INFORME FINAL

CONVENIO INTERADMINISTRATIVO: SBV–ES–CA–238–2025

“AUNAR ESFUERZOS TÉCNICOS, ADMINISTRATIVOS Y FINANCIEROS PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE UN PROYECTO DE CARACTERIZACIÓN DE LA HUELLA HÍDRICA EN EL NODO LÁCTEO DE LA ESTRATEGIA DE ECONOMÍA CIRCULAR, ORIENTADO AL MEJORAMIENTO DE LA COMPETITIVIDAD, LA EFICIENCIA EN EL USO DE LOS RECURSOS HÍDRICOS Y LA SOSTENIBILIDAD AMBIENTAL Y SOCIAL EN EL DEPARTAMENTO DE CUNDINAMARCA.”

20 DE OCTUBRE - 29 DE DICIEMBRE DE 2025

29 DE DICIEMBRE DE 2025

Bienestar Verde
Gobernación de Cundinamarca

Una filial de:
Cámara de Comercio de Bogotá

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN 4
2. OBJETIVO 5
2.1. Objetivo general 5
3. METODOLOGÍA GENERAL DE EJECUCIÓN DEL PROYECTO 5
3.1. Enfoque metodológico general 6
3.2. Etapa 1. Convocatoria, priorización y vinculación de empresas 7
3.3. Etapa 2. Diagnóstico y caracterización ambiental y productiva 7
3.4. Etapa 3. Medición de huellas hídricas empresariales 8
3.5. Articulación metodológica y consistencia de resultados 8
4. RESULTADOS DEL PROYECTO 10
4.1. Resultados de la Etapa 1 – Convocatoria, priorización y vinculación de empresas 10
4.1.1. Priorización Multicriterio y Consolidación del Nodo 11
4.2. Resultados de la Etapa 2 – Diagnóstico y caracterización ambiental y productiva 16
4.2.1. Caracterización Productiva y Generación de Subproductos 17
4.3. Resultados de la Etapa 3 – Medición de las huellas hídricas y formulación de planes de acción 21
5. ANÁLISIS DE RESULTADOS 27
5.1. Factores Estructurales: La Carga de la Cadena de Suministro 28
5.2. Factores Operativos: La Paradoja de la Gestión Interna 28
5.3. Dinámica del Lactosuero: De Residuo a Subproducto 29
6. CONCLUSIONES 32
7. ANEXOS 34
8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 34

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Enfoque metodológico general 6
Figura 2. Enfoque metodológico de la medición de la huella hídrica y su relación con la eficiencia en el uso del agua 9
Figura 3. Flujo de Selección Técnica (Embudo de Atrición) 12
Figura 4. Caracterización de las Exclusiones 13
Figura 5. Cobertura Territorial del Nodo 14
Figura 6. Distribución Geográfica de las empresas 15
Figura 7. Generación Diaria de Lactosuero vs. Producción de Queso por Empresa 17
Figura 8. Distribución Porcentual del Balance de Masa - Promedio del Nodo . 19
Figura 9. Distribución Típica del Consumo de Agua en las Plantas del Nodo .. 20

Figura 10. Predominancia de la Huella Verde (Cadena de Suministro) 24
Figura 11. Enfoque progresivo para la medición de la huella hídrica y la formulación de planes de acción ambiental 26
Figura 12. Ejes de análisis del uso del agua en el sector lácteo 31

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Matriz de Selección y Priorización del Nodo Lácteo 11
Tabla 2. Resumen de Indicadores Promedio (Estimado Nodo Lácteo) 25
Tabla 3. Resultados del desempeño hídrico del Nodo Lácteo 30

1. INTRODUCCIÓN

El Departamento de Cundinamarca, a través de la Secretaría de Bienestar Verde, y la Corporación Ambiental Empresarial – CAEM desarrollaron el proyecto "**Caracterización de la Huella Hídrica – Nodo Lácteo de Cundinamarca**", orientado al fortalecimiento de la gestión ambiental empresarial y a la mejora del desempeño hídrico del sector lácteo departamental, en el marco de la Estrategia Departamental de Economía Circular.

El proyecto se concibió como una intervención técnica aplicada, dirigida a empresas del sector lácteo localizadas en municipios priorizados, con el propósito de generar información confiable sobre el uso del recurso hídrico, identificar brechas operativas y ambientales, y formular acciones de mejora ajustadas a las condiciones productivas reales del Nodo. La iniciativa respondió a la necesidad de contar con diagnósticos ambientales detallados y mediciones específicas que permitieran orientar decisiones empresariales y sectoriales basadas en evidencia técnica.

El alcance técnico del proyecto comprendió la convocatoria, priorización, selección y vinculación de diez (10) empresas del sector lácteo; el desarrollo de diagnósticos y caracterización ambiental y productiva en cada una de las empresas vinculadas; la caracterización de vertimientos mediante análisis de laboratorio certificado; la medición de diez (10) huellas hídricas empresariales con consolidación de resultados a nivel de Nodo; y la formulación de planes de acción ambiental orientados a la eficiencia en el uso del agua, la reducción de impactos ambientales y la valorización de subproductos bajo un enfoque de economía circular.

La ejecución del proyecto se estructuró a partir de una ruta metodológica secuencial definida en el Plan Operativo del Proyecto, organizada en tres etapas técnicas: (i) convocatoria y vinculación de empresas, (ii) diagnóstico y caracterización ambiental y productiva, y (iii) medición de huellas hídricas. Esta estructura permitió construir una línea base ambiental consistente, integrar información primaria levantada en campo y desarrollar análisis técnicos progresivos que fortalecieron la comprensión del desempeño hídrico del sector lácteo a escala empresarial y agregada.

La medición de la huella hídrica constituyó el eje analítico central del proyecto, al permitir cuantificar el uso del recurso hídrico asociado a los procesos productivos, identificar los componentes con mayor incidencia en el consumo de agua y reconocer oportunidades de optimización técnica y operativa. Los

resultados obtenidos aportan insumos relevantes para el diseño de estrategias de mejora empresarial, el fortalecimiento de capacidades técnicas en las organizaciones participantes y la formulación de lineamientos sectoriales orientados a la sostenibilidad del Nodo Lácteo.

El presente Informe Final consolida de manera integrada el desarrollo metodológico del proyecto, los resultados técnicos obtenidos en cada una de las etapas ejecutadas, el análisis de los hallazgos alcanzados y los productos finales generados. El documento consolida el desarrollo metodológico y resultados sobre el desempeño hídrico del Nodo Lácteo de Cundinamarca, orientada a la transferencia de conocimiento, la toma de decisiones informadas y la proyección de acciones de mejora en el sector.

2. OBJETIVO

2.1. Objetivo general

Consolidar, analizar e interpretar de manera integral los resultados del proceso de diagnóstico ambiental y productivo, la medición de las huellas hídricas empresariales y la formulación de planes de acción ambiental del Nodo Lácteo, con el fin de evaluar el desempeño hídrico del sector y aportar insumos técnicos para la toma de decisiones orientadas a la gestión sostenible del recurso hídrico.

3. METODOLOGÍA GENERAL DE EJECUCIÓN DEL PROYECTO

La ejecución del proyecto "Caracterización de la Huella Hídrica - Nodo Lácteo de Cundinamarca" se desarrolló mediante una metodología técnica aplicada, estructurada en etapas secuenciales y complementarias, orientadas a la generación de información confiable, al análisis del desempeño hídrico empresarial y a la formulación de acciones de mejora ajustadas a las condiciones productivas del sector lácteo departamental.

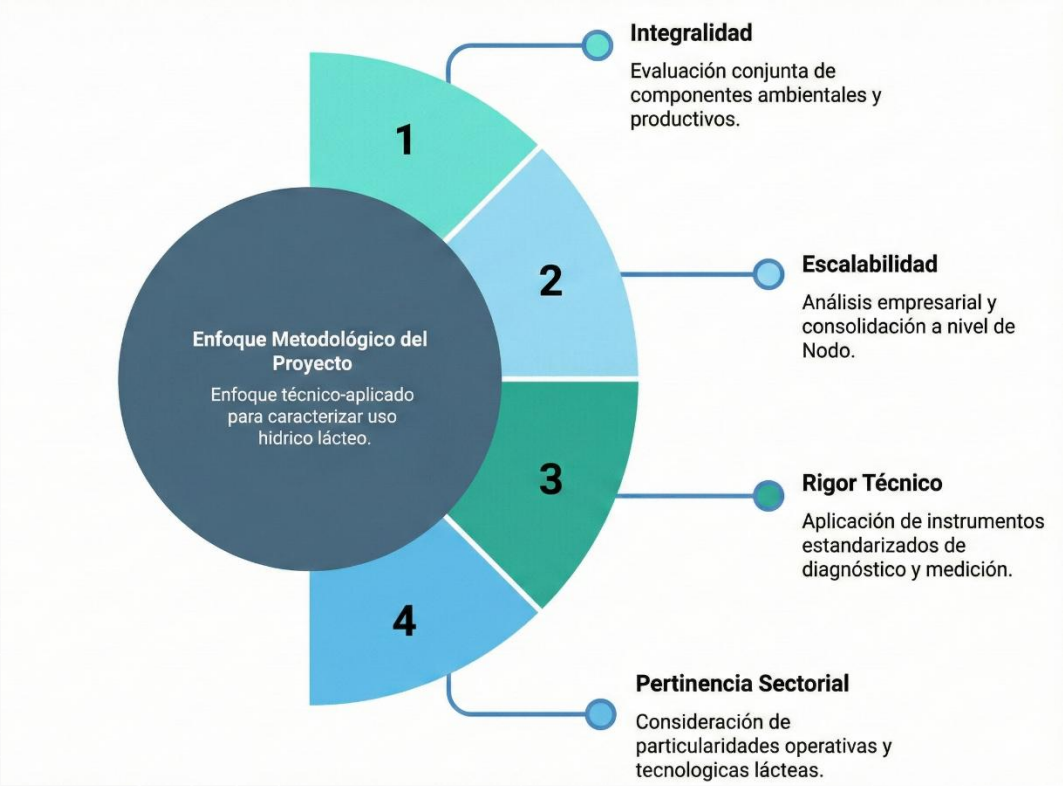
La metodología integró actividades de convocatoria y vinculación empresarial, levantamiento de información primaria en campo, diagnóstico ambiental y productivo, análisis de laboratorio certificado y medición de huellas hídricas empresariales. Cada etapa se diseñó para alimentar progresivamente la siguiente, garantizando coherencia técnica, trazabilidad de la información y consistencia en los resultados obtenidos a nivel empresarial y agregado.

3.1. Enfoque metodológico general

El enfoque metodológico del proyecto fue de carácter técnico - aplicado, con énfasis en la caracterización del uso del recurso hídrico en procesos productivos reales del sector lácteo. Se priorizó el uso de información primaria recolectada directamente en las empresas participantes, complementada con información secundaria suministrada por las organizaciones y con resultados analíticos obtenidos a partir de laboratorio certificado.

La metodología se fundamentó en los siguientes principios operativos:

Figura 1. Enfoque metodológico general



Fuente: CAEM

Este enfoque permitió identificar patrones de consumo, brechas de desempeño y oportunidades de mejora con base en evidencia técnica verificable.

3.2. Etapa 1. Convocatoria, priorización y vinculación de empresas

La primera etapa se orientó a la identificación y selección de empresas del sector lácteo con potencial de participación en el proyecto, mediante un proceso de convocatoria abierta y aplicación de criterios técnicos de priorización. La convocatoria se dirigió a empresas localizadas en municipios priorizados del departamento de Cundinamarca, considerando criterios relacionados con el tipo de actividad productiva, el nivel de formalización, la disposición para participar en procesos de diagnóstico ambiental y la representatividad sectorial. Las empresas inscritas fueron evaluadas mediante una matriz de priorización que permitió seleccionar aquellas que cumplían con los criterios definidos para el alcance del proyecto.

Una vez seleccionadas, las empresas fueron vinculadas formalmente mediante actas suscritas, las cuales establecieron los compromisos de participación, el alcance de la intervención técnica y las responsabilidades asociadas al suministro de información y al acompañamiento en campo. Esta etapa permitió conformar el grupo definitivo de empresas participantes y garantizar condiciones homogéneas para el desarrollo de las etapas posteriores.

La convocatoria, verificación y priorización de las empresas se desarrolló mediante un proceso técnico estructurado, cuyos lineamientos, instrumentos y criterios se encuentran documentados en el Documento de Convocatoria y en la matriz única de selección de empresas (**ver Anexo 01.Documento Convocatoria; Anexo 02. Matriz de priorización y selección de empresas del Nodo Lácteo.**)

3.3. Etapa 2. Diagnóstico y caracterización ambiental y productiva

La segunda etapa correspondió al diagnóstico y caracterización ambiental y productiva de las empresas vinculadas, con el propósito de construir una línea base detallada sobre el uso del recurso hídrico y las condiciones operativas asociadas a los procesos productivos.
Esta etapa incluyó visitas técnicas a cada empresa, durante las cuales se levantó información relacionada con:

- Procesos productivos y flujos operativos.
- Consumos de agua y energía.
- Generación y manejo de residuos y vertimientos.
- Infraestructura asociada al manejo del recurso hídrico.

- Condiciones operativas relevantes para la medición de la huella hídrica.

Como componente fundamental del diagnóstico, se llevó a cabo la contratación de un laboratorio ambiental certificado para garantizar la validez técnica de la información primaria. La labor de este laboratorio consistió en la caracterización fisicoquímica de los vertimientos mediante la toma de muestras puntuales y compuestas tanto en los afluentes como en los efluentes de las empresas.
Los resultados analíticos entregados por el laboratorio (específicamente las concentraciones de carga orgánica DBO y DQO) permitieron no solo identificar el impacto de los procesos productivos, sino que se constituyeron en los insumos técnicos indispensables para la medición de la huella hídrica gris que se desarrolla en la Etapa 3. (ver **Anexo 7**)

3.4. Etapa 3. Medición de huellas hídricas empresariales

La tercera etapa se orientó a la medición de las huellas hídricas empresariales, a partir de la información consolidada durante el diagnóstico ambiental y productivo. Esta etapa constituyó el componente analítico central del proyecto.
La medición de la huella hídrica se realizó considerando los usos directos e indirectos del recurso hídrico asociados a las actividades productivas de cada empresa, integrando datos de consumo, procesos, insumos y condiciones operativas específicas. Los cálculos se desarrollaron con criterios homogéneos, lo que permitió la comparación de resultados entre empresas y la agregación de la información a nivel de Nodo Lácteo.
Los resultados obtenidos fueron analizados de manera individual y consolidada, con el fin de identificar:

- Componentes del proceso productivo con mayor incidencia en el consumo de agua.
- Variabilidad del desempeño hídrico entre empresas.
- Factores técnicos que influyen en el uso eficiente del recurso hídrico.

Los insumos generados en esta etapa sirvieron de base para la formulación de planes de acción ambiental orientados a la optimización del uso del agua y la reducción de impactos ambientales.

3.5. Articulación metodológica y consistencia de resultados

La metodología aplicada permitió articular de manera coherente las tres etapas del proyecto, asegurando que los resultados obtenidos en cada fase alimentaran de forma directa la siguiente. La información levantada durante la convocatoria

y vinculación garantizó una selección adecuada de empresas; el diagnóstico y la caracterización ambiental aportaron la base técnica necesaria para la medición de la huella hídrica; y los resultados de la medición permitieron orientar la formulación de planes de acción ajustados a las condiciones reales del sector.
Esta articulación metodológica fortaleció la consistencia de los resultados obtenidos y recopiló una visión integral del desempeño hídrico del Nodo Lácteo de Cundinamarca, con enfoque técnico, sectorial y aplicado.

Figura 2. Enfoque metodológico de la medición de la huella hídrica y su relación con la eficiencia en el uso del agua



Fuente: CAEM

La medición de la huella hídrica constituye un instrumento técnico para analizar de manera integrada el uso directo e indirecto del recurso hídrico en los procesos productivos, permitiendo identificar los componentes con mayor consumo de agua, evaluar la variabilidad del desempeño hídrico entre empresas y reconocer los factores técnicos que influyen en la eficiencia del uso del recurso. Este enfoque analítico facilita la formulación de planes de acción orientados a la optimización del consumo de agua y a la reducción de impactos ambientales, a

partir de información técnica verificable y comparable a nivel empresarial y sectorial.

4. RESULTADOS DEL PROYECTO

El presente capítulo consolida los resultados técnicos obtenidos durante la ejecución del proyecto "Caracterización de la Huella Hídrica – Nodo Lácteo de Cundinamarca", organizados de acuerdo con las tres etapas de intervención desarrolladas. Los resultados se presentan de manera progresiva, iniciando con los asociados a la conformación del grupo empresarial intervenido, continuando con los hallazgos del diagnóstico y la caracterización ambiental y productiva, y finalizando con los resultados de la medición de las huellas hídricas empresariales y su consolidación a nivel de Nodo.

4.1. Resultados de la Etapa 1 – Convocatoria, priorización y vinculación de empresas

La conformación del Nodo Lácteo se fundamentó en una metodología de filtrado secuencial, diseñada para identificar unidades productivas que no solo demostraran voluntad de participación, sino que cumplieran con las condiciones operativas y de infraestructura requeridas para un estudio de Huella Hídrica (HH) de alcance industrial.

A continuación, se detalla el análisis técnico de las fases de postulación, habilitación y priorización, que derivó en la selección final:

El despliegue de la convocatoria integró un registro de veinte (20) postulaciones efectivas. Sobre este universo se aplicó una auditoría de requisitos habilitantes para segregar las actividades logísticas de las de transformación real.

- Filtro de Habilitación: El 80% de los postulantes (16 empresas) demostró contar con procesos activos de transformación industrial. El 20% restante (4 organizaciones) fue declarado NO HABILITADO debido a que su modelo de negocio se limitaba exclusivamente al acopio, enfriamiento o comercialización de leche cruda (*Centros de Acopio*). Estas actividades fueron excluidas técnicamente, ya que no generan los vertimientos fisicoquímicos ni los consumos de proceso (calderas, limpieza CIP) que constituyen el objeto de estudio de la Huella Hídrica Industrial.

- Filtro de Priorización: Las 16 empresas habilitadas fueron sometidas a la Matriz de Evaluación Multicriterio (0-100 puntos). Tras este análisis, se seleccionaron las diez (10) organizaciones con los puntajes más altos y mayor relevancia estratégica. En esta etapa, 6 empresas habilitadas no ingresaron al nodo final (*Atrición del 30% del total*). Las causales incluyeron puntajes inferiores al corte de competitividad o menor impacto hídrico relativo.

4.1.1. Priorización Multicriterio y Consolidación del Nodo

Como resultado del proceso, se consolidó el grupo de diez (10) empresas beneficiarias, lo que representa una selección del 50% del total de postulaciones. Este porcentaje garantiza que el estudio intervenga exclusivamente a las unidades de mayor madurez técnica y representatividad territorial.

Tabla 1 Matriz de Selección y Priorización del Nodo Lácteo

ORDEN	EMPRESA	MUNICIPIO	PUNTAJE
1	LACTEOS HATO CHIPS P SAS	Ubaté	90
2	Asociación Productora lechera y agropecuaria San Jorge	Zipaquirá	80
3	ASOCIACION DE PRODUCTORES DE LECHE DE CHOCONTA	Chocontá	80
4	INDUSTRIAS LACTEAS EL NOGAL S.A.S	Zipaquirá	80
5	PRODUCTOS LACTEOS SAN ANDRES EU	Ubaté	80
6	Asociación Lechera y Agropecuaria de Suesca -Asolac -	Suesca	75
7	ASOCIACION AGROINDUSTRIAL LAS CUATRO NATAS	Villapinzón	70
8	PRODUCTOS ALIMENTICIOS EL RECREO SAS	Zipaquirá	75
9	T&T HOLAANDES SAS	Guatavita	65
10	MILKCHES SAS	Villapinzón	60

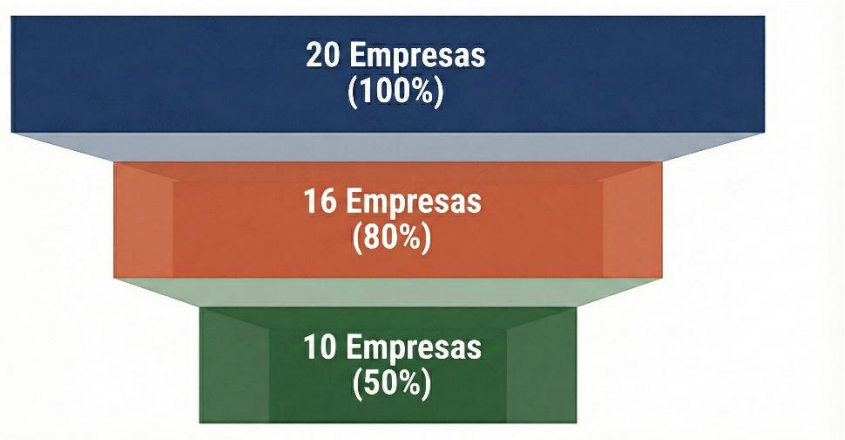
Fuente: CAEM_ Convenio SBV–ES–CA–238–2025

El grupo empresarial seleccionado presenta características que fortalecen la calidad técnica del proyecto, al concentrar unidades productivas con consumo significativo de agua, interacción directa con cuerpos hídricos o sistemas de vertimiento y capacidad operativa para participar en procesos de diagnóstico y medición. La información detallada del proceso de convocatoria, priorización y

selección, incluyendo las matrices aplicadas y las actas de vinculación suscritas, se presenta como evidencia en los anexos correspondientes (**ver Anexos 01**).

Las siguientes figuras ilustran el proceso de selección y la distribución final del nodo.

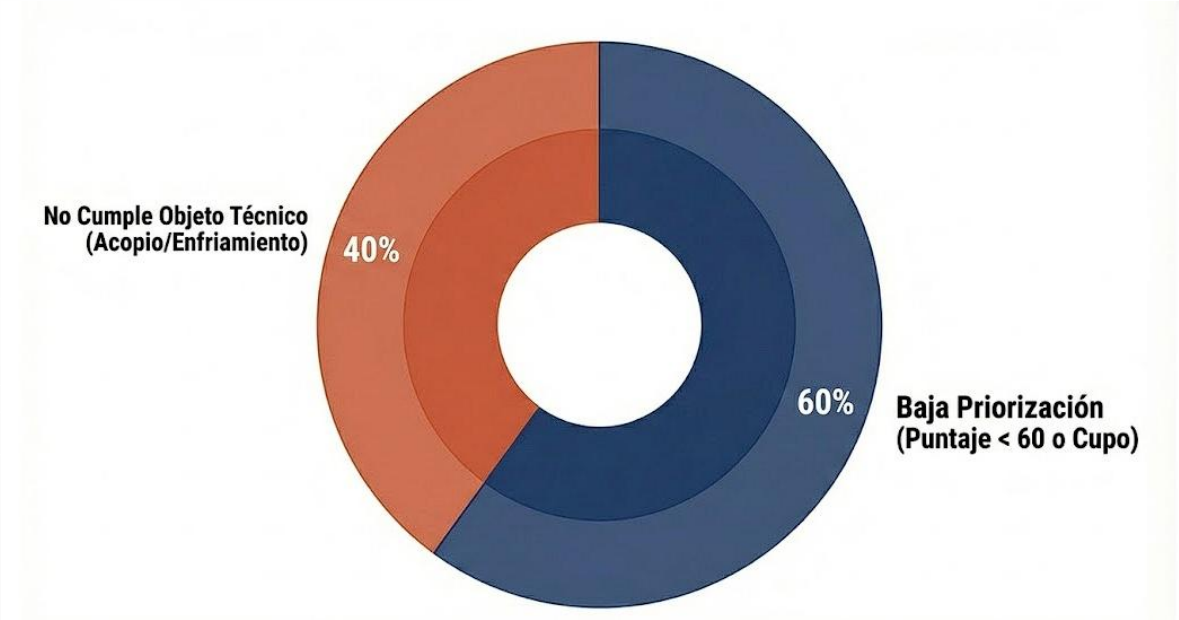
Figura 3. Flujo de Selección Técnica (Embudo de Atrición)



Fuente: CAEM

El gráfico evidencia la eficiencia del tamizaje técnico. Partiendo de 20 inscritos, se observa cómo el proceso retiene al 80% en la fase de habilitación y, finalmente, selecciona al 50% (10 empresas) en la fase de priorización. Esto evidencia que la conformación del Nodo se realizó mediante un proceso de selección técnica y competitiva, basado en criterios habilitantes y de priorización donde solo 1 de cada 2 postulantes cumplió con los estándares de alto impacto requeridos.

Figura 4. Caracterización de las Exclusiones

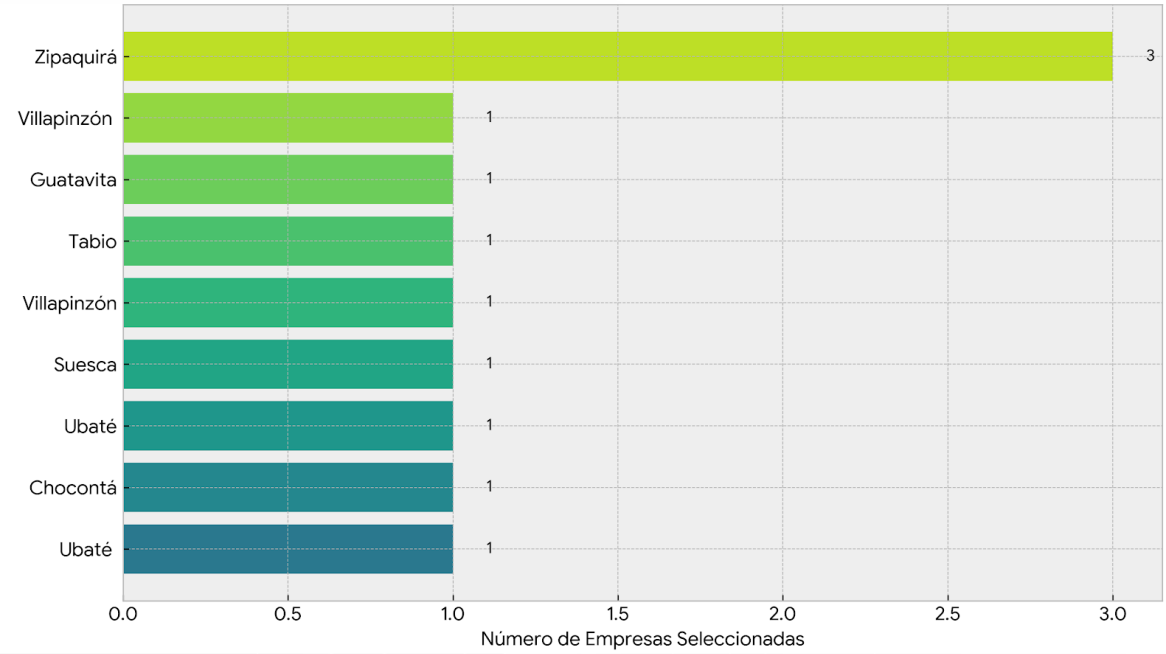


Fuente: CAEM

Al revisar el grupo de las diez (10) organizaciones que no continuaron en el proyecto, se identifican dos causas principales:

1. Por Puntaje (60%): Seis de las empresas no ingresaron al grupo final simplemente porque obtuvieron una calificación menor en la evaluación. Aunque estas empresas sí transforman lácteos, sus puntajes no alcanzaron para estar entre los diez primeros lugares del ranking.
2. Por Tipo de Actividad (40%): Las cuatro empresas restantes no pudieron continuar porque su actividad principal es solamente enfriar o almacenar leche (centros de acopio). Para medir la huella hídrica en este proyecto, es requisito indispensable que la empresa transforme la leche (haga quesos, yogures, etc.), ya que ahí es donde se consume el agua que se quiere medir en el desarrollo del proyecto.

Figura 5. Cobertura Territorial del Nodo



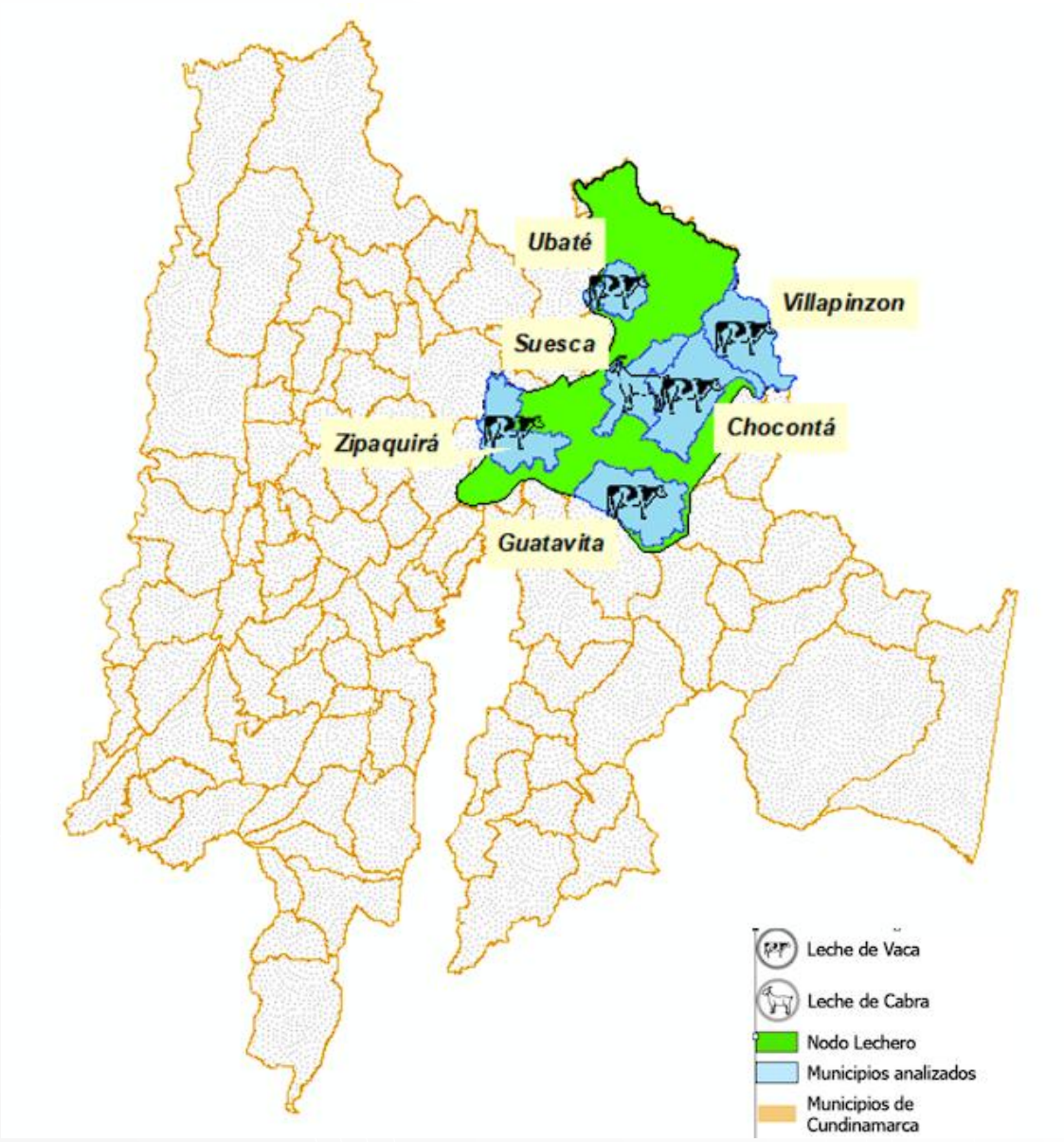
Fuente: CAEM

La distribución de las diez empresas seleccionadas permite cubrir las zonas más importantes para el estudio de la siguiente manera:

- Municipios con mayor industria (50%): La mitad del grupo (5 empresas) está ubicado en Zipaquirá y Ubaté. Esto es fundamental porque son los municipios donde se procesa la mayor cantidad de leche en la región.
- Zona del nacimiento del río (20%): Contamos con dos (2) empresas en Villapinzón. Su participación es clave para medir el impacto de la industria desde la parte alta, cerca de donde nace el Río Bogotá.
- Cobertura regional (30%): Las tres (3) empresas restantes están en Chocontá, Suesca (empresa con leche de cabra) y Guatavita (una en cada

municipio). Esto nos permite comparar datos y asegurar que el estudio no se centre solo en las grandes ciudades, sino que tenga una visión completa del territorio.

Figura 6. Distribución Geográfica de las empresas



Fuente: CAEM

La distribución espacial de las diez (10) empresas seleccionadas se presenta en el mapa mediante una diferenciación cromática por niveles de concentración municipal, lo que permite identificar los principales núcleos territoriales del proyecto dentro del nodo lechero de Cundinamarca:

- El municipio de Zipaquirá concentra el mayor número de organizaciones, con tres (3) empresas localizadas dentro de su jurisdicción. Esta concentración confirma su papel como uno de los principales centros de transformación y procesamiento lácteo del área de estudio.

- Los municipios de Ubaté y Villapinzón registran dos (2) empresas cada uno, para un total de cuatro (4) organizaciones en esta categoría. En particular, Villapinzón adquiere relevancia adicional por su localización en el área de influencia del nacimiento del río Bogotá, lo cual refuerza la importancia ambiental del análisis territorial.

- Los municipios de Chocontá, Suesca y Guatavita cuentan con una (1) empresa cada uno, permitiendo ampliar la cobertura del proyecto hacia municipios con menor concentración industrial pero estratégicamente representativos dentro del nodo lechero.

El mapa permite ver una distribución territorial equilibrada, con una mayor concentración de empresas en municipios con tradición y capacidad instalada para la transformación láctea, complementada por la inclusión de municipios con presencia puntual que fortalecen la representatividad regional del proyecto.

4.2. Resultados de la Etapa 2 – Diagnóstico y caracterización ambiental y productiva

La Etapa 2 permitió consolidar la línea base ambiental y productiva de las diez (10) empresas vinculadas al Nodo Lácteo. Mediante visitas técnicas y levantamiento de información primaria, se caracterizaron los procesos de transformación, se cuantificaron los balances de materia y se identificaron los puntos críticos en el uso del agua.

Este diagnóstico revela la marcada heterogeneidad operativa y productiva del sector; conviven grandes industrias con alta capacidad instalada como Productos Alimenticios El Recreo e Industrias Lácteas El Nogal, junto a empresas de nicho especializado y unidades asociativas. Se destaca particularmente la diversidad en la materia prima: mientras la mayoría procesa leche bovina, la empresa ASOLAC introduce una línea de leche de cabra, aportando datos comparativos

valiosos sobre rendimientos y cargas contaminantes diferenciadas. A pesar de estas diferencias, los desafíos ambientales son transversales a todas las organizaciones.

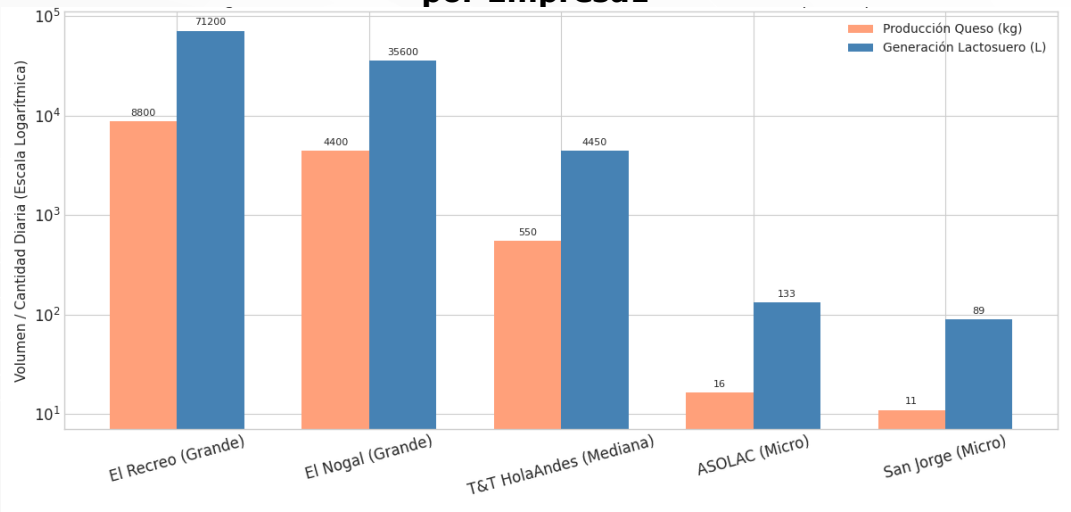
A continuación, se presentan los hallazgos principales soportados en el análisis de datos agregados del nodo.

4.2.1. Caracterización Productiva y Generación de Subproductos

El análisis de los volúmenes productivos confirma que la transformación de leche en queso es un proceso intrínsecamente extractivo, en el cual la mayor fracción de la materia prima no se convierte en producto final, sino que se libera como lactosuero.

Tal como se evidencia en la **Figura 7**, independientemente de la escala productiva desde plantas industriales con capacidades cercanas a 80.000 litros de leche procesados por día hasta microempresas con volúmenes aproximados de 150 litros/día, la generación de lactosuero supera ampliamente la producción de queso, respondiendo a una condición estructural del proceso quesero.

Figura 7. Generación Diaria de Lactosuero vs. Producción de Queso por Empresa1



Fuente: CAEM

[1] Se utiliza escala logarítmica debido a la inmensa diferencia de volumen entre una gran industria y una microempresa, permitiendo visualizar a ASOLAC en el mismo contexto.

De manera técnica, por cada litro de leche procesado, se obtienen en promedio 0,10 a 0,12 kg de queso, mientras que se generan aproximadamente 0,88 a 0,90 litros de lactosuero, lo que explica que este subproducto constituya el flujo dominante del proceso.

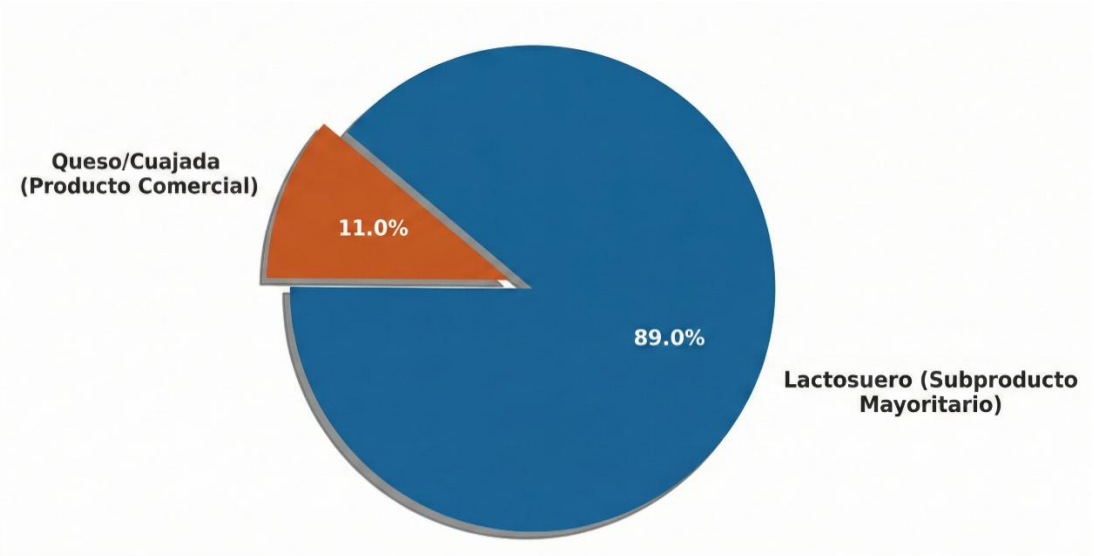
Aplicado a una microempresa como ASOLAC, que procesa aproximadamente 150 litros de leche por día, se generan alrededor de 132 a 135 litros diarios de lactosuero, frente a una producción de apenas 15 a 18 kg diarios de queso. En consecuencia, más del 85 % del volumen del proceso corresponde a lactosuero.

En la gran industria, esta condición representa principalmente un reto asociado al manejo de caudal hidráulico. En microempresas, el riesgo ambiental se relaciona con la alta carga orgánica del lactosuero, lo que hace ambientalmente inviable su disposición en sistemas convencionales como pozos sépticos.

El diagnóstico valida que ASOLAC ha implementado una estrategia funcional de economía circular a microescala, mediante el aprovechamiento controlado del lactosuero como insumo agronómico en terrenos de pastoreo, evitando su vertimiento y cerrando el ciclo de nutrientes dentro del sistema productivo.

Balance de Materia, Ineficiencia Másica Natural La validación técnica arrojó que el rendimiento promedio de conversión es bajo en todo el nodo. La **Figura 8** ilustra este balance de masa.

Figura 8. Distribución Porcentual del Balance de Masa - Promedio del Nodo



Fuente: CAEM

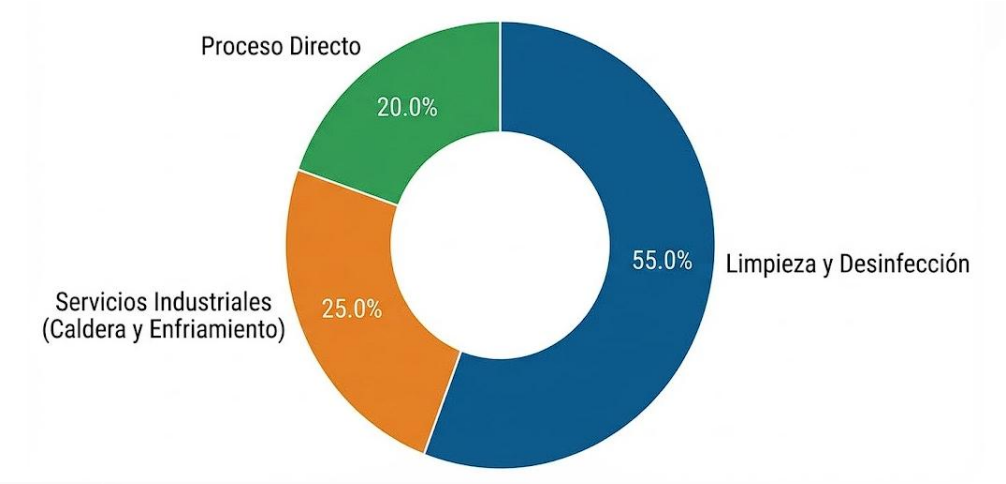
El balance de masa revela que el nodo opera con un rendimiento de conversión del 11%. Esto implica que el 89% de la masa de entrada (leche) fluye a través de la planta solo para convertirse en residuo líquido.

Desde la ingeniería de procesos, esto indica que cualquier esfuerzo por "aumentar la producción" sin gestionar el suero amplificará exponencialmente el problema ambiental. En el caso del nicho caprino de ASOLAC, aunque la leche de cabra posee mayores sólidos totales que la bovina, la mejora en rendimiento es marginal frente a la masiva generación de lactosuero. Por tanto, la sostenibilidad financiera y ambiental de la empresa no reside en vender más queso, sino en valorizar ese 89% restante, tal como ya lo inician con su uso en suelos.

El análisis de los volúmenes de producción evidencia la disparidad en la escala de las empresas participantes. Sin embargo, existe un patrón común transversal: la generación de lactosuero supera significativamente la producción de queso en todas las plantas.

En el desempeño Hídrico, el Costo Oculto de la Inocuidad el perfil de consumo de agua (**Figura 9**) expone una realidad, el agua en la industria láctea es un insumo de limpieza, no de formulación.

Figura 9. Distribución Típica del Consumo de Agua en las Plantas del Nodo



Fuente: CAEM

El diagnóstico identificó una distribución crítica del consumo hídrico, donde las actividades de limpieza y desinfección representan el uso mayoritario (estimado en un 55%). Este comportamiento es característico de plantas con baja tecnificación en sus sistemas de lavado, alejándose del estándar internacional de eficiencia que sitúa el consumo óptimo entre 1.3 y 2.5 litros de agua por litro de leche procesada ([PNUMA], 2002).

Al contrastar los consumos estimados de las microempresas con los estándares internacionales de la guía 'Cleaner Production Assessment in Dairy Processing' ([PNUMA], 2002), se evidencia que el consumo en limpieza supera los rangos de eficiencia recomendados, los cuales sugieren mantener el indicador cercano a 1.5 litros de agua por litro de leche procesada en plantas optimizadas

El consumos y generación de residuos del sector permiten establecer órdenes de magnitud operativas a partir de referencias técnicas del sector. En términos energéticos, se reporta que las queserías pequeñas y medianas presentan consumos totales típicos entre 0,4 y 0,8 kWh por litro de leche procesada, con predominio del componente térmico asociado al calentamiento y pasteurización.

Desde el componente de residuos líquidos, se reconoce que el lactosuero constituye el principal flujo residual del proceso, con una generación aproximada de 8 a 9 litros por cada kilogramo de queso producido, equivalente al 85–95 %

del volumen inicial de la leche, y con cargas orgánicas elevadas (DBO entre 30.000 y 60.000 mg/L), lo que exige una gestión diferenciada frente a los sistemas convencionales de saneamiento (Kushwaha et al., 2020; Stasinakis, 2022).

Adicionalmente, el sector lácteo genera residuos sólidos que deben ser gestionados en el marco del PGIRS, incluyendo residuos orgánicos del proceso (aproximadamente 8–15 kg por tonelada de leche procesada), residuos aprovechables (2–5 kg/ton), residuos ordinarios (1–3 kg/ton) y residuos peligrosos asociados a productos químicos y mantenimiento (0,3–1 kg/ton) (FAO & IDF, 2011; PNUMA, 2002).

Estos valores constituyen referencias sectoriales que permiten contextualizar el desempeño ambiental del nodo y sirven como línea base técnica para la cuantificación específica de consumos y residuos del proyecto en las etapas posteriores del estudio. (**ver Anexo 03. Diagnósticos ambientales y productivos por empresa**)

La información consolidada durante esta etapa constituye la base técnica para la medición de la huella hídrica desarrollada en la Etapa 3.

4.3. Resultados de la Etapa 3 – Medición de huellas hídricas y formulación de Planes de Acción bajo Economía Circular

La Etapa 3 del proyecto se orientó a la medición de la huella hídrica organizacional y a la formulación de planes de acción ambiental, con el propósito de evaluar de manera integral el uso del recurso hídrico asociado a las actividades productivas de las empresas del Nodo Lácteo. Esta etapa permitió cuantificar, desagregar e interpretar los componentes directos e indirectos del uso del agua, así como analizar sus implicaciones ambientales, operativas y sectoriales, bajo un enfoque metodológico estandarizado.

La medición de la huella hídrica se desarrolló a escala organizacional para cada una de las empresas priorizadas del nodo (incluyendo, entre otras, Hato Chips P S.A.S., Asociación San Jorge, Asociación de Productores de Leche de Chocontá, Lácteos El Nogal S.A.S., San Andrés EU, ASOLAC, Las Cuatro Natas, Lácteos El Recreo S.A.S., T&T Holaandes S.A.S. y Milkches S.A.S.), aplicando estrictamente los lineamientos del Manual de Evaluación de la Huella Hídrica de la Water Footprint Network (WFN).

Esta metodología permite desagregar el uso del recurso hídrico en tres componentes: huella azul, huella verde y huella gris, los cuales se analizan a continuación con base en los resultados consolidados:

➢ La huella hídrica azul corresponde al volumen de agua superficial y subterránea consumida de manera directa durante los procesos productivos. En el caso de las empresas del Nodo Lácteo, este componente se asocia principalmente al consumo de agua en planta, utilizado en las etapas de transformación, limpieza y sanitización de equipos, utensilios y áreas de proceso. Si bien este componente representa una proporción menor frente al total de la huella hídrica, adquiere relevancia desde la perspectiva de la gestión operativa, dado que se encuentra directamente bajo control de las empresas y presenta un alto potencial de optimización mediante mejoras técnicas y de gestión.

$$S.S_{azul} = Agua_{evaporada} + Agua_{incorporado} + Agua_{flujo_perdido}$$

Donde Agua incorporada refiere al agua que queda dentro del producto final (ej. quesos frescos) y Agua evaporada a las pérdidas por secado o torres de enfriamiento.

➢ La huella hídrica verde se relaciona con el uso de agua lluvia incorporada en la producción de la materia prima láctea, particularmente en los sistemas de alimentación del ganado. En el contexto del Nodo Lácteo, este componente se manifiesta de manera indirecta en las empresas transformadoras, al estar asociado a la fase agropecuaria de producción de leche cruda.

Los resultados consolidados evidencian un patrón sectorial claro:
el componente verde representa, en promedio, entre el 85 % y el 90 % de la huella hídrica total de las empresas del nodo, con valores que en algunos casos superan el 95 %, como se observa en empresas de menor escala industrial pero altamente dependientes de la cadena primaria.

Este comportamiento confirma que la mayor demanda de agua del sistema lácteo ocurre “aguas arriba”, en los predios ganaderos, como resultado de la evapotranspiración de los pastos y forrajes utilizados en la alimentación animal. En consecuencia, la gestión de la huella hídrica verde trasciende el ámbito exclusivo de la planta industrial y requiere enfoques

de articulación con proveedores de leche, prácticas de manejo agropecuario y adaptación a condiciones agroclimáticas.

El cálculo se realiza sumando la huella hídrica verde de los insumos agropecuarios adquiridos:

$$S.S_{verde,indirecta} = \sum_{yo=1}^{norte} (Volumen_{insumo,i} \times S.S_{verde\ d\ e\ ,\ especí\ fi\ co\ ,\ i})$$

➢ La huella hídrica gris representa el volumen teórico de agua requerido para asimilar la carga contaminante generada por los vertimientos asociados a los procesos productivos, hasta alcanzar condiciones aceptables de calidad en el cuerpo receptor. Este componente no corresponde a un consumo real de agua, sino a un indicador del impacto potencial por contaminación.

En las empresas del Nodo Lácteo, la huella gris se encuentra estrechamente vinculada al manejo del lactosuero y su eventual mezcla con aguas de lavado, debido a la elevada carga orgánica de este subproducto. Los resultados muestran que la huella gris representa, en promedio, entre el 8 % y el 12 % de la huella hídrica total, superando de manera consistente a la huella azul.

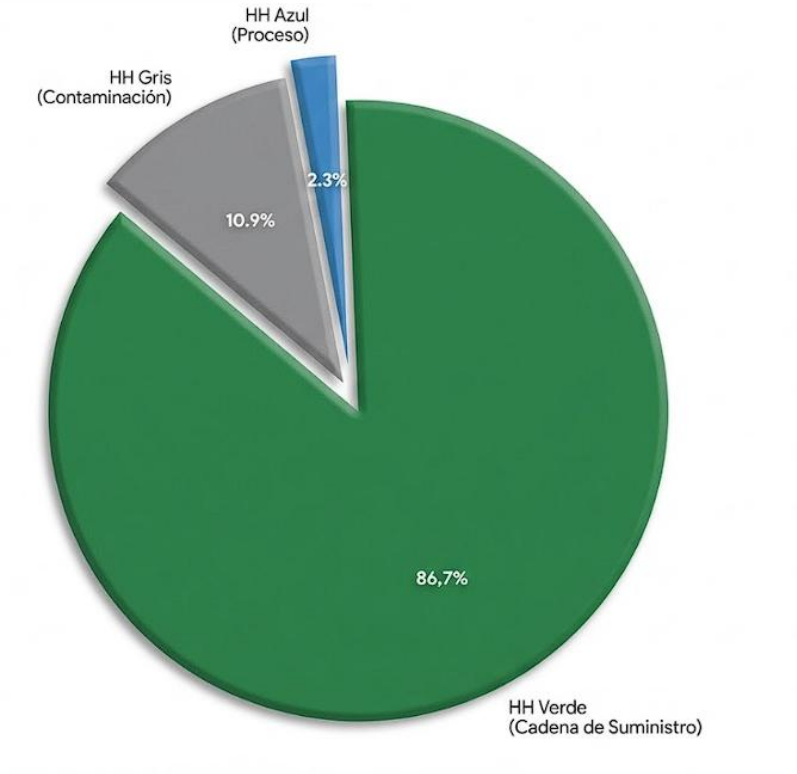
La ecuación aplicada es:

$$S.S_{gris} = \frac{L}{do_{máximo} - do_{no\ t}}$$

La consolidación de los datos de medición para las empresas del Nodo Lácteo revela un patrón sectorial claro, caracterizado por la predominancia del componente indirecto sobre el directo. A continuación, se presentan los datos relevantes y su representación gráfica.

Hallazgo 1: Como se observa en la Figura 10, la huella verde constituye el componente dominante de la huella hídrica total del Nodo Lácteo, confirmando el carácter agrodependiente del sector.

Figura 10. Predominancia de la Huella Verde (Cadena de Suministro)



Fuente: CAEM

Hallazgo 2: Los resultados consolidados evidencian que la huella hídrica gris representa, en promedio, entre el 8 % y el 12 % de la huella hídrica total del Nodo Lácteo, superando de manera consistente la participación de la huella hídrica azul, la cual se sitúa generalmente por debajo del 3 %.

Este resultado indica que, desde una perspectiva ambiental, el impacto asociado a la contaminación del recurso hídrico es más significativo que el consumo físico de agua en planta. En otras palabras, aunque las empresas utilizan volúmenes relativamente bajos de agua potable en sus procesos, la carga orgánica de los vertimientos, asociada principalmente al manejo del lactosuero y a su eventual

mezcla con aguas de lavado, genera una presión ambiental mayor sobre el recurso hídrico.

La huella gris no representa agua realmente consumida, sino el volumen teórico de agua necesario para diluir los contaminantes hasta cumplir con los estándares de calidad, lo que la convierte en un indicador crítico para la gestión de vertimientos. En este contexto, la reducción de impactos hídricos en el Nodo Lácteo depende en mayor medida de mejoras en el manejo y tratamiento de efluentes, que de reducciones marginales en el consumo directo de agua potable.

La **Tabla 2** presenta un resumen de los indicadores promedio estimados para el Nodo Lácteo, los cuales reflejan de manera consistente la estructura de la huella hídrica del sector.

Tabla 2. Resumen de Indicadores Promedio (Estimado Nodo Lácteo)

COMPONENTE	TIPO DE IMPACTO	PARTICIPACIÓN PROMEDIO	FOCO DE GESTIÓN
HUELLA VERDE	Indirecto (oferta hídrica)	~87–90 %	Articulación con proveedores de leche
HUELLA AZUL	Directo (consumo en planta)	~1–3 %	Eficiencia en lavado y sanitización
HUELLA GRIS	Directo (contaminación)	~8–12 %	Tratamiento de aguas y gestión de sueros

Fuente: CAEM

Estos resultados evidencian que, aunque la huella azul es volumétricamente pequeña, su gestión resulta estratégica por el control directo que tienen las empresas sobre este componente y por su impacto en los costos operativos. En contraste, la huella verde y la huella gris requieren enfoques de gestión diferenciados, que integren tanto acciones internas como medidas de articulación externa.

El análisis individual por empresa (**ver Anexo 04**) muestra variaciones relacionadas con el volumen de producción y la eficiencia de sus sistemas de tratamiento, pero todas mantienen la tendencia estructural donde

$$HH_{verde} \gg HH_{gris} > HH_{azul}.$$

Con el fin de representar de manera sintética la lógica técnica aplicada en esta etapa del proyecto, la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** p resenta el enfoque progresivo utilizado para la medición de la huella hídrica, el análisis de resultados y la formulación de planes de acción ambiental, como parte de un proceso integrado de gestión del recurso hídrico.

Figura 11. Enfoque progresivo para la medición de la huella hídrica y la formulación de planes de acción ambiental



Fuente: CAEM

La figura ilustra la secuencia técnica desarrollada durante la Etapa 3, iniciando con la medición de las huellas hídricas empresariales, que permite cuantificar y desagregar el uso del recurso hídrico en sus componentes azul, verde y gris. A partir de estos resultados, se realizó un análisis orientado a identificar patrones de desempeño hídrico, componentes críticos del proceso productivo y oportunidades de mejora comunes entre las empresas del Nodo Lácteo. Con base en dicho análisis, se formularon planes de acción ambiental específicos,

ajustados a las características productivas, la escala operativa y el contexto territorial de cada organización.

4.3.1. Estrategias de Economía Circular y Formulación de Planes de Acción Ambiental

Como resultado de este proceso, y tras el análisis de las huellas hídricas, se formularon planes de acción ambiental individuales, orientados a mejorar el desempeño hídrico empresarial y a reducir los impactos asociados al uso del recurso. De manera transversal, estos planes incorporan líneas de intervención comunes, entre las que se destacan la optimización del uso del agua en procesos operativos, la implementación de sistemas de medición y control del consumo hídrico, y fundamentalmente, el aprovechamiento del lactosuero bajo principios de economía circular, priorizando su valorización como subproducto frente a su tratamiento como vertimiento.

La consolidación de los resultados de la Etapa 3 permitió identificar patrones sectoriales relevantes y oportunidades de mejora compartidas entre las empresas del Nodo Lácteo, aportando insumos técnicos sólidos para la toma de decisiones. Los resultados individuales de la medición de las huellas hídricas y los planes de acción empresariales detallados se presentan en los documentos técnicos específicos por empresa, los cuales hacen parte de los anexos del presente informe.

Los resultados de esta etapa confirman la pertinencia del enfoque metodológico aplicado y evidencian que la medición de la huella hídrica, integrada con el diagnóstico ambiental y la formulación de planes de acción, constituye una herramienta clave para orientar la gestión sostenible del agua en el sector lácteo a nivel territorial (**Ver Anexo 05. Planes de Accion**)

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

El análisis de resultados permite interpretar de manera integrada la información obtenida durante la ejecución del proyecto "Caracterización de la Huella Hídrica – Nodo Lácteo de Cundinamarca", identificando patrones, relaciones causales y factores determinantes del desempeño hídrico desde una perspectiva sectorial. Este análisis articula los hallazgos del diagnóstico productivo (particularmente la eficiencia másica del proceso quesero) con la cuantificación de las huellas

hídricas (verde, azul y gris), permitiendo comprender el origen real de los impactos y las oportunidades de gestión.

1. Los resultados ratifican que el desempeño hídrico de las empresas del Nodo no es una variable aislada ni atribuible únicamente al consumo de agua en planta, sino una consecuencia directa de dos condiciones estructurales del sector: la ineficiencia másica natural del proceso quesero, donde aproximadamente el 89 % de la materia prima se libera como lactosuero, y
2. la alta dependencia de la cadena de suministro agropecuaria, responsable del predominio del componente indirecto de la huella hídrica.

A partir de esta lectura integrada, se identifican los siguientes factores determinantes, validados por los datos del estudio.

5.1. Factores Estructurales: La Carga de la Cadena de Suministro

El predominio absoluto del componente indirecto, particularmente de la huella hídrica verde, con una participación promedio cercana al 86,7 % de la huella hídrica total, confirma que la principal presión sobre el recurso hídrico es estructural y se localiza "aguas arriba" del proceso industrial.

Esto implica que el impacto hídrico asociado a un litro de leche procesada en el Nodo Lácteo de Cundinamarca se define mayoritariamente en el predio ganadero, a través de la evapotranspiración de los pastos y forrajes utilizados en la alimentación animal, y no en la planta de transformación. En consecuencia, las acciones exclusivas al interior de la fábrica, aunque necesarias, no son suficientes por sí solas para modificar de manera significativa la huella hídrica total del sistema.

Desde esta perspectiva, la gestión ambiental empresarial debe trascender los límites físicos de la planta, requiriendo estrategias de articulación con los proveedores de leche cruda, tales como buenas prácticas ganaderas, manejo de praderas y esquemas de corresponsabilidad hídrica en la cadena de suministro.

5.2. Factores Operativos: La Paradoja de la Gestión Interna

Aunque los componentes Huella Azul (generalmente <3 %) y Huella Gris (≈8–12 %) representan una fracción menor del volumen total de la huella hídrica, el

análisis demuestra que estos constituyen el foco crítico de gestión empresarial, por dos razones fundamentales:

(i) control operativo inmediato.
(ii) riesgo normativo y ambiental directo.

5.2.1. Huella azul: ineficiencia en limpieza y sanitización

El diagnóstico productivo evidenció que aproximadamente el 55 % del consumo de agua en planta se destina a actividades de limpieza y desinfección. Al contrastar este resultado con los indicadores internacionales de eficiencia hídrica (1,5–2,5 L de agua por litro de leche procesada), se identifican en varias empresas consumos superiores a los rangos óptimos, lo que confirma la existencia de un margen significativo de optimización.

Este hallazgo indica que la huella azul, aunque volumétricamente baja frente al total, representa una oportunidad inmediata de mejora, tanto desde el punto de vista ambiental como económico, mediante la implementación de tecnologías de lavado más eficientes, buenas prácticas operativas y recuperación de aguas de proceso.

5.2.2. Huella gris: el reto del lactosuero y los vertimientos

La huella hídrica gris supera sistemáticamente a la huella azul, lo que evidencia que el principal impacto directo de las plantas no está asociado a cuánto agua consumen, sino a cuánta carga contaminante liberan al sistema hídrico.

Este comportamiento se explica por la elevada carga orgánica del lactosuero y su eventual mezcla con aguas de lavado. Desde el punto de vista ambiental y normativo, la gestión de vertimientos se convierte así en el factor más sensible para la sostenibilidad legal y ambiental de las empresas, dado que pequeñas pérdidas de producto en el drenaje generan incrementos desproporcionados de la huella gris.

5.3. Dinámica del Lactosuero: De Residuo a Subproducto

Los balances de masa confirmaron que por cada kilogramo de queso producido se generan aproximadamente 8 a 9 litros de lactosuero, lo que ratifica que este subproducto constituye el flujo dominante del proceso quesero.

No obstante, el análisis cualitativo del Nodo arroja un hallazgo positivo de adaptación sectorial. A diferencia de la gran industria, donde el lactosuero representa un problema hidráulico masivo que exige infraestructuras complejas, las empresas del Nodo especialmente las de escala media y asociativa— han adoptado esquemas de economía circular in situ.
En la mayoría de los casos evaluados, el lactosuero no se gestiona predominantemente como vertimiento directo, sino que se valoriza mediante:

- alimentación animal (porcicultura complementaria),
- aplicación controlada como enmienda orgánica para suelos, recirculando nutrientes hacia los sistemas de pastoreo.

Estas prácticas reducen de manera significativa el impacto potencial sobre las microcuencas y sistemas hídricos locales asociados a las áreas de influencia del Nodo Lácteo, las cuales en su mayoría drenan hacia la cuenca del río Bogotá. Este enfoque demuestra que, para la pequeña y mediana industria, la solución ambientalmente más eficiente no es necesariamente la implementación de infraestructuras complejas de tratamiento, sino la segregación en la fuente y el aprovechamiento del lactosuero bajo principios de economía circular.

Con el fin de facilitar la comprensión de los principales hallazgos, la **Tabla 3** presenta una visión estructurada de los resultados, vinculando cada dato técnico con su implicación de gestión.

Tabla 3. Resultados del desempeño hídrico del Nodo Lácteo

COMPONENTE ANALIZADO	RESULTADO TÉCNICO VALIDADO	IMPLICACIÓN ESTRATÉGICA
HUELLA HÍDRICA TOTAL	Dominancia indirecta (~87 %). Impacto concentrado en la fase agrícola.	La sostenibilidad hídrica depende de la articulación con la cadena de suministro ganadera.
HUELLA AZUL (DIRECTA)	Bajo volumen (<3 %), alto costo operativo. 55 % del consumo asociado a limpieza.	Oportunidad inmediata de ahorro económico mediante eficiencia en lavado y sanitización.
HUELLA GRIS	Impacto superior al consumo (~8–12 %). Proporcional a pérdidas de producto en efluentes.	Prioridad ambiental: segregación y manejo del lactosuero para reducir carga contaminante.

BALANCE DE MASA	Ineficiencia natural (rendimiento ~11 %). 89 % de la materia prima es subproducto líquido.	La viabilidad del negocio exige valorizar el lactosuero bajo principios de economía circular.
VARIABILIDAD	Alta heterogeneidad de escala (150 L/día a 80.000 L/día).	Las soluciones deben adaptarse a la escala: biológicas/agropecuarias vs. ingeniería pesada.

Fuente: Elaborado a partir de los resultados consolidados del proyecto – CAEM.

La información consolidada permite establecer que, aunque la huella hídrica total del Nodo Lácteo es predominantemente un fenómeno agroclimático, la competitividad empresarial y el cumplimiento ambiental se definen en la gestión eficiente de la huella azul (costos operativos) y, especialmente, de la huella gris (riesgo ambiental y normativo).

Este análisis confirma que las decisiones estratégicas más efectivas no se concentran únicamente en reducir consumos, sino en evitar la pérdida de producto hacia el efluente, consolidando el enfoque de economía circular como eje central de la sostenibilidad del sector.

La Figura 12 resume el modelo conceptual derivado de estos resultados, proponiendo una gestión que articula la eficiencia interna con la responsabilidad territorial.

Figura 12. Ejes de análisis del uso del agua en el sector lácteo



Fuente: CAEM

El esquema valida que la mejora del desempeño hídrico no depende de una sola tecnología, sino de la combinación de:

1. Cultura de medición (control de fugas y consumos).
2. Tecnología adecuada a la escala (lavado a presión, segregación de redes).
3. Valorización de residuos (transformar la carga contaminante en insumo productivo).

Este análisis cierra la brecha entre el diagnóstico (el problema identificado) y los planes de acción formulados (la solución propuesta), demostrando que la intervención en el Nodo Lácteo cuenta con una base técnica robusta para reducir la presión sobre las fuentes hídricas de Cundinamarca.

6. CONCLUSIONES

La ejecución del proyecto "Caracterización de la Huella Hídrica – Nodo Lácteo de Cundinamarca" permitió validar un modelo de gestión hídrica coherente con la realidad productiva de la pequeña y mediana industria láctea, a partir de la integración del diagnóstico productivo, la medición estandarizada de huella hídrica bajo la metodología Water Footprint Network (WFN) y la formulación de planes de acción ambiental.

Con base en los resultados obtenidos, se establecen las siguientes conclusiones técnicas y estratégicas:

1. Los resultados confirman que el desempeño hídrico del Nodo Lácteo está estructuralmente condicionado por la cadena de suministro agropecuaria. El predominio del componente indirecto, con una Huella Verde superior al 86 % de la huella hídrica total, evidencia que la mayor demanda de agua se genera en la fase agrícola, asociada a la evapotranspiración de pastos y forrajes utilizados en la producción de leche cruda. En consecuencia, las empresas presentan un control adecuado del consumo directo en planta, pero no pueden reducir de manera significativa su huella hídrica total sin acciones articuladas con los proveedores de leche.

2. Desde el punto de vista operativo, el análisis demuestra que, aunque la Huella Azul representa menos del 3 % del total, constituye un componente estratégico de gestión. El hecho de que aproximadamente el 55 % del

consumo de agua en planta se destine a actividades de limpieza y desinfección evidencia ineficiencias operativas frente a estándares internacionales, lo que se traduce en oportunidades inmediatas de reducción de consumo y de costos asociados. Esto indica que el sector aún no alcanza niveles óptimos de eficiencia hídrica interna y requiere fortalecer la tecnificación y el control del uso del agua en los procesos de lavado.

3. El componente más sensible desde la perspectiva ambiental y normativa es la Huella Gris, la cual representa entre el 8 % y el 12 % de la huella hídrica total, superando consistentemente a la Huella Azul. Este resultado demuestra que el principal impacto directo del sector no está asociado al volumen de agua consumido, sino a la carga contaminante de los vertimientos, especialmente aquella relacionada con pérdidas de leche y lactosuero en el drenaje. La gestión inadecuada de estos flujos representa el mayor riesgo de incumplimiento ambiental para las empresas del Nodo.

4. Desde la perspectiva ambiental y normativa, el parámetro más sensible corresponde a la huella hídrica gris, específicamente la carga orgánica del vertimiento, representada por DBO y DQO, asociada a pérdidas de leche y lactosuero en el drenaje. Aunque el volumen descargado es relativamente bajo, la elevada concentración de estos parámetros provoca que la huella gris represente entre el 8 % y el 12 % de la huella hídrica total, constituyéndose en el principal riesgo de incumplimiento ambiental del sector.

5. El balance de masa del proceso quesero confirmó una ineficiencia másica inherente, con un rendimiento promedio cercano al 11 %, lo que implica que alrededor del 89 % de la materia prima se transforma en lactosuero. Frente a esta condición estructural, el estudio evidenció una respuesta positiva del sector, particularmente en la pequeña y mediana industria, donde el lactosuero no se gestiona predominantemente como vertimiento, sino como subproducto aprovechable.

6. Las prácticas de valorización del lactosuero mediante alimentación animal y aplicación controlada en suelos han permitido mitigar de manera efectiva la carga contaminante potencial, evitando incrementos significativos de la Huella Gris. Este hallazgo confirma que, para la escala Pyme, la solución ambientalmente más eficiente no es el tratamiento convencional del agua mediante infraestructuras complejas, sino la segregación en la fuente y la economía circular, ajustada a las condiciones productivas y territoriales.

7. La formulación de los planes de acción ambiental evidenció una alta homogeneidad en las necesidades del sector, independientemente del tamaño de las empresas. Las medidas priorizadas se concentran en la optimización del lavado, la segregación de corrientes, la medición continua del consumo de agua y el control del manejo del lactosuero, lo que valida la pertinencia de enfoques sectoriales y asociativos frente a intervenciones aisladas.

Los resultados demuestran que el impacto hídrico del Nodo Lácteo de Cundinamarca no está determinado por el volumen de agua consumida, sino por los parámetros de eficiencia de proceso y carga contaminante del efluente. La sostenibilidad ambiental y el cumplimiento normativo del sector dependen de intervenir estos parámetros críticos, consolidando un modelo de gestión hídrica basado en eficiencia operativa y economía circular.

7. ANEXOS

- Anexo 01. Documento de convocatoria y lineamientos de vinculación de empresas.
- Anexo 02. Matriz de priorización y selección de empresas del Nodo Lácteo.
- Anexo 03. Diagnósticos ambientales y productivos empresariales.
- Anexo 04. Documentos técnicos de medición de huella hídrica empresarial - Planes de acción ambiental formulados por empresa
- Anexo 05. Soportes técnicos complementarios y registros de campo.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ✓ FAO. (2011). Guide to good dairy farming practice. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- ✓ Hoekstra, A. Y., Chapagain, A. K., Aldaya, M. M., & Mekonnen, M. M. (2011). The water footprint assessment manual: Setting the global standard. Earthscan.

- ✓ Mekonnen, M. M., & Hoekstra, A. Y. (2012). A global assessment of the water footprint of farm animal products. Ecosystems, 15(3), 401–415.
- ✓ Prazeres, A. R., Carvalho, F., & Rivas, J. (2012). Cheese whey management: A review. Journal of Environmental Management, 110, 48–68.
- ✓ Walstra, P., Wouters, J. T. M., & Geurts, T. J. (2006). Dairy science and technology (2nd ed.). CRC Press.
- ✓ AGROBIT. (16 de Mayo de 2008). Composición de la leche y valor nutritivo.
- ✓ ARÉVALO URIBE, D. (2012). Una mirada a la agricultura de Colombia desde su Huella Hídrica.
- ✓ AREVALO, J., VELEZ, J., & TAMAYO, J. (2013). Uso efiiciente del agua para el cultivo de rosa cv. Freedom bajo invernadero. Revista Brasilera de Ingeniería agrícola y ambiental.