

# Euroclima

## Informe de producto 3 – parte 1

Recomendaciones y propuesta de acciones con  
enfoque de transición energética y descarbonización  
de la logística de la cadena cárnica uruguaya

Del 19 de enero al 13 de marzo de 2026

Uruguay

Ing. Stella Cristobal, Ing. Sofía Donatti,

Ing. Guadalupe Martínez, Arq. Andrés Olivera

Implementado por



---

Este informe se ha elaborado para el [Programa Euroclima de la Unión Europea](#), a solicitud de la Fundación para la Internacionalización de las Administraciones Públicas (FIAP) en el marco de la acción "CM-DEMA-2025-076".

El equipo de coordinación local estuvo liderado por el Instituto Nacional de Logística (INALOG) junto al Ministerio de Ambiente (MA) y la Agencia Uruguaya de Cooperación Internacional (AUCI).

---

## Contenido

<b>1. Introducción</b> .....	6
<b>2. Aplicabilidad de casos exitosos</b> .....	9
<b>3. Soluciones logísticas y tecnológicas</b> .....	14
<b>4. Análisis de costos y beneficios</b> .....	36
<b>5. Acceso a programas de compensación de carbono</b> .....	42
<b>6. Políticas comerciales sostenibles</b> .....	46
<b>7. Líneas de trabajo para un plan de implementación</b> .....	60
<b>8. Conclusiones</b> .....	72
<b>9. Agradecimientos</b> .....	77
<b>10. Bibliografía</b> .....	79
<b>11. Anexos</b> .....	81

## Acrónimos

ACR	American Carbon Registry
AFIR	Alternative Fuels Infrastructure Regulation
ALUR	Alcoholes del Uruguay S.A.
AMPC	Australian Meat Processor Corporation
ANCAP	Administración Nacional de Combustibles, Alcohol y Portland
ANP	Administración Nacional de Puertos
BEN	Balance Energético Nacional
BL	Bill of Lading
CII	Indicador de Intensidad de Carbono
CSRD	Corporate Sustainability Reporting Directive
DEFRA	Department of Environment, Food & Rural Affairs
DUA	Documento Único Aduanero
ESG	Environmental, Social and Governance
ESRS	European Sustainability Reporting Standards
ETS	Emissions Trading System
EU	Unión Europea
EUDR	EU Deforestation Regulation
GEI	Gases de Efecto Invernadero
GHG	Greenhouse Gases
GNC	Gas Natural Comprimido
GPS	Sistema de Posicionamiento Global
HEFA	Hydroprocessed Esters and Fatty Acids
HFC	Hidrofluorocarbonos
HVO	Hydrotreated Vegetable Oil
IMO	Organización Marítima Internacional
INAC	Instituto Nacional de Carnes

INALOG	Instituto Nacional de Logística
ISO	International Organization for Standardization
MA	Ministerio de Ambiente
MEF	Ministerio de Economía y Finanzas
MGAP	Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca
MIEM	Ministerio de Industria, Energía y Minería
MIPYMES	Micros, Pequeñas y Medianas Empresas
MRV	Medición, reporte y verificación
MTOP	Ministerio de Transporte y Obras Públicas
NDC	Contribuciones Determinadas a Nivel Nacional
OACI	Organización de Aviación Civil Internacional
OMI	Organización Marítima Internacional
OPS	Onshore Power Supply
SAF	Sustainable Aviation Fuel
SNIG	Sistema Nacional de Información Ganadera
UE	Unión Europea
UTE	Administración Nacional de Usinas y Transmisiones Eléctricas
VAD	Vehículos de Alto Desempeño
WTW	Well to wake
VCS	Verified Carbon Standard
ZEV	Zero Emission Vehicles

## 1. Introducción

El presente documento corresponde al Producto 3 de la consultoría requerida por FIAP y llevada adelante por LATU con el fin de contar con los servicios de coordinación, apoyo y asesoría para la definición de una propuesta de acciones a nivel nacional para el desarrollo de la transición energética en la logística y el transporte de la cadena cárnica en sus distintas fases productivas y comerciales. Su finalidad es avanzar en la descarbonización de la logística asociada, así como sensibilizar y alinear a los actores públicos y privados involucrados en dicha cadena.

### **OBJETIVO DE LAS RECOMENDACIONES Y LA PROPUESTA DE ACCIONES**

El objetivo principal de este trabajo es el diseño de una propuesta estratégica correspondiente a las acciones para avanzar en la descarbonización de la logística y el transporte de la cadena cárnica uruguaya, considerando escenarios de reducción de emisiones, análisis de costos y beneficios, y oportunidades de financiamiento y certificación.

Para este cometido se desarrollaron siete ejes temáticos que profundizan aspectos que se abordaron en el Producto 2 (diagnostico) como ser los normativos, casos de éxito, certificaciones, alianzas estratégicas y oportunidades comerciales en mercados internacionales y se incorporan elementos asociados a la evaluación de los escenarios de mejora en base al uso de nuevas tecnologías y mejoras desde la gestión logística de la cadena.

### **ESTRUCTURA DEL ENTREGABLE**

A efectos de una mejor presentación de los contenidos desarrollados, el entregable se estructura en 2 partes diferenciadas, una primera parte correspondiente al análisis cualitativo de las diferentes alternativas tecnológicas y de gestión para descarbonizar la cadena logística cárnica y una segunda parte correspondiente al análisis cuantitativo de las actuales emisiones de GEI de la cadena en estudio y su comparativo frente a las diferentes alternativas de mejora propuestas.

A continuación, se sintetiza el contenido de cada eje temático desarrollado:

#### **Parte 1:**

1. Estudio de experiencias internacionales en descarbonización de la cadena logística, identificando los factores clave de éxito y condiciones habilitantes. Determinación de las acciones requeridas para su aplicabilidad al contexto uruguayo.
2. Planteo de propuestas de optimización de rutas, consolidación de cargas, uso de transporte multimodal. Incorporación del uso de vehículos que utilizan combustibles alternativos u otras tecnologías limpias y recomendaciones para infraestructura de apoyo.
3. Evaluación económica y ambiental de las medidas propuestas, atendiendo a

los costos de inversión, operación y mantenimiento. Identificación de los beneficios en términos de reducción de emisiones, acceso a mercados, eficiencia y reputación.

4. Pertinencia del acceso a los programas de compensación de carbono considerando los requisitos de elegibilidad y condiciones de acceso, así como el potencial de monetización de la reducción de emisiones.
5. Análisis de las tendencias regulatorias de sostenibilidad en mercados clave y los requisitos para alinear la cadena cárnica nacional con las exigencias ambientales crecientes a nivel internacional.
6. Propuesta de acciones para la adopción de tecnologías limpias con la determinación de las inversiones requeridas para la infraestructura y el desarrollo de las capacidades. Definición de los indicadores de seguimiento y evaluación del proceso de descarbonización de la cadena cárnica.

## Parte 2:

1. Modelado de escenarios con diferentes niveles de adopción de tecnologías limpias y mejoras logísticas estimando la potencial reducción de emisiones de GEI.

## METODOLOGÍA

La metodología aplicada para este producto combina el uso de herramientas cuantitativas, cualitativas y comparativas que permitieron la construcción de un análisis integral y contextualizado, generando los elementos propositivos en concordancia con los objetivos establecidos. Esto incluye la revisión documental de fuentes primarias y secundarias; entrevistas con actores clave del sector público y privado; análisis comparativo de casos internacionales; modelado de escenarios de mejora con base a la información sobre diferentes alternativas energéticas y a estudios previos sobre el sector y la evaluación multicriterio de las medidas propuestas.

Como resultado del trabajo se establecen escenarios cuantificados de reducción de emisiones, así como una batería de recomendaciones técnicas, económicas y regulatorias. Esta propuesta de acciones priorizadas y contextualizadas ofician como insumos para la elaboración de un plan nacional de transición energética en la cadena logística cárnica con el fin de fortalecer la competitividad del sector en mercados que valoran la sostenibilidad, contribuyendo al posicionamiento del país como referente en producción responsable y transporte eficiente.

## COYUNTURA LOCAL Y REGIONAL PARA EL SECTOR CÁRNICO

En 2025, el rubro carne bovina encabezó el desempeño exportador, registrando una expansión interanual del 33%, impulsada por el fortalecimiento de la demanda en los principales mercados de destino (Estados Unidos, China y la Unión Europea), sumado a la revalorización del precio promedio de exportación del 19%.

Desde la perspectiva de los destinos para el mismo año, China se consolidó como

el principal socio comercial, con un incremento del 13,6% en las compras, explicado en gran medida por mayores colocaciones de soja y carne bovina, seguido por Brasil y la Unión Europea en tercer lugar con un crecimiento del 3,5%, fundamentalmente asociado al dinamismo de las exportaciones de carne bovina. Estados Unidos se posicionó en el cuarto lugar, con una expansión del 30,3%, atribuida en parte por el aumento de las ventas de carne bovina.

Las exportaciones de carne bovina con destino a la Unión Europea representaron el 32% del total exportado, las ventas a ese destino fueron un 60% por encima del nivel del año anterior, como resultado combinado de mejores precios internacionales y mayores volúmenes embarcados. Asimismo, las exportaciones de subproductos cárnicos exhibieron un aumento superior a seis veces respecto al período previo (UEU, 2026).

A nivel regional, desde el 2024 las compras desde la Unión Europea se han mantenido en aumento, con un crecimiento, al cierre del año, del 11,3%. La región tiene, al cierre del 2024, una cuota de mercado del 5,3% de las importaciones totales realizadas por Unión Europea fuera de este bloque.

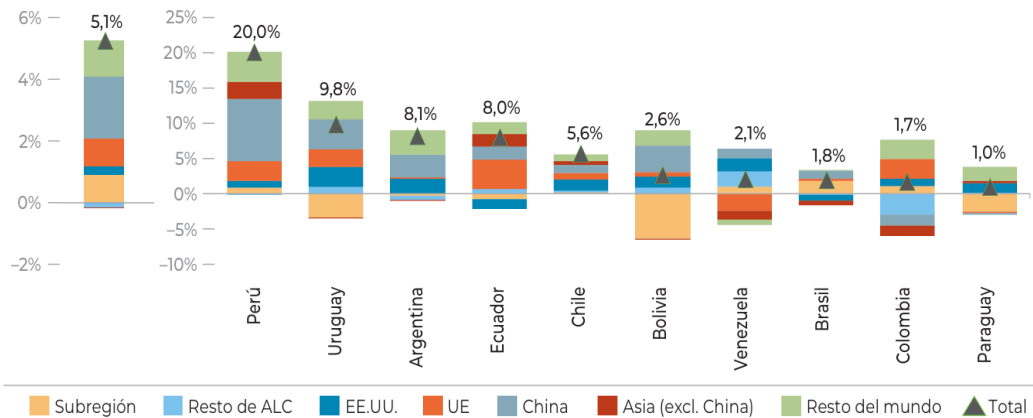
En cuanto a las importaciones de China desde la región se mantuvieron sin variaciones en 2025 respecto al año anterior, siendo la cuota de mercado de América Latina y el Caribe de 9,6% en 2025.

Las compras de Estados Unidos a la región crecieron de forma estable en el último año, pero con cierta desaceleración durante el segundo semestre de 2025. Esto responde en parte al mercado adelanto de compras en el primer semestre para sortear las subas anunciadas para los aranceles, bajando luego la participación regional de manera leve en 0,1 puntos porcentuales (20,0%).

Para las compras intrarregionales se estimó un crecimiento del 3,6% en 2025 luego de una contracción durante el año previo.

El aumento de las exportaciones de Uruguay se estimó en 9,8% para el 2025. Los envíos con destino a China responden al 44% del aumento, seguida por Estados Unidos con 28% y la Unión Europea con 26%. Respecto a la región como destino comercial, las ventas se redujeron. Las exportaciones de carne son responsables de más del 75% del aumento total de las ventas al exterior (BID, 2026).

Gráfico 1: Contribución de los principales socios a la variación total del valor de las exportaciones de bienes de Sudamérica (Tasa de variación anual y puntos porcentuales, 2025). Fuente: BID, Sector de Productividad, Comercio e Innovación.



Finalmente, el Acuerdo Mercosur-Unión Europea concluido en diciembre de 2024, firmado en enero de 2026 y actualmente en proceso de ratificación, tendría un impacto inmediato en la rentabilidad de las exportaciones existentes por eliminación del arancel de la Cuota Hilton. Según el acuerdo, Uruguay mantendrá su cupo histórico de 5.600 toneladas dentro de la Cuota Hilton, con carne de alta calidad, pero el arancel actual del 20% se elimina totalmente, pasando a 0% desde la entrada en vigor del acuerdo.

A partir de este, se crearía una nueva cuota de carne bovina de 99.000 toneladas anuales (peso canal) para todo el Mercosur, que ingresaría con un arancel intra-cuota del 7,5%, muy inferior al arancel extra-cuota europea (40-50%). El volumen será distribuido entre Uruguay, Argentina, Brasil y Paraguay, sin asignación fija predeterminada. La cuota se implementa gradualmente en un plazo de 5 años. Las exportaciones de carne bovina fuera de las cuotas preferenciales seguirán pagando los aranceles plenos de la UE, que oscilan entre 40% y 50% (UEU, 2026).

## 2. Aplicabilidad de casos exitosos

Las experiencias internacionales en descarbonización del transporte y la logística ofrecen aprendizajes valiosos para el diseño de políticas públicas aplicables a la cadena cárnica uruguaya, un sector intensivo en transporte refrigerado y con alta dependencia de la competitividad logística. La revisión de marcos de la Unión Europea, Nueva Zelanda, Estados Unidos, Australia y Chile evidencia que la transición hacia sistemas logísticos bajos en carbono requiere una combinación de regulación, incentivos económicos, instrumentos de medición y articulación institucional.

En la Unión Europea, la Estrategia de Movilidad Sostenible e Inteligente y el Pacto Verde Europeo destacan la importancia de la planificación de largo plazo, la digitalización de la cadena logística y la eficiencia del transporte de carga como

pilares para reducir emisiones. Para Uruguay, esto sugiere la necesidad de desarrollar un marco estratégico nacional específico para transporte de carga sostenible, incluyendo hojas de ruta sectoriales. La cadena cárnica podría beneficiarse de planes que prioricen corredores logísticos claves, mejoren la trazabilidad de emisiones y promuevan la incorporación progresiva de tecnologías limpias.

El caso de Nueva Zelanda es particularmente relevante para Uruguay por su perfil agroexportador. Su enfoque combina metas nacionales de reducción de emisiones con estrategias logísticas específicas que fortalecen la resiliencia y competitividad de las cadenas productivas. Este modelo ofrece insumos para políticas uruguayas orientadas a integrar la mitigación climática con la eficiencia operativa del transporte de carne, como mecanismos de evaluación de desempeño ambiental de flotas, incentivos para tecnologías bajas en carbono y programas de cooperación público-privada en infraestructura.

Estados Unidos aporta aprendizajes sobre instrumentos voluntarios, como el SmartWay Transport Partnership, que promueve la mejora continua mediante medición estandarizada y benchmarking. Esta lógica podría ser aplicada en Uruguay a través de un programa nacional de “logística baja en carbono” que involucre frigoríficos, transportistas y operadores portuarios, generando información comparable y promoviendo mejores prácticas sin exigir grandes inversiones regulatorias iniciales. Asimismo, la experiencia del Clean Ports Program destaca el rol estratégico de los puertos en la descarbonización de cadenas exportadoras, lo cual abre oportunidades para fortalecer la infraestructura energética y operativa del puerto de Montevideo respecto a tecnologías de cero emisiones.

El caso australiano, con el desarrollo de la plataforma DiVA para medir emisiones en transporte pesado de la industria cárnica, muestra una herramienta concreta para mejorar la competitividad climática del sector. Este tipo de soluciones podría inspirar un programa uruguayo para la medición de emisiones en transporte refrigerado, integrando sensores, sistemas de monitoreo y análisis en tiempo real. Generar líneas base de emisiones sería un paso clave para el acceso a mercados que exigen transparencia climática, como la Unión Europea.

En América Latina, Chile demuestra que políticas de electromovilidad clara y progresiva pueden acelerar la adopción de tecnologías limpias incluso en contextos institucionales similares al uruguayo. Su experiencia sugiere que Uruguay podría avanzar hacia un marco normativo que incentive la incorporación gradual de flotas eléctricas para transporte de carga liviana y mediana, articulado con la matriz eléctrica renovable del país. Esto sería especialmente relevante en etapas de transporte interno de la cadena cárnica.

Finalmente, los incentivos existentes en países del ZEV Transition Council dan la pauta sobre la diversidad de instrumentos económicos aplicables, desde subsidios directos hasta créditos fiscales y apoyos a la compra de vehículos de cero emisiones. Uruguay podría adaptar estos esquemas a su escala mediante

incentivos focalizados a empresas transportistas que operen en cadenas exportadoras estratégicas como la cárnica, priorizando tecnologías de transición (vehículos eléctricos, híbridos enchufables, o biocombustibles avanzados) con alcance a unidades de transporte de carga media o pesada.

En conjunto, las experiencias internacionales indican que la descarbonización del transporte asociado a la carne requiere políticas públicas que combinen planificación estratégica, incentivos económicos, digitalización, medición de emisiones y cooperación interinstitucional. Estas herramientas permitirían a Uruguay mantener la competitividad de su cadena cárnica en mercados exigentes, al tiempo que consolidan su liderazgo regional en sostenibilidad.

## **FACTORES DE ÉXITO Y CONDICIONES HABILITANTES**

En su ponencia, “Uruguay: ¿cómo pensamos el futuro de la energía?”, el Dr. Rafael Popper (Popper, 2025) plantea desafíos y oportunidades para la descarbonización del transporte de carga en el marco de la segunda transición energética para el país. De su análisis se desprenden los siguientes aspectos clave:

1. Producción local de hidrógeno verde y combustibles sintéticos para el transporte carretero pesado, de pasajeros y buques como oportunidad estratégica mediante el uso de energía renovable local, minimizando la dependencia de gasoil importado. Sinergias entre las diferentes alternativas (hidrógeno, electricidad y biocombustibles).
2. Creación de redes inteligentes y sistemas de almacenamiento que habiliten la instalación de cargadores de alta potencia en rutas aptos para movilidad pesada. Desarrollo de corredores logísticos limpios que integren a los puertos con las rutas nacionales con zonas de abastecimiento energético limpio para camiones y buques.
3. Digitalización e inteligencia del sistema energético. Uso de datos e IA para la optimización de rutas, el mantenimiento predictivo de los componentes del sistema y su integración eficiente. Gestión inteligente de la demanda para flotas eléctricas.
4. Integración con la bioeconomía y la agroindustria mediante el uso de residuos forestales y agrícolas para bioenergía y biohidrógeno, pudiendo abastecer al transporte rural y de carga especializada.

## **DESAFÍOS O BARRERAS PARA SU APLICABILIDAD**

A través del análisis bibliográfico, normativo y las entrevistas realizadas a referentes a nivel nacional (ver listado en 9. Agradecimientos), se identificaron de manera preliminar algunas alternativas para la descarbonización de la cadena. No obstante, desde una visión sistémica surgen otros elementos que es necesario tener en cuenta y gestionar de forma temprana para minimizar los riesgos asociados a una transición tecnológica. A continuación, se detallan los elementos críticos en ese

contexto de cambio:

1. Incertidumbre tecnológica, dado que a la fecha no hay una proyección sobre qué tan rápido incorporará los cambios el transporte de carga y cuáles serán los vectores energéticos dominantes (hidrógeno, baterías, bioenergía). Esto conlleva al aumento de los riesgos al momento de decidir la inversión en tecnologías que están en una fase temprana a nivel nacional.
2. Falta de infraestructura adaptada a los nuevos combustibles. Esto se refleja en la falta de equipamiento en los recintos portuarios para suministro de hidrógeno o combustibles limpios a buques y camiones de carga, además de la inexistencia de estaciones de hidrógeno o puntos de carga de alta potencia dado que la logística nacional aún está orientada al consumo de gasoil.
3. Competitividad e incertidumbre económica. Al momento no se dispone de la suficiente información para determinar si el hidrógeno verde será una alternativa competitiva al igual que la producción de combustibles sintéticos y su demanda energética. En la actualidad, los costos iniciales o de reconversión siguen siendo elevados para las flotas de camiones, lo que limita adopción temprana, sumado a los limitados incentivos económicos para la adquisición de vehículos de carga pesada con tecnologías limpias.
4. Ritmo de inversión insuficiente en redes inteligentes y almacenamiento. Esta infraestructura debería acompañar o anticiparse a la renovación de las flotas de transporte de carga, asegurando la confiabilidad del suministro.
5. Velocidad de cambio de las flotas de transporte. Al ser características de este sector: el recorrido de largas distancias, la necesidad de potencia y autonomía, así como los elevados costos de renovación de flotas, estos aspectos dificultan determinar la dinámica con que las flotas pasarán del uso de diésel a hidrógeno, electricidad o biocombustibles avanzados.
6. Falta de señales regulatorias de largo plazo que aseguren una política energética de Estado que trascienda los diferentes gobiernos. Se requiere como mínimo la existencia de incentivos fiscales estable, la reglamentación aplicable al uso de las energías limpias, normas de eficiencia y estándares de emisiones a nivel nacional.
7. Aceptación social y justicia territorial. Los cambios en rutas, puertos y zonas de operaciones logísticas pueden generar tensiones en diferentes grupos de interés. A modo de ejemplo los puntos de producción de hidrógeno o de bioenergía pueden afectar a comunidades circundantes. En cuanto a los sindicatos y asociaciones de transportistas, puede existir preocupación o incertidumbre, ya sea por los costos de reconversión o por como afecte a la demanda de mano de obra (Popper, 2025).

## AVANCES Y OPORTUNIDADES A NIVEL PAÍS

Uruguay cuenta con una serie de avances, desarrollos y planes relacionados con la descarbonización que le otorgan ventajas comparativas y competitivas factibles de oficiar como puntos de apalancamiento para el desarrollo y la consolidación de una segunda transición energética. En los párrafos siguientes se detallan las de mayor impacto o relevancia a nivel nacional:

**Matriz eléctrica limpia:** Uruguay completó su primera transformación energética con más del 90% de electricidad producida en base a fuentes renovables (base para electrificar el transporte y la infraestructura de frío). El MIEM enmarca ahora la segunda etapa: descarbonizar transporte e industria y habilitar vectores como el hidrógeno verde (H2U).

**Movilidad eléctrica:** El MIEM despliega instrumentos (Subite y Subite Cargo con reembolsos para vehículos de carga eléctricos y cargadores) y un portal con la normativa e información sobre la interoperabilidad de carga. Tanto UTE como el MIEM impulsan la expansión de la red pública y los beneficios fiscales.

**Hidrógeno verde:** La Hoja de Ruta H2U (aprobada por resolución MIEM en agosto de 2024) proyecta una economía de H<sub>2</sub> y derivados a 2040 (industria local y exportación), con capítulos de transporte pesado y un programa offshore (H2U-offshore) en preparación de ronda licitatoria.

**Biocombustibles:** La mezcla de biodiésel en gasoil (B5) dejó de ser obligatoria en 2022; actualmente hay evaluación para retomar mezcla (2–5%) y/o avanzar en diésel renovable/SAF (HEFA) vía ALUR/ANCAP. La ficha NDC del Ministerio de Ambiente confirma 0% de mezcla en 2023 y el marco legal vigente.

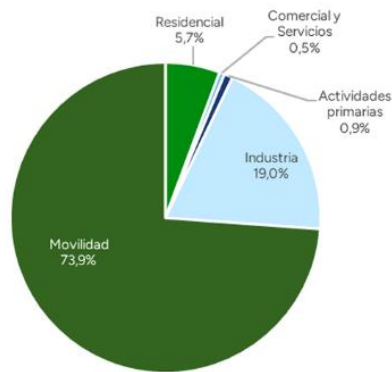
**Ferrocarril Central:** Desde 2024 opera un corredor ferroviario moderno (22,5 t/eje, 80 km/h, diseño europeo) entre Paso de los Toros y Montevideo; habilita hasta 4 Mt/año y reduce tráfico carretero, costes y CO<sub>2</sub>; el MTOP y ANP trabajan para extender vías en el recinto portuario y conectar más terminales.

**Puerto de Montevideo:** ANP invierte en accesos automatizados, conexión ferroviaria interna y obras “smart port”; Muelle C dispone de tomas de muelle para alimentación eléctrica a buques (paso hacia OPS/shore power). ANP ha anunciado el objetivo de conexión eléctrica de muelles y avanzar en certificaciones EcoPorts.

**Plantas frigoríficas y cadena de frío:** Medidas de eficiencia energética de cámaras y compresores (mejoran el costo total de propiedad y el perfil de emisiones de la planta y del transporte eléctrico). Uruguay está actualizando el etiquetado y la reglamentación técnica para la refrigeración/AC, útil para compras eficientes.

Finalmente, desde el Área de Eficiencia Energética del Ministerio de Industria, Minería y Energía, tal como se visualiza en el gráfico a continuación, se prevé una contribución significativa al 2035 desde el sector de movilidad en cuanto a las emisiones de CO<sub>2</sub> evitadas basado en las medidas de descarbonización previstas.

Gráfico 2: Participación de emisiones de CO2 evitadas por sector en el total de energía evitada a 2035.  
Fuente: Escenarios de energía evitada del Plan Nacional de Eficiencia energética 2025 – 2035, MIEM.



### 3. Soluciones logísticas y tecnológicas

En este capítulo se presentan las principales soluciones logísticas y tecnológicas identificadas con potencial para reducir emisiones en la cadena logística cárnica, considerando su implementación progresiva en función de su aplicabilidad por tramo, su madurez tecnológica y los requerimientos de infraestructura asociados, en coherencia con los escenarios de reducción de emisiones desarrollados en capítulos anteriores.

Las alternativas analizadas se agrupan en tres categorías complementarias: (i) sustitución de la fuente energética de los vehículos, (ii) mejora de la eficiencia técnica del parque automotor y (iii) optimización sistémica del diseño y la operación logística. Las tecnologías analizadas no son excluyentes entre sí y presentan distintos niveles de desarrollo, necesidades de infraestructura y efectos potenciales sobre la huella de carbono; por ello, su pertinencia depende del tramo logístico considerado: movimiento rural, traslado a frigorífico, distribución interna o exportación, y del marco regulatorio vigente.

#### HIDRÓGENO VERDE

##### Descripción general de la tecnología

El hidrógeno verde aplicado al transporte pesado se puede materializar a través de camiones eléctricos con celda de combustible (Fuel Cell Electric Vehicles – FCEV). En estos vehículos, el hidrógeno almacenado a alta presión se utiliza para generar electricidad a bordo, la cual alimenta un sistema de tracción eléctrica.

Desde el punto de vista funcional, esta tecnología combina tracción eléctrica, autonomías comparables a vehículos diésel en aplicaciones de larga distancia y tiempos de repostaje reducidos respecto a soluciones exclusivamente a batería.

## Descripción de los camiones FCEV y desempeño operativo

Los camiones pesados a hidrógeno actualmente disponibles presentan capacidades técnicas similares a las de los vehículos diésel en términos de carga, aunque difieren en autonomía y arquitectura energética.

Modelos como el Hyundai XCIENT Fuel Cell, así como desarrollos recientes de fabricantes europeos, registran:

- Autonomías entre 400 y 700 km, según configuración.
- Tiempos de repostaje entre 8 y 25 minutos.
- Capacidades de carga de hasta 40–48 toneladas.
- Consumos estimados de 7 a 10 kg de hidrógeno cada 100 km en operación pesada.

El sistema integra tanques de almacenamiento de hidrógeno en fibra de carbono, celda de combustible, batería auxiliar para estabilización de potencia y motor eléctrico de tracción. La arquitectura híbrida (celda de combustible más batería buffer) permite absorber picos de demanda y mejorar la eficiencia en condiciones operativas variables.

Imagen 1: Hyundai Motor Company - XCIENT Fuel Cell. Fuente: (HYUNDAI, 2021).



## Caso piloto en Uruguay: Proyecto Kahirós

En Uruguay, el proyecto Kahirós constituye la primera experiencia piloto de camiones pesados impulsados por hidrógeno verde, pensado para transporte en la cadena forestal.

El proyecto incorpora unidades Hyundai XCIENT Fuel Cell con autonomías superiores a 400 km, tiempos de repostaje de 8 a 20 minutos, capacidad cercana a

48 toneladas y un consumo estimado de 7 a 10 kg de hidrógeno cada 100 km. La demanda anual proyectada del piloto se sitúa en el entorno de 77 toneladas de hidrógeno.

En el corto plazo, esta experiencia permitirá evaluar el desempeño en condiciones reales nacionales, analizar la logística de abastecimiento, validar la integración con infraestructura eléctrica renovable y obtener datos operativos relevantes. No obstante, se encuentra aún en una fase de escala limitada.

### Casos internacionales relevantes

El desarrollo del transporte pesado impulsado por hidrógeno verde ha avanzado mediante programas demostrativos y despliegues comerciales en distintas regiones.

#### Europa – Proyecto H2Haul

El proyecto H2Haul, financiado por la Unión Europea en el marco del Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking (FCH JU), tiene como objetivo demostrar la viabilidad operativa de camiones pesados FCEV en aplicaciones comerciales reales de larga distancia y alta carga.

El programa contempla la operación de unidades con autonomías superiores a 700 km, integradas en cadenas logísticas industriales y abastecidas mediante estaciones dedicadas de hidrógeno de alta capacidad. Su objetivo es validar desempeño técnico, confiabilidad operativa e integración con infraestructura de carga en condiciones de uso cotidiano.

#### Alemania – Red H2 Mobility

Alemania ha desarrollado una red nacional de estaciones de carga de hidrógeno a través del consorcio H2 Mobility Deutschland. El modelo combina producción centralizada o regional, transporte mediante camiones cisterna criogénicos de hidrógeno líquido, almacenamiento intermedio en estaciones y surtidores de alta presión (350 y 700 bar).

Este esquema evidencia que la logística de distribución constituye un componente crítico del sistema, dado que el transporte, almacenamiento y compresión representan costos energéticos y operativos relevantes.

#### China – Despliegue a escala industrial

China lidera actualmente el despliegue global de camiones pesados con celda de combustible. Según la Agencia Internacional de Energía, el país concentra la mayor cantidad de vehículos FCEV en operación, particularmente en transporte industrial, minería y logística portuaria.

El crecimiento ha sido impulsado por políticas públicas específicas, subsidios y

desarrollo de infraestructura dedicada en corredores estratégicos.

### Infraestructura requerida

La adopción de hidrógeno verde requiere un sistema integrado:

#### Producción

- Electrolizador.
- Electricidad renovable.
- Agua desmineralizada.
- Sistema de control.

#### Compresión y almacenamiento

- Compresores de alta presión.
- Tanques intermedios.
- Sistemas de seguridad.

#### Distribución

- Producción in situ en nodos logísticos, o
- Transporte criogénico de hidrógeno líquido hacia estaciones.

#### Estaciones de carga

- Surtidores de 350 o 700 bar.
- Sistemas de seguridad y monitoreo.
- Infraestructura compatible con flotas pesadas.

La escala mínima viable depende del número de vehículos y del patrón de operación.

### Limitantes y desafíos para su implementación

A pesar de los avances tecnológicos observados a nivel internacional, la incorporación del hidrógeno verde en el transporte pesado enfrenta una serie de condicionantes estructurales que deben ser considerados en el análisis de viabilidad.

#### Intensidad de capital (CAPEX)

El costo de adquisición de camiones FCEV continúa siendo significativamente superior al de vehículos diésel equivalentes, debido principalmente al precio de la celda de combustible, los tanques de almacenamiento de alta presión y la baja escala de producción global (International Energy Agency, 2023).

Adicionalmente, la infraestructura asociada (electrolizadores, compresores, almacenamiento, estaciones de carga de 350 o 700 bar) requiere inversiones iniciales elevadas. Diversos estudios internacionales coinciden en que la viabilidad económica depende en gran medida de la concentración de demanda y del grado

de utilización de la infraestructura (Hydrogen Council, 2022).

### Eficiencia energética sistémica

Desde el punto de vista termodinámico, la cadena energética del hidrógeno presenta mayores pérdidas que la electrificación directa a batería. El proceso que comprende electrólisis, compresión, transporte, almacenamiento y reconversión en electricidad mediante celda de combustible implica una eficiencia global inferior a la de los vehículos eléctricos a batería (BEV) en trayectos comparables (European Commission, 2020).

Esto no invalida su aplicación, pero condiciona su conveniencia relativa en función de la distancia, carga y disponibilidad de infraestructura.

### Escala mínima de operación

La implementación eficiente de infraestructura de hidrógeno requiere una masa crítica de vehículos que garantice niveles adecuados de utilización. La literatura internacional señala que estaciones subutilizadas incrementan significativamente el costo por kilogramo de hidrógeno dispensado.

En consecuencia, la adopción progresiva debe planificarse en corredores específicos donde exista concentración de demanda logística.

### Madurez de mercado

Si bien los proyectos demostrativos han validado la factibilidad técnica de los camiones FCEV, el despliegue global aún es limitado en comparación con el parque diésel y con el crecimiento reciente de la electrificación a batería. La disponibilidad de repuestos, redes de mantenimiento y estándares consolidados continúa en fase de expansión.

### Planificación territorial y regulación

El hidrógeno requiere planificación territorial coordinada que defina:

- Corredores prioritarios.
- Ubicación de nodos de producción y carga.
- Integración con red eléctrica renovable.
- Marco regulatorio para seguridad y certificación de origen.

La experiencia alemana y europea demuestra que la coordinación público-privada resulta determinante para viabilizar el sistema (H2 Mobility Deutschland GmbH & Co. KG, 2023).

## Rol estratégico del hidrógeno verde en la cadena cárnica

Más allá de sus desafíos, el hidrógeno verde presenta un potencial estratégico específico en el transporte pesado de larga distancia y alta carga, donde las alternativas exclusivamente a batería enfrentan limitaciones de autonomía o tiempos de recarga.

En el contexto de la cadena cárnica uruguaya, su aplicación podría resultar pertinente en los siguientes escenarios:

- Corredores longitudinales norte-sur, que concentran flujos relevantes de carga hacia centros industriales y portuarios.
- Transporte frigorífico de exportación, donde la exigencia de reducción de huella puede convertirse en ventaja competitiva frente a mercados con regulaciones climáticas crecientes.
- Rutas de alta frecuencia y volumen, donde la masa crítica de vehículos permitiría justificar infraestructura dedicada.
- Esquemas de corredores logísticos verdes estratégicos, integrando producción renovable, certificación de origen y trazabilidad ambiental.

En este sentido, el hidrógeno no debe interpretarse únicamente como una tecnología alternativa, sino como un posible componente de posicionamiento estratégico país en materia de logística de bajas emisiones.

La experiencia internacional indica que su despliegue resulta más efectivo cuando se focaliza en corredores específicos de alta intensidad logística, en lugar de buscar una adopción dispersa en el territorio.

## BIOMETANO

El biometano se obtiene a partir de residuos orgánicos mediante digestión anaerobia y posterior proceso de upgrading para alcanzar calidad equivalente al gas natural vehicular.

Su principal ventaja radica en que puede utilizarse en camiones comerciales a GNC sin modificaciones estructurales profundas. Fabricantes como Scania e Iveco ofrecen modelos pesados con autonomías entre 400 y 600 km, tiempos de carga de entre 5 y 15 minutos y capacidades aptas para transporte de larga distancia.

Experiencias en Brasil muestran una expansión sostenida del biometano producido a partir de residuos agroindustriales y estiércol, con volúmenes crecientes destinados al transporte pesado.

En términos climáticos, diversos estudios de ciclo de vida indican reducciones del orden del 70% al 90% frente al diésel fósil, pudiendo alcanzar balances cercanos a la neutralidad cuando se captura metano que de otro modo se liberaría a la atmósfera. Sin embargo, el desempeño depende críticamente del control de fugas, dado el alto potencial de calentamiento global del metano.

Su implementación requiere plantas de digestión, unidades de purificación, compresión y estaciones de carga, pero presenta menores exigencias de inversión sistémica que el hidrógeno.

Imagen 2: Camión SCANIA G410 a biometano. Fuente: (ST Supertruck, 2025).



## BIODIESEL

El biodiesel constituye una alternativa de implementación inmediata basada en la mezcla parcial con gasoil fósil. En Uruguay, la Ley 18.195 estableció el carácter obligatorio de una mezcla mínima del 5% hasta su suspensión en 2021.

Su principal fortaleza es la compatibilidad total con la flota existente y la inexistencia de requerimientos adicionales de infraestructura. La reducción de emisiones es proporcional al porcentaje de mezcla utilizado y depende del origen de la materia prima.

Si bien no transforma estructuralmente el sistema, puede contribuir de manera inmediata a reducir parcialmente la intensidad de carbono del transporte.

## ELECTRIFICACIÓN

La electrificación del transporte pesado mediante camiones eléctricos a batería (Battery Electric Vehicle, BEV) constituye una de las alternativas más avanzadas tecnológicamente para la reducción directa de emisiones en el sector logístico.

A diferencia de las soluciones basadas en combustibles renovables, la electrificación elimina completamente las emisiones en el punto de uso. En el contexto uruguayo, donde la matriz eléctrica presenta una alta participación de fuentes renovables, el beneficio en términos de emisiones de ciclo de vida (Well-to-Wheel) es particularmente significativo.

## Estado de la tecnología y disponibilidad comercial

En los últimos cinco años, el mercado de camiones eléctricos pesados ha evolucionado desde pilotos demostrativos hacia producción en serie. Fabricantes como Volvo, Scania, Mercedes-Benz, MAN y BYD ofrecen actualmente modelos eléctricos para transporte pesado.

Algunos parámetros de referencia:

- Autonomía típica real: 250–350 km en configuraciones estándar de larga distancia.
- Configuraciones extendidas: hasta 500–600 km según tamaño de batería y perfil de operación.
- Capacidad de carga: comparable a camiones diésel equivalentes ( $\approx$  40–48 toneladas).
- Eficiencia energética promedio: 1,1–1,5 kWh por km en operación pesada, dependiendo de carga y topografía.

En Uruguay, la empresa Bitafal opera un camión eléctrico pesado en aplicaciones industriales con una autonomía aproximada de 300 km y capacidad cercana a 48 toneladas, lo que confirma la factibilidad técnica en condiciones locales (Bitafal, 2023).

Imagen 3: Primer camión eléctrico de la empresa Bitafal. Fuente: Bitafal, 2023.



## Requerimientos de infraestructura

La electrificación del transporte pesado no depende únicamente del vehículo, sino del ecosistema de carga.

Se distinguen dos niveles de infraestructura:

### Carga en nodos logísticos (Depot Charging)

Ubicaciones típicas:

- Frigoríficos.
- Centros de consolidación.
- Puerto.
- Centros logísticos regionales.

Potencias habituales:

- 50–150 kW DC.
- En algunos casos AC trifásica de alta capacidad.

Ventajas:

- Menor estrés sobre la red.
- Posibilidad de carga nocturna.
- Integración con gestión inteligente de carga (smart charging).
- Optimización tarifaria.

### Carga en corredores estratégicos

Aplicable a trayectos interdepartamentales o repetitivos.

Potencias:

- 150–350 kW DC en la actualidad.
- Preparación futura para sistemas MCS (Megawatt Charging System), que superarán 1 MW para transporte pesado de larga distancia.

Tiempos de carga orientativos:

- 150 kW: 1,5 a 2 horas (vehículos pesados).
- 350 kW: 45 a 60 minutos.
- MCS (>1 MW): potencialmente <30 minutos en escenarios futuros.

La instalación de cargadores de alta potencia puede requerir:

- Transformadores dedicados.
- Refuerzo de red.
- Eventualmente subestaciones específicas.
- Sistemas de almacenamiento estacionario para suavizar picos.

Imagen 4: Experiencias reales de electrolinerías para pesados en Latinoamérica (en la foto Patio Marva Delectrico Tultitlán-México). Estación de carga con 4 cargadores con capacidad de carga de hasta 50 camiones. Fuente: (Indicador Automotriz, 2025).



### Escenarios de mayor viabilidad en la cadena cárnica

La electrificación no es homogéneamente viable en todos los tramos. Su incorporación resulta más consistente en:

#### Distribución de frigorífico a mercado interno

- Trayectos cortos y urbanos.
- Retorno diario a base.
- Alta repetitividad.
- Impacto reputacional positivo (cero emisiones locales).

#### Frigorífico a puerto ( $\leq 300$ km)

- Operación repetitiva.
- Punto fijo de carga en origen y/o destino.
- Posibilidad de diseñar corredor eléctrico dedicado.

#### Centros regionales a centros logísticos

Cuando la distancia total por ciclo diario no excede la autonomía operativa real.

Menor prioridad inicial:

- Movimiento rural disperso.
- Zonas con infraestructura eléctrica débil.

### Costos asociados

La electrificación implica principalmente:

### Inversión en vehículo

- Camión eléctrico: aproximadamente 2–2,5 veces el costo de un diésel equivalente.
- Costos decrecientes a medida que escala el mercado.

### Infraestructura

- Cargador DC 150 kW: inversión media.
- Cargador 350 kW: inversión alta.
- Posible refuerzo eléctrico: variable según sitio.

No obstante, los costos operativos pueden verse compensados por:

- Menor costo por km de energía.
- Menor mantenimiento (menos piezas móviles).
- Estabilidad de precios eléctricos frente a combustibles fósiles.

### Consideraciones técnicas para la implementación

A efectos de evaluar la incorporación de camiones eléctricos a batería en la cadena logística cárnica, se identifican las siguientes consideraciones técnicas relevantes:

#### Impacto del peso de las baterías en la carga útil

La incorporación de sistemas de almacenamiento energético de gran capacidad puede implicar un incremento del peso propio del vehículo respecto a su equivalente diésel. En determinadas configuraciones, ello podría traducirse en una leve reducción de la carga útil máxima admisible.

Se recomienda analizar este aspecto en función del tipo de operación (transporte de ganado en pie, carne refrigerada, insumos) y del perfil de carga habitual, evaluando la eventual necesidad de ajustes operativos o compensaciones en configuración de ejes.

#### Sensibilidad a condiciones operativas (topografía y clima)

El desempeño energético de los vehículos eléctricos pesados está influenciado por factores externos tales como:

- Pendientes pronunciadas.
- Condiciones de viento.
- Temperaturas extremas (especialmente bajas temperaturas).

Estos factores pueden afectar la autonomía efectiva respecto a la nominal. Por tanto, la planificación de rutas y la ubicación de infraestructura de carga deben considerar márgenes operativos prudentes.

### Consumo adicional en transporte frigorífico

En el caso de transporte de carne refrigerada, el sistema de frío constituye una carga energética adicional que incide en el consumo total del vehículo.

Se debe evaluar soluciones integradas de refrigeración eléctrica optimizada o sistemas de gestión energética que permitan minimizar la afectación de la autonomía operativa.

### Compatibilidad futura con estándares de carga de alta potencia

Dado que el desarrollo tecnológico avanza hacia sistemas de carga de muy alta potencia (Megawatt Charging System – MCS), la planificación de infraestructura debe contemplar:

- Capacidad de ampliación de potencia.
- Espacio físico suficiente.
- Conexiones eléctricas escalables.

Esta previsión evitará obsolescencia prematura y reducirá costos de reconversión futura.

### Rol estratégico de la electrificación en la cadena logística

La electrificación del transporte pesado no debe analizarse exclusivamente como sustituto directo de otras tecnologías energéticas, sino como un componente complementario dentro de una estrategia integral de descarbonización.

En este sentido, se identifican los siguientes aportes estratégicos:

### Descarbonización progresiva de tramos específicos

La electrificación resulta particularmente adecuada para:

- Trayectos cortos y repetitivos.
- Operaciones con retorno a base.
- Distribución de frigorífico a mercado interno.
- Traslados controlados de frigorífico a puerto de distancia moderada.

Su implementación en estos segmentos permite reducir emisiones de manera inmediata sin requerir transformación completa del sistema energético.

### Plataforma de transición tecnológica

La adopción progresiva de flotas eléctricas contribuye al desarrollo de capacidades nacionales en:

- Gestión de infraestructura de carga.
- Integración red-movilidad.
- Gestión de demanda eléctrica.

- Monitoreo de consumo energético y emisiones.

Este aprendizaje institucional facilita la eventual incorporación de tecnologías más complejas, como el hidrógeno verde.

### Integración con herramientas de optimización logística

Cuando se combina con plataformas de ruteo dinámico, telemetría y modelado de red logística, la electrificación puede maximizar su impacto ambiental al:

- Reducir kilómetros recorridos.
- Optimizar factores de carga.
- Minimizar viajes en vacío.

En este contexto, la electrificación puede generar reducciones sustantivas de emisiones sin requerir una transformación inmediata y total de la matriz energética del transporte pesado.

## NEUMÁTICOS DE BAJA RESISTENCIA A LA RODADURA

La resistencia a la rodadura constituye uno de los componentes relevantes del consumo energético en vehículos pesados. Diversos estudios técnicos estiman que puede representar entre un 5% y un 10% del consumo total de combustible en camiones de larga distancia, dependiendo de la configuración del vehículo, el tipo de neumático, la carga y las condiciones de operación (Transportation Research Board, 2006) (European Commission, 2019).

En este contexto, los neumáticos de baja resistencia a la rodadura (Low Rolling Resistance - LRR) constituyen una tecnología madura orientada a reducir las pérdidas energéticas asociadas a la deformación del neumático durante el rodamiento.

Los neumáticos LRR incorporan:

- Compuestos avanzados de sílice y polímeros.
- Optimización del diseño de banda de rodadura.
- Reducción de histéresis (energía disipada en deformación).

La mejora energética se traduce en menor demanda de potencia para mantener velocidad constante.

### Impacto en consumo y emisiones

La evidencia internacional indica que:

- La adopción de neumáticos LRR puede reducir el consumo de combustible entre un 2% y un 6% en transporte pesado (U.S. Environmental Protection Agency, 2023).
- Diferencias entre clases de etiquetado europeo pueden implicar variaciones de consumo de hasta 7,5% entre el mejor y peor desempeño (European

Commission, 2019).

- El Transportation Research Board (TRB) indica que una reducción del 10% en resistencia a la rodadura puede generar mejoras de eficiencia del orden del 1-2% (Transportation Research Board, 2006).

En términos de huella de carbono, la reducción de consumo se traduce linealmente en disminución de emisiones de CO<sub>2</sub> en vehículos diésel.

### Costos asociados

- Sobrecosto estimado respecto a neumáticos convencionales: 5-15%.
- No requiere infraestructura adicional.
- Retorno asociado al ahorro de combustible.
- Tecnología plenamente compatible con cualquier sistema de propulsión (diésel, gas, eléctrico, hidrógeno).

Imagen 5: Etiquetado para neumáticos de baja resistencia a la rodadura. Fuente: Good Year, 2022.



### Sistemas automáticos de inflado y monitoreo de presión

La presión inadecuada de los neumáticos es un factor que incrementa significativamente la resistencia a la rodadura. Se estima que un neumático con presión inferior a la recomendada puede aumentar el consumo de combustible entre 1% y 3%, además de acelerar el desgaste y afectar la seguridad.

Para mitigar este efecto, existen dos tecnologías complementarias:

#### Sistemas de monitoreo de presión (TPMS)

Permiten:

- Medición continua de presión y temperatura.
- Alertas en tiempo real.
- Corrección manual o preventiva.

Su implementación reduce pérdidas por subinflado y mejora la vida útil del neumático.

### Sistemas automáticos de inflado (ATIS)

Los sistemas ATIS (Automatic Tire Inflation System) mantienen la presión óptima de forma automática mediante:

- Compresor integrado.
- Válvulas reguladoras.
- Distribución hacia ejes y ruedas.

Estos sistemas permiten compensar pérdidas de presión durante la operación y mantener condiciones óptimas de rodadura sin intervención manual.

### Impacto estimado

La combinación de neumáticos LRR y mantenimiento automático de presión puede generar mejoras adicionales de eficiencia del orden de 1% a 3%, dependiendo de la disciplina operativa previa y del perfil de uso (U.S. Environmental Protection Agency, 2023).

## CONFIGURACIONES DE VAD PARA TRANSPORTE DE GANADO EN PIE

### Tramo: Zona de cuarentena a puerto

En el análisis de alternativas logísticas para la exportación de ganado en pie, se incorpora la viabilidad de utilizar configuraciones de Vehículos de Alto Desempeño (VAD), como bitrenes y tritrenes, en el tramo comprendido entre las zonas de cuarentena y el puerto de embarque.

Dado que el transporte desde predios rurales suele realizarse por caminería secundaria con limitaciones geométricas y estructurales (ver Imagen 7 con detalle de los corredores habilitados), la utilización de tritrenes no resulta operativamente viable en esa primera etapa. En consecuencia, cualquier eventual implementación de VAD debería estructurarse bajo un esquema de operación en dos etapas:

- **Etapla 1:** Predio a zona de cuarentena, mediante camiones convencionales.
- **Etapla 2:** Zona de cuarentena a puerto, mediante configuración de VAD autorizada.

Este enfoque permitiría concentrar el uso de configuraciones de mayor capacidad en tramos de red vial nacional con mejores estándares geométricos y estructurales.

### Marco normativo aplicable

El Decreto 303/020 regula las combinaciones VAD, estableciendo:

- Requisitos técnicos específicos del vehículo (sistemas de frenado, estabilidad, configuración).
- Límites de peso bruto total y longitud.
- Necesidad de aprobación técnica por modelo.
- Circulación exclusivamente en corredores habilitados por MTOP.

Por tanto, la viabilidad de esta alternativa depende de:

- Que el corredor cuarentena-puerto esté habilitado para VAD.
- Que el modelo específico esté aprobado por la Dirección Nacional de Transporte.
- Que se cumplan estrictamente los límites de peso por eje y por conjunto de ejes.

### Principal limitante técnica: peso por eje

Aunque las configuraciones VAD permiten un mayor peso bruto total respecto a combinaciones convencionales, la restricción determinante es el peso máximo admisible por eje o conjunto de ejes.

En la práctica:

- El aumento de animales transportados incrementa el peso total.
- Si la carga por eje supera el límite normativo, la circulación no es permitida.
- El mayor número de ejes en un tritrén permite distribuir mejor la carga, pero no elimina la restricción.

En categorías de bovinos adultos, el límite por eje puede convertirse en el factor dominante antes que la disponibilidad de superficie útil.

### Diferenciación por categoría

Bovinos adultos:

- Mayor peso vivo individual.
- Mayor probabilidad de que la restricción sea estructural (peso por eje).
- Incremento potencial de cabezas por viaje moderado y condicionado por la distribución de carga.

Bovinos livianos:

- Menor peso individual.
- La restricción dominante tiende a ser el espacio y no el peso.
- La mayor longitud del conjunto puede permitir aumento de dotación manteniendo densidad adecuada.

## Bienestar animal como restricción estructural

El aumento de capacidad debe respetar estándares internacionales de transporte terrestre en materia de:

- Espacio mínimo por animal.
- Ventilación adecuada.
- Compartimentación.
- Condiciones térmicas.
- Minimización de estrés y lesiones.

La eficiencia logística no puede alcanzarse mediante incremento de densidad por m<sup>2</sup>, sino mediante mayor superficie útil o mejor diseño interno.

## Impacto potencial en la huella por animal

Desde una perspectiva conceptual:

$$\text{Emisiones por animal transportado} = \frac{\text{Emisiones totales del viaje}}{\text{Número de animales transportados}}$$

En el tramo cuarentena-puerto, la utilización de tritrenes podría reducir la huella por animal si:

- Se incrementa el número de cabezas por viaje manteniendo bienestar.
- Se reduce el número total de viajes necesarios.
- No se generan desvíos significativos por restricciones de corredor.

El beneficio ambiental estaría asociado principalmente a la reducción de viajes y no necesariamente a una disminución del consumo por vehículo.

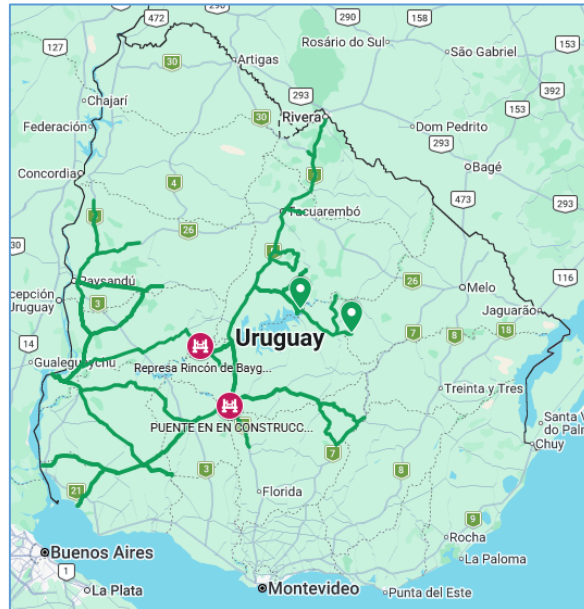
No obstante, el efecto podría verse atenuado si:

- Existen restricciones de circulación que obliguen a rutas más extensas.
- Se presentan limitaciones operativas en accesos portuarios.
- Condiciones climáticas obligan a reducir la carga por razones de bienestar.

Imagen 6: Bitren ganadero. Fuente: R2820.com, 2024.



Imagen 7: Corredores habilitados para el transporte con VAD. Puente Río Yi y Puente Rincón de Baygorria no autorizados en este momento. Fuente: MTOP, 2023



## OPTIMIZACIÓN LOGÍSTICA Y MODELADO SISTÉMICO

La reducción de emisiones en la cadena logística cárnica no depende exclusivamente de la sustitución energética del parque automotor, sino también de la eficiencia estructural del sistema de transporte. En este sentido, la optimización logística y el modelado sistémico constituyen herramientas de alto impacto potencial y bajo requerimiento de transformación tecnológica inmediata.

El modelado sistémico de la red logística trasciende su función operativa y se posiciona como una herramienta estratégica para la planificación territorial y energética del transporte vinculado a la cadena cárnica. Su aplicación permite analizar integralmente los flujos de carga, la localización de nodos productivos y logísticos, la estructura de la red vial y los distintos escenarios tecnológicos de descarbonización.

Desde esta perspectiva, el modelado constituye un insumo técnico clave para la definición de políticas públicas y decisiones de inversión. Entre sus principales aportes se encuentran la identificación de corredores prioritarios, la determinación de ubicaciones óptimas para infraestructura de carga eléctrica o estaciones de hidrógeno, el dimensionamiento de capacidades requeridas y la evaluación comparativa de distintos escenarios energéticos. Asimismo, posibilita integrar restricciones regulatorias, límites de peso por eje, tiempos máximos de transporte y criterios de bienestar animal en un único esquema analítico.

En el contexto nacional, este enfoque facilita la coordinación interinstitucional entre organismos con competencias complementarias como el MTOP, MIEM, MGAP,

gobiernos departamentales y el sector privado, generando una base técnica común para la toma de decisiones. En este sentido, el modelado no debe interpretarse únicamente como una herramienta de eficiencia empresarial, sino como un instrumento estructurante para el diseño de una política de transporte descarbonizado.

Desde el punto de vista económico, la implementación de plataformas de optimización y análisis geoespacial presenta una inversión inicial relativamente baja o media en comparación con las tecnologías energéticas de sustitución. Los costos se concentran en software especializado, integración de bases de datos, desarrollo de modelos y capacitación técnica. Frente a las inversiones requeridas para infraestructura de hidrógeno o electrificación de alta potencia, el modelado representa una herramienta de bajo riesgo financiero y alto potencial de retorno.

El beneficio se materializa en ahorros operativos derivados de la reducción de kilómetros recorridos, mejora del factor de carga y disminución de viajes en vacío, así como en una mejor planificación de inversiones futuras. Al permitir priorizar corredores y nodos estratégicos, reduce la incertidumbre en la asignación de recursos y aumenta la probabilidad de éxito de las políticas de descarbonización.

En términos estratégicos, la optimización logística puede actuar como plataforma base sobre la cual se integren progresivamente otras soluciones tecnológicas (electrificación, biometano, hidrógeno verde o configuraciones vehiculares de mayor capacidad) asegurando que dichas incorporaciones se realicen sobre un sistema previamente racionalizado y territorialmente planificado.

### Información de entrada requerida

El modelado logístico requiere consolidar información proveniente de múltiples fuentes, entre ellas:

#### Información geoespacial

- Localización de predios.
- Ubicación de zonas de cuarentena.
- Frigoríficos y plantas de procesamiento.
- Puerto y nodos logísticos.
- Red vial: jerarquización y priorización, estado, restricciones.

#### Información operativa

- Volumen de animales transportados por categoría.
- Frecuencia de viajes.
- Capacidad promedio por vehículo.
- Kilómetros recorridos por tramo.
- Tiempos de carga y descarga.
- Retornos vacíos.

### Información técnica

- Tipo de vehículo utilizado.
- Consumo específico (L/km o kg H<sub>2</sub>/km).
- Factor de carga promedio.
- Emisiones por tipo de combustible.

### Información regulatoria

- Restricciones de peso por eje.
- Corredores habilitados VAD.
- Limitaciones urbanas.

Con estos datos es posible construir modelos de:

- Vehicle Routing Problem (VRP).
- Optimización de consolidación.
- Modelado de escenarios energéticos.
- Simulación de reducción de emisiones bajo distintos supuestos tecnológicos.

### Caso internacional de referencia: Australia

Australia ha desarrollado modelos avanzados de optimización logística en el sector ganadero, particularmente para transporte de ganado en pie y carne procesada en largas distancias.

En ese contexto se han aplicado herramientas de modelado geoespacial para:

- Identificar rutas óptimas en territorios extensos.
- Minimizar kilómetros recorridos.
- Reducir viajes en vacío.
- Evaluar impactos en costos y emisiones.
- Analizar configuraciones de alta capacidad (road trains).

El uso de combinaciones vehiculares de gran longitud (road trains) en Australia se acompaña de planificación territorial y análisis estructural de red, lo que permite concentrar operaciones en corredores específicos con infraestructura apta.

La experiencia australiana demuestra que la eficiencia logística puede generar reducciones significativas de consumo sin modificar necesariamente la fuente energética, simplemente mediante optimización de red y consolidación de flujos.

### Aplicabilidad en Uruguay

Si bien Uruguay presenta una escala territorial menor que Australia, comparte ciertas características estructurales:

- Concentración de producción ganadera en determinadas regiones.
- Flujo predominante hacia centros industriales y puerto.

- Movimientos repetitivos y predecibles.
- Transporte de ganado en pie y transporte frigorífico diferenciado.

La aplicación de modelado sistémico permitiría:

- Identificar corredores de mayor intensidad logística.
- Evaluar factibilidad de consolidación en nodos intermedios.
- Dimensionar masa crítica para electrificación o hidrógeno.
- Determinar impacto real de bitrenes/tritrenes.
- Analizar reducción de viajes en vacío.
- Evaluar intermodalidad carretera-ferrocarril en tramos específicos.

En particular, para el tramo zona de cuarentena → puerto, el modelado permitiría cuantificar si la incorporación de VAD efectivamente reduce viajes totales o si las restricciones operativas neutralizan el beneficio.

### Multimodalidad aplicada al transporte de carga bovino

El transporte multimodal para ganado bovino es adecuado para optimizar rutas de larga distancia combinando camión, barco o tren, reduciendo costos logísticos y tiempos de tránsito. Sus ventajas incluyen mayor seguridad, menor huella ambiental y mejor trazabilidad. No obstante, conlleva riesgos como el alto estrés de los animales por las operaciones de trasbordos, mayor complejidad para su coordinación y posibles retrasos asociados a la incertidumbre que pudiera existir en cada etapa.

Ventajas	Desventajas
<b>Optimización de costos:</b> Permite utilizar el modo de transporte más eficiente para cada tramo del viaje, reduciendo los costos totales.	<b>Alto estrés animal:</b> Los trasbordos entre diferentes medios (de camión a barco, por ejemplo) aumentan el riesgo de lesiones y estrés, impactando en el bienestar animal.
<b>Mayor alcance y flexibilidad:</b> Acceso a mercados internacionales o distancias largas, combinando camión para la recogida/entrega y barco/tren para el trayecto principal.	<b>Complejidad operativa:</b> Requiere una coordinación logística compleja y mayor planificación para evitar fallos.
<b>Seguridad y trazabilidad:</b> Facilita el seguimiento de los animales en tiempo real a través de un único operador logístico, mejorando la seguridad y reduciendo riesgos de pérdida.	<b>Riesgo de retrasos:</b> La dependencia de múltiples modos de transporte con diferentes responsables aumenta la posibilidad de retrasos en las entregas.
<b>Sostenibilidad:</b> Menor impacto ambiental por cabeza de ganado al utilizar medios más eficientes como el marítimo o ferroviario en tramos largos.	<b>Limitantes de infraestructura:</b> Depende de la disponibilidad de infraestructuras adecuadas para el manejo seguro de animales en puntos de trasbordo.

El transporte multimodal de ganado bovino (camión - ferrocarril) se justifica generalmente para largas distancias, superiores a los 500-800 km, donde el

ferrocarril ofrece mayor eficiencia de costos y bienestar animal. Este sistema reduce el estrés por viaje largo, minimiza los golpes y facilita el traslado de grandes volúmenes de hacienda de forma continua.

Factores clave para la justificación multimodal:

- Eficiencia en larga distancia: El tren se vuelve más competitivo y seguro que el camión solo en recorridos extensos.
- Bienestar animal: Al ser un viaje más estable, el tren disminuye el estrés, riesgo de lesiones y pérdida de peso en comparación con largos trayectos en camión.
- Capacidad: Permite mover gran volumen de hacienda eficientemente.

Aunque el camión es el medio principal para distancias cortas y medias (con promedios de 240 km en algunos estudios), el sistema multimodal es la opción recomendada para largas distancias (Sánchez Gómez, S/D).

## **REFRIGERANTES CON MENOR POTENCIAL DE CALENTAMIENTO GLOBAL**

La Enmienda de Kigali al Protocolo de Montreal establece la reducción progresiva del consumo de hidrofluorocarbonos (HFC) por su alto potencial de calentamiento global. Esto afecta directamente a los usos vigentes en muchos sistemas de refrigeración utilizados en el transporte, almacenamiento y operaciones portuarias de la cadena cárnica.

La División de Mitigación del Cambio Climático y Ozono del Ministerio de Ambiente de Uruguay coordina proyectos y asistencia técnica para la eliminación de los gases antes mencionados y promueve la adopción de refrigerantes de bajo potencial de calentamiento global y alta eficiencia energética.

Las mejores alternativas para sustituir los refrigerantes con alto potencial de calentamiento global en cámaras, camiones y contenedores reefer incluyen:

### **CO<sub>2</sub> (R744)**

Aumenta su uso en supermercados, cámaras frigoríficas y contenedores reefer de última generación. Requiere de altas presiones, es seguro, económico y no tóxico.  
GWP: 1

### **Amoníaco (R717)**

Ideal para grandes cámaras frigoríficas e industrias. Requiere de sistemas de seguridad por su toxicidad. Promovido como tecnología de largo plazo.  
GWP: 0

### R290 (propano) y R600a (isobutano)

Aplicables en equipos comerciales pequeños, cámaras de porte medio y unidades autónomas de refrigeración. Por ser inflamables requieren de dispositivos certificados A3.

GWP: 3 - 8

### HFO (como R1234yf/ze)

Refrigerante sintético de nueva generación (desarrollados para reemplazar HFC como R404A, R410A o R134a). Ligeramente inflamable. Aplicable para unidades de transporte y equipos compactos.

GWP: 0,5

## 4. Análisis de costos y beneficios

Este capítulo presenta un análisis integral de los costos y beneficios asociados a las medidas propuestas, considerando sus implicancias económicas, sociales y ambientales. Para ello, se abordan los costos estimados de inversión, operación y mantenimiento necesarios para su implementación, así como los beneficios esperados en términos de reducción de emisiones, mejora del acceso a mercados y el incremento de la eficiencia operativa. Este enfoque permite valorar de manera equilibrada los impactos potenciales de cada alternativa.

La tabla a continuación presenta las acciones estructuradas según complejidad de implementación, costos e impactos sociales y ambientales.

Introducción de hidrógeno verde para vehículos pesados	
<b>Complejidad</b>	<b>Alta</b> Requiere el desarrollo de infraestructura para producción, almacenamiento y abastecimiento de hidrógeno, así como estaciones de carga para transporte pesado. Implica la incorporación de una tecnología vehicular aún incipiente en el mercado, con desafíos en disponibilidad de vehículos, mantenimiento y seguridad. Además, demanda marcos regulatorios, estándares técnicos y coordinación entre actores públicos y privados para su despliegue.
<b>Costos</b>	<b>Alto</b> Los costos se asocian principalmente a la elevada inversión inicial para la adquisición de vehículos, el desarrollo de infraestructura de producción y abastecimiento de hidrógeno, y la adaptación de instalaciones logísticas y de mantenimiento. Además, el hidrógeno verde presenta actualmente costos de producción superiores a los de los combustibles convencionales, lo que incide en el costo operativo en las primeras etapas de adopción.
<b>Impactos</b>	Reducción significativa de emisiones de gases de efecto invernadero y contaminantes locales en el transporte pesado. Puede impulsar el desarrollo de nuevas cadenas de valor asociadas al hidrógeno verde, generando oportunidades de innovación, desarrollo tecnológico y empleo especializado. Su implementación también requiere capacitación técnica y desarrollo de infraestructura energética.

Electrificación de la flota	
<b>Complejidad</b>	<b>Alta</b> Requiere la incorporación de vehículos eléctricos para transporte pesado, cuya disponibilidad aún es limitada en algunos segmentos de larga distancia. También implica el desarrollo de infraestructura de carga para vehículos de gran porte, la adaptación de instalaciones logísticas y posibles ajustes en la planificación de rutas según autonomías y tiempos de carga. Asimismo, puede requerir refuerzos en la red eléctrica y coordinación con el proveedor de energía para asegurar el suministro.
<b>Costos</b>	<b>Alto</b> Los costos se asocian principalmente a la inversión inicial para la adquisición de camiones eléctricos y la instalación de infraestructura de carga, incluyendo cargadores de alta potencia y adecuaciones eléctricas en centros logísticos o puntos estratégicos. Si bien los costos operativos pueden ser menores que en tecnologías convencionales, la inversión inicial continúa siendo la principal barrera para su adopción.
<b>Impactos</b>	Reducción significativa de emisiones de gases de efecto invernadero y eliminación de contaminantes locales durante la operación del transporte. También contribuye a disminuir el ruido en zonas urbanas y logísticas. Además, puede impulsar el desarrollo de capacidades técnicas para el mantenimiento y operación de flotas eléctricas y la expansión de infraestructura energética asociada.

Introducción de biocombustibles (mezclas biodiesel o combustibles renovables compatibles)	
<b>Complejidad</b>	<b>Baja a media</b> Presenta una complejidad relativamente baja, ya que muchos biocombustibles pueden utilizarse en motores diésel existentes mediante mezclas con combustibles convencionales, sin requerir modificaciones significativas en los vehículos ni en la infraestructura de abastecimiento. No obstante, su adopción depende de la disponibilidad del combustible, de marcos regulatorios que habiliten mayores porcentajes de mezcla y de ajustes en la logística de suministro.
<b>Costos</b>	<b>Bajo a medio</b> Los costos de implementación son relativamente moderados, ya que no requieren la sustitución inmediata de la flota ni grandes inversiones en infraestructura. No obstante, el costo del combustible puede variar según la disponibilidad de materias primas y las condiciones de producción, pudiendo ser superior al del diésel convencional en algunos contextos.
<b>Impactos</b>	Reducción parcial de emisiones de gases de efecto invernadero en comparación con combustibles fósiles, dependiendo del tipo de biocombustible y su proceso de producción. También puede impulsar cadenas productivas asociadas a la bioeconomía y al aprovechamiento de residuos agrícolas, forestales o industriales. Desde el punto de vista social, puede generar oportunidades para sectores vinculados a la producción de biomasa, siempre que se aseguren criterios de sostenibilidad en el origen de las materias primas.

Introducción de combustibles sintéticos	
<b>Complejidad</b>	<b>Media a alta</b> Los combustibles sintéticos pueden utilizarse en motores de combustión interna existentes con pocas o ninguna modificación, lo que reduce la complejidad a nivel vehicular. No obstante, su implementación depende del desarrollo de capacidades industriales para su producción a gran escala, así como de la disponibilidad de hidrógeno verde y CO <sub>2</sub> capturado. También requiere el desarrollo de cadenas de suministro y marcos regulatorios que habiliten su comercialización y uso en el transporte.
<b>Costos</b>	<b>Alto</b> Actualmente los combustibles sintéticos presentan costos de producción elevados debido a los procesos tecnológicos involucrados. Si bien pueden aprovechar la infraestructura existente de almacenamiento y distribución de combustibles líquidos, su precio sigue siendo superior al de los combustibles fósiles convencionales.
<b>Impactos</b>	Reducción potencial de emisiones de gases de efecto invernadero cuando se producen con hidrógeno verde y CO <sub>2</sub> capturado, permitiendo disminuir la huella de carbono sin cambios significativos en la flota existente. Además, pueden impulsar el desarrollo de cadenas tecnológicas vinculadas a combustibles renovables. Su sostenibilidad depende de la disponibilidad de energía renovable y de la eficiencia del proceso de producción.

Sistemas de mantenimiento predictivo	
<b>Complejidad</b>	<b>Media</b> Se requiere incorporar tecnologías de monitoreo en los vehículos, como sensores, telemetría y sistemas de diagnóstico a bordo, junto con plataformas digitales para analizar el estado de componentes críticos. También implica integrar estos datos en sistemas de gestión de flotas y capacitar al personal técnico para planificar intervenciones de mantenimiento basadas en condición.
<b>Costos</b>	<b>Bajo a medio</b> Los costos se asocian principalmente a la incorporación de sensores, sistemas de telemetría y plataformas de gestión de datos para el monitoreo de flotas. Estas inversiones suelen ser moderadas en comparación con otras tecnologías de descarbonización y pueden compensarse mediante la reducción de fallas mecánicas, menor tiempo de inactividad y mayor eficiencia en el consumo de combustible.
<b>Impactos</b>	Mejora la eficiencia operativa al reducir fallas mecánicas, optimizar el rendimiento de los vehículos y prolongar la vida útil de sus componentes. Desde el punto de vista ambiental, contribuye indirectamente a reducir el consumo de combustible y las emisiones asociadas. También puede mejorar la seguridad vial y las condiciones de trabajo mediante una gestión preventiva del estado de la flota.

Incorporación de neumáticos de baja resistencia a la rodadura (LRR) en la flota de transporte	
<b>Complejidad</b>	<b>Baja</b> Consiste en la sustitución progresiva de neumáticos convencionales por neumáticos de baja resistencia a la rodadura. No requiere cambios en la infraestructura ni en la configuración de los vehículos y puede integrarse en los ciclos habituales de mantenimiento de la flota. Su efectividad depende de una adecuada gestión de la presión de inflado y del mantenimiento regular de los vehículos.
<b>Costos</b>	<b>Bajo a medio</b> Los neumáticos de baja resistencia a la rodadura pueden tener un costo inicial ligeramente superior al de los neumáticos convencionales, pero no requieren inversiones adicionales. La mejora en la eficiencia del consumo de combustible puede compensar parcialmente este costo a lo largo de su vida útil.
<b>Impactos</b>	Reduce el consumo de combustible y las emisiones asociadas al transporte. También mejora la eficiencia energética de la operación logística y puede prolongar la vida útil de los neumáticos cuando se combina con un adecuado mantenimiento y control de presión. La presión inadecuada puede aumentar el consumo de combustible entre 1 % y 3 %.

Incorporación de VAD y mayor eficiencia energética en la flota de transporte de la cadena cárnica	
<b>Complejidad</b>	<b>Media</b> No requiere cambios en la tecnología energética del vehículo, pero sí la adopción de configuraciones vehiculares de mayor longitud o capacidad, sujetas a requisitos técnicos y normativos y a su circulación en corredores habilitados de la red vial. En Uruguay, su uso podría concentrarse en tramos de mayor estándar, requiriendo planificación logística para compatibilizar estas configuraciones con camiones convencionales en caminería secundaria.
<b>Costos</b>	<b>Medio</b> Los costos se asocian principalmente a la incorporación de nuevas configuraciones vehiculares o a la adaptación de unidades existentes. No requiere cambios en el sistema energético ni desarrollo de infraestructura de abastecimiento adicional, lo que reduce los costos en comparación con tecnologías de sustitución energética.
<b>Impactos</b>	Reduce la huella de carbono por animal transportado al aumentar la cantidad de cabezas por viaje y disminuir el número total de viajes. El beneficio ambiental se asocia principalmente a mejoras en la eficiencia logística. Su implementación debe respetar estándares de bienestar animal, incluyendo espacio mínimo, ventilación y condiciones adecuadas de transporte.

Planificación avanzada de rutas, consolidación de cargas y reducción de viajes en vacío	
<b>Complejidad</b>	<b>Media</b> Requiere herramientas de planificación y modelado logístico para optimizar rutas, identificar corredores prioritarios y mejorar la coordinación entre actores de la cadena. La integración de datos y sistemas de gestión facilita la planificación de soluciones de transporte multimodal. No requiere cambios en la tecnología vehicular, pero sí ajustes organizacionales en la planificación del transporte.
<b>Costos</b>	<b>Bajo a medio</b> Los costos se asocian principalmente a la incorporación de plataformas de gestión logística, sistemas de información geográfica y herramientas de modelado, así como a la integración de datos y capacitación del personal. En comparación con otras medidas tecnológicas, la inversión es relativamente moderada y se orienta al fortalecimiento de capacidades de gestión y análisis de información.
<b>Impactos</b>	Reduce el número de viajes, los kilómetros recorridos y el consumo de combustible, contribuyendo a disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero. También mejora la utilización de la flota, reduce los viajes en vacío y optimiza los tiempos de traslado. El modelado sistémico puede servir como insumo para la planificación territorial y energética del transporte de carga. En esquemas de logística multimodal deben considerarse además aspectos de sanidad y bienestar animal.

Sustitución progresiva de gases refrigerantes de alto potencial de calentamiento global	
<b>Complejidad</b>	<b>Media</b> Requiere sustituir o adaptar equipos de refrigeración que utilizan gases con alto potencial de calentamiento global (HFC o HCFC), incorporando refrigerantes de nueva generación como CO <sub>2</sub> , amoníaco o HFO. Puede implicar recambio o reconversión de sistemas, capacitación técnica para su operación segura y cumplimiento de marcos regulatorios que establecen la reducción progresiva de estas sustancias.
<b>Costos</b>	<b>Medio a alto</b> Los costos se asocian principalmente al recambio o adaptación de equipos de refrigeración y al mayor costo de algunos refrigerantes de nueva generación. No obstante, estas inversiones pueden integrarse progresivamente en los ciclos de renovación tecnológica de los sistemas de frío en frigoríficos, transporte en vehículos refrigerados y contenedores reefer.
<b>Impactos</b>	Reduce emisiones indirectas de gases de efecto invernadero asociadas al uso y fuga de refrigerantes con alto potencial de calentamiento global. Contribuye al cumplimiento de compromisos internacionales de reducción de estas sustancias y puede mejorar la eficiencia energética de los sistemas de refrigeración mediante tecnologías más modernas.

## HIDRÓGENO VERDE

Atendiendo que el uso de hidrógeno verde se encuentra en una fase incipiente a nivel nacional, lo que aún no permite contar con datos precisos sobre su generación más allá de experiencias piloto, se detalla a continuación el análisis realizado por integrantes de la consultora KPMG Uruguay en el artículo “Entendiendo el rápido crecimiento de las aplicaciones del hidrógeno en la industria energética”.

Allí se analiza la creciente relevancia del hidrógeno en la transición energética

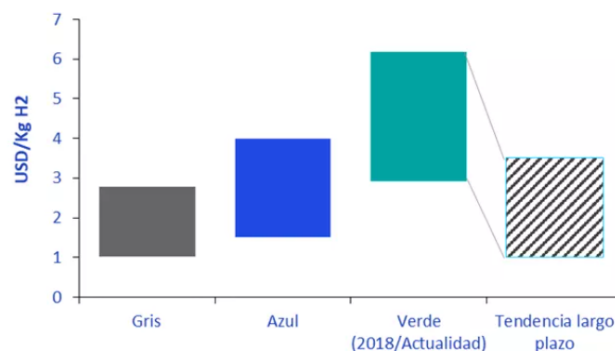
global y destaca cómo los costos de producción determinan la velocidad y dirección del desarrollo de las distintas “etiquetas” de hidrógeno (gris, azul y verde).

Aunque el hidrógeno verde es el más beneficioso en términos de descarbonización, hoy el hidrógeno gris domina el mercado debido a su menor costo, resultado de la amplia disponibilidad y bajo precio del gas natural y el carbón en varias regiones. En contextos como Medio Oriente, Rusia o América del Norte, el costo del hidrógeno gris llega a 1 USD/kg, y en otras zonas rara vez supera 2 USD/kg.

En contraste, el hidrógeno verde mantiene actualmente un costo mayor, estimado entre 2,5 y 6 USD/kg, debido principalmente al precio del insumo energético renovable, que representa hasta 75% del costo operativo. A pesar de esto, las proyecciones indican que el hidrógeno verde irá ganando competitividad conforme avance la tecnología, especialmente los electrolizadores cuyo tamaño y escala han crecido rápidamente y bajen los costos de la energía eólica y solar. El hidrógeno azul, aunque más caro que el gris, aparece como una opción intermedia debido al costo adicional asociado a la captura y almacenamiento de CO<sub>2</sub>.

El artículo señala que regiones con abundantes recursos renovables como Uruguay, la Patagonia, Nueva Zelanda, el norte de África o Australia tienen potencial para producir hidrógeno verde a costos competitivos en el futuro. Aun así, se advierte que hasta al menos 2030 la ventaja de costos seguirá del lado de los combustibles fósiles, salvo que entren en juego mecanismos regulatorios, como precios al carbono. Asimismo, es necesario el desarrollo de capacidad institucional, macroeconómica y jurídica para atraer al país las inversiones necesarias para asegurar suministro a largo plazo mediante iniciativas con factibilidad económica y ambiental (Perutti, Magdalena; Minarrieta, Mauricio, 2023).

Gráfico 3: Comparativo de costos de generación de hidrógeno gris, azul y verde y su proyección a largo plazo. Fuente: KPMG Uruguay, 2023.



## 5. Acceso a programas de compensación de carbono

Un programa de compensación de carbono es el sistema de acreditación que establece las reglas, metodologías y la infraestructura de registro para que proyectos de reducción o remoción de GEI cuantifiquen, verifiquen y emitan créditos de carbono (1 crédito = una tonelada de CO<sub>2</sub>e), los cuales luego pueden transferirse y retirarse para compensar emisiones de terceros, evitando la doble contabilidad y garantizando integridad ambiental. En la práctica, el programa define la gobernanza, la validación y verificación independientes, el seguimiento (monitoreo, reporte y verificación, MRV), el registro público y los procedimientos de emisión-transferencia-retiro de créditos.

Los ámbitos de uso de un programa de compensación de carbono pueden ser regulado, voluntario o mixto.

**Regulado:** los créditos de carbono se emplean para satisfacer obligaciones legales impuestas por un régimen regulatorio específico, que determina la elegibilidad de programas y créditos, exige MRV y trazabilidad y, cuando corresponde, ajustes internacionales para evitar el doble cómputo.

**Voluntario:** los créditos de carbono son utilizados sin una obligación legal de hacerlo, para compensar emisiones residuales, cumplir metas corporativas o respaldar estrategias de sostenibilidad y de cadena de suministro.

**Mixto:** los créditos de carbono emitidos por el programa son elegibles tanto para el mercado voluntario como para un régimen de cumplimiento y se emplean alternativamente (nunca de forma simultánea), con trazabilidad en registro y sin doble cómputo, cumpliendo las reglas del programa y los criterios del regulador que habilita su uso regulado.

Los programas utilizados en el ámbito regulatorio, habilitados por la autoridad competente del país de aplicación, serán abordados en el capítulo correspondiente a las “Políticas comerciales sostenibles”, para los mercados de interés.

A continuación, se introducen los principales programas de compensación de carbono<sup>1</sup> existentes a nivel internacional, utilizados tanto en ámbitos voluntarios como mixtos. Se los identifica como mecanismos operativos para que empresas y organizaciones vinculadas a la logística de la cadena cárnica desarrollen proyectos de eficiencia energética y otras medidas de mitigación, con generación de créditos de carbono:

- Verra- Verified Carbon Standard (VCS), <https://verra.org/>
- Gold Standard, <https://www.goldstandard.org/>

---

<sup>1</sup> Los programas de compensación de carbono definen reglas, metodologías, verificación y registro para emitir créditos. Los mercados de carbono son los ámbitos donde esos créditos se demandan, transan y usan.

- American Carbon Registry (ACR), <https://acrcarbon.org/>
- Mecanismo de Acreditación del Acuerdo de París, PACM, Artículo 6.4 <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/article-64-mechanism>

El estándar A6.4-STAN-AC-002 define los requisitos obligatorios para todo proyecto bajo el mecanismo del Art.6.4, desde el diseño hasta la emisión de reducciones (A6.4ERs). No hay exclusión sectorial por lo cual transporte, logística, frío industrial, energía y combustibles son plenamente elegibles. Para proyectos empresariales, el estándar exige que el Art. 6.4 forme parte del análisis económico ex ante, es decir, la posibilidad de generar A6.4ERs debe ser considerada y documentada antes de comprometer la inversión, porque el estándar exige demostrar que esos incentivos influyeron en la decisión de realizar el proyecto tal como se diseñó. Las metodologías a ser utilizadas deben ser aprobadas por el Órgano Supervisor del Artículo 6.4.

En la cadena cárnica uruguaya muchas inversiones logísticas seguramente ocurrirían igual, pero con tecnologías menos ambiciosas o más lentamente. El Art. 6.4 no financia el “mínimo” pero sí financiaría el salto tecnológico adicional.

Cabe destacar que la compensación se considera un instrumento complementario y residual, posterior a la implementación de medidas de reducción costo-efectivas.

## PRECIOS Y VOLÚMENES EN LOS MERCADOS DE CARBONO

En los mercados regulados o de cumplimiento, el precio está dominado por el precio implícito de la obligación (impuesto o ETS) y por los límites regulatorios al uso. Como resultado los volúmenes son más previsibles y los precios más estables. Las autoridades regulatorias tienen mecanismos de información de precios en forma sistemática.

En los mercados voluntarios, los precios suelen estar determinados por el tipo de proyecto, los cobeneficios, la mayor compatibilidad futura con CORSIA y Art.6 del Acuerdo de París y la reputación del programa/estándar. Suelen ser mercados con alta dispersión de precios que en promedio oscilan entre 6-25 USD/ toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente.

Según el informe State of the Voluntary Carbon Market 2025 – Meeting the Moment: Renewing Trust in Carbon Finance de Ecosystem Marketplace (EM), durante 2024 los Mercados Voluntarios de Carbono (MVC) continuaron atravesando una etapa de ajuste y transformación. El volumen de créditos transados a nivel global se redujo aproximadamente un 25% respecto al año anterior, alcanzando unos 84 millones de toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente, mientras que el valor total del mercado cayó cerca de un 30%, situándose en torno a USD 535 millones. Esta contracción se explica principalmente por la salida progresiva de créditos considerados de menor calidad y por una mayor cautela de compradores e intermediarios.

Gráfico 4 Tamaño del Mercado Voluntario de Carbono por Valor de Créditos de Carbono Emitidos (pre-2005 a 2024). Fuente: Ecosystem Marketplace, 2025

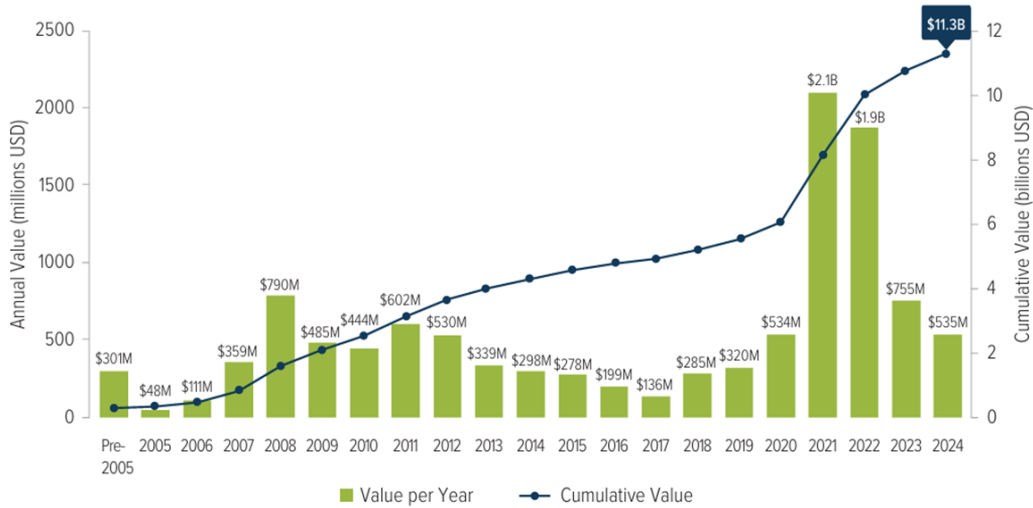
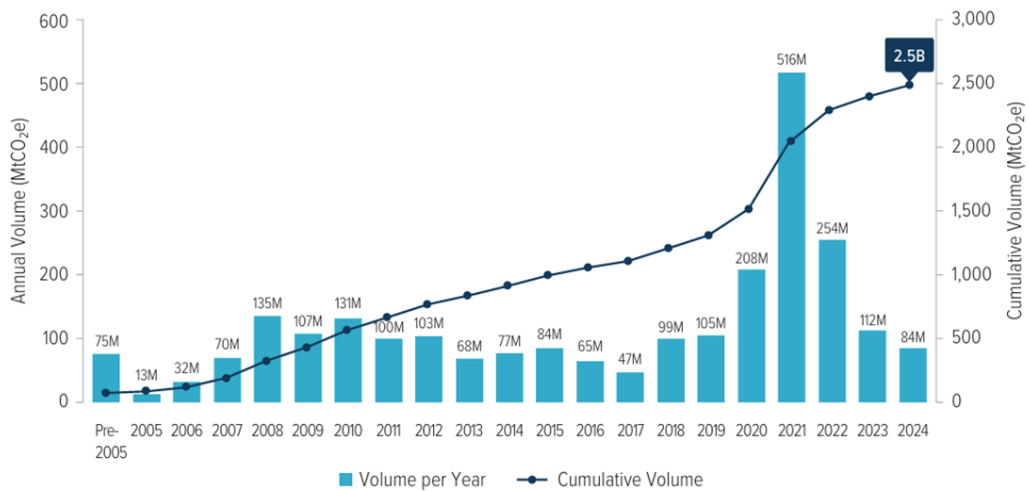


Gráfico 5 Tamaño del Mercado Voluntario de Carbono por Volumen de Créditos de Carbono Emitidos (pre-2005 a 2024). Fuente: Ecosystem Marketplace, 2025



No obstante, esta disminución de los volúmenes transados no refleja una caída equivalente de la demanda final. El número de créditos efectivamente utilizados y retirados se mantuvo relativamente estable, en torno a 180 millones de toneladas, lo que indica que empresas y organizaciones continúan recurriendo a los créditos de carbono como parte de sus estrategias climáticas, aunque bajo criterios crecientemente exigentes de calidad, integridad y trazabilidad.

En este contexto, los precios promedio mostraron solo una leve corrección, ubicándose alrededor de USD 6 por tonelada, y permanecen claramente por encima de los niveles previos a 2021. Al mismo tiempo, se observa una mayor

diferenciación de precios entre tipos de créditos. Aquellos asociados a proyectos de mayor integridad ambiental, en particular los que remueven carbono de la atmósfera, como forestación, restauración de ecosistemas o ciertas soluciones tecnológicas, alcanzan precios significativamente superiores a los créditos basados exclusivamente en reducciones de emisiones. A su vez, los compradores muestran una marcada preferencia por créditos recientes, emitidos en los últimos cinco años, que registran primas de precio muy relevantes frente a créditos más antiguos, reflejando la creciente atención sobre la actualidad metodológica y la credibilidad de los impactos declarados.

Información más reciente publicada por Ecosystem Marketplace en el EM Market Insights Brief – VCM Demand Outlook (Q1 2026) indica que, desde la perspectiva de desarrolladores e intermediarios, el interés de los compradores y los niveles de precios se han mantenido mayoritariamente estables, sin una tendencia clara de crecimiento o caída generalizada. Aproximadamente la mitad de los actores del mercado reporta precios similares a los observados seis meses atrás, mientras que los aumentos y reducciones se distribuyen de forma equilibrada, lo que sugiere que el mercado ha alcanzado un cierto punto de equilibrio, aunque con una expansión aún limitada.

En términos de volúmenes, el MVC se caracteriza actualmente por una demanda altamente selectiva. Si bien existen consultas frecuentes por créditos, solo una pequeña proporción se traduce en operaciones efectivas, con tasas de conversión cercanas al 6%, lo que evidencia procesos de compra más rigurosos y prolongados. La mayor parte de las transacciones se concentra en créditos ya emitidos (mercado spot), lo que indica una preferencia por reducir riesgos y evitar compromisos de largo plazo, aunque comienza a observarse un interés incipiente por acuerdos de suministro a futuro en segmentos específicos.

En conjunto, el MVC puede describirse hoy como un mercado más maduro y cauteloso, con precios relativamente estables, volúmenes moderados y un énfasis creciente en la calidad de los créditos por sobre el crecimiento acelerado de las cantidades transadas. Para Uruguay, esta dinámica implica oportunidades reales pero selectivas: si bien existe interés por parte de los compradores, los volúmenes efectivamente colocables dependen de la capacidad de ofrecer proyectos con alta integridad ambiental, sistemas robustos de medición y verificación, y plazos de generación de créditos compatibles con la preferencia del mercado por unidades disponibles.

Estas características resultan particularmente relevantes para la cadena cárnica uruguaya, y en especial para sus actividades de logística y transporte como ser la movilización de ganado, transporte terrestre y marítimo, operación de plantas frigoríficas y cadena de frío. La menor disponibilidad de créditos de baja calidad implica que las estrategias de compensación de emisiones asociadas al transporte tenderán a basarse en menores volúmenes de créditos, pero con mayores exigencias de integridad y, en muchos casos, con precios superiores al promedio histórico.

Al mismo tiempo, la creciente preferencia de los compradores internacionales por créditos provenientes de proyectos vinculados a sectores difíciles de descarbonizar o que remueven carbono de la atmósfera refuerza la conveniencia de que las empresas de la cadena cárnica no se limiten a la compra de créditos, sino que evalúen el desarrollo o la participación en proyectos de mitigación asociados al propio sistema logístico, tales como mejoras en eficiencia energética, uso de biogás o combustibles alternativos, optimización del transporte y gestión de residuos.

En este marco, los MVC evolucionan hacia un esquema en el que la calidad pesa más que la cantidad, y donde los créditos de carbono funcionan no solo como un instrumento de compensación, sino también como un mecanismo de señalización de compromiso climático frente a mercados internacionales cada vez más exigentes. Para la cadena cárnica uruguaya, anticiparse a esta evolución resulta clave para sostener y fortalecer su competitividad exportadora, especialmente en destinos donde las emisiones asociadas a la logística y el transporte representan una fracción relevante de la huella de carbono del producto final.

## 6. Políticas comerciales sostenibles

A continuación, se desarrolla un análisis sobre las tendencias regulatorias en los mercados clave para la colocación de la producción de la cadena cárnica nacional y se presentan una serie de recomendaciones para alinearse con las exigencias ambientales crecientes a nivel internacional.

A efectos de analizar las tendencias regulatorias relacionadas a la descarbonización de la cadena cárnica exportadora con foco en la logística y el transporte en forma específica, se consideraron como mercados de interés a la Unión Europea, China y Estados Unidos.

### UNIÓN EUROPEA

#### Reglas que inciden de forma directa en los productos cárnicos

**Reglamento de Productos Libres de Deforestación (EUDR)**, este reglamento aprobado formalmente el 31 de mayo de 2023, entró en vigor el 29 de junio de 2023, aunque sus obligaciones principales se aplican en forma diferida, con plazos que fueron modificados en 2024 y 2025 a fin de reducir los costos administrativos y la carga burocrática para las empresas que están obligadas a cumplir con el Reglamento. Sus obligaciones sustantivas están asociadas a trazabilidad, debida diligencia y no deforestación. El Reglamento se aplica a distintos tipos de operadores según su tamaño: Operadores grandes y medianos; Operadores micro y pequeños; Micro y pequeños operadores que ya estaban alcanzados por el Reglamento Europeo de la Madera (EUTR).

En 2025 se acordó aplazar el cumplimiento pleno con el Reglamento hasta las siguientes fechas: 30/12/2026 (grandes y medianos operadores; micro y pequeños

operadores ya cubiertos por el EUTR), 30/06/2027 (PyMEs).

El Reglamento incluye explícitamente a los bovinos y sus productos derivados (carne fresca, congelada, procesada, cueros y cuero). Los productos deben cumplir tres requisitos acumulativos: ser libres de deforestación (no provenir de tierras deforestadas o degradadas luego del 31/12/2020), haber sido producidos conforme a la legislación del país de origen y estar respaldados por una declaración de diligencia debida, con información verificable de trazabilidad y geolocalización. El EUDR no regula directamente el transporte, pero afecta la logística en forma indirecta:

- Posibles demoras en frontera si la documentación no es completa.
- Mayor exigencia contractual de los importadores europeos hacia los exportadores y, en cascada, hacia productores.

La clasificación de Uruguay como país de bajo riesgo de deforestación implica que solo un 1 % de los envíos será inspeccionado físicamente, reduciendo fricciones logísticas frente a competidores regionales.

**CSRD/ESRS. Corporate Sustainability Reporting Directive** es una directiva de la UE que amplía y endurece las obligaciones de reporte de sostenibilidad. Aplica inicialmente a grandes compañías europeas y luego se extiende a más empresas en olas sucesivas. ESRS, European Sustainability Reporting Standards, son los estándares técnicos que indican qué y cómo deben reportar las empresas bajo la CSRD (clima, ambiente, social, gobernanza). Las empresas están obligadas a informar:

- Emisiones de GEI en Alcances 1, 2 y 3: (Alcance 1: emisiones directas propias; Alcance 2: emisiones indirectas por energía comprada; Alcance 3: emisiones de la cadena de valor (proveedores aguas arriba y clientes aguas abajo).
- Reporte bajo el principio de doble materialidad (Materialidad de impacto: cómo la empresa impacta en clima, ambiente y sociedad; Materialidad financiera: cómo los riesgos y oportunidades ESG afectan su desempeño financiero).

CSRD/ESRS no es solo un requisito de reporte europeo, sino un driver regulatorio que baja por la cadena de suministro, obligando a proveedores no europeos (como la cadena cárnica uruguaya) a generar y entregar datos primarios de sostenibilidad, especialmente de emisiones y logística. La obligación se traslada contractualmente hacia atrás, desde la empresa europea hacia proveedores de materias primas, frigoríficos no europeos, operadores logísticos, transportistas, puertos, energía, insumos.

### Reglas que inciden en la logística (marítimo, terrestre, aéreo)

**EU ETS marítimo:** Es la extensión del Sistema de Comercio de Emisiones de la UE (EU ETS) al sector del transporte marítimo. A partir de esta inclusión, determinados buques deben medir, reportar y cubrir con derechos de emisión los gases de efecto

invernadero que emiten. Desde 2024 aplica a buques de 5.000 toneladas de arqueo bruto (GT) o más (grandes buques portacontenedores, graneleros, buques frigoríficos, entre otros).

Si el buque navega entre puertos de la Unión Europea (viajes intra-UE), todas las emisiones de CO<sub>2</sub> del viaje quedan cubiertas por el EU ETS.

Si el viaje es entre un puerto de la UE y un puerto fuera de la UE (viajes extra-UE) solo se cubre el 50 % de las emisiones del trayecto.

Los gases que están incluidos son: dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), incluido desde 2024; metano (CH<sub>4</sub>) y óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) que se incorporan a partir de 2026. Lo cual es relevante ya que algunos combustibles alternativos (como gas natural licuado) reducen CO<sub>2</sub> pero emiten más metano, que pasa a estar regulado.

Si bien el sistema comenzó en 2024, la obligación de entregar derechos de emisión se introduce de forma gradual: 2025 (40%), 2026 (70%), 2027 (100%); CH<sub>4</sub>/N<sub>2</sub>O se agregan desde 2026. Es un período de transición, pensado para que el sector se adapte progresivamente al nuevo costo del carbono.

**FuelEU Maritime:** Es un reglamento de la Unión Europea que no pone un precio al carbono, sino que impone estándares técnicos obligatorios sobre la energía utilizada a bordo de los buques que operan en puertos de la UE. Su objetivo es forzar el cambio hacia combustibles y tecnologías más limpias en el transporte marítimo. A partir del 01/01/2025, los buques cubiertos deben empezar a cumplir con límites de intensidad de gases de efecto invernadero (Intensidad GHG). No se regulan las emisiones totales del viaje, sino cuántos GEI se emiten por unidad de energía utilizada, incentivándose al uso de energía más limpia y no solo consumir menos energía. Con un enfoque de vida completo, Intensidad GHG “well-to-wake” (well: extracción o producción del combustible; to wake: uso final del combustible en el buque) evitándose así el uso de combustibles muy emisores en su producción. El reglamento fija una trayectoria obligatoria de reducción de la intensidad GHG de la energía marítima:

- 2025: reducción mínima del 2 %.
- Progresivamente más exigente en los años siguientes.
- 2050: reducción del 80 %.

Esto obliga a introducir combustibles alternativos (biocombustibles sostenibles, e-fuels, hidrógeno, amoníaco); mejorar eficiencia energética; renovar flotas y contratos de suministro energético.

Asimismo, desde 2030 para buques portacontenedores y de pasajeros, en puertos cubiertos por la normativa será obligatorio la conexión eléctrica del buque al puerto (OPS, On-shore Power Supply), que permite apagar los motores auxiliares y usar electricidad desde tierra mientras el buque está atracado (el buque deja de quemar combustible fósil en puerto), reduciéndose así las emisiones y la contaminación local (NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, partículas), especialmente en zonas portuarias urbanas.

**AFIR (Alternative Fuels Infrastructure Regulation, Reg. 2023/1804)** es un reglamento europeo de aplicación directa que fija objetivos obligatorios para el despliegue de infraestructura de: Electricidad (carga), Hidrógeno, Energía en puerto (shore power), con el fin de eliminar cuellos de botella de infraestructura que impiden la descarbonización del transporte. AFIR establece metas vinculantes, con plazos y cobertura territorial concreta, es decir: los Estados miembros están legalmente obligados a instalar la infraestructura definida, no es voluntario ni depende del mercado, se aplica de forma coordinada en los principales corredores de transporte europeos.

Respecto al transporte carretero de carga pesada (camiones), con el objetivo de que el transporte pesado eléctrico sea técnica y operativamente viable para largas distancias, se establece que, en las principales rutas europeas, especialmente la red TEN-T (Trans-European Transport Network), debe existir infraestructura de carga eléctrica de alta potencia para vehículos pesados: al menos cada 120 km. El despliegue es progresivo, con hitos intermedios y debe estar plenamente operativo hacia 2030.

AFIR también cubre el hidrógeno como vector energético:

- Obliga a instalar estaciones de repostaje de hidrógeno: cada 200 km en la red central TEN-T.
- Pensado para: transporte pesado de larga distancia, tecnologías donde la electrificación directa es más difícil.

La norma no impone usar hidrógeno, pero garantiza que la infraestructura exista para quien lo adopte.

Asimismo, AFIR exige instalación de shore power en puertos de la red TEN-T, en particular para buques frecuentemente atracados (contenedores, pasajeros) con el objetivo de reducir emisiones, mejorar calidad del aire en zonas portuarias y alinear puertos con FuelEU Maritime y EU ETS marítimo.

Aunque AFIR no regula directamente a exportadores, sí:

- Cambia el mapa de costos y decisiones logísticas dentro de Europa,
- Acelera la electrificación y el uso de hidrógeno en:
  - Transporte terrestre desde/ hacia puertos.
  - Distribución interna de alimentos.
- Reduce gradualmente la dependencia de diésel en la “última milla” y corredores principales.

**Normas CO<sub>2</sub> para HDV.** Se trata del Reglamento (UE) 2024/1610, que actualiza y endurece los estándares de emisiones de CO<sub>2</sub> para vehículos pesados (HDV – Heavy-Duty Vehicles), entre ellos: camiones de más de 7,5 toneladas, ómnibus y buses, vehículos de transporte urbano y de larga distancia. Estas normas obligan a los fabricantes a que los vehículos nuevos vendidos en la UE cumplan metas de reducción de emisiones cada vez más estrictas.

Las metas de reducción para camiones de más de 7,5 toneladas se miden respecto a una línea base y se aplican de forma progresiva:

- 2030: -45 % de emisiones de CO<sub>2</sub>.
- 2035: -65 % de emisiones de CO<sub>2</sub>.
- 2040: -90 % de emisiones de CO<sub>2</sub>.

Hacia 2040, los camiones nuevos vendidos deberán ser casi totalmente libres de emisiones, lo que en la práctica empuja a camiones eléctricos a batería, camiones a hidrógeno, o tecnologías equivalentes de cero/bajas emisiones.

Aunque la norma se aplica formalmente a los fabricantes, el efecto real recae sobre los operadores logísticos y transportistas, porque:

- Los fabricantes dejarán de ofrecer camiones diésel tradicionales en el mercado europeo.
- Los operadores deberán renovar flotas antes del fin de su vida útil, invertir en vehículos más caros (eléctricos / hidrógeno), adaptar operaciones a nuevas autonomías, tiempos de carga y rutas.
- Se acelera la obsolescencia regulatoria de flotas existentes.

**ReFuelEU Aviation** es un reglamento de la Unión Europea que busca descarbonizar la aviación obligando a que el combustible utilizado en vuelos que parten de aeropuertos de la UE incorpore una proporción mínima de combustibles sostenibles. Es una obligación técnica de mezcla de combustible.

SAF (Sustainable Aviation Fuel) es un combustible de aviación sostenible que:

- Puede producirse a partir de residuos, biomasa o procesos sintéticos.
- Reduce significativamente las emisiones de GEI respecto al queroseno fósil.
- Es compatible (total o parcialmente) con las aeronaves actuales.

Desde 2025, el combustible de aviación suministrado en aeropuertos de la UE debe contener al menos un 2 % de SAF. No es voluntario: todas las aerolíneas que operan desde la UE deben cumplir con ese porcentaje mínimo.

El reglamento define una trayectoria creciente de incorporación de SAF, con porcentajes cada vez más altos en los años siguientes, para forzar una transición gradual pero irreversible hacia combustibles de menor huella de carbono.

A partir de 2030, el reglamento agrega un requisito adicional: dentro del SAF obligatorio, una parte mínima deberá ser e-fuels (combustibles sintéticos), producidos con:

- Hidrógeno verde.
- CO<sub>2</sub> capturado.
- Electricidad renovable.

Evitando así que toda la transición se base solo en biocombustibles y empuja tecnologías de cero emisiones netas a largo plazo.

ReFuelEU Aviation encarece estructuralmente el transporte aéreo, no por una penalización, sino porque obliga a usar combustibles más limpios y caros, acelerando la descarbonización de la aviación.

En resumen: el “nuevo estándar mínimo” de la UE combina debida diligencia forestal (EUDR), reporting de sostenibilidad (CSRD/ESRS) y una descarbonización acelerada del transporte (EU ETS marítimo, FuelEU Maritime, AFIR para infraestructura de recarga/hidrógeno y normas CO<sub>2</sub> para camiones).

Para carne vacuna implica trazabilidad geoespacial hasta predio y huella de Alcance 3 exigida indirectamente por clientes europeos, además de presiones de costo en fletes marítimos y terrestres por precios de carbono y combustibles sustentables.

## CHINA

### Decretos GACC 248 y GACC 249

Desde el 1 de enero de 2022, China aplica dos normas clave emitidas por la General Administration of Customs of China (GACC). El Decreto GACC 248 regula el registro obligatorio de establecimientos extranjeros que producen, procesan o almacenan alimentos destinados a China (frigoríficos, plantas de procesamiento y, en ciertos casos, depósitos y cámaras de frío en el país exportador deben estar registrados ante GACC).

Asimismo, el Decreto GACC 249 establece las medidas administrativas de seguridad alimentaria para la importación y exportación de alimentos. En la práctica, el decreto establece el marco operativo que permite a GACC auditar y controlar toda la cadena de suministro del alimento importado.

Aunque los decretos no son normas climáticas, imponen requisitos que obligan a estructurar sistemas de trazabilidad robustos tales como registros de establecimientos (identificación y georreferenciación), etiquetado con número de registro y control documental y de procesos (temperatura, condiciones sanitarias, tiempos de transporte y almacenamiento y controles oficiales, entre otros). Todo lo cual excede el mero cumplimiento documental y empuja a sistemas digitales de trazabilidad (digitalización de la cadena, integración de datos y transparencia operativa).

Esto es particularmente relevante si, a futuro, China introduce requerimientos ambientales sectoriales o integra criterios climáticos en compras públicas o acuerdos sanitarios-comerciales.

## Puertos y emisiones: uso de shore power (OPS)

En China, la conexión es obligatoria cuando el buque está equipado (tiene conexión eléctrica compatible: frecuencia, voltaje, enchufes) y el muelle es apto (tiene infraestructura OPS operativa). Hay multas por no conexión y obligación de registro de uso.

Este país está internalizando la descarbonización portuaria en la operación del comercio exterior. El cumplimiento OPS pasa a ser parte del “costo de acceder al mercado”.

China no exige hoy que la carne importada sea “baja en carbono” pero sí exige que la logística que la transporta opere bajo estándares de menor emisión en su territorio. Esto implica que la descarbonización logística ya está ocurriendo aguas abajo, aun sin etiquetado climático.

## Logística de bajas emisiones

La “Guía 2025 para un sistema energético del transporte limpio a 2035” fija lineamientos para transformar el sistema energético del transporte chino hacia bajas emisiones. La guía no se limita a eficiencia, sino que apunta a cambiar la fuente de energía del transporte.

Si bien no es una exigencia directa al exportador uruguayo, sí define el entorno operativo del mercado chino ya que la carne importada entra en un sistema logístico que prioriza flotas limpias, electrifica nodos, mide y gestiona emisiones; lo cual impacta costos logísticos internos, selección de operadores y condiciones contractuales.

China está descarbonizando su logística, no pidiendo aún que el exportador la descarbonice. Aun sin imponer hoy requisitos climáticos al producto, la huella logística asociada a la carne será cada vez más visible, medible y comparable. Lo cual refuerza para la estrategia exportadora uruguayo, la conveniencia de entender la huella logística “puerta a puerta”, anticipar futuros requerimientos e integrar la logística en el relato de sostenibilidad.

## Marco de carbono: ETS nacional

El Sistema Nacional de Comercio de Emisiones de China (China ETS) fue lanzado en 2021 y ampliado en 2025 más allá del sector eléctrico para incluir acero, cemento y aluminio, tres de los sectores industriales más intensivos en carbono del país.

Con esta ampliación el ETS pasa de cubrir solo electricidad a cubrir también industrias pesadas, la cobertura del mercado sube aproximadamente de 40 % a cerca de 60 % de las emisiones nacionales de CO<sub>2</sub> y se incorporan unas 1.500 empresas industriales adicionales. Todo lo cual consolida al ETS como el principal instrumento económico de política climática de China.

China definió el período 2024–2026 como una fase de aprendizaje (learning phase) para los nuevos sectores. Durante esta fase las asignaciones se basan en emisiones históricas verificadas, los ajustes por desempeño son limitados y el objetivo principal es: mejorar calidad de datos, ajustar metodologías, acostumbrar a empresas y autoridades al sistema.

A partir de 2027, el ETS chino pasará a una fase más estricta con benchmarks más exigentes, reducción gradual de asignaciones, mayor probabilidad de déficits de permisos para instalaciones intensivas en carbono. El precio del carbono se vuelve más relevante económicamente.

Aunque el transporte, la logística y la carne importada no están directamente cubiertos por el ETS, sí ocurre un efecto indirecto de transmisión de costos, porque:

- Materiales y energía clave para la logística están cubiertos:
  - Acero: camiones, chasis, contenedores, infraestructura portuaria.
  - Cemento: puertos, carreteras, depósitos, infraestructura logística.
  - Aluminio: contenedores, carrocerías, equipamiento.
  - Electricidad: ya estaba cubierta por el ETS.

Al entrar estos sectores al ETS el costo del carbono pasa a formar parte de sus estructuras de costos y ese costo tiende a trasladarse aguas abajo a clientes y usuarios de servicios.

Para la carne importada el precio logístico interno en China puede aumentar y diferenciarse según desempeño ambiental del operador.

En resumen, China está internalizando el costo del carbono en su economía real y la logística asociada a la carne importada operará en un entorno de:

- Costos crecientes para soluciones intensivas en carbono,
- Ventaja relativa para cadenas más eficientes y electrificadas.

En términos estratégicos el ETS chino actúa como un driver económico indirecto de descarbonización logística, complementando las exigencias operativas (OPS, flotas limpias) ya analizadas.

Cabe destacar que se identifica una convergencia regulatoria clara entre la UE y China pese a diferencias institucionales. Ambos mercados convergen en un mismo resultado, donde el carbono tiene precio y la descarbonización logística se vuelven ventaja económica.

## Plan de Control de Emisiones de Metano

El Methane Emissions Control Action Plan de China, emitido en noviembre de 2023, es el primer documento nacional de alto nivel dedicado específicamente a la gestión y reducción del metano, con horizonte hasta 2035 y metas intermedias para 2025 y 2030.

China está priorizando la reducción de metano en ganadería, desarrollando capacidades técnicas y regulatorias para medir y gestionar CH<sub>4</sub>, integrando metano en su agenda climática y productiva.

Esto hace que la ganadería (incluida la comparada/importada) gane visibilidad climática, las líneas de efluentes y manejo de residuos ganaderos se vuelvan un foco técnico clave, los sistemas con baja intensidad de metano y buen manejo de estiércol queden mejor posicionados en el discurso y, potencialmente, en futuras exigencias.

Aunque el plan es productivo-ambiental, tiene impacto indirecto en la logística: la digestión anaerobia puede generar energía local para frigoríficos, transporte interno, cadena de frío; el foco en monitoreo, reporte y verificación (MRV) refuerza la cultura de medición, trazabilidad ambiental, reporte verificable, que luego se replica en logística.

En conjunto con ETS industrial, OPS portuario, logística de bajas emisiones, el plan de metano completa el enfoque sistémico chino para la descarbonización desde la producción primaria hasta la logística.

## CONVERGENCIA DE CHINA Y LA UNIÓN EUROPEA

Pese a enfoques distintos en los instrumentos de política pública utilizados, se identifica que China y la UE convergen en cinco pilares comunes:

- Descarbonizar la logística, no solo el producto.
- Electrificar nodos y flotas (puertos, camiones, OPS).
- Cambiar el mix energético hacia combustibles limpios.
- Hacer trazable y registrable el uso energético.
- Internalizar costos climáticos en la operación logística.

Lo cual tiene implicancias para la cadena cárnica uruguaya:

- La carne exportada entra en sistemas logísticos cada vez más regulados ambientalmente, tanto en China como en la UE.
- Aunque China hoy no exige huella de carbono al producto, el entorno operativo converge con la UE:
  - Costos más altos para logística intensiva en emisiones
  - Ventaja para cadenas trazables y eficientes.
- Esto refuerza la necesidad de:
  - Medir huella logística,
  - Integrar logística en la narrativa de sostenibilidad,
  - Anticipar estándares que hoy son portuarios/energéticos y mañana pueden ser comerciales.

## ESTADOS UNIDOS

Estados Unidos no presenta hoy un marco federal obligatorio de descarbonización de cadenas cárnicas; sin embargo, las leyes climáticas de California (SB 253) están estableciendo un estándar de facto de medición de emisiones de alcance 3, que se proyecta sobre importadores y, por arrastre, sobre exportadores de carne, incluyendo producción, frigorífico y logística internacional.

California aprobó en 2023 dos leyes que alcanzan a empresas no californianas si “hacen negocios” en el estado.

**La SB 253, Climate Corporate Data Accountability Act**, obliga a empresas (públicas o privadas) que tengan ingresos globales > USD 1.000 millones, y hagan negocios en California, a reportar anualmente:

- Scope 1 (emisiones directas),
- Scope 2 (electricidad comprada),
- Scope 3 (cadena de valor completa), siguiendo el GHG Protocol.

La entrega de los primeros reportes será en 2026 (Scope 1 y 2, año fiscal 2025) y a partir de 2027 (Scope 3).

Aunque frigoríficos y operadores logísticos uruguayos no estén directamente obligados:

- Sus clientes estadounidenses (retailers, importadores, traders, food service) sí pueden estarlo;
- Esos clientes deberán cuantificar su Scope 3, que incluye:
  - Producción ganadera.
  - Procesamiento frigorífico.
  - Transporte terrestre y marítimo.
  - Cadena de frío.

En la práctica, se trasladan requerimientos de medición y datos de huella de carbono hacia los proveedores, incluidos exportadores de carne.

**La SB 261, Riesgo financiero climático**, aplica a empresas con ingresos > USD 500 millones, que hagan negocios en California. Exige reportes bienales de riesgos financieros asociados al cambio climático, y medidas de gestión y adaptación, alineados con TCFD o estándares equivalentes.

En noviembre de 2025, la Corte de Apelaciones del Noveno Circuito dictó una medida cautelar que pausó la exigibilidad obligatoria de SB 261. Como resultado, SB 261 no está hoy siendo exigida coercitivamente, pero las empresas líderes ya están reportando por: presión de inversores, alineación con SB 253, coherencia con estándares internacionales (TCFD / ISSB).

Por lo tanto, se podría decir que para los exportadores uruguayos es un requisito

comercial emergente la provisión de datos de huella, trazabilidad de emisiones logísticas, coherencia metodológica (GHG Protocol) y la capacidad de demostrar reducciones o mejoras.

## Reglas que inciden en la logística

Aunque EE. UU. no impone hoy un precio federal al carbono, la combinación de estándares federales de eficiencia y emisiones para vehículos pesados (EPA Phase 3) y estándares subnacionales de intensidad de carbono de combustibles (LCFS, liderados por California) está transformando estructuralmente la logística terrestre, encareciendo el diésel fósil y acelerando la adopción de flotas e infraestructuras de bajas o cero emisiones.

La CARB (California Air Resources Board) es la autoridad ambiental del estado de California responsable de regular la calidad del aire, diseñar e implementar políticas de reducción de emisiones de GEI, desarrollar normas clave de descarbonización del transporte y la energía. En la práctica, CARB administra programas como el Low Carbon Fuel Standard (LCFS), implementa las leyes SB 253 y SB 261, define estándares que luego se proyectan al resto de EE. UU. y a las cadenas globales de suministro, actuando como regulador “de facto” del mercado estadounidense.

**EPA Phase 3, Greenhouse Gas Emissions Standards for Heavy-Duty Vehicles** es una regla federal adoptada el 29 de marzo de 2024, que establece estándares más estrictos de emisiones de GEI para vehículos pesados vocacionales (camiones de reparto, camiones de residuos, utilitarios, buses, etc.), y tractocamiones (day cabs y sleeper cabs), aplicables progresivamente a los model years (MY) 2027–2032. La norma fija límites de emisiones por categoría de vehículo, pero no obliga explícitamente a usar una tecnología concreta, cada fabricante o flota decide cómo cumplir.

La regla endurece progresivamente los estándares hasta 2032; reduce el margen para cumplir solo con mejoras incrementales del diésel; hace que, en varios segmentos (especialmente urbano/regional), vehículos de cero emisiones en el tubo de escape (ZEV, Zero-Emission Vehicle) y electrificación sean la opción de menor costo de cumplimiento a mediano plazo.

Para la logística, esto implica: renovación de flotas de camiones en EE. UU.; cambios en costos de flete interno; mayor diferenciación entre operadores “tradicionales” y operadores de logística de bajas emisiones.

Para cadenas como la cárnica exportadora: afecta el tramo terrestre interno en EE. UU. (puerto–centro de distribución–retail); influye en tarifas de transporte, selección de operadores logísticos, métricas de huella de carbono del tramo “downstream” (Scope 3).

**Low Carbon Fuel Standards (LCFS)**, son regímenes subnacionales (el más influyente es el de California) que:

- Establecen metas decrecientes de intensidad de carbono (CI) para los combustibles de transporte,
- Medidas en gCO<sub>2</sub>e/MJ a lo largo del ciclo de vida.

En noviembre de 2024, CARB aprobó una actualización profunda del LCFS que acelera los objetivos de reducción de CI (30 % al 2030, 90 % al 2045) y endurece la senda 2025-2030 respecto al régimen previo.

El LCFS penaliza económicamente combustibles con alta CI (diésel fósil), genera créditos para combustibles de baja o muy baja CI y obliga a proveedores de combustible a modificar su mix o comprar créditos (que encarecen el combustible). Los créditos de reducción de intensidad de carbono generados bajo el LCFS de California se otorgan a proveedores de electricidad usada en transporte, productores y distribuidores de hidrógeno y proveedores de biometano; cuando sus combustibles o energéticos tienen una intensidad de carbono (CI) inferior al benchmark anual fijado por CARB.

Estos créditos se monetizan en el mercado LCFS, son comprados por proveedores de combustibles fósiles que generan déficits y canalizan recursos financieros hacia infraestructura de transporte de bajas emisiones.

Los créditos LCFS permiten financiar infraestructura de carga eléctrica para camiones medianos y pesados (depots, puertos, centros logísticos), estaciones de hidrógeno para transporte pesado y proyectos asociados a logística de última milla y flotas cautivas.

Como resultado de las iniciativas anteriores suben los costos relativos del diésel convencional y se vuelven más competitivos la electricidad, hidrógeno y el biometano.

La incidencia sobre la logística asociada a exportaciones, como la cárnica, resulta en que el transporte interno en EE.UU. tenderá a ser más electrificado, usar combustibles alternativos y reportar menor CI por tonelada-km; los importadores y retailers: seleccionarán operadores logísticos alineados con estos marcos, trasladarán exigencias de datos y desempeño ambiental.

## **TENDENCIAS TRANSVERSALES EN TRANSPORTE MARÍTIMO GLOBAL**

A continuación, se introducen procesos, reglas y transformaciones que atraviesan a todo el sector marítimo internacional, de manera transversal, independiente de la ruta, el tipo de carga, el pabellón del buque o el mercado de destino. Se incluyen dinámicas estructurales comunes que redefinen cómo funciona el transporte marítimo en su conjunto.

IMO es la agencia especializada de las Naciones Unidas, cuya función principal es establecer normas internacionales para garantizar que el transporte marítimo sea seguro, eficiente y ambientalmente responsable. Cuando adopta normas, éstas se vuelven obligatorias vía el Convenio MARPOL.

IMO definió y administra instrumentos como:

- EEXI (eficiencia de diseño).
- CII (intensidad de carbono operativa).
- La Estrategia IMO 2023 hacia cero neto alrededor de 2050.
- Los futuros estándares globales de combustible y precio de GEI.

### **EEXI – Energy Efficiency Existing Ship Index (diseño)**

- Es un requisito técnico obligatorio para todos los buques existentes (en general  $\geq 400$  GT) en tráfico internacional.
- Evalúa la eficiencia energética del diseño del buque (potencia instalada, velocidad de referencia, capacidad, tipo de combustible).
- Es un test “one-off”: el buque debe demostrar que su EEXI alcanzado  $\leq$  EEXI requerido para su tipo y tamaño.
- Entró en vigor con las enmiendas a MARPOL Anexo VI y es obligatorio desde el 1 de enero de 2023.

EEXI fuerza mejoras técnicas (limitación de potencia, retrofit, dispositivos de ahorro) en la flota existente, independientemente de cómo opere el buque.

### **CII – Carbon Intensity Indicator (operación)**

- Es un indicador operativo anual que mide la intensidad de carbono del buque (emisiones de CO<sub>2</sub> por unidad de “trabajo de transporte”: carga  $\times$  distancia).
- Cada buque recibe una calificación anual de A a E:
  - A–B: desempeño superior.
  - C: cumplimiento.
  - D–E: desempeño insuficiente.
- La calificación se calcula todos los años, a partir de los datos operativos reportados (consumo, distancia, carga).
- También es obligatorio desde 2023, con las primeras calificaciones efectivas desde 2024.
- El CII introduce presión operativa y comercial (velocidad, rutas, ocupación, consumo), no solo técnica.

### **Estrategia IMO 2023: metas de largo plazo y “checkpoints”**

En julio de 2023, el IMO adoptó la Estrategia 2023 sobre Reducción de GEI de los Buques, que reemplaza y endurece la estrategia inicial de 2018.

a) Objetivo central: Alcanzar emisiones netas cero de GEI en el transporte marítimo internacional “alrededor de 2050”.

b) Puntos de referencia (indicative checkpoints)

Comparados con 2008:

- 2030:
  - al menos –20 %.
  - esforzándose por –30 %.
- 2040:
  - al menos –70 %.
  - esforzándose por –80 %.

Estas metas se refieren a la reducción total de GEI del sector, no solo a intensidad. El IMO pasa de hablar solo de “intensidad” a hablar de reducción absoluta de GEI del sector.

### Estándar global de combustible y precio de GHG

En abril de 2025, el IMO aprobó un borrador de marco regulatorio conocido como el IMO Net-Zero Framework, que combina dos elementos:

1. Un estándar global de combustible marítimo
  - Regula la intensidad de GEI de los combustibles usados por los buques.
  - Basado en un enfoque well-to-wake (todo el ciclo de vida del combustible).
2. Un mecanismo global de precio al carbono (GHG pricing)
  - Los buques que no cumplan con los umbrales de intensidad deberán pagar por sus emisiones excedentes.
  - Los ingresos se canalizarían a un fondo internacional para apoyar la transición.

El marco fue aprobado técnicamente en 2025, pero su adopción formal está sujeta a un proceso adicional. La entrada en vigor prevista es 2027, tras la adopción y el período estándar de implementación de MARPOL. Durante 2025–2026 continúan negociaciones técnicas, evaluaciones de impacto en Estados, desarrollo de guías de aplicación.

### Impacto en las cadenas logísticas globales, incluida la cárnica

El costo del flete marítimo tenderá a:

- Reflejar desempeño CII.
- Incorporar precios de GEI.
- Diferenciarse por tipo de buque y combustible.

Las cadenas largas, como ser la cárnica con destino al mercado asiático, estarán más expuestas. La descarbonización marítima deja de ser regional y pasa a ser global y homogénea.

## 7. Líneas de trabajo para un plan de implementación

El sector de la carne en su sentido amplio y su logística es una de las principales cadenas productivas a nivel nacional. Considerando que hay otras cadenas de importancia similar como ser la forestal, la láctea o la arroceras entre otras se entiende la pertinencia de la existencia de una estrategia nacional para la descarbonización del transporte que no se limite a un solo sector de actividad. A continuación, se desarrollan propuestas de acciones y políticas para promover la transición energética del transporte de carga en Uruguay. Las mismas se basan en diferentes estudios prospectivos relacionados a la estrategia energética del país.

### **Impulsar un marco regulatorio robusto y estable para desarrollar el hidrógeno y combustibles sintéticos**

- Crear un marco de seguridad, certificación y calidad del H<sub>2</sub> para el transporte pesado con estándares de presión, pureza, compatibilidad con vehículos y protocolos de operación.
- Establecer un régimen fiscal preferencial para los proyectos de H<sub>2</sub> destinados al desarrollo corredores logísticos.
- Definir corredores energéticos prioritarios (Rutas 1, 3, 5, 8 y 9) con conexión portuaria).
- Incorporar normas de certificación verde para los combustibles sintéticos, coherente con las tendencias políticas y ambientales globales y en particular de los mercados de destino de la carne.
- Generar liderazgo a nivel regional.

### **Desarrollar infraestructura energética clave: hidrogeneras, cargadores HPC y almacenamiento**

- Financiar la instalación de hidrogeneras (estación de servicio especializada en el almacenamiento y suministro de hidrógeno comprimido a alta presión) en los corredores energéticos que se establezcan.
- Financiar la instalación de estaciones de carga rápida (High Power Charging). Puntos de carga ultrarrápida para vehículos eléctricos que suministran potencias superiores a 150 kW, generalmente hasta 500 kW para camiones eléctricos.
- Implementar baterías de red en centros logísticos y puertos para soportar picos de carga y flexibilidad.
- Crear alimentadores flexibles (baterías + control digital) como pilotos de redes inteligentes.

## **Impulsar una política de digitalización profunda del sistema logístico - energético**

- Equipar la red con medición avanzada, automatización y plataformas de datos interoperables.
- Implementar gemelos digitales para anticipar fallas y optimizar energía en corredores.
- Crear una plataforma nacional de datos de movilidad de carga, integrando consumo, rutas, flota y factores de carga.
- Introducir IA para eco-ruteo y gestión predictiva del transporte.

## **Acelerar la adopción tecnológica en flotas**

- Crear un programa nacional para la reconversión de flotas para carga pesada, con subsidios escalonados e incentivos fiscales.
- Exigir metas progresivas de reducción de emisiones para flotas de gran porte a partir de 2030.
- Crear contratos de “transporte limpio garantizado” en cadenas logísticas críticas (leche, carne, celulosa, granos).
- Inducir acciones para reducir la incertidumbre sobre cuán rápido cambiará el transporte de carga hacia tecnologías limpias mediante políticas que permitan acelerar la transición.

## **Desarrollar polos bioenergéticos y corredores de bio-H<sub>2</sub>, integrando territorios rurales**

- Instalar polos de bioenergía y bio-H<sub>2</sub> en regiones forestales y agroindustriales.
- Financiar biorrefinerías regionales que usen residuos agrícolas/forestales como materia prima.
- Desarrollar corredores mixtos bio-H<sub>2</sub> + HVO + combustibles sintéticos para transporte pesado ganadero y forestal.
- Bioenergía y la agroindustria circular como oportunidades estratégicas para la descarbonización.

## **Implementar una estrategia de transición justa y de alcance territorial**

- Crear mesas territoriales energéticas para proyectos de H<sub>2</sub>, offshore y corredores limpios.
- Establecer un fondo de innovación y transición justa, financiado por rentas energéticas.
- Promover programas para el desarrollo de nuevas competencias verdes (técnicos en H<sub>2</sub>, operadores de redes inteligentes, mantenimiento de la

infraestructura).

- Asegurar que la transición energética sea justa en el territorio, para que sea sostenible.

### Financiar proyectos de demostración

- Financiar proyectos demostración directamente alineados con las tendencias del documento y de alto impacto:
- Instalación de hidrogena en puerto + camiones H<sub>2</sub>.
- Diseño de corredores logísticos flexibles (H<sub>2</sub> + BEV + almacenamiento).
- Aplicación de gemelos digitales para optimización continua de la red logística.
- Polo bio-H<sub>2</sub> rural.
- Eólica offshore conectada a H<sub>2</sub> portuario.
- Evaluar impacto con evidencia viva y escalar solo lo que funciona.
- Enfoque de hoja de ruta dinámica y modelado de pilotos territoriales + indicadores desempeño de la transformación.

### Fijar un acuerdo país de continuidad de políticas

Establecimiento de un acuerdo multipartidario y multiactor que permita:

- Fijar metas de infraestructura para el desarrollo de combustibles limpios.
- Establecer un calendario de inversiones en la red de generación, suministro y almacenamiento.
- Mantener reglas estables por un lapso no menor a 20 o 30 años a efectos de minimizar la incertidumbre para quienes desarrollen o incorporen las nuevas tecnologías.

### INDICADORES PROPUESTOS PARA LA CADENA LOGÍSTICA DE LA CARNE

Con el fin de dar soporte al seguimiento de una estrategia de descarbonización para el transporte de carga de la cadena en estudio, se desarrollan a continuación una batería de indicadores para dos niveles diferenciados dentro de la estrategia:

- Operativos.
- De gestión, gobernanza, adopción tecnológica, madurez institucional y alineación estratégica.

### Nota metodológica

Para el desarrollo de los diferentes indicadores se utilizaron las siguientes fuentes de información:

- ISO 14083:2023: estándar internacional específico para cuantificar y reportar GEI en cadenas de transporte (multimodal) incluyendo hubs.

- GLEC Framework (Smart Freight Centre): guía industrial global para contabilidad de emisiones logísticas y declarada guía primaria para implementar ISO 14083.
- SmartWay (EPA): referencia de métricas comparables para desempeño de transporte (g/ton-mile, g/mile) y benchmarking.
- EU ETS marítimo (EMSA): define alcance, gases y fase-in (40/70/100) para internalización de costos del carbono en shipping.
- FuelEU Maritime (Reg. EU 2023/1805): regula intensidad GHG del fuel/energía a bordo con enfoque WtW.
- IMO 2023 Strategy: metas globales de intensidad y adopción de combustibles/energías cero o casi cero hacia 2030/2050.

### Indicadores clave de desempeño (KPIs) de primer nivel

Indicadores operativos mínimos para el seguimiento de la descarbonización de la cadena logística cárnica. Para cada indicador se explicita su definición y la referencia metodológica o regulatoria correspondiente.

Los indicadores se agrupan en cuatro categorías complementarias:

- Indicadores centrales de emisiones,
- Indicadores operativos de eficiencia logística, orientados a reducciones “reales” previas a la sustitución de vectores energéticos,
- Indicadores de transición energética en flotas y nodos logísticos, y
- Indicadores de gobernanza y madurez del sistema, necesarios para habilitar el escalamiento del proceso.

### Indicadores centrales de emisiones

#### KPI 1- Emisiones logísticas totales (WtW) por período

- Qué mide: las emisiones totales de gases de efecto invernadero (CO<sub>2</sub> equivalente) asociadas a la logística, considerando las distintas fases del ciclo logístico.
- Referencia: ISO 14083 establece metodología para cuantificar y reportar emisiones en cadenas de transporte y nodos logísticos.

#### KPI 2- Intensidad logística “puerta a puerto”, (kgCO<sub>2</sub>e por tonelada de producto exportado)

- Qué mide: la huella de carbono logística por tonelada de producto exportado, indicador especialmente relevante para clientes y reportes de emisiones de la cadena de valor (Alcance 3).
- Referencia: ISO 14083 y el Marco GLEC Framework (Global Logistics Emissions Council) como guía práctica de implementación.

KPI 3 - Intensidad de emisiones por transporte terrestre (gCO<sub>2</sub>e por tonelada-kilómetro)

- Qué mide: la eficiencia en términos de carbono del transporte carretero y, cuando corresponda, ferroviario.
- Referencia: métricas comparables utilizadas en esquemas internacionales de evaluación del desempeño del transporte, adaptadas a tonelada-kilómetro.

KPI 4 - Intensidad de emisiones del transporte marítimo (gCO<sub>2</sub>e por TEU-kilómetro o tonelada-kilómetro) por ruta o servicio

- Qué mide: el desempeño ambiental del tramo marítimo, que suele representar el componente más significativo en cadenas logísticas de larga distancia.
- Referencia: Marco GLEC para el cálculo y la comparación de emisiones en transporte marítimo.

KPI 5 - % de emisiones calculadas con datos primarios (vs. factores por defecto)

- Qué mide: la calidad del sistema de medición, reporte y verificación, diferenciando el uso de datos primarios (telemetría, consumos eléctricos medidos, información directa de operadores) frente a factores promedio o valores por defecto.
- Referencia: la norma ISO 14083 define criterios de jerarquía y consistencia de datos, operacionalizados a través del Marco GLEC.

### Indicadores operativos de eficiencia logística

KPI 6- Factor de carga promedio y porcentaje de kilómetros en vacío (transporte carretero) (% km vacíos / factor de carga)

- Qué mide: la eficiencia logística estructural asociada a la consolidación de cargas y la reducción de recorridos sin carga.
- Definición:  
Factor de carga promedio: toneladas transportadas / capacidad del vehículo  
Porcentaje de kilómetros en vacío: km sin carga / km totales recorridos

KPI 7 - Intensidad energética de cadena de frío (kWh reefer por hora y por tonelada de producto)

- Qué mide: el consumo energético asociado a la operación de equipos refrigerados y la eficiencia del sistema de frío en función del tiempo de permanencia y del volumen transportado.

KPI 8 - Tiempo total de permanencia del contenedor refrigerado (planta + terminal)

- Qué mide: el tiempo total, expresado en horas, durante el cual el contenedor refrigerado permanece conectado a la red eléctrica en planta y en terminal portuaria.
- Utilidad: indicador clave para reducir consumos eléctricos y riesgos asociados

a la gestión de la cadena de frío.

### Indicadores de transición energética en flotas y nodos logísticos

KPI 9 - Porcentaje de kilómetros o tonelada-kilómetro realizados con tecnologías de bajas o nulas emisiones

- Qué mide: el grado de penetración efectiva de tecnologías de bajas y cero emisiones en la operación logística, más allá de la mera adquisición de equipos.
- Referencia: la norma ISO 14083 permite consolidar información por modo de transporte y tipo de energía, incluyendo electrificación, hidrógeno y biocombustibles.

### Indicadores de gobernanza y madurez del sistema

KPI 10 - Índice de interoperabilidad de datos y trazabilidad integral

- Qué mide: la capacidad del sistema para reconstruir y gestionar de forma integrada el flujo de información desde el lote de origen hasta el arribo al destino final, sin fricciones entre sistemas.
- Escala de referencia (0-5):
  - 0 = reconstrucción manual posterior,
  - 3 = integración parcial mediante intercambio de archivos o interfaces,
  - 5 = integración en tiempo casi real con identificadores únicos y registros automatizados.

## INDICADORES DE SEGUNDO NIVEL

Los indicadores de segundo nivel corresponden a indicadores de gestión, gobernanza, adopción tecnológica, madurez institucional y alineación estratégica. No se trata de indicadores operativos, sino de indicadores transversales, coherentes con las principales líneas de análisis desarrolladas en el presente informe, tales como la transición energética, la digitalización, la articulación público-privada, la competitividad internacional, el acceso al financiamiento y el desarrollo de capacidades.

Este marco de indicadores de segundo nivel complementa a los indicadores operativos ya incluidos en el informe y tiene como finalidad:

- Realizar el seguimiento estratégico del proceso de descarbonización de la cadena cárnica,
- Evaluar el nivel de capacidades y preparación del sistema,
- Apoyar la gobernanza del plan de implementación, y
- Facilitar el diálogo con autoridades públicas, organismos financieros y mercados internacionales.

## Indicadores de gobernanza y gestión de la cadena cárnica

Estos indicadores permiten evaluar el grado de organización, coordinación y capacidad de conducción del proceso de transición, y no el desempeño físico u operativo de la logística.

### Grado de articulación de la cadena logística cárnica

Qué mide: El nivel de coordinación formal entre frigoríficos, transportistas, puertos, navieras, organismos públicos y reguladores.

Indicadores sugeridos:

- Número de acuerdos, mesas de trabajo o mecanismos formales de coordinación activos (convenios, mesas técnicas, comités, proyectos piloto colaborativos).
- Índice cualitativo de articulación (bajo / medio / alto) basado en:
  - La existencia de espacios permanentes de coordinación,
  - El intercambio regular de información,
  - La definición compartida de metas.

Utilidad: Permite evaluar la capacidad de acción colectiva, aspecto clave para avanzar en la descarbonización de una cadena exportadora compleja y multisectorial.

### Nivel de institucionalización del plan de descarbonización logística

Qué mide: Determina si la descarbonización se aborda como una iniciativa puntual o como una política sectorial estable y sostenida en el tiempo.

Indicador sugerido:

Escala de madurez (0-4):

- 0: iniciativas aisladas,
- 1: hoja de ruta indicativa,
- 2: plan formal aprobado,
- 3: plan con responsables, metas y presupuesto asignado,
- 4: plan integrado a políticas sectoriales y comerciales.

Utilidad: Permite evaluar la continuidad del proceso y la reducción del riesgo político-institucional asociado a cambios de contexto.

### Nivel de alineación interinstitucional

Qué mide: El grado de coherencia entre las políticas de energía, transporte, ambiente, comercio exterior y el sector cárnico.

Indicadores sugeridos:

- Número de políticas o planes nacionales que incorporan de forma explícita la descarbonización logística de la cadena cárnica.
- Existencia de lineamientos comunes entre MIEM, MTOP, MA, MGAP, ANP e INAC.

Utilidad: Permite identificar riesgos de desalineación que podrían frenar inversiones, generar incertidumbre o enviar señales contradictorias al sector privado.

### Indicadores de adopción de nuevas tecnologías (no operativos)

Estos indicadores reflejan decisiones estratégicas de incorporación tecnológica, y no el desempeño técnico de las soluciones implementadas.

#### Tasa de adopción de tecnologías limpias en la cadena

Qué mide: El grado de incorporación de tecnologías no convencionales en la logística y el transporte.

Indicador sugerido:

- Porcentaje de actores de la cadena que han iniciado la adopción de al menos una tecnología limpia, tales como:
  - Electrificación,
  - Biocombustibles avanzados,
  - Hidrógeno,
  - Digitalización avanzada de flotas/logística.

Utilidad: Permite identificar si la transición se encuentra limitada a experiencias aisladas o si comienza a generalizarse a nivel sectorial.

#### Diversificación tecnológica de la estrategia

Qué mide: El grado de dependencia de una única solución tecnológica frente a un enfoque de portafolio tecnológico diversificado.

Indicadores sugeridos:

- Número de vectores tecnológicos activos en proyectos piloto o en etapas tempranas de despliegue.
- Clasificación de la estrategia como monovector, bivector o multivector.

Utilidad: Contribuye a reducir el riesgo tecnológico, especialmente relevante en un contexto de elevada incertidumbre, como el transporte de carga pesada.

### Nivel de madurez tecnológica promedio de la cadena

Qué mide: La etapa del ciclo de adopción en la que se encuentran las tecnologías utilizadas.

Indicador sugerido:

- Índice de madurez (adaptado al contexto logístico):
  - Piloto,
  - Demostración,
  - Precomercial,
  - Comercial temprano,
  - Comercial consolidado.

Utilidad: Facilita la planificación del financiamiento, el escalamiento y el apoyo público requerido en cada etapa.

### Indicadores de digitalización y gestión de datos (no operativos)

Estos indicadores no miden consumos ni emisiones, sino la capacidad de gestión, integración y uso de la información.

### Nivel de digitalización de la cadena logística cárnica

Qué mide: El grado de digitalización de procesos clave, como documentación trazabilidad e intercambio de información.

Indicador sugerido:

- Escala cualitativa:
  - Bajo: predominio procesos documentales o manuales,
  - Medio: digitalización parcial por actor,
  - Alto: digitalización integrada entre actores

Utilidad: La descarbonización avanzada requiere sistemas digitales robustos; sin digitalización, el proceso no es escalable.

### Grado de interoperabilidad de sistemas

Qué mide: La capacidad de integrar información entre frigoríficos, transporte terrestre, puertos y navieras.

Indicador sugerido:

- Índice de interoperabilidad (0-5):

- 0: ausencia de integración
- 3: integración parcial posterior al evento
- 5: integración integral de punta a punta, en tiempo casi real.

Utilidad: Es un habilitador clave para futuras certificaciones, reportes internacionales y la eficiencia sistémica de la cadena.

### Capacidad de reporte ambiental de la cadena

Qué mide: El grado de preparación para responder a las exigencias ambientales de clientes y mercados internacionales.

Indicadore sugeridos:

- Porcentaje de actores capaces de generar reportes ambientales consistentes.
- Existencia de formatos sectoriales armonizados.

Utilidad: Constituye un Indicador directo de competitividad comercial futura.

### Indicadores de financiamiento y viabilidad económica

Estos indicadores evalúan condiciones habilitantes para la transición, no costos unitarios.

### Acceso a instrumentos de financiamiento verde

Qué mide: La capacidad del sistema para movilizar capital orientado a la transición energética.

Indicador sugerido:

- Número de proyectos que acceden a:
  - Financiamiento concesional,
  - Fondos climáticos,
  - Créditos verdes,
  - Esquemas de carbono.

Utilidad: Sin acceso a financiamiento adecuado, la transición no puede escalar.

## Dependencia de incentivos públicos

Qué mide: El grado de autonomía económica de las soluciones tecnológicas adoptadas.

Indicadores sugeridos:

- Porcentaje de proyectos que requieren subsidios permanentes frente a aquellos con apoyos temporales.
- Clasificación de la dependencia como alta, media o baja.

Utilidad: Permite priorizar soluciones con mayor robustez económica en el largo plazo.

## Indicadores de capacidades y transición justa

Estos indicadores ponen el foco en las personas y el territorio, no en la tecnología.

## Desarrollo de capacidades técnicas en la cadena

Qué mide: El nivel de preparación del capital humano para operar y gestionar nuevas tecnologías.

Indicadores sugeridos:

- Número de programas de capacitación específicos implementados.
- Porcentaje de actores con personal formado en transición energética y logística.

Utilidad: La falta de capacidades ha sido identificada como una barrera crítica para la implementación.

## Inclusión territorial y sectorial

Qué mide: Si la transición alcanza únicamente a grandes actores o se extiende a toda la cadena.

Indicadores sugeridos:

- Participación de micro, pequeñas y medianas empresas y actores del interior en proyectos piloto y programas.
- Cobertura territorial de las iniciativas.

Utilidad: Es clave para asegurar la legitimidad social y sostenibilidad política del proceso.

### **Indicadores de posicionamiento estratégico y competitividad internacional**

#### Integración de la descarbonización logística en la estrategia exportadora

Qué mide: El uso de la logística baja en carbono como activo estratégico país.

Indicador sugerido:

- Presencia explícita del atributo “logística descarbonizada” en:
  - Estrategias sectoriales,
  - Acciones de promoción comercial,
  - Diálogo con mercados clave.

Utilidad: Vincula la transición energética con el acceso a mercados y la generación de valor agregado.

#### Preparación frente a regulaciones internacionales

Qué mide: El grado de anticipación frente a marcos regulatorios emergentes en la Unión Europea, China y Estados Unidos.

Indicador sugerido:

- Índice de preparación regulatoria:
  - Bajo: enfoque reactivo,
  - Medio: monitoreo activo,
  - Alto: adaptación anticipada y desarrollo de proyectos piloto.

Utilidad: Reduce riesgos comerciales y evita costos asociados a adaptaciones tardías.

## 8. Conclusiones

La descarbonización de la cadena logística cárnica uruguaya surge como un imperativo estratégico para sostener la competitividad internacional del sector ante un entorno comercial crecientemente regulado por criterios ambientales y climáticos. El análisis realizado evidencia que Uruguay posee ventajas comparativas significativas como ser su matriz eléctrica renovable, su sistema de trazabilidad único y el avance en infraestructura logística, posicionándolo favorablemente para liderar una transición energética profunda. Sin embargo, enfrenta algunos desafíos estructurales que requieren una planificación coordinada, inversiones progresivas y un marco regulatorio estable.

En primer lugar, la logística es un componente dentro de la cadena cárnica bovina que cuenta con diferentes frentes para incorporar acciones para la disminución de la huella de carbono total. Las emisiones asociadas al transporte carretero de ganado y carne, la operación de la cadena de frío y la logística portuaria constituyen puntos susceptibles de mejora mediante la incorporación de tecnologías limpias y la optimización operativa. En este sentido, las experiencias internacionales que fueron analizadas evidencian que la transición es posible cuando confluyen regulación, incentivos económicos, información estandarizada y cooperación público-privada. Estas referencias permiten concluir que Uruguay puede adoptar esquemas similares adaptados a su escala, con énfasis en la medición de emisiones, programas voluntarios de eficiencia logística y el desarrollo progresivo de infraestructura energética para transporte de bajas emisiones.

Asimismo, Uruguay ya cuenta con ventanas de oportunidad que pueden ser capitalizadas rápidamente. La matriz eléctrica renovable con más del 90 % de generación limpia habilita la electrificación del transporte como una de las alternativas con mayor impacto neto positivo. La existencia de instrumentos como Subite y Subite Cargo, así como el despliegue de la infraestructura de carga en expansión, contribuyen a viabilizar la adopción temprana de vehículos eléctricos en tramos logísticos específicos, particularmente aquellos de distancias cortas y repetitivas (p. ej., distribución desde frigoríficos a mercado interno y traslado frigorífico-puerto en rangos menores a 300 km). En estas etapas, los camiones eléctricos de batería ya operan con desempeños adecuados, sin requerimientos tecnológicos disruptivos ni cambios estructurales en la red logística, por lo que este segmento debería ser la “punta de lanza” de la transición tecnológica en la cadena cárnica.

En paralelo, el análisis sitúa al hidrógeno verde como un vector estratégico de mediano y largo plazo para el transporte pesado de larga distancia. La Hoja de Ruta H2U, la disponibilidad de energía renovable y proyectos piloto a nivel local indican que Uruguay se encuentra en condiciones de evaluar seriamente la adopción de esta tecnología en corredores logísticos de alta intensidad. No obstante, su viabilidad depende de factores aún en desarrollo como ser los costos elevados de vehículos e infraestructura, necesidad de estaciones de carga de hidrógeno, incertidumbre en los estándares globales y masa crítica insuficiente para garantizar

operación eficiente. Por lo tanto, se recomienda un enfoque escalonado que priorice pilotos estratégicos, planificación territorial de corredores limpios y alineación regulatoria antes de promover una adopción masiva.

Los biocombustibles, en particular el biometano y los combustibles renovables compatibles, surgen como soluciones de transición con capacidad de reducción significativa de emisiones y alta compatibilidad con las flotas existentes. Dado que Uruguay posee sectores agroindustriales y forestales que pueden generar residuos para su producción, y que el transporte pesado nacional ya posee experiencia con GNC, el estudio concluye que esta alternativa puede integrarse de forma más acelerada que el hidrógeno en ciertos tramos. No obstante, la disponibilidad de biomasa y la necesidad de infraestructura requieren planificación sectorial. En el caso del biodiésel, su mezcla inmediata contribuye a reducciones parciales sin inversiones importantes, pero no constituye una solución estructural a largo plazo.

Además de los escenarios tecnológicos evaluados en el modelo desarrollado en la parte 2 de este producto, existen diversas oportunidades adicionales de mitigación que no fueron cuantificadas en el presente análisis, pero que pueden desempeñar un papel relevante en la reducción de emisiones del sistema logístico de la cadena cárnica. Estas oportunidades se relacionan principalmente con mejoras en la infraestructura logística, optimización operativa de los flujos de transporte e incorporación de innovaciones tecnológicas emergentes.

La optimización logística se identifica como el eje de mayor costo-efectividad y con beneficios inmediatos. Las conclusiones sostienen que la reducción de kilómetros recorridos, la consolidación de cargas, la disminución de viajes en vacío, la integración de ruteo inteligente y la planificación sistemática mediante modelos geoespaciales pueden generar reducciones sustantivas de emisiones sin requerir transformaciones tecnológicas profundas. Este enfoque tiene un potencial particularmente alto en la cadena cárnica debido a la repetitividad de flujos, la concentración geográfica de producción y la existencia de nodos bien definidos (predios, zonas de cuarentena, frigoríficos, puerto de Montevideo). En consecuencia, se recomienda desarrollar un modelo nacional de optimización logística del sector cárnico, integrando información georreferenciada, datos de flotas, restricciones normativas (como pesos por eje) y previsión de infraestructura energética.

El desarrollo de infraestructura adecuada puede mejorar significativamente la eficiencia del sistema de transporte. En particular, la implementación de centros de consolidación de carga permitiría agrupar volúmenes provenientes de distintos orígenes antes de su transporte hacia los nodos de exportación o distribución, reduciendo el número de viajes y mejorando los factores de carga de los vehículos. De forma complementaria, la instalación de infraestructura de frío intermedio o centros de acopio refrigerados podría facilitar la coordinación logística entre productores, frigoríficos y puertos, permitiendo una mayor flexibilidad en la planificación del transporte.

Asimismo, el desarrollo de hubs logísticos intermodales podría favorecer la integración entre modos de transporte, particularmente entre carretera, ferrocarril y transporte fluvial, siempre que se genere la infraestructura de enlace adecuada. La ampliación del uso ferroviario para el transporte de productos cárnicos y contenedores refrigerados representa una oportunidad adicional para desplazar parte de los flujos de larga distancia hacia modos con menor intensidad de emisiones.

En cuanto a la cadena en estudio, los tramos carreteros cortos de conexión modal presentan costos de flete por tonelada proporcionalmente elevados, dado que los costos fijos de movilización, maniobras y retorno vacío se distribuyen sobre distancias muy reducidas. Para que la multimodalidad resulte económicamente atractiva, el ahorro en el tramo ferroviario o fluvial debe compensar este sobrecosto y los costos adicionales de coordinación entre operadores, sincronización de frecuencias y operación en los nodos de transferencia. Estos nodos requieren infraestructura específica (plataformas de carga, equipamiento para contenedores refrigerados y, en el caso del ganado en pie, mangas y corrales de tránsito adecuados) cuya ausencia constituye una barrera de entrada real en los corredores analizados.

El transporte de ganado en pie introduce condicionantes adicionales de particular relevancia. Cada transferencia entre modos implica un ciclo de manejo de animales vivos con riesgos de estrés, pérdida de condición corporal y potencial ruptura de la cadena sanitaria, en tramos donde los requisitos de los países de destino son especialmente exigentes. En el corredor Ruta 3, el trasvasije entre la barcaza fluvial y el buque trasatlántico en el Puerto de Montevideo requiere infraestructura portuaria específica para ganado vivo (corrales de tránsito, rampas de transferencia entre embarcaciones) y protocolos de re-inspección sanitaria que actualmente no están previstos en la operativa habitual del puerto. En el corredor Ruta 5, el desembarque del tren y la posterior movilización hasta el muelle de embarque introduce un tramo adicional dentro del puerto de Montevideo y expone a los animales a un nuevo ciclo de manejo en entorno urbano. En ambos casos, la coordinación con las ventanas de embarque de los buques ganaderos, que operan con calendario fijo y escala breve, añade una restricción operativa que amplifica el riesgo logístico de la cadena. Estos factores no invalidan el potencial de mitigación identificado, pero su concreción requiere de inversiones en infraestructura y protocolos específicos que deben evaluarse en conjunto con la competitividad económica del corredor.

Las innovaciones tecnológicas emergentes podrían contribuir a mejorar la eficiencia energética del transporte en el mediano y largo plazo. Entre ellas se destacan los sistemas de conducción, que podrían optimizar patrones de conducción y reducir el consumo energético, y las tecnologías que permiten la circulación coordinada de camiones en convoy, reduciendo la resistencia aerodinámica y mejorando la eficiencia del transporte carretero.

El desarrollo de esquemas de logística colaborativa, donde los distintos operadores comparten infraestructura, capacidad de transporte o información logística, puede

contribuir a mejorar la utilización de los recursos disponibles y reducir emisiones asociadas a ineficiencias del sistema.

La incorporación de configuraciones de Vehículos de Alto Desempeño (bitrenes y tritrenes) cuya aplicación, aunque limitada al tramo cuarentena-puerto por condiciones de caminería, puede reducir la huella por animal mediante la disminución del número de viajes. Sin embargo, el estudio enfatiza que su beneficio ambiental está fuertemente condicionado por restricciones normativas, carga por eje y bienestar animal. No deben promoverse incrementos de densidad de animales, sino mejoras estructurales y de capacidad permitidas para las diferentes configuraciones vehiculares.

La descarbonización de la cadena de frío se presenta como un componente crucial. Las tecnologías de refrigeración basadas en CO<sub>2</sub>, amoníaco o HFO, junto con la reducción de fugas de HFC y la eficiencia energética en cámaras, compresores y contenedores refrigerados, permiten disminuir significativamente la huella logística. El cambio de refrigerantes debe integrarse progresivamente en los ciclos naturales de renovación tecnológica, y que los frigoríficos y operadores logísticos deben prepararse para estándares internacionales más estrictos.

En conjunto, estas oportunidades complementan las estrategias tecnológicas evaluadas en el presente estudio y muestran que la reducción de emisiones en la cadena logística cárnica no depende únicamente del cambio de tecnologías de transporte, sino también de la mejora integral de la organización, infraestructura y gestión del sistema logístico.

Las tendencias regulatorias globales pueden implicar el traslado de exigencias ambientales a las exportaciones uruguayas incluso sin regulaciones directas sobre la carne. La Unión Europea, Estados Unidos y China están transformando sus sistemas logísticos mediante estándares de emisiones, combustibles sostenibles, reportes de las emisiones de Alcance 3, penalidades climáticas en puertos y obligatoriedad de uso de energía eléctrica en muelles. Esto implica que la carne exportada será transportada, distribuida y comercializada en sistemas donde las emisiones logísticas son visibles, rastreables y comparables, por lo que Uruguay debe anticipar estas exigencias generando métricas, estándares y programas de mejora continua.

Finalmente, la transición debería estructurarse como una política de Estado, con horizonte de 20–30 años y con una gobernanza que articule al MIEM, MA, MGAP, MTOP, ANP, INAC, UTE, gobiernos departamentales y sector privado. La existencia de un plan nacional de descarbonización logística cárnica permitiría alinear inversiones, priorizar corredores, definir infraestructura energética, atraer financiamiento verde y generar señales de largo plazo para los operadores. La transición no debe centrarse exclusivamente en la sustitución tecnológica del vehículo, sino en la eficiencia sistémica, la coordinación público-privada, la digitalización de la operación y la incorporación progresiva de tecnologías limpias complementarias.



En síntesis, Uruguay está en condiciones de avanzar aceleradamente hacia una cadena logística cárnica baja en carbono mediante un enfoque combinado de optimización operativa, electrificación progresiva, biocombustibles de transición, hidrógeno en corredores estratégicos, modernización de la infraestructura de frío, nuevas configuraciones vehiculares y planificación basada en datos. La oportunidad es tangible para mejorar la competitividad internacional, reducir riesgos regulatorios, consolidar la reputación país y posicionarse como líder en sostenibilidad logística dentro de la región.

## 9. Agradecimientos

### Facilitaron su testimonio o documentación para la realización de este trabajo:

Ignacio di Pascua – Consultor independiente

Roberto Marvid - División de Mitigación de Cambio Climático – Ozono, Ministerio de Ambiente.

Alejandra Reyes - Área Planificación Estadística y Balance – Dirección Nacional de Energía, Ministerio de Industria, Energía y Minería.

Agustín González - Área de Demanda, Acceso y Eficiencia Energética - Dirección Nacional de Energía, Ministerio de Industria, Energía y Minería.

Antonella Tambasco - Área de Demanda, Acceso y Eficiencia Energética - Dirección Nacional de Energía, Ministerio de Industria, Energía y Minería.

Carolina Mena – Unidad Ambiental, Ministerio de Industria, Energía y Minería.

Nicolás Koster – Gerencia de Sostenibilidad – Instituto Nacional de Carnes.

Aldo Cal - Gerencia de Calidad – Instituto Nacional de Carnes.

Agustina Dorgans - Gerencia de Calidad – Instituto Nacional de Carnes.

Eduardo Govea - Gerencia de Calidad – Instituto Nacional de Carnes.

Gianni Motta - Gerencia de Sostenibilidad – Instituto Nacional de Carnes.

Jerónimo Reyes - Dirección General de Transporte Fluvial y Marítimo – Ministerio de Transporte y Obras Públicas.

Claudia Riolfo - Dirección General de Transporte Fluvial y Marítimo – Ministerio de Transporte y Obras Públicas.

Laura Lapitz - Departamento de Comercio Internacional de la División de Sanidad Animal de la Dirección General de Servicios Ganaderos – Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca.

Ignacio Iturburu – KMA Uruguay.

Francisco García – KMA Uruguay.

**Nota:** En los casos, donde por razones de agenda, no se pudo acceder al testimonio de referentes por parte de organizaciones estatales, la información y datos se extrajeron de publicaciones oficiales vigentes.

**Coordinación general, facilitación de contactos y documentación:**

Guzmán Banizi – Administración y finanzas – Instituto Nacional de Logística

Giorgina Silvotti - Instituto Nacional de Logística

María Eugenia Cardozo – Instituto Nacional de Logística

Belén Reyes – Ministerio de Ambiente

Lorena Márques – Ministerio de Ambiente

Daniel Quiñones – Ministerio de Ambiente

Cecilia Flores – Agencia Uruguaya de Cooperación Internacional

## 10. Bibliografía

- BID. (2026). *Estimaciones de las tendencias comerciales - Latinoamérica y el Caribe*. Banco Interamericano de Desarrollo. Recuperado el 23 de Enero de 2026, de <https://publications.iadb.org/es/publications/spanish/viewer/Estimaciones-de-las-tendencias-comerciales-America-Latina-y-el-Caribe.-Edicion-2026.pdf>
- Bitafal. (2023). *Primer camión eléctrico para transporte pesado del Uruguay*. Obtenido de Bitafal: <https://bitafal.com.uy/primer-camion-electrico-para-transporte-pesado-del-uruguay/>
- European Commission. (2019). *Regulation (EU) 2019/1222 on the Labelling of Tyres with Respect to Fuel Efficiency and Other Essential Parameters*. Brussels: European Union.
- European Commission. (2020). *A Hydrogen Strategy for a Climate-Neutral Europe*. Brussels: European Commission.
- H2 Mobility Deutschland GmbH & Co. KG. (2023). *Hydrogen Refuelling Infrastructure in Germany*. Obtenido de H2 Mobility Deutschland: <https://h2.live/>
- Hydrogen Council. (2022). *Hydrogen Insights 2022*. Brussels: Hydrogen Council.
- HYUNDAI. (2021). *HYUNDAI Noticias*. Obtenido de <https://www.hyundai.com.uy/noticias/xcient-pila-combustible>
- Indicador Automotriz. (02 de 2025). *Inauguran primera electrolinera para pesados en Tultitlán*. Obtenido de <https://www.indicadorautomotriz.com.mx/camiones/inauguran-primera-electrolinera-para-pesados-en-tultitlan/>
- International Energy Agency. (2023). *Global Hydrogen Review 2023*. Paris: IEA.
- MTOP. (2023). *Tramos para Vehículos de Alto Desempeño*. Obtenido de Tramos para Vehículos de Alto Desempeño: <https://www.google.com/maps/d/u/1/viewer?mid=1m1VPHJRpFDskeGhRX2dl6pgnbmpeXMY&ll=-33.372421%2C-56.510877&z=8>
- Perutti, Magdalena; Minarrieta, Mauricio. (24 de Julio de 2023). *KPMG*. Recuperado el 02 de Marzo de 2026, de <https://kpmg.com/uy/es/home/insights/2023/08/hidrogeno-verde.html>

Popper, R. (2 de 12 de 2025). Uruguay: ¿cómo pensamos el futuro de la energía? Montevideo. Recuperado el 14 de 02 de 2026

Sánchez Gómez, J. I. (S/D de S/D de S/D). *www.produccion-animal.com.ar*. Recuperado el 02 de 03 de 2026, de Sitio argentino de producción animal: [https://www.produccion-animal.com.ar/informacion\\_tecnica/comercializacion/34-transporte.pdf#:~:text=Como%20las%20condiciones%20actuales%20requieren%20de%20una,engorda%2C%20para%20el%20abasto%20y%20para%20exhibici%C3%B3n](https://www.produccion-animal.com.ar/informacion_tecnica/comercializacion/34-transporte.pdf#:~:text=Como%20las%20condiciones%20actuales%20requieren%20de%20una,engorda%2C%20para%20el%20abasto%20y%20para%20exhibici%C3%B3n).

ST Supertruck. (2025). Obtenido de Scania G410 a biometano: <https://supertruck.com.ar/noticias/scania-lanza-camion-a-gas-biometano/>

Transportation Research Board. (2006). *Technologies and Approaches to Reducing the Fuel Consumption of Medium- and Heavy-Duty Vehicles*. Washington, DC: National Academies Press.

U.S. Environmental Protection Agency. (2023). *SmartWay Transport Partnership*. Obtenido de EPA SmartWay: <https://www.epa.gov/smartway>

U.S. Environmental Protection Agency. (2023). *SmartWay Transport Partnership – Technology Program*. Obtenido de EPA SmartWay: <https://www.epa.gov/smartway>

UEU. (2026). *Foco Exportador: Unión Europea y acuerdo con Mercosur*. Unión de Exportadores del Uruguay, Montevideo. Recuperado el 23 de Enero de 2026, de [https://www.uniondeexportadores.com/\\_datos/estadisticas/es/foco-exportador\\_enero26.pdf](https://www.uniondeexportadores.com/_datos/estadisticas/es/foco-exportador_enero26.pdf)

## 11. Anexos

### ANEXO 1 - CUADRO COMPARATIVO DE TECNOLOGÍAS LIMPIAS PARA TRANSPORTE DE CARGA PESADA EN URUGUAY

1. Nivel tecnológico y madurez		
Tecnología	Madurez global	Situación en Uruguay
Hidrógeno verde (H <sub>2</sub> )	Emergente y en rápido desarrollo.	En etapa de pilotos; país tiene oportunidad de producir H <sub>2</sub> con renovables.
Baterías (BEV)	Más madura para livianos; limitada para camiones de largo alcance.	Infraestructura aún insuficiente; requiere redes inteligentes.
Biocombustibles avanzados	Tecnología conocida; nuevas rutas como bio-H <sub>2</sub> y e-fuels en crecimiento.	Potencial alto por la agroindustria y bioeconomía rural.

2. Infraestructura necesaria		
Tecnología	Infraestructura crítica	Desafíos en Uruguay
H <sub>2</sub>	Plantas de electrólisis, estaciones de carga H <sub>2</sub> , adaptación portuaria y logística.	Aún no existe infraestructura; incertidumbre sobre tiempos de adaptación.
Baterías	Cargadores de alta potencia, redes inteligentes, almacenamiento eléctrico.	Inversiones en redes y flexibilidad todavía inciertas.
Biocombustibles	Plantas de procesamiento de biomasa, cadenas logísticas rurales.	Requiere evaluar límites ambientales de uso de biomasa y agua.

3. Costos y viabilidad futura		
Tecnología	Competitividad actual	Incertidumbres
H <sub>2</sub>	Costos altos; requiere escala.	Competitividad de esta tecnología.
Baterías	Bajando costos globales; eficiente en distancias cortas/medias.	Si no se invierte en redes inteligentes, no es viable para cargas pesadas.
Biocombustibles	Costos moderados; tecnología probada.	Cuánta biomasa es sostenible sin afectar territorio y recursos.

4. Impacto ambiental		
Tecnología	Impactos	Consideraciones para Uruguay
H <sub>2</sub>	Cero emisiones en uso; uso intensivo de agua.	Nexo agua-energía como crítico.
Baterías	Cero emisiones en uso. Impactos en ciclo de vida.	Importancia del análisis de ciclo de vida.
Biocombustibles	Eficiencia variable; emisiones menores que fósiles.	Posibles conflictos territoriales por biomasa y biodiversidad.

5. Adecuación por tipo de operación		
Tecnología	Adecuación para camiones de larga distancia	Adecuación para logística urbana/regional
H <sub>2</sub>	Alta: mayor autonomía y rápida recarga.	Menos competitivo que eléctricos.
Baterías	Limitada por peso y autonomía.	Excelente para distribución urbana o rutas cortas.
Biocombustibles	Adecuada para camiones existentes sin reconversión total.	Útiles como transición rápida.

6. Principales barreras identificadas	
Tecnología	Barreras clave
H <sub>2</sub>	Competitividad incierta, infraestructura inexistente, tecnologías de electrolizadores aún no definidas.
Baterías	Ritmo de inversión en redes, digitalización insuficiente, necesidad de infraestructura.
Biocombustibles	Límites ambientales sobre agua/biomasa; incertidumbre sobre rol del biohidrógeno.

7. Ventanas de oportunidad identificadas	
Tecnología	Oportunidad estratégica para Uruguay
H <sub>2</sub>	Corredores logísticos limpios; integración puerto-rutas; exportación potencial.
Baterías	Redes inteligentes, flexibilidad, logística urbana baja en emisiones.
Biocombustibles	Sinergia con bioeconomía y agroindustria rural (2030-2050).

## ANEXO 2 - VINCULACIÓN DE LA INFRAESTRUCTURA LOGÍSTICA CON LA MEDICIÓN DE HUELLA DE CARBONO (CO<sub>2</sub>E)

A continuación, se incorpora un esquema de vinculación entre los principales eslabones de la cadena (planta frigorífica, transporte interno, puerto/terminal y transporte marítimo) y los datos requeridos para cuantificar la huella logística en CO<sub>2</sub> equivalente (CO<sub>2</sub>e).

El objetivo es identificar qué información se debe capturar en cada punto, qué fuentes nacionales permitirían su extracción y qué metodologías pueden utilizarse para convertir dichos datos en emisiones comparables. Este enfoque permite respaldar la evaluación de medidas tecnológicas y logísticas presentadas en este capítulo y fortalecer la trazabilidad necesaria para certificaciones y exigencias de mercado.

### Frigorífico (post-faena) a conformación de lote y carga en contenedor reefer

Actividades a medir:

- Consumo eléctrico y/o combustible en operaciones previas a expedición (túneles, cámaras, muelles de carga).
- Tiempo a enchufe (“dwell time”) del contenedor reefer en planta (kWh del equipo de frío).
- Datos de lote (kg netos por producto, fecha de empaque, destino).

Fuentes de extracción de datos:

- SEIIC- INAC: lotes, pesos, fechas, conformación de bultos y cajas de exportación. Permite trazar animal – tropa – lote - caja.
- Programas INAC (Programa de Carne Natural Certificada del Uruguay) y procedimientos de planta: especifican flujos de certificación/etiquetado y soportes de trazabilidad hasta el embalaje.
- Medición interna de planta: contadores eléctricos por cámara/túnel y registro del tiempo enchufado del reefer antes de salir (bitácoras de logística).

Aunque no es una exigencia regulada, las buenas prácticas para trazabilidad industrial y digitalización están en la modernización del SEIIC que promueve INAC como parte del Programa de Carne Natural Certificada del Uruguay.

Cómo convertir a CO<sub>2</sub>e:

- Electricidad (kWh): aplicar factores de emisión de inventario corporativo (o, si no se dispone, referencia internacional de factores de red; p. ej., guía DEFRA/DESNZ 2024 para electricidad/fuels con WtT/TTW separados).
- Estandarización del cálculo y reporte: ISO 14083 (cálculo y reporte de emisiones en cadenas de transporte; aplica a nodos/hubs como “facilidades de manejo”).

## Tramo terrestre interno (frigorífico a playa de contenedores/puerto)

Actividades a medir:

- Distancia recorrida por camión (km) con contenedor reefer.
- Consumo de diésel del camión (si disponible) y consumo eléctrico del reefer en espera (si se enchufa en depósito).
- Temperatura objetivo y registros de cadena de frío.

Fuentes de extracción de datos:

- Guía/Regulación nacional (INAC) para transporte de carnes: define temperaturas obligatorias, habilitación de unidades y posibilidad de traslados en contenedores refrigerados entre establecimientos y playas de contenedores (trazabilidad sanitaria/logística).
- Bitácoras del transportista & tracking (GPS) para km y tiempos; POES/BPT exigidos por normativa de transporte de carnes (evidencias de limpieza, temperaturas, etc.).

Cómo convertir a CO<sub>2</sub>e:

- Carretero (diésel): factores DEFRA 2024 para “Freighting goods – heavy goods vehicles” con opción WtT+TTW si buscas WtW; o metodología GHG Protocol – Scope 3 Category 4 (asignación por tonelada-km).
- Estándar de reporte multimodal: ISO 14083 (armoniza por modo y permite totalizar).

## Puerto/terminal (playa de contenedores y puerto de Montevideo)

Actividades a medir:

- Tiempo enchufado (plug-in) del reefer en terminal (kWh/cont).
- Movimientos intra-terminal (shifting) y stack time (afecta kWh del reefer).
- Energía de equipos de manipuleo (cuando se desee mayor granularidad).

Fuentes de extracción de datos:

- ANP / terminales: sistemas de ordenes de trabajo y event logs de terminal (gate-in, gate-out, stack, plug-in/out), DUA y registros de terminal combinados (usados en estudios de conectividad y dinámica de contenedores).
- Estadísticas ANP/INE: volúmenes por modalidad, útiles como respaldo y para validar consistencia temporal.

Cómo convertir a CO<sub>2</sub>e:

- Electricidad terminal (kWh): factores de red/fuente que se defina para el

inventario; en ausencia, DEFRA/DESNZ 2024 (con WtT separado para llegar a WtW). ISO 14083 contempla nodos logísticos y almacenamiento refrigerado como “hub operations”.

### Tramo marítimo (naviera y viaje internacional)

Actividades a medir:

- Distancia puerto-puerto (NM/km) de la ruta efectivamente navegada (OD+desvíos).
- Tipo de buque y emisión específica (g CO<sub>2</sub>e/TEU-km o g CO<sub>2</sub>e/t-km).
- Consumo energético del reefer a bordo (en la práctica se incluye en la intensidad por TEU-km; si hay dato primario, mejor).

Fuentes de extracción de datos:

- Booking/Bill of Lading (BL) + documentación de naviera: tipo de servicio/buque y distancias estándar; algunos carriers entregan intensidades Clean Cargo por trade.
- Bases sectoriales:
  - Smart Freight Centre – Clean Cargo (intensidades de GEI para contenedores, metodología compatible con ISO 14083/GLEC).
  - Factores GLEC para container ship – reefer (kgCO<sub>2</sub>e/TEU-km; útil si el carrier no provee dato primario).
- Contexto regulatorio y contable WtW:
  - IMO (EEXI/CII y LCA Guidelines 2024 – Well-to-Wake): orientan el tratamiento WtW de combustibles marítimos y coherencia con marcos (útil si se incorporan biocombustibles o e-fuels).

Cómo convertir a CO<sub>2</sub>e:

- Preferible dato primario del carrier (Clean Cargo); si no, factor GLEC por TEU-km para reefer y multiplicar por TEU-km del trayecto declarado. ISO 14083 valida ambos enfoques (primario>por defecto) y estandariza el reporte multimodal.

### Integración trazable “end-to-end”: qué enlazar y cómo

A partir de la infraestructura actual, se podría construir un hilo digital por lote - contenedor - viaje - arribo. Los enlaces clave:

1. SEIIC (INAC) - SRGE/DUA/booking
  - Enlazar lote/caja (ID SEIIC) con número de contenedor, BL, DUA y booking para asegurar consistencia de pesos y destinos.

2. Transportista - terminal (ANP/TCP)
  - Enlazar CMR/orden de retiro con gate-in y registro de enchufe/desenchufe del reefer (tiempos/kWh).
3. Terminal/ANP - naviera
  - Enlazar cut-off, load list y manifiesto con BL definitivo y distancia ruta efectiva.
4. Naviera - datos de intensidad
  - Si hay reporte Clean Cargo del servicio/buque, usarlo; si no, aplicar GLEC para reefer.

### Variables mínimas por tramo y estándar de cálculo

- a) Planta (hub frío)
  - kWh túneles/cámaras asociados al lote; kWh de reefer en muelle.
    - Conversión: factores electricidad; ISO 14083 para reporte de hub.
- b) Ruta carretera a puerto
  - km camión; t netas; opcional L diésel.
    - Conversión: DEFRA (t-km) o consumo directo; GHG Protocol – Cat. 4.
- c) Terminal/puerto
  - kWh reefer (plug-in); horas de stack.
    - Conversión: factores electricidad (WtT+TTW); ISO 14083.
- d) Marítimo
  - TEU-km del trayecto; factor de intensidad del servicio/buque (preferido: Clean Cargo; alternativo: GLEC – reefer).
    - Conversión: multiplicación directa; si se evalúan combustibles alternativos, aplicar IMO 2024 LCA Guidelines (WtW).

### Cómo cubrir “Well-to-Wake” (WtW) con el set de datos actual

- Tank-to-Wake (TTW): se obtiene directamente con DEFRA/GLEC/Clean Cargo (son intensidades operativas; TTW o WtW según dataset).
- Well-to-Tank (WtT):
  - Carretero y electricidad: DEFRA 2024 publica WtT y TTW por separado para combustibles y electricidad (permite sumar a WtW).
  - Marítimo: si el carrier aporta solo TTW, puede aproximar WtW con factores/guías coherentes con IMO LCA 2024 (para fuel pathways; útil si hay blends de biofuel/e-fuel).

### Interoperabilidad: el eslabón crítico

En resumen, Uruguay dispone de la arquitectura necesaria para una trazabilidad logística y de frío avanzada. El eslabón más débil al día de hoy en la cadena no es el productor ni el frigorífico, sino la integración sistémica de datos logísticos. Como ha sido indicado, la brecha es la interoperabilidad y estandarización (no la

disponibilidad de datos). Resolver esta brecha habilita certificaciones ambientales futuras, reduce riesgos comerciales y posiciona a Uruguay ante las exigencias indirectas de mercados como la UE y China.

### ANEXO 3 - TABLAS RESUMEN DE INDICADORES DE SEGUNDO NIVEL

En las tablas siguientes se resumen los indicadores transversales asociados a la gestión y adopción de tecnologías, priorizados según la fase de implementación:

- PILOTO (P): indicador crítico para iniciar el proceso, generar aprendizaje y montar estructuras de gobernanza, datos y proyectos piloto.
- ESCALAMIENTO (E): indicador clave para la masificación de las soluciones, institucionalizar políticas, movilizar financiamiento a gran escala y sostener el proceso en el tiempo.
- P + E: indicador relevante en ambas fases.

Las referencias metodológicas consideradas para la armonización y el reporte son la norma ISO 14083 para la cuantificación y el reporte en cadenas de transporte y el Marco GLEC como guía industrial para su implementación. Si bien los indicadores de segundo nivel no son operativos, el sistema de gestión propuesto se apoya en dicha arquitectura de datos y reporte.

**Nota:** En las columnas correspondientes al “Responsable sugerido” se mencionan para algunos casos a las organizaciones sugeridas para el seguimiento de las diferentes áreas de gestión. En otros casos se sugiere de forma genérica la creación de grupos o comités interinstitucionales (de gobernanza, coordinación o técnicos) para este cometido.

### A. Gobernanza y gestión sectorial

ID	Indicador (KPI)	Objetivo de gestión	Definición operacional	Método / Criterio de cálculo (no operativo)	Fuente de datos / evidencia	Frecuencia	Responsable sugerido	Fase
G1	<b>Mecanismos formales de coordinación activos</b>	Fortalecer articulación pública-privada	Nº de instancias formales de coordinación activas con agenda y actas	Recuento y verificación documental (actas, convocatorias, planes de trabajo)	Actas, convenios, resoluciones, minutas	Trimestral	Coordinación del programa (INAC y contrapartes)	<b>P+E</b>
G2	<b>Madurez de institucionalización del plan</b>	Evolucionar de proyecto a política pública	Nivel de madurez en escala 0-4 (0: iniciativas aisladas; 4: plan integrado con metas y presupuesto)	Evaluación mediante lista de verificación: aprobación formal, metas definidas, responsables asignados, presupuesto y sistema de seguimiento	Documento del plan, resoluciones, asignaciones presupuestales, tablero de seguimiento	Semestral	Comité directivo interinstitucional	<b>E</b>
G3	<b>Alineación interinstitucional</b>	Evitar señales contradictorias al sector	Nº de políticas, planes o instrumentos alineados explícitamente con la descarbonización logística	Recuento y validación de referencias cruzadas (menciones explícitas y acciones comunes)	Documentos de MIEM, MTOP, MA, MGAP, ANP, INAC; acuerdos marco	Semestral	Secretaría técnica interinstitucional	<b>E</b>
G4	<b>Gobernanza de datos y del sistema de medición, reporte y verificación</b>	Asegurar credibilidad y continuidad del proceso	Existencia y grado de completitud del marco de gobernanza de datos (roles, accesos, confidencialidad, control de calidad, auditoría)	Lista de verificación: definición de roles y responsabilidades, políticas de datos, protocolos de control de calidad, trazabilidad de versiones	Manual o política de datos, procedimientos internos, acuerdos de intercambio de información	Trimestral (fase piloto) / Semestral (escalamiento)	Responsable de datos (INAC/ANP)	<b>P+E</b>

## B. Adopción de tecnologías y gestión de innovación (no operativa)

ID	Indicador (KPI)	Objetivo de gestión	Definición operacional	Método / Criterio de cálculo (no operativo)	Fuente de datos / evidencia	Frecuencia	Responsable sugerido	Fase
T1	<b>Tasa de adopción organizacional de tecnologías limpias</b>	Ampliar la adopción tecnológica en la cadena	Porcentaje de organizaciones que cuentan con una decisión formal o con un proyecto activo de adopción de tecnologías limpias	Numerador: organizaciones con inversión aprobada o proyecto piloto en ejecución; Denominador: universo de actores definidos	Resoluciones internas, contratos, proyectos, licitaciones, registros de compras	Trimestral	Mesa tecnológica sectorial y cámaras/operadores	<b>P+E</b>
T2	<b>Diversificación del portafolio tecnológico</b>	Reducir el riesgo tecnológico	Nº de vectores tecnológicos distintos con proyectos piloto o pruebas de concepto activas (se recomienda un mínimo de dos)	Recuento de vectores con piloto validado, considerando como criterio mínimo la existencia de plan, presupuesto y objetivos de aprendizaje	Portafolio de proyectos piloto, informes de avance	Trimestral	Oficina de gestión del programa (PMO)	<b>P</b>
T3	<b>Madurez tecnológica promedio del portafolio</b>	Planificar el escalamiento de soluciones	Nivel promedio de madurez de las tecnologías adoptadas	Asignación de nivel de madurez por tecnología y cálculo de promedio ponderado según relevancia estratégica o volumen de inversión	Informes de proyectos piloto, evaluación de madurez tecnológica adaptada al sector, evidencia contractual	Semestral	PMO y comité técnico	<b>P+E</b>
T4	<b>Cartera de proyectos desde demostración a escala</b>	Asegurar continuidad del proceso de innovación	Nº de proyectos en cartera clasificados por etapa (idea, diseño, piloto, demostración, escalamiento)	Recuento por etapa y análisis de la tasa de transición entre etapas	Portafolio de proyectos, actas de aprobación, hitos y reportes de avance	Trimestral	PMO del programa	<b>P+E</b>

### C. Digitalización e interoperabilidad (gestión de datos, no operativa)

ID	Indicador (KPI)	Objetivo de gestión	Definición operacional	Método / Criterio de cálculo (no operativo)	Fuente de datos / evidencia	Frecuencia	Responsable sugerido	Fase
D1	Nivel de digitalización de procesos logísticos críticos	Habilitar una gestión moderna e integrada	Nivel de digitalización de procesos clave por actor (docs., trazabilidad, registro de eventos), clasificado en bajo, medio o alto	Auditoría simplificada mediante lista de verificación, considerando procesos cubiertos y evidencia digital disponible	Sistemas de gestión, registros digitales, manuales de procesos	Trimestral (fase piloto) / Semestral (escalamiento)	Líder de transformación digital	P+E
D2	Índice de interoperabilidad de sistemas de información	Superar cuellos de botella en el intercambio de datos	Grado de integración de datos entre actores de la cadena, en escala 0-5	Evaluación por criterios: uso de interfaces de intercambio, adopción de estándares, diccionario de datos común y trazabilidad	Arquitectura de sistemas, interfaces de intercambio, acuerdos de interoperabilidad, registros integrados	Trimestral	Comité de datos (INAC/ANP/actores privados)	P+E
D3	Cobertura de estándares comunes de cálculo y reporte	Asegurar comparabilidad internacional	Porcentaje de actores que adoptan un estándar común de cálculo y reporte de emisiones (ISO 14083, Marco GLEC o equivalente)	Numerador: actores con procedimientos formalmente adoptados; Denominador: universo de actores definidos	Procedimientos internos, reportes ambientales, auditorías internas	Semestral	Mesa de medición, reporte y verificación	E
D4	Calidad de dato para reporte ambiental	Evitar inconsistencias y mejorar confiabilidad	Porcentaje de conjuntos de datos críticos con mecanismos formales de control de calidad	Numerad.: conjuntos de datos con controles formales; Denominador: conjuntos de datos críticos definidos	Protocolos de control de calidad, registros de validación, bitácoras de auditoría	Trimestral	Responsable de datos	P+E

#### D. Financiamiento y viabilidad del escalamiento (no operativo)

ID	Indicador (KPI)	Objetivo de gestión	Definición operacional	Método / Criterio de cálculo (no operativo)	Fuente de datos / evidencia	Frecuencia	Responsable sugerido	Fase
F1	<b>Acceso a instrumentos de financiamiento verde</b>	Movilizar capital para la transición	Número de proyectos que acceden a instrumentos de financiamiento orientados a la descarbonización	Recuento de proyectos con financiamiento aprobado y/o contratos firmados	Contratos de financiamiento, cartas de aprobación, convenios con entidades financieras	Trimestral	Coordinación financiera del programa / MEF	<b>E</b>
F2	<b>Capacidad de apalancamiento financiero</b>	Escalar inversiones con participación privada	Relación entre recursos privados movilizados y recursos públicos o concesionales comprometidos en el portafolio de proyectos	Cálculo agregado del cociente entre aportes privados y públicos/concesionales	Planes financieros de proyectos, contratos, informes de ejecución	Semestral	Comité económico-financiero	<b>E</b>
F3	<b>Dependencia de incentivos públicos</b>	Evaluar sostenibilidad económica	Porcentaje de proyectos que requieren subsidios permanentes frente a aquellos con apoyos temporales o sin incentivos	Clasificación de proyectos según tipo de apoyo (ninguno / temporal / permanente) y cálculo porcentual	Diseño de instrumentos, contratos, evaluaciones económicas de proyectos	Semestral	Comité económico-financiero	<b>P+E</b>
F4	<b>Instrumentos habilitantes implementados</b>	Reducir barreras a la inversión	Número de instrumentos de política implementados para facilitar la transición	Recuento de instrumentos por estado (diseñado, aprobado, en ejecución)	Normativa vigente, resoluciones, programas y llamados públicos	Trimestral	MIEM / MTOP / MA (según competencia)	<b>P+E</b>

### E. Capacidades, transición justa y participación (indicadores no operativos)

ID	Indicador	Objetivo de gestión	Definición operacional	Método / criterio de cálculo (no operativo)	Fuente de datos / evidencia	Frecuencia	Responsable sugerido	Fase
C1	<b>Desarrollo de capacidades técnicas en la cadena</b>	Fortalecer el capital humano para la transición	Nivel de preparación de los recursos humanos para operar y gestionar nuevas tecnologías asociadas a la descarbonización logística	Recuento de programas de capacitación específicos y cálculo del porcentaje de actores con personal formado	Registros de capacitación, certificaciones, listados de participantes	Trimestral (fase piloto) / Semestral (escalamiento)	Comité de capacidades / instituciones técnicas	<b>P+E</b>
C2	<b>Cobertura de programas de formación sectorial</b>	Asegurar una formación adecuada y continua	Alcance de las acciones de formación en relación con los actores de la cadena logística cárnica	Número de programas implementados y porcentaje de actores alcanzados respecto del universo definido	Programas de formación, informes de ejecución, convenios institucionales	Semestral	Coordinación del programa / instituciones formadoras	<b>P+E</b>
C3	<b>Inclusión territorial y sectorial en la transición</b>	Garantizar una transición justa e inclusiva	Grado de participación de micro, pequeñas y medianas empresas y actores del interior del país en proyectos piloto y programas de apoyo	Porcentaje de MIPYMES y actores territoriales participantes sobre el total de beneficiarios	Registros de participantes, convenios territoriales, informes de proyectos	Trimestral	Mesa territorial / coordinación del programa	<b>P+E</b>
C4	<b>Gestión de actores y aceptación social del proceso</b>	Asegurar legitimidad social y sostenibilidad política	Existencia y nivel de implementación de mecanismos de diálogo, consulta y gestión de partes interesadas	Evaluación cualitativa basada en la existencia de instancias de participación y registro de consultas	Actas de reuniones, registros de consultas, informes de participación	Semestral	Unidad social o territorial del programa	<b>E</b>

## F. Posicionamiento estratégico y competitividad internacional

ID	Indicador	Objetivo de gestión	Definición operacional	Método / criterio de cálculo (no operativo)	Fuente de datos / evidencia	Frecuencia	Responsable sugerido	Fase
R1	<b>Integración de la descarbonización logística en la estrategia exportadora</b>	Posicionar la logística baja en carbono como activo país	Grado de incorporación explícita del atributo "logística descarbonizada" en las estrategias sectoriales, la promoción comercial y el diálogo con mercados clave	Evaluación cualitativa basada en la presencia del atributo en documentos estratégicos, materiales de promoción y agendas de negociación	Estrategias sectoriales, planes de promoción comercial, presentaciones institucionales, actas de misiones comerciales	Semestral	INAC / Cancillería / organismos de promoción	<b>E</b>
R2	<b>Nivel de preparación frente a regulaciones internacionales</b>	Anticipar exigencias regulatorias externas	Grado de preparación de la cadena frente a marcos regulatorios emergentes en la Unión Europea, China y Estados Unidos	Índice cualitativo de preparación (bajo: reactivo; medio: monitoreo activo; alto: adaptación anticipada y proyectos piloto)	Informes de seguimiento regulatorio, análisis sectoriales, actas de comités técnicos	Trimestral	Mesa comercio-regulación / coordinación del programa	<b>E</b>
R3	<b>Incorporación de la presión regulatoria del transporte marítimo en la planificación</b>	Gestionar riesgos y costos futuros	Existencia y uso sistemático de análisis sobre regulaciones marítimas en la toma de decisiones logísticas (rutas, contratos, servicios)	Verificación de análisis periódicos y evidencia de su uso en decisiones contractuales o estratégicas	Informes internos, actas de directorio, contratos con navieras	Trimestral	Mesa marítima / coordinación logística	<b>P+E</b>

## ANEXO 4 – MECANISMO DE COMPENSACIÓN DE CARBONO

### Metodologías usadas por programas de compensación

A continuación, se detallan las metodologías que pueden aplicarse a la transición energética de la logística y el transporte de la cadena cárnica, desde el campo hasta la exportación. Para cada fase se incluyen los requisitos clave de elegibilidad (programa-metodología) y los puntos críticos de MRV.

Campo a Planta (transporte carretero de ganado, insumos y productos intermedios)

Programa/Metodología aplicable:

- Verra – VCS: VMR0004 “Improved Efficiency of Fleet Vehicles”, v2.0 (2024). <https://verra.org/verra-publishes-revised-vehicle-fleet-efficiency-methodology/>. Aplica a proyectos que mejoran la eficiencia energética de flotas de vehículos o maquinaria móvil, reduciendo consumo de combustible y emisiones de CO<sub>2</sub>. El proyecto debe alinearse con planes nacionales o regionales de descarbonización. Desde 1 de enero de 2035 no pueden incorporarse nuevos vehículos fósiles al proyecto. Las líneas de base deben ajustarse cuando entren en vigor metas de reducción de emisiones o cambio tecnológico.

Requisitos clave de elegibilidad:

- Medidas técnicas de eficiencia, no cambios operativos
- Adicionalidad robusta (regulatoria, económica y práctica común).
- Contratos claros de propiedad de reducciones
- Línea base: desempeño histórico de la flota ya sea por telemetría o datos periódicos de consumo, distancia/horas y operación del motor, o grupo de control con vehículos comparables en antigüedad, peso, capacidad, uso y condiciones operativas.
- MRV: monitoreo continuo por telemetría/odómetro o según parámetros, consumo, horas de operación, base de datos centralizada; tratamiento de incertidumbre y deducciones conservadoras.

Planta frigorífica y cadena de frío (almacenaje, patios, reefer en tránsito terrestre)

Programas/Metodologías aplicables:

- Verra – VCS: VM0001 “Refrigerant Leak Detection”, v1.2 (2024). <https://verra.org/methodologies/vm0001-refrigerant-leak-detection-v1-2/>. Cuantifica reducciones por disminución de fugas de HFC en sistemas de refrigeración comerciales/industriales (frío en planta, depósitos, centros de distribución). Metodología desarrollada para el mercado de norteamericano.

- ACR – metodologías para refrigeración y refrigerantes, desarrollados para Estados Unidos, Canadá y México:
  - Advanced Refrigeration Systems (eficiencias y modernización), versión 3.0-2024,  
<https://acrcarbon.org/methodology/advanced-refrigeration-systems/>
  - Certified Reclaimed HFC Refrigerants, Propellants, and Fire Suppressants (promoción de uso de HFCs sugeridos y reducción de producción/uso de vírgenes), versión 2.0-2022,  
<https://acrcarbon.org/methodology/certified-reclaimed-hfc-refrigerants-propellants-and-fire-suppressants/>

#### Requisitos clave de elegibilidad:

- Adicionalidad y cumplimiento regulatorio; demostrar que la reducción de fugas o el uso de HFCs reclamados no es práctica común ni exigencia legal en el alcance del proyecto (según reglas VCS/ACR).
- Línea base: tasas históricas de fuga/recarga o composición del refrigerante; para ACR, elegibilidad de las prácticas de reclamación y trazabilidad.
- MRV: registros de carga/recarga y mantenimiento, inventario de equipos, balances de masa, calibración de sensores/LD, y verificación por tercero.

#### Puerto de Montevideo y logística marítima (exportación)

##### Programas/Metodologías aplicables:

- Shore Power / OPS: Gold Standard dispone de la “Methodology for Emission Reduction by Shore-side or Offshore Electricity Supply System” para acreditar reducciones cuando los buques se conectan a la red en puerto (en lugar de operar generadores auxiliares).  
[https://globalgoals.goldstandard.org/standards/439\\_V1.0\\_FS\\_Methodology-for-emission-reduction-by-shore-side-or-off-shore-electricity-supply-system.pdf](https://globalgoals.goldstandard.org/standards/439_V1.0_FS_Methodology-for-emission-reduction-by-shore-side-or-off-shore-electricity-supply-system.pdf)
- Retrofits de eficiencia en buques: Gold Standard – “Retrofit Energy Efficiency Measures in Shipping” metodología que se centra en la modernización de los buques para mejorar su eficiencia energética (p. ej., optimización de casco, hélices, waste-heat recovery, etc.) reduciendo el consumo energético durante la travesía.  
<https://www.goldstandard.org/news/two-new-emission-reduction-methodologies-for-shipping-released>
- Combustibles marinos: Gold Standard – “Methodology for Marine Fuels and Bio Bunkers” (2024) para biocombustibles (hoy aplicable a UCOME: éster metílico de aceite de cocina usado) con contabilidad well-to-wake; la metodología establece que solo el componente bio mezclado a bordo es elegible para créditos. Importante: la elegibilidad depende de trazabilidad,

sostenibilidad del biocombustible y reglas del estándar; su uso debe analizarse caso a caso con navieras.

<https://globalgoals.goldstandard.org/442-ee-methodology-for-marine-fuels-and-biobunkers/>

Requisitos clave de elegibilidad:

- OPS: demostrar que el buque se conecta a la red/renovable conforme norma (p. ej., IEC/ISO/IEEE 80005), estimar la energía sustituida, aplicar factores de emisiones de la red local y evidenciar que el suministro en muelle no es “de rutina” en la línea base del buque/terminal.
- Retrofits: línea base de consumo del buque, plan de upgrades, métodos de medición de ahorro (torque meters/mediciones continuas) y permanencia operativa de las medidas.
- Bio-bunkers: elegibilidad del biocombustible, cadena de custodia y MRV well-to-wake; créditos only-bio; evitar doble contabilidad con otros incentivos/regímenes.

Distribución nacional y “drayage” a puerto (camiones frigoríficos, última milla)

Programa/ Metodología aplicable:

- Verra – VCS: VMR0004 (flotas) —idéntica a la fase 1— enfocada aquí a camiones frigoríficos eléctricos en distancias cortas/medias, optimización de rutas, eco-driving, neumáticos, spoilers, etc. La metodología acepta reducciones por menor consumo (combustible o electricidad) respecto a la línea base.

Requisitos clave de elegibilidad:

- Definir flota y actividad (km/ton-km, perfiles de ruta, carga térmica), demostrar adicionalidad (inversión/tecnología no habitual), y establecer sistema telemático para MRV (combustible, km, horas).

## Potencial de monetización de las reducciones de emisiones

Un mercado de carbono es un ámbito económico e institucional donde se compran, venden y/o usan créditos de carbono emitidos por programas de compensación de carbono. Como ya se ha mencionado, generalmente se los suele diferenciar en mercados voluntarios, mercados regulados o un híbrido entre ambos a los que se les denomina “mixtos”, teniendo en consideración quién está obligado a participar, para qué se usan los créditos y bajo qué marco normativo se reconocen.

**Mercados regulados o de cumplimiento (ETS por su sigla en inglés):** Son mercados creados por ley o reglamento, en los que determinados actores (empresas, instalaciones, sectores o países) están legalmente obligados a cumplir con un límite de emisiones de GEI. Los créditos o permisos de emisión se utilizan

para cumplir una obligación normativa.

Las características principales de este tipo de mercado se pueden resumir como:

- **Obligatoriedad:** la participación no es voluntaria; surge de una norma legal.
- **Tope de emisiones (cap):** la autoridad fija un límite máximo de emisiones.
- **Unidades reguladas:** permisos de emisión o créditos reconocidos por el sistema.
- **Autoridad competente:** existe un regulador público que define reglas, MRV, sanciones y elegibilidad.
- **Cumplimiento verificable:** el uso de créditos evita sanciones legales.
- **Alta integridad regulatoria,** pero menor flexibilidad.

Ejemplos típicos de mercados regulados: EU ETS (Unión Europea), China ETS, entre otros.

**Mercado voluntario (VCM por su sigla en inglés):** Son mercados en los que organizaciones o individuos deciden voluntariamente compensar parte de sus emisiones, sin que exista una obligación legal directa que lo exija.

Características principales de este tipo de mercado se pueden resumir en:

- Participación voluntaria.
- Motivación reputacional, estratégica o comercial (carbono neutralidad, net-zero, ESG).
- Créditos verificados bajo estándares privados o híbridos.
- Alta diversidad de metodologías y proyectos.
- Mayor flexibilidad, pero también mayor escrutinio sobre su integridad ambiental.

El uso de los créditos en estos mercados es generalmente para compensación voluntaria de huellas de carbono, cumplimiento de compromisos climáticos corporativos (net-zero, carbon neutral) y diferenciación de productos (claims ambientales).

**Mercados o esquemas mixtos:** Son esquemas en los que los mismos créditos o programas pueden ser utilizados tanto en ámbitos voluntarios como en ámbitos de cumplimiento, bajo ciertas condiciones regulatorias.

Características principales:

- Doble elegibilidad potencial: voluntaria y regulada.
- Reglas estrictas de contabilidad para evitar doble conteo.
- Intervención estatal parcial o total.
- Requisitos reforzados de MRV y trazabilidad.
- Flexibilidad con control público.

Se identifican en general dos modalidades:

- Créditos generados voluntariamente que luego son:
  - Aceptados en esquemas de cumplimiento.
  - Correspondidos con ajustes contables (corresponding adjustments).
- Programas nacionales que:
  - Permiten uso voluntario interno.
  - Reservan parte de los créditos para NDCs o regímenes obligatorios.

Algunos países latinoamericanos con sistemas nacionales de créditos que operan bajo mercados o esquemas mixtos son Colombia y Chile.

A nivel internacional, un ejemplo de interés es el de CORSIA (Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation).

CORSIA es un esquema internacional de compensación de emisiones de cumplimiento sectorial, adoptado por la OACI (ICAO), aplicable a la aviación internacional. CORSIA no regula el mercado de créditos, sino el uso obligatorio de créditos externos para cumplir una obligación regulatoria. Para lo cual promueve y organiza un esquema de uso regulado de créditos de carbono, que puede caracterizarse claramente como un mecanismo de cumplimiento con rasgos de mercado mixto, puesto que:

- Obliga a las aerolíneas a compensar el crecimiento neto de sus emisiones por encima de un nivel de referencia.
- Permite cumplir esa obligación mediante la compra y cancelación de créditos de carbono elegibles.



Cofinanciado por  
la Unión Europea

