3. Análisis de riesgos asociados al transporte de sistemas fotovoltaicos por tipología de trayecto

El transporte de los componentes de los sistemas fotovoltaicos en Colombia constituye una cadena logística multietapa que inicia en entornos altamente controlados, como puertos marítimos y corredores logísticos nacionales y culmina en territorios rurales dispersos, caracterizados por limitaciones en infraestructura, capacidades técnicas y control operativo. Esta transición progresiva implica un incremento sustancial en la incertidumbre operativa y en la exposición a riesgos, tanto para las personas como para el medio ambiente.

Incluir Imagen

Desde el punto de vista técnico, los sistemas fotovoltaicos están compuestos por materiales con propiedades físico-químicas diversas, incluyendo vidrio templado, aluminio, silicio, cobre, polímeros, semiconductores, electrolitos y metales pesados como plomo, cadmio y litio. En condiciones de daño, degradación o fin de vida útil, estos materiales pueden convertirse en residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE) o residuos peligrosos (RESPEL), con potencial de generar impactos sobre la salud humana y los ecosistemas (IRENA, 2016; IEA, 2020).

En Colombia, la gestión de estos residuos se encuentra regulada por un marco normativo robusto que incluye la Ley 1672 de 2013, el Decreto 4741 de 2005 y el Decreto 1076 de 2015, los cuales establecen obligaciones relacionadas con la prevención, el manejo integral, el transporte seguro y la disposición final de residuos peligrosos. A su vez, el transporte de este tipo de materiales debe cumplir con lo dispuesto en el Decreto 1609 de 2002, que regula el manejo y transporte de mercancías peligrosas por carretera.

Las guías técnicas nacionales complementan este marco normativo, señalando que el transporte debe considerar variables críticas como la compatibilidad de materiales, la resistencia del embalaje, la estabilidad de la carga, las condiciones de la infraestructura vial y la capacitación del personal (MADS, 2023; Ministerio de Ambiente, s.f.). A nivel internacional, organismos como Naciones Unidas establecen lineamientos técnicos para el transporte seguro de mercancías peligrosas, destacando la importancia de la clasificación, etiquetado y documentación de los materiales (UN, 2019).

3.1. Primer traslado: transporte portuario a bodegas principales

El primer tramo logístico corresponde al desplazamiento de los equipos desde los puertos marítimos hacia los centros de acopio principal, generalmente a través de vías de primer orden y mediante transporte en contenedores. Este es el segmento más controlado del sistema logístico, caracterizado por el uso de estándares internacionales de embalaje, manipulación mecanizada y trazabilidad de la carga.

Incluir Imagen

En este segmento se emplean vehículos de carga pesada, principalmente tractocamiones con semirremolques y sistemas de contenedores, lo que permite transportar grandes volúmenes de equipos en condiciones estandarizadas. La carga suele organizarse mediante contenedores marítimos, pallets certificados y sistemas de sujeción mecánica que buscan minimizar el movimiento interno de los materiales. Los paneles solares son transportados en estructuras tipo rack con protección contra impactos, mientras que los inversores y baterías requieren embalajes especializados que controlen vibraciones, humedad y temperatura.

No obstante, este nivel de estandarización no elimina los riesgos. Desde la perspectiva de la seguridad ocupacional, las operaciones portuarias implican una alta exposición a eventos como golpes, atrapamientos y caídas de carga durante el uso de grúas, montacargas y sistemas de izaje, lo cual ha sido ampliamente documentado en guías internacionales de seguridad industrial (OSHA, 2016). Adicionalmente, el transporte prolongado en contenedores puede generar efectos acumulativos de vibración que afectan la integridad de componentes sensibles como inversores y módulos fotovoltaicos (IEA PVPS, 2021).

Desde el enfoque de gestión de residuos, cualquier daño estructural ocurrido en este tramo puede convertir los equipos en residuos desde el momento mismo de su ingreso al país, activando la obligación de su manejo conforme a los lineamientos de RAEE. En particular, la normativa colombiana establece que los generadores deben garantizar la trazabilidad de estos residuos y su entrega a gestores autorizados, evitando su abandono o disposición inadecuada.

Adicionalmente, la exposición a ambientes salinos puede acelerar la degradación de materiales, lo cual incrementa la probabilidad de generación temprana de residuos, especialmente en conexiones eléctricas y estructuras metálicas.

En términos ambientales, uno de los principales riesgos se asocia a la exposición a ambientes salinos, especialmente en zonas costeras, lo cual puede acelerar

procesos de corrosión en conexiones eléctricas y estructuras metálicas, generando fallas prematuras y, eventualmente, residuos electrónicos. Asimismo, aunque de baja probabilidad, los eventos de pérdida de carga o daño estructural durante el transporte pueden derivar en la liberación de materiales al entorno.

3.2. Segundo traslado: distribución regional y desconsolidación de carga

El segundo tramo, que conecta los centros de acopio principal con bodegas regionales o municipales, introduce un cambio significativo en la dinámica logística, debido a la fragmentación de la carga y a la necesidad de reembalaje o redistribución de los equipos.

En este tramo se utilizan vehículos de carga media, como camiones rígidos tipo NPR, NQR o doble troque, adecuados para el transporte de volúmenes intermedios. A diferencia del primer traslado, aquí la carga se fracciona, lo que implica procesos adicionales de manipulación, redistribución y, en muchos casos, reembalaje. Esta situación incrementa la probabilidad de daños físicos en los componentes, especialmente en los paneles solares, así como la exposición a condiciones ambientales adversas como humedad, polvo y variaciones térmicas.

Incluir Imagen

Desde el punto de vista de los riesgos para las personas, este tramo presenta una mayor incidencia de lesiones asociadas a la manipulación manual, incluyendo sobreesfuerzos, posturas inadecuadas y errores operativos derivados de la intervención de personal no especializado. Asimismo, el tránsito por vías secundarias incrementa la probabilidad de accidentes vehiculares.

En cuanto a los riesgos ambientales, la literatura señala que las vibraciones en vías en mal estado pueden generar microfracturas en los módulos fotovoltaicos y daños en componentes electrónicos, lo cual incrementa la probabilidad de generación de residuos prematuros (IRENA, 2016). Adicionalmente, la exposición a variaciones de temperatura y humedad puede afectar la estabilidad de las baterías y otros componentes sensibles, particularmente en regiones con alta variabilidad climática.

Las condiciones operativas incluyen mayor intervención manual, almacenamiento temporal en bodegas con niveles variables de adecuación técnica y una menor estandarización en los procesos logísticos. En este contexto, las guías técnicas enfatizan la importancia de la capacitación del personal en aspectos como etiquetado, manipulación segura, uso de equipos de protección personal y

respuesta ante emergencias, dado que la variabilidad en las capacidades técnicas del recurso humano constituye un factor crítico de riesgo.

Las guías técnicas nacionales destacan que el embalaje debe ser resistente a las condiciones de transporte y garantizar la integridad del contenido, evitando fugas o deterioro de los materiales, particularmente en el caso de residuos peligrosos (Ministerio de Ambiente, s.f.; Área Metropolitana del Valle de Aburrá, s.f.). Asimismo, se resalta la importancia de la capacitación del personal en manipulación segura, uso de equipos de protección personal y respuesta a emergencias.

3.3. Tercer traslado: acceso a zonas rurales dispersas

El tercer tramo de la cadena logística corresponde al desplazamiento desde las bodegas temporales de almacenamiento ubicadas en municipios o cabeceras intermedias hacia los sitios de instalación de los sistemas fotovoltaicos, los cuales, en la mayoría de los casos, se localizan en zonas rurales dispersas, con condiciones de accesibilidad altamente restringidas. Este tramo constituye el segmento de mayor complejidad técnica, operativa y de riesgo dentro de toda la cadena logística, debido a la convergencia de factores como la precariedad de la infraestructura vial, la fragmentación de la carga, la limitada disponibilidad de equipos especializados y la heterogeneidad en las capacidades técnicas del personal involucrado.

Desde el punto de vista de la infraestructura vial, este tramo abarca una amplia tipología de vías de tercer orden, incluyendo carreteras terciarias pavimentadas con estándares básicos, vías sin pavimentar con afirmado o en tierra, caminos de herradura y, en algunos casos, trayectos fluviales. Cada una de estas condiciones impone restricciones específicas sobre los tipos de vehículos que pueden utilizarse, los volúmenes de carga transportados y las estrategias de embalaje requeridas.

En el caso de las vías terciarias pavimentadas, aunque existe una superficie de rodadura continua, estas presentan deficiencias estructurales, deformaciones, fisuras y limitaciones geométricas que generan vibraciones constantes. En este contexto, el transporte se realiza mediante vehículos livianos como camionetas 4x4 o camiones de baja capacidad, en los cuales la carga debe organizarse en unidades menores, debidamente amortiguadas mediante espumas, separadores y sistemas de sujeción flexible. Los riesgos predominantes incluyen la fatiga de materiales por vibración, microfracturas en módulos fotovoltaicos, aflojamiento de conexiones internas en inversores y posibles daños en baterías por movimientos repetitivos, en concordancia con lo señalado por las recomendaciones técnicas de transporte de mercancías sensibles (United Nations, 2019).

Incluir Imagen

En las vías sin pavimentar, las condiciones operativas se tornan significativamente más exigentes, con presencia de pendientes pronunciadas, superficies inestables, barro, polvo y escorrentía superficial. Los vehículos empleados corresponden principalmente a camionetas 4x4, camiones con doble tracción o vehículos adaptados para condiciones off-road. La organización de la carga en este contexto requiere un mayor nivel de protección, incluyendo embalajes reforzados, sistemas de encapsulamiento y, en algunos casos, doble embalaje. Los riesgos asociados se incrementan considerablemente, incluyendo volcamiento, pérdida de carga, daño estructural de los equipos y exposición a condiciones ambientales extremas. Adicionalmente, la operación en estas vías depende fuertemente de condiciones climáticas, lo que introduce incertidumbre en la planificación logística.

Incluir Imagen

En escenarios donde no existe infraestructura vial formal, el transporte se realiza a través de caminos de herradura, mediante el uso de animales de carga (mulas, caballos), transporte manual por cuadrillas o sistemas artesanales. En estos casos, la carga debe ser completamente fraccionada y adaptada a capacidades individuales de transporte, lo que implica una reorganización total del embalaje original. Se requieren embalajes modulares, livianos, resistentes a impactos y con sistemas de sujeción individual. Este tipo de transporte presenta riesgos críticos, tales como caídas de materiales, pérdida de componentes, fatiga del personal, accidentes en terreno irregular y manipulación inadecuada de equipos sensibles. La limitada capacitación técnica del personal en estos entornos incrementa la probabilidad de eventos adversos, lo que hace necesario implementar procesos de formación básica en manipulación segura y uso de equipos de protección personal, en concordancia con lo establecido en el Decreto 1072 de 2015.

Incluir Imagen

En regiones con accesibilidad fluvial, el transporte se realiza mediante embarcaciones menores como lanchas o planchones, lo que introduce una dinámica operativa completamente diferente. Las condiciones de alta humedad, exposición a lluvias intensas, movimientos bruscos y limitaciones en la estabilidad de la carga generan riesgos elevados de daño a los equipos, especialmente en componentes eléctricos y electrónicos. En este contexto, el embalaje debe garantizar impermeabilidad, flotabilidad controlada y resistencia a impactos. Los riesgos ambientales son particularmente relevantes en este tipo de transporte, ya que cualquier incidente puede derivar en la contaminación de cuerpos de agua, especialmente en el caso de baterías o equipos que contengan sustancias

peligrosas, tal como lo advierte el Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente (UNEP, 2019).

En términos de capacidades técnicas, este tramo se caracteriza por una disminución progresiva en la especialización del personal, pasando de operadores logísticos capacitados a conductores rurales, ayudantes informales o incluso miembros de la comunidad. Esta situación exige la implementación de estrategias de capacitación diferenciadas, supervisión técnica y adaptación de protocolos operativos a las condiciones locales.

3.4. Cuarto traslado: recolección y transporte de materiales en desmonte

El cuarto tramo de la cadena logística corresponde a la recolección, acopio y transporte de los componentes del sistema fotovoltaico que han alcanzado el final de su vida útil, han sufrido daños o requieren reemplazo. Este proceso incluye principalmente módulos fotovoltaicos averiados, baterías agotadas, inversores fuera de operación, cableado deteriorado y otros componentes eléctricos y electrónicos, los cuales deben ser gestionados como residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE) y, en muchos casos, como residuos peligrosos (RESPEL).

Incluir Imagen

A diferencia del transporte de equipos nuevos, este tramo presenta un nivel de riesgo significativamente mayor debido al estado de los materiales. Los equipos pueden encontrarse fisurados, con fugas, corrosión, degradación de componentes internos o exposición de materiales peligrosos. Por ejemplo, las baterías pueden presentar liberación de electrolitos, los módulos fotovoltaicos pueden liberar partículas o compuestos encapsulados, y los inversores pueden contener componentes electrónicos dañados con presencia de metales pesados.

El transporte en este tramo sigue una lógica inversa a la del ingreso, iniciando en zonas rurales dispersas y avanzando hacia centros de acopio o tratamiento. Esto implica nuevamente el uso de tipologías de transporte como caminos de herradura, transporte fluvial y vías terciarias, pero bajo condiciones más críticas debido a la fragilidad y peligrosidad de los materiales.

Desde el punto de vista técnico, el embalaje adquiere una importancia aún mayor, ya que debe garantizar la contención de materiales potencialmente peligrosos, evitar fugas y permitir una manipulación segura. Las guías técnicas de gestión de RAEE establecen que estos residuos deben ser embalados de manera que se prevenga la liberación de sustancias peligrosas y se facilite su transporte seguro

hacia gestores autorizados (MADS, 2023). Asimismo, el Decreto 4741 de 2005 exige la implementación de medidas específicas para el manejo de residuos peligrosos, incluyendo etiquetado, almacenamiento temporal adecuado y transporte bajo condiciones controladas.

En cuanto a los tipos de vehículos, en los primeros subtramos se emplean nuevamente medios de transporte adaptados a condiciones rurales (animales de carga, transporte manual, vehículos 4x4), mientras que en los tramos posteriores se utilizan camiones especializados en el transporte de residuos peligrosos, debidamente señalizados y con sistemas de contención.

Los riesgos asociados en este tramo incluyen la exposición del personal a sustancias peligrosas, la contaminación del suelo y cuerpos de agua en caso de derrames, la liberación de partículas contaminantes y la generación de accidentes por manipulación de materiales inestables. En este sentido, la normativa colombiana exige la implementación de planes de contingencia, el uso de equipos de protección personal y la capacitación del personal en manejo de residuos peligrosos (Ministerio de Ambiente, 2005; Ministerio de Transporte, 2002).

Adicionalmente, la Ley 1672 de 2013 establece el principio de responsabilidad extendida del productor, lo que implica que estos materiales deben ser gestionados a través de sistemas organizados que garanticen su recolección, transporte y disposición final de manera ambientalmente segura. En este contexto, la trazabilidad de los residuos y la articulación con gestores autorizados constituyen elementos fundamentales para el control del riesgo.

En términos ambientales, este tramo es particularmente sensible, ya que cualquier falla en la gestión puede generar impactos significativos sobre ecosistemas frágiles, especialmente en zonas rurales y cuerpos de agua. Como fue mencionado previamente, los residuos fotovoltaicos pueden contener materiales peligrosos que, en condiciones inadecuadas, pueden lixiviar y contaminar el entorno (IEA, 2020; IRENA, 2016).

3.5. Quinto traslado: transporte hacia disposición final

El quinto tramo de la cadena logística corresponde al transporte de los residuos derivados de los sistemas fotovoltaicos, algunos de bajo riesgo, pero también incluyen RAEE y, en muchos casos, RESPEL, desde los centros de acopio intermedios hacia instalaciones autorizadas para su tratamiento, aprovechamiento o disposición final. Este segmento representa una fase crítica dentro del ciclo de vida de los sistemas, en la medida en que define el cierre ambientalmente seguro

de los materiales y condiciona la prevención de impactos acumulativos sobre el entorno.

Incluir Imagen

A diferencia de los tramos previos, este traslado se desarrolla predominantemente sobre infraestructura vial de mayor nivel (vías secundarias y primarias), lo que permite el uso de vehículos especializados en el transporte de residuos peligrosos, tales como camiones cerrados tipo furgón, vehículos con contenedores herméticos, o unidades con sistemas de retención de derrames. No obstante, la complejidad del tramo no radica únicamente en las condiciones de transporte, sino en la naturaleza de la carga, que corresponde a materiales heterogéneos, potencialmente contaminantes y con requerimientos estrictos de control.

Desde el punto de vista de la organización de la carga, en este tramo se deben aplicar criterios avanzados de segregación, compatibilidad y trazabilidad. Los residuos deben clasificarse según su naturaleza (RAEE aprovechables, RAEE peligrosos, residuos no aprovechables), evitando la mezcla de materiales incompatibles. En particular, componentes como baterías, tarjetas electrónicas y módulos fotovoltaicos deben embalarse en sistemas que garanticen la contención de sustancias peligrosas, tales como electrolitos, metales pesados o compuestos orgánicos persistentes. Las Guías Ambientales de Transporte de Sustancias Peligrosas establecen que el embalaje debe ser resistente, estanco, rotulado y capaz de soportar las condiciones normales de transporte sin generar fugas o liberación de contaminantes (Ministerio de Ambiente, s.f.).

En términos de tipología vehicular, este tramo exige el uso de vehículos que cumplan con las especificaciones del Decreto 1609 de 2002, incluyendo señalización externa (rótulos de peligro), sistemas de emergencia (extintores, kits de contención), documentación obligatoria (tarjeta de emergencia, manifiesto de carga) y condiciones técnicas adecuadas para el transporte de mercancías peligrosas. Adicionalmente, estos vehículos deben garantizar la estabilidad de la carga, la ventilación controlada cuando aplique y la protección frente a condiciones climáticas adversas.

El volumen de carga en este tramo suele ser nuevamente consolidado, a diferencia de los tramos rurales, lo que implica la movilización de cantidades significativas de residuos en un solo viaje. Esta condición aumenta el riesgo potencial de impactos en caso de accidente, ya que un evento puede involucrar grandes cantidades de materiales peligrosos. Por esta razón, la planificación logística cobra especial relevancia, incluyendo la definición de rutas seguras, horarios de transporte, puntos de contingencia y coordinación con autoridades locales.

Desde la perspectiva de las capacidades técnicas del personal, este tramo requiere un alto nivel de especialización. Los conductores y operadores deben contar con formación certificada en transporte de mercancías peligrosas, manejo de emergencias y uso de equipos de protección personal, conforme a lo establecido en el Decreto 1072 de 2015 y en las disposiciones del sistema de gestión de seguridad y salud en el trabajo. Asimismo, las empresas transportadoras deben implementar planes de contingencia, protocolos de respuesta a emergencias y sistemas de monitoreo de la operación.

En relación con los riesgos asociados, este tramo concentra principalmente riesgos de carácter químico, ambiental y operacional. Entre ellos se destacan: derrames de sustancias peligrosas, liberación de vapores tóxicos, incendios asociados a baterías, exposición del personal a contaminantes y contaminación del suelo o cuerpos de agua en caso de accidente. Las guías técnicas nacionales advierten que los eventos asociados al transporte de sustancias peligrosas pueden generar impactos de gran magnitud, especialmente cuando involucran ecosistemas sensibles o áreas pobladas (Ministerio de Ambiente, s.f.) .

Adicionalmente, dado que algunos de los residuos contienen sustancias como plomo, cadmio, mercurio y retardantes de llama bromados, los cuales pueden generar efectos adversos en la salud humana y el ambiente si no son manejados adecuadamente (MADS, 2023) . En este sentido, el transporte debe garantizar condiciones que eviten la dispersión de estos materiales y faciliten su entrega a gestores autorizados.

Desde el punto de vista normativo, este tramo se encuentra fuertemente regulado por el Decreto 4741 de 2005, que establece las obligaciones para el manejo de residuos peligrosos, incluyendo su transporte bajo condiciones controladas, y por la Ley 1672 de 2013, que define la responsabilidad extendida del productor en la gestión de RAEE. Estas disposiciones obligan a asegurar la trazabilidad de los residuos, desde su generación hasta su disposición final, así como la articulación con gestores autorizados.

Finalmente, en términos ambientales, este tramo representa una oportunidad crítica para cerrar adecuadamente el ciclo de vida de los sistemas fotovoltaicos bajo principios de economía circular. Una gestión adecuada permite la recuperación de materiales valiosos y la reducción de impactos ambientales, mientras que una gestión deficiente puede derivar en contaminación persistente y riesgos a largo plazo. En este sentido, organismos internacionales como la IEA (2020) e IRENA (2016) destacan la importancia de establecer cadenas logísticas seguras y eficientes para la gestión de residuos fotovoltaicos.

Tabla X. Síntesis de los riesgos identificados por tramo de desplazamiento de los sistemas fotovoltaicos

Tramo logístico	Condiciones operativas (vías, vehículos, carga)	Riesgos a las personas	Riesgos ambientales	Medidas de manejo y control
1. Transporte portuario y larga distancia	Vías primarias; tractocamiones, contenedores ISO; carga consolidada en pallets y racks	Golpes, atrapamientos, caídas de carga, accidentes en izaje	Pérdida de carga, liberación accidental de materiales, corrosión por ambiente salino	Uso de contenedores certificados; sistemas de sujeción; inspección de embalajes; protocolos de izaje seguro
2. Distribución regional	Vías secundarias; camiones medianos (NPR, NQR); desconsolidación de carga	Sobreesfuerzos, lesiones musculoesqueléticas, errores en manipulación	Daño de equipos, generación prematura de RAEE, exposición a humedad/polvo	Reembalaje técnico; capacitación en manipulación; uso de EPP; control de vibraciones
3. Acceso a zonas rurales dispersas	Vías terciarias, caminos de herradura, fluvial; vehículos 4x4, animales de carga; carga fraccionada	Caídas, fatiga, accidentes en terreno irregular, manipulación inadecuada	Derrames en ecosistemas sensibles, pérdida de materiales, contaminación hídrica	Embalaje reforzado e impermeable; fraccionamiento controlado; capacitación básica; supervisión técnica
4. Recolección y transporte en desmonte (RAEE/RESPEL)	Vías terciarias y secundarias; transporte mixto; materiales dañados o degradados	Exposición a sustancias peligrosas,	Derrames, lixiviación, contaminación de suelos y aguas,	Embalaje estanco; etiquetado; segregación; planes de

Tramo logístico	Condiciones operativas (vías, vehículos, carga)	Riesgos a las personas	Riesgos ambientales	Medidas de manejo y control
		intoxicación, cortes, incendios	liberación de metales pesados	contingencia; EPP especializado
5. Transporte a disposición final	Vías secundarias y primarias; vehículos especializados RESPEL; carga consolidada y clasificada	Exposición a químicos, incendios, accidentes mayores, inhalación de vapores	Derrames masivos, contaminación de suelo/agua, emisiones tóxicas	Transporte en vehículos autorizados; rotulado; kits de emergencia; rutas seguras; trazabilidad

Capítulo 4. Normativa asociada al transporte de los materiales que componen los sistemas fotovoltaicos.

Comentado [DA1]: Propongo esta estructura para el capitulo 4. Se ajusto, completo y organizo respetando el aporte de la compañera el capitulo 4, con base en la estructura principal del documento , uniendo en un solo bloque y suprimiendo las letras A,B,C ect...

4.1 Normativa Internacional asociada al transporte de sistemas fotovoltaicos

A nivel internacional, el transporte de los materiales de los sistemas fotovoltaicos se rige por el tipo de vía (marítima, aérea y terrestre), cada una con normas específicas de seguridad y operación. En el marco del Programa Colombia Solar, este proceso es estratégico, ya que implica la movilización de equipos desde puertos hasta zonas urbanos y rurales mediante esquemas multimodales. Dentro de estos componentes, las baterías de ion-litio son las más reguladas, al ser clasificadas como mercancías peligrosas, lo que exige condiciones estrictas de embalaje, etiquetado, documentación y manejo para garantizar la seguridad de las personas, el ambiente y los sistemas.

Transporte

El transporte internacional de los componentes de los sistemas fotovoltaicos, en su fase de importación hacia Colombia, se realiza principalmente por vía marítima desde Estados Unidos, Asia y Europa, constituyéndose el punto inicial de la cadena logística del presente protocolo. Este proceso se encuentra regulado por un conjunto de organismos internacionales que establecen lineamientos técnicos para garantizar la seguridad en la movilización de equipos, especialmente aquellos clasificados como mercancías peligrosas. son los siguientes:

- **Organización Marítima Internacional (OMI):** A través del Código IMDG, regula el transporte marítimo de mercancías peligrosas, definiendo requisitos de clasificación, embalaje, etiquetado, estiba, segregación y documentación, especialmente para baterías de ion-litio (Clase 9).
- **Organización de las Naciones Unidas (ONU):** Establece la base normativa global mediante la reglamentación modelo para el transporte de mercancías peligrosas y el manual de pruebas y criterios (Sección 38.3), que define los requisitos para baterías UN 3480 y UN 3481.
- **Organización de Aviación Civil Internacional (OACI) / International Air Transport Association (IATA):** Regulan el transporte aéreo de mercancías peligrosas, estableciendo restricciones específicas para baterías de litio, como límites de estado de carga (SoC ≤ 30%) y condiciones estrictas de embalaje.
- **Comisión Económica para Europa (UNECE):** Define los acuerdos ADR (carretera), RID (ferrocarril) y ADN (vías navegables), que armonizan el transporte terrestre y multimodal de mercancías peligrosas.

- **International Electrotechnical Commission (IEC):** Establece normas técnicas como IEC 62759-1, IEC 61215 e IEC 61730, relacionadas con la calidad, resistencia mecánica y comportamiento de los módulos fotovoltaicos durante transporte y operación.
- **Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA):** A través del Convenio de Basilea, regula el movimiento transfronterizo de residuos peligrosos, incluyendo baterías y residuos fotovoltaicos (RAEE).
- **Department of Transportation (DOT/PHMSA – Estados Unidos):** Mediante la regulación 49 CFR, establece requisitos específicos para el transporte de baterías de litio, alineados con estándares internacionales.
- **Unión Europea:** A través del Reglamento (UE) 2023/1542, incorpora criterios de sostenibilidad, trazabilidad y gestión del ciclo de vida de las baterías.
- **Autoridades asiáticas (CAAC, DGCA, MLIT):** Adoptan y complementan los estándares internacionales (ONU, OACI, IATA), incorporando requisitos adicionales de certificación en transporte aéreo.

4.2 Normativa Nacional asociada al transporte de sistemas fotovoltaicos

El marco normativo colombiano articula disposiciones de transporte, ambiente, gestión de residuos y regulación eléctrica aplicables a los componentes de los sistemas fotovoltaicos, especialmente en el contexto del Programa Colombia Solar, donde se requiere garantizar condiciones seguras de movilización, trazabilidad y manejo de materiales, incluyendo aquellos clasificados como peligrosos.

Ministerio de Transporte

- **Decreto 1079 de 2015:** Decreto Único Reglamentario del Sector Transporte, que establece las condiciones generales para la prestación del servicio de transporte de carga en Colombia e incorpora las disposiciones del transporte de mercancías peligrosas.
- **Decreto 1609 de 2002 (compilado en el 1079 de 2015):** Regula el manejo y transporte terrestre automotor de mercancías peligrosas, definiendo requisitos de señalización, documentación, capacitación del personal y condiciones técnicas de los vehículos.
- **Resolución 20223040045515 de 2022:** Reglamenta el Registro Nacional de Despachos de Carga (RNDC), garantizando la trazabilidad de los movimientos de carga en el territorio nacional.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible

- **Decreto 4741 de 2005:** Regula la gestión integral de residuos peligrosos (RESPEL), aplicable al manejo de baterías, aceites dieléctricos y otros componentes con potencial contaminante.
- **Decreto 1076 de 2015:** Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente, que compila la normativa relacionada con la gestión ambiental y el manejo de residuos.
- **Ley 1252 de 2008:** Establece disposiciones prohibitivas en materia ambiental relacionadas con la generación, manejo y disposición de residuos peligrosos.

Régimen de RAEE (Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos)

- **Ley 1672 de 2013:** Define la política pública para la gestión integral de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos, bajo el principio de responsabilidad extendida del productor.
- **Decreto 284 de 2018:** Reglamenta la gestión integral de RAEE, estableciendo obligaciones para productores, comercializadores y gestores.
- **Resolución 851 de 2022:** Define los lineamientos para la implementación de sistemas de recolección y gestión de RAEE en el país.

Ministerio de Minas y Energía

- **RETIE – Resolución 40117 de 2024:** Establece los requisitos técnicos para instalaciones eléctricas, garantizando la seguridad e integridad de los equipos fotovoltaicos durante su transporte, instalación y operación.

4.3 Retos normativos del transporte de sistemas fotovoltaicos en Colombia

En continuidad con el marco normativo nacional expuesto en el numeral 4.2, y en el contexto de la estrategia del Gobierno Nacional a través del Programa Colombia Solar, orientado a la masificación de soluciones energéticas en zonas rurales y Zonas No Interconectadas (ZNI), se identifican una serie de retos normativos y operativos que limitan la adecuada implementación del transporte de los sistemas fotovoltaicos y sus componentes a lo largo del territorio nacional:

- Clasificación, regulación y capacitación en transporte de mercancías peligrosas: Aunque el Decreto 1609 de 2002 (compilado en el Decreto 1079 de 2015) regula el transporte de mercancías peligrosas, su aplicación en territorios rurales presenta limitaciones, especialmente en baterías de ion-litio. En Colombia Solar persisten brechas de capacitación y certificación en transportistas locales.
- Limitaciones en infraestructura vial y regulación de última milla: No existen lineamientos específicos para transporte de equipos sensibles en vías terciarias, lo que genera microfisuras y pérdida de eficiencia en paneles.
- Vacíos en la regulación del transporte de componentes eléctricos: El RETIE regula instalación pero no el transporte, generando riesgos para inversores, tableros y demás componentes.
- Gestión de residuos y logística inversa: A pesar de Ley 1672 de 2013, Decreto 284 de 2018, Resolución 851 de 2022 y Decreto 4741 de 2005, existen limitaciones para transporte de residuos fotovoltaicos y baterías degradadas.
- Articulación normativa frente a la transición energética: Ley 1715 de 2014 y Ley 2099 de 2021 no desarrollan lineamientos específicos para transporte de sistemas fotovoltaicos.
- Falta de estandarización técnica para subsistemas: No existe guía nacional que integre transporte seguro de generación, conversión, almacenamiento, conducción, estructura y BOS.

Así las cosas, El marco normativo colombiano, aunque robusto, presenta vacíos en la regulación específica del transporte de tecnologías fotovoltaicas, especialmente en contextos rurales y Zonas No Interconectadas, lo que resalta la necesidad de fortalecer y complementar los instrumentos existentes para optimizar la implementación del Programa Colombia Solar. En este sentido, se requiere la formulación de decretos reglamentarios sectoriales y la estructuración de un Documento CONPES que articulen los sectores de transporte, ambiente y energía, estableciendo lineamientos técnicos, logísticos y de trazabilidad que garanticen la seguridad, eficiencia y sostenibilidad en la ejecución de proyectos de transición energética en el país.

Referencias bibliográficas

Asociación de Transporte Aéreo Internacional (IATA). (2026). Dangerous Goods Regulations (DGR) (67ª ed.). IATA.

Comisión Electrotécnica Internacional (IEC). (2021). IEC 61215: Terrestrial photovoltaic (PV) modules – Design qualification and type approval. IEC.

Congreso de la República de Colombia. (2013). Ley 1672 de 2013.

Congreso de la República de Colombia. (2014). Ley 1715 de 2014.

Congreso de la República de Colombia. (2021). Ley 2099 de 2021.

Fraunhofer ISE. (2020). Photovoltaics report.

IEA PVPS. (2021). Transport, handling and installation of PV modules.

IEA – International Energy Agency. (2020). End-of-life management of photovoltaic panels.
IRENA. (2016). End-of-life management: Solar photovoltaic panels.
Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC). (s.f.). NTC 3972: Transporte de mercancías peligrosas. Clase 9.
International Maritime Organization (IMO). (2024). International maritime dangerous goods (IMDG) code (Amendment 41-22/24).
Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2005). Decreto 4741 de 2005.
Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2015). Decreto 1076 de 2015.
Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2023). Guía técnica para la gestión integral de RAEE.
Ministerio de Ambiente. (s.f.). Guías ambientales para almacenamiento y transporte de sustancias peligrosas.
Ministerio de Minas y Energía. (2024). Resolución 40117 de 2024 (RETIE).
Ministerio de Trabajo. (2015). Decreto 1072 de 2015.
Ministerio de Transporte. (2002). Decreto 1609 de 2002.
Ministerio de Transporte. (2015). Decreto 1079 de 2015.
Ministerio de Transporte. (2022). Resolución 45515 de 2022 (RNDC).
Naciones Unidas. (2023). Recomendaciones relativas al transporte de mercancías peligrosas: Reglamentación modelo (23ª ed.).
OSHA. (2016). Material handling and storage guidelines.
Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (UNEP). (2019). Guidelines for the environmentally sound management of hazardous materials.
Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME). (2025). Plan de expansión de referencia generación-transmisión 2025–2039.
United Nations. (2019). Recommendations on the transport of dangerous goods: Model regulations.
Área Metropolitana del Valle de Aburrá. (s.f.). Guía para la gestión de residuos peligrosos (RESPEL).