4. Caminos de Herradura y Caminos Peatonales





4.1 Caracterización de las vías

Los caminos de herradura y los caminos peatonales representan los últimos eslabones de la cadena logística en el programa Colombia Solar y, en términos de complejidad operativa, los más exigentes de todo el sistema de transporte. No son variantes menores de una vía convencional: son entornos radicalmente distintos en los que las reglas del transporte motorizado dejan de aplicar y donde la logística depende enteramente de la capacidad física de animales de carga o de personas. Esta distinción no es semántica; tiene implicaciones técnicas, operativas y de seguridad que el protocolo debe abordar con la misma rigurosidad que cualquier otro segmento de la cadena.

Los caminos de herradura son senderos no vehiculares, generalmente de entre 60 centímetros y un metro y medio de ancho, trazados históricamente para el tránsito de personas y animales de carga —mulas, burros y caballos— en terrenos de alta complejidad topográfica. Su superficie es irregular, sin tratamiento y altamente variable: piedra suelta, tierra compactada, raíces expuestas, cruces de quebradas sin infraestructura de paso y tramos con pendientes que en zonas de montaña superan el 30%. No existe mantenimiento formal de estos corredores y su estado depende directamente de las condiciones climáticas recientes. En la región Andina y en algunas zonas de la Sierra Nevada de Santa Marta —territorios con presencia significativa de comunidades rurales objetivo del programa— estos caminos constituyen la única vía de acceso durante períodos que pueden extenderse a lo largo de todo el año o volverse completamente intransitables en temporada de lluvias.

Los caminos peatonales comparten con los de herradura su condición no vehicular y su irregularidad superficial, pero presentan características aún más restrictivas desde la perspectiva logística: anchos de senda frecuentemente inferiores a 60 centímetros, presencia de escalinatas, puentes improvisados sobre troncos o cables, tramos en roca viva empinada y obstáculos físicos que impiden el paso de cualquier medio de carga que no sea el cuerpo humano. En estos corredores no es posible el uso de animales de carga, bien sea por las dimensiones del sendero, por la geometría de los obstáculos o por la peligrosidad del terreno para el animal. El transporte se realiza exclusivamente mediante cargue humano, con todas las limitaciones físicas, ergonómicas y de seguridad que esa condición implica.

Ambos tipos de vía comparten un conjunto de condiciones climáticas adversas que agravan sus características intrínsecas: lluvias que convierten la superficie en barro resbaladizo, neblina que reduce la visibilidad y la percepción de profundidad en tramos de altura, calor extremo en zonas bajas que genera fatiga acelerada en personas y animales, y polvo en épocas secas que penetra cualquier embalaje no hermético. La exposición de la carga a estas condiciones es directa e inevitable, dado que no existe cubierta o protección estructural en estos senderos. Esta exposición ambiental continua, combinada con la manipulación manual constante que estos trayectos exigen, configura el escenario de mayor vulnerabilidad para los componentes fotovoltaicos en toda la cadena logística del programa.

4.2 Análisis de riesgo del transporte

4.2.1 Entrada: traslado de equipos y componentes fotovoltaicos

El transporte de sistemas fotovoltaicos por caminos de herradura y peatonales introduce una transformación fundamental en la naturaleza del riesgo respecto a los segmentos anteriores de la cadena: mientras en vías vehiculares el riesgo dominante es la vibración mecánica transmitida por el vehículo, en estos corredores el riesgo central es el impacto físico directo y la manipulación manual no controlada. Esta distinción tiene consecuencias técnicas precisas sobre cada subsistema del sistema fotovoltaico.

Los módulos fotovoltaicos, diseñados para resistir décadas de exposición ambiental estática pero no para soportar ciclos de impacto y flexión manual, enfrentan en estos trayectos su mayor amenaza de daño físico irreversible. En el transporte con animales de carga, los módulos deben ser asegurados en los costados del animal mediante amarres que, si no distribuyen uniformemente la presión sobre el área superficial del panel, generan puntos de flexión concentrada que rompen el vidrio templado o fracturan las celdas en patrones radiales. Un amarre excesivamente tenso sobre el marco del módulo puede introducir tensiones que se propagan hacia el encapsulante y las celdas, produciendo cracking que no es visible hasta que se realiza una inspección con electroluminiscencia —tecnología que no está disponible en campo. En el transporte humano, el problema es análogo pero agravado: el operario ajusta la carga según su percepción de comodidad y seguridad personal, no según los requerimientos técnicos del equipo, lo que introduce una variabilidad de manejo que ningún protocolo puede controlar completamente sin formación específica previa.

La caída de la carga —del animal o del operario— es el evento de mayor probabilidad en estos corredores y el de consecuencias más severas para los equipos. Un módulo fotovoltaico que cae desde la altura de carga de una mula —aproximadamente 1,2 metros— sobre terreno rocoso sufre con alta probabilidad la ruptura del vidrio frontal, el desprendimiento de la caja de conexiones y la fractura de múltiples celdas. Este daño es total e irreparable en campo: el módulo queda inutilizable y su gestión como residuo RAEE debe iniciarse en el sitio, con todas las dificultades que eso implica en un entorno sin acceso vehicular. La probabilidad de caída no es despreciable: el terreno irregular, las pendientes pronunciadas, los pasos estrechos sobre quebradas y la fatiga acumulada del animal o del operario son factores que interactúan para hacer de este evento una contingencia real y frecuentemente documentada en operaciones similares.

Los inversores y reguladores de carga presentan en este escenario una vulnerabilidad específica que no se manifiesta con la misma intensidad en segmentos vehiculares: los golpes repetidos contra rocas, árboles y obstáculos del camino durante el trayecto. En el transporte con animal de carga, la carga lateral del equipo queda expuesta a contactos continuos con la vegetación, las paredes de roca y los bordes del sendero, generando impactos de baja energía individual pero alta frecuencia acumulada que aflojan conexiones internas, desplazan componentes electrónicos de sus soportes y generan microfracturas en tarjetas de circuito. El ingreso de polvo, humedad y partículas orgánicas a través de embalajes deteriorados por el roce continuo completa un cuadro de degradación que, como en el caso de los módulos, puede no ser detectable visualmente en el punto de recepción.

Las baterías de ion-litio representan en estos corredores el riesgo de mayor gravedad potencial y de más difícil gestión. Su peso —que en sistemas de almacenamiento de mediana capacidad puede superar los 30 kilogramos por unidad— las convierte en una carga crítica tanto para el animal como para el operario, incrementando la probabilidad de caída y el esfuerzo físico requerido para su manejo. Un impacto severo sobre una batería de litio en un corredor de montaña, lejos de cualquier infraestructura de respuesta, puede desencadenar un evento de fuga térmica cuyas consecuencias —incendio, emisión de gases tóxicos como fluoruro de hidrógeno, quemaduras graves— son prácticamente inmanejables en ese entorno. Esta condición plantea una pregunta que el protocolo debe responder con claridad: ¿es el transporte de baterías de litio por caminos de herradura o peatonales una operación que puede realizarse con los estándares de seguridad mínimos requeridos, o existen umbrales de riesgo que justifican la búsqueda de alternativas tecnológicas —como baterías de plomo-ácido sellado de menor riesgo térmico— para los sistemas destinados a estas zonas?

El subsistema de conducción y protección eléctrica enfrenta en estos trayectos una amenaza específica derivada del rozamiento y la fricción: el cableado y los conectores MC4, si no están adecuadamente protegidos dentro de embalajes rígidos, pueden sufrir abrasión del aislamiento por contacto continuo con superficies rugosas durante el trayecto, generando puntos de exposición del conductor que solo se manifestarán como fallas eléctricas durante la operación. Este mecanismo de daño —silencioso, acumulativo e invisible— es especialmente relevante en trayectos largos donde la carga es reacomodada múltiples veces por el operario o reajustada sobre el animal en los puntos de descanso.

Desde la perspectiva de las personas, los caminos de herradura y peatonales configuran el escenario de mayor riesgo laboral de todo el protocolo, sin excepción. En el transporte con tracción animal, el operario está expuesto a reacciones imprevisibles del animal ante ruidos, obstáculos, condiciones de calor extremo o fatiga: una mula que pierde el equilibrio en un tramo con pendiente pronunciada puede arrastrar al operario, aplastarlo con la carga o generar una caída en cadena si el animal va en fila con otros. La conducción de animales de carga con equipos pesados y voluminosos en terrenos de alta complejidad exige habilidades específicas que no todo el personal logístico posee, y la ausencia de formación adecuada en manejo animal es un factor de riesgo que se suma a las condiciones del terreno.

En el transporte humano, el riesgo laboral adquiere una dimensión ergonómica y de salud pública que trasciende lo puramente accidental. Los módulos fotovoltaicos estándar pesan entre 20 y 25 kilogramos; los inversores de string, entre 15 y 40 kilogramos; las baterías, como ya se mencionó, pueden superar los 30 kilogramos. El cargue manual de estos equipos en trayectos que pueden durar entre una y cuatro horas, con pendientes pronunciadas y terreno irregular, somete al operario a cargas físicas que superan ampliamente los límites ergonómicos establecidos por la normativa de seguridad y salud en el trabajo —el Decreto 1072 de 2015 y la norma técnica colombiana NTC 5693 establecen límites de carga manual que en estos escenarios son sistemáticamente excedidos. Las lesiones musculoesqueléticas, las caídas por pérdida de equilibrio bajo carga pesada y los accidentes en cruces de quebradas o tramos inestables son consecuencias reales y documentadas en operaciones de este tipo, no escenarios hipotéticos.

La fatiga como factor de riesgo merece atención específica en estos corredores. A diferencia de la fatiga del conductor en vía vehicular, que afecta principalmente la atención y los reflejos, la fatiga física del operario en cargue manual afecta directamente su capacidad de sostener la carga, mantener el equilibrio y tomar decisiones de seguridad en tiempo real. Un operario fatigado en el tramo final de un trayecto de tres horas con 25 kilogramos al hombro tiene una probabilidad significativamente mayor de caída que al inicio del recorrido, precisamente cuando la acumulación de obstáculos superados puede haber generado una percepción falsa de control sobre el terreno.

Desde la perspectiva ambiental, la ausencia de infraestructura de contención en estos corredores convierte cualquier derrame o fuga en un evento de contaminación directa sobre ecosistemas frecuentemente sensibles. Los caminos de herradura y peatonales que conducen a comunidades rurales aisladas atraviesan en muchos casos zonas de alta biodiversidad, rondas de quebradas, humedales de altura y corredores biológicos que son precisamente los entornos que caracterizan la Colombia profunda donde el programa tiene mayor vocación de intervención. Una fuga de aceite dieléctrico de un transformador dañado en una caída, o el derrame de electrolito de una batería fracturada, en estos entornos no tiene posibilidad real de contención: el líquido se incorpora directamente al suelo y a los cuerpos de agua superficiales, con efectos sobre la fauna y la flora que pueden persistir durante años y que generan una responsabilidad ambiental directa sobre el programa.

4.2.2 Salida: gestión de residuos RAEE y RESPEL

La gestión de residuos en caminos de herradura y peatonales enfrenta una paradoja operativa fundamental: los mismos factores que hacen difícil el ingreso de equipos nuevos hacen prácticamente inviable la salida de residuos bajo condiciones de manejo adecuado. Un módulo fracturado, una batería deteriorada o un inversor dañado deben ser evacuados del sitio por el mismo corredor por el que ingresaron, con las mismas limitaciones de capacidad de carga, las mismas condiciones de terreno y el mismo riesgo de daño adicional durante el trayecto de salida.

La diferencia crítica es que en la salida los materiales han perdido su integridad estructural, lo que los hace más peligrosos de manejar: un módulo fracturado expone bordes de vidrio cortante y posibles trazas de metales pesados; una batería dañada puede tener fugas activas de electrolito; un inversor con carcasa comprometida puede exponer componentes energizados si no fue correctamente desenergizado antes del retiro. El manejo de estos residuos por parte de operarios sin formación específica en gestión de RAEE y RESPEL, en un entorno sin equipos de protección adecuados y sin posibilidad de contención, representa un riesgo simultáneo para la salud del trabajador, para el ecosistema del corredor y para el cumplimiento normativo del programa.

Esta realidad impone al protocolo una exigencia que va más allá de la logística inversa convencional: la gestión de residuos en estos corredores debe ser planificada desde el momento del diseño del sistema, no como una contingencia posterior. Ello implica definir previamente los procedimientos de embalaje de emergencia para residuos en campo, los equipos de protección personal que deben acompañar cada operación de transporte en estos corredores, y los acuerdos con gestores autorizados de RAEE y RESPEL que tengan capacidad real de operar en zonas de difícil acceso.

4.3 Nivel de riesgo y articulación sistémica

Los caminos de herradura y los caminos peatonales comparten la calificación de riesgo más alto del protocolo —Muy Alto— pero por razones que, aunque convergentes, tienen matices diferenciados que el análisis debe preservar. En los caminos de herradura, el riesgo está distribuido entre la imprevisibilidad del animal, las condiciones del terreno y la manipulación manual en los puntos de cargue y descargue. En los caminos peatonales, el riesgo se concentra enteramente en la capacidad física y la formación del operario, eliminando cualquier variable de control mecánico o animal y haciendo de la persona el único sistema de gestión de la carga disponible.

Lo que unifica ambos escenarios, y lo que los distingue cualitativamente de todos los demás tipos de vía analizados en este protocolo, es la ausencia total de mediación tecnológica entre la carga y el entorno. No hay suspensión vehicular que amortigüe los impactos, no hay cabina que proteja los equipos de la lluvia, no hay sistema de amarre estandarizado que garantice la estabilidad de la carga, y no hay capacidad de respuesta inmediata ante un evento de emergencia. En estos corredores, el protocolo de transporte debe ser capaz de anticipar y gestionar un entorno donde prácticamente todas las variables que en otros segmentos de la cadena pueden ser controladas, aquí son inciertas.

Esta condición tiene una implicación estratégica que trasciende el análisis de riesgo individual: la decisión de transportar sistemas fotovoltaicos por caminos de herradura o peatonales no debe tomarse únicamente con base en la viabilidad logística inmediata, sino considerando el balance entre el riesgo acumulado sobre los equipos, la seguridad del personal, el impacto ambiental potencial y la sostenibilidad del programa en esas comunidades. En algunos casos, ese balance puede justificar el rediseño del sistema fotovoltaico para adaptarlo a las restricciones del corredor —módulos de menor formato y peso, sistemas de almacenamiento de menor riesgo térmico, estructuras desmontables en piezas de menor dimensión— antes que forzar el transporte de equipos estándar por corredores que no están en condiciones de recibirlos sin daño significativo.