

MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA

PROTOCOLO DE TRANSPORTE Y MOVILIZACIÓN

Sistemas Fotovoltaicos – Programa Colombia Solar

Análisis de riesgos y medidas para la gestión segura de la cadena logística

Componente Metodológico – Programa Colombia Solar

Versión 3 Mayo de 2026

Tabla de contenido

Presentación	5
Capítulo 1. Los Sistemas Fotovoltaicos: Caracterización Técnica	6
1.1 Descripción General y Funcionamiento del Sistema	6
1.2 Subsistemas Constitutivos y sus Implicaciones para el Transporte	6
1.3 Clasificación de Materiales según Nivel de Peligrosidad	7
1.4 Características que Condicionan el Transporte	7
Capítulo 2. Marco Normativo Integral del Ciclo de Vida de los Sistemas Fotovoltaicos	8
2.1 Normativa Internacional Aplicable al Transporte	8
2.2 Normativa Nacional por Fase del Ciclo de Vida	8
2.2.1 Transporte y movilización	8
2.2.2 Instalación y seguridad eléctrica	9
2.2.3 Operación, seguimiento y sostenibilidad	9
2.2.4 Gestión de residuos y disposición final	10
2.3 Vacíos Normativos y Retos para el Programa	10
Capítulo 3. Cadena Logística y Tipologías de Transporte en Colombia	11
3.1 Etapas de la Cadena Logística	11
3.2 Tipologías de Vía y sus Condicionantes Operativos	12
Capítulo 4. Análisis Integrado de Riesgos y Medidas de Gestión	13
4.1 Marco General de Gestión del Riesgo	13
4.2 Medidas Transversales Obligatorias (todas las tipologías).....	13
Planeación de la operación	13
Embalaje y acondicionamiento diferenciado por subsistema	14
Cargue, estiba y aseguramiento	14
Talento humano y EPP	14
4.3 Análisis de Riesgos y Medidas por Tipología de Vía.....	14
Capítulo 5. Gestión Integral de RAEE y RESPEL en la Cadena Logística	16
5.1 Marco Conceptual y Normativo	16
5.2 Clasificación de Residuos Fotovoltaicos	17
5.3 Procedimientos de Almacenamiento Temporal en Campo	17
5.4 Obligaciones de los Actores de la Cadena Logística	18
5.5 Síntesis: Ciclo Completo de Gestión de Residuos Fotovoltaicos	19

Referencias y Marco Normativo	20
Normativa colombiana.....	20
Normativa y estándares internacionales.....	20

Lista de tablas

Tabla 1. Subsistemas constitutivos del sistema fotovoltaico y sus implicaciones para el transporte	6
Tabla 2. Clasificación de materiales según nivel de peligrosidad	7
Tabla 3. Normativa internacional aplicable al transporte de componentes fotovoltaicos.....	8
Tabla 4. Normativa nacional aplicable al transporte y movilización.....	9
Tabla 5. Normativa nacional aplicable a la instalación y seguridad eléctrica	9
Tabla 6. Normativa nacional aplicable a la operación, seguimiento y sostenibilidad	9
Tabla 7. Normativa nacional aplicable a la gestión de residuos y disposición final.....	10
Tabla 8. Etapas de la cadena logística del Programa Colombia Solar	11
Tabla 9. Tipologías de vía y sus condicionantes operativos.....	12
Tabla 10. Análisis de riesgos y medidas de gestión por tipología de vía	14
Tabla 11. Clasificación de residuos fotovoltaicos	17
Tabla 12. Obligaciones de los actores de la cadena logística en gestión de RAEE y RESPEL	18

Presentación

El presente documento constituye el Protocolo de Transporte y Movilización del Programa Colombia Solar, iniciativa estratégica del Ministerio de Minas y Energía orientada a la implementación masiva de sistemas solares fotovoltaicos (SISFV) en hogares de estratos 1, 2 y 3 en todo el territorio nacional. Su propósito es establecer los lineamientos técnicos, operativos y normativos que deben regir la movilización de los componentes de estos sistemas, desde su importación hasta la instalación en las comunidades beneficiarias, así como la gestión de los residuos generados al final de su ciclo de vida.

El transporte de sistemas fotovoltaicos en Colombia no es una actividad logística convencional. La diversidad territorial del país, la heterogeneidad de la infraestructura vial y la complejidad de los corredores de acceso a las zonas rurales generan un entorno de alta exigencia en el que las decisiones de embalaje, manipulación, ruta y condiciones de transporte tienen consecuencias directas sobre la integridad de los equipos, la seguridad del personal, el impacto ambiental y la sostenibilidad del programa.

El protocolo adopta un enfoque de ciclo de vida integral: analiza los riesgos desde la importación de los equipos hasta su disposición final, reconociendo que la gestión logística responsable exige comprender y actuar sobre la cadena completa. A diferencia de enfoques parciales, este documento articula el análisis técnico de los sistemas, el marco normativo aplicable a todas las fases del ciclo de vida, la caracterización de las tipologías de transporte y un sistema integrado de gestión de riesgos y medidas, evitando la repetición de contenidos y favoreciendo la consulta operativa.

El protocolo se organiza en cinco capítulos:

- Capítulo 1: Caracterización técnica de los sistemas fotovoltaicos y sus subsistemas.
- Capítulo 2: Marco normativo integral (transporte, instalación, operación y disposición final).
- Capítulo 3: Cadena logística y tipologías de transporte en Colombia.
- Capítulo 4: Análisis integrado de riesgos y medidas de gestión por tipología de vía.
- Capítulo 5: Gestión integral de RAEE y RESPEL en la cadena logística.

Capítulo 1. Los Sistemas Fotovoltaicos: Caracterización Técnica

La gestión logística responsable de los sistemas fotovoltaicos requiere una comprensión integral de su naturaleza técnica. A diferencia de la carga industrial estándar, estos sistemas combinan alta fragilidad física, sensibilidad ambiental, diversidad de materiales y, en algunos componentes, condición de mercancía peligrosa. Este capítulo establece las bases conceptuales y técnicas que fundamentan las decisiones operativas desarrolladas en los capítulos siguientes.

1.1 Descripción General y Funcionamiento del Sistema

Un sistema fotovoltaico es una arquitectura funcional integrada que convierte la radiación solar en energía eléctrica utilizable mediante el efecto fotovoltaico. Su desempeño operativo depende de la interacción precisa entre todos sus componentes: la falla o degradación de cualquiera de ellos compromete el conjunto. Esta naturaleza sistémica implica que el transporte no puede gestionarse componente a componente de forma aislada, sino como el traslado de partes de un sistema cuya integridad debe preservarse en cada eslabón de la cadena logística.

El proceso de generación eléctrica se desarrolla como una cadena de transformaciones secuenciales: la radiación solar incide sobre las celdas fotovoltaicas, generando corriente continua que fluye hacia el inversor para su conversión a corriente alterna. La energía resultante puede consumirse en el punto de generación, almacenarse en baterías o inyectarse a la red. En sistemas aislados o híbridos, las baterías son el componente de mayor complejidad regulatoria y de gestión de riesgo durante el transporte.

1.2 Subsistemas Constitutivos y sus Implicaciones para el Transporte

Para efectos del presente protocolo, el sistema fotovoltaico se desagrega en seis subsistemas con características físicas, de fragilidad y requerimientos de manejo diferenciados. Esta desagregación es el criterio organizador de los procedimientos de embalaje, transporte y recepción:

Tabla 1. Subsistemas constitutivos del sistema fotovoltaico y sus implicaciones para el transporte

Subsistema	Componentes principales	Vulnerabilidad crítica	Condición regulatoria
Generación	Módulos fotovoltaicos (celdas de silicio, vidrio templado, encapsulante EVA, backsheet)	Microfracturas invisibles en celdas por vibración; degradación de EVA por calor y UV	No peligroso; requerimiento IEC 61215/61730
Conversión y control	Inversores, reguladores de carga, controladores, protecciones eléctricas	Componentes electrónicos sensibles a impactos, humedad y variaciones térmicas	No peligroso; requerimientos RETIE
Almacenamiento energético	Baterías LiFePO ₄ / ion-litio, BMS (Battery Management System)	Fuga térmica (thermal runaway) ante daño físico o cortocircuito	PELIGROSO – Clase 9, UN 3480/UN 3481; Decreto 1609/2002
Conducción y protección eléctrica	Cableado DC/AC, conectores MC4, cajas de combinación, SPD, puesta a tierra	Deformación de conectores; degradación de aislamientos por temperatura extrema	No peligroso; requerimientos RETIE

Subsistema	Componentes principales	Vulnerabilidad crítica	Condición regulatoria
Estructural	Estructuras de soporte (Al/acero galvanizado), trackers, tornillería, anclajes	Deformación geométrica por apilamiento incorrecto; pérdida de piezas de fijación	No peligroso
BOS (Balance of System)	Tableros eléctricos, sistemas SCADA, infraestructura civil (cimentaciones, drenajes)	Arcos eléctricos internos por impacto en barras o interruptores de tableros	No peligroso; requerimientos RETIE

1.3 Clasificación de Materiales según Nivel de Peligrosidad

La diversidad de materiales de los sistemas fotovoltaicos exige una clasificación funcional con implicaciones directas sobre embalaje, señalización, documentación y capacitación del personal logístico:

Tabla 2. Clasificación de materiales según nivel de peligrosidad

Categoría	Materiales	Riesgo principal	Marco normativo
No peligrosos	Vidrio templado, aluminio, silicio sólido, acero galvanizado	Daño físico (fractura, deformación) sin riesgo tóxico o ambiental directo	Estándares de embalaje IEC / ISTA
Potencialmente peligrosos	Polímeros EVA y backsheet, componentes electrónicos complejos	Emisión de gases en combustión; degradación acelerada por UV/temperatura extrema	Precauciones de almacenamiento; control térmico
Peligrosos	Baterías ion-litio; metales pesados en módulos CdTe/CIGS (Cd, Pb); aceites dieléctricos en transformadores	Fuga térmica, toxicidad sistémica, contaminación ambiental en caso de ruptura	Decreto 1609/2002; Decreto 4741/2005; Ley 1252/2008; IMDG Clase 9

1.4 Características que Condicionan el Transporte

Tres características técnicas de los sistemas fotovoltaicos son determinantes para el diseño del protocolo:

- Naturaleza acumulativa del daño: las microfracturas en módulos y los daños en componentes electrónicos frecuentemente no son detectables en la inspección visual de recepción, pero se manifiestan como pérdidas silenciosas de rendimiento semanas o meses después de la puesta en marcha. Esta condición hace insuficiente la inspección visual como único mecanismo de control y refuerza la obligatoriedad de los estándares de embalaje desde el origen.
- Diversidad de requerimientos en un mismo envío: cada subsistema demanda condiciones diferenciadas de amortiguación, control de humedad, orientación de carga y señalización. Un tratamiento homogéneo de la carga introduce riesgos innecesarios.

- Condición variable de mercancía peligrosa: las baterías de ion-litio activan obligaciones regulatorias específicas (embalaje certificado UN, documentación, señalización vehicular, capacitación del personal) que aplican a todo el trayecto desde la importación hasta la instalación y el retorno al cierre de vida útil.

Capítulo 2. Marco Normativo Integral del Ciclo de Vida de los Sistemas Fotovoltaicos

Los sistemas fotovoltaicos están sujetos a un conjunto articulado de disposiciones normativas que regulan su transporte, instalación, operación y disposición final. La adecuada comprensión de este marco es condición necesaria para que el protocolo cumpla su propósito: las decisiones operativas deben estar respaldadas por el cumplimiento de las obligaciones que el ordenamiento jurídico impone a los actores de la cadena logística y del programa.

2.1 Normativa Internacional Aplicable al Transporte

El transporte internacional de componentes fotovoltaicos —principalmente por vía marítima desde Asia— se regula por los siguientes instrumentos:

Tabla 3. Normativa internacional aplicable al transporte de componentes fotovoltaicos

Instrumento	Alcance y aplicación al programa
Código IMDG (OMI)	Transporte marítimo de mercancías peligrosas; clasificación, embalaje, estiba y documentación de baterías ion-litio (Clase 9)
ONU – Recomendaciones modelo (23.ª ed., 2023)	Base normativa global; Manual de pruebas Sección 38.3 para baterías UN 3480 y UN 3481
IATA DGR – Reglamentación de mercancías peligrosas	Transporte aéreo de baterías de litio: SOC ≤ 30 %, embalajes específicos
UNECE – ADR/RID/ADN	Transporte terrestre y multimodal internacional de mercancías peligrosas
IEC 61215 / 61730 / 62759-1	Calidad, resistencia mecánica y comportamiento de módulos fotovoltaicos en transporte y operación
Convenio de Basilea (PNUMA)	Movimiento transfronterizo de residuos peligrosos, incluyendo RAEE y baterías
Reglamento (UE) 2023/1542	Sostenibilidad, trazabilidad y gestión del ciclo de vida de baterías

2.2 Normativa Nacional por Fase del Ciclo de Vida

2.2.1 Transporte y movilización

Tabla 4. Normativa nacional aplicable al transporte y movilización

Norma	Aplicación al transporte de sistemas fotovoltaicos
Decreto 1609 de 2002 (compilado en D. 1079/2015)	Manejo y transporte terrestre de mercancías peligrosas: señalización vehicular, documentación (tarjeta de emergencia, manifiesto), capacitación del personal y condiciones técnicas de los vehículos. Aplica obligatoriamente al transporte de baterías.
Decreto 1079 de 2015	Decreto Único Reglamentario del Sector Transporte; regula condiciones generales para la prestación del servicio de transporte de carga.
Resolución 20223040045515 de 2022 (RNDC)	Registro Nacional de Despachos de Carga; garantiza la trazabilidad de movimientos de carga en el territorio nacional.
NTC 3972 – ICONTEC	Transporte de mercancías peligrosas Clase 9: requisitos de embalaje, etiquetado y señalización para el transporte terrestre de baterías.
Decreto 1072 de 2015	Decreto Único Reglamentario del Sector Trabajo; establece obligaciones de capacitación, EPP y gestión de riesgos laborales en operaciones de transporte y cargue/descargue.

2.2.2 Instalación y seguridad eléctrica

Tabla 5. Normativa nacional aplicable a la instalación y seguridad eléctrica

Norma	Aplicación a la instalación de SISFV
RETIE – Resolución 40117 de 2024	Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas: requisitos de seguridad para la instalación de SISFV, certificaciones obligatorias, condiciones de puesta a tierra, protecciones eléctricas y distancias de seguridad. Obligatorio para la habilitación operativa de los sistemas instalados en Colombia.
Ley 1715 de 2014	Marco legal para la integración de energías renovables no convencionales; define condiciones de conexión a la red, incentivos tributarios y obligaciones técnicas para proyectos FNCE. Aplica a los sistemas del Programa Colombia Solar que puedan conectarse a la red.
Resolución CREG 030 de 2018 y concordantes	Regula la conexión de pequeños generadores a la red eléctrica (FNCE de hasta 1 MW); establece condiciones técnicas, medición y facturación neta. Aplica a sistemas con posibilidad de excedentes.
Resolución UPME 40591 de 2017	Formulario de autogeneración a pequeña escala; requisitos de reporte y registro ante la UPME para sistemas instalados en el marco del programa.
NTC 2050 – ICONTEC	Código Eléctrico Colombiano; establece los requerimientos técnicos mínimos para instalaciones eléctricas de baja tensión, incluyendo sistemas fotovoltaicos residenciales.

2.2.3 Operación, seguimiento y sostenibilidad

Tabla 6. Normativa nacional aplicable a la operación, seguimiento y sostenibilidad

Norma	Aplicación a la operación y seguimiento
Decreto 1073 de 2015	Decreto Único Reglamentario del Sector Energético; compila disposiciones sobre planificación energética, operación del sistema y obligaciones de los actores del sector.

Norma	Aplicación a la operación y seguimiento
Ley 2099 de 2021	Ley de Transición Energética: establece metas de penetración de FNCE, mandatos de eficiencia energética y disposiciones sobre almacenamiento. Define el marco de sostenibilidad operacional del programa.
Resolución CREG 101 de 2023	Regula el almacenamiento de energía eléctrica en el sistema colombiano; establece condiciones técnicas para sistemas de baterías conectados a la red, relevante para el seguimiento operacional del componente AOM.
Decreto 309 de 2000 (y modificaciones)	Regula la investigación científica en biodiversidad y el aprovechamiento de recursos naturales; aplica en la evaluación de sitios de instalación con restricciones ecosistémicas.
Resolución 1023 de 2010 – MADS	Guías ambientales para el sector energético; contiene lineamientos para la gestión ambiental de proyectos de generación eléctrica, incluyendo aspectos de monitoreo y seguimiento ambiental.

2.2.4 Gestión de residuos y disposición final

Tabla 7. Normativa nacional aplicable a la gestión de residuos y disposición final

Norma	Aplicación a la gestión de residuos y disposición final
Ley 1672 de 2013	Política pública para la gestión integral de RAEE bajo el principio de responsabilidad extendida del productor (REP). Define obligaciones de fabricantes, importadores, comercializadores y usuarios para el manejo posconsumo de equipos eléctricos y electrónicos, incluyendo paneles, inversores y baterías.
Decreto 284 de 2018	Reglamenta la gestión integral de RAEE: establece metas de recolección, obligaciones de los productores, condiciones para gestores autorizados y mecanismos de control y reporte.
Resolución 851 de 2022 – MADS	Define lineamientos para la implementación de sistemas de recolección y gestión de RAEE; actualiza metas y requisitos técnicos para gestores.
Decreto 4741 de 2005	Regula la gestión integral de residuos peligrosos (RESPEL): aplica a baterías deterioradas, aceites dieléctricos y componentes con metales pesados. Establece obligaciones de manifiesto de residuos, gestores autorizados y planes de gestión.
Decreto 1076 de 2015 – Sector Ambiente	Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente; compila disposiciones sobre gestión ambiental, residuos peligrosos y protección de recursos naturales.
Ley 1252 de 2008	Disposiciones prohibitivas en materia ambiental relacionadas con la generación, manejo y disposición de residuos peligrosos; prohíbe la importación de residuos peligrosos al territorio colombiano.
Política Nacional RAEE – MADS (2017)	Establece lineamientos estratégicos para la gestión posconsumo de RAEE en Colombia; incluye directrices para fabricantes, distribuidores, usuarios y gestores. Marco de referencia para el diseño del esquema de disposición final del programa.

2.3 Vacíos Normativos y Retos para el Programa

A pesar de la existencia de un marco normativo amplio, se identifican vacíos relevantes para la implementación del Programa Colombia Solar que el protocolo debe reconocer y ante los cuales debe definir criterios operativos propios:

- **Transporte de última milla:** No existen lineamientos específicos para el transporte de equipos sensibles en vías terciarias, caminos de herradura o senderos peatonales. El Decreto 1609 de 2002 está diseñado para vías principales y vehículos motorizados.
- **Instalación de SISFV en comunidades étnicas:** No existe reglamentación específica que articule los requisitos del RETIE con los protocolos de consulta previa y los estándares técnicos diferenciados en territorios de comunidades indígenas y afrodescendientes.
- **Transporte y seguridad de componentes eléctricos (no peligrosos):** El RETIE regula la instalación pero no el transporte de inversores, tableros y demás componentes eléctricos no clasificados como peligrosos, generando un vacío en las condiciones de manejo durante su movilización.
- **Logística inversa en zonas de difícil acceso:** A pesar de la Ley 1672 de 2013 y el Decreto 284 de 2018, no existen disposiciones operativas para la gestión de residuos RAEE y RESPEL desde zonas rurales aisladas sin capacidad de almacenamiento temporal seguro ni acceso a gestores autorizados.
- **Articulación energía-ambiente-transición energética:** La Ley 1715 de 2014 y la Ley 2099 de 2021 no desarrollan lineamientos específicos para el transporte y la gestión logística de sistemas fotovoltaicos en contextos rurales complejos, dejando este ámbito sin regulación sectorial integrada.

Capítulo 3. Cadena Logística y Tipologías de Transporte en Colombia

El transporte de los componentes del Programa Colombia Solar constituye una cadena logística multietapa que inicia en puertos de importación —principalmente en la región Caribe— y culmina en territorios rurales dispersos. Esta transición implica un incremento progresivo de la incertidumbre operativa y la exposición a riesgos. Comprender las tipologías de vía y las etapas de la cadena es condición previa para diseñar procedimientos de transporte adaptados a la realidad territorial del programa.

3.1 Etapas de la Cadena Logística

Tabla 8. Etapas de la cadena logística del Programa Colombia Solar

Etapas	Origen → Destino	Modo dominante	Nivel de control
1. Importación y nacionalización	Puerto internacional → Centros de acopio principal (vías de primer orden)	Tractocamión con semirremolque / contenedor	Alto – estándares internacionales
2. Distribución regional	Centros de acopio principal → Bodegas regionales/municipales (vías de segundo orden)	Camión rígido (NPR / NQR / doble troque)	Medio – fragmentación de carga

3. Transporte primario a zonas rurales	Bodegas regionales → Sitios de instalación (vías terciarias, fluvial, herradura)	Camioneta 4x4, canoa motorizada, animal de carga o transporte manual	Bajo a Muy Bajo – alta variabilidad
4. Logística inversa – recolección	Sitios de instalación → Centros de acopio intermedios (mismo corredor inverso)	Mismo modo de entrada; condiciones críticas por estado de los materiales	Muy Bajo – sin infraestructura de respuesta
5. Transporte a disposición final	Centros de acopio → Gestores autorizados RAEE/RESPEL (vías de primer orden)	Vehículo especializado para residuos peligrosos (furgón hermético)	Alto – normativa Decreto 1609/2002

3.2 Tipologías de Vía y sus Condicionantes Operativos

El sistema vial colombiano presenta una marcada heterogeneidad que condiciona directamente las decisiones logísticas del programa:

Tabla 9. Tipologías de vía y sus condicionantes operativos

Tipología	Caracterización	Vehículo / modo	Nivel de riesgo
Vías de 1.er y 2.º orden	Pavimentadas, alta velocidad, tráfico pesado, condiciones estándar. Corredores principales desde puertos hacia centros de acopio.	Tractocamión / contenedor Camión rígido	MEDIO
Vías de 3.er orden (terciarias)	Afirmado o tierra, irregulares, pendientes pronunciadas, baches, saturación hídrica. ~142.000 km en Colombia; < 10 % pavimentados.	Camioneta 4x4 Vehículo liviano reforzado	MUY ALTO
Caminos de herradura	0,8–1,5 m de ancho, terreno irregular, tránsito de animales de carga (80–120 kg por animal). Alta pendiente y accidentalidad por desbalance.	Animal de carga (mula / caballo)	MUY ALTO
Caminos peatonales	0,4–0,8 m de ancho, sin vehículo ni animal posible. Dependencia total de la capacidad física del operario.	Transporte manual (arnés, relevos)	MUY ALTO
Vías fluviales	Ríos, caños y esteros en Pacífico, Amazonía, Caribe y Orinoquía. Sin alternativa terrestre. Variación de nivel de ±10 m entre temporadas.	Canoa / lancha (500 kg–2 ton capacidad)	ALTO a MUY ALTO
Vías marítimas costeras	Transporte en buques portacontenedores. Entorno de alta agresividad ambiental: humedad salina, oleaje, condensación en contenedores.	Buque portacontenedores (operaciones portuarias)	MEDIO a ALTO

CONDICIONANTE TERRITORIAL CRÍTICO

Las condiciones climáticas de la región Caribe —altas temperaturas (>38 °C), alta humedad relativa y radiación solar intensa— hacen que la exposición ambiental no sea una condición excepcional sino el escenario operativo habitual. La temperatura interior de un vehículo cerrado en estas condiciones puede superar los 60 °C, acelerando la degradación de polímeros y afectando la calibración de baterías antes de la instalación. Este factor debe incorporarse en todos los procedimientos de embalaje, almacenamiento temporal y programación de horarios operativos.

Capítulo 4. Análisis Integrado de Riesgos y Medidas de Gestión

Este capítulo integra, en un solo instrumento, el análisis de riesgos y las medidas de prevención, mitigación y atención correspondientes. Se organiza por tipología de vía y categoría de riesgo, evitando la repetición de contenidos. Las medidas transversales que aplican a todas las tipologías se presentan primero; las específicas por vía, a continuación.

4.1 Marco General de Gestión del Riesgo

La gestión del riesgo en el transporte de sistemas fotovoltaicos del Programa Colombia Solar se estructura bajo tres dimensiones complementarias:

- Prevención: control anticipado de variables críticas para evitar la ocurrencia de eventos adversos.
- Mitigación: reducción de la severidad de impactos cuando el riesgo se materializa.
- Atención: protocolos de respuesta inmediata ante incidentes que comprometan equipos, personal o ambiente.

Un principio transversal es la naturaleza acumulativa e interdependiente de los riesgos: los daños en sistemas fotovoltaicos son frecuentemente progresivos y se manifiestan meses después de la instalación. Esta condición hace que la inspección visual de recepción sea insuficiente como único mecanismo de control.

4.2 Medidas Transversales Obligatorias (todas las tipologías)

Planeación de la operación

- Realizar análisis de ruta previo a cada operación: estado de la infraestructura vial, condiciones climáticas esperadas, puntos críticos de transbordo, proximidad a ecosistemas sensibles y disponibilidad de capacidades operativas locales.
- Definir rutas principales y alternativas, con ventanas operativas que minimicen la exposición a eventos climáticos extremos (lluvia intensa, crecientes, temperaturas excesivas).
- Toda operación debe contar con plan de contingencia que incluya procedimientos de atención de derrames, contención de materiales peligrosos y protección de cuerpos de agua. La ausencia de este plan es causal de suspensión.

Embalaje y acondicionamiento diferenciado por subsistema

- Módulos fotovoltaicos: embalajes rígidos con sistemas de amortiguación que distribuyan uniformemente las cargas y absorban vibraciones; dispositivos de monitoreo de impacto e inclinación para trayectos críticos.
- Inversores y equipos electrónicos: protección anti-humedad con materiales desecantes y empaques sellados; amortiguación de impactos equivalente a equipos electrónicos industriales.
- Baterías ion-litio: obligatorio embalaje certificado para mercancías peligrosas (contenedor tipo UN), materiales absorbentes, sistemas de contención secundaria, señalización y documentación (tarjeta de emergencia, manifiesto de carga).
- Estructuras de soporte: inventarios verificables por lote para prevenir pérdida de piezas de fijación; embalaje que evite deformación geométrica por apilamiento inadecuado.
- Prohibición expresa: apilamiento excesivo, superposición de componentes incompatibles, contacto directo entre elementos de alta sensibilidad.

Cargue, estiba y aseguramiento

- Inmovilización efectiva de componentes mediante sistemas de amarre mecánico certificados; verificar en cada punto de la cadena.
- Toda carga debe estar identificada con señalización visible: nivel de fragilidad, orientación de transporte y, cuando aplique, condición de mercancía peligrosa (IMDG / Decreto 1609).
- Prohibición de mezclar RAEE y RESPEL con equipos nuevos o con residuos ordinarios.

Talento humano y EPP

- Obligatoriedad de capacitación en: manipulación de cargas sensibles, manejo de mercancías peligrosas, prevención de riesgos laborales y respuesta a emergencias (conforme al Decreto 1072 de 2015).
- EPP mínimo según operación: guantes anticorte, casco, protección ocular, chaleco reflectivo, botas de seguridad. Operaciones fluviales: chaleco salvavidas obligatorio (NTC 4725).
- Programa de gestión de fatiga para conductores en trayectos prolongados: pausas activas y rotación de conductores.

4.3 Análisis de Riesgos y Medidas por Tipología de Vía

La siguiente tabla sistematiza, para cada tipología de vía, los riesgos específicos diferenciados por categoría (equipos, personas, ambiente) y las medidas de gestión correspondientes. Las medidas transversales del apartado 4.2 se entienden aplicables en todos los casos:

Tabla 10. Análisis de riesgos y medidas de gestión por tipología de vía

Componente Metodológico – Programa Colombia Solar

Tipología	Riesgos específicos para los equipos	Riesgos para personas y ambiente	Medidas de gestión específicas
Vías de 1.er y 2.º orden	<ul style="list-style-type: none"> • Microfracturas en módulos por vibración de alta frecuencia en juntas de pavimento rígido • Efecto vela (succión aerodinámica) en carga no asegurada • Condensación en inversores por cambios térmicos en trayectos largos • Compresión de módulos en colisiones de alta energía con riesgo de ruptura de baterías 	<ul style="list-style-type: none"> • Alta velocidad y fatiga del conductor en trayectos largos • Riesgo de volcamiento en curvas cerradas con carga sobredimensionada • Derrames de combustible/electrolitos en corredores próximos a fuentes hídricas • Contaminación por lixiviación en suelos permeables 	<ul style="list-style-type: none"> • Vehículos con suspensión adecuada para carga sensible • Control de velocidad estricto en tramos con irregularidades o juntas • Puntos de inspección periódica para verificar estado de carga y sistema de amarre • Segregación de materiales peligrosos conforme al Decreto 1609/2002 • Retorno RAEE/RESPEL: contenedores rígidos herméticos, etiquetados, sin mezcla con carga ordinaria
Vías de 3.er orden	<ul style="list-style-type: none"> • Esfuerzos de torsión y flexión en módulos que exceden diseño estándar (microfisuras en celdas) • Oxidación prematura y entrada de partículas en inversores por polvo y humedad • Riesgo de caída de carga en pendientes pronunciadas con posibles consecuencias térmicas en baterías 	<ul style="list-style-type: none"> • Accidentes vehiculares por superficie inestable, pendientes y barro • Lesiones por manipulación manual en transbordo • Derrame de aceite dieléctrico o electrolito cerca de cuerpos de agua y ecosistemas sensibles en vías sin infraestructura de contención 	<ul style="list-style-type: none"> • Fragmentación de carga en unidades menores; refuerzo de embalaje con capas adicionales • Evitar operaciones en saturación hídrica del terreno • Puntos intermedios de acopio para reducir exposición prolongada a condiciones adversas • Cubiertas impermeables para protección contra lluvia • Contenedores de emergencia con contención de fugas para el retorno de baterías
Caminos de herradura	<ul style="list-style-type: none"> • Esfuerzos de flexión por amarres desbalanceados; impactos laterales en senderos estrechos • Vibración localizada en inversores; entrada de polvo/humedad • Caída de baterías (alto peso, desbalance del animal) con posibles consecuencias químicas y térmicas 	<ul style="list-style-type: none"> • Caídas, atrapamientos y golpes al interactuar con el animal en espacios reducidos • Imprevisibilidad del animal ante ruidos, obstáculos o calor extremo • Dispersión de contaminantes desde altura (>1 m) en pendientes o cercanías a cuerpos de agua 	<ul style="list-style-type: none"> • Límite estricto de carga por animal (no exceder 20–25 % del peso vivo) • Distribución simétrica de la carga; protección rígida en bordes de módulos • Supervisión constante con paradas técnicas para ajuste y verificación de estabilidad • Retiro inmediato de componentes dañados para evitar exposición de materiales peligrosos • Retorno RAEE: refuerzo de embalaje para bordes cortantes; prohibición de baterías dañadas sin contenedor certificado
Caminos peatonales	<ul style="list-style-type: none"> • Vulnerabilidad extrema de módulos a impactos y esfuerzos de flexión; fractura de vidrio templado ante caídas de baja altura • Baterías: riesgo crítico por caída (deformación de celdas, liberación de electrolitos) 	<ul style="list-style-type: none"> • Mayor riesgo laboral de toda la cadena: lesiones musculoesqueléticas, fatiga, caídas en superficies irregulares • Riesgo de insolación/hipotermia según región y altitud • Contacto con fauna silvestre • Liberación de electrolitos directamente en ecosistemas sensibles sin capacidad de contención 	<ul style="list-style-type: none"> • Límites estrictos de carga por persona; sistemas ergonómicos (arnés, mochila estructurada) • Relevos de personal en trayectos largos; programación fuera de horas de máxima temperatura • Protocolo de primeros auxilios y evacuación adaptado a aislamiento • EPP reforzado para retorno de RAEE: guantes de corte, contenedores rígidos • Prohibición absoluta de transporte manual de baterías deterioradas sin contenedor hermético certificado

Tipología	Riesgos específicos para los equipos	Riesgos para personas y ambiente	Medidas de gestión específicas
Vías fluviales	<ul style="list-style-type: none"> Exposición combinada a humedad/movimiento tridimensional: infiltración en módulos, delaminación del EVA, condensación en inversores Baterías: contacto con agua genera cortocircuitos con riesgo de fuga térmica; cualquier vertido de electrolito contamina el cuerpo de agua directamente 	<ul style="list-style-type: none"> Ahogamiento en ríos de corriente fuerte; chaleco salvavidas obligatorio (NTC 4725) Contaminación acuática irreversible ante cualquier derrame (afecta fuentes de agua potable de comunidades ribereñas) Aislamiento total: sin posibilidad de solicitar apoyo externo en tiempo real 	<ul style="list-style-type: none"> Contenedores herméticos con materiales desecantes para todos los componentes electrónicos Criterios mínimos de navegabilidad antes de cada trayecto: nivel del río, velocidad de corriente, condiciones de lluvia y visibilidad Distribución equilibrada de la carga dentro de la embarcación Equipos de comunicación de emergencia a bordo Retorno RAEE/RESPEL: almacenamiento temporal seguro en sitio hasta coordinación con gestor autorizado con capacidad fluvial real (ver Capítulo 5)
Vías marítimas	<ul style="list-style-type: none"> Humedad salina constante + container rain (condensación interior): corrosión acelerada en conexiones, degradación de polímeros Inestabilidad de contenedores por oleaje; desplazamiento de carga por estiba deficiente 	<ul style="list-style-type: none"> Riesgos portuarios: caídas, atrapamientos, golpes en operaciones con grúas y montacargas Contaminación marina por derrames: afectación de ecosistemas costeros y pérdida de biodiversidad 	<ul style="list-style-type: none"> Cumplimiento de Código IMDG y Convenio SOLAS/MARPOL Uso de desecantes y sistema de control de humedad en contenedores Técnicas de estiba y amarre marítimo; inspección en origen, tránsito y destino EPP y protocolos de seguridad en operaciones portuarias Capacitación en manejo de mercancías peligrosas y respuesta a emergencias

Capítulo 5. Gestión Integral de RAEE y RESPEL en la Cadena Logística

La gestión de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE) y de residuos peligrosos (RESPEL) constituye una dimensión transversal de la cadena logística del Programa Colombia Solar que no puede ser tratada como un apéndice de cada tipología de vía. Este capítulo consolida los criterios, procedimientos y obligaciones normativas aplicables a la gestión integral de estos residuos, desde el momento en que los equipos sufren daños durante el transporte hasta su disposición final por gestores autorizados.

5.1 Marco Conceptual y Normativo

Los componentes de los sistemas fotovoltaicos se clasifican como Aparatos Eléctricos y Electrónicos (AEE) durante su transporte hacia la instalación. Al ser dañados, deteriorados o al alcanzar el final de su vida útil, se convierten en RAEE bajo la Ley 1672 de 2013. Algunos componentes —particularmente baterías, aceites dieléctricos y componentes con metales pesados— se clasifican además como RESPEL bajo el Decreto 4741 de 2005, con obligaciones adicionales de manifiesto, gestores especializados y trazabilidad.

PRINCIPIO DE RESPONSABILIDAD EXTENDIDA DEL PRODUCTOR (REP)

La Ley 1672 de 2013 establece que los productores e importadores de equipos eléctricos y electrónicos son responsables del manejo posconsumo de sus productos. En el contexto del Programa Colombia Solar, este principio implica que FENOGÉ y sus contratistas EPC tienen obligaciones formales de garantizar el manejo adecuado de los residuos generados, tanto durante el transporte (daños en tránsito) como al final de la vida útil de los sistemas instalados. El incumplimiento de estas obligaciones genera responsabilidad ambiental y administrativa ante el MADS y las autoridades ambientales regionales.

5.2 Clasificación de Residuos Fotovoltaicos

Tabla 11. Clasificación de residuos fotovoltaicos

Componente	Clasificación	Peligrosidad específica	Norma aplicable
Módulos fotovoltaicos (paneles) Silicio cristalino	RAEE	Bordes cortantes de vidrio; trazas de plata en contactos eléctricos	Ley 1672/2013; Decreto 284/2018
Módulos fotovoltaicos CdTe / CIGS	RAEE + RESPEL	Metales pesados (cadmio, plomo): toxicidad sistémica y contaminación ambiental	Ley 1672/2013; Decreto 4741/2005; Ley 1252/2008
Inversores y reguladores de carga	RAEE	Componentes electrónicos con metales pesados; posible aceite dieléctrico en transformadores	Ley 1672/2013; Decreto 284/2018
Baterías LiFePO ₄ / ion-litio	RAEE + RESPEL	Electrolitos corrosivos, litio reactivo, posible fuga térmica. Clase 9 – UN 3480/3481	Decreto 4741/2005; Decreto 1609/2002; Ley 1672/2013
Cableado y conectores	RAEE	Cobre recuperable; aislamientos con compuestos halogenados en combustión	Ley 1672/2013
Estructuras de aluminio/acero	Residuo no peligroso aprovechable	Sin peligrosidad directa; alto valor de recuperación material	Resolución 851/2022 (aprovechamiento)

5.3 Procedimientos de Almacenamiento Temporal en Campo

En corredores de difícil acceso donde la evacuación inmediata de residuos no es viable, se debe implementar almacenamiento temporal controlado en sitio. Este procedimiento aplica especialmente en vías fluviales, caminos de herradura y senderos peatonales:

Acondicionamiento del área

- Ubicar el punto de acopio en zona elevada, fuera de riesgo de inundación y sin contacto directo con cuerpos de agua.

- Garantizar superficie firme, nivelada e impermeable (plataformas en madera tratada, concreto o contenedores elevados).
- Restringir el acceso a personal no autorizado mediante señalización perimetral visible.

Requisitos del contenedor temporal

- Contenedores rígidos, herméticos e impermeables (mínimo IP65–IP67) fabricados en material resistente a la corrosión.
- Sistemas de cierre seguro y bandejas internas de contención secundaria para posibles fugas.
- RESPEL (baterías): contenedores certificados tipo UN con material absorbente y separación interna.
- RAEE (módulos fracturados): embalaje vertical con protección en bordes para prevenir cortes y fragmentación.

Clasificación y segregación

- Separar obligatoriamente RAEE (paneles, inversores, reguladores) de RESPEL (baterías, componentes con electrolitos).
- Prohibir la mezcla con residuos ordinarios o con equipos en buen estado.

Señalización y trazabilidad

- Rotulación visible: tipo de residuo (RAEE / RESPEL), símbolos de peligro (GHS), leyenda "Residuos peligrosos – no manipular".
- Información de trazabilidad en cada contenedor: fecha de almacenamiento, origen del residuo y responsable.
- Registro de ingreso y salida de residuos con inspecciones periódicas de integridad del contenedor.

Coordinación para evacuación

- Limitar el tiempo de almacenamiento temporal al mínimo necesario.
- Coordinar transporte con gestores autorizados de RAEE y RESPEL que tengan capacidad operativa real en la zona (incluyendo capacidad fluvial cuando corresponda).
- Verificar condiciones de embalaje antes del traslado, especialmente para baterías.

5.4 Obligaciones de los Actores de la Cadena Logística

Tabla 12. Obligaciones de los actores de la cadena logística en gestión de RAEE y RESPEL

Actor	Obligaciones principales en gestión de RAEE / RESPEL
FENOGE – GECELCA (organizaciones ejecutoras)	<ul style="list-style-type: none">• Diseñar e implementar el esquema de gestión de RAEE desde la planificación del programa (Componente Metodológico).• Establecer contratos con gestores autorizados con cobertura en las zonas de intervención.• Garantizar la trazabilidad de todos los residuos generados hasta su disposición final.• Reportar ante la autoridad ambiental conforme al Decreto 4741/2005 y la Política Nacional RAEE.

Contratistas EPC (ingeniería, procura y construcción)	<ul style="list-style-type: none"> • Cumplir los procedimientos del presente protocolo en todas las operaciones de transporte. • Elaborar manifiestos de residuos para cada cargamento de RESPEL. • Capacitar al personal operativo en identificación, manejo y reporte de RAEE/RESPEL. • Notificar a FENOGÉ GECELCA dentro de las 24 horas siguientes a cualquier incidente con residuos peligrosos.
Operadores logísticos y transportistas	<ul style="list-style-type: none"> • Cumplir el Decreto 1609 de 2002 en el transporte de baterías y componentes clasificados como mercancías peligrosas. • Portar documentación obligatoria (tarjeta de emergencia, manifiesto de carga, plan de contingencia). • No mezclar RAEE/RESPEL con carga ordinaria. • Reportar incidentes de derrame o pérdida de carga inmediatamente a la coordinación logística.
Gestores autorizados de RAEE/RESPEL	<ul style="list-style-type: none"> • Contar con licencia ambiental vigente y registro ante la autoridad ambiental competente. • Garantizar capacidad operativa real en la zona de intervención del programa, incluyendo zonas de difícil acceso. • Emitir certificados de disposición final para cada lote de residuos recibido. • Cumplir la Resolución 851 de 2022 en materia de recolección y gestión de RAEE.

5.5 Síntesis: Ciclo Completo de Gestión de Residuos Fotovoltaicos

La gestión integral de residuos del Programa Colombia Solar abarca cinco momentos críticos que deben ser planificados desde el diseño del componente metodológico:

- **Daño en tránsito:** Embalaje de emergencia en campo; registro del incidente; notificación a FENOGÉ; almacenamiento temporal seguro mientras se coordina evacuación.
- **Falla durante la instalación:** Aislamiento del componente; evaluación de si es RAEE o RESPEL; embalaje diferenciado; inclusión en el plan de logística inversa.
- **Reemplazo durante el esquema AOM:** Los componentes reemplazados durante el primer año de operación deben gestionarse como RAEE/RESPEL y no abandonarse en el sitio.
- **Fin de vida útil del sistema:** Aplicación del plan de disposición final diseñado desde la fase metodológica; coordinación con gestores; transferencia de activos al cierre del convenio.
- **Retorno logístico:** Transporte desde el sitio de instalación hasta el gestor autorizado, siguiendo los mismos corredores logísticos de entrada pero con embalaje de residuos según los procedimientos del capítulo 4 y el presente capítulo.

ADVERTENCIA: PROHIBICIÓN DE ABANDONO DE RESIDUOS EN CAMPO

Queda expresamente prohibido el abandono de cualquier componente fotovoltaico dañado, deteriorado o al final de su vida útil en el sitio de instalación o en cualquier punto de la cadena logística. El abandono de componentes que contienen metales pesados (plomo, cadmio, litio) genera responsabilidad ambiental solidaria para FENOGÉ y sus contratistas conforme al Decreto 4741 de 2005 y la Ley 99 de 1993, independientemente de la zona de acceso o de las dificultades logísticas para la evacuación.

Referencias y Marco Normativo

Normativa colombiana

- Congreso de la República. Ley 99 de 1993. Por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente.
- Congreso de la República. Ley 1252 de 2008. Disposiciones sobre residuos peligrosos.
- Congreso de la República. Ley 1672 de 2013. Gestión integral de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE).
- Congreso de la República. Ley 1715 de 2014. Integración de energías renovables no convencionales al sistema energético nacional.
- Congreso de la República. Ley 2099 de 2021. Transición energética justa.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Decreto 4741 de 2005. Gestión integral de residuos peligrosos.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Decreto 284 de 2018. Gestión integral de RAEE.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Decreto 1076 de 2015. Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Resolución 851 de 2022. Lineamientos para sistemas de recolección y gestión de RAEE.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2017). Política Nacional para la Gestión Integral de Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos (RAEE). Bogotá.
- Ministerio de Minas y Energía. Resolución 40117 de 2024. Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE).
- Ministerio de Transporte. Decreto 1609 de 2002. Manejo y transporte terrestre de mercancías peligrosas (compilado en Decreto 1079 de 2015).
- Ministerio de Transporte. Resolución 20223040045515 de 2022. Registro Nacional de Despachos de Carga (RNDC).
- Ministerio de Trabajo. Decreto 1072 de 2015. Decreto Único Reglamentario del Sector Trabajo.
- ICONTEC. NTC 2050. Código Eléctrico Colombiano.
- ICONTEC. NTC 3972. Transporte de mercancías peligrosas. Clase 9.
- ICONTEC. NTC 4725. Dispositivos de flotación personal. Chalecos salvavidas.
- INVÍAS. (s.f.). Infraestructura vial y caracterización de corredores terciarios.
- UPME. (2025). Plan de expansión de referencia generación-transmisión 2025–2039.

Normativa y estándares internacionales

- Organización Marítima Internacional (OMI). (2024). International Maritime Dangerous Goods (IMDG) Code (Amendment 41-22/24).
- Naciones Unidas. (2023). Recomendaciones relativas al transporte de mercancías peligrosas: Reglamentación modelo (23.^a ed.).

- IATA. (2026). Dangerous Goods Regulations (DGR) (67.^a ed.). IATA.
- UNECE. (2019). ADR: European Agreement concerning the International Carriage of Dangerous Goods by Road.
- IEC. (2021). IEC 61215: Terrestrial photovoltaic (PV) modules — Design qualification and type approval.
- IEC. IEC 61730: PV module safety qualification.
- IEC. IEC 62759-1: PV module transport testing.
- Unión Europea. Reglamento (UE) 2023/1542. Baterías y residuos de baterías.
- PNUMA. Convenio de Basilea sobre el control de los movimientos transfronterizos de los desechos peligrosos.
- IRENA. (2016). End-of-life management: Solar photovoltaic panels.
- IEA PVPS. (2021). Transport, handling and installation of PV modules.
- ISTA. (2018). ISTA 3 Series: Performance Testing for Packaged-Products.
- ISO 11228-1. (2007). Ergonomics — Manual handling — Lifting and carrying.
- NREL. (2016). Photovoltaic Module Reliability Workshop (PVMRW) Report.
- Fraunhofer ISE. (2020). Photovoltaics Report.