existentes

Obtenido de: (Terega, n.d.)

— *Distribución de biogás y comercialización*

La distribución y comercialización de biogás en Francia se centra en la inyección de biometano purificado en la red de gas natural. El biogás se convierte en biometano y se inyecta en la red de gas después de ser purificado y liberado de dióxido de carbono.

El biometano se puede usar en una variedad de áreas, como la calefacción, el transporte y los procesos industriales, si se inyecta en la red de gas. Además, se fomenta su uso como fuente de energía sostenible y renovable. Para promover la producción y distribución de biometano, el Gobierno francés ha implementado incentivos y programas de apoyo.

4.4.5.4 Cadena de suministro de SAF

— *Producción primaria*

En Francia, se puede obtener SAF mediante: aceites usados, residuos de agricultura, grasas animales y a partir de hidrógeno verde (TotalEnergies, n.d.).

— *Plantas de procesamiento*

La principal planta de procesamiento de SAF en Francia es TotalEnergies, quien, en el año 2021, realizó un vuelo trasatlántico París-Montreal utilizando 16 % de SAF. Adicionalmente, existen varias plantas piloto y proyectos de investigación en el estudio del SAF a nivel local (TotalEnergies, n.d.).

— *Distribución y comercialización*

Luego de obtener el SAF en las refinerías, se transporta en barcazas hasta los centros petroleros para realizar las mezclas correspondientes; de allí sale en

oleoductos, barcazas, tren o camiones cisterna hasta los silos de almacenamiento. Los camiones de abastecimiento de combustible proporcionan el suministro de SAF a las aeronaves una vez que llegan al aeropuerto, como se evidencia en la figura 109.

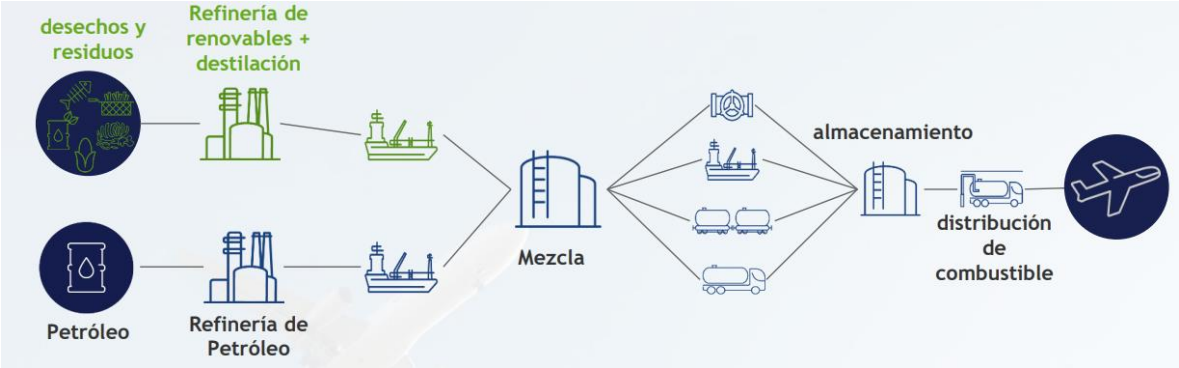


Figura 109. Distribución y comercialización de SAF

Obtenido de: (Cooper, n.d.)

4.4.6 Aspectos ambientales

4.4.6.1 Análisis de ciclo de vida

La Figura 110 muestra el esquema general del análisis de ciclo de vida de todos los biocombustibles indicados en la Tabla 57 (Direction Production et Energies Durables (DEPD) - ADEME, n.d.).

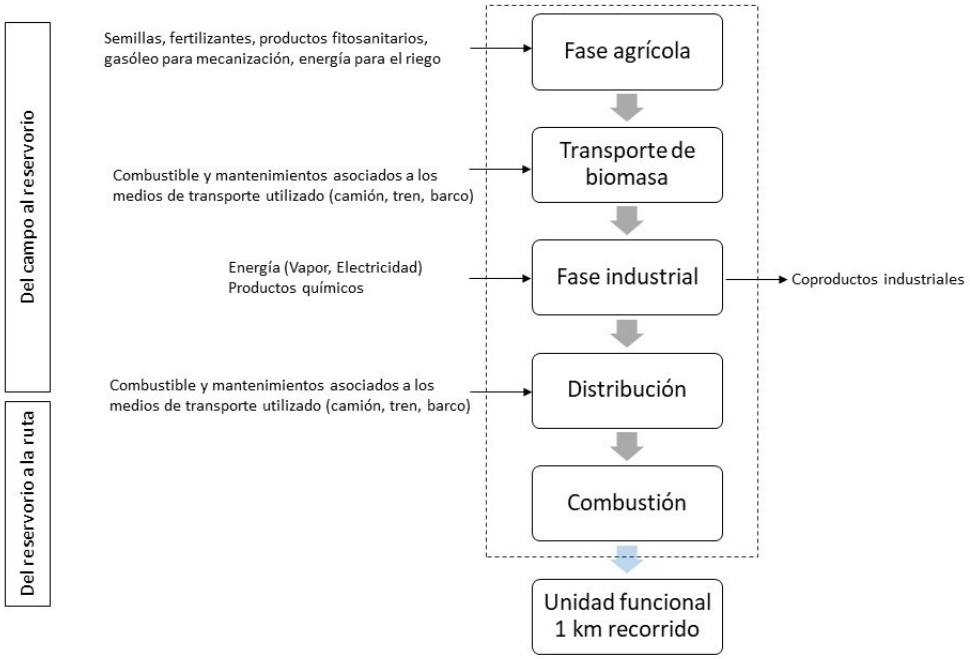


Figura 110. Esquema general en el ACV de biocombustibles de primera generación en Francia

Tomado de: (Direction Production et Energies Durables (DEPD) - ADEME, 2010)

En la tabla 57, se resumen los indicadores ambientales para diferentes biocombustibles a partir de diversos precursores elaborados en Francia. El mayor impacto en emisiones GEI lo realiza el bioetanol E100, sin embargo, logra los menores efectos en toxicidad humana y eutrofización. El bioetanol de caña de azúcar E85 logra el mayor efecto en oxidación fotoquímica, mientras que el E85 de trigo logra el mayor impacto en eutrofización. El hidrobiodiésel (HVP100) causa el menor impacto en emisiones GEI y oxidación fotoquímica, pero el mayor impacto en toxicidad humana.

Tabla 57. Resultados por km recorrido para los biocombustibles seleccionados en Francia

		Energía primaria no renovable	Emisión GEI	Oxidación fotoquímica	Toxicidad humana	Eutrofización
		MJF/km	kg CO2eq/km	Kg C2H4eq/km	kg 1,4-DB/km	kg PO4/km
B0	B0, euro 4	2,12	1,55E-01	1,91E-05	7,01E-01	6,30E-05
E0	E0, euro 4	2,69	1,98E-01	4,40E-05	4,51E-02	3,97E-05
Bioetanol de remolacha	E10	2,6	1,89E-01	4,01E-05	4,70E-02	6,62E-05
	E85	1,6	1,01E-01	5,46E-05	6,70E-02	3,46E-04
	ETBE de E10	2,66	1,93E-01	4,01E-05	4,66E-02	6,49E-05
Bioetanol de trigo	E10	2,6	1,92E-01	4,01E-05	4,97E-02	9,88E-05
	E85	1,64	1,28E-01	5,45E-05	9,83E-02	7,22E-04
	ETBE de E10	2,66	1,95E-01	4,00E-05	4,94E-02	9,79E-05
Bioetanol de maíz	E10	2,6	1,91E-01	4,00E-05	4,82E-02	9,40E-05
	E85	1,57	1,17E-01	5,40E-05	8,16E-02	6,67E-04
	ETBE de E10	2,65	1,94E-01	4,00E-05	4,79E-02	9,31E-05
Bioetanol de caña de azúcar	E10	2,54	1,88E-01	6,21E-05	4,73E-02	6,99E-05
	E85	0,885	9,20E-02	3,08E-04	7,13E-02	3,88E-04
	ETBE de E10	2,59	1,92E-01	6,23E-05	4,70E-02	6,86E-05
Biodiésel de soja	B10	1,98	1,44E-01	1,92E-05	5,32E-01	8,55E-05
	B30	1,71	1,21E-01	1,98E-05	5,39E-01	1,29E-04
Biodiésel de girasol	B10	1,99	1,45E-01	1,97E-05	5,34E-01	1,19E-04
	B30	1,71	1,23E-01	2,11E-05	5,45E-01	2,31E-04
Biodiésel de colza	B10	1,99	1,47E-01	1,97E-05	5,33E-01	1,15E-04
	B30	1,73	1,29E-01	2,12E-05	5,41E-01	2,19E-04
Biodiésel de palma	B10	1,97	1,44E-01	1,86E-05	5,33E-01	8,62E-05
	B30	1,65	1,22E-01	1,78E-05	5,42E-01	1,32E-04
Éster metílico de aceites alimenticios usados (EMHAU)	B10	1,96	1,42E-01	1,81E-05	5,28E-01	6,51E-05
	B30	1,63	1,15E-01	1,62E-05	5,27E-01	6,73E-05
Éster metílico de grasa animal (EMGA)	B10	1,96	1,42E-01	1,80E-05	5,28E-01	6,53E-05
	B30	1,63	1,15E-01	1,61E-05	5,27E-01	6,80E-05
Hidrobiodiésel	HVP100	0,404	5,68E-02	1,02E-05	7,50E-01	6,17E-04

Tomado de: (Direction Production et Energies Durables (DEPD) - ADEME, 2010)

4.4.6.2 Emisiones de gases de efecto invernadero

En Francia, la mayor participación en las emisiones netas de GEI se da en los sectores de energía y AFOLU (agricultura, silvicultura y otros usos de la tierra) en el año 2020.

El 99 % de las emisiones en el sector energético se dan por la combustión, con el 41 % del impacto causado en el sector transporte, el 26 % por el sector residencial y de edificaciones y el 17 % en el sector de las industrias manufactureras y de la construcción (Ministére de la Transition Énergétique, n.d.).

En procesos industriales y uso de productos (IPPU), el 29 % de las emisiones es causado por el uso de sustitutos SAO, el 25 % por la industria de los metales y el 23 % por la industria de los minerales (Ministére de la Transition Énergétique, n.d.).

4.4.6.3 Compromisos ambientales en reducción de GEI

De acuerdo con los compromisos adquiridos por la Unión Europea, se espera reducir el 55 % de los GEI respecto a los niveles de 1990 para 2030 .

4.4.7 Aspectos sociales

Francia es el cuarto país productor mundial de biocombustibles (5 % de la producción mundial), con dos millones de toneladas producidas el interior del país. En cuanto al biodiésel, el mismo se produce a base de plantas oleaginosas como la colza y girasol (Ministères Écologie Énergie Territoires, n.d.).

Frente a los impactos de la industria de los biocombustibles en Francia, se reportan cifras de facturación entre 900 a 1800 millones de euros y de ingresos fiscales de 340 millones de euros y una generación de más de 28.000 empleos.

Respecto de los impactos sociales, se destaca que, en materia de seguridad alimentaria y uso de suelos, si bien existe un debate debido a la guerra entre Rusia y Ucrania, en Francia no existe actualmente conflicto. Esto debido al desarrollo de coproductos agrícolas y un mejor uso de cultivos como consecuencia de la industria de producción de materias primas para los biocombustibles.

4.4.7.1 Seguridad alimentaria

El debate en los países de la Unión Europea entre la seguridad alimentaria y la soberanía ha crecido en los dos últimos años como consecuencia de la guerra entre Rusia y Ucrania. Sin embargo, de la información analizada, no existe actualmente una competencia por los cultivos y la producción de materia prima en este país respecto de otras industrias. Por el contrario, se evidencian fenómenos complementarios o que reducen el uso intensivo de tierras.

Tal como destaca la Asamblea Nacional francesa, actualmente la producción de biocombustibles ha permitido el desarrollo de co-productos, que no solo permiten generar ingresos, sino que además potencializa las áreas cultivadas. Ejemplo de esto es la generación de tortas para la alimentación animal como consecuencia del proceso de trituración de semillas para la producción de biodiésel; la producción de glicerina que puede usarse en el campo farmacéutico, cosmético o alimentario; o el uso del pulpas y vinazas de la remolacha o de bagazo de trigo en el proceso de producción de bioetanol para la alimentación de rumiantes, cerdos, ganado destinado a la producción de carne y leche y pollos (Assemblée Nationale, n.d.).

En la misma línea ADEME-FranceAgriMer (2019) señalan que entre 1994 y 2014 se presentó un aumento en la autonomía proteica destinado al ganado, que pasó del 18 % al 34 %, vinculado en parte al desarrollo de biocombustibles. Advierten que la colza o canola ha ocupado un lugar muy especial para este fin (ADEME-FranceAgriMer et al., 2019).

En este sentido, el debate se centra más en el ámbito internacional y las consecuencias del consumo de biocombustibles en Francia frente a la seguridad alimentaria de los países en desarrollo.

4.4.7.2 Acceso a la tierra e impacto a comunidades locales, agrícolas e indígenas

— Usos de la tierra

Actualmente, se cultivan materias primas como colza, girasol, remolacha, trigo y maíz con una modificación en el uso de dichos productos, de alimentario a energético. Para 2014, este tipo de materias primas usado para los

biocombustibles de primera generación ocupaban una superficie bruta de 768.630 hectáreas, equivalentes a un 3 % de las tierras cultivadas en Francia (AGRESTE, 2015).

Para el caso de los biocombustibles de segunda generación, resalta ADEME, que, si bien es cierto, su materia prima parte de la base de cultivos de uso no alimentario, los mismos podrían sustituir a los cultivos para uso alimentario en tierras agrícolas y que aporten más materia orgánica al suelo que los cultivos tradicionales. A su vez, señala la precitada agencia, que estos cultivos de materia prima para los biocombustibles de segunda generación pueden cultivarse en tierras degradadas o en zonas sensibles donde el uso de insumos es limitado, es decir, en tierras donde el cultivo de especies convencionales es más difícil, tanto por su rendimiento como por su rentabilidad) o en zonas de cultivos intermedios, sin impacto en el uso del suelo (ADEME, 2018).

De otro lado, la producción de biocombustibles en tierras agrícolas debe respetar las condiciones medioambientales fijadas por la Política Agraria Común (PAC) y las Buenas Conductas Agrarias Medioambientales (BCAM) y en este sentido:

- No deben utilizar terrenos con alto valor en términos de biodiversidad y almacenamiento de carbono.
- Hacen parte de la meta establecida para la cadena de valor relacionada con garantizar la producción de un biocombustible que emita menos gases de efecto invernadero que el combustible convencional.

Frente a este tema, concluye ADEME, que en el contexto de los biocombustibles de primera generación se observa, en cierta medida, un cambio en el uso de los suelos y en la orientación de los cultivos agrícolas alimentarios hacia la energía en superficies relativamente grandes (3 % de la tierra cultivable en Francia). No obstante, señala que estos cambios no modifican la rentabilidad de la parcela para el agricultor, los cuales pueden variar en función de los cultivos y los precios del mercado. Respecto de los biocombustibles de segunda generación, considera este organismo que pueden sustituir parcialmente a los cultivos alimentarios tradicionales, pero por el momento solo afectan a zonas

limitadas (ADEME, 2018, p. 33). Finalmente, resalta que la movilización de tierras agrícolas para la producción de biocombustibles depende casi exclusivamente de políticas públicas y no de la disponibilidad de tierras agrícolas.

— *Impacto a comunidades locales*

A nivel de política pública, tanto la Asamblea Nacional como ADEME ven la posibilidad de la integración de la agricultura y la producción de energía renovable a través de la producción de biocombustibles. Para 2018, según datos de ADEME, el sector agrícola representaba el 96 % de la producción de biocombustibles en Francia, teniendo como ventajas la generación de una nueva fuente de ingreso para los agricultores que se ha visto potenciada debido a la política agrícola común (Assemblée Nationale, n.d.).

Asimismo, la Asamblea Nacional destaca que para los agricultores los modelos de producción de materias primas para biocombustibles de primera generación no se diferencian ni en tiempos ni en los esquemas de producción agrícola convencional, basados en la producción y venta de materias primas, normalmente a una cooperativa. Señala que los modelos contractuales establecidos para la producción destinada a los biocombustibles permiten estabilizar la relación comercial de los agricultores con su aval y proporcionarles cierta seguridad. Por lo tanto, el desarrollo de los biocombustibles puede contribuir al mantenimiento del empleo en las zonas rurales, en territorios donde el tejido industrial es generalmente débil (Assemblée Nationale, n.d.).

Por su parte, de acuerdo con las estimaciones desarrolladas por ADEME (2018) a 2016 la producción de biocombustibles de primera generación tuvo:

- Una facturación aproximada de 1.057 millones de euros/año procedente de la venta de materias primas, equivalente a un 1,5 % del volumen de los negocios agrícolas en dicho año. Esta facturación se distribuyó así:
- 581 millones de euros/año en ventas de colza y girasol para la producción de biodiésel.
- 476 millones de euros/año en ventas de remolacha, trigo blando y maíz para la producción de bioetanol.

- Un margen bruto de unos 596 millones euros/año si se tiene en cuenta un coste medio de producción de 600 euros/ha para los grandes cultivos (ADEME, 2018).

4.5 Caso India

Según la Agencia Internacional de Energía (EIA), se espera que para el 2026 India se proyecte como el tercer mercado de etanol más grande del mundo, dado que el país ha triplicado su consumo de etanol entre 2017 y 2021, a raíz de un paquete de incentivos, tendientes a reducir la importación de combustibles fósiles y la emisión de gases efecto invernadero.

Existe una política nacional de biocombustibles cuyo objetivo principal es lograr un nivel de mezcla del 20 % de etanol en la gasolina para el año 2025. Las materias primas utilizadas básicamente son la caña de azúcar, el maíz, el arroz y los residuos agrícolas.

La infraestructura de producción de biocombustibles de la India se destaca por su importante número de plantas, la cual asciende a 113 plantas de bioetanol y 52 plantas de biodiésel

4.5.1 Actores oficiales

- Ministerio de Petróleo y Gas Natural
- Ministerio de Energías Nuevas y Renovables
- Ministerio de Finanzas
- Ministerio de Agricultura y Bienestar de los Agricultores
- Agencia de Desarrollo de Energías Renovables (IREDA)
- El Banco de Desarrollo de la India (SIDBI)
- Junta para el desarrollo de una directiva para el desarrollo de los biocombustibles (Committee on Development of Bio-fuels). La junta estará encabezada por el primer ministro, con presencia de 5 ministerios en el desarrollo de los biocombustibles en India (Seekhe., 2021).

4.5.2 Actores privados

De acuerdo con Seekhe (2021), los principales productores de biodiésel en la India son:

- Naturol Bioenergy Limited
- Southern Online Biotechnologies

4.5.3 Marco regulatorio y económico

4.5.3.1 Mapa normativo

— Política Nacional de Biocombustibles 2018

La Política Nacional de Biocombustibles 2018 fue notificada por el Ministerio de Petróleo y Gas Natural. Esta política ha sido anunciada por Rajasthan, el primer estado en implementar esta política en la India. El objetivo de la política es promover la producción de biocombustibles en el país y reducir la importación de petróleo crudo.

Se ha establecido una planta de producción de biodiésel en Rajasthan en colaboración con Indian Railways. La capacidad de producción de esta planta es de 8 toneladas por día.

Se propone establecer un centro de excelencia en Rajasthan con el apoyo técnico de la Universidad de Agricultura y Tecnología Maharana Pratap, Udaipur. Además, para garantizar la calidad del biodiésel, se ha fijado el objetivo de crear un plan de acción para la producción y distribución de biodiésel y descenso de carburantes junto con el laboratorio de biodiésel (Seekhe., 2021)

La Política Nacional de Biocombustibles de la India apunta a la integración de los biocombustibles y, por lo tanto, prevé un papel central para él en los sectores de energía y transporte del país en las próximas décadas. La citada política propicia un desarrollo y promoción del cultivo, producción y uso de biocombustibles a niveles cada vez más altos, al sustituir la gasolina y el diésel para el transporte y utilizarse en vehículos estacionarios y otras aplicaciones, contribuyendo al mismo tiempo a la seguridad energética, la mitigación del cambio climático, además de crear nuevas oportunidades de empleo y conducir a desarrollo ambientalmente sustentable.

Teniendo en cuenta el desarrollo que se ha hecho en el campo de los biocombustibles, varias decisiones importantes han sido tomadas por el Comité Nacional de Coordinación de Biocombustibles (NBCC), estas decisiones se

concentran en unas modificaciones a la Política Nacional de Biocombustibles y son las siguientes:

- **Más materia primas.** Sobre las materias primas, una de las enmiendas es que el Gobierno permitirá y promoverá el uso de más materia prima para la producción de biocombustibles (Seekhe., 2021).
- **Objetivo de mezcla de etanol.** El Estado planea avanzar con el objetivo de mezclar etanol con un 20 % de gasolina que contenga etanol para 2025-2026, en lugar de 2030.
- **Programa Make in India.** Promoverá la producción de biocombustibles en el país por unidades ubicadas en Zonas Económicas Especiales / Unidades Orientadas a la Exportación en el marco del programa Make in India (Seekhe., 2018, 2021).
- **Nuevos miembros de NBCC.** El Gobierno ha dado permiso para agregar nuevos miembros al Comité Nacional de Coordinación de Biocombustibles (NBCC). El NBCC se constituyó bajo la presidencia del ministro de Petróleo y Gas Natural (P&NG) para proporcionar coordinación general, implementación eficaz de principio a fin y seguimiento del programa de biocombustibles (Seekhe., 2021). La NBCC incluye miembros de otros 14 ministerios.
- **Exportación de biocombustibles.** En casos específicos se permitirá la exportación de biocombustibles, por ahora el programa de biocombustibles debe ser producido con materia prima local.
- **Importancia de las enmiendas.** Se espera que las enmiendas propuestas allanen el camino para la campaña Make in India, que conducirá a una mayor producción de biocombustibles y a una reducción de las importaciones de productos derivados del petróleo (Seekhe., 2021).
- **Promover la iniciativa de la India autosuficiente.** Dado que se permite el uso de muchas otras fuentes como materia prima para la producción de biocombustibles, esto promoverá la autosuficiencia de la India y acelerará la visión del primer ministro de que la India se convierta en “autosuficiente en el sector energético” para el año 2047 (Seekhe., 2021).

- **Generación de empleo.** Además, se espera que las enmiendas propuestas atraigan y promuevan el desarrollo de tecnologías autóctonas, lo que allanará el camino para la campaña Make in India y generará más empleo (Seekhe., 2021).

— *Regulación de precios*

La Política Nacional de Biocombustibles-Enmienda, ordena que el biocombustible sea para uso interno únicamente y no para exportación. Así mismo establece como política no emplear cultivos comestibles para la elaboración de biocombustibles, en consecuencia, hace que el etanol se produzca a partir de melazas y no a partir de azúcar directamente.

Ahora bien, el Ministerio del Petróleo y Gas Natural cuenta con una norma la cual establece un precio de compra del biodiésel por parte de las empresas comercializadoras, precio que incluye por litro el valor de todos los impuestos y costos asociados (Seekhe., 2021).

No obstante, lo anterior, en India existe la llamada Biodiésel Purchase Policy una directiva que establece el precio fijo para la compra de biodiésel por parte de las compañías petrolíferas. El mencionado precio se estableció con base a una estimación de los costos de producción de biodiésel a partir de jatropha (Drishti, n.d.).

Así mismo se establece que las compañías comercializadoras estén obligadas a comprar todo el biodiésel que les fuese suministrado. Los productores de biodisel deben cumplir con los estándares IS 15607:2005, además, deben estar registrados como proveedores de biodisel ante el coordinador estatal de compañías petrolíferas (State Level Coordinator for Oil Companies) y que se suministre un mínimo de 1000 litros, en este sentido, se entiende que existe una revisión a los proveedores que no den cumplimiento a estos estándares (Seekhe, 2021).

Un instrumento importante de la política de biocombustibles es que pueda establecer un precio mínimo de apoyo (PMP) para semillas oleaginosas que debe

anunciarse e implementarse con una disposición para su revisión periódica para garantizar un precio justo a los agricultores.

Por otro lado, el precio mínimo de compra (MPP) del biodiésel por parte de las empresas de comercialización de petróleo estará vinculado al precio minorista vigente del diésel. El precio mínimo de apoyo para bioetanol se basará sobre el costo real de producción y el precio de importación del bioetanol. El precio mínimo de compra, ambos para biodiésel y bioetanol, serán determinados por la Dirección de Biocombustibles y decidido por el Comité Nacional de Coordinación de Biocombustibles. En caso de que el precio del diésel o la gasolina caiga por debajo del precio mínimo de apoyo para el biodiésel y el bioetanol, las empresas de comercialización de petróleo serán debidamente compensadas por el Gobierno.

— Normativas y regulaciones en el procesamiento de la materia prima

Según el borrador de notificación de Responsabilidad Extendida del Productor (EPR), el cual entrará en vigor el 1º de abril de 2024, los productores, recolectores, recicladores e importadores de aceite usado deberán registrarse en el sistema en línea desarrollado por el Tablero Central de Control de la Contaminación (Central Pollution Control Board). El portal (https://cpcb.nic.in/) también se utilizará para la presentación de declaraciones trimestrales y anuales, certificado EPR y rastreo de petróleo producido o generado por los interesados.

— Políticas vigentes de mandatos de mezcla

La Política Nacional de Biocombustibles de 2018 tiene por objetivo llegar a un 20 % de mezcla tanto para biodiésel como para bioetanol para el 2026.

— Normas específicas que rigen la comercialización de biocombustibles

La Política Nacional de Biocombustibles indica que la responsabilidad del almacenamiento, distribución y comercialización de biocombustibles recaería en las empresas comercializadoras de petróleo. Esto se llevará a cabo a través de su almacenamiento existente e infraestructura de distribución y redes de comercialización, que pueden ser adecuadamente modificados o mejorados para cumplir los requisitos de los biocombustibles.

— *Programas de promoción de uso de biocombustibles*

Para el caso de la India, existen estas iniciativas:

- **Programa de mezcla de etanol,** el cual consiste en un plan para la implantación progresiva del bioetanol mediante su mezcla con la gasolina convencional.
- **Misión Nacional sobre Biodiésel del 2023** es el programa que busca que el Gobierno tenga la labor de facilitador, pero que sea la iniciativa privada la que desarrolle el programa. Tiene medidas específicas, como la de compra de biodiésel por las compañías gasolineras, la compra de semillas de jatropha por las empresas productoras de biodiésel o las certificaciones de biodiésel.
- **Alianza Mundial para los Biocombustibles** es la plataforma internacional para compartir las mejores prácticas, promover el desarrollo sostenible de biocombustibles y mejorar su aplicación, especialmente en el sector del transporte (septiembre 2023).

4.5.3.2 Variables económicas en la producción

— *Subsidios en la cadena de biocombustibles*

Sobre los préstamos concesionales, el National Bank for Agriucltural and Rural Development (NABARD) es el que ofrece esquemas de financiación de plantaciones de *Jatropha curcas* y *Pongamia pinnata (cultivos principalmente para Biodiésel)*. Estos esquemas contemplan periodos de carencia del principal de 4 o 6 años para plantaciones de *Jatropha* y *Pongamia*, respectivamente. La institución financia entre el 80 y el 95 % de la plantación, dependiendo del tipo de agricultor solicitante.

— *Impuestos en la cadena de biocombustibles*

El bioetanol tiene un impuesto especial favorable del 16 % y el biodiésel está exento de impuestos especiales. No se aplican otros impuestos. Se otorgan concesiones sobre plantas y maquinaria para la producción de biodiésel o

bioetanol, así como para motores que funcionan con biocombustibles para el transporte, aplicaciones estacionarias y de otro tipo, si no se fabrican localmente.

— *Regulación del comercio exterior*

La India hace parte del G20 jutno con Brasil, su comercio exterior es bajo porque buscan es fortalecer su producción interna.

— *Papel del Gobierno en la cadena de los biocombustibles*

Es el sector que subsidia la investigación, tiene una política general en donde el sector privado es el activo para el desarrollo de la industria.

El Gobierno tiene por política no emplear recursos alimentarios ni tierras aptas para el cultivo para la producción de biocombustibles, hace que la producción de biodiésel en India esté basada en especies como la *Jatropha curcas* y la *Pongamia pinnata*.

— *Papel del sector privado en la cadena de los biocombustibles*

El sector privado tiene la responsabilidad de impulsar la industria, el etanol es comprado por las compañías petrolíferas que son las encargas de la mezcla con la gasolina y la distribución. El Gobierno de la India permite la inversión extranjera directa en un 100 %, lo que facilita la penetración del mercado, ya que las empresas extranjeras no requieren de un socio para entrar al país.

— *Desarrollo económico y empleabilidad*

Una de las mayores dificultades es la identificación de información gubernamental que permita hacer seguimiento a las estadísticas acerca de los impactos socioeconómicos de los biocombustibles en la India. La información que se presenta a continuación se extrae de diferentes fuentes, ya sea de tipo académico, gremial o de organizaciones no gubernamentales.

— *Generación de empleos*

No se identificó una fuente de datos oficial que permitiera identificar el número de empleos directos e indirectos generados por la actividad de los biocombustibles en India. La información disponible en la materia procede de la Organización Mundial

del Trabajo (OIT) y la International Renewable Energy Agency (IRENA). Con base en esta, se pudieron identificar para el 2022 los datos de la tabla 58.

Tabla 58. Empleos generados

Tipo	Número de empleos
Biogás	85.000
Biomasa	58.000
Biocombustibles líquidos	35.100

Fuente. (IRENA & OIT., 2022).

4.5.3.3 Contratos en firme

— *Contratación de agricultores y cooperativas*

La empresa británica BP-D1 Oils tiene contratos con agricultores y cooperativas. Estos contratos consisten en una compra anticipada de la cosecha, mediante la cual los agricultores perciben ingresos durante los primeros años en los que las plantaciones no son productivas. La empresa aparte de esto se ocupa de la gestión de las ayudas públicas y el suministro del material de plantado.

También se firman contratos de alquiler con el Gobierno estatal, por el cual se cede la explotación de tierras de baldío públicas para la plantación de *Jatropha* o *Pongamia*. Es importante indicar que las condiciones y los procedimientos a seguir para la obtención de los mencionados contratos de alquiler difieren en cada estado y deben ser consultados en el organismo designado para la promoción de la producción (Seekhe., 2021).

4.5.4 Aspectos técnicos

4.5.4.1 Descripción de materias primas (pretratamiento, procesamiento, rendimiento, costo)

La India, con el fin de lograr la seguridad energética del país y reducir la dependencia de las importaciones, es decir, el uso de combustibles fósiles, junto con los problemas de contaminación ambiental, han impulsado la necesidad de combustibles alternativos que tengan beneficios ambientales superiores y sean económicamente competitivos con los combustibles fósiles.

Esto prevé un papel estratégico para los biocombustibles en la canasta energética de la India, donde los recursos para tal fin incluyen biomasa y residuos

agrícolas y forestales, residuos sólidos municipales (RSU), entre otros, que pueden utilizarse para convertirlos en biocombustibles, con el objetivo de reducir la dependencia de las importaciones de petróleo, lograr ahorros de divisas y proporcionar una mejor remuneración a los agricultores con miras a duplicar sus ingresos.

La industria del biodiésel en la India no está desarrollada, por lo que no existe en la actualidad una cadena de suministro robusta para la producción de biodiésel en el país. Su desarrollo insipiente ha estado basado en el uso de materia primas de especies no alimenticias, como el aceite de jatropha (*Jatropha curcas*), que es una planta oleaginosa que comienza a producir hasta pasado mínimo 3 años desde su plantación, y del denominado “árbol de diésel” (*Pongamia pinnata*), que es una especie de porte alto, nativa de Asia tropical y templada, que incluye partes de la India. Con limitaciones por bajo rendimiento en la producción de semillas, con disponibilidad limitada de tierras para su cultivo y con costos de plantación, son algunas de las problemáticas pendientes de resolver sobre el cultivo de la materia prima necesaria para la producción de biodiésel. Tambiés están las grandes inversiones para establecer la infraestructura productiva, que en el caso del sector de la producción de etanol, vienen avanzado basadas en las alianzas entre las industrias químicas y alimentarias, pero que no ocurre en el caso del biodiésel.

Por este aspecto, entre otros, a partir del año 2018, se permitieron el uso de materias primas para la producción de etanol, a partir de la melaza de la caña de azúcar, cereales alimentarios dañados como el trigo y el arroz no aptos para el consumo humano. Además, el Gobierno fijó un precio diferente en la fabricación del etanol, basado en la materia prima utilizada, en el caso del jugo de caña de azúcar y sus derivados. Las acciones antes mencionadas ayudaron a aumentar la adquisición de etanol de 38 millones de millones de litros durante el año 2014 a 188,6 millones de millones de litros durante el año 2019, logrando así un porcentaje de mezcla promedio del 5 % (Ministry of Petroleum and Natural Gas, 2023a).

Tabla 59. Características de los biocombustibles en la India

	Etanol	Biodiésel
Materia prima	Principalemte de caña de azúcar (melaza)	*Jatropha curcas* *Pongamia pinnata* Aceite de palma importado
Área plantada	~ 5 millones de hectáreas	~ 500.000 hectáreas
Producción	1900 millones de litros	10 millones de litros
Plantas de producción	~120 (destilerías + plantas)	~2
Política Gubernamental	Ethanol Blending Program	National Mision on Biodiesel
Objetivos	5% y 10% en mezcla	20 % en mezcla

Adaptado de: (Ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des Territoires, n.d.) El sector de los biocombustibles en India. Notas sectoriales. Oficina Económica y Comercial de la Embajada de España en Nueva Delhi.

Asimismo, con el objetivo de argumentar el suministro de etanol, el Gobierno de la India permitió la adquisición de etanol producido a partir de otras materias primas no alimentarias además de la melaza, como materiales celulósicos y lignocelulósicos, incluida la vía petroquímica que ha planeado establecer biorrefinerías de etanol 2G en varias partes del país.

Además, el Gobierno lanzó la iniciativa “Pradhan Mantri JI-VAN (Jaiv Indhan-Vatavaran Anukool fasal awashesh Nivaran) Yojana” para proporcionar financiamiento para el déficit de viabilidad, a fin de brindar un impulso inicial para crear capacidad de etanol 2G en el país y atraer inversiones en este sector. En este plan, se busca brindar apoyo financiero a doce proyectos integrados de bioetanol que utilicen biomasa lignocelulósica y otras materias primas renovables con un diseño financiero total de 23.7 millones de dólares para el periodo 2018 a 2024.

India es el segundo mayor productor de caña de azúcar después de Brasil, y aporta alrededor del 19 % de la producción mundial. La caña de azúcar es uno de los cultivos comerciales más importantes del país y su cultivo ocupa un área de 4,77 millones de hectáreas (2018), con un 45 % de distribución geográfica entre la India subtropical y tropical. El área sembrada bajo la caña de azúcar depende de las preferencias de los agricultores, referentes al cambio de área para otros cultivos más rentables, condiciones agroclimáticas, rentabilidad, instalaciones de

riego, disponibilidad de recursos de los agricultores y pago oportuno por los ingenios.

Con relación al renglón del cultivo de la caña de azúcar, la India presenta un mercado ideal para expandirse debido al creciente consumo de azúcar en el país. Con nuevas políticas regulatorias y enmiendas a las más antiguas, existe una mayor posibilidad de que los agricultores y molineros aumenten sus esfuerzos hacia la producción y el procesamiento de azúcar de caña. La industria azucarera sustenta aproximadamente al 12 % de la población rural en los nueve estados del país, a saber, Punjab, Uttar Pradesh, Maharashtra, Andhra Pradesh, Bihar, Gujarat, Haryana, Karnataka y Tamil Nadu, a través del empleo directo o indirecto (FAO).

La Federación de Fábricas de Azúcar Cooperativas (Uttar Pradesh Cooperative Sugar Factories Federation Ltd., 2023), desde 1963 ha impulsa el desarrollo y la expansión de las industrias azucareras con el establecimiento de nuevas fábricas de azúcar, la expansión y la modernización de ingenios azucareros existentes, establecimiento de destilerías para el aprovechamiento de subproductos y asesoramiento y directrices financieras, técnicas y administrativas.

En este contexto, en el marco del programa de desarrollo de la caña de azúcar, de las 28 cooperativas azucareras, 13 funcionan como sociedades azucareras que desarrollan todas las actividades necesarias para el cultivo de la caña; mientras que las sociedades industriales se dedican al negocio de los fertilizantes y los insecticidas, para aumentar la producción de caña y de azúcar por unidad de tierra, poniendo a disposición semillas de variedades tempranas y otras variedades mejoradas, para aumentar la superficie de caña cultivada con variedades tempranas hasta un 35-40 % en cada ingenio, considerando que algunos ingenios tenían más del 50 % de la superficie de caña cultivada con variedades inadecuadas como COS-91269 y BO-91.

De acuerdo al Portal Unificado de Estadísticas Agrícolas (UPAg) (Ministry of Agriculture & Farmers Welfare, 2023) de la India, diseñado para generar estimaciones de cultivos e integrarse con otros sistemas que generan estadísticas agrícolas, como precios, comercio, adquisiciones, existencias, para el caso de la

superficie cultivada con caña de azúcar en los dos últimos periodos 2021-2022 y 2022-2023, se considera un aumento del área cultivada, contándose con 5.883.000 de hectáreas, como se observa en la Figura 111, que se cultivaron durante la temporada de monzones, que dura de junio a noviembre según la zona.

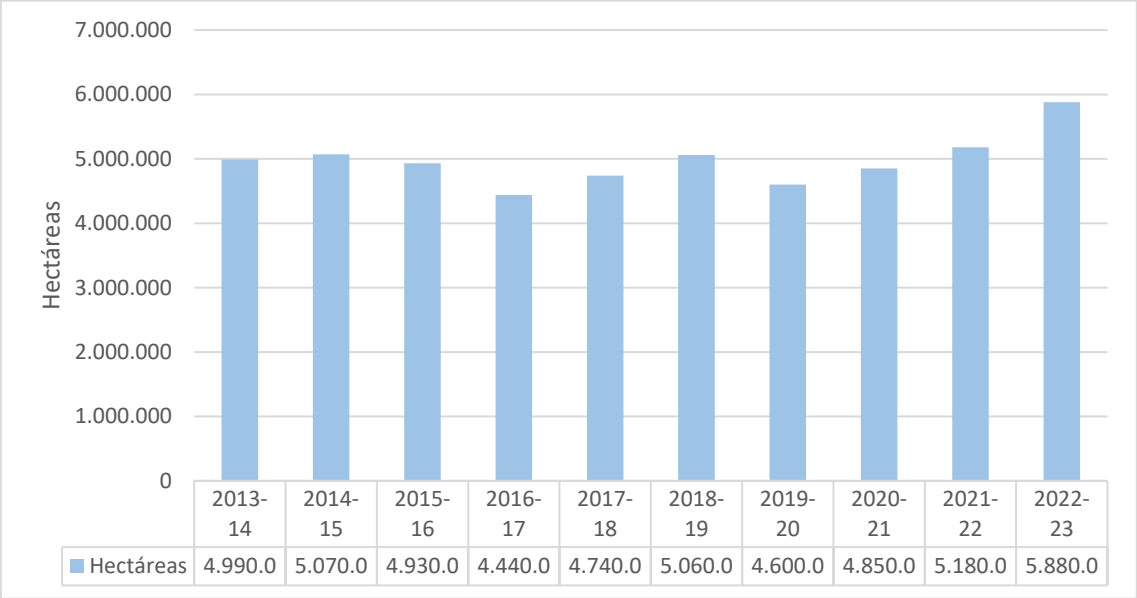


Figura 111. Superficie sembrada caña de azúcar para el periodo 2013-2014 a 2022-2023

Tomado de: Adaptado de (Ministry of Agriculture & Farmers Welfare, 2023)

Con referencia a la producción de caña de azúcar, en la misma tendencia de la superficie sembrada, y a diferencia del periodo 2019-2020, donde se registró una disminución de 34,9 millones de toneladas con referencia al periodo anterior (2018-2019), se ha mantenido un aumento en la producción, que para el caso del último periodo evaluado (2022-2023), registró una producción de 494,2 millones de toneladas, como se observa en la Figura 112.

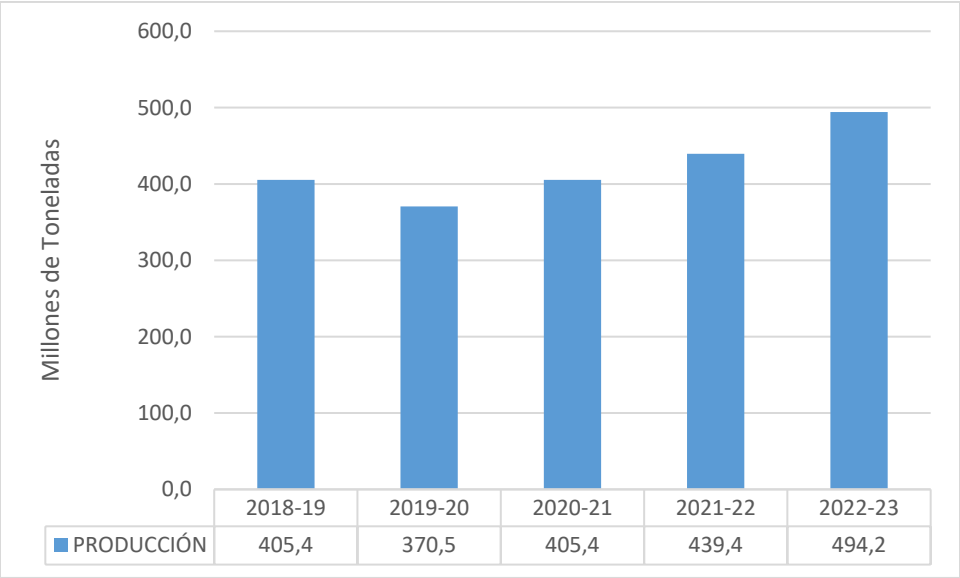


Figura 112. Producción de caña de azúcar para el periodo 2018-19 a 2022-23.

Tomado de: Adaptado de (Ministry of Agriculture & Farmers Welfare, 2023)

De acuerdo con el Portal Unificado de Estadísticas Agrícolas de la India, los cinco estados con mayor producción de caña de azúcar y que se denotan en color verde oscuro en la figura 114, fueron: Uttar Pradesh con 151,71 toneladas, Maharastra con 1239,68, Karnataka con 624,60, Tamil Nadu con 169,16 y Guyarat con 146,86.

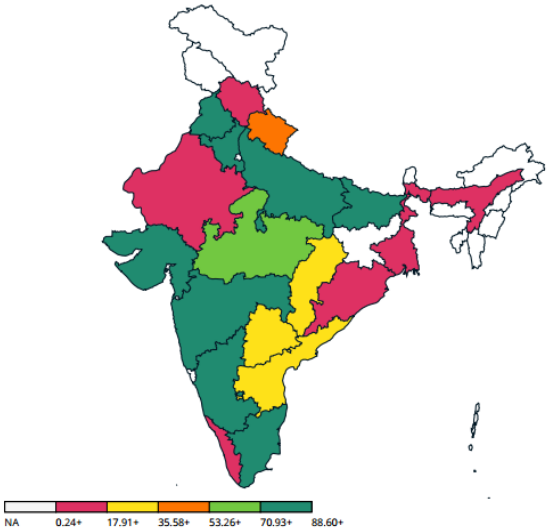


Figura 113. Estados principales productores de caña de azúcar (2022-2023)

Tomado de: (Ministry of Agriculture & Farmers Welfare, 2023)

Con referencia a los rendimientos obtenidos de la producción de caña de azúcar en la misma tendencia de la superficie sembrada, que para los periodos 2018-2019 y 2019-2020 registró rendimientos de 80.105 y 80.497 kilogramos por hectárea sembrada; para los periodos 2020-2021 y 2021-2022 se registraron mejores beneficios con rendimientos de 83.566 y 84.906 kilogramos por hectárea sembrada, este último es el mejor reporte, dado que para el periodo 2022-2023 se registró, a pesar de una mayor área sembrada y producción obtenida, una disminución del rendimiento en 84.003 kilogramos por hectárea sembrada con relación al periodo anterior (2021-2022), como se observa en la figura 114.

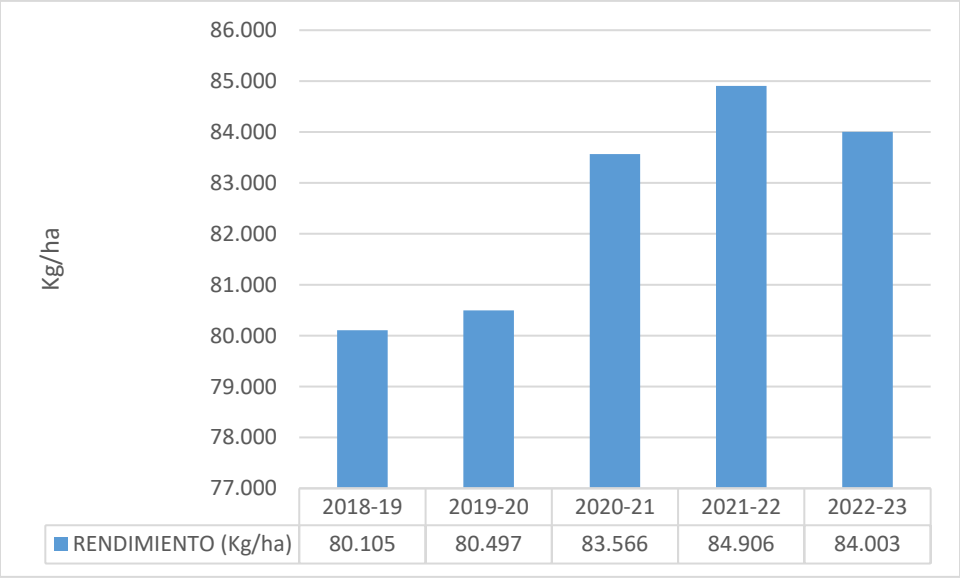


Figura 114. Rendimiento de la producción de caña de azúcar para el periodo 2018-2019 a 2022-2023

Tomado de: Adaptado de (Ministry of Agriculture & Farmers Welfare & Department of Agriculture & Farmers Welfare, 2023). Crop-wise Area, Production & Yield

4.5.4.2 Tecnologías de producción (características técnicas, costo/beneficio ambiental y rendimiento técnico y energético)

En el caso del bioetanol, en India se ha considerado como política de Estado el fortalecimiento de la seguridad energética sin entrar en conflicto con la seguridad alimentaria, razón por la cual se viene implementando una fase de transición hacia una economía basada en la productividad creciente y eficiente que mitiga y

permite la adaptación al cambio climático con la implementación de un programa eficaz en cuanto a la disminución efectiva de los gases efecto invernadero (GEI).

En este sentido, las mezclas de bioetanol con gasolina le dan al país la mejor ruta hacia la pretendida seguridad energética, como política y como negocio con varios actores vinculados a una nueva cadena productiva liderada por el Estado y desarrollada por el sector privado, empresarios y agricultores del orden local, quienes participan activamente en el movimiento económico con responsabilidad social (generación de empleo y oficios locales, movimiento de economías locales y regionales) y ambiental (reducción de emisiones atmosféricas por parte de los vehículos de transporte utilizados, disminución de la huella de carbono, planteándose en el futuro próximo la generación de bonos de carbono y el respectivo apoyo internacional que ello significa).

Los temas específicos como precios del bioetanol, adaptación industrial para la fabricación de los biocombustibles, adaptación de motores de vehículos y regulación de precios de venta, infraestructura nacional de suministro de biocombustibles ya mezclados, medición de la eficiencia del combustible mezclado de acuerdo con el tipo de motor y otros se revisan en comités interministeriales creados para estos fines y con el aporte de algunas asociaciones, las cuales han planteado, para el caso de la mezcla gasolina/bioetanol, las siguientes iniciativas:

- Régimen de subvención de intereses para las destilerías de melaza y cereales (DFPD).
- Establecimiento de normas para E5 (etanol 5 %, gasolina 95 %), mezclas de etanol E10 y E20 gasolina mezclada (Oficina de Normas de la India, BIS).
- Adopción del combustible E20 como combustible para automóviles y emisión de normas de emisiones masivas para él.
- Normas de seguridad para combustibles mezclados con etanol según GSR 343(E) del 25 de mayo de 2021 sobre la base de la norma de la industria automotriz (AIS 171).
- Establecimiento de requisitos de seguridad para la homologación de vehículos con etanol puro, combustible flexible y mezclas de etanol y

gasolina en la India. Las normas de emisiones BS-VI vigentes desde el 1º de abril de 2020 son aplicables a los vehículos E20.

El análisis hecho en estos comités entre los representantes seleccionados por los ministerios y las asociaciones involucradas, y luego de evaluar la factibilidad de las proyecciones progresivas de oferta y demanda, los desafíos en la fabricación de vehículos E20 y la infraestructura de las empresas de comercialización de petróleo (OMC), se sugirió un despliegue gradual de etanol E20 en el país para lograr el objetivo de 2025. Al tiempo que se iniciaron las acciones básicas para lograr la disponibilidad en toda la India del E10, a partir de abril de 2022, para su uso como combustible de protección para satisfacer las demandas de los vehículos existentes, proyectándolas hasta abril de 2025 y su continuidad sostenible. Se consideraron variables sociales, ambientales y económicas, tales como oferta y demanda, costo/beneficio por penetración de corto plazo de vehículos eléctricos en el mercado, como competencia a los vehículos adaptados para las mezclas gasolina-bioetanol, rangos de inversión, inversionistas y diversidad de actores.

La capacidad actual de producción de etanol en la India se deriva principalmente de destilerías a base de melaza.

Se propuso, entonces, ampliar el número de destilerías de cereales. Esto sería suficiente para producir los litros proyectados de etanol requeridos para biocombustibles y para otros usos. Esto requerirá de un aumento en la producción de azúcar y de cereales por año con el apoyo de todos los estamentos del país, permitiendo la acción de todas las partes interesadas, a saber, empresas de comercialización de petróleo, fabricantes de vehículos, estaciones de servicio, destilerías y empresarios, según este plan de implementación detallado y sugerido.

El apoyo estatal inició con el establecimiento de un régimen regulatorio más simple y rápido, preferiblemente autorización de ventanilla única por parte de los estados y el lanzamiento de campañas educativas para los consumidores.

En India se ha tenido en cuenta que cuando se utiliza E20, hay una pérdida estimada de eficiencia de combustible del 6 al 7 % para vehículos de 4 ruedas

diseñados originalmente para E0 y calibrados para E10, del 3 al 4 % para vehículos de 2 ruedas diseñados para E0 y calibrados para E10, y del 1 al 2 % para vehículos de 2 ruedas diseñados para E0 y calibrados para E10. Sobre los vehículos de 4 ruedas diseñados para E10 y calibrados para E20 se ha informado que con modificaciones en los motores (*hardware* y *tuning*) se puede reducir la pérdida de eficiencia por combustible mezclado. Para compensar a los consumidores por la caída en la eficiencia de los combustibles mezclados con etanol, se están considerando incentivos fiscales para los combustibles E10 y E20.

En este sentido, se prepararán para suministrar vehículos compatibles de acuerdo con la hoja de ruta. Los vehículos que cumplen con los materiales E20 y los motores sintonizados con E10 pueden lanzarse en todo el país a partir de abril de 2023.

Estos vehículos pueden tolerar entre un 10 y un 20 % de gasolina mezclada con etanol y también ofrecen un rendimiento óptimo con combustible E10. Los vehículos con motores sintonizados E20 se podrán implementar en todo el país a partir de abril de 2025. Los vehículos adaptados funcionarán únicamente con E20 y brindarán un alto rendimiento.

Para acelerar la adopción y la transición a combustibles mezclados con etanol, se establecieron incentivos de precios a través de desgravaciones fiscales a nivel minorista para el combustible mezclado con etanol e incentivos fiscales para vehículos compatibles con E20.

El Gobierno también fomenta el uso de cultivos de cereales alimentarios que consuman menos agua, como el maíz, y materias primas 2G para la producción de etanol.

— *Procesos de mejora de la calidad para biocombustibles*

Estratégicamente, en India se han visto los biocombustibles como la oportunidad buscada para desarrollar un negocio que implica una serie de beneficios que favorecen a todos los actores involucrados; por un lado asegura el cumplimiento de los acuerdos internacionales firmados por el país en lo que tiene que ver con la reducción transicional de los combustibles fósiles, sobre todo los importados, reduciendo ostensiblemente la dependencia nacional de este tipo de combustibles

significativamente contaminantes, además, los biocombustibles cumplen la misión de ser fuentes de energía sostenibles y amigables con el medio ambiente.

Desde el punto de vista social, para una población tan alta y que habita en su mayoría regiones rurales, ayudará indudablemente a la generación de empleo u oficios de hecho, promoviendo su marca Make in India (Hacer en India), lo que consecuentemente mejorará los ingresos de los agricultores y promoverá la generación de residuos susceptibles de la economía circular.

El etanol es uno de los principales biocombustibles que se produce naturalmente mediante la fermentación de azúcares por levaduras o mediante procesos petroquímicos como la hidratación del etileno. Tiene aplicaciones médicas como antiséptico y desinfectante. En India se utiliza como disolvente químico y en la síntesis de compuestos orgánicos, además de ser una fuente natural alternativa para la mezcla con los combustibles fósiles, disminuyendo costos y mitigando la emisión de los gases efecto invernadero.

La Política Nacional sobre Biocombustibles establece un objetivo indicativo de una mezcla del 20 % de etanol en el marco del programa de gasolina mezclada con etanol (EBP) para 2030. Sin embargo, como no hay suficiente cantidad de bioetanol disponible, solo alrededor del 50 % de la gasolina vendida es mezcla E10, mientras que el resto es gasolina sin mezclar (E0).

En este sentido, en la India los vehículos más nuevos en E20 están adoptando normas de seguridad para la homologación de vehículos con etanol puro, combustible flexible y mezclas de etanol y gasolina. También se está empezando a aumentar la capacidad existente de destilación combinada de alcohol y etanol, de acuerdo con lo establecido en la hoja de ruta establecida en todo el país.

Un tema complicado se da para el caso de la caña de azúcar, la industria azucarera y el arroz que, en conjunto, utilizan el 70 % del agua de riego del país, agotando la disponibilidad de agua para otros cultivos.

Por lo tanto, se plantea el cambio del patrón de cultivos, reduciendo la dependencia de un cultivo en particular evolucionando hacia cultivos ambientalmente más sostenibles para la producción de etanol.

Los cereales, en particular el maíz, y los biocombustibles de segunda generación (2G) con innovaciones tecnológicas adecuadas que ofrecen la promesa de una materia prima alternativa más benigna para el medio ambiente en la producción de etanol.

4.5.4.3 Implicaciones de carácter agrario

Desde 2003, en la India se promovió la creación de la Comisión de Comercialización de Productos Agrícolas (CCPA) que permitió que cada estado estipulase unos precios mínimos regionales para determinados productos que evitasen la explotación de los agricultores. La electricidad también está altamente subvencionada y los productos que se venden en los mandis están sujetos a tarifas (los mercados privados no). De esas tarifas salen después el fomento de infraestructuras, un sistema de pensiones agricultor, programas de asesoramiento e innovación en temas como semillas y fertilizantes para los trabajadores, y también unas subvenciones para la población para que compren a buen precio artículos de primera necesidad que se venden en esos mismos mandis (Trula, 2021).

Desde el 26 de noviembre de 2020, con la huelga general agraria donde participaron unos 250 millones de personas, la India vivió grandes movilizaciones que se oponían a tres leyes aprobadas en septiembre de ese mismo año, que favorecerían a las grandes empresas transnacionales en detrimento del pequeño campesinado y que al contrario de esperarse con el confinamiento por COVID-19 que todavía estaba en vigor, no generaban un paquete de estímulo financiero ni medidas de alivio para superar el periodo de restricciones (Mantxo, 2021). Sin embargo, las propuestas de ley rechazadas se enmarcaron en:

- **Ley de Anulación del APMC (Comité del Mercado de Productos Agrícolas):** permite por primera vez el comercio de productos agrícolas fuera de los mandis (mercados) regulados por el APMC, y posibilita la proliferación de mandis privados en todo el país, que podrían controlar los precios y luego el mercado.

- **Ley de Agricultura por Contrato**: es un marco legislativo que favorece un acuerdo entre el agricultor y el comprador antes de la siembra a un precio predeterminado. La experiencia muestra que esta práctica incrementa el endeudamiento y, por tanto, afianza pautas de desigualdad como la pérdida de tierras y la concentración de la propiedad.
- **Ley de Acaparamiento de Alimentos (libertad para las empresas):** busca eliminar los límites arbitrarios y periódicos de existencias de productos agrícolas que el Gobierno impone a los comerciantes. La nueva ley introduce disparadores de precios que se emplearán solo en circunstancias excepcionales. Hasta ahora, los límites de existencias pueden imponerse solo cuando los precios de los productos perecederos aumenten en más del 100 % y los de los no perecederos en más del 50 %.

La justificación de estas leyes es que los fertilizantes subsidiados y la adquisición de productos básicos esenciales llevó al uso excesivo de pesticidas, degradando los suelos y la salud, y a la utilización excesiva de recursos hídricos subterráneos (especialmente por la expansión del arroz y el trigo). No hay razones para creer que las grandes empresas se preocupan por la salud del suelo o el uso excesivo de agua (Tricontinental, 2021).

En general, los proyectos de ley agraria otorgan a las grandes corporaciones un mayor control del mercado laboral y agrícola que tendría consecuencias de gran alcance en los precios de los productos básicos, la estructura financiera, los salarios, la salud pública y el medio ambiente. El poder total se concentrará en manos de pocas empresas y dejará a la mayoría de las personas del campo y trabajadoras en general en una situación de desamparo inimaginable (Mantxo, 2021).

Los argumentos que aduce el Gobierno en defensa de estas medidas señalan que se trata de ampliar las opciones y la libertad de los agricultores de vender más allá de los mandis (mercados) locales, es decir, de los espacios de mercado APMC (Agricultural Produce Market Committee, comités de mercado de productos agrícolas) notificados y de las fronteras de su estado. El propósito del Gobierno, con su masiva campaña mediática a favor de estos argumentos, estriba

en lograr que esta política sea aceptable para la comunidad campesina. Sin embargo, la libertad que se amplía realmente es la de las grandes empresas agroindustriales, tanto de dentro como de fuera de India. Los más perjudicados serán los campesinos marginales, pequeños y medianos, cuyo poder de negociación frente a las gigantescas empresas, dotadas de enormes recursos, será tan escaso para cerrar contratos sobre precios y asegurar su aplicación efectiva, que acabarán siendo esclavos de los tentáculos de los designios de las grandes empresas (Singh, 2021).

La India es el país del mundo con mayor superficie agrícola y ganadera, seguido de China y los Estados Unidos, su agricultura se divide en tres apartados: cultivos alimentarios, comerciales y de plantación, para lo cual, entre los cultivos comerciales, se incluye la caña de azúcar empleada en gran parte para bioetanol, como combustible (Mantxo, 2021).

En el sistema laboral de la India, se debe tener en cuenta el fenómeno de las cooperativas agrícolas, impulsadas en el marco de la reforma agraria, las cuales crecieron convirtiéndose en lo que se denominan falsas cooperativas, que funcionan bajo el control de una o pocas personas, o incluso de otras empresas. Otras son subvencionadas por el Estado, y en muchas ocasiones, son contrarias al interés social y ambiental. En algunos casos, prácticamente han adquirido tamaño de monopolios y debido a su peso económico, sus lazos con el mundo político son también muy fuertes. En la mayor zona de producción de azúcar, el estado de Maharashtra, se crearon más de 25.000 cooperativas agrícolas en la década de 1990 (Mantxo, 2021).

Con una producción récord de 30 millones de toneladas de azúcar, en el año 2022, la India se constituye como uno de los mayores productores de azúcar del mundo, pero a un alto costo para la población. Más de 1,4 millones de trabajadores no cuentan con condiciones dignas de trabajo en los campos de caña de azúcar con salarios entre 300 y 400 dólares por seis meses de duro trabajo, con un solo día libre al mes (Saifi, 2023).

4.5.4.4 Estrategias de recolección, tratamiento y transporte de materias primas (experiencia y gestión en aprovechamiento de uco)

Actualmente, el biodiésel se produce en la India principalmente a partir de aceite de palma importado. Para eliminar progresivamente la materia prima de la palma y como medida de sustitución de importaciones, se ha decidido promover el aceite de cocina usado (UCO) disponible en el país como materia prima. El aceite de cocina usado ha sido identificada como una materia prima potencial para la producción de biodiésel en la Política Nacional de Biocombustibles de 2018. El UCO se puede recopilar de consumidores a granel, como hoteles, restaurantes, comedores, entre otros, para su conversión (Ministry of Petroleum and Natural Gas, 2023b).

El aceite de cocina usado en la India a menudo se vierte imprudentemente por los fregaderos de la cocina, lo que provoca la obstrucción de los desagües, la contaminación de cuerpos de agua abiertos como lagos o estanques y el peligro de la vida marina. El sistema de drenaje obstruido causa problemas de acumulación de agua durante el monzón. El año pasado, India importó alrededor de 15 millones de toneladas de aceites comestibles, lo que contribuyó al 3 % de la factura total de importación del país (Aris Bioenergy, 2020).

Desde el 1º de julio de 2018, todos los operadores de empresas alimentarias (FBO) en la India están obligados a controlar la calidad del aceite utilizado para cocinar y cumplir con dichas normas. La Autoridad de Normas y Seguridad Alimentaria de la India (FSSAI) está implementando la estrategia “EEE”, es decir, Ecosistema de Aplicación de la Educación. El enfoque de la estrategia “EEE” garantiza la buena salud y el bienestar de todos los ciudadanos de 130 millones de rupias, lo que ayuda a la seguridad energética y la mitigación del cambio climático, lo que eventualmente conduce a un desarrollo ambientalmente sostenible (Aris Bioenergy, 2020).

En India, el biodiésel tiene una importancia estratégica para garantizar el equilibrio energético y la seguridad del país. Al alinearse bien con las iniciativas en curso del Gobierno, como Make in India y Swachh Bharat Abhiyan, la generación de biodiésel ofrece una gran oportunidad para integrar las ideas de enriquecer los

ingresos de los agricultores, reducir las importaciones de petróleo, crear empleos y riqueza a partir de los residuos (Aris Bioenergy, 2020).

Si todos estos establecimientos desechan el aceite de cocina usado de manera responsable, contribuirán a generar cientos de toneladas de biodiésel que es amigable con el medio ambiente y utilizable. La Autoridad de Normas y Seguridad Alimentaria de la India (FSSAI) emitió una guía en 2018 sobre la recolección de aceite de cocina usado en un contenedor y cómo convertirlo en biodiésel ecológico (Aris Bioenergy, 2020).

El aceite de cocina usado es recolectado por agregadores/recolectores autorizados que están debidamente registrados en agencias autorizadas como la Asociación de Biodiésel de India y la Junta Estatal de Biodiésel. La eliminación de cualquier material que dañe el medio ambiente en el agua es un delito grave y punible según la Ley de Control y Prevención del Agua de 1974 (Aris Bioenergy, 2020).

Existe la costumbre de que el aceite de cocina usado no sirva para nada después de utilizado, por ello no se recicla y sí se tira de forma irresponsable. Solo en algunos casos se convierte en biodiésel, se usa para fabricar jabones, glicerina y biodiésel. Se cuentan con muchos centros de acopio en el país de UCO de casas o restaurantes; luego es recogido en sus contenedores en las plantas para iniciar el reciclaje (Aris Bioenergy, 2020).

El aceite de cocina usado debe almacenarse de cierta manera para garantizar que pueda venderse a agregadores para su reciclaje (Aris Bioenergy, 2020). Para el caso de la India, se relacionan los siguientes generadores:

- **En conjuntos residenciales:** la mayoría de los hogares no son elegibles para el cobro de UCO por parte de los agregadores, ya que compran al por mayor. Sin embargo, es posible emprender una iniciativa comunitaria local y recolectar el aceite de cocina usado en un lugar comunitario designado.
- **Recolección comercial:** para aquellas empresas que tienen una cocina comercial, ciertamente es posible cobrar su UCO y luego entregarlo a los agregadores de la industria del biodiésel. Esto resuelve muchos propósitos, que van desde el cumplimiento del Gobierno hasta la reducción de impactos

como tuberías obstruidas, así como su responsabilidad cívica hacia el medio ambiente. Un contenedor dedicado, con un mecanismo de tamizado adecuado, puede conducir al almacenamiento adecuado de UCO que luego se puede proporcionar a una agencia de recolección/agregación. Algunas empresas proporcionan contenedores complementarios.

La FSSAI (Autoridad de Normas y Seguridad Alimentaria de la India) ha pedido a la Asociación India de Biodiésel que cree un ecosistema nacional que recoja el aceite de cocina usado y lo convierta en biodiésel. Por lo tanto, la FSSAI ha lanzado Repurpose Used Cooking Oil (RUCO), un ecosistema que simplifica la recolección y conversión de aceite de cocina usado en biodiésel. En un año promedio, se consumen alrededor de 23 millones de toneladas de aceite de cocina, por lo que existe un potencial para recuperar alrededor de 3 millones de toneladas de aceite comestible para producir biodiésel. Este enfoque estratégico ayuda a la seguridad energética y a la mitigación del cambio climático, lo que eventualmente conduce a un desarrollo ambientalmente sostenible (Aris Bioenergy, 2020).

4.5.4.5 Porcentaje de mezclas de biocombustibles

India es considerado el tercer productor y consumidor de etanol en el mundo. En 2018 lanzó su Política Nacional en Bicombustibles que establece unas metas de mezcla (20 % de bioetanol E20 y 5 % de biodiésel B5 en 2030) (IEA, n.d.).

Para el caso del bioetanol estableció un Programa de Mezcla de Etanol con Gasolina (EBP). En junio de 2022, India logró una mezcla promedio de 10 % de bioetanol en gasolina (IEA, n.d.).

En la Tabla 20, se resumen los mandatos de mezcla para India.

5.5.4.6 Experiencias internacionales, requerimientos energéticos y tasa de retorno energético

Hiloidhari et al. (2021) realizaron un análisis de ciclo de vida a escala de distrito en el estado de Maharashtra, India, para la producción de bioenergía a partir de caña de azúcar. El EROI entre los distritos oscila entre 1,5 y 5, siendo menor para Amravati y mayor para Sangli (véase figura 115) (Hiloidhari et al., n.d.).

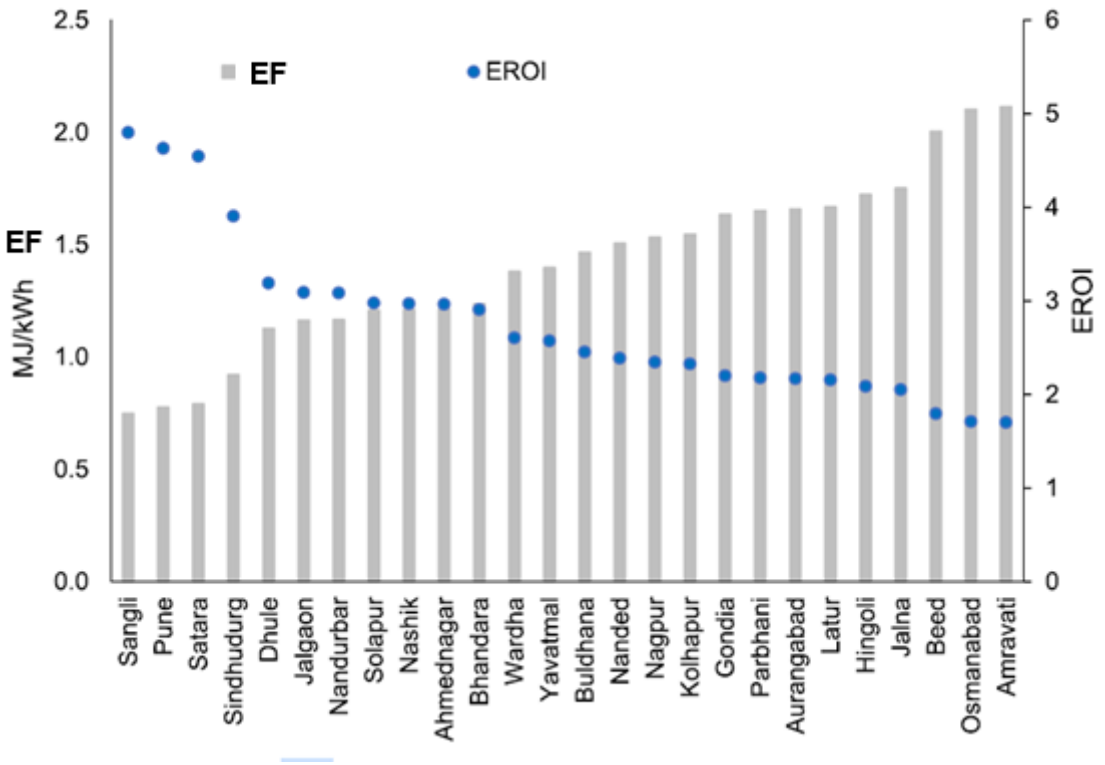


Figura 115. Huella energética y EROI en cogeneración de bagazo en distritos de Maharashtra, India

EF es La huella energética y EROI es la tasa de retorno de inversión energética

Tomado de: (Hiloidhari et al., n.d.)

De otro lado, Sharno & Hiloidhari (2022), determinaron el EROI para biojet a partir de diferentes materias primas, que se encuentra entre 1,60 y 1,78.

Tabla 60. EROI del biojet a partir de diferentes materias primas

Materia prima	Demanda energética acumulativa (MJ/l)	EROI
Paja de arroz	25,75	1,72
Paja de trigo	26,14	1,69
Hojas de papa	27,75	1,60
Tallo de yute	24,95	1,78

Adaptado de: (Sharno & Hiloidhari, 2022)

De acuerdo con la figura 40, el consumo per cápita promedio en India para los años 2017 a 2021 fue de 23,12 MMBtu/persona, mientras que el PIB energético promedio fue de 3,58 1000 Btu/2015$ PIB PPP (véase figura 41).

En el anexo A, Indicadores energéticos, se encuentran algunos indicadores energéticos de interés para el desarrollo de biocombustibles en diferentes países, entre ellos los seleccionados para el presente estudio. Es importante resaltar que

la tasa de retorno energético (EROI) debe ser superior a la unidad y que es mayor para los combustibles fósiles. Esto indica que la energía requerida por el sistema es menor que la energía liberada por el mismo.

De otro lado, en el anexo B, Requerimientos energéticos por etapa de la cadena de suministro de biocombustibles, se encuentran los requerimientos energéticos para el proceso agrícola, el pretratamiento de materias primas, procesamiento de precursores y transporte en la obtención de biocombustibles como el biodiésel, bioetanol, biogás y biojet para diferentes países. Los diferentes autores concuerdan en que la fase agrícola es aquella en la que se requiere mayor cantidad de energía.

4.5.5 Cadena de suministro

4.5.5.1 Cadena de suministro del biodiésel

A continuación, en la figura 116, se describe la cadena de valor para la producción de biodiésel y sus principales variables, con lo cual podemos definir capacidad de producción, capacidad de exportación y definición de esquema logístico para el uso de los biocombustibles.

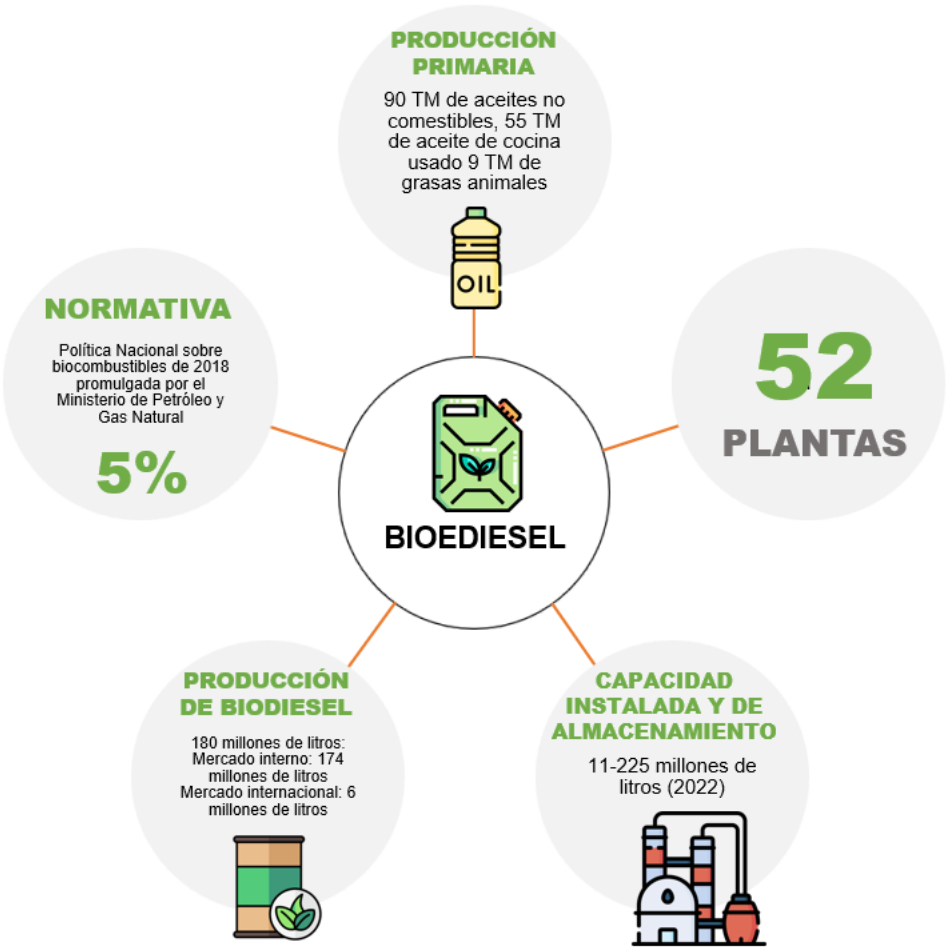


Figura 116. Cadena de valor de biodiésel en India

Adaptado de: (United States Department of Agriculture, n.d.)

— *Producción primaria*

Se cuenta con una capacidad de procesamiento de 90 toneladas métricas (TM) de jatropha y demás productos generadores de aceites no comestibles, 55 TM de aceite de cocina usado y 9 TM de grasas o cebo de origen animal (The Energy and Resources Institute, n.d.).

En India, la producción de biodiésel se da principalmente a partir de grasa de animales, cantidades limitadas de aceites no comestibles, aceite de cocina usado, aceite de palma y estearina de palma importada (United States Deparment of Agriculture, 2023). A diferencia de países pertenecientes a la Unión Europea y Estados Unidos, donde la producción de biodiésel se basa en aceites comestibles como el de soja, la producción de biodiésel no se puede realizar a partir de este

tipo de aceites, debido a que se cuenta con una producción deficiente debido a la competitividad existente para la seguridad alimentaria, por lo cual al seleccionar materias primas para la producción local de biodiésel se hace uso de aceites no comestibles, como el producido a partir de plantaciones de *Jatropha curcas*, esto debido a la escasez de agua y tierras aptas para la agricultura. Teniendo en cuenta las características de India, se busca el uso de especies que puedan cultivarse en terrenos baldíos, con el fin de evitar que las plantaciones para la producción de biodiésel desplacen los cultivos establecidos para la producción de alimentos (Oficina Económica y Comercial de la Embajada de España en Nueva Delhi, 2008).

— *Plantas de procesamiento*

Tras la cosecha de los frutos, el primer paso del procesamiento es la extracción del aceite, la técnica más usada es extraer el aceite por medio de máquinas prensadoras, sin embargo, con el uso de este tipo de equipos, solo alrededor del 60 % del aceite que contiene la semilla puede ser extraído (Altenburg et al., 2009). En cuanto a la producción de biodiésel, India cuenta con 54 plantas de producción, de las cuales 52 son operables y 2 se encuentran en construcción, se puede observar la ubicación de los fabricantes en la Figura 117, en la cual se denota que la mayoría de los fabricantes o plantas se encuentran en las regiones norte, oeste y costa del país, esto debido a que en estas zonas se tiene mayor facilidad de transporte de las materias primas y su disponibilidad.

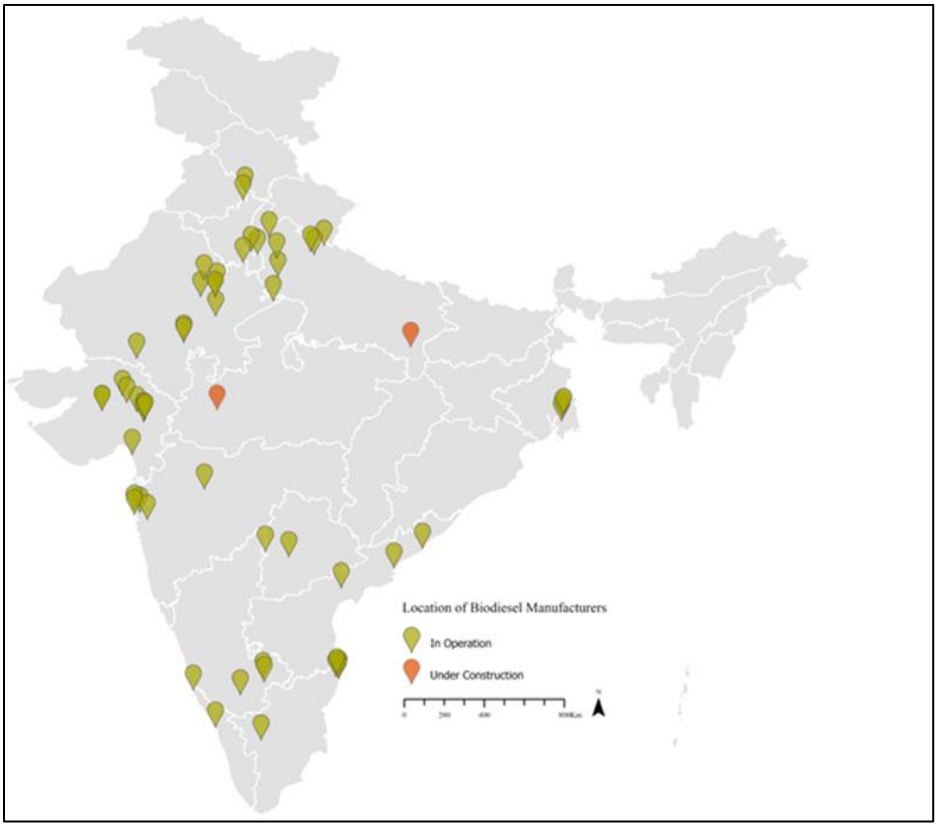


Figura 117. Fabricantes de biodiésel en India

Fuente: (The Energy and Resources Institute, 2023)

— *Producción de biodiésel y comercialización*

Para 2021, la producción de biodiésel fue de 180 millones de litros, de los cuales 174 millones de litros fueron usados en el interior del país y 6 millones de litros fueron exportados (The Energy and Resources Institute, 2023); mientras que en 2022, la producción de biodiésel fue de 185 millones de litros (Expo, 2023), por lo que tuvo un aumento en relación con la producción del 2021 que fue de 180 millones de litros de biodiésel. India cuenta con una capacidad instalada anual de producción máxima de mil millones de litros, sin embargo, la capacidad operativa se encontraba entre 500-550 millones de litros, debido a que durante la pandemia del COVID-19, la mayoría de las plantas estuvieron cerradas y sin producción, tras esto y debido a los altos costos de importación de materias primas, la capacidad

de producción actual está entre los 11 a los 225 millones de litros (JM BAXI GROUP, 2022).

— *Venta y exportación*

Los precios del biodiésel han caído entre un 15 y 28 % durante los primeros cuatro meses de 2023, encontrándose por debajo de los precios máximos alcanzados durante 2022, así mismo se espera que para 2024 la demanda de biocombustibles se expanda un 11 %, para un total de 25 millones de litros por año (IEA, n.d.).

En la Política Nacional de Biocombustibles de 2018, se establecen restricciones para la importación y exportación de biodiésel, con el fin de desincentivar la importación debido a que esta puede evitar que se genere un aumento en la producción local, por lo que en el informe anual de 2023 realizado por USDA, para el año en mención, la importación de biodiésel será muy cercana al millón de litros y se espera que las exportaciones se mantengan estables en 4 millones de litros, por su parte Malasia ha sido el principal importador de biodiésel producido en la India en los últimos 2 años (USDA, 2023).

— *Aceite de cocina usado*

El Ministerio de Petróleo y Gas Natural junto con las empresas de comercialización de petróleo lanzaron un programa llamado Repurpose Used Cooking Oil (RUCO). Es un ecosistema con el fin de rastrear la fuente del aceite usado. El portal muestra información sobre la recolección y tratamiento del aceite. Las principales fuentes de rastreo están dadas en restaurantes, hoteles, cantinas y demás cadenas de procesamiento de comida y deben controlar la calidad del aceite durante la fritura cumpliendo con las regulaciones establecidas. Cuentan con puntos de recolección en 15 estados y ofrecen la información de los puntos mas cercanos para disponer del aceite de cocina usado (RUCO, 2021).

Se lleva a cabo una campaña de sensibilización en establecimientos de alimentación, hoteles, pubs, cafeterías, etc., en donde se les habla de las ventajas de reciclar el aceite de cocina. Se informa, además, a los propietarios de estos establecimientos de alimentación, así como al personal de cocina, sobre las posibles enfermedades causadas por el aceite de cocina reutilizado (TOI, 2019).

— *Costos*

En cuanto al biodiésel y ya que la materia prima principal utilizada es el aceite de cocina usado, los costos de producción se reducirían en un 60-70 %, en comparación con los demás países. El costo del ACU es dos y tres veces menor que el del aceite vegetal fresco, lo que conduce a una reducción significativa en el costo total de procesamiento. El precio para el aceite de cocina usado es de 224 dólares/tonelada (Daniel Mandolesi De Araújo, 2013).

4.5.5.2 Cadena de suministro del bioetanol

A continuación, en la figura 118, se describe la cadena de valor para la producción de bioetanol y sus principales variables, con lo cual podemos definir capacidad de producción, capacidad de exportación y definición de esquema logístico para el uso de los biocombustibles.

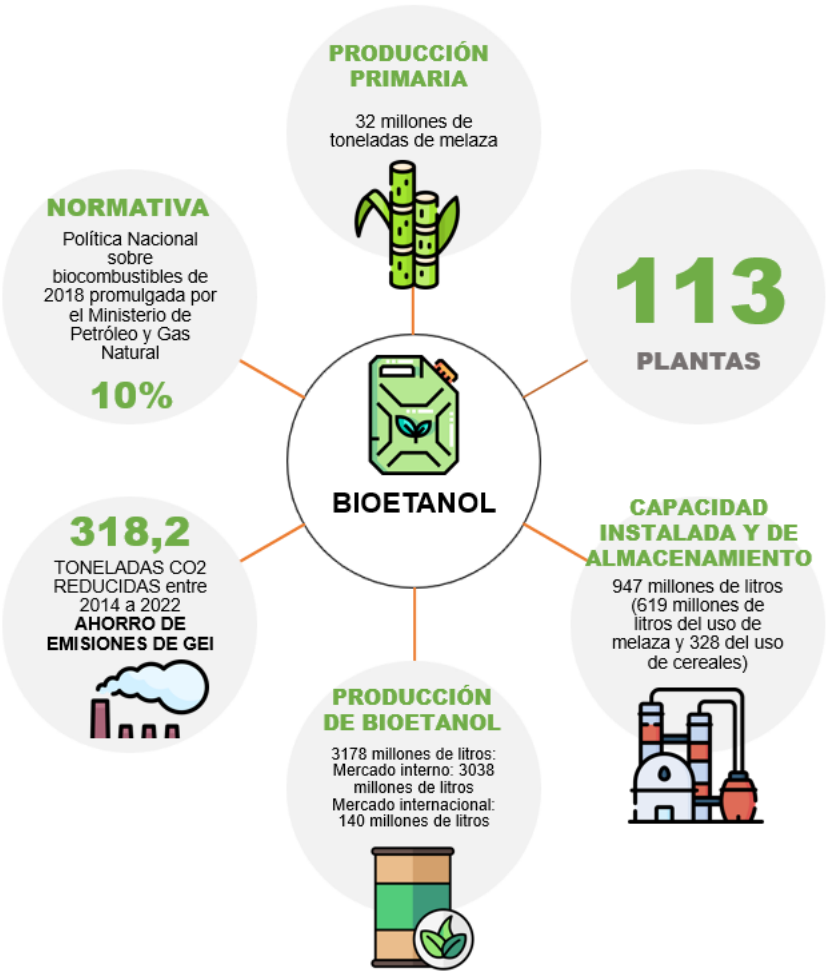


Figura 118. Cadena de suministro para bioetanol en India

Elaboración Propia

— Producción primaria

En India, el etanol se produce principalmente de melaza y caña de azúcar, pero cuenta también con un aporte de excedentes cereales como el maíz, arroz y la yuca. El programa de mezcla de etanol inició en 2003, con el objetivo de mezclar un 5 % etanol con gasolina en un piloto de distritos seleccionados. Se estima que la producción de bioetanol generada a partir de melaza es de alrededor de 32 millones de toneladas (Sarwal et al., n.d.).

— Plantas de procesamiento

El bioetanol se produce a partir de la fermentación de azúcares por levaduras o mediante procesos petroquímicos como la hidratación de etileno, tiene diferentes

usos, entre ellos se encuentra la aplicación como antiséptico o desinfectante, disolvente químico y como fuente alternativa de combustible (Sarwal et al., n.d.).

La cadena de valor del bioetanol inicia en la etapa de vivero y cuidado de las semillas, en la que se encuentran las instituciones que puedan a apoyar en temas de investigación y desarrollo, posteriormente se encuentra la etapa del cultivo o plantación de las semillas, continuando con el transporte de la materia prima por camión a las plantas o fábricas de producción de bioetanol.

Así las cosas, en esta fase se destila y se realiza la producción de bioetanol para lo cual se requiere apoyo de las empresas que comercializan petróleo, entidades del Gobierno, empresas de automóviles y consumidores, en general (Gunatilake & Abeygunawardena, 2011) (Abeygunawardena, 2011). Actualmente, India cuenta con 113 plantas de producción para suplir su demanda, distribuidas en los estados de Punjab, Maharashtra, Andhra Pradesh, Haryana, Madhya Pradesh, Bihar y Rajasthan (USDA, 2023)

— *Producción de bioetanol y comercialización*

Para el año 2019, la producción de bioetanol en India fue alrededor de 2 mil millones de litros, siendo el quinto productor de bioetanol; mientras que para el año 2021 la producción de bioetanol fue de 3178 millones de litros, de los cuales 3038 fueron consumidos al interior del país y 140 millones de litros fueron exportados (JM BAXI GROUP, 2022).

— *Ventas y exportación*

Los precios del etanol en India son más altos que los que otros países, debido a los costos de las materias primas, aunque el Gobierno ha fijado estrategias para regular los precios de la caña de azúcar y los cereales alimentarios, con el fin de apoyar a la comunidad agrícola. De acuerdo con lo anterior, la tabla 61 presenta la relación del precio en dólares por litro de bioetanol, según la materia prima.

Tabla 61. Precio del bioetanol según materia prima

Materia prima	Precio (USD/L)
Jugo o jarabe de caña de azúcar	0,865
Melaza	0,795
Excedentes de arroz	0,785

Fuente: (Sarwal et al., 2021)

En términos de la demanda (venta) del bioetanol, se espera que esta sea en promedio 1458 millones de litros por año en el periodo que comprende 2022 a 2024 (International Energy Agency, 2023); por otra parte, para el año 2021, la producción de bioetanol fue de 3178 millones de litros, de los cuales 3038 fueron consumidos al interior del país y 140 millones de litros fueron exportados (JM BAXI GROUP, 2022)

El comercio exterior se lleva a cabo a través de los puertos y el 70 % se lleva a cabo entre los puertos de Bombay y Jawaharlal Nehru, el restante se lleva a cabo en 12 puertos restantes. Y 43 puertos menores e intermedios manipulan mercancías. La flota de la Shipping Corporation of India consta de 79 buques con un tonelaje bruto total de 2.750.000 GT (Bhatt et al., 2021).

— *Costos*

Los costos para la caña de azúcar en porcentaje son:

- Materia prima: 60-70 %
- Mantenimiento: 4 %
- Químicos: 12,6 %
- Energía: 2,7 %
- Mano de obra: 2,5 %
- Depreciación: 7,6 % (Mandolesi de Araújo, 2013).

4.5.5.3 Cadena de suministro del biogás

En el contexto indio, se promueve la construcción de plantas de biogás a pequeña y gran escala, especialmente en zonas rurales. El gobierno indio ha implementado programas de subsidios y apoyos para fomentar la adopción de esta tecnología. Además, se fomenta la formación de cooperativas y grupos comunitarios para administrar y mantener estas instalaciones. La cadena de suministro del biogás en la India contribuye a la generación de energía sostenible, a la gestión de residuos y a la mejora de la productividad agrícola.

— *Producción primaria*

La India produce principalmente biogás utilizando materias primas como estiércol, desechos agrícolas y desechos orgánicos. Estos elementos se introducen en

digestores anaeróbicos, donde se produce la fermentación y se produce biogás. Este biogás se puede almacenar y usar directamente para producir electricidad o cocinar. Además, el digestato resultante es un fertilizante orgánico útil.

— *Almacenamiento y transporte*

En términos de transporte, la naturaleza descentralizada de las plantas de biogás en la India significa que el transporte de sustratos (como estiércol y desechos orgánicos) hacia las instalaciones es una parte importante del proceso. Los sustratos suelen ser recolectados de fuentes cercanas, lo que reduce los costos y la contaminación ambiental. En ocasiones, los sustratos se transportan a las plantas de biogás mediante sistemas de tuberías, especialmente en instalaciones más grandes o industriales (Biovec, n.d.).

— *Plantas de procesamiento*

India es el segundo país del mundo con más plantas de biogás. En este país el biogás es una cuestión de Estado. Existen unos 4,6 millones de pequeños digestores, básicamente basados en estiércol vacuno y deyecciones humanas destinados para cocinar y pequeñas iluminaciones (Biovec, n.d.).

— *Distribución y comercialización*

La distribución y comercialización de biogás en la India está impulsada por programas gubernamentales y organizaciones no gubernamentales (ONG) que fomentan la instalación de plantas de biogás en hogares y comunidades. Estas plantas producen biogás utilizando estiércol y otros desechos orgánicos. Este biogás puede ser utilizado para cocinar y producir electricidad. En algunas áreas urbanas, el biogás también se inyecta en la red de gas natural (World, n.d.).

La promoción de la distribución de biogás se enfoca en zonas rurales donde hay una alta disponibilidad de estiércol. Se han establecido programas de financiamiento y subsidios para facilitar la instalación de plantas de biogás, lo que contribuye a la electrificación rural y a la reducción de la presión sobre los recursos forestales (World, n.d.).

En conclusión, la distribución y comercialización de biogás en la India se basa en una estrategia amplia de descentralización, con un enfoque en las

comunidades rurales y una variedad de programas de apoyo gubernamental y de organizaciones no gubernamentales (ONG).

4.5.6 Aspectos ambientales

5.5.4.1 Análisis de ciclo de vida

India es considerado el cuarto consumidor de energía del mundo y su demanda energética está creciendo a una tasa de 5,6 % anual, incrementando la demanda del diésel, por ejemplo, a 65 toneladas métricas al 2030. Aspectos ambientales en el sector transporte están potenciando el uso de biocombustibles como el bioetanol y el biodiésel; además, el Gobierno de la India lanzó la Misión Nacional de Bicombustibles para potenciar su desarrollo (Mandade & Shastri, 2019).

Lo anterior a promocionado el desarrollo de mezclas a base de residuos lignocelulósicos como el bagazo de caña de azúcar, paja de arroz, paja de trigo, tallo de sorgo, tallo de algodón entre otros (Mandade & Shastri, 2019).

Mandade & Shastri (2019), desarrollan un estudio de optimización multi-objetivo para recomendar la selección óptima de materias primas lignocelulósicas para el desarrollo de bioetanol en India con base en diferentes precursores e indicadores de sostenibilidadHaga clic o pulse aquí para escribir texto..

En dicho estudio, se reporta un análisis de ciclo de vida de la cuna a la tumba “*cadle-to-gate*”, cuyos límites del sistema se muestran en la figura 120.

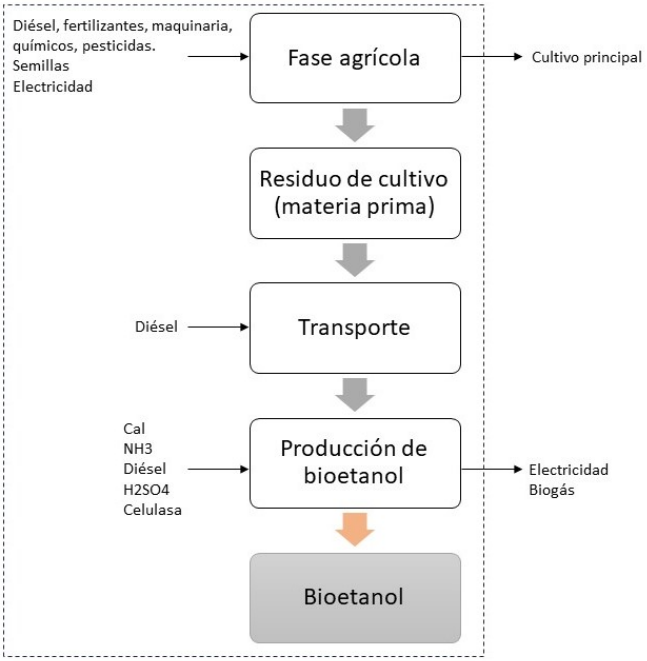


Figura 119. Límites del Sistema para el ACV en India

Tomado de: (Mandade & Shastri, 2019)

Este análisis de ciclo de vida (ACV) involucra el proceso de producción de la materia prima (cultivo), su transporte al lugar de procesamiento y su transformación (biorefinería) en bioetanol.

La tabla 62 muestra algunos datos de rendimiento de los residuos seleccionados y los resultados de los indicadores ambientales evaluados.

Tabla 62. Valores promedio del ACV y otros parámetros de interés

Materia prima	Disponibilidad (millones Mg/año)	Rendimiento de bioetanol (l/Mg materia prima)	Potencial de producción máxima de bioetanol (millones m^3/año)	Emisiones GEI (kg CO2/l bioetanol producido)	Uso de la tierra (m2/l bioetanol producido)	Uso de agua (l agua/l bioetanol producido)	EROI
Tallo de algodón	15,3	335	3,09	0.2858	0.3625	240	5,496
Cascarilla de arroz	194	254,5	3,28	0.4137	0.1888	3954	4.293
Tallo de trigo	136	262,7	2,95	0.4006	0.7495	284	3.966
Tallo de sorgo	67	107	0,734	0.1801	0.5897	328	7.215
Bagazo de caña de azúcar	53,7	301	8,08	0.2594	0.1959	203	5.56
Molasas de caña de azúcar	13,9	285	3,18	0.1138	0.1829	432	4.85

Adaptado de: (Mandade & Shastri, 2019)

De acuerdo con la tabla 62, India tiene disponibilidad de estos residuos en su territorio, lo que podría cumplir el potencial de producción máxima de bioetanol que oscila entre 1 y 8 millones de metros cúbicos por año, dependiendo del precursor y su disponibilidad. Las menores emisiones se logran con las molasas de la caña de azúcar, el tallo de sorgo y el bagazo de caña. El menor uso de la tierra se logra con los residuos de la caña de azúcar y la cascarilla de arroz, sin embargo, este último requiere mucha agua. La mayor tasa de retorno energético se logra con el tallo de sorgo y el bagazo de caña, sin embargo, todas son superiores a la unidad, por tanto logran gran disponibilidad de energía para su uso en diferentes actividades.

5.5.4.2 Emisiones de gases de efecto invernadero

En el año 2016, la mayor participación en las emisiones netas fue del sector energético y el sector de procesos industriales y uso de productos (IPPU) (Environment et al., n.d.).

En el sector de energía, la mayor participación se da en la combustión, sobre todo por la industria de la energía (por la producción de electricidad y los procesos de refinería), las industrias manufactureras (por la industria del cemento y el hierro y el acero) y de la construcción y el sector transporte (transporte por carretera y aviación civil). El sector residencial también tiene una participación considerable en las emisiones del sector de energía. Mientras que para IPPU, las mayores emisiones son generadas por la industria de los minerales (cemento y cal, principalmente) y la industria de los metales (aluminio y ferroaleaciones) (Environment et al., n.d.).

5.5.4.3 Compromisos ambientales en reducción de GEI

Inicialmente expresó una reducción del 33-35 % comparadas desde 2005 para el 2030, sin embargo, no actualizó el compromiso en el comité realizado para el año 2021.

Su mayor compromiso es con la transición energética, con el fin de hacer uso de una mayor proporción de las energías renovables, sin embargo, no se evidencia una meta clara para una transición lejos del carbón.

Ademas, no ha expresado un compromiso para actualizar ambiciosamente la meta de las contribuciones determinadas a nivel naciona (NDC) (Harvard Law School, 2021).

4.5.7 Aspectos sociales

De acuerdo con el Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA) en su reporte anual respecto de la situación de los biocombustibles (USDA, 2023), India produce biodiésel principalmente a partir de grasas animales, cantidades limitadas de aceites no comestibles, aceites de cocina usado (UCO) y aceite de palma y estearina de palma importados. La utilización de biodiésel en la India sigue siendo excepcionalmente baja debido a las limitaciones de importación, la falta de una cadena de suministro organizada, los costos excesivos y la falta de disponibilidad de materias primas (USDA, 2023).

En cuanto a la información relacionada con los impactos económicos y sociales, no se identificó una estadística centralizada o de acceso público a nivel gubernamental o de gremios. En este sentido, los resultados que se presentan respecto de este país responden a fuentes secundarias. De esta información se destaca una generación de empleo de 178.100 puestos de trabajo en la cadena de valor de la industria.

Entre los principales impactos socioeconómicos se identifica un debate respecto de las implicaciones a la seguridad alimentaria, principalmente, por el cambio realizado a la política de biocombustibles por la hoja de ruta del etanol, la cual promueve el uso de materias primas agrícolas, esto en un país con altos índices de desnutrición. Asimismo, se identifican afectaciones a los recursos hídricos como consecuencia de los cultivos intensivos de caña y de vertimientos, lo que tiene diferentes impactos a nivel de salud.

A continuación, se presentan los resultados del análisis de conformidad con la información disponible en India.

4.5.7.1 Seguridad alimentaria

Actualmente el debate en materia de implicaciones sociales respecto de los biocombustibles en India está relacionado con la seguridad alimentaria con muchas organizaciones detrás del mismo. Esto, principalmente como

consecuencia del cambio en la política nacional en la materia de 2021 a través del Informe Niti Aayog (hoja de ruta del etanol) que modificó la premisa establecida en la Política Nacional de Biocombustibles de 2018, que promovía el desarrollo de estos no empleando ningún tipo de materia prima comestible, por un enfoque basado en materias primas de origen alimentario (Powel et al., 2022).

La hoja de ruta para el etanol prevé duplicar la producción de este biocombustible, para lo que es necesario cuadruplicar la producción de granos nacionales y crecer en 2,5 veces la de caña de azúcar a 2025. De acuerdo con el International Council of Clean Transportation, se hace necesario un aumento de las tierras de cultivo o sobrepasar el uso de los excedentes de materia prima con los que cuenta la nación para garantizar la seguridad alimentaria, o cambiar la vocación de India de un país autosuficiente en granos a uno que depende de las importaciones de los mismos, lo que podría resultar en una reducción de las oportunidades de trabajo doméstico, salarios deprimidos y fluctuación de la moneda y el cambio del uso de la tierra (ILUC) en los países que importan sus productos a la India (Pradhan & Parij, 2021).

La preocupación relacionada con dicho enfoque está en que el mismo pueda generar un desvió de los granos alimenticios que estaban dirigidos a las comunidades pobres a empresas productores o destilerías que pagan mejores precios comparado con el Estado (Pradhan & Parij, 2021).

Dicho contexto podría agravar la situación de vulneración de la India, la cual de acuerdo con datos del Índice Mundial de Hambre ocupa el lugar 94 entre 107 países, con cerca de 209 millones de indios en situación de desnutrición (15 % de su población) entre 2018 y 2020, cifra que pudo haber crecido como consecuencia de la pandemia del COVID-19.

4.5.7.2 Acceso a la tierra e impacto a comunidades locales, agrícolas e indígenas

— Usos de la tierra

En la India, el cultivo de materias primas para biocombustibles se ha previsto por parte de la Política Nacional de Biocombustibles en tierras baldías o marginales. Esto con el fin de minimizar los impactos sobre el uso de la tierra y la seguridad

alimentaria. Al respecto, destaca USAID que la Misión Nacional de Biodiésel imaginó el cultivo de jatropha en 400,000 hectáreas de tierras marginadas para 2007, y otros 10 millones de hectáreas de páramo y otras tierras inactivas adyacentes a vías ferroviarias en 2012. Un proyecto tan masivo, destinado a reemplazar el 20 % de la India. Se prevé que el consumo de diésel con biodiésel emplee entre 2.5 y 5 millones de personas.

No obstante, de acuerdo con Shruti Tripathi, el cultivo jatropha puede tener graves consecuencias para los medios de vida rurales y los sistemas ecológicos rurales, siendo una problemática en un contexto de crecimiento poblacional, aumento de los ingresos y presiones sobre los recursos naturales, lo que conducirá a una mayor pérdida de hábitat natural. Además, la escasez de agua ya es un factor limitante en la producción de alimentos en muchas regiones (Tripathi, n.d.).

Asimismo, señala el precitado autor, que los cultivos de materias primas para biocombustibles, como el azúcar, son intensivos en agua y a menudo se producen bajo la modalidad de monocultivo, lo que lleva a una mayor escasez de agua y contaminación del recurso hídrico. Además, las materias primas de los biocombustibles tienen algunos impactos negativos en el medio ambiente debido a la necesidad de energía fósil, a la producción bajo monocultivos y el uso de fertilizantes y pesticidas que contamina el suelo y las aguas subterráneas (Tripathi, n.d.).

— *Impacto a comunidades locales*

Señala Shruti Tripathi, que se han presentado diferentes conflictos que afectan a las comunidades locales y ancestrales. En Chhattisgarh, una zona con alta presencia de comunidades tribales, sus cultivos agrícolas han sido destruidos para plantar jatropha. Esto también ha generado conflictos con las comunidades, ya que se les está negando su derecho inherente a tomar decisiones sobre el uso de la tierra. En Vidarbha, Maharashtra, la empresa involucrada contrata la agricultura con los agricultores. Se han aprovechado del fracaso de los cultivos de algodón Bt y han atraído a los agricultores a cultivar jatropha. Las empresas han tenido éxito en inducir a los agricultores a jatropha con la falsa promesa de que las

plantaciones les darán inmensos rendimientos después de tres años (Tripathi, n.d.).

Asimismo, continua el autor, que en la India el ganado es la principal fuente de sustento de los pobres y dependen en gran medida de los pastos comunes para el pastoreo de su ganado. Al plantar jatropha, la disponibilidad de forraje del ganado se ha visto directamente afectada. La transferencia de bienes comunes y tierras de pastoreo, del suministro de forraje al ganado, en la economía local, al suministro de combustible para los automóviles, erosiona aún más los medios de vida rurales y aumenta las tensiones sociales. Los pobres viven en una economía basada en la biomasa y la biodiversidad. El desvío de la tierra a los biocombustibles industriales también desviará la biodiversidad/materia orgánica de las necesidades básicas de los pobres y el mantenimiento de los ciclos ecológicos. Esto puede crear un colapso de los agroecosistemas rurales a medida que la industria desvíe la biodiversidad y el agua para el biocombustible (Tripathi, n.d.).

— *Afectación sobre el recurso hídrico*

Asimismo, señalan Powel et al. (2022) que la caña de azúcar, principal insumo para el etanol en la India, es un cultivo intensivo en agua. De acuerdo con The Third Pole, dicho consumo intensivo de agua para la producción de caña podría ser alto en tiempos de sequía. Señala dicha organización que para la producción de un kilo de caña de azúcar se requiere entre 1500 y 2000 litros de agua; para la trituración de una tonelada de caña de azúcar se requieren otros 1500 a 2000 mil litros de agua y se generan cerca de 1000 litros de aguas residuales (Mondal, 2021).

Otros de los impactos que se señalan en The Third Pole frente al cultivo intensivo de caña de azúcar, son:

- **La afectación a los niveles de agua subterránea y de captación de agua para el consumo humano:** frente a esto se ha podido identificar presencia de patógenos, sales inorgánicas (calcio, magnesio, sodio, nitratos) por arriba de los 1,190 mg/l en el agua de consumo humano, lo que implica una baja calidad del agua.

- **Afectaciones a la salud humana:** la contaminación en el agua puede generar enfermedades crónicas, afectación al hígado, los riñones, el sistema inmune, el sistema nervioso, el tracto gastrointestinal y generar dificultades de aprendizaje en los niños.
- **Contaminación al aire a través de cenizas y hollín** provenientes de las fábricas que procesan el azúcar y de otros recursos, como el suelo por el uso de pesticidas (Mondal, 2021).

4.5.7.3 Condiciones laborales y de seguridad y salud en el trabajo

Actualmente, la fuerza laboral de la India está creciendo a una tasa del 2,5 % anual, pero el empleo está creciendo a solo el 2,3 %. Más del 90 % de la fuerza laboral está empleada en el "sector no organizado", es decir, en sectores que no proporcionan la seguridad social y otros beneficios del empleo en el "sector organizado". En las zonas rurales, los trabajadores agrícolas forman la mayor parte del sector no organizado (Tripathi, n.d.).

Esto puede verse sobre todo en la cadena de valor de los cultivos azucareros en los cuales, según Oxfam, se identifican problemáticas asociadas con:

- **Brechas salariales de género:** el pago realizado a los trabajadores asalariados diarios es altamente discriminatorio en cuanto al género, con una variación significativa en la cantidad de salarios pagados a hombres y a mujeres trabajadoras.
- **Bajos salarios:** a los trabajadores agrícolas, ya sean contratados directamente por los agricultores o a través de contratistas o agentes de mano de obra de terceros, siempre se les pagaba mucho menos de lo que el Gobierno del estado prescribía como salarios mínimos. Los salarios varían entre 200 y 400 rupias para los hombres, entre 80 y 200 rupias para las mujeres, frente a unos salarios de 293, 322 y 361 rupias para trabajadores no cualificados, semicualificados y cualificados
- **Pago tardío de los salarios para quienes trabajan a jornal:** estos trabajadores dependen de sus ingresos diarios, lo que ayuda al sustento de sus hogares. Sin embargo, el estudio encontró que hasta el 81 % de los

trabajadores agrícolas no son pagados el mismo día y experimentan un retraso de hasta 10 a 15 días.

- **Deducciones:** para aquellos trabajadores que tienen un contrato de largo plazo se evidenció que los agricultores también deducen dinero del pago de los trabajadores si el molino no paga la cantidad total debido a la descomposición de la caña o a que a los bastones les quedan hojas. Las deducciones de peso injustas en parte de las fábricas a su vez afectan tanto a los agricultores como a los trabajadores.
- **Trabajo infantil:** asimismo hay evidencia de que los niños que trabajan en la caña de azúcar están expuestos a malas condiciones de trabajo y de vida, lo que puede conducir a problemas de salud e interferir con su educación y no están siendo pagados o son mal pagados.
- **Trabajadores migrantes:** se identificó la presencia de estos y condiciones relacionadas con el no pago de horas extras, abusos verbales y amenazas, pagos al final de periodo de cosecha, no tiempos de descanso, entre otros (Oxfam India., n.d.).

5. Análisis comparativo

5.1 Actores oficiales

Los actores oficiales en los países analizados tienen estructuras muy parecidas para sus actores gubernamentales , encontramos que Estados Unidos con su Agencia de Protección Ambiental (EPA), quien es la responsable de desarrollar e implementar regulaciones para los combustibles destinados al transporte vendidos en los Estados Unidos, se encarga de regular las operaciones en las instalaciones de producción de etanol bajo programas de licenciamientos de aire, agua y almacenamiento, así como de prevención de derrames, gestión de riesgos y respuesta a emergencias en las instalaciones. Además, es la creadora del Programa de Estandarización de Combustible Renovable (RFS), el cual promueve que las compañías petroleras mezclen volúmenes cada vez mayores de combustibles renovables con gasolina y diésel, culminando con 36 mil millones de galones en el 2022. Así mismo ha expedido el Reglamento E15 y el Programa de Normas de Combustible y Emisiones de Vehículos de Nivel 3.

El Departamento de Transporte de Estados Unidos (DOT) es el responsable de regular el transporte seguro de etanol por vía terrestre y férrea. Por otro lado, la Administración de Alimentos y Medicamentos (FDA) del Departamento de Salud y Servicios Humanos establece que las plantas productoras de etanol deberán estar registradas ante la FDA y deberán cumplir con las buenas prácticas de fabricación, así mismo, contar con un Plan de Seguridad Alimentaria donde deberán detallar un análisis de peligros y controles preventivos (U.S. Food & Drug Administration, 2023a). Estados Uninos también cuenta con la Comisión Federal de Comercio (FTC) quien es la responsable de asegurar que el mercado de consumo sea eficiente y no tenga restricciones, para lo cual emitió la regla para la clasificación, certificación y publicación de combustible para automóviles.

En Brasil el Decreto n.º 83.700, del 5 de julio de 1979, en su artículo 3º, establece los actores gubernamentales que son el Ministerio de Hacienda, el Ministerio de Agricultura, el Ministerio de Industria y Comercio, el Ministerio de

Minas y Energía, el Ministerio del Interior, y la Secretaría de Planificación de la Presidencia de la República. Este mismo decreto crea el Consejo Nacional del Alcohol (CNA), en donde se enuncia su estructura y sus miembros.

Argentina tiene como actores oficiales al Ministerio de Economía con su Secretaría de Energía y a la Comisión Nacional Asesora para la Promoción de la Producción y Uso Sustentables de los Biocombustibles, cuya función es la de asistir y asesorar a la autoridad de aplicación. La Comisión está integrada por por un representante de la Secretaría de Energía, Secretaría de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentos, Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable, Secretaría de Hacienda, Secretaría de Política Económica, Secretaría de Comercio, Industria y de la Pequeña y Mediana Empresa, Secretaría de Ciencia, Tecnología e Innovación Productiva, y Administración Federal de Ingresos Públicos y todo otro organismo o instituciones públicas o privadas que pueda asegurar el mejor cumplimiento de las funciones asignadas a la autoridad de aplicación.

Encontramos a Francia, sin una norma especial que tenga sus actores definidos, sin embargo, encontramos que están involucrados a la Comisión Europea, al Comité Económico y Social Europeo y al propio Gobierno francés.

En la India, tenemos como actores principales al Ministerio de Petróleo y Gas Natural, el Ministerio de Energías Nuevas y Renovables, el Ministerio de Finanzas, el Ministerio de Agricultura, la Agencia de Desarrollo de Energías Renovables (IREDA), el Banco de Desarrollo de la India (SIDBI) y finalmente la Junta para el desarrollo de una directiva para el desarrollo de los biocombustibles (Committee on Development of Bio-fuels). Esta Junta estará encabezada por el primer ministro, con presencia de 5 ministerios en el desarrollo de los biocombustibles en India (Seekhe, 2021).

5.2 Actores privados

En lo que se refiere a los actores privados, son las grandes empresas privadas y algunas estatales dependiente de la política interna que se tenga en cada uno de los paises. Por ejemplo, en los Estados Unidos, las firmas que lideran el mercado del etanol son Poet Biorefining, Valero Renewable Fuels, Green Plains Renewable

Energy, Aventine Renewable Energy, Flint Hills Resources, Abengoa Bioenergy, Big River Resources, The Andersons Ethanol y Cargill.

En Brasil, encontramos que los principales actores económicos del mercado de las energías alternativas en Brasil, en su orden son: BP Plc, Bunge Limited, Odebrecht Agroindustrial S.A., Cosan S.A. y Shell Plc.

Llama la atención que, en Argentina, la industria está compuesta por 24 empresas productoras. En perspectiva internacional, esta puede considerarse relativamente pequeña en términos de la cantidad total de plantas, pero de un tamaño relativamente grande en términos de la producción promedio por planta. Ahora bien, en la industria podemos diferenciar tres tipos de empresas: las grandes empresas productoras de aceite vegetal, estratégicamente localizadas cerca de las zonas portuarias; las grandes empresas independientes y las empresas medianas y pequeñas, en general, tienen una situación de desventaja con respecto al volumen en comparación con las grandes empresas del sector, pero son flexibles y capaces de obtener productos secundarios, como la glicerina.

Las empresas vinculadas a la producción de aceite vegetal tienen una posición muy fuerte en el mercado (explicando el mayor porcentaje de la producción), sin embargo, destinan todo (o gran parte) de su producción al mercado externo. Las empresas medianas y pequeñas, en tanto, son más beneficiadas por el incremento en la demanda de biocombustibles en el mercado doméstico (Marín, 2014).

Dentro del desarrollo económico de los biocombustibles en Francia se requiere de los actores privados, los principales actores económicos del sector de los biocombustibles o combustibles alternativos se encuentran: Tate & Lyle (de trigo), BCE (de trigo), BENP (de trigo), Cristanol en Bazancourt (a partir de remolacha azucarera y trigo), AB Bioenergy en Lacq (a partir de maíz), Roquette en Bernheim (a partir de trigo) Tereos (de trigo), Lillebonne y Soufflet en Le Meriot (de trigo).

La india tiene un sector privado más pequeño, toda vez que todo está construido a partir de los permisos del Estado; es por ello que, los principales

productores de biodiésel son solo dos: Naturol Bioenergy Limited y Southern Online Biotechnologies.

5.3 Marco regulatorio y económico

5.3.1 Respecto al mapa normativo

En el año 2005, en Estados Unidos se estableció el Renewable Fuels Standard (RFS) y fue ampliado en 2007 (RFS2) con el objetivo de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y la dependencia del petróleo extranjero mediante el aumento gradual de los volúmenes de biocombustibles en el transporte.

A partir del RFS, se clasificaron los biocarburantes en cuatro importantes categorías: biocarburantes convencionales, biocarburantes avanzados, diésel a partir de biomasa y biocarburantes celulósicos. En este sentido, los biocombustibles avanzados y diésel de biomasa deben reducir en un 50 % las emisiones de gases de efecto invernadero durante su ciclo de vida, los biocombustibles celulósicos en un 60 %, mientras que los biocombustibles convencionales, en los que predomina el etanol de maíz, en un 20 %. De acuerdo con esta clasificación, una vez que los productores de biocarburantes superan los umbrales del 20 %, 50 % o 60 %, no reciben ningún crédito adicional por mejorar la intensidad de carbono del biocarburante (Herbstritt, 2023).

Por su lado, el sector de los biocombustibles en Brasil está regulado por una serie de normativas específicas:

- **Ley n.º 11.097:** esta ley introduce el biodiésel en la matriz energética brasilera, reforma las leyes 9.478, 9.847 y 10.636. Además, establece la introducción del biodiésel en la matriz energética brasilera fijando los porcentajes de adición al aceite combustible (óleo diésel) (Trejo, 2007).
- **Programa Proálcool (Bioetanol-1975):** Este programa fue patrocinado por el Gobierno de Brasil para la producción de etanol a partir de caña de azúcar y el desarrollo de la tecnología necesaria (Naciones Unidas, 2006).

En Argentina, por medio de la Ley n.º 27.640 de 2021, se aprueba el Marco Regulatorio de Biocombustibles, el cual comprende todas las actividades de elaboración, almacenaje, comercialización y mezcla de biocombustibles, con vigencia hasta el 31 de diciembre de 2030. Se destaca que, al ser una ley de año 2021, abarca la totalidad de la regulación argentina, en torno a los biocombustibles.

Para Francia, las siguientes normas establecen el marco legal de los biocombustibles: el Código Aduanero francés, en su artículo 266, el Código de la Energía francés, artículos L281-1 a L281-5 y L641-6, el Decreto n.º 2019-570 de junio de 2019, implementa los incentivos fiscales para la incorporación de biocombustibles, el Código Fiscal de Bienes y Servicios de Francia, artículo L312-79, estipula la implementación de algunas de las tasas impositivas para los biocombustibles y la Directiva de Energías Renovables 2018/2001/UE (RED II), que es la legislación que establece el marco para el uso de energías renovables en la Unión Europea.

La Política Nacional de Biocombustibles de la India apunta a la integración de los biocombustibles y, por lo tanto, prevé un papel central para él en los sectores de energía y transporte del país en próximas décadas. La política propicia un desarrollo y promoción del cultivo, producción y uso de biocombustibles con el fin de sustituir la gasolina y el diésel para el transporte y utilizarse en vehículos estacionarios y otras aplicaciones, contribuyendo al mismo tiempo a la seguridad energética, la mitigación del cambio climático, además de crear nuevas oportunidades de empleo y conducir al desarrollo sustentable.

En el caso de los países a comparar, todos tienen un marco regulatorio definido, que permite a los diferentes actores privados establecerse a lo largo y ancho de la cadena de producción de biocombustibles, es importante tener en cuenta que entre más robusto y claro sea el marco regulatorio mayor es el mercado de biocombustibles, como es el caso de Estados Unidos y Brasil, donde este marco regulatorio claro, junto a mezclas definidas y una regulación fuerte permiten tener un sector robusto donde se dan procesos de desarrollo investigativo e industrial que promueven el desarrollo de la cadene productiva.

— Regulación de precios

Estados Unidos ha implementado de forma general diferentes políticas en torno a la temática energética y de forma específica políticas relacionadas con los biocombustibles líquidos, lo que ha permitido una alta producción y consumo de estos tanto interna como externamente. Dentro del marco general de la regulación de la producción, comercialización y consumo de las energías alternativas, que hacen especial énfasis en algunos puntos en particular, entre los cuales se encuentran:

- La inclusión de un arancel *ad valorem* del 2,5%, relativo a un derecho de importación por galón de etanol; arancel que tiene como fin garantizar que los beneficios del crédito fiscal interno de los Estados Unidos para el etanol no recaigan en los productores extranjeros (Ley Pública 108-357).
- El desarrollo de un crédito fiscal federal por galón sobre todo el etanol producido a nivel nacional, disponible para las refinerías que lo produzcan. Si el etanol se produce a partir de al menos el 50 % de materia prima agrícola cultivada, será libre de impuestos. Si el contenido de materia prima local es menor, se aplicarán limitaciones a la cantidad de etanol libre de impuestos. La cantidad de etanol que se puede importar libre de impuestos y que se produce a partir de materias primas agrícolas está restringida a 60 millones de galones (Ley Pública 108-357). Este crédito fiscal volumétrico sobre la producción de etanol el cual es un crédito al impuesto especial sobre el consumo de alcohol y biodiésel y una extensión del crédito al impuesto sobre la renta para combustibles de alcohol adicionalmente es también un crédito fiscal sobre la renta para biodiésel para los productores.
- De otra parte, existen disposiciones crediticias para el almacenamiento de etanol, en forma de un impuesto especial más bajo para el etanol que para el combustible líquido derivado del petróleo, mediante el uso de reservas estratégicas (Ley Pública 109-58, 2005).

Lo que significa que cada estado se rige por la ley general y tiene su propia legislación para sus mezclas de acuerdo con su producción.

No obstante, lo anterior, encontramos que el Gobierno brasilero indica que la fijación de precios será propuesta por el Consejo Nacional del Petróleo (CNP) y fijados por el Consejo Nacional del Alcohol (CNA), previa aprobación del ministro de Hacienda.

Brasil exime al etanol del impuesto estadual a los combustibles (CIDE), tanto el etanol hidratado (es decir, combustible 100 % etanol), como el etanol anhidro empleado en el corte con nafta fósil. Y, además, a nivel nacional existen dos impuestos que se cobran a la venta de combustibles, el programa de integración social-programa de formación del patrimonio público (PIS-PASEP) y la contribución de financiamiento de la seguridad social (COFINS), ambos impuestos tienen alícuotas distintas según sea combustible fósil o etanol. En el caso del combustible fósil, se cobra 0,80 BRL por litro (ambos impuestos); para el etanol, 0,33 BRL por litro observándose una clara ventaja fiscal para el biocombustible en el país vecino (Risso, 2021).

Argentina, muy parecido a Estados Unidos, dando facilidades, pero siempre muy proteccionista de sus productos, mediante una ley (Ley n.º 26.093) reglamenta el régimen de regulación y promoción para la producción y uso sustentables de biocombustibles, tiene unos beneficios promocionales como en el impuesto al valor agregado y al impuesto a las ganancias. Así mismo se indica que el biodiésel y el bioetanol producidos por los sujetos titulares de los proyectos aprobados por la autoridad de aplicación, para satisfacer las cantidades previstas, no estarán alcanzados por la tasa de infraestructura hídrica (Decreto n.º 1381/01), ni por el impuesto sobre los combustibles líquidos y el gas natural (capítulo I, título III de la Ley n.º 23.966), ni por el impuesto denominado “sobre la transferencia a título oneroso o gratuito, o sobre la importación de gasoil” (Ley n.º 26.028), así como tampoco por los tributos que en el futuro puedan sustituir o complementar a los mismos.

Llama la atención que existe una directriz, que al realizar las mezclas se deberán adquirir productos definidos en la norma, así mismo se favorece la diversificación productiva del sector agropecuario, se promueve la adquisición de

bienes de capital por parte de las pequeñas y medianas empresas destinados a la producción de biocombustibles.

Como en Brasil, se indica que todo combustible líquido deberá ser mezclado por aquellas instalaciones que hayan sido aprobadas por la autoridad de aplicación para el fin específico de realizar esta mezcla, con la especie de biocombustible denominada “bioetanol”, en un porcentaje mínimo, medido sobre la cantidad total del producto final.

Francia, tomando las banderas de la Unión Europea, no muy lejos de la normatividad de Brasil, ofrece desgravaciones fiscales para una cantidad limitada de biocombustibles producidos y vendidos en el mercado francés. El Gobierno impone un impuesto ambiental (Taxe Generale Sur les Activites Polluantes, o TGAP) a los distribuidores de combustible que no cumplan con una tasa de incorporación de biocombustible.

La Unión Europea (UE) es la llamada a regular el precio de los biocombustibles, específicamente la Comisión Europea tiene como política que los precios de la energía reflejen todos costos externos de la producción y el consumo energéticos, incluidos cuando proceda los costos medioambientales, sociales y sanitarios.

Particularmente en Francia las energías renovables, como el etanol, el metano, los biocombustibles y la turba, están exentas de impuesto, con lo que se concluye que existe una política de responsabilidad ecológica y medioambiental creando actores responsables de la vigilancia y control de las políticas de importación, exportación, precios y costos.

La India, con su Política Nacional de Biocombustible, ordena que el biocombustible sea para uso interno únicamente y no para exportación, como vemos, la más proteccionista de los países estudiados. Así mismo estableció una política de no emplear cultivos comestibles para la elaboración de biocombustibles, en consecuencia, hace que el etanol se produzca a partir de melazas y no a partir de azúcar directamente (Seekhe., 2021).

El Ministerio del Petróleo y Gas Natural cuenta con una norma la cual establece el precio de compra del biodiésel por parte de las empresas

comercializadoras, precio que incluye por litro el valor de todos los impuestos y costos asociados (Seekhe, 2021).

Así mismo se establece que las compañías comercializadoras están obligadas a comprar todo el biodiésel que les fuese suministrado al igual que en Argentina. Los productores de biodiésel deben cumplir con los estándares IS 15607:2005, además, deben estar registradas como proveedores de biodiésel ante el coordinador estatal de compañías petrolíferas (State Level Coordinator for Oil Companies) y que se suministre un mínimo de 1000 litros, en este sentido, se entiende que existe una revisión a los proveedores que no den cumplimiento a estos estandares (Seekhe, 2021), esta política ha dado resultado por tanto debería de revisarse este modelo.

Es de mencionar que en casos específicos se permitirá la exportación de biocombustibles.

Dado que se permite el uso de muchas otras fuentes como materia prima para la producción de biocombustibles, esto promoverá la autosuficiencia de la India y acelerará la visión del primer ministro de que la India se convierta en “autosuficiente en el sector energético” para el año 2047 (Seekhe, 2021).

Como se observó, todos los países tienen una regulación clara en términos de precios, pues en ninguna parte del mundo el sector de los biocombuntibles es capaz de competir contra la industria petrolera, por lo que la regulación, el apalancamiento por parte del Estado, un proteccionismo muy claro por parte de todos los países, y la remuneración dependendiendo de su potencial ambiental y las materias primas utilizadas permiten un ecosistema perfecto para el desarrollo del sector de los biocombustibles.

— *Fórmula para calcular el precio*

No se logró identificar la existencia de una fórmula para el cálculo del precio de los biocombustibles en los Estados Unidos, por lo que es posible inferir que este es determinado por las dinámicas propias del mercado (Oferta y demanda).

De acuerdo con Risso (2021), “En Estados Unidos igual que en Brasil no existen cuotas de comercialización máximas, las empresas productoras de etanol

producen lo que deseen. Sí existe el Renewable Fuels Standard que impone volúmenes mínimos de etanol para mezclar con nafta fósil, no máximos".

Brasil a diferencia de Estados Unidos con su RFS que solo da directrices, tiene varios incentivos específicos establecidos por el Programa Nacional de Alcohol (Proálcool), se encuentran los siguientes:

- Precio del etanol inferior al de la gasolina.
- Remuneración garantizada para el productor.
- Reducción de impuestos para los vehículos propulsados por alcohol hidratado.
- Financiación para los productores que aumenten la capacidad de producción.
- Los puestos de venta están obligados a comercializar el etanol.
- Mantenimiento de las reservas estratégicas de etanol.

A partir del Decreto n.º 83.700, el Consejo Nacional del Petróleo (CNP) pasó a controlar las exportaciones y a garantizar la paridad de precios. Los precios de adquisición tanto en las distribuidoras como en las estaciones de servicio los proponía el CNP y los aprobaba el CNA.

En Argentina a diferencia de los países analizados, sí existe fórmula general por norma para la determinación del precio, según Risso (2021), la Secretaría de Energía estableció la siguiente fórmula para el cálculo del precio de un litro de Etanol:

$$\$\ litro = 0{,}110 * Precio\ promedio\ litro\ Gasoil + 0{,}104 * Precio\ Hora\ Hombre + 0{,}36 * Precio\ m3\ de\ Gas\ Natural + 0{,}382 * (1 + Var\ \%\ del\ ICC1) * (1{,}313).$$

Para Francia, no se encontró información con relación a la existencia de una fórmula que permita determinar el precio de la comercialización de los biocombustibles; ahora bien, en la India existe la llamada Biodiésel Purchase Policy, una directiva que establece el precio fijo para la compra de biodiésel por parte de las compañías petrolíferas, precio que se estableció con base a una estimación de los costos de producción de biodiésel a partir de jatropha (Drishti, 2022).

En el caso de la creación de una fórmula tarifaria todos los países observados tienen diferentes formas de enfrentar el problema del precio, desde una libre formación tarifaria como es el caso de USA, como una estructura de precios siendo el caso de Argentina, pero siempre se intenta establecer un precio que sea competitivo con los hidrocarburos, tal como lo dice Brasil, “Precio del etanol inferior al de la gasolina”, por lo que en todos los casos la capacidad de cada país en términos regulatorios y fiscales son escenciales para el desarrollo del sector.

— *Principales incentivos específicos del sector de los biocombustibles*

Los principales incentivos específicos del sector de biocombustibles en Estados Unidos son los siguientes:

- La inclusión de un arancel *ad valorem* del 2,5%, relativo a un derecho de importación por galón de etanol; arancel que tiene como fin garantizar que los beneficios del crédito fiscal interno de los Estados Unidos para el etanol no recaigan en los productores extranjeros (Ley Pública 108-357).
- El desarrollo de un crédito fiscal federal por galón sobre todo el etanol producido a nivel nacional, disponible para las refinerías que lo produzcan. Si el etanol se produce a partir de al menos el 50 % de materia prima agrícola cultivada, será libre de impuestos. Si el contenido de materia prima local es menor, se aplicarán limitaciones a la cantidad de etanol libre de impuestos. La cantidad de etanol que se puede importar libre de impuestos y que se produce a partir de materias primas agrícolas está restringida a 60 millones de galones (Ley Pública 108-357). Este crédito fiscal volumétrico sobre la producción de etanol el cual es un crédito al impuesto especial sobre el consumo de alcohol y biodiésel y una extensión del crédito al impuesto sobre la renta para combustibles de alcohol adicionalmente es también un crédito fiscal sobre la renta para biodiésel para los productores.
- De otra parte, existen disposiciones crediticias para el almacenamiento de etanol, en forma de un impuesto especial más bajo para el etanol que para el combustible líquido derivado del petróleo, mediante el uso de reservas estratégicas (Ley Pública 109-58, 2005).

Mientras Brasil tiene incentivos específicos establecidos por Proálcool, como el precio del etanol inferior al de la gasolina, remuneración garantizada para el productor, reducción de impuestos para los vehículos propulsados por alcohol hidratado, financiación para los productores que aumenten la capacidad de producción, los puestos de venta están obligados a comercializar el etanol, mantenimiento de las reservas estratégicas de etanol.

Adicionalmente, existe un Crédito que cubre el 30 % de los costos de almacenamiento del azúcar. También hay exenciones tributarias sobre vehículos que usen bioetanol o FFV, se reducen los impuestos por uso de biocombustibles y se exige usar biocombustibles en flotas gubernamentales y la reducción de impuestos a la producción de biocombustibles.

Por medio de la Resolución n.º 947/2023, se estableció la creación de un programa de financiamiento para el sector de biocombustibles en Argentina. Este programa tiene como objetivo proporcionar condiciones financieras ventajosas para la adquisición de los insumos necesarios en la producción de biodiésel destinado a la mezcla obligatoria con el gasoil. La resolución enfatiza la importancia de asegurar un suministro constante de biodiésel con el fin de reducir la dependencia de las importaciones de gasoil y cumplir con los objetivos de desarrollo económico y autoabastecimiento en la industria de hidrocarburos. Además, se reconoce la situación financiera desafiante que afrontan las empresas del sector, y se proponen medidas preventivas destinadas a evitar problemas relacionados con los precios y los cortes obligatorios de biodiésel.

Con lo que se evidencia que en América se está a la vanguardia en incentivos, siendo un Gobierno proteccionista, que invierte para que exista un desarrollo dinámico de los biocombustibles.

Francia apunta sus incentivos en lo relacionado con el uso de energías renovables en el transporte, por tal motivo existe un impuesto de incentivo relativo al uso de energías renovables en el transporte y existe un impuesto especial sobre la energía mencionado en el artículo L. 312-1 del Código fiscal sobre bienes y servicios, el cual hace referencia que a los productos que contienen energía

producida a partir de fuentes renovables y que pueden transformarse en combustibles sujetos al impuesto o incorporarse a dichos combustibles.

India, por su parte, como tal no tiene incentivos, recordemos que es un estado que toda su producción es para consumo interno, en consecuencia, los beneficios los otorga el Estado para aquellos que desarrollen materias primas para la generación de biocombustibles.

Como se ve el programa de biocombustibles en cada país es una apuesta gubernamental, llevando a que se establezcan barreras de entrada tanto a materias primas como a biocombustibles extranjeros, todos los países apuestan al desarrollo de materias primas locales, y de maquiladoras locales. Europa es el único caso donde esto no sucede, principalmente por su limitación en la producción de materia prima, dado que no cuenta con espacio suficiente para el desarrollo de un sector agrícola fuerte que apalanque el sector de los biocombusitbles.

— *Normativas y regulaciones en el procesamiento de la materia prima*

Actualmente, en los Estados Unidos, hay dos leyes federales fundamentales que se destacan como relevantes para todos los estados. Estas leyes son la Ley Pública 108-357, y la Ley Pública 109-58, sobre políticas energéticas del año 2005, a través de las cuales se creó el Renewable Fuels Standard (RFS).

En Brasil las leyes y regulaciones se relacionan con el procedimiento y uso de biocombustibles, las cuales son la **Ley 737/1938**: por medio de esta ley se establece la obligatoriedad de adicionar alcohol anhidro a la gasolina; el **Decreto n.º 3.866-2001**, este decreto reglamenta el inciso II-A, del parágrafo 2, del artículo 2 de la Ley n.º 8.001, del 13 de marzo de 1990; y la Ley n.º 993, del 24 de julio de 2004, por medio de las cuales se dispone que los recursos previstos en las disposiciones que se reglamentan y que provienen de la explotación de recursos minerales, serán destinados al sector de ciencia y tecnología, en los términos que se indican; la **Ley 11.116,** en esta ley se menciona el Registro Federal de Productor o Importador de Biodiésel y se establece el procedimiento para el registro del productor o importador de biodiésel ante la Secretaria de Renta Federal del Ministerio de Hacienda; la **Resolución ANP n.º 36/2005 (Reglamento**

Técnico ANP n.º 07/2005), la cual establece las especificaciones del alcohol etílico anidro (AEAC) y del alcohol etílico hidratado (AEHC) comercializados por los diversos agentes económicos en todo el país, de acuerdo con las disposiciones contenidas en el Reglamento Técnico ANP n.º 7/2005 del 7 de diciembre de 2005.

Argentina cuenta con un marco regulatorio sólido para el procesamiento de materias primas en la producción de biocombustibles, con dos leyes clave: la Ley n.º 26.093, que establece un régimen de regulación y promoción para la producción y uso sustentables de biocombustibles y la Ley n.º 27.640, la cual es el marco regulatorio de los biocombustibles.

La Directiva de Energías Renovables 2018/2001/UE (RED II), en Francia, es la legislación que establece el marco para el uso de energías renovables en la Unión Europea. Dispone un objetivo general vinculante de energía renovable del 32 % para 2030, y un objetivo específico para el uso de energía renovable en el transporte para cada Estado miembro del 14 %, incluidos subobjetivos mínimos para los biocombustibles avanzados, es decir, biocombustibles elaborados a partir de materias primas incluidas.

— *Políticas vigentes de mandatos de mezcla*

En cuanto a las políticas vigentes de mandatos de mezcla en Estados Unidos, varios estados han diseñado una legislación específica para sus mezclas; por ejemplo, en Hawái, la mezcla corresponde al 10 % de bioetanol; Luisana cuenta con una mezcla del 2 % para el biodiésel y bioetanol; Massachusetts posee una mezcla de 15 % para biodiésel; en Minnesota, la mezcla es del 10 % para el bioetanol y del 20 % para el biodiésel 10 %; en Misuri, la mezcla corresponde al 10 %; en Nuevo México, se encuentra un 5 % la mezcla biodiésel; Oregón cuenta con el 10 y 5 % para la mezcla de bioetanol y biodiésel, respectivamente; y, en Washington, la mezcla es del 2 % para el bioetanol y biodiésel (Torroba et al., 2022).

Es importante mencionar al Low Carbon Fuel Standard - California Air Resources Board, que es la política del estado de California que es la política de combustible bajo en carbono diseñada para disminuir la intensidad de carbono del

conjunto de combustibles para el transporte de California y proporcionar una gama cada vez mayor de alternativas renovables y bajas en carbono, que reducen la dependencia del petróleo y logran beneficios en la calidad del aire

En Brasil, por medio de la Resolución n.º 3 del 20 de marzo de 2023, la cual, dispone sobre la evolución y adición de biodiésel en el diésel vendido al consumidor final, en cualquier parte del territorio nacional, y en otras provincias. En este sentido, el Consejo Nacional de Política Energética de Brasil, determinó unos nuevos porcentajes de mezclas para el biodiésel en territorio nacional con un crecimiento progresivo. A continuación, se presentan los porcentajes de mezcla establecidos para cada año:

- 2023: 12 %
- 2024: 13 %
- 2025: 14 %
- 2026: 15 %

Las políticas vigentes de mandatos de mezcla en Argentina se encuentran enmarcadas a través de la Ley n.º 27.640 de 2021 se establece el régimen de mezcla obligatoria de biocombustibles con combustible fósiles, de la siguiente manera:

- Todo combustible líquido clasificado como gasoil o diésel oil debe contener un porcentaje obligatorio de biodiésel de 5% en volumen sobre la cantidad total del producto final.
- Todo combustible líquido clasificado como nafta debe contener un porcentaje obligatorio de bioetanol de 12% en volumen sobre la cantidad final del producto.

En Francia, el Código de la Energía, en su artículo L641-6, indica que el Estado deberá crear las condiciones para que la proporción de energía producida a partir de fuentes renovables utilizadas en todos los modos de transporte, en 2020, sea igual al menos al 10 % del consumo de energía final en el sector del transporte y al menos al 15 % en el 2030.

Política Nacional de Biocombustibles de 2018 de la India tiene por objetivo llegar a un 20 % de mezcla, tanto para biodiésel como para bioetanol.

Así las cosas, vemos que la existencia de un mandato de mezcla obligatorio es la que permite el sostenimiento del sector, dado que los costos de producción de biocombustibles son mayores que los combustibles de origen fósil, este mandato de mezcla es el que obliga a su consumo, aunque los países establecen dicho mandato de acuerdo con sus avances y estándares todos tienen una meta casi que común buscando llegar a una mezcla general entre el 15 y 20 % para el 2030.

— *Normas específicas que rigen la producción de biocombustibles*

Como lo hemos venido exponiendo durante el presente documento, las normas específicas que regulan la producción de biocombustibles en Estados Unidos se derivan principalmente de la Ley Pública 108-357 y la Ley Pública 109-58. Estas leyes fueron fundamentales en la creación del Renewable Fuel Standard (RFS), que luego se expandió con el RFS2.

Las regulaciones específicas relacionadas con la producción de biocombustibles en Brasil, mencionadas anteriormente, incluyen la Ley n.º 11.116, el Reglamento Técnico ANP n.º 5-2005 y la Resolución n.º 3 del 20 de marzo de 2023, que establece un mandato progresivo de mezcla de biodiésel. Estas normativas son fundamentales para garantizar la producción y el uso de biocombustibles de manera segura y en cumplimiento con las políticas y estándares nacionales, fomentando la sostenibilidad y la reducción de emisiones en Brasil.

En Argentina, la Ley n.º 27.640 se constituye como la piedra basal del marco regulatorio de los biocombustibles, la cual es aplicable a las actividades de producción, mezcla, distribución, comercialización, consumo y autoconsumo de biocombustibles.

Es preciso mencionar que, la tasa de fiscalización constituye “una tasa de control de calidad de combustibles de hasta tres diez milesimos de pesos ($ 0,0003) por litro comercializado en el mercado interno”. El artículo 9º de la Ley n.º

26.093 aclara que dicha tasa se aplicará para cada litro de biocombustible comercializado tanto en el mercado interno como en el externo.

De otra parte, la Resolución 324 del 2023 la norma fijó en 307.226 ARS por tonelada el precio de adquisición del biodiésel destinado a su mezcla obligatoria con gasoil para las operaciones correspondientes a mayo de 2023, al tiempo que también determinó un valor de 318.455 ARS para junio de 2023.

En Francia, para los biocombustibles basados en cultivos, límite de cultivos a niveles de consumo de 2020 en transporte por carretera y ferrocarril, más 1 % de flexibilidad dentro de un límite del 7 %, como en RED II, artículo 26. Se fija un límite separado para el uso de residuos de la extracción de azúcar y de la transformación del almidón (1,0 %). Los biocombustibles elaborados a partir de residuos de la extracción de azúcar deben contar el 50 % de su contenido energético, hacia el límite de cultivo, y el 50 % hacia el límite separado del 1 %. Se fija un límite para el uso de tall oil (0,1%).

La Política Nacional de Biocombustibles de la India indica la producción de semillas oleaginosas, la extracción de bioaceite y su procesamiento. Se debe tener en cuenta la mezcla, la distribución y la comercialización. Por otro lado, el precio mínimo de compra (MPP por sus siglas en inglés) del biodiésel por parte de las empresas de comercialización de petróleo estará vinculado al precio minorista vigente del diésel. El precio mínimo de apoyo para bioetanol se basará sobre el costo real de producción y el precio de importación del bioetanol. El precio mínimo de compra, ambos para biodiésel y bioetanol, serán determinados por la Dirección de Biocombustibles y decidido por el Comité Nacional de Coordinación de Biocombustibles. En caso de que el precio del diésel o la gasolina caiga por debajo del precio mínimo de apoyo para el biodiésel y el bioetanol, las empresas de comercialización de petróleo serán debidamente compensadas por el Gobierno.

— *Normas específicas que rigen el consumo de biocombustibles*

De acuerdo con la Naciones Unidas (2006), en Estados Unidos se han promulgado leyes recientes que tienen un impacto significativo en el consumo de biocombustibles. Estas leyes incluyen, la Ley de seguridad agraria e inversión

rural de 2002, la Ley de creación de empleos americanos de 2002 y la Ley de política energética de 2005. Cada una de estas leyes tiene objetivos específicos relacionados con el consumo de biocombustibles y el fomento de la energía limpia.

En la Ley de seguridad agraria e inversión rural, por ejemplo, se establecen nuevos programas y subvenciones para la adquisición de productos biológicos para el desarrollo de las biorrefinerías; para sensibilizar al público sobre las ventajas de la utilización del biodiésel como combustible; y para prestar asistencia a los agricultores, ganaderos y pequeños empresarios rurales en la compra de sistemas de energías renovables. Esta ley también prevé pagos a los productores que reúnen las condiciones con el fin de promover la compra de materias primas con miras al aumento de la producción de bioenergía y la creación de nueva capacidad de producción.

En Brasil, existen normas específicas que regulan el consumo de biocombustibles. Estas normativas incluyen un crédito que cubre el 30 % de los costos de almacenamiento del azúcar, exenciones tributarias aplicables a vehículos que utilizan bioetanol o vehículos flexibles (FFV), así como reducciones de impuestos relacionadas con el uso de biocombustibles. Además, se ha implementado un mandato que exige el uso de biocombustibles en las flotas gubernamentales.

La Resolución ANP n.º 36 del 2005 (Reglamento Técnico ANP n.º 07/2005) establece las especificaciones del alcohol etílico anidro (AEAC) y del alcohol etílico hidratado (AEHC) comercializados por los diversos agentes económicos en todo el país. La Resolución de la ANP n.º 5/2006 establece el registro electrónico de unidades productoras, el envío a la Agencia Nacional del Petróleo, Gas Natural y Biocombustibles de datos de comercialización de combustible de etanol de los productores y normas de comercialización que deben adoptar las plantas. Igualmente, la Agencia Nacional del Petróleo, Gas Natural y Biocombustibles (ANP) es la responsable, en relación con el etanol carburante, de especificar la calidad del producto, regular, autorizar y controlar las actividades de distribución, venta y comercialización, así como de organizar y mantener los datos técnicos relativos a dichas actividades.

El transporte del etanol no lo autoriza la Agencia, ya que no lo dispone así la Ley n.º 9.478/97, ni las disposiciones reglamentarias expedidas por la ANP (ANP, 2007). La instrucción de la ANP n.º 116/2000 regula la venta al por menor de combustible de automoción, la Resolución de la ANP n.º /2007 regula el límite de ventas entre distribuidores y el cumplimiento de este. Por medio de la Ley n.º 27.640, se menciona que en Argentina se podrán establecer porcentajes de mezcla diferentes y/o tratamientos particulares por región geográfica y/o para periodos o meses del año de consumo y/o tratamientos particulares.

En Francia, la Directiva que enmienda y deroga las Directivas 2001/77/CE y 2003/30/CE anteriores, establece un conjunto común de normas para el uso de energías renovables en la Unión Europea con el objetivo de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y promover un transporte más limpio.

Establece objetivos nacionales vinculantes para todos los países de la UE con el propósito general de lograr que las fuentes de energía renovable representen para 2020 el 20 % de la energía de la Unión Europea y el 10 % de la energía específicamente en el sector del transporte (en ambos casos, se calcula en términos de consumo final bruto de energía, es decir, el consumo total de energía procedente de todas las fuentes, incluidas las renovables) (Eur-lex, 2017).

En el caso de todos los países el consumo de biocombustibles es apalancado por mezclas obligatorias, un Estado que promueve el desarrollo industrial a partir de normas claras y diferentes subveciones a lo largo de la cadena permitiendo el crecimiento del sector. Es claro que sin el trabajo activo del estado en ningún país del mundo este sería un sector existente.

— *Normas específicas que rigen la comercialización de biocombustibles*

El acuerdo de Estados Unidos, Iniciativa de la Cuenca del Caribe (ICC), permite que los países cubiertos por la ICC exporten bioetanol, producido a partir *feedstock* foráneo (por ejemplo, azúcar de otro país), a Estados Unidos libre de tarifa hasta un 7 % de la producción total de bioetanol estadounidense. Una vez alcanzado el umbral del 7 %, se permite la importación libre de tarifa de 35 millones de galones adicionales, provisto que al menos un 30 % del bioetanol se derive de *feedstock* “locales” (Región Caribe). Cualquier importación por sobre los

35 millones de galones será libre de tarifas, si al menos un 50 % del bioetanol se deriva de *feedstock* locales. Recientemente, la Comisión Comercial Internacional de Estados Unidos estableció un límite a las importaciones libres de impuesto provenientes de la ICC en 240,4 millones de galones para el año fiscal 2005 (Dufrey, 2006).

En el ámbito de la comercialización internacional en Brasil, el Reglamento Resolución ANP n.º 42-2004 y el Reglamento Técnico ANP n.º 4/2004 establecen la especificación de biodiésel, según el Reglamento Técnico, que podrá ser adicionado al óleo diésel en proporción del 2 % del volumen y comercializado por los diversos agentes económicos autorizados en todo el territorio nacional.

Además, la Ley n.º 11.097/05, por la que se creó el Programa Nacional de Biodiésel, amplió la competencia administrativa de la ANP que, desde entonces, pasó a denominarse Agencia Nacional del Petróleo, Gas Natural y Biocombustibles. A partir de la publicación de la Ley n.º 11.097, la ANP asumió la competencia de regular y controlar las actividades relativas a la producción, el control de calidad, la distribución, la venta, la gestión de reservas, la comercialización y el control del biodiésel y de la mezcla de combustible diésel-biodiésel.

La Ley 11.116 sobre el registro especial para el productor o importador de biodiesel establece el procedimiento para el registro, ya sea productor o importador de biodiésel, en la Secretaría de Renta Federal del Ministerio de Hacienda. La ANP regula la exportación del excedente de etanol a distintos países,
especialmente a Estados Unidos.

La Ley n.º 27.640 confiere al Estado argentino la competencia para determinar las políticas relacionadas con la comercialización de biocombustibles. Por medio de estas se exige que los comerciantes se encuentren debidamente registrados, cumplan con las calidades de mezclas exigidas y respeten las fórmulas implementadas para el cálculo del precio.

Además, permite establecer porcentajes de mezcla diferentes y/o tratamientos particulares por región geográfica y/o para periodos o meses del año

de consumo y/o tratamientos particulares, la regulación de la comercialización de biocombustibles,

En Argentina, la Secretaría de Energía a través de resoluciones generales, establece, en el caso del etanol destinado al consumo interno, cuotas máximas de comercialización. Esto si bien genera una demanda “artificial” gracias al corte regulatorio es necesario resaltar que si una empresa productora de etanol deseara abastecer al mercado doméstico un volumen de etanol por encima del que le autorizó la Secretaría de Energía no podría hacerlo.

En Francia, la contribución de los biocombustibles avanzados y el biogás producido a partir de las materias primas enumeradas en la parte A del anexo IX de la Directiva (UE) 2018/2001, como porcentaje del consumo final de energía en el sector del transporte, es de al menos el 0,2 % en 2022, el 1 % en 2025 y el 3,5 % en 2030.

La Política Nacional de Biocombustibles de la India indica que la responsabilidad del almacenamiento, distribución y comercialización de biocombustibles recae en las empresas comercializadoras de petróleo. Esto se lleva a cabo a través de su almacenamiento existente e infraestructura de distribución y redes de comercialización, que pueden ser adecuadamente modificadas o mejoradas para cumplir los requisitos de los biocombustibles.

— *Programa gubernamentales asociados a la producción, comercialización y consumo de los biocombustibles*

Cada país estudiado, tiene su propio programa para los biocombustibles, los cuales han venido siendo actualizados de acuerdo con las necesidades de cada país, entre ellos encontramos en Estados Unidos el Renewable Fuels Standard (RFS), este programa ha ido limitando las cantidades de biocombustibles convencionales mientras aumenta la necesidad de biocombustibles avanzados.

La Agencia de Protección Ambiental (EPA) supervisa el cumplimiento del RFS a través de un sistema de crédito negociable. Las partes obligadas, generalmente las refinerías, deben presentar créditos conocidos como “números de identificación renovable” (RIN) a la EPA.

El Programa RenovaBio de Brasil es la Política Nacional de Biocombustibles, establecida por la Ley n.º 13.576/2017, el cual tiene como objetivos: proporcionar una importante contribución al cumplimiento de los compromisos determinados por Brasil en el Acuerdo de París; promover la adecuada expansión de los biocombustibles en la matriz energética, con énfasis en el suministro regular de combustibles; garantizar la previsibilidad del mercado de combustibles, induciendo ganancias en eficiencia energética y reducción de emisiones de gases de efecto invernadero en la producción, comercialización y uso de biocombustibles.

En Argentina, existe el Plan Nacional de Adaptación y Mitigación al Cambio Climático al 2030, el cual sintetiza las políticas del país para limitar las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Dentro de las líneas estratégicas del plan, se destacan: la transición energética, la transición productiva, la movilidad sostenible, los territorios sostenibles y resilientes, la conservación de la biodiversidad y bienes comunes, la gestión sostenible de los sistemas alimentarios y bosques. Además, el plan incorpora enfoques transversales que abordan cuestiones de género y diversidades, gestión integral del riesgo, salud y una transición laboral justa.

Actualmente, en Francia, existe una Política de reglamentación, desarrollo del mercado y apoyo a los biocombustibles, la cual está compuesta por: Planes de acción de energías renovables, Promoción de los biocombustibles en Francia, Transición energética para el *croissance verte* (Etip Bioenergy, s.f.).

Para el caso de la India, existen estas iniciativas: el **Programa de mezcla de etanol,** el cual consiste en un plan para la implantación progresiva del bioetanol mediante su mezcla con la gasolina convencional. La **Misión Nacional sobre Biodiésel del 2023** es el programa que busca que el Gobierno tenga la labor de facilitador, pero que sea la iniciativa privada la que desarrolle el programa. Tiene medidas específicas, como la de compra de biodiésel por las compañías gasolineras, la compra de semillas de jatropha por las empresas productoras de biodiésel o las certificaciones de biodiésel. Y la **Alianza Mundial para los Biocombustibles** es la plataforma internacional para compartir las mejores

prácticas, promover el desarrollo sostenible de biocombustibles y mejorar su aplicación, especialmente en el sector del transporte (septiembre 2023).

5.3.2 Variables económicas en la producción de Biocombustibles

— *Subsidios en la cadena de biocombustibles*

Estados Unidos tiene el flete verde, una reducción en el costo de las operaciones de las agencias de transporte. Cuenta con el RIN (Renewable Identificación Numbers), con el cual permitieron reducir el precio de venta al consumo debido a su alto costo de elaboración (Aapresid, 2023).

Brasil cuenta con un crédito que cubre el 30 % de los costos de almacenamiento del azúcar, exenciones tributarias aplicables a vehículos que utilizan bioetanol o vehículos flexibles (FFV), así como reducciones de impuestos relacionadas con el uso de biocombustibles.

En Argentina, se han implementado programas de financiamiento para el sector de biocombustibles, como el que se dispone por medio de la Resolución n.º 497 de 2023, el cual tiene por objeto dar condiciones favorables de financiamiento para la adquisición de insumos para la producción que cumplan con la mezcla obligatoria. A través de este tipo de subsidios, se busca apoyar a los eslabones de la cadena de los biocombustibles al ofrecer opciones de financiamiento que faciliten la producción y el cumplimiento de las regulaciones relacionadas con la mezcla de biocombustibles.

El Código Aduanero francés, en su artículo 266, establece que los sujetos pasivos del impuesto especial sobre la energía, mencionado en el artículo L312-1 del código fiscal francés, sobre bienes y servicios recaudados sobre los productos comprendidos en las categorías impositivas de gasóleo, gasolina y combustible para aviones están sujetos a un impuesto de incentivo relativo al uso de energías renovables en el transporte.

Por otro lado, tiene el impuesto de incentivo relativo al uso de energías renovables en el transporte que se paga en el momento en que el impuesto especial sobre la energía recaudado sobre ciertos los productos se hace pagadero en aplicación de las disposiciones mencionadas en el artículo L312-88 del Código Fiscal sobre Bienes y Servicios francés. Y finalmente, el impuesto de incentivo

relativo al uso de energías renovables en el transporte se basa en el volumen total, respectivamente, de gasolinas, diésel y turbosina.

La India cuenta con prestamos concesionales, mediante el National Bank for Agriucltural and Rural Development (NABARD) que ofrece esquemas de financiación de plantaciones de *Jatropha curcas* y *Pongamia pinnata (principalmente para biodiésel)*. Estos esquemas contemplan periodos de carencia principal de 4 o 6 años para plantaciones de *Jatropha* y *Pongamia*, respectivamente.

Así las cosas, encontramos que los Gobiernos tienen incentivos representados en diferentes eslabones de la cadena de los biocombustibles, algunos como Estados Unidos, Brasil y Argentina van al consumo, a la creación de empresas, la India enfoca sus incentivos directamente a los productores y Francia es la más simple porque va directamente a los consumidores.

— *Impuestos en la cadena de biocombustibles*

De acuerdo con Risso (2021), en el caso de los Estados Unidos, el etanol actualmente no posee ninguna rebaja impositiva en los impuestos a la venta de combustibles; existió desde 1975 hasta 2011 un crédito fiscal de hasta 0,60 USD por galón que abarataba el precio del etanol, sin embargo, fue discontinuado. El único impuesto vigente para el etanol es un arancel *ad valorem* del 2,5 % al etanol importado.

En la cadena de biocombustibles en Brasil, se aplican tres impuestos federales sobre el combustible de alcohol etílico (hidratado y anhidro), estos impuestos son: la Contribución al PIS/PASEP (Programas de Integración Social/Programa de Formación del Patrimonio del Servidor Público), la CIDE (Contribución para la Intervención del Dominio Económico) y la COFINS (Contribución para la Financiación de la Seguridad Social).

La tributación federal del etanol se modificó hace poco y, actualmente, está regulada por el Decreto n.º 6.573 que establece el coeficiente para la reducción de las proporciones específicas de la Contribución al PIS/PASEP y la COFINS que inciden sobre los ingresos brutos obtenidos de la venta de etanol y determina los

valores de los créditos de dichas contribuciones, que pueden deducirse en la adquisición de alcohol anhidro para su adición a la gasolina.

De acuerdo con el decreto mencionado, el coeficiente de reducción de la parte proporcional de la Contribución al PIS/PASEP y de la Contribución para la Financiación de la Seguridad Social (COFINS) se fijó en 0,6333 para el productor, importador o distribuidor. Las partes proporcionales de la Contribución al PIS/PASEP y la COFINS, con la utilización del coeficiente determinado en el decreto, se fijaron, respectivamente, en:

- 8,57 BRL (ocho reales con cincuenta y siete centavos) y 39,43 BRL (treinta y nueve reales con cuarenta y tres centavos) por metro cúbico de alcohol, en el caso de la venta realizada por el productor o importador.
- 21,43 BRL (veintiún reales con cuarenta y tres centavos) y 98,57 BRL (noventa y ocho reales con cincuenta y siete centavos) por metro cúbico de alcohol, en caso de la venta realizada por el distribuidor.

En el caso de la adquisición de alcohol anhidro para su adición a la gasolina, los valores de los créditos de la Contribución al PIS/PASEP y la COFINS se fijaron, respectivamente, en:

- 3,21 BRL (tres reales con veintiún centavos) y 14,79 BRL (catorce reales con setenta y nueve centavos) por metro cúbico de alcohol, en el caso de la venta realizada por el productor o importador.
- 16,07 BRL (dieciséis reales con siete centavos) y 73,93 BRL (setenta y tres reales con noventa y tres centavos) por metro cúbico de alcohol, en caso de la venta realizada por el distribuidor.

De acuerdo con la Ley n.º 27.640/2021 en Argentina, el biodiésel y el bioetanol no estarán gravados por el impuesto a los combustibles líquidos (ICL), ni por el impuesto al dióxido de carbono (ICO2), establecidos en el título III, capítulos I y II, respectivamente, de la Ley n.º 23.966. Alcanzando el citado tratamiento a todas sus etapas de producción, distribución y comercialización. En el caso de la mezcla de dichos biocombustibles con combustibles fósiles, el gravamen recaerá solo por el componente de combustible fósil que integre la mezcla. Se destaca que, el tratamiento impositivo previsto en el presente artículo regirá hasta la fecha

de finalización del régimen y corresponderá en tanto y en cuanto las materias primas principales utilizadas en los respectivos procesos productivos sean de origen nacional.

El impuesto de incentivo relativo al uso de energías renovables en Francia va en el transporte, donde se recauda y controla según los mismos procedimientos y bajo las mismas sanciones, garantías y privilegios que el impuesto especial sobre la energía mencionado en el Código Fiscal sobre Bienes y Servicios y se recaudan sobre productos comprendidos en las categorías impositivas de diésel, gasolina y combustible para aviones. Las reclamaciones se presentan, investigan y juzgan de acuerdo con las normas aplicables a este mismo impuesto.

El bioetanol tiene un impuesto especial favorable del 16 % en la India y el biodiésel está exento de impuestos especiales. No se aplican otros impuestos. Se otorgan concesiones sobre plantas y maquinaria para la producción debiodiésel o bioetanol, así como para motores que funcionan con biocombustibles para el transporte, aplicaciones estacionarias y de otro tipo, si no se fabrican localmente.

— *Regulación del comercio exterior de biocombustibles*

Según Dufey (2006), la regulación del comercio exterior de biocombustibles en Estados Unidos se basa en la clasificación de estos biocombustibles y sigue diversas normativas y acuerdos internacionales. A continuación, se describen las regulaciones aplicadas:

- Bienes industriales. Cuando los biocombustibles se consideran bienes industriales, como el biodiésel, su comercio está sujeto a las reglas del Acuerdo General sobre Aranceles Aduaneros y Comercio (GATT) y el Acuerdo sobre Subsidios y Medidas Compensatorias (Acuerdo SCM). El Acuerdo SCM supervisa el uso de subsidios para reducir o eliminar las distorsiones en el comercio.
- Productos agrícolas. En el caso que los biocombustibles se clasifiquen como productos agrícolas, como lo es el bioetanol, su comercio se rige por el Acuerdo sobre Agricultura (AoA) de la Organización Mundial del Comercio (OMC).

- Regulación técnica. El Acuerdo sobre Obstáculos Técnicos al Comercio (TBT, por sus siglas en inglés) asegura que las regulaciones, estándares, pruebas y procedimientos de certificación no creen barreras innecesarias al comercio. Mientras que las regulaciones siguen las disposiciones del Acuerdo TBT, su anexo incluye el Código de Buenas Prácticas para estándares internacionales, como aquellos elaborados por la Organización Internacional de Estandarización (ISO). Los estándares administrados por el sector privado y otras entidades no gubernamentales estarían fuera del alcance de las reglas de la OMC.
- Comercio de bienes y servicios ambientales. En la Declaración Ministerial de Doha de la OMC, en noviembre de 2001, los países miembros acordaron una negociación acelerada para la liberalización del comercio de los bienes y servicios ambientales. Los biocombustibles derivados de prácticas agrícolas sustentables poseen numerosos atributos que los harían calificar como bienes ambientales. De hecho, varios países miembros de la OMC han sugerido que las tecnologías de energía renovables se incluyan debido a su positivo potencial ambiental y económico.

En el ámbito del comercio exterior, la Resolución ANP n.º 42-2004 y el Reglamento Técnico ANP n.º 4-2004, en Brasil, establece la especificación de biodiésel, según el reglamento técnico, que podrá ser adicionado al óleo diésel en proporción del 2 % del volumen y comercializado por los diversos agentes económicos autorizados en todo el territorio nacional.

Además, la Ley n.º 11097/05, por la que se creó el Programa Nacional de Biodiésel, amplió la competencia administrativa de la ANP que, desde entonces, pasó a denominarse Agencia Nacional del Petróleo, Gas Natural y Biocombustibles. A partir de la publicación de la Ley n.º 11097, la ANP asumió la competencia de regular y controlar las actividades relativas a la producción, el control de calidad, la distribución, la venta, la gestión de reservas, la comercialización y el control del biodiésel y de la mezcla de combustible diésel-biodiésel. Asimismo, se modificó la Ley n.º 9.478/97 para contemplar las nuevas competencias del organismo regulador.

La Ley 11.116 sobre el registro especial para el productor o importador de biodiesel establece el procedimiento para el registro, ya sea productor o importador de biodiésel, en la secretaria de Renta Federal del Ministerio de Hacienda. La ANP regula la exportación del excedente de etanol a distintos países,
especialmente a Estados Unidos.

La regulación de la comercialización internacional de biocombustibles en Argentina ha estado sujeta a una serie de normativas y resoluciones que han ido cambiando a través del tiempo. Las Resoluciones n.º 125 y n.º 126 son ejemplo de regulaciones que han tenido un impacto directo en la producción agrícola y sus derivados.

La Resolución n.º 125 estableció un sistema de retenciones móviles a las exportaciones de granos como la soja, el maíz y el trigo. Por su parte, la resolución n.º 126 aumentó los derechos de exportación al biodiésel, elevándolos del 5 % al 20 %. Sin embargo, el Decreto n.º 1025/2017 derogó esta resolución y fijó los derechos de exportación en un 8 %.

Estas resoluciones, que nacieron en respuesta a un contexto internacional que se presentaba favorable para las actividades primarias (altos precios externos) y podían significar un importante nicho de ingresos para el fisco, ya que la 125 permitía incrementar las retenciones con el precio de los granos, que entonces se hallaban en pleno auge de crecimiento.

La Directiva 2003/30/CE del Parlamento Europeo y del Consejo del 8 de mayo de 2003, relativa al fomento del uso de biocarburantes u otros combustibles renovables en el transporte, hace un breve acercamiento a la comercialización en la Unión Europea y en Francia. La India hace parte del G20 junto con Brasil, su comercio exterior es bajo porque buscan es fortalecer su producción interna.

— Papel Gobierno en la cadena de los biocombustibles

El gobierno de Estados Unidos desempeña un papel central en la cadena de los biocombustibles, y su participación abarca varios aspectos clave. Es el Gobierno quien establece las regulaciones y las políticas que afectan directamente a la producción, el uso y la comercialización de los biocombustibles. Esto incluye

mandatos de mezcla (como el RFS), regulaciones de calidad, y la promulgación de incentivos fiscales para fomentar la producción y el consumo de biocombustibles.

Cuenta con un apoyo financiero, en donde también es el Gobierno quien brinda apoyo financiero al sector de los biocombustibles a través de subvenciones, créditos fiscales y préstamos para proyectos relacionados con la producción y distribución de biocombustibles. Estos incentivos financieros ayudan a reducir los costos iniciales y promover la inversión en el sector.

Además, es el gobierno quien promueve la investigación y el desarrollo en el campo de los biocombustibles. Esto incluye la inversión en proyectos de investigación que buscan mejorar la eficiencia de la producción, explorar nuevas fuentes de materias primas y desarrollar tecnologías de conversión más avanzadas. El gobierno regula las importaciones y exportaciones de biocombustibles para garantizar que cumplan con los estándares de calidad y seguridad. También participa en acuerdos comerciales internacionales relacionados con los biocombustibles.

Para abastecer la producción de materias primas utilizadas en la fabricación de biocombustibles, el Gobierno puede implementar políticas que fomenten la producción agrícola, como la promoción de cultivos específicos destinados a la producción de biocombustibles. Por otro lado, establece objetivos energéticos y ambientales que incluyen aumentar la participación de los biocombustibles en la matriz energética para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y promover fuentes de energía más sostenibles.

En la cadena de biocombustibles en Brasil, el Gobierno desarrolla un papel importante por medio de La Agencia Nacional del Petróleo, Gas Natural y Biocombustibles (ANP), quien es la entidad responsable, en relación con el etanol carburante, de especificar la calidad del producto, regular, autorizar y controlar las actividades de distribución, venta y comercialización, así como de organizar y mantener los datos técnicos relativos a dichas actividades. El transporte del etanol no lo autoriza la Agencia, ya que no lo dispone así la Ley n.º 9.478/97, ni las disposiciones reglamentarias expedidas por la ANP (ANP, 2007). En el apartado de Brasil están todos los actos jurídicos relacionados con el etanol carburante que

la ANP reglamentado, tales como la Ley n.º 11.097/2005, la Instrucción de la ANP n.º 116/2000, la Resolución de la ANP n.º 36/2005, Resolución de la ANP n.º 5/2006 y la Resolución de la ANP n.º 7/2007.

El Gobierno argentino desempeña un papel relevante en la cadena de biocombustibles. De conformidad con la Ley n.º 27.640 regula desde la producción, comercialización y consumo, con enfoques diferenciales por provincias; además, en atención a la Resolución n.º 614/2023, la Secretaria de Energía convoca a la presentación de nuevos proyectos o ampliaciones de los ya existentes para la elaboración de bioetanol, combustible elaborado a base de caña de azúcar o de maíz.

Uno de los enfoques del Gobierno francés es la creación de créditos de carbono y la implementación de créditos de biodiversidad, su plan verde está enfocado en bajar los costos de inversión para la industria verde. Se creo el Fondo de inversión en energía para acelerar la diversificación de combustibles fósiles a fuentes energéticas verdes, incluyendo eólica, olas, solar, biomasa, biocombustibles, biogás e hidrógeno.

El Gobierno indio, a la vanguardia, es el sector que subsidia la investigación, tiene una política general en donde el sector privado es el activo para el desarrollo de la industria. El Gobierno tiene por política no emplear recursos alimentarios ni tierras aptas para el cultivo para la producción de biocombustibles, hace que la producción de biodiésel en India esté basada en especies como la *Jatropha curcas* y la *Pongamia pinnata*.

Vemos gobiernos participativos, interesados en crear programas que fomenten el sector de los biocombustibles desde varias aristas, abriendo sus puertas a que los privados lleguen a invertir, sin embargo, siempre restringiendo el negocio a sus países.

— *Papel del sector privado en la cadena de los biocombustibles*

En los países encontramos que es el gran sector que se mueve de acuerdo con la economía mundial el negocio, por ejemplo, en los Estados Unidos desempeña un papel esencial en la cadena de biocombustibles. Invierte en tecnología para la producción y comercialización de biocombustibles, tanto a nivel nacional como

internacional, respondiendo a las fuerzas del mercado, como la oferta y la demanda. Además, el sector privado juega un papel clave en la determinación de los costos del producto final. Su participación y su enfoque en la eficiencia son fundamentales para el desarrollo y crecimiento de la industria de biocombustibles en el país.

En Brasil, desempeña un papel fundamental en la cadena de los biocombustibles, incluye su participación en la producción de biocombustibles, así como en la inversión en investigación tecnológica y desarrollo en esta industria. Además, a través de instituciones financieras y bancos, ofrece créditos diferenciales para apoyar la investigación, la tecnología y la producción de biocombustibles. Esta inversión y apoyo del sector privado son esenciales para el crecimiento y la sostenibilidad de la industria de biocombustibles en Brasil, así como para el avance de tecnologías más eficientes y sostenibles en este campo.

El sector privado desempeña un papel importante en la cadena de biocombustibles en Argentina, participando en la producción de los biocombustibles y desde la banca ofreciendo créditos diferenciales para la investigación tecnológica y la producción de los biocombustibles. No se queda atrás Francia que, por su plan verde, el sector privado está trabajando en el enfoque a la biodiversidad, haciendo inversiones con el fin de lograr la dependencia del petrolero.

El sector privado tiene la responsabilidad de impulsar la industria en la India, el etanol es comprado por las compañías petrolíferas que son las encargas de la mezcla con la gasolina y la distribución. El Gobierno de la India permite la inversión extranjera directa en un 100 %, lo que facilita la penetración del mercado, ya que las empresas extranjeras no requieren de un socio para entrar al país.

Como se observó en todos los países hay exenciones de impuestos para la producción, comercialización y consumo de biocombustibles, esto con el fin de permitir una competencia contra los hidrocarburos, la consolidación del sector agrícola, y el uso principalmente de materias primas locales, el desarrollo del

sector de los biocombustibles está fuertemente ligado a las decisiones gubernamentales y a la protección del desarrollo local,

5.4 Aspectos técnicos y ambientales

Tabla 63. Análisis comparativo del componente técnico

ASPECTO	ESTADOS UNIDOS	BRASIL	ARGENTINA	FRANCIA	INDIA
Principales materias primas para la producción de bioetanol	El principal biocombustible usado en Estados Unidos utiliza como materia prima para la producción de etanol es el maíz, llegando a industrializar el 40 % de la producción para la generación del biocombustible y exportando aproximadamente el 31 % del maíz producido. aproximadamente el 90 % del etanol producido hoy proviene del proceso de molienda seca del grano, y el resto proviene de molinos húmedos	La principal materia prima utilizada en Brasil para la producción de etanol es la caña de azúcar con una superficie destinada de 8.288 mil hectáreas para cosecha, una producción de 652,9 millones de toneladas de caña de azúcar, y un rendimiento medio de 78.7 toneladas por hectárea, con una creciente producción de etanol a partir de maíz, en la Región Centro-Oeste, con una producción de biocombustibles, estimada en 6,11 mil millones de litros, la mayor parte es etanol hidratado con 3,53 mil millones de litros y 2,58 mil millones de litros de etanol anhidro.	Con relación a la producción de bioetanol en la Argentina, este se produce a partir de caña de azúcar con una producción de 21,5 millones de toneladas y de cereales como el maíz, con una producción de 57 millones de toneladas y el cual fue incorporado con posterioridad a la caña de azúcar.	Las materias primas utilizadas para la producción de etanol en Francia están referidas principalmente al trigo, maíz y remolacha con un área disminuida en su siembra por de 378.748 hectáreas y que para el periodo 2017 a 2022 correspondió en promedio a 1.321.171 hectáreas cultivas anualmente. Para el caso del maíz, la superficie sembrada promedio es de 17,3 millones de hectáreas y para el trigo una superficie sembrada promedio de 30,5 millones de hectáreas. Para el caso de producción se proyecta en 2023 una siembra de 402.000 hectáreas que representaran 4 millones de toneladas	La principal materia prima utilizada en la India para la producción de etanol es la caña de azúcar a partir de la melaza con una superficie destinada 4,77 millones de hectáreas (2018) con rendimiento en 84.003 kilogramos por hectárea (2021-2022)

				de azúcar de remolacha.	
Principales materias primas para la producción de biodiésel	La producción de aceite de soja en Estados Unidos ronda los 10 millones de toneladas, destinándose casi un millón a la exportación y 6,5 millones de toneladas a otros usos domésticos que no son la producción de biodiésel. La producción de biodiésel en estados Unidos en un 27 % de la demanda total se realiza mediante el aceite de soja, con una producción aproximada de 2,8 millones de toneladas de aceite de soja con relación a una demanda de 10,2 millones de toneladas. Sin embargo, los mayores costos de producción de biodiésel con relación al bioetanol, a partir del aceite de soja que tiene un costo más alto que los otros aceites y que conlleva que el costo de la materia prima sea	La producción de biodiésel en Brasil se da básicamente a partir de la materia prima del cultivo de soja que cubre el 55 % de la producción de biodiésel, el ricino representa el 20 %, y el resto se divide entre otras oleaginosas. Aunque el cultivo de soja que tiene características físicas no tal deseables para el biodiésel, dado que sus granos rinden escasamente alrededor del 18 % de aceite, resultando en una producción de 700 l/ha si se compara con el aceite de ricino con 47% de aceite que alcanza un rendimiento de 1200 l/ha, y del girasol con el 40%, que alcanza un rendimiento de 800 l/ha. Sin embargo, las ventajas del cultivo de la soja están relacionadas con el paquete tecnológico ya desarrollado por la	En la Argentina, el biodiésel es producido principalmente a partir del cultivo de soja con una producción anual de 55.3 millones de toneladas de materia prima	El sector biodiésel, se elabora a partir de aceites procedentes de plantas oleaginosas, grasas animales o aceites usados. En 2019, el 7,3 % de la energía contenida en el diésel provino de biocombustibles.	La industria del biodiésel en la India no está desarrollada por lo que no existe en la actualidad una cadena de suministro robusta para la producción de biodiésel en el país y su desarrollo insipiente a estado basado en el uso de materia primas de especies no alimenticias como el aceite de Jatropha (*Jatropha curcas*) que es una planta oleaginosa y del denominado árbol de diésel (*Pongamia pinnata*) que es una especie de porte alto nativa de Asia tropical y templada que incluye partes de la India, pero con limitaciones por bajo rendimiento en la producción de semillas, disponibilidad limitada de tierras para su cultivo, y costos de plantación

	más alto para el productor de biodiésel, han conllevado entre otros factores como el mayor costo tecnológico para la instalación de plantas de biodiésel que sea mayor la producción de bioetanol	agroindustria para esta especie en el proceso de producción del aceite.			
Principales implicaciones de uso agrario del suelo	El debate alrededor de la industria de los biocombustibles, se centra en relación a la producción de alimentos o combustibles, donde la producción de etanol a base de maíz, ha llevado un aumento de los precios de los alimentos, considerando que a partir de la implementación del Estándar de Combustibles Renovables (RFS) y la Ley de Seguridad Independiente y Energética (EISA) en 2005 y 2007, se produjo a un mayor volumen de producción de maíz	Aunque los biocombustibles son considerados social y ambientalmente como un atenuante para enfrentar los efectos del cambio climático, el desarrollo de cultivos para extraer materias primas a partir de biomasa, genera impactos asociados sobre la disminución de ecosistemas naturales y su biodiversidad, la competición para la producción de alimentos, y los conflictos sociales por el desplazamiento de poblaciones rurales, entre otras.	Como un antecedente para el caso de la Argentina, es de mencionarse el conflicto agrario de 2008, el cual se trató de una confrontación entre los productores agropecuarios de la región pampeana y el gobierno nacional por el intento de parte de este último de aplicar un nuevo esquema de retenciones móviles a las exportaciones de soja, trigo, maíz, girasol y sus subproductos. Desde el punto de vista de la estructura agraria, la distribución de la tierra en la Argentina no es en absoluto equitativa, donde el 2 % de las explotaciones	El cultivo de remolacha azucarera en Francia se ha visto afectado por enfermedades fitosanitarias que atacan los cultivo, lo que conllevo a que el Gobierno autorizara el uso de neocotinoide (insecticidas neurotóxicos), para su tratamiento, lo que ha generado conflictos por la nocividad de estos agroquímicos para el ambiente y la salud, por lo que el sector de la remolacha tuvo que presentar un plan de prevención para proteger a los polinizadores y reducir el uso de neonicotinoides en los recubrimientos de	Desde el año 2020, con la huelga general agraria, la India vive grandes movilizaciones que se oponen a leyes que favorecerían a las grandes empresas transnacionales en detrimento del pequeño campesinado y que al contrario de esperarse con el confinamiento por COVID-19 que todavía estaba en vigor, no atendían un paquete de estímulo financiero, y medidas de alivio para superar el periodo de restricciones. La justificación de estas leyes es que los fertilizantes subsidiados y la

	para etanol en lugar de que para alimentos, situación que en 2008 fue criticada por la organización Global Humanitarian and Development Organization y Oxfam International, que señalaron que los agricultores destinaban una mayor producción de maíz para la generación de etanol, dado que les representaba mayores utilidades (Minnesota Bio-Fuels Association, 2023). Sin embargo, es de anotarse que a la par de producirse la materia prima para biocombustible, se genera alimento para animales a base de concentrados, donde un tercio de cada fanega procesada por una planta, se utiliza para fabricar alimento para animales.		agropecuarias controlan el 50 % de la tierra en el país, mientras que el 57 % de las explotaciones agropecuarias controlan el 3 % de la tierra.	semillas en un 25 % en comparación con prácticas anteriores. Esta situación ha provocado pérdidas de rendimiento de alrededor del 30 % en promedio y si no se maneja puede superar el 60 % localmente, conllevo a que el Gobierno decidido crear un sistema de subvenciones para compensar las pérdidas y crear un instrumento de estabilización de ingresos (ISR), con el objetivo de proteger a los agricultores contra caídas significativas de sus ingresos por episodios climáticos que destruyen las cosechas.	adquisición de productos básicos esenciales llevó al uso excesivo de pesticidas, degradando los suelos y la salud, y a la utilización excesiva de recursos hídricos subterráneos (especialmente por la expansión del arroz y el trigo). Asimismo, es de destacarse que el gobierno de India para impulsar el sector de las energías renovables, ha permitido el emplazamiento de empresas extranjeras con una participación directa del 100 % sin la necesidad de requerir un socio nacional.

Cada país tiene unas metas establecidas para emplear biocombustibles en mezcla con los combustibles convencionales. El bioetanol usualmente se mezcla con la gasolina y el biodiésel con diésel de petróleo. Para los países estudiados, la mezcla con bioetanol oscila entre 8 y 27 %, mientras que la mezcla con biodiésel oscila entre 5 y 20 %.

Cabe resaltar que existen estándares internacionales que establecen las especificaciones técnicas que deben cumplir los biocombustibles., entre ellos se destaca la norma americana ASTM (Biodiésel ASTM D6751, Bioetanol ASTM D4806) o la norma europea EN (Biodiésel EN 14214, Bioetanol EN 15376). Algunos países pueden establecer sus estándares internos con base en los estándares internacionales, como lo hizo Brasil con los ABNT/NBR.

En general, los rendimientos del bioetanol oscilan entre un 1 y un 70 %, éste depende de la materia prima precursora, su pretratamiento y la tecnología y condiciones de operación. El control de parámetros específicos como la concentración de levaduras y enzimas ayudan a optimizar los rendimientos de operación. Por otro lado, los rendimientos en la producción de biodiésel son superiores al 75 % y pueden ser de hasta el 100 %. Si bien el proceso de obtención más común es la transesterificación con o sin catálisis (ácida, alcalina o enzimática), existen otros procesos con menores rendimientos como el pirólisis, la ventaja de este último es que se obtienen 3 coproductos que pueden emplearse para fines energéticos u otras aplicaciones.

Dentro de las variables a considerar dentro del proceso de producción de biodiésel se encuentran la relación molar alcohol: grasa, tipo y cantidad de catalizador, agitación, temperatura y tiempo de reacción. Es importante resaltar que el uso de algas (tercera generación) permite elevados rendimientos en la obtención de biocombustibles, sin embargo, el costo y el sistema de recolección son temáticas que pueden jugar en contra de su desarrollo.

Dependiendo de la frontera de análisis, algunos autores concuerdan en que la etapa de mayor requerimiento energético es aquella referente a las actividades agrícolas en la que se prepara el suelo, se aplican insumos químicos (como fertilizantes, pesticidas, insecticidas, cal, etc.), se requiere un sistema de riego y se

cosecha. Por ejemplo, en Francia, para obtener un litro de bioetanol el 61,14 % de la energía se requiere para la fase agrícola. Mientras que en Estados Unidos el mayor requerimiento energético se asocia a la fermentación y la transesterificación, procesamiento de las materias primas para obtener bioetanol a partir de maíz y biodiésel a partir de soja respectivamente (> 60 %).

En referencia a indicadores energéticos, a manera general los combustibles fósiles como los derivados del petróleo y gas o el carbón, poseen tasas de retorno energético (EROI) mayores o iguales a 20, mientras que el biodiésel (5, aproximadamente) y el bioetanol (3, aproximadamente), tienen EROI superior a la unidad, lo cual indica que si bien generan energía útil (superior a la energía requerida), no es superior a la cantidad de energía a ser usada producida por los combustibles convencionales.

En comparación con el mundo (76,73 MMBtu/persona), el consumo per cápita de energía promedio entre 2017 y 2021 para Estados Unidos fue mayor con 347,57 MMBtu/persona, seguido por Francia (147,10 MMBtu/persona) que también supera el promedio mundial junto con Argentina (79,64 MMBtu/persona). Brasil (55,46 MMBtu/persona) e India (23,12 MMBtu/persona) se encuentran por debajo del promedio mundial.

Por otra parte, la evolución del PIB energético promedio mundial entre 2017 y 2021 se encontró en 4,73 1000 Btu/2015$ PIB PPP, siendo superado únicamente por Estados Unidos con 4,93 1000 Btu/2015$ PIB PPP. Brasil, Francia, Argentina e India se encuentran por debajo de dicho promedio mundial, siendo menor Francia con 3,50 1000 Btu/2015$ PIB PPP.

En cuanto al análisis de ciclo de vida (ACV) por países y los diferentes impactos ambientales que se pueden determinar en un sistema, los estudios referenciados en su mayoría centran el límite del sistema a los impactos causados en la fase agrícola, el transporte de la materia prima al lugar de procesamiento y la etapa de procesamiento. En muy pocos casos se referencia la distribución del biocombustible y en ninguno se analiza el impacto en la fase de consumo final.

En Estados Unidos se generan mayores emisiones por la producción de bioetanol de maíz que de biodiésel a partir de soja, también consume mayor

cantidad de agua, causa mayores efectos respiratorios, eutrofización y genera mayor ocupación de tierras. Sin embargo, el costo evitado por las emisiones no causadas es menor que en la producción de biodiésel a partir de soja. En dicho país, de acuerdo con el último informe bienal de actualización (BUR-5), el sector que aporta mayores emisiones es energía, seguido por agricultura y procesos industriales y uso de productos, siendo la mayor participación por la combustión de combustibles fósiles en generación de electricidad, transporte y sector industrial y en IPPU, por el desarrollo de la industria cementera, producción de hierro y acero y coque metalúrgico.

En los estudios de análisis de ciclo de vida en Brasil, se puede apreciar que el precursor del biocombustible y la tecnología influyen directamente en aspectos como el costo de operación, la eficiencia y los impactos ambientales. La producción de biodiésel a partir de aceite reciclado de cocina con transesterificación con catálisis enzimática logra menores impactos en todos los indicadores ambientales analizados (potencial de agotamiento abiótico [ADP], potencial de calentamiento global [GWP], potencial de agotamiento de la capa de ozono [ODP], potencial de toxicidad humana [HTP], potencial de ecotoxicidad de agua fresca [FAETP], potencial de ecotoxicidad de agua marina [MAETP], potencial de ecotoxicidad terrestre [TETP], potencial de creación fotoquímica de ozono [POCP], potencial de acidificación [AP] y potencial de eutrofización [EP]). Así mismo, el HVO o diésel verde o diésel renovable, también producido en Estados Unidos, está tomando fuerza por su gran similitud en propiedades con el diésel de petróleo y su capacidad para reducir los impactos ambientales.

En Brasil, las principales emisiones de acuerdo con su último informe bienal de actualización (BUR-4), se dan en el sector energía y el AFOLU (agricultura, silvicultura y otros usos de la tierra), en similitud con Estados Unidos, se destacan los sectores asociados a la combustión de combustibles fósiles, emisiones fugitivas y las industrias de cemento, hierro y acero.

En el caso de Argentina, se referenciaron estudios de ACV que tienen en cuenta dos subsistemas, uno referente a la operación agrícola y otro referente al procesamiento de las materias primas (maíz, caña de azúcar). En dicho análisis, el

mayor impacto ambiental es causado en la fase agrícola relacionado con el consumo de agroinsumos químicos como fertilizantes a base de N, S y P, el uso del suelo y el consumo de combustibles fósiles. Al igual que en Brasil, el sector de energía y AFOLU son los que generan mayores emisiones en el país. Siendo considerable la participación en la generación de electricidad, transporte e industria y en el caso de los procesos industriales, se destaca la industria de los minerales (cemento y cal), la industria de los metales (hierro y acero, aluminio) y el uso de sustitutos SAO (de acuerdo con el último informe de actualización de Argentina BUR-4).

El esquema de ACV es similar con el de los países estudiados. El mayor impacto en emisiones GEI lo realiza el bioetanol E0, sin embargo, logra los menores efectos en toxicidad humana y eutrofización. El bioetanol de caña de azúcar E85 logra el mayor efecto en oxidación fotoquímica, mientras que el E85 de trigo logra el mayor impacto en eutrofización.

De forma similar a Brasil y Argentina, en Francia, el sector de energía y el AFOLU generan la mayor cantidad de emisiones del país. Sin embargo, en el sector energético se destacan las emisiones del sector transporte, del sector residencial y de edificaciones y el sector industrial. Para los procesos industriales, la mayor participación se logra por el uso de sustitutos SAO.

Como ocurre con los países analizados, en India se realiza un ACV enfocado en la etapa agrícola, el procesamiento y transporte de materias primas. Las menores emisiones se logran con las molasas de la caña de azúcar, el tallo de sorgo y el bagazo de caña. El menor uso de la tierra se logra con los residuos de la caña de azúcar y la cascarilla de arroz, sin embargo, este último requiere mucha agua. La mayor tasa de retorno energético se logra con el tallo de sorgo y el bagazo de caña, sin embargo, todas son superiores a la unidad por tanto logran gran disponibilidad de energía para su uso en diferentes actividades.

En India, las principales emisiones se dan en el sector de energía y procesos industriales y uso de productos. En el sector de energía, la mayor participación se da en la combustión, sobre todo por la industria de la energía (por la producción de electricidad y los procesos de refinería), las industrias manufactureras (por la

industria del cemento y el hierro y el acero) y de la construcción y el sector transporte (transporte por carretera y aviación civil), el sector residencial también tiene una participación considerable en las emisiones del sector de energía. Mientras que para IPPU, las mayores emisiones son generadas por la industria de los minerales (cemento y cal principalmente) y la industria de los metales (aluminio y ferroaleaciones).

5.5 Aspecto logístico

5.5.1 Comparación del bioetanol

A partir del análisis de cada uno de los países se sintetiza la información de la cadena de valor en la tabla 64.

Tabla 64. Consideraciones del bioetanol

BIOETANOL							
País	**Producción primaría (millones de Ton)**	**Número de plantas de producción**	**Producción o capacidad instalada (mmgal)**	**Ahorro de emisiones de GEI (millones de toneladas métricas CO_2)**	**Comercialización interna (mmgal)**	**Comercialización externa (mmgal)**	**Mezcla**
Estados Unidos	Maíz 135,4	187	17,66	20	14	1,35	E10 Promedio
Brasil	Caña de azúcar 312,5	356	8,11	No determinado	6,3	0,518	E27
Argentina	Maíz y caña de azúcar 57	19	0,071	1,3	0,066	0	E12
Francia	No determinado	10	0,29	No determinado	0,31	0	E8,6 (UE)
India	Melaza de caña 32	113	0,25	3,18E-05	0,82	0,036	E20 al 2026

Fuente: elaboración propia

De lo anterior, se colige:

- La industrialización de Estados Unidos al igual que la cercanía de los procesos de producción primaria y la transformación de bioetanol, permite que tenga mejores rendimientos en la cantidad de biocombustible obtenido. (La producción de bioetanol es mayor *vs.* la cantidad de plantas existentes).
- Brasil e India al tener mayor número de productoras de bioetanol tienen menor producción de bioetanol, esto es principalmente dado porque la industria se conforma por micro y pequeña empresa.
- A pesar de que la industria de Argentina está madura, la producción de bioetanol es baja en comparación con los otros países seleccionados para el presente análisis, esto se debe, a que el esfuerzo de este país esté concentrado en el biodiésel. Las dos principales materias primas en la que se concentra la mayor producción de bioetanol es el maíz y la caña de azúcar para los países en estudio.
- Es fundamental el incentivo gubernamental, para el desarrollo de la industria como lo han trabajado los presentes países, teniendo como objetivo principal los acuerdos ambientales y las políticas de transformación energética para su industria de transporte.

5.5.2 Comparación del biodiésel

A partir del análisis de cada uno de los países se sintetiza la información de la cadena de valor en la Tabla 65.

Tabla 65. Consideraciones del biodiésel

BIODIÉSEL

País	Producción primaría (millones de toneladas)	Número de plantas de producción	Producción o capacidad instalada (mmgal)	Ahorro de emisiones de GEI (millones de toneladas métricas CO2)	Comercialización interna (mmgal)	Comercialización externa (mmgal)	Mandato de Mezcla
Estados Unidos	Aceite de soja Aceite de maíz Aceite de canola Grasas recicladas 5,46	59	2,08	20	1,65	0,18	B5 – B20
Brasil	Soja 5,95	59	1,6	No determinado	1,58	0	B11
Argentina	Soja 1,72	36	0,78	1,3	0,340	0,436	B10
Francia	Aceite de canola 1	45	0,73	No determinado	0,89	0	B8
India	Aceites no comestibles/usado y grasas animales 1,97 E-4	52	0,047	3,18E-05	0,045	0,001	B20 al 2026

Fuente: elaboración propia

De lo anterior, se colige:

- La industrialización de Estados Unidos al igual que la cercanía de los procesos de producción primaria y la transformación de biodiésel, permite que tenga mejores rendimientos en la cantidad de biocombustible obtenido. (La producción de biodiésel es mayor vs la cantidad de plantas existentes).
- Brasil e India al tener mayor número de productoras de biodiésel tienen menor producción de este, principalmente porque la industria se conforma por micro y pequeña empresa.
- Es fundamental el incentivo gubernamental, para el desarrollo de la industria como lo han trabajado los presentes países, teniendo como objetivo principal los acuerdos ambientales y las políticas de transformación energética para su industria de transporte.

- Gracias a la distribución y gestión logística de Argentina, se ha logrado realizar una comercialización internacional del 55 %, por lo tanto, es un punto de referencia para la transición colombiana.
- El caso de Francia es de especial tratamiento ya que su principal materia prima es de aceites vegetales y animales.

5.6 Aspecto social

Tabla 66. Análisis comparativo del componente social

Categoría de análisis	País				
	Estados Unidos	**Brasil**	**Argentina**	**Francia**	**India**
Aspectos generales	• Maíz y soja principales materias primas para la producción de biocombustibles. • Productores de materias primas: agricultores individuales con contratos anualizados de cooperación con biorrefinerías. • Biorrefinerías avanzadas son propiedad de grandes compañías debido a capital requerido • Distribuidoras minoristas propiedad de grandes empresas	• Caña de azúcar es la principal materia prima para la elaboración de bioetanol • Maíz ha tomado una importancia creciente en los últimos años • Gran extensión del mercado de biocombustibles con desventaja para la distribución por producción fragmentada e infraestructura de distribución limitada	• El insumo principal del biodiésel es el aceite de soja, mientras que el bioetanol se produce a partir de caña de azúcar y maíz	• Producción a base de plantas oleaginosas como la colza y girasol • Producción convencional de biocombustibles está organizada en unos pocos grandes grupos empresariales que compran la producción agrícola a los agricultores	• Producción de biodiésel principalmente a partir de grasas animales, cantidades limitadas de aceites no comestibles, aceites de cocina (UCO) y aceite de palma y estearina de palma importados • Falta de una cadena de suministro organizada y los costos excesivos y la falta de disponibilidad de materias primas
Desarrollo económico y empleabilidad	**Desarrollo económico** • Biodiésel ○ 23,3 millones de impacto económico • Etanol ○ 25 mil millones de dólares de ingresos	**Desarrollo económico** • Ingreso superior a 26,2 billones de reales. Esto principalmente por los productos de biodiésel, Renovabio y	**Desarrollo económico** • Facturación anual entre 2.100 millones de dólares (2018) y 3300 millones de dólares (2017). • Valor agregado anual	**Desarrollo económico** • Impacto en la economía francesa de 900 a 1800 millones de euros • ingresos fiscales para el estado francés de	**Empleabilidad** • 178.100 puestos de trabajo en la cadena de valor de la industria • Eslabón con mayor generación de puestos de trabajo es

Categoría de análisis	País				
	Estados Unidos	**Brasil**	**Argentina**	**Francia**	**India**
	para los hogares ○ 4800 millones de ingresos fiscales ○ 4000 millones ingresos fiscales para los estados **Empleabilidad** • Biodiésel ○ 72.200 empleos generados ○ 3,6 billones en salarios pagados • Etanol: ○ 71000 puestos de trabajo directos ○ 29000 puestos de trabajo indirectos	etanol **Empleabilidad** • 874000 empleos producidos por biocombustibles líquidos, principalmente en el sector de producción de biodiésel. • Bajos salarios y el poco o nulo acceso a servicios de salud y sanitarios para la población que depende de la actividad agrícola	estimado de alrededor de 400 millones de dólares. • Sector sojero genera un 33% de las divisas por exportaciones, equivalentes a un 30% del PIB. **Empleabilidad** • Empleo directo: entre los 4000 y 5000 puestos de trabajo • Empleo indirecto: 15.000 a 18.000 puestos de trabajo • La mayor parte del empleo lo generan plantas medianas y pequeñas, aunque estas representaran menos del 25% de la producción total de biocombustibles	260 y 80 millones de euros por el bioetanol y el biodiésel respectivamente **Empleabilidad** • Biodiésel ○ Empleos directos: 11400 ○ Empleos indirectos: 7850 • Etanol ○ Empleos directos: 4650 ○ Empleos indirectos: 4415	el de la producción de biogás, seguido por el de biomasa y finalmente el de biocombustibles líquidos.
Seguridad alimentaria	• Aumento de precios de cultivos, principalmente de maíz. • Impacto menor en los costos de alimentos. No afecta la seguridad	• El país es una de las principales despensas agrícolas a nivel mundial • Seguridad alimentaria no se encuentra amenazada por la	• Debate potenciado por el avance de la frontera agrícola que ha desplazado a otras actividades, principalmente en zonas de humedales	• Preocupación por la seguridad alimentaria como consecuencia de la guerra entre Rusia y Ucrania • No hay riesgo de afectación a la	• Debate como consecuencia del cambio en el enfoque normativo de la Hoja de Ruta del Etanol que privilegia las materias primas

Categoría de análisis	País				
	Estados Unidos	**Brasil**	**Argentina**	**Francia**	**India**
	alimentaria en EE. UU. • Debate frente a los impactos de la industria en la seguridad alimentaria de países en desarrollo	industria de los biocombustibles. • Concentración de la riqueza, la tierra e inflación principales causas de desnutrición en el país	como la región Delta del Paraná y proceso de concentración de tierra • Asamblea Nacional no considera Argentina tenga riesgo de seguridad alimentaria, la producción de biocombustibles es un subproducto agrícola y no afecta la disponibilidad de alimentos	seguridad alimentaria, esto debido a la efectividad en el uso de tierras y el desarrollo de subproductos como parte de la industria de los biocombustibles, por ejemplo, tortas para la alimentación animal. • Debate se centra más en el ámbito internacional y las consecuencias del consumo de biocombustibles en Francia frente a la seguridad alimentaria de los países en desarrollo	agrícolas. • Hace necesario un aumento de las tierras de cultivo o sobrepasar el uso de los excedentes de materia prima con los que cuenta la nación para garantizar la seguridad alimentaria • Desvió de los granos alimenticios que estaban dirigidos a las comunidades pobres a empresas productores o destilerías que pagan mejores precios comparado con el Estado • Cerca de 209 millones de indios en situación de desnutrición (15 % de su población) entre 2018 y 2020.
Acceso a tierra e impacto a comunidades locales y agrícolas	**Uso de la tierra** • Transformación del paisaje agrícola por demanda de productos agrarios • Impactos agrícolas en suelo y agua por riego	**Uso de la tierra** • Extensión de monocultivos de soja y caña de azúcar beneficiado por la práctica de arrendamiento de	**Uso de la tierra** • Afectaciones principalmente relacionadas al cultivo de la soja, como: desmontes, deforestación,	**Uso de la tierra** • Modificación del uso de materias primas como colza, girasol, remolacha, trigo y maíz, de alimentario a energético (3% de la	**Uso de la tierra** • Cultivo de materias primas para biocombustibles se ha previsto por parte de la Política Nacional de Biocombustibles en

Categoría de análisis	País				
	Estados Unidos	**Brasil**	**Argentina**	**Francia**	**India**
	y uso de químicos • Emisiones de GEI por cambios en el uso de suelo **Impacto en comunidades locales** • Incremento costos de materias primas para otras industrias como la agrícola • Sobrecarga a la infraestructura local, especialmente la infraestructura de transporte vial. • Afectación sobre el recurso hídrico y el aire con posibles impactos en la salud • Afectación sobre los ecosistemas locales y la biodiversidad consecuencia de la conversión de tierras • Reducción de enfermedades, enfermedades laborales y costos en el sistema de salud	territorios • Competencia por el suelo y las condiciones sociales • Afectación del modelo de la agricultura familiar y genera cambios en el esquema de producción agrícola, principalmente sobre la pequeña y mediana propiedad rural • Ocupación de áreas improductivas con destinación a reforma agraria **Impacto a comunidades locales** • Expulsión de la población rural de sus tierras y cambios en los modelos de producción, desempleo y reducción de la producción de alimentos **Afectación**	destrucción de selvas y humedales, expansión de malezas resilientes, pérdida de la biodiversidad, entre otras • Siembra de soja con variedades transgénicas y bajo un modelo de monocultivo, ha generado que se remplacen muchas especies por una sola • El desplazamiento y reducción de la superficie de cultivo dedicada a otras variedades y la ganadería bovina **Impactos a comunidades locales** • Desaparición de unidades productivas de familiares y relación de dependencia de pequeños y medianos productores con las empresas	tierra cultivable en Francia) • Posibilidad de cultivos de materia prima para los biocombustibles de segunda generación en tierras degradadas o en zonas sensibles donde el uso de insumos es limitado, es decir, en tierras donde el cultivo de especies convencionales es más difícil. • No modificación de la rentabilidad de la parcela para el agricultor, los cuales pueden variar en función de los cultivos y los precios del mercado • Posibilidad de la integración de la agricultura y la producción de energía renovable a través de la producción de biocombustible	tierras baldías o marginales • Producción bajo figura de monocultivo. • Cultivo Jatropha, puede tener graves consecuencias para los medios de vida rurales y los sistemas ecológicos rurales siendo una problemática en un contexto de crecimiento poblacional, aumento de los ingresos y presiones sobre los recursos naturales • Uso de fertilizantes y pesticidas contamina el suelo y las aguas subterráneas. **Impactos a comunidades locales** • En Chhattisgarh una zona con alta presencia de comunidades tribales sus cultivos agrícolas han sido destruidos

Categoría de análisis	País				
	Estados Unidos	Brasil	Argentina	Francia	India
		comunidades étnicas • Afectación a territorios colectivos y modelos de vida tradicional (caza, pesca, entre otros) • Reportes de vulneraciones a derechos humanos **Afectación sobre el recurso hídrico** • Uso intensivo del agua, afectación de los niveles de los caudales, conflictos sociales por disponibilidad del agua, entre otros. **Deforestación y pérdida de biodiversidad** • Presión sobre la región amazónica y La Cerrada, deforestación y pérdida de la biodiversidad y	proveedoras de semillas fitoresistentes • Desplazamiento de actividades menos rentables a actividades más intensivas de trabajo **Afectación sobre el recurso hídrico** • Humedales se ven afectados directamente por la entrada de agroquímicos como los plaguicidas	**Impactos en comunidades locales** • Para los agricultores los modelos de producción de materias primas para biocombustibles de primera generación no se diferencian ni en tiempos ni en los esquemas de producción agrícola convencional, basados en la producción y venta de materias primas, normalmente a una cooperativa • Los modelos contractuales establecidos para la producción destinada a los biocombustibles permiten estabilizar la relación comercial de los agricultores con su aval y proporcionarles cierta seguridad. • Posibilidad de contribuir al mantenimiento del empleo en las zonas	para plantar Jatropha • Desconocimiento de derechos de comunidades tradicionales frente al manejo de su territorio • Disponibilidad de forraje del ganado se ha visto directamente afectada. • Colapso de los agroecosistemas rurales a medida que la industria desvíe la biodiversidad y el agua para el biocombustible **Afectación sobre el recurso hídrico** • Consumo intensivo de agua para la producción de caña podría ser alto en tiempos de sequía • Afectación a los niveles de agua subterránea y de captación de agua para el consumo humano

Categoría de análisis	País				
	Estados Unidos	**Brasil**	**Argentina**	**Francia**	**India**
		afectación a ecosistemas con importancia ambiental y socioeconómica para las comunidades locales		rurales, en territorios donde el tejido industrial es generalmente débil	• Contaminación en el agua puede generar enfermedades crónicas, afectación al hígado, los riñones, el sistema inmune, el sistema nervioso, el tracto gastrointestinal y generar dificultades de aprendizaje en los niños. • Contaminación al aire a través de cenizas y hollín provenientes de las fábricas que procesan el azúcar y de otros recursos como el suelo por el uso de pesticidas
Procesos de desplazamiento o relocalización de comunidades	No se identifican situaciones al interior del país de procesos de desplazamiento y relocalización de comunidades.	• Cerca de 2,5 millones de personas han sido desplazadas por la producción de soja en el Paraná y cerca de 300 mil en el Río Grande do Su • Afectación de la dinámica urbana en las zonas aledañas a estos como consecuencia de la demanda por servicios públicos, tales como	• 400.000 personas que dependen de la agricultura, no sólo para la alimentación sino también para mantener su identidad cultural, han migrado a las grandes ciudades	No se identifican situaciones al interior del país de procesos de desplazamiento y relocalización de comunidades.	Debido al subregistro en la nación no se identifican eventos sistemáticos de desplazamiento por cultivo de materia prima para biocombustibles

Categoría de análisis	País				
	Estados Unidos	**Brasil**	**Argentina**	**Francia**	**India**
		salud, educación, seguridad, entre otros			
Condiciones laborales y de seguridad y salud en el trabajo	**Condiciones laborales** • Principal problemática, la mayoría de puestos de trabajo son temporales. • Amplio porcentaje de trabajo masculino • Presencia de una importante proporción de población adulta **Riesgos en materia de salud y seguridad:** • Peligros biológicos, químicos y físicos • Enfermedades ocupacionales están asociados con la exposición a los materiales orgánicos	• Condiciones de trabajo por debajo de los mínimos legales, principalmente en las actividades agrícolas	• En el eslabón de producción de la cadena de valor (cultivo de insumos), los trabajadores están más expuestos a la informalidad laboral, a trabajos temporales y a peores condiciones en materia de salud y seguridad en el trabajo. Por su parte, industriales y de procesamiento son generalmente formalizados y no temporales	• Trabajo agrícola a partir de asociaciones con contratos temporales • Mayores condiciones de estabilidad y formalidad laboral en la etapa de producción y distribución	• Más del 90 % de la fuerza laboral está empleada en el "sector no organizado", es decir, en sectores que no proporcionan la seguridad social y otros beneficios del empleo en el “sector organizado”. • En las zonas rurales, los trabajadores agrícolas forman la mayor parte del sector no organizado • Se evidencia en la producción agrícola principalmente de caña de azúcar: brechas de género, bajos salarios, pago tardío de salarios, descuentos de dinero, trabajo infantil y malas

Categoría de análisis	País				
	Estados Unidos	Brasil	Argentina	Francia	India
					condiciones para trabajadores migrantes.

Referencias

Aapresid. (2023). *Crece la producción de diésel renovable en Estados Unidos y avanza una potencial amenaza para las exportaciones argentinas.*

Adams, P., B. T., L.-L. A., R. A., & W. I. (2017). *Biomass Conversion Technologies. In Greenhouse Gas Balances of Bioenergy Systems (pp. 107-139).*

ADEME-FranceAgriMer, I Care & Consult, & IFPEN. (2019). *Evaluation des impacts de 3 scénarios de développement de biocarburants pour la LTECV, Rapport*. https://librairie.ademe.fr/

ADEME. (2018). *Agriculture et energies renouvelables: contributions et oppotunites pour les exploitations agricoles. Rapport final de mission.* https://librairie.ademe.fr/energies-renouvelables-reseaux-et-stockage/15...

Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC). (2019). *Combustíveis sustentáveis para a aviação - Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC)*. https://www.gov.br/anac/pt-br/assuntos/meio-ambiente/combustiveis-sustentaveis-para-a-aviacao

Agricultura, M., & Pesca. (n.d.). *Informe técnico*.

Agricultural Marketing Resource Center. (2023). *Biodiesel.*

Agriculture, C. D. (n.d.). *Collecte des huiles usagées: de nouveau gratuit depuis janvier ! - Chambre d'agriculture Hauts-de-France*. https://hautsdefrance.chambre-agriculture.fr/articles/detail-de-lactualite/actualites/collecte-des-huiles-usagees-de-nouveau-gratuit-depuis-janvier/

Airwaigs. (n.d.). *Aerolíneas avanza SAF 2023*. https://airgways.com/2022/12/08/aerolineas-avanza-saf-2023/

Altieri, M., & Bravo, Elizabeth. (n.d.-a). *La tragedia social y ecológica de la producción de agrocombustibles en el continente americano.*

Altieri, M., & Bravo, Elizabeth. (n.d.-b). *La tragedia social y ecológica de la producción de agrocombustibles en el continente americano.* Retrieved September 30, 2023, from https://dhls.hegoa.ehu.eus/uploads/resources/4994/resource_files/Altieri-Bravo-Biocombustibles-ES_1_.pdf

American Biogas Council. (2020). *How Biogas Systems Work.*

American Biogas Council. (2023). *Biogas Industry Market Snapshot | American Biogas Council.*

Amores, M. J., Mele, F. D., Jiménez, L., & Castells, F. (n.d.). Life cycle assessment of fuel ethanol from sugarcane in Argentina. *International Journal of Life Cycle Assessment*, *18*(7), 1344-1357. https://doi.org/10.1007/s11367-013-0584-2

Aris Bioenergy. (2020). *#HarGharHealthy Campaña y Aris BioEnergy.*

Artur, J., & Peixoto, S. (n.d.). *Universidade Federal do Rio Grande do Sul Escola de Engenharia Departamento De Engenharia Química Otimização do Custo Na Cadeia Produtiva do Biodiésel no Brasil Trabalho De Conclusão Em Engenharia Química*.

Assemblée nationale. (n.d.). Retrieved October 26, 2023, from https://www.assemblee-nationale.fr/dyn/15/rapports/cion-dvp/l15b2609_rapport-information

ASTM. (n.d.-a). *ASTM D1655-23a: Standard Specification for Aviation Turbine Fuels*. https://doi.org/10.1520/D1655-23A

ASTM. (n.d.-b). *ASTM D6751-23a: Standard Specification for Biodiésel Fuel Blendstock (B100) for Middle Distillate Fuels 1*. https://doi.org/10.1520/D6751-23A

ASTM. (n.d.-c). *ASTM D8080-21: Standard Specification for Compressed Natural Gas (CNG) and Liquefied Natural Gas (LNG) Used as a Motor Vehicle Fuel 1*. https://doi.org/10.1520/D8080-21

Aviação Civil, A. N. (n.d.). *Combustíveis sustentáveis para a aviação - Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC*. https://www.gov.br/anac/pt-br/assuntos/meio-ambiente/combustiveis-sustentaveis-para-a-aviacao

Bank, W. (2020). Emisiones de gases efecto invernadero totales (kt CO2eq. *Https://Datos.Bancomundial.Org/Indicador/EN.ATM.GHGT.KT.CE*.

Barsky, O., & Dávila, M. (2008). *La rebelión del campo. Historia del conflicto agrario argentino.*

Bergmann, J. C., Tupinambá, D. D., Costa, O. Y. A., Almeida, J. R. M., Barreto, C. C., & Quirino, B. F. (2013). Biodiésel production in Brazil and alternative biomass feedstocks. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *21*, 411-420. https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.12.058

Bhardwaj, O. P., Kolbeck, A. F., Kkoerfer, T., & Honkanen, M. (2013). Potential of Hydrogenated Vegetable Oil (HVO) in Future High Efficiency Combustion System. *SAE International Journal of Fuels and Lubricants*, *6*(1), 157-169. https://doi.org/10.4271/2013-01-1677

Bioéthanol Robulons Plus Vert et moind cher. (n.d.). Https://Www.Bioethanolcarburant.Com/Atout-et-Enjeux/.

Bioplat. (2021). *La descarbonización de la aviación: El potencial de los SAF*.

Biovec. (n.d.). *BIOGÁS EN INDIA - Biovec Medioambiente | Plantas de Biogás | Biogás*. https://biovec.net/biogas-en-india/

Bisang, R., Fuchs, M., Torroba, A., & Vernazza, S. (2021). *Biocombustibles en Argentina: el arte de establecer nuevos mercados en alquimias economicas*. https://alquimiaseconomicas.com/2021/04/30/biocombustibles-en-argen

Bolsa de Comercio de Rosario. (n.d.). *Bolsa de Comercio de Rosario.*

Cabral, D. de Carvalho. (2016). Na Presença da Floresta: Mata Atlântica e História Colonial. In *Varia Historia* (Vol. 32, Issue 60, pp. 901–903). Universidade Federal de Minas Gerais. https://doi.org/10.1590/0104-87752016000300012

Calzada, J., & Rozadilla, B. (n.d.). *Brasil y los cambios en la logística e infraestructura de transporte granaria*.

Cámara Argentina de Biocombustibles. (n.d.). *SUSTENTABILIDAD*. Http://Carbio.Com.Ar/Index.Php/Sustentabilidad/

Carvalho, S. A. D. de, & Furtado, A. T. (2013). O Melhoramento Genético de Cana de Açúcar no Brasil e o Desafio das Mudanças Climáticas Globais Revista Gestão & Conexões. *Revista Gestão & Conexões*. https://doi.org/10.13071/regec.2317-5087.2013.2.1.4909.22-46.

Cesar Vitti, G., & Antonio Mazza, J. (n.d.). *Planejamento, estratégias de manejo e nutrição da cultura de cana-de-açúcar.* Retrieved October 2, 2023, from http://www.ipni.net/publication/ia-brasil.nsf/0/504B40E488537AE083257AA2005EA7F6/$FILE/Encarte%2097.pdf

Clean Fuel Alliance of America. (n.d.). *Biodiésel´s Health Benefits: Improving Health / Reducing Medical Costs*. Retrieved September 29, 2023, from https://cleanfuels.org/wp-content/uploads/2023/07/nbb-trinity-study-one-pager.pdf

Clean Fuel Alliance of America. Clean Fuels. (n.d.). Clean Fuels: America´s Economic Engine. 2022. In *2022*. Retrieved September 29, 2023, from https://cleanfuels.org/wp-content/uploads/2023/07/CFAA-2022_EconomicImpactStudy_FINAL-1.pdf

CME Group. (2023). *Producción, uso y transporte de la soya.*

Comisión Federal De Comercio FTC. (n.d.). *Selected Industries | Comisión Federal de Comercio*. Retrieved October 29, 2023, from https://www.ftc.gov/es/business-guidance/industry

Comunelli, J., & Del Canto, J. (n.d.). Informe Logistica de Hidrocarburos. In *Unidad de Investigación y Desarrollo En Ingeniería Civil. Área Transporte*.

https://labs.ing.unlp.edu.ar/uidic/archivos_publicaciones/tmp/Informe%20Logistica%20de%20Hidrocarburos.pdf

CONAB - Companhia nacional de abastcimento. (2023). *Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar*.

Cooper, C. (n.d.). *Combustibles Sostenibles de Aviación (SAF*.

D'Angelo, G., & Calzada, J. (n.d.). *Desafíos y perspectivas para los biocombustibles en el 2023*. Bolsa de Comercio de Rosario.

Da Silva, A. Navarro. (2014). *Os biocombustíveis afetam a segurança alimentar no Brasil? Discussão e abordagem quantitativa*. Universidade Federal de Viçosa.

Daniel Mandolesi De Araújo, C., C. D. A. C., D. S. E. S. E., & D. F. A. (2013). *Biodiésel production from used cooking oil: A review.*

Das, S. (2020). The National Policy of biofuels of India – A perspective. *Energy Policy*, *143*. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.111595

de Fravet, P. R. F., Soares, R. A. B., Lana, R. M. Q., Lana, Â. M. Q., & Korndörfer, G. H. (2010). Effect of filter cake doses and methol of application on yield and technologycal quality of sugar cane ratoon. *Ciencia e Agrotecnologia*, *34*(3), 618–624. https://doi.org/10.1590/s1413-70542010000300013

Desanti, N. (2022). Les producteurs de betteraves demandent des hausses de prix d'achat. *Journal d'informations Régionales Économiques et Juridiques.*

Devi, A., Singh, A., Bajar, S., Pant, D., & Din, Z. U. (2021). Ethanol from lignocellulosic biomass: An in-depth analysis of pre-treatment methods, fermentation approaches and detoxification processes. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, *9*(5). https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105798

Diputados Argentina. (2022). *Proyecto de ley: Programa Nacional de Recuperación de Aceites Vegetales Usados*.

https://www4.hcdn.gob.ar/dependencias/dsecretaria/Periodo2022/PDF2022/TP2022/2095-D-2022.pdf

Dirección Nacional de Alimentos. (n.d.). *Logística en la cadena de oleaginosas*. Retrieved October 15, 2023, from https://alimentosargentinos.magyp.gob.ar/contenido/revista/html/30/30_17_Logistica_oleaginosas.htm

Direction Production et Energies Durables (DEPD) - ADEME. (n.d.). www.ademe.fr

Do Globo Rural. (n.d.). *Do silo até o exterior: conheça a rota da soja que vem do Norte do país*.

Drishti. (n.d.). *Política Nacional de Biocombustibles*. Retrieved October 29, 2023, from https://www-drishtiias-com.translate.goog/hindi/daily-news-analysis/national-policy-on-biofuels?_x_tr_sl=auto&_x_tr_tl=es&_x_tr_hl=es

du Preez, J. C., & Prior, B. A. (1985). A quantitative screening of some xylose-fermenting yeast isolates. *Biotechnology Letters*, *7*(4), 241–246. https://doi.org/10.1007/BF01042370/METRICS

Dufrey, A. (2006). *Producción y comercio de biocombustibles y desarrollo sustentable: los grandes temas. Instituto Internacional para el Medio Ambiente y Desarrollo, Londres.*

Earth 911. (n.d.). *Centros de Reciclaje. Retrieved October 15, 2023*.

EIA. (n.d.). *Homepage - U.S. Energy Information Administration (EIA)*. Retrieved October 29, 2023, from https://www.eia.gov/

Energy Efficiency & Renewable Energy. (n.d.). *Ethanol Production and Distribution . Retrieved October 15, 2023*.

Environment, F., C., C., & India, G. (n.d.). *India Third Biennial Update Report to The United Nations Framework Convention on Climate Change*.

EPA. (n.d.). *Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos*. Retrieved November 1, 2023, from https://espanol.epa.gov/

Epifanio, D., & Ernst, C. (2019). *La cadena de suministro de biodiésel en Argentina: ¿una oportunidad para el avance social?* www.ilo.org/buenosaires

Estados Unidos, Ley Pública 108-357.

Estados Unidos, Ley Pública 109-58, 2005.

ESTERIFRANCE. (2022). *10 sites industriels.*

Établissment National Des Produits de L'agriculture et de la Mer. (n.d.). https://www.franceagrimer.fr/content/download/66407/document/FICHE%20FILIERE%20BIOETHANOL%202021.pdf

Ethanol Fuel Basics. (2023). *U. S. Department of Energy.*

EUR-Lex. (n.d.). *Derecho de la UE - EUR-Lex*. Retrieved October 29, 2023, from https://eur-lex.europa.eu/homepage.html?locale=es

EuroNews. (2023). *Brasil pone fin a la exención fiscal a las importaciones de etanol* | *Euronews*. https://es.euronews.com/next/2023/02/02/brazil-ethanol

Forest, R., & Forest, M. (2014). Segurança alimentar e sua relação com a expansão do programa de biocombustíveis. *Revista de Política Agrícola*. https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/114659/1/Seguranca-alimentar.pdf

Francia, R. (n.d.). *Biogazole*.

Gauthier, G., & Placci, F. M. (n.d.). *LOGISTIC A DE LA SOJA ARGENTINA-PARAGUAY-URUGUAY*.

Gava, G. J. de C., Silva, M. de A., da Silva, R. C., Jeronimo, E. M., Cruz, J. C. S., & Kölln, O. T. (2011). Productivity of three sugarcane cultivars under dry and drip irrigated management. *Revista Brasileira de Engenharia Agricola e Ambiental*, *15*(3), 250–255. https://doi.org/10.1590/S1415-43662011000300005

Gebremariam, S., & M. J. (2018). *Economics of biodiésel production: Review.*

Giraldo Zuniga A. D., Martins M., Dos Reis Coimbra J. S., Alves Martins E. C., Silva D. X., & Telis-romero J. (2011). *REVISÃO: PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DO BIODIÉSEL*.

Goldstein, E. & G. G. (2010). *Producción de biomasa para biocombustibles líquidos: el potencial de América Latina y el Caribe. CEUR-CONICET, Documento de Trabajo*.

Gonçalves, D. B. (2005). *Mar de cana, deserto verde? Dilemas do desenvolvimento sustentável na produção canavieira paulista [Universidade Federal de São Carlos].*

Gui, M. M., L. K. T., & B. S. (2008). *Feasibility of edible oil vs. non-edible oil vs. waste edible oil as biodiésel feedstock. Energy, 33(11), 1646–1653.*

Guimarães, C. E. C., Neto, F. S., Castro Bizerra, V., Nascimento, J. G. A., Valério, R. B. R., Sousa Junior, P. G., Sousa Braz, A. K., Melo, R. L. F., França Serpa, J., Lima, R. K. C., Guimarães, A. P., Souza, M. C. M., Lopes, A. A. S., Sousa Rios, M. A., Desai, A. S., Bilal, M., Smułek, W., Jesionowski, T., & Santos, J. C. S. (2023). Sustainable bioethanol production from first- and second-generation sugar-based feedstocks: Advanced bibliometric analysis. *Bioresource Technology Reports*, *23*. https://doi.org/10.1016/j.biteb.2023.101543

Gulati, M., Kohlmann, K., Ladisch, M. R., Hespell, R., & Bothast, R. J. (1996). Assessment of ethanol production options for corn products. *Bioresource Technology*, *58*(3), 253–264. https://doi.org/10.1016/S0960-8524(96)00108-3

Gunatilake, H., & Abeygunawardena, P. (2011). Energy Security, Food Security, and Economics of Sugarcane Bioethanol in India. *ADB Economics Working Paper Series*, *255*, 1–34. https://doi.org/10.2139/SSRN.1869325

Gupta, A. (2018). *Energy Return on Energy Invested (EROI) and Energy Payback Time (EPBT) for PVs. In A Comprehensive Guide to Solar Energy Systems (pp. 407–425)*.

Hagos, K., Zong, J., Li, D., Liu, C., & Lu, X. (n.d.). Anaerobic co-digestion process for biogas production: Progress, challenges and perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *76*, 1485–1496. https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.184

Herbstritt, S., L. J., F. K. & S. M. (2023). *Estados Unidos Norma sobre combustibles renovables: Retos y oportunidades en el camino hacia la descarbonización del sector del transporte. Clean Air Task Force.*

HESPRESS. (2022). *France approves new amendment for use of cooking oil as fuel.*

Hilbert, J. A. (n.d.). *Biofuels and food production: a systemic approach to study the relations and implications in complex agricultura markets.* Retrieved September 30, 2023, from http://www.carbio.com.ar/wp-content/uploads/2016/12/biofuels-and-food-security-hilbert-INTA-Argentina.pdf

Hiloidhari, M., Vijay, V., Banerjee, R., Baruah, D. C., & Rao, A. B. (n.d.). Energy-carbon-water footprint of sugarcane bioenergy: A district-level life cycle assessment in the state of Maharashtra, India. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *151*. https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111583

Hosein, R., & Mellowes, W. A. (1989). Malt hydrolysis of sweet-potatoes and eddoes for ethanol production. *Biological Wastes*, *29*(4), 263–270. https://doi.org/10.1016/0269-7483(89)90017-7

I.E.A. (n.d.). *France needs to invest more in energy efficiency, renewables and nuclear to put itself on track for net zero by 2050, IEA policy review says*. Https://Www.Iea.Org/News/France-Needs-to-Invest-More-in-Energy-Efficiency-Renewables-and-Nuclear-to-Put-Itself-on-Track-for-Net-Zero-by-2050-Iea-Policy-Review-Says.

IATA. (2023). *Fact Sheet 2 Sustainable Aviation Fuel: Technical Certification.*

Ibis World. (2023). *Cooking Oil Recycling in the US - Market Size, Industry Analysis, Trends and Forecasts (2023-2028).*

IEA. (2023). *Biofuel Policy in Brazil, India and the United States. Insights for the Global Biofuel Alliance*. www.iea.org

IEA. (n.d.). *IEA – International Energy Agency*. Retrieved November 1, 2023, from https://www.iea.org/

IICA, T., A., & Orozco, R. (n.d.). *Atlas de los biocombustible líquidos 2021-2022*. http://www.iica.int.

Indian Standards, B. (2013). *Indian Standard IS 16087 (2013): Biogas (Biomethane) - Specification*.

Institute of Medicine. (2014). *Occupational Health and Biofuels Production - The Nexus of Biofuels, Climate Change, and Human Health - NCBI Bookshelf*. https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK196449/

Institute, E. (n.d.). *Statistical Review of World Energy Data*.

Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA). (2022). *Estado de los biocombustibles en las Américas 2022*.

International Council on Clean Transportation. (2021). *The impact of the U.S. Renewable Fuel Standard on food and feed prices - RFS-and-feed-prices-jan2021*. https://theicct.org/sites/default/files/publications/RFS-and-feed-prices-jan2021.pdf

IRENA, & OIT. (2022a). *Renewable energy and Jobs Annual review 2022*. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2022/Sep/IRENA_Renewable_energy_and_jobs_2022.pdf?rev=7c0be3e04bfa4cddaedb4277861b1b61

IRENA, & OIT. (2022b). *Renewable Energy and Jobs. Annual Review 2022.* https://www.irena.org/-

/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2022/Sep/IRENA_Renewable_energy_and_jobs_2022.pdf?rev=7c0be3e04bfa4cddaedb4277861b1b61

Jayakumar, M., Gindaba, G. T., Gebeyehu, K. B., Periyasamy, S., Jabesa, A., Baskar, G., John, B. I., & Pugazhendhi, A. (2023). Bioethanol production from agricultural residues as lignocellulosic biomass feedstock's waste valorization approach: A comprehensive review. In *Science of the Total Environment* (Vol. 879). Elsevier B.V. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163158

JBS avanza en la producción de biogás en Brasil - H2. (n.d.). *Business News*. https://h2businessnews.com/jbs-avanza-en-la-produccion-de-biogas-en-brasil/

JM BAXI GROUP. (2022). *INDIA'S Roadmap For Biofuels.*

Jozami, E., Mele, F. D., Piastrellini, R., Civit, B. M., & Feldman, S. R. (n.d.). Life cycle assessment of bioenergy from lignocellulosic herbaceous biomass: The case study of Spartina argentinensis. *Energy*, *254*. https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124215

Le Monde. (2020). Trois questions pour comprendre le debat sur le retour des néonicotïnoides dans les champs de betteraves. Agriculture & Alimentation. *Le Monde.*

Licht, M. (2023). *Integrated Crop Management: Storing soybean.*

Lim, M. K. O. Y. (2012). *Biofuel Supply Chain Network Design Operation*. http://publish.illinois.edu/mlim/files/2012/12/Lim_Ouyang_Biofuel-SCN_Final.pdf

Limayem, A., & Ricke, S. C. (2012). Lignocellulosic biomass for bioethanol production: Current perspectives, potential issues and future prospects. *Progress in Energy and Combustion Science*, *38*(ue 4), 449–467. https://doi.org/10.1016/j.pecs.2012.03.002

Liu, B., & M. J. (2019). *Annual changes in energy quality and quality of life: A cross-national study of 29 OECD and 37 non-OECD countries.*

Liza. (n.d.). *Liza - Reciclagem de Óleo*. Retrieved October 15, 2023, from https://www.liza.com.br/sustentabilidade/reciclagem-de-oleo

LMC International. (2022). *Economic Impact of Biodiésel on the US Economy 2022 Main Report - LMC Economic Impact of Biodiésel-on-the-US-Economy-2022*.

Loizides, M. I., L. X. I., O. D. L., & P. D. (2019). *Circular Bioeconomy in Action: Collection and Recycling of Domestic Used Cooking Oil through a Social, Reverse Logistics System. Recycling 2019, Vol. 4, Page 16, 4(2), 16.*

López-Ulibarri, R., & Hall, G. M. (1997). Saccharification of cassava flour starch in a hollow-fiber membrane reactor. *Enzyme and Microbial Technology*, *21*(6), 398–404. https://doi.org/10.1016/S0141-0229(97)82260-0

Lorenzi, G., Mignini, L., Venezia, B., Silva, C., & Santarelli, M. (2019). Integration of high-temperature electrolysis in an HVO production process using waste vegetable oil. *Energy Procedia*, *158*, 2005–2011. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.01.465

Maciel, C. A. (2009). Biocombustibles: desarrollo histórico-tecnológico, mercados actuales y comercio internacional. *Economía Informa*, 63-89. https://api.semanticscholar.org/CorpusID:170444893

Malcolm, S., & Aillery Marcel. (2009). *Growing Crops for Biofuels Has Spillover Effects.* http://webarchives.cdlib.org/sw15d8pg7m/http://ers.usda.gov/AmberWaves/March09

Mandade, P., & Shastri, Y. (2019). Multi-objective optimization of lignocellulosic feedstock selection for ethanol production in India. *Journal of Cleaner Production*, *231*, 1226-1234. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.311

Mantxo, M. (2021). Las protestas agrarias en la India contra la nueva legislación neoliberal. Soberanía Alimentaria, Biodiversidad y Culturas. *Revista Soberanía Alimentaria.*

Marín, A., S. L. & K. Y. (2014). *La industria de biodiésel en argentina: capacidades de innovación y sostenibiLidad futura. Desarrollo Económico, Vol 54*. https://www.jstor.org/stable/43748247

MAyDS. (n.d.). *Cuarto Informe Bienal de Actualización de Argentina a la Convención Marco de las Naciones Unidas para el*.

McAloon, A., Taylor, F., Yee, W., Ibsen, K., & Wooley, R. (2000). *Determining the Cost of Producing Ethanol from Corn Starch and Lignocellulosic Feedstocks*. https://doi.org/10.2172/766198

Mendonça, M. (2009). *Impactos del monocultivo de caña para la producción de etanol.*

Metro. (n.d.). *Recyclage des huiles usagées alimentaires (HUA) | METRO*. https://www.metro.fr/service/developpement-durable/recycler-huiles-usagees?itm_pm=cookie_consent_accept_button

Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté alimentaire. (2023). *https://agriculture.gouv.fr/*. http://agreste.agriculture.gouv.fr/

Ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des Territoires, & M. de la T. énergétique. (n.d.). *Biocarburants.*

Ministére de la Transition énergétique. (n.d.). Https://Www.Ecologie.Gouv.Fr/Biocarburants.

Ministères Écologie Énergie Territoires. (n.d.). Retrieved October 26, 2023, from https://www.ecologie.gouv.fr/biocarburants

Ministerio de Agricultura y Pesca. (2021). *Informe técnico*.

Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible. (n.d.). *https://www.argentina.gob.ar/ambiente*

Ministry of Agriculture & Farmers Welfare, & D. of A. & F. Welfare. (2023). *Unified Portal for Agricultural Statistics.*

Ministry of Foreign Affairs, & Ministry of Science, T. and I. (2020). *Fourth Biennial Update Report Of Brazil To The United Nations Framework Convention On Climate Change*.

Ministry of Petroleum and Natural Gas. (2023a). *Bio Diesel. Government of India.*

Ministry of Petroleum and Natural Gas. (2023b). *Ethanol Blended Petrol (EBP) Programme. Government of India.*

Minnesota Bio-Fuels Association. (2023). *Who We Are. Minnesota Bio-Fuels Association.*

Miranda, A., Da Silva Filho, S., Basile, E., & CurveloSantana, J. (2017). *Analysis of the costs and logistics of biodiésel production from used cooking oil in the metropolitan region of Campinas (Brazil)*.

Mondal, Mónica. (2021). Hidden water crisis behind India´s sugar dominance. *Third Pole.*

Moore, P. H., & Botha, F. C. (2013). *Sugarcane: Physiology, Biochemistry, and Functional Biology*.

Mordor Intelligence. (2023). *Análisis del tamaño y participación del mercado de biocombustibles de Brasil-Informe de investiga*.

Muñoz, A. (2020). *Beneficios ambientales de un proceso de re-refinación de aceites lubricantes usados en Colombia*.

Naciones Unidas. (2006). *El mercado emergente de biocombustibles: consecuencias normativas, comerciales y de desarrollo. Nueva York y Ginebra.*

Napolitano, P., Guido, C., Beatrice, C., & Pellegrini, L. (2018). Impact of hydrocracked diésel fuel and Hydrotreated Vegetable Oil blends on the fuel

consumption of automotive diésel engines. *Fuel*, *222*, 718–732. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.02.097

National Agricultural Statistics Service. (n.d.). *Statistics by Subject*. Retrieved October 29, 2023, from https://www.nass.usda.gov/Statistics_by_Subject/index.php?sector=CROPS

Nigam, P., & Singh, D. (1995). Processes of fermentative production of Xylitol — a sugar substitute. *Process Biochemistry*, *30*(2), 117–124. https://doi.org/10.1016/0032-9592(95)80001-8

Nimer, E. (1989). *Climatologia do Brasil*. https://biblioteca.ibge.gov.br/biblioteca-catalogo?id=281099&view=detalhes

Noel, J., Rodríguez, G., & Pérez-Díaz, B. (2014). Factores previos involucrados en la producción de bioetanol, aspectos a considerar. *Rev. Int. Contam. Ambie*, *30*(ue 2)).

Noticias Puente. (2023). Mercado Maíz, Chicago cierra con baja predominante por dólar débil, baja demanda en EE. UU. *Noticias Puente.* file:///C:/Users/user/Desktop/Referencias/MERCADO%20MAIZ_%20Chicago%20cierra%20con%20baja%20predominante%20por%20d%C3%B3lar%20d%C3%A9bil,%20baja%20demanda%20en%20EEUU%20-%20Noticias%20-%20Puente.pdf

Oatway, J., Panos, /, & Actionaid, /. (2012). *ActionAid International USA Report FUELING THE FOOD CRISIS: The Cost to Developing Countries of US Corn Ethanol Expansion*.

Oliveira, A. F., Gasi, F., & Lourenço, S. R. (2019). Energy Return on Investment (EROI) of Brazilian Coal Production. *International Journal of Advanced Engineering Research and Science*, *6*(7), 156–163. https://doi.org/10.22161/ijaers.6719

Organización Internacional del Trabajo (OIT). (2019). *La cadena de suministro de biodiésel en Argentina: ¿una oportunidad para el avance social?*

Oxfam India. (n.d.). *Human Cost of Sugar. A farm-to-mill assessment of sugar supply chain in Uttar Pradesh.*

Peñarrubia Fernandez, I. A., Liu, D. H., & Zhao, J. (n.d.). LCA studies comparing alkaline and immobilized enzyme catalyst processes for biodiésel production under Brazilian conditions. *Resources, Conservation and Recycling*, *119*, 117–127. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.05.009

Piastrellini, R. (2016). Aportes a la determinación de la huella ambiental de biocombustibles en argentina. Influencia de los sistemas de manejo de cultivos sobre el impacto del consumo de agua, del uso del suelo y de las emisiones de gases de efecto invernadero para el biodiésel de soja. In *Ecosistemas* (Vol. 25, Issue 2). https://doi.org/10.7818/ECOS.2016.25-2.14

Pieragostini, C., Aguirre, P., & Mussati, M. C. (n.d.). Life cycle assessment of corn-based ethanol production in Argentina. *Science of the Total Environment*, *472*, 212–225. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.11.012

Pimental, D. (2005). *Weighing in on renewable energy efficiency. Geotimes, 50, 18–22.*

Powel, L., Sati Akhilesh;, & Kumar Vinod; (2022). *Biofuels in India: Do the benefits justify the costs?* https://www.orfonline.org/expert-speak/biofuels-in-india-do-the-benefits...

Pradhan, B., & Parij, Pratik. (2021). *Modi govt's ambitious ethanol plan spurs food security fears*. https://theprint.in/india/modi-govts-ambitious-ethanol-plan-spurs-food-...

Pramanik, S. K., Suja, F. B., Zain, S. M., & Pramanik, B. K. (n.d.). The anaerobic digestion process of biogas production from food waste: Prospects and constraints. In *Bioresource Technology Reports* (Vol. 8). Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/j.biteb.2019.100310

Rahmaditio, M. R., & Gardian, P. I. (2023). Projection of Carbon Emissions from the Diesel, Biodiesel, and Battery Electric Vehicle in Indonesia: A Policy

Scenario Analysis for Decarbonization of Transportation Sector. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. https://doi.org/10.1088/1755-1315/1199/1/012011

Raud, M., Kikas, T., Sippula, O., & Shurpali, N. J. (2019). Potentials and challenges in lignocellulosic biofuel production technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *111*, 44–56. https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.05.020

RBA Ambiental. (2023). *Recolección Gastronómica o Industrial - RBA Ambiental*. http://www.rba-ambiental.com.ar/servicios/recoleccion-gastronomica-o-industrial/

Renewable Fuels Association. (2023). *How is Ethanol Made?*

Renewable Fuels Association. (n.d.-a). *Annual Ethanol Production*. 2023. Retrieved October 29, 2023, from https://ethanolrfa.org/markets-and-statistics/annual-ethanol-production

Renewable Fuels Association. (n.d.-b). Where is Ethanol Made? In *2023*. Retrieved October 29, 2023, from https://ethanolrfa.org/ethanol-101/where-is-ethanol-made*Resultados Biocombustíveis 2020 — Ministério de Minas e Energia*. (n.d.). Retrieved October 26, 2023, from https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/petroleo-gas-natural-e-biocombustiveis/publicacoes-1/resultados-dos-biocombustiveis-em-2020/resultados-biocombustiveis-2020/view

Risso, O. (2021). *La política pública del etanol en Argentina, Brasil y Estados Unidos*.

Romano, S. D., & Sorichetti, P. A. (2011). Introduction to biodiésel production. In *Green Energy and Technology* (Vol. 29, pp. 7–27). Springer Verlag. https://doi.org/10.1007/978-1-84996-519-4_2

Roque, L. F. A., Costa, R. B. R., Souza, T. A. Z., Coronado, C. J. R., Pinto, G. M., Cintra, A. J. A., Raats, O. O., Oliveira, B. M., Frez, G. V, & Alves, L. F. R. (2023). Experimental analysis and life cycle assessment of green diésel

(HVO) in dual-fuel operation with bioethanol. *Journal of Cleaner Production*, *389*. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.135989

RUCO. (2021). *Repurpose Used Cooking Oil.*

Saifi, A., S. A., D. L., & R. S. (2023). India: el éxito de la industria de la caña de azúcar sacrifica el bienestar de los trabajadores. *France 24.*

Sánchez, Ó. J., & Cardona, C. A. (2005). Producción biotecnológica de alcohol carburante I: obtención a partir de diferentes materias primas. *Interciencia*, *30*(11), 671-678. http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0378-18442005001100005&lng=es&nrm=iso&tlng=es

Sarkar, N., Ghosh, S. K., Bannerjee, S., & Aikat, K. (2012). Bioethanol production from agricultural wastes: An overview. *Renewable Energy*, *37*(ue 1), 19-27. https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.06.045

Sarwal, R., Aayog, I. N. I. T. I., Petroleum, I. M., & Gas, N. (n.d.). *Road map for Ethanol blending in India 2020-25 : report of the expert committee*.

Saskatchewan Agriculture and Food. (1993). *Establishing an Ethanol Production Business.* (The Secretariat., Ed.).

Secretaría de Agricultura Ganadería y Pesca. Argentina. (2023). *Biodisel. Observatorio Bioeconomía.*

Seekhe. (2018). *National Biofuel Policy 2018*. https://seekhe.com/yojana/rajasthan-biofuel-policy-2018/

Seekhe. (2021). *National Biofuel Policy 2021*. https://seekhe.com/yojana/himachal-saur-sinchai-subsidy-scheme-2020/

Selfa, T. L., Goe, R., Kulcsar, L., & Middendorf, G. & B. Carmen. (2013). *The Biofuels Revolution Understanding the Social, Cultural and Economic Impacts of Biofuels Development on Rural Communities (Technical Report)*. https://www.osti.gov/biblio/1062587

Sharno, M. A., & Hiloidhari, M. (n.d.). Life cycle carbon, energy, water, and landuse footprints of agricultural residue-based biojet fuel in Bangladesh. *Bioresource Technology Reports*, *20*. https://doi.org/10.1016/j.biteb.2022.101234

Sili, M. E., & S. L. (2011). *La problemática de la tierra en Argentina: Conflictos y dinámicas de uso, tenencia y concentración. Fondo Internacional de Desarrollo Agrícola.*

Singh, P. (2021). *Las raíces de la revuelta campesina en India: contra el agronegocio capitalista y la centralización.*

Smith, J. P., Limb, B. J., Beal, C. M., Banta, K. R., Field, J. L., Simske, S. J., & Quinn, J. C. (2023). Evaluating the sustainability of the 2017 US biofuel industry with an integrated techno-economic analysis and life cycle assessment. *Journal of Cleaner Production*, *413*. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137364

Souza, S. P., Seabra, J. E. A., & Nogueira, L. A. H. (2018). Feedstocks for biodiésel production: Brazilian and global perspectives. *Biofuels*, *9*(4), 455–478. https://doi.org/10.1080/17597269.2017.1278931

Statista. (2023). *Main producers of SAF*. //Www.Statista.Com/Statistics/1365117/Announced-Offtake-Volumes-Saf-by-Producer.

Stringfield, G. H., & Anderson, M. S. (1954). *Corn production : Farmer's Bulletin. 1893*-. https://archive.org/details/CAT87205478/page/2/mode/1up

Suarez-Bertoa, R., Kousoulidou, M., Clairotte, M., Giechaskiel, B., Nuottimäki, J., Sarjovaara, T., & Lonza, L. (2019). Impact of HVO blends on modern diésel passenger cars emissions during real world operation. *Fuel*, *235*, 1427–1435. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.08.031

Suez. (n.d.). *La valorisation des huiles alimentaires usagées.*

Suzihaque, M. U. H., A. H., K. I. U., A. S., & H. N. (2022). *Biodiésel production from waste cooking oil: A brief review. Materials Today: Proceedings, 63, S490–S495.*

Taheripour, F. (2018). *Production and Consumption of Protein, Fats, and Carbs in the U.S.: Role of the Livestock Sector.* https://cleanfuelsfoundation.org/docs/default-source/workshops/2018-sustainability-workshop-report.pdf?sfvrsn=e8d54698_2

Terega. (n.d.). *Biomethane in France in 2023*. https://www.terega.fr/en/newsroom/editorial/what-are-the-perspects-for-biomethane-in-france-in-2023

The Energy and Resources Institute. (n.d.). www.teriin.org

TOI. (2019). Govt launches programme for converting used cooking oil into biodiesel in 100 cities. *Times of India.*

Torroba, A., & I.I.C.A. (2022). *Atlas de los biocombustibles líquidos 2021-2022*. http://www.iica.int.

Torroba, A., Brenes, C., Orozco, R., & Vernazza, S. (2022). *Estado de los biocombustibles en las Américas, 2022*.

TotalEnergies. (n.d.). *¿Conoces SAF, el combustible sostenible para aviación? » TotalEnergies Blog: Expertos en lubricantes para tu motor*. https://blog.totalenergies.es/saf-el-combustible-sostenible-para-aviacion/

Tounoux, A. (2020). La betterave : un secteur agricole en danger. *Franceinfo.*

Trejo, E. (2007). *Estudio de Derecho Comparado y Marco Jurídico Internacional sobre Biocombustibles/bioenergéticos.*

Tricontinental. (2021). *La revuelta campesina en India. Dossier 41.*

Tripathi, Shruti. (n.d.). *Working paper. Social Impacto f Biofuels in India. Social Science Research Network.* Retrieved October 2, 2023, from

https://www.zbw.eu/econis-archiv/bitstream/11159/30678/1/EBP071708774_0.pdf

Tuck, B. (2022). *Economic Contribution of Minnesota's Ethanol Industry: 2021. A report of the Economic Impact Analysis Program.*

U.S. Department Of Energy. (2023). *Alternative Fuels Data Center: Ethanol Fuel Basics*. https://afdc.energy.gov/fuels/ethanol_benefits.html

U.S. Department of Energy. (2023). *Ethanol Feedstocks.*

U.S. Grains Council. (n.d.). Informe de la calidad del maíz para exportación 2020/2021. In *2021*.

U.S. Department of Energy. (2023). *Ethanol Feedstocks.*

U.S. Food & Drug Administration. (2023a). *Biotecnología Agrícola | FDA*. https://www.ams.usda.gov/rules-

U.S. Food & Drug Administration. (2023b). *FDA*. https://www.ams.usda.gov/rules-

U.S. Grains. (2023). *El Mercado del Etanol - América Latina*. https://grains.org/lta/buying-selling/etanol/el-mercado-del-etanol/

Undavalli, V., G. O. O. B., B. R., W. C., H. J., H. J., & K. B. (2023). *Recent advancements in sustainable aviation fuels. Progress in Aerospace Sciences, 136, 100876.*

UNEP. (n.d.). *Guide de la Gestion Écologiquement Rationnelle des Huiles Usagées en Méditerranée.*

United States Department of Agriculture. (n.d.). In *Corn Production and Portion Used for Fuel Ethanol*. https://afdc.energy.gov/data/10339

United States of America. (2021). *The United States of America Nationally Determined Contribution Reducing Greenhouse Gases in the United States: A 2030 Emissions Target*.

Urbanchuk, J. M. (2013). *The Renewable Fuel Standard and Consumer Food Prices.*

USDA. (2022). *USDA - National Agricultural Statistics Service - Statistics by Subject*.

USDA. (2023). *India Biofuels Annual 2023*. https://apps.fas.usda.gov/newgainapi/api/Report/DownloadReportByFileName?fileName=Biofuels%20Annual_New%20Delhi_India_IN2023-0039.pdf

USDA. (2023). *India Biofuels Annual*. https://apps.fas.usda.gov/newgainapi/api/Report/DownloadReportByFileName?fileName=Biofuels%20Annual_New%20Delhi_India_IN2023-0039.pdf

USDA. (n.d.). *https://www.usda.gov/*.

Van Der Veen, A. M. H., L. J., D. K. I., P. S., & M. H. (2018). *Biogas: Regulations and measurement standards.*

Vargas Amelin, Elisa. (n.d.). *La producción de bioetanol en Brasil y sus impactos medioambientales e hídricos*. www.conama10.es

Veiga, Filho. (2006). *Alceu de Arruda et al. Análise da Mecanização do Corte da Cana-de-Açúcar no Estado de São Paulo. Informações Econômicas/SP. V 24, nº 10, 1994.*

Wancura, J. H. C., Brondani, M., Vezaro, F. D., Martins-Vieira, J. C., Moreira, B. P., Santos, M. S. N., Abaide, E. R., Castilhos, F., & Mayer, F. D. (2023). Motivations to produce biofuels from rice bran: An overview involving a recent panorama. In *Industrial Crops and Products* (Vol. 203). Elsevier B.V. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.117170

Whitehouse. (n.d.). *https://www.whitehouse.gov/*.

World, E. (n.d.). *Why the biogas sector presents a compelling case for growth of clean energy and startups, ET EnergyWorld*. https://energy.economictimes.indiatimes.com/news/oil-and-gas/why-the-

biogas-sector-presents-a-compelling-case-for-growth-of-clean-energy-and-startups/103050670

Zucarelli, Marcos. (2007). Conflictos Socioambientales de la Expansión de Biocombustibles: Explotación contra-simetrica del espacio y promoción de desigualdad. XXVI Congreso de la Asociación Latinoamericana de Sociología. *Asociación Latinoamericana de Sociología*.