

Euroclima

Informe de producto 3 – parte 2

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

1. Alcance del análisis.....	4
2. Marco metodológico de estimación	9
3. Tecnologías de transporte consideradas.....	16
4. Parámetros del modelo	21
5. Metodología de estimación por tramo	27
6. Evaluación de escenarios de refrigerantes	48
7. Resultados	50
8. Discusión.....	72
9. Bibliografía	81
10. Anexos.....	83

1. Alcance del análisis

La presente sección del informe corresponde al análisis de escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en la cadena logística de la carne bovina en Uruguay, desarrollado en el marco del Producto 3. El objetivo es evaluar el desempeño climático de distintos escenarios tecnológicos aplicados a los principales tramos de transporte identificados en la cadena logística.

La cadena logística analizada abarca desde la fase primaria (producción ganadera) hasta la distribución final en mercados internos o exportación. Los flujos logísticos considerados incluyen el transporte de ganado entre establecimientos, el transporte hacia plantas de faena, los movimientos internos dentro de la fase industrial, y los flujos de distribución y exportación de productos cárnicos.

La estructura general de la cadena logística considerada se presenta en el Anexo 1. Esta incluye las principales etapas y nodos logísticos, tales como predios ganaderos, plantas frigoríficas, centros de distribución, puertos y aeropuertos, así como los diferentes tramos de transporte asociados.

MODELO LOGÍSTICO COMPLETO DE LA CADENA CÁRNICA

En el Anexo 1 presenta el modelo logístico completo de la cadena cárnica bovina utilizado como base conceptual para el análisis de emisiones. El modelo describe los nodos productivos, logísticos y comerciales del sistema, así como los principales flujos de transporte que conectan cada etapa de la cadena.

El sistema incluye cinco subsistemas principales: fase primaria, fase industrial, exportación de carne, mercado interno e importación de carne (DI Pascua, 2026) (Rosselli, Carriquiry, Pérez, & Varela, 2022) Cada uno de estos subsistemas se compone de nodos logísticos identificados con la nomenclatura N (nodos) y flujos de transporte identificados como T (tramos).

Fase primaria

La cadena comienza en los predios ganaderos (N1), donde se desarrolla la producción bovina. Dentro de esta fase ocurren movimientos de animales asociados a las etapas productivas de cría, recría y engorde (N2).

El primer flujo logístico corresponde al T1 – Transporte de ganado entre establecimientos, que representa los movimientos de animales entre predios ganaderos durante el ciclo productivo.

Una vez finalizada la etapa de engorde, los animales son transportados hacia plantas frigoríficas mediante el T2 – Transporte de ganado a faena.

Adicionalmente, desde los predios ganaderos puede originarse un flujo alternativo asociado a la exportación de ganado en pie, el cual se describe más adelante.

Fase industrial

Los animales transportados desde los predios llegan a las plantas frigoríficas (N3) donde se realiza el proceso de faena.

Posteriormente, los productos cárnicos pasan a la etapa de desosado y preparación de productos (N3b). Dependiendo de la organización industrial, estas operaciones pueden realizarse en el mismo establecimiento o en instalaciones separadas.

Desde esta etapa se generan dos grandes destinos logísticos: exportación de carne y distribución hacia el mercado interno.

Exportación de carne

Para la exportación de carne, el modelo incluye un nodo intermedio correspondiente a plataformas logísticas o centros de consolidación de exportación (N4). En este punto se realizan actividades de consolidación de cargas, preparación logística y acondicionamiento de contenedores refrigerados.

El transporte desde la planta industrial hacia esta plataforma corresponde al tramo T4 – Carne a acopio o plataforma logística.

Los productos pueden seguir tres rutas de exportación:

Exportación marítima

Los productos son transportados hacia puerto marítimo (N6a) mediante transporte en contenedores refrigerados, desde donde se embarcan hacia mercados internacionales.

Exportación aérea

Parte de la producción puede transportarse hacia aeropuertos (N6b) mediante el tramo T6b – Carne a aeropuerto, desde donde se realizan envíos internacionales por vía aérea.

Exportación terrestre

El modelo también contempla exportaciones realizadas por vía terrestre hacia países vecinos mediante el T6c – Carne exportación por carretera.

Exportación de ganado en pie

El modelo logístico también contempla el flujo asociado a la exportación de ganado en pie, que constituye una cadena logística diferenciada dentro del sistema y forma

parte tanto del esquema conceptual como del modelo simplificado utilizado para la estimación de emisiones.

De acuerdo con el esquema logístico, el movimiento inicial de animales desde los predios ganaderos (N1) hacia las instalaciones de acopio o cuarentena para exportación (N9) se identifica también como T2, es decir, corresponde a un transporte de ganado desde la fase primaria hacia un nodo de destino logístico. En estos nodos se realizan operaciones de consolidación de cargas, controles sanitarios y preparación logística previa al embarque. Esta doble utilización de T2 en el esquema refleja que se trata, en ambos casos, de transporte de animales vivos desde predios, aunque con destinos distintos: plantas de faena o acopios/cuarentenas para exportación en pie. La rama hacia faena y la rama hacia exportación en pie se diferencian por el nodo de destino y por la continuación posterior del flujo.

Posteriormente, los animales se trasladan desde las instalaciones de acopio/cuarentena hacia el puerto de ganado en pie (N10) mediante el tramo T2p – traslado a puerto, donde se realizan las operaciones de carga en buques ganaderos y el embarque hacia los mercados de destino. En consecuencia, en el caso de la exportación de ganado en pie, el esquema completo distingue dos movimientos sucesivos: T2e (predio → acopio/cuarentena) y T2p (acopio/cuarentena → puerto).

Mercado interno

Para el abastecimiento del mercado interno, los productos cárnicos se transportan desde las plantas industriales o desde plataformas logísticas hacia cámaras o acopios del mercado interno (N5).

Desde estos nodos se realiza la distribución secundaria (T3a) hacia centros de distribución (N5).

Finalmente, desde los centros de distribución se realiza la distribución interna final (T5) hacia los destinos de consumo, que incluyen supermercados, carnicerías, restaurantes y otros establecimientos comerciales.

Importación de carne

El modelo incluye también el flujo asociado a la importación de carne.

En este caso los productos ingresan al país a través de frontera por vía terrestre (N7).

Los productos son transportados hacia acopios o cámaras del mercado interno (N5) mediante el tramo T7 – Distribución a acopio.

Posteriormente estos productos se integran a la red de distribución nacional siguiendo los mismos canales logísticos del mercado interno.

Estructura general del sistema

En síntesis, el modelo logístico completo incluye los siguientes tipos de nodos:

- **N1:** Predios ganaderos
- **N3:** Plantas frigoríficas (faena)
- **N3b:** Instalaciones de desosado y preparación de productos
- **N4:** Plataformas logísticas o acopios de exportación
- **N5:** Cámaras de acopio y centros de distribución del mercado interno
- **N6:** Puertos, aeropuertos, aduana terrestre de exportación
- **N7:** Puntos de importación

Los nodos están conectados por diferentes tramos logísticos identificados en el esquema conceptual de la cadena (T1–T7). Estos tramos representan los movimientos físicos de animales o productos dentro del sistema logístico completo. En el esquema conceptual se identifican los siguientes flujos principales:

- **T1:** Transporte de ganado entre establecimientos ganaderos.
- **T2:** Transporte de ganado hacia plantas de faena y transporte de ganado hacia acopio/cuarentena para exportación en pie.
- **T3:** Transporte de carne desde plantas industriales hacia acopios, plataformas logísticas o centros de distribución de mercado internos
- **T4:** Transporte de carne desde plataformas logísticas hacia nodos de exportación
- **T5:** Distribución hacia el mercado interno.
- **T6:** Transporte asociado a exportaciones de carne (puerto, aeropuerto o exportación terrestre).
- **T7:** Transporte asociado a la importación de carne hacia acopio o centro de distribución

Simplificación del modelo para el análisis de emisiones

Si bien el modelo logístico completo incluye múltiples nodos y posibles configuraciones operativas, para el análisis de emisiones se adopta una simplificación estructural que permite representar los principales flujos de transporte sin perder representatividad del sistema.

Esta simplificación consiste en agrupar los movimientos logísticos en tramos representativos de transporte, definidos según el tipo de carga transportada y la etapa de la cadena en la que ocurre el movimiento. La simplificación no implica excluir flujos relevantes del sistema, sino representarlos de forma operativamente modelable en las planillas de cálculo y en la comparación de escenarios.

Los tramos definidos se corresponden con los flujos efectivamente modelados en las planillas de cálculo del Producto 3:

- **T1:** Transporte de ganado entre establecimientos ganaderos
- **T2f:** Transporte de ganado hacia plantas de faena y preparación de productos
- **T2e:** Transporte de ganado para exportación en pie.
- **T3-T5:** Distribución hacia el mercado interno.
- **T6:** Transporte asociado a exportaciones de carne.
- **T7:** Importación de carne

En esta representación simplificada, algunos movimientos del esquema conceptual quedan absorbidos dentro de tramos más agregados. En particular, el T4 del esquema completo se incorpora dentro de los tramos de exportación cuando se trata de carne. De forma análoga, el T3 del esquema conceptual se incorpora dentro del T5, que representa la distribución interna de productos cárnicos.

Asimismo, los movimientos logísticos que pueden ocurrir entre las etapas de faena y desosado/preparación de productos no se modelan como un tramo independiente en el modelo simplificado, sino que se consideran integrados dentro de los flujos industriales correspondientes.

Esta representación permite modelar las emisiones del sistema logístico utilizando un conjunto acotado de tramos de transporte, cada uno caracterizado por parámetros operativos específicos como distancia promedio, tipo de vehículo, factor de carga y frecuencia de viajes.

El modelo logístico simplificado constituye la base para el análisis de emisiones desarrollado en las secciones siguientes, donde se estiman las emisiones asociadas

a cada tramo de transporte y se evalúan distintos escenarios tecnológicos de descarbonización.

2. Marco metodológico de estimación

MARCO METODOLÓGICO DE REFERENCIA

La estimación de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) asociadas al transporte en la cadena logística de la carne bovina se realizó utilizando como marco metodológico principal el estándar ISO 14083, que establece los principios, límites del sistema y métodos para la cuantificación y reporte de emisiones de GEI derivadas de operaciones de transporte y logística (International Organization for Standardization., 2023).

Este estándar proporciona lineamientos para estimar emisiones en cadenas de transporte multimodales, considerando tanto el consumo energético directo del transporte como las emisiones asociadas a la producción de los vectores energéticos utilizados.

El estándar establece que las emisiones del transporte deben estimarse a partir de la relación entre:

- Actividad de transporte,
- Consumo energético del sistema logístico,
- Factores de emisión del vector energético utilizado.

La aplicación de ISO 14083 permite asegurar la consistencia metodológica del análisis y la comparabilidad de los resultados con estudios internacionales de huella de carbono en transporte y logística.

El análisis se complementó con otras metodologías internacionalmente utilizadas para la estimación de emisiones en el sector transporte, entre ellas:

- Las Directrices del IPCC para inventarios nacionales de gases de efecto invernadero, utilizadas para estimar emisiones de combustión de combustibles fósiles y emisiones fugitivas asociadas a equipos de refrigeración (Intergovernmental Panel on Climate Change., 2006)
- Los factores de emisión del ciclo energético upstream utilizados en análisis de transporte y publicados por el Department for Environment, Food and

Rural Affairs (DEFRA) del Reino Unido (Department for Environment, Food & Rural Affairs, 2025);

- Enfoques de análisis de ciclo de vida del transporte utilizados para comparar tecnologías energéticas alternativas (Edwards, Hass, Larivé, Lonza, & Maas, 2020) (International Energy Agency., 2023).

Estas metodologías permiten estimar de manera consistente las emisiones del transporte considerando tanto las emisiones directas del uso de energía como las emisiones asociadas a la producción de los vectores energéticos utilizados.

Enfoque de contabilidad de emisiones del transporte

La estimación de emisiones del transporte puede realizarse considerando distintos límites del ciclo energético asociado al uso del vector energético utilizado.

En este estudio se adoptó un enfoque basado en tres niveles de contabilidad energética utilizados ampliamente en análisis de transporte y evaluaciones de ciclo de vida.

Tank-to-Engine (TTE)

Corresponde a las emisiones directas generadas durante el uso del vector energético en el vehículo, principalmente asociadas a la combustión del combustible en el motor o a las emisiones directas del sistema de propulsión (International Energy Agency., 2023) (International Organization for Standardization., 2023).

Well-to-Tank (WTT)

Representa las emisiones asociadas a la extracción, producción, procesamiento y distribución del vector energético hasta su disponibilidad para su uso en el vehículo (International Energy Agency., 2023) (International Organization for Standardization., 2023).

Well-to-Wheel (WTW)

Corresponde al total de emisiones del sistema energético utilizado en el transporte y resulta de la suma de las emisiones asociadas a la producción del vector energético y las emisiones generadas durante su utilización en el vehículo (International Energy Agency., 2023) (International Organization for Standardization., 2023)

Este enfoque se expresa de forma general como:

$$WTW = TTE + WTT$$

El enfoque Well-to-Wheel fue adoptado como base para la comparación de tecnologías de transporte debido a que permite evaluar de manera consistente el desempeño climático de tecnologías con diferentes vectores energéticos, evitando subestimar las emisiones de tecnologías con cero emisiones directas en el punto de uso, como los vehículos eléctricos o los vehículos impulsados por hidrógeno.

Unidad funcional e indicadores de análisis

La unidad funcional utilizada para la estimación de emisiones corresponde a la intensidad de emisiones por unidad de transporte de carga, expresada como:

$$gCO_2e/t \cdot km$$

Esta unidad funcional representa la cantidad de emisiones generadas para transportar una tonelada de carga a lo largo de un kilómetro y constituye uno de los indicadores más utilizados para evaluar el desempeño climático del transporte de carga (International Organization for Standardization., 2023)

La utilización de esta unidad funcional permite comparar tecnologías de transporte con diferentes eficiencias energéticas y distintos vectores energéticos, así como evaluar el desempeño relativo de distintos modos de transporte dentro de la cadena logística.

Además de este indicador principal, el análisis utiliza indicadores complementarios que facilitan la interpretación de los resultados, entre ellos:

- Emisiones por tonelada transportada (kg CO₂e/t),
- Emisiones totales anuales del sistema logístico.

Estos indicadores permiten evaluar tanto la intensidad climática del transporte como el impacto agregado de los flujos logísticos analizados.

Límites del sistema analizado

La estimación de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) se realizó mediante la delimitación de un sistema que abarca los principales flujos de transporte asociados a la cadena logística de la carne bovina vinculada al mercado interno, a las exportaciones y a las importaciones. La definición de los límites del sistema se establece siguiendo los principios metodológicos para la cuantificación de emisiones en cadenas de transporte, que requieren especificar de forma transparente las actividades incluidas y excluidas del análisis (International Organization for Standardization., 2023).

El sistema considerado se limita a las operaciones de transporte asociadas al movimiento de ganado y productos cárnicos dentro del territorio nacional y en los tramos vinculados al comercio exterior hasta los puntos de entrada o salida del país. En el caso de las exportaciones, el análisis considera las emisiones asociadas al transporte hasta el puerto de salida o el punto fronterizo terrestre, sin incluir el transporte internacional posterior hacia los mercados de destino.

Dentro de los límites del sistema se incluyen los siguientes flujos logísticos de transporte:

- **Transporte de ganado entre establecimientos ganaderos**, asociado a las distintas etapas del ciclo productivo ganadero que generan movimientos de animales entre predios durante las fases de cría, recría e internada.
- **Transporte de ganado asociado a la exportación de ganado en pie**, correspondiente al traslado de animales desde establecimientos ganaderos hasta los puntos de salida del país para su exportación.
- **Transporte de ganado hacia plantas de faena**, que comprende el traslado de animales desde los establecimientos ganaderos hasta las plantas industriales donde se realizan las actividades de faena y procesamiento y generación de productos.
- **Transporte de productos cárnicos hacia centros de distribución y distribución final interna**, incluyendo el transporte desde plantas industriales hacia centros logísticos y la posterior distribución dentro del mercado interno.
- **Transporte asociado a importaciones de productos cárnicos**, considerando el traslado desde los puntos de ingreso al país (puertos o pasos fronterizos) hasta los centros de distribución o destinos logísticos dentro del territorio nacional.

El análisis incluye exclusivamente las emisiones asociadas a las operaciones de transporte, por lo que quedan fuera de los límites del sistema las emisiones correspondientes a otras etapas de la cadena productiva, tales como la producción ganadera, los procesos industriales de faena y procesamiento de carne, así como las actividades de comercialización o consumo final.

Las emisiones asociadas al transporte incluyen tanto las emisiones directas derivadas del consumo de energía en los vehículos, como las emisiones indirectas asociadas a la producción y suministro de los vectores energéticos utilizados.

En el caso de los combustibles fósiles empleados en el transporte carretero, las emisiones asociadas a su producción, refinación y distribución (enfoque Well-to-

Tank) se consideran mediante factores de emisión representativos de la cadena de suministro del combustible. Dado que Uruguay no es un productor primario de petróleo y gran parte de los combustibles utilizados en el transporte se originan en cadenas de suministro internacionales, estas emisiones corresponden mayoritariamente a procesos que ocurren fuera del territorio nacional (International Organization for Standardization., 2023).

En el caso del transporte refrigerado de productos cárnicos, el análisis considera las emisiones fugitivas asociadas a posibles fugas de refrigerantes en los sistemas de refrigeración utilizados durante el transporte. Estos sistemas suelen emplear gases fluorados con elevado potencial de calentamiento global, por lo que incluso pequeñas tasas de fuga pueden contribuir a las emisiones totales del sistema (Intergovernmental Panel on Climate Change., 2006). Las emisiones fugitivas se estimaron mediante un indicador específico de emisiones por unidad de transporte refrigerado, calculado a partir de la carga típica de refrigerante, una tasa de fuga representativa y el potencial de calentamiento global del refrigerante correspondiente.

El presente estudio no modela el consumo energético asociado al funcionamiento de los sistemas de refrigeración durante el transporte. En la práctica, los contenedores refrigerados pueden ser alimentados mediante generadores diésel independientes (gensets) o mediante conexiones eléctricas externas en infraestructura logística, por lo que el consumo energético del sistema frigorífico no se encuentra necesariamente asociado al consumo de combustible del vehículo de transporte.

Diversos estudios indican que el consumo energético de las unidades de refrigeración representa una fracción relativamente menor del consumo energético total del transporte en comparación con el consumo de combustible del vehículo tractor (International Energy Agency, 2017); (Smart Freight Centre, 2023). Debido a la ausencia de información representativa sobre las configuraciones energéticas utilizadas en los tramos logísticos analizados, estas emisiones no se estimaron de forma explícita en el presente estudio.

Por otra parte, las emisiones asociadas a sistemas de refrigeración en infraestructura logística, tales como centros de acopio, cámaras frigoríficas o instalaciones de almacenamiento en frío, se encuentran fuera de los límites del sistema definidos para este análisis, el cual se enfoca exclusivamente en las operaciones de transporte. Durante el desarrollo del estudio se evaluó la posibilidad de incorporar estas fuentes de emisión; sin embargo, no se logró obtener información representativa sobre la ubicación, características operativas y

consumo energético de los centros de acopio refrigerados dentro de la cadena logística analizada, por lo que dichas emisiones no pudieron ser estimadas.

En consecuencia, los resultados obtenidos representan las emisiones asociadas a las operaciones de transporte dentro del sistema logístico nacional, incluyendo los tramos vinculados a comercio exterior hasta los puntos de salida o ingreso al país, pero excluyendo el transporte internacional posterior a las exportaciones y las emisiones asociadas a infraestructura logística no vinculada directamente al transporte.

Movimientos auxiliares asociados a la prestación del servicio de transporte

El sistema de análisis considera determinadas operaciones logísticas auxiliares necesarias para la prestación del servicio de transporte, de acuerdo con las recomendaciones metodológicas establecidas en ISO 14083, las cuales indican que las emisiones asociadas a actividades necesarias para completar un servicio logístico deben incluirse dentro de los límites del sistema cuando sean relevantes para la operación del transporte (International Organization for Standardization., 2023).

En particular, en el caso de los tramos de transporte carretero, el modelo considera el retorno vacío de los vehículos cuando el movimiento logístico implica el reposicionamiento del vehículo para completar el servicio de transporte. Esta situación ocurre, por ejemplo, cuando un camión debe regresar sin carga después de realizar la entrega de la mercancía o luego de transportar ganado hacia una planta de faena.

La inclusión del retorno vacío permite representar de manera más realista la operación logística del transporte de carga, evitando subestimar las emisiones asociadas al servicio de transporte.

Asimismo, en los escenarios logísticos que incorporan transporte ferroviario o fluvial mediante contenedores, el análisis considera los movimientos asociados al reposicionamiento de contenedores vacíos, necesarios para completar la operación logística de exportación o transporte intermodal.

Por el contrario, otras operaciones auxiliares potencialmente asociadas a la cadena logística no se incluyen dentro de los límites del sistema, debido a la falta de información representativa o a que no forman parte directa de las operaciones de transporte modeladas en el presente estudio. Entre estas actividades se incluyen:

- Movimientos logísticos internos dentro de instalaciones industriales o centros logísticos,

- Transporte interno dentro de plantas frigoríficas,
- Movimientos de carga dentro de terminales portuarias o centros de distribución,
- Reposicionamiento logístico de equipos o contenedores fuera de los flujos modelados,
- Transporte internacional posterior a la salida del país en el caso de exportaciones,
- Operaciones de almacenamiento y refrigeración en centros de acopio o cámaras frigoríficas.

La delimitación de estas operaciones permite mantener la consistencia metodológica del sistema analizado y garantizar la transparencia en la definición de los límites del estudio, en línea con los principios establecidos por ISO 14083 para la cuantificación de emisiones de GEI en cadenas de transporte (International Organization for Standardization., 2023).

Fuentes de factores de emisión

Los factores de emisión utilizados para la estimación de emisiones del transporte provienen de fuentes metodológicas internacionalmente reconocidas.

En particular, se utilizaron:

- factores de emisión para la combustión de combustibles fósiles provenientes de las *Directrices del IPCC para inventarios nacionales de gases de efecto invernadero* (Intergovernmental Panel on Climate Change., 2006);
- factores de emisión del ciclo energético TTW y WTT utilizados en análisis de transporte y publicados por DEFRA (Department for Environment, Food & Rural Affairs, 2025);
- factores de emisión de la red eléctrica nacional de Uruguay (Sistema Interconectado Nacional – SIN) utilizados para estimar las emisiones asociadas al consumo de electricidad en tecnologías electrificadas;
- potenciales de calentamiento global (GWP) provenientes del Quinto Informe de Evaluación del IPCC.

Los valores específicos de estos factores de emisión se presentan en la sección de parámetros técnicos del modelo.

Parámetros de modelado considerados

El modelo de estimación de emisiones del transporte se basa en un conjunto de parámetros que describen el funcionamiento del sistema logístico y el desempeño energético de las tecnologías de transporte consideradas.

Entre los principales parámetros utilizados se encuentran:

- consumo energético de los vehículos por unidad de distancia
- masa de carga transportada
- distancia media de transporte para cada tramo logístico
- factores de emisión del vector energético utilizado
- tasa de fuga de refrigerantes en sistemas de transporte refrigerado

Estos parámetros permiten estimar las emisiones del transporte a partir de la relación entre actividad logística, consumo energético y factores de emisión, de acuerdo con el enfoque metodológico adoptado para la cuantificación de emisiones en operaciones de transporte.

Los valores específicos de estos parámetros se presentan en la sección correspondiente a los parámetros técnicos utilizados en el modelado, donde se detallan los supuestos operativos y los valores utilizados para cada escenario analizado.

3. Tecnologías de transporte consideradas

La descarbonización del transporte de carga requiere evaluar distintas alternativas tecnológicas que permitan reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) asociadas a la operación logística. En este estudio se consideran diferentes tecnologías de propulsión y vectores energéticos aplicables al transporte carretero de mercancías en la cadena logística cárnica.

La comparación entre tecnologías se realiza siguiendo un enfoque de ciclo energético completo (Well-to-Wheel, WTW), que considera tanto las emisiones directas generadas durante la operación del vehículo (Tank-to-Wheel, TTW) como aquellas asociadas a la producción, procesamiento y suministro de la energía utilizada (Well-to-Tank, WTT).

Este enfoque es consistente con los lineamientos metodológicos del Global Logistics Emissions Council Framework (GLEC) y de la norma ISO 14083, que

recomiendan evaluar las emisiones del transporte manteniendo constante el servicio logístico prestado y expresando los resultados en unidades funcionales comparables, típicamente toneladas-kilómetro transportadas (Smart Freight Centre, 2023).

Las alternativas tecnológicas consideradas incluyen tanto cambios en el sistema de propulsión del vehículo como modificaciones en el tipo de energía o combustible utilizado, manteniendo constante la función logística del transporte.

Las tecnologías incluidas en el presente estudio son:

- vehículos diésel (escenario de referencia)
- mejoras de eficiencia energética en vehículos diésel /mezcla con biodiesel
- uso de combustibles renovables en motores diésel existentes (HVO y mezclas con biodiésel)
- vehículos a biometano
- vehículos eléctricos a batería (BEV)
- vehículos eléctricos con celda de combustible de hidrógeno (FCEV)
- vehículos con motor de combustión interna a hidrógeno (H₂-ICE)

Las subsecciones siguientes describen las características técnicas de cada alternativa.

Vehículo diésel (escenario de referencia)

El transporte de carga por carretera se basa predominantemente en vehículos impulsados por motores diésel de combustión interna. Estos motores operan mediante ignición por compresión y presentan una elevada eficiencia térmica, lo que ha favorecido su adopción en el transporte pesado de mercancías. (International Energy Agency, 2017)

En la cadena logística cárnica analizada, el transporte carretero se realiza mayoritariamente mediante camiones diésel utilizados tanto para el traslado de ganado entre establecimientos ganaderos como para el transporte de productos cárnicos hacia centros de distribución, puertos y fronteras. Esta configuración logística ha sido documentada en estudios sobre la cadena exportadora de carne en Uruguay (DI Pascua, 2026) (Rosselli, Carriquiry, Pérez, & Varela, 2022)

En el presente estudio los vehículos diésel se utilizan como escenario de referencia (baseline) para la comparación de las distintas alternativas tecnológicas.

Mejoras de eficiencia energética en vehículos diésel /mezcla con biodiésel

Además del cambio hacia combustibles o tecnologías alternativas, una estrategia relevante de mitigación consiste en mejorar la eficiencia energética de los vehículos existentes.

Las mejoras de eficiencia pueden lograrse mediante diversas medidas tecnológicas y operativas, entre ellas:

- optimización del rendimiento del motor y la transmisión
- mejoras aerodinámicas del vehículo
- reducción de peso mediante materiales livianos
- uso de neumáticos de baja resistencia a la rodadura
- sistemas de gestión energética
- optimización de rutas y conducción eficiente

Estas medidas permiten reducir el consumo energético del transporte manteniendo el mismo sistema de propulsión, y forman parte de las estrategias de eficiencia consideradas en las políticas de descarbonización del transporte pesado (European Commission, 2021).

Combustibles renovables en motores diésel (biodiésel y HVO)

Los biocombustibles líquidos pueden utilizarse en motores diésel convencionales mediante mezclas con diésel fósil o como sustitutos directos del combustible.

El biodiésel se produce a partir de aceites vegetales o grasas animales mediante un proceso de transesterificación y se utiliza habitualmente mezclado con diésel fósil en distintas proporciones. (International Energy Agency., 2023).

En Uruguay, el desarrollo del sector de biocombustibles se inició con la Ley N.º 18.195 de Agrocombustibles (2007), que estableció el marco legal para la producción y utilización de biocombustibles en el país. Posteriormente, el Decreto N.º 523/008 reglamentó aspectos técnicos vinculados a la producción, control de calidad y comercialización de estos combustibles. (Presidencia de la República, 2008).

Durante varios años se aplicó una mezcla obligatoria de biodiésel en el gasoil, que permitió incorporar biocombustibles producidos localmente al combustible utilizado por el transporte carretero. Posteriormente esta obligación fue eliminada

y actualmente el gasoil comercializado en Uruguay no incorpora biodiésel de forma obligatoria.

En este estudio, el uso de biodiésel se considera como una posible opción futura de composición del combustible diésel.

Adicionalmente, se incluye el HVO (Hydrotreated Vegetable Oil), un biocombustible avanzado producido mediante hidrogenación de aceites vegetales o residuos orgánicos. El HVO presenta propiedades fisicoquímicas similares al diésel fósil y puede utilizarse en motores diésel existentes sin modificaciones técnicas (International Energy Agency., 2023).

Vehículos a biometano

El biometano es un combustible renovable obtenido a partir de la digestión anaerobia de residuos orgánicos. Tras procesos de purificación, el biogás puede alcanzar una calidad equivalente al gas natural y utilizarse como combustible vehicular. (International Energy Agency., 2023).

Los vehículos impulsados por gas pueden operar con gas natural comprimido (CNG) o gas natural licuado (LNG). Los motores diseñados para gas natural pueden utilizar biometano como sustituto renovable.

Actualmente existen camiones a gas disponibles en diferentes configuraciones de transporte de carga, incluyendo camiones rígidos para distribución urbana, vehículos para transporte regional y tractores para transporte pesado. (International Energy Agency, 2017).

Vehículos eléctricos a batería (BEV)

Los vehículos eléctricos a batería (Battery Electric Vehicles, BEV) utilizan motores eléctricos alimentados por energía almacenada en baterías recargables.

Esta tecnología elimina las emisiones directas de gases de efecto invernadero durante la operación del vehículo. Las emisiones asociadas al ciclo de vida dependen principalmente de la intensidad de carbono del sistema eléctrico utilizado para la recarga. (International Energy Agency., 2023).

En los últimos años se han desarrollado camiones eléctricos para transporte de carga en distintas configuraciones, incluyendo vehículos de distribución urbana y camiones de mayor capacidad. (International Energy Agency, 2017).

Vehículos a hidrógeno

El hidrógeno puede utilizarse como vector energético en el transporte mediante diferentes configuraciones tecnológicas.

Vehículos eléctricos con celda de combustible (FCEV)

Los Fuel Cell Electric Vehicles (FCEV) utilizan hidrógeno para generar electricidad mediante una reacción electroquímica en una celda de combustible. La electricidad producida alimenta un motor eléctrico que impulsa el vehículo. (International Council on Clean Transportation., 2022).

Motores de combustión interna a hidrógeno (H₂-ICE)

En esta configuración el hidrógeno se utiliza como combustible en un motor de combustión interna adaptado. Aunque el principio de funcionamiento es similar al de los motores convencionales, el combustible utilizado no contiene carbono. (Transport & Environment., 2020).

VEHÍCULO DE REFERENCIA UTILIZADO EN EL MODELADO

Para la comparación entre tecnologías se definió un vehículo de referencia representativo del transporte carretero utilizado en la cadena logística cárnica.

De acuerdo con la caracterización logística del sistema exportador de carne desarrollada por Di Pascua, el transporte principal se realiza mediante camiones articulados compuestos por un tractor y un semirremolque, utilizados para transportar ganado o productos cárnicos entre distintos nodos de la cadena logística.

En el caso del transporte de ganado, la carga se realiza en remolques o semirremolques tipo jaula ganadera, mientras que en el transporte de carne se utilizan contenedores refrigerados o unidades frigoríficas. (DI Pascua, 2026)

En el análisis de tecnologías alternativas se mantiene constante la capacidad de carga y el servicio logístico prestado, sustituyendo únicamente el sistema de propulsión o el tipo de energía utilizado por el vehículo.

4. Parámetros del modelo

Esta sección presenta los parámetros utilizados en el modelo de estimación de emisiones de gases de efecto invernadero aplicado a la cadena logística de transporte de ganado y carne bovina. Los parámetros incluyen los datos de actividad por tramo logístico, los consumos energéticos por tecnología de transporte y los factores de emisión asociados al ciclo energético de los distintos vectores energéticos considerados.

Los datos de actividad utilizados en el modelo se derivan del análisis logístico de los flujos de transporte de la cadena cárnica en Uruguay, elaborado a partir de información de sistemas nacionales de trazabilidad ganadera, estadísticas sectoriales y registros de comercio exterior. Estos datos permiten caracterizar los volúmenes transportados, distancias medias recorridas y número de viajes asociados a cada tramo logístico.

Por su parte, los parámetros energéticos y los factores de emisión utilizados para el cálculo de emisiones se basan en fuentes metodológicas reconocidas a nivel internacional, incluyendo las Directrices del IPCC para inventarios nacionales de gases de efecto invernadero, los factores de conversión de DEFRA y literatura técnica sobre desempeño energético de tecnologías de transporte.

TIPOS DE VEHÍCULOS CONSIDERADOS

El transporte de ganado en pie y de productos cárnicos en Uruguay se realiza mediante diferentes configuraciones de vehículos de carga utilizados en el transporte carretero de mercancías.

El transporte interdepartamental de ganado en pie se realiza principalmente mediante camiones jaula especializados para transporte de animales vivos, generalmente configuraciones de tractocamión con semirremolque ganadero. Estas configuraciones permiten transportar grandes volúmenes de ganado entre establecimientos ganaderos y plantas de faena. (DI Pascua, 2026) (Rosselli, Carriquiry, Pérez, & Varela, 2022).

En el caso del transporte de carne y productos cárnicos, se utilizan semirremolques frigoríficos, equipados con unidades de refrigeración autónomas que permiten mantener la cadena de frío durante el transporte hacia centros de distribución, puertos de exportación o mercados internos. (DI Pascua, 2026) (Rosselli, Carriquiry, Pérez, & Varela, 2022).

Para fines de modelización, estas configuraciones operativas fueron representadas mediante categorías simplificadas de vehículos definidas en función de su capacidad de carga representativa:

- **Camión pesado (≈28 t de carga útil):** configuraciones de tractocamión con semirremolque utilizadas en transporte interdepartamental y en los principales flujos logísticos hacia plantas de faena o puertos de exportación.
- **Camión mediano (≈8 t):** camiones rígidos utilizados para transporte regional o distribución intermedia.
- **Camión simple (≈2 t):** vehículos rígidos de menor porte utilizados en tramos logísticos de menor escala.
- **Vehículos utilitarios (≈0.8 t):** vehículos livianos utilizados principalmente en distribución urbana o transporte de volúmenes reducidos.

Esta clasificación permite representar las configuraciones reales del sistema logístico manteniendo una estructura simplificada para el cálculo de consumos energéticos y emisiones.

DATOS DE ACTIVIDAD POR TRAMO LOGÍSTICO

Los datos de actividad corresponden a los flujos de transporte estimados para la cadena logística de la carne bovina en Uruguay.

Tabla 1. Datos de actividad por tramo logístico

Tramo logístico	Vehículo	Carga (t/año)	Distancia (km)	Viajes (n/año)
T1 Establecimientos	Pesado	1.262.643,9 ¹	114,0 ¹	80.423,2 ¹
T2 Faena	Pesado	1.143.479,3 ¹	185,0 ¹	70.428,6 ¹
T2 Exportación en pie (general)	Pesado	70.397,6 ¹	100,0 ¹	4.171,0 ¹
T2 Exportación en pie (Ruta 5)	Pesado	3.519,9 ¹	180,0 ¹	241,9 ¹
T2 Exportación en pie (Ruta 3)	Pesado	2.111,9 ¹	450,0 ¹	125,1 ¹
T6 Puerto (Ruta 5)	Pesado	74.858,0 ¹	296,7 ¹	3.254,7 ¹
T6 Puerto (Ruta 3)	Pesado	31.471,0 ¹	492,0 ¹	1.368,3 ¹
T6 Puerto y carretera	Pesado	374.121,0 ¹	166,0 ¹	22.186,0 ¹
T6 Aéreo	Simple	2.421,0 ¹	108,0 ¹	1.047,0 ¹
T7 Importación	Pesado	34.881,0 ¹	335,0 ¹	1.516,6 ¹
Interno Pesado	Pesado	35.295,5 ¹	175,5 ¹	2.485,5 ¹
Interno Mediano	Mediano	78.443,0 ¹	135,0 ¹	17.195,0 ¹
Interno Simple	Simple	48.568,0 ¹	104,5 ¹	25.838,0 ¹
Interno Utilitario	Utilitario	10.426,5 ¹	100,0 ¹	24.020,5 ¹

Los valores utilizados representan promedios del período 2022-2024 y fueron derivados a partir de información de trazabilidad ganadera, estadísticas sectoriales y registros de comercio exterior¹.

CONSUMO ENERGÉTICO POR TECNOLOGÍA Y TIPO DE VEHÍCULO

Los consumos energéticos utilizados en el modelo corresponden a valores diferenciados para vehículos cargados y vacíos, representando las condiciones operativas típicas del transporte de mercancías.

Los valores base para vehículos diésel corresponden a estimaciones del consumo específico de combustible para cada categoría de vehículo. Para tecnologías drop-in, como biodiésel o HVO, se asumió el mismo consumo energético que el diésel debido a la similitud de sus propiedades energéticas y su uso en motores diésel convencionales.

Tabla 2. Consumo energético por tecnología y tipo de vehículo

Tecnología	Unidad	Pesado	Mediano	Simple	Utilitario
Gas oil (baseline)	L/100km	40 / 30 ²	30 / 25 ²	20 / 15 ²	7 / 5,95 ²
Gas oil (eficiencia)	L/100km	34 / 25,5 ³	25,5 / 21,25 ³	17 / 12,75 ³	5,95 / 5,06 ³
Gas oil + biodiésel	L/100km	40 / 30 ⁴	30 / 25 ⁴	20 / 15 ⁴	7 / 5,95 ⁴
Gas oil + biodiésel + eficiencia	L/100km	34 / 25,5 ⁴	25,5 / 21,25 ⁴	17 / 12,75 ⁴	5,95 / 5,06 ⁴
HVO	L/100km	40 / 30 ⁵	30 / 25 ⁵	20 / 15 ⁵	7 / 5,95 ⁵
Biometano (GNC)	kg/100km	29 / 23 ⁶	22 / 18 ⁷	14 / 11 ⁷	6 / 5,1 ⁷
BEV	kWh/km	1,45 / 1,10 ⁸	0,85 / 0,65 ⁹	0,65 / 0,50 ⁹	0,25 / 0,20 ⁹
FCEV	kg/km	0,12 / 0,12 ¹⁰	0,07 / 0,05 ¹⁰	0,05 / 0,04 ¹¹	—
H ₂ -ICE	kg/km	0,12 / 0,10 ¹⁰	0,105 / 0,085 ¹⁰	0,075 / 0,055 ¹¹	—

¹ Análisis logístico de flujos de transporte de la cadena cárnica en Uruguay. Di Pascua, 2026.

² Análisis logístico de flujos de transporte de la cadena cárnica en Uruguay.

³ Consumos diésel representativos de transporte pesado.

⁴ Mejora de eficiencia energética del 15 % respecto al baseline.

⁵ Consumo asumido igual al diésel para biodiésel.

⁶ Consumo asumido igual al diésel para HVO.

⁷ ICCT & Öko-Institut (2020).

⁸ Iveco (2023).

⁹ Volvo Trucks; Transport & Environment.

¹⁰ Designwerk (2024).

¹¹ ICCT (2022).

FACTORES DE EMISIÓN DEL CICLO ENERGÉTICO

Los factores de emisión utilizados corresponden a emisiones Well-to-Wheel (WTW), incluyendo emisiones Tank-to-Wheel (TTW) y Well-to-Tank (WTT).

Tabla 3. Factores de emisión por vector energético

Vector energético	Unidad	TTW	WTT
Gasoil	kg CO ₂ e/L	2,7071 ¹²	0,6241 ¹³
Gasoil + biodiesel	kg CO ₂ e/L	2,5708 ¹³	0,6110 ¹³
HVO	kg CO ₂ e/L	0,0356 ¹³	0,5644 ¹³
Biometano	kg CO ₂ e/kg	0,0052 ¹³	0,7741 ¹³
Electricidad (2022-2024)	kg CO ₂ e/kWh	0	0,0410 ¹⁴
Electricidad (2024)	kg CO ₂ e/kWh	0	0,0060 ¹⁴
Hidrógeno (2022-2024)	kg CO ₂ e/kg	0	2,132 ^{15 16}
Hidrógeno (2024)	kg CO ₂ e/kg	0	0,312 ^{15 16}

Estimación del factor de emisión del hidrógeno

El factor de emisión del hidrógeno producido mediante electrólisis se estimó a partir del consumo eléctrico del proceso.

Según IRENA (2020), el consumo energético típico de la electrólisis alcalina es aproximadamente 52 kWh por kilogramo de hidrógeno producido.

El factor de emisión del hidrógeno se calculó multiplicando el consumo eléctrico del proceso por el factor de emisión de la electricidad del sistema eléctrico nacional:

$$FE_{H_2} = Consumo_{electrólisis} \times FE_{electricidad}$$

Se destaca que, si bien el factor de emisión del hidrógeno para el periodo 2022-2024 (2,132 kg CO₂e/kg) es superior al proyectado para 2024, ambos escenarios se sitúan holgadamente por debajo del umbral internacional de 3,4 kg CO₂e/kg H₂ (International Renewable Energy Agency, 2020). Por lo tanto, en ambos casos el vector energético clasifica como hidrógeno verde de muy baja intensidad de carbono, validando la sostenibilidad de las tecnologías FCEV y H₂-ICE en la cadena cárnica uruguaya.

¹² IPCC (2006).

¹³ DEFRA 2025.

¹⁴ Balance Energético Nacional - MIEM.

¹⁵ Estimación a partir del FE eléctrico nacional.

¹⁶ IRENA (2020).

Factores de emisión modales para transporte ferroviario y fluvial

Para la evaluación de escenarios multimodales se utilizaron factores de emisión por tonelada-kilómetro para transporte ferroviario y transporte marítimo de contenedores.

Para la estimación de emisiones asociadas al transporte fluvial se utilizaron factores de emisión por tonelada-kilómetro correspondientes a buques portacontenedores de pequeño porte (0-999 TEU) reportados en los factores de conversión de DEFRA (2025).

La elección de este factor se basa en que el transporte fluvial considerado en el análisis corresponde a embarcaciones de escala relativamente pequeña utilizadas en navegación regional, cuya capacidad de carga y perfil operativo es más comparable con buques de contenedores de pequeño porte que con buques oceánicos de gran capacidad.

Además, las bases de datos internacionales de factores de emisión para transporte marítimo y fluvial presentan una disponibilidad limitada de factores específicos para navegación interior en América del Sur. En este contexto, el uso de factores de emisión para buques portacontenedores de menor capacidad constituye una aproximación conservadora y consistente con metodologías utilizadas en estudios de evaluación de emisiones de transporte multimodal. Dado que el análisis se centra en la comparación relativa entre escenarios logísticos, la utilización de un factor modal representativo permite capturar adecuadamente las diferencias de intensidad de emisiones entre transporte carretero y transporte fluvial

Tabla 4. Factores de emisión modales. Fuente: DEFRA 2025

Modo	Unidad	TTW	WTT
Container ship 0-999 TEU	kg CO ₂ e/tkm	0,03675	0,00833
Tren	kg CO ₂ e/tkm	0,0278	0,00691

Estos factores representan las emisiones directas del combustible utilizado en la embarcación (TTW) y las emisiones asociadas a la producción y suministro del combustible (WTT).

Emisiones asociadas a refrigeración en transporte de carne

El transporte de carne se realiza mediante camiones refrigerados equipados con unidades de refrigeración autónomas que utilizan refrigerantes fluorados.

En el modelo se consideró el uso del refrigerante R404A, ampliamente utilizado en transporte frigorífico. Se asumió una carga típica de refrigerante entre 3 y 8 kg por unidad de transporte y una tasa anual de fugas del 15 %, de acuerdo con valores reportados en las Directrices del IPCC.

MODELO GENERAL DE CÁLCULO DE EMISIONES

La estimación de emisiones para cada tramo logístico se realiza a partir de la actividad de transporte y los consumos energéticos asociados a cada tecnología.

La actividad de transporte se expresa mediante el indicador de tonelada-kilómetro (ton-km), calculado como:

$$TKM = \text{Toneladas} \times \text{Distancia promedio}$$

El consumo energético total se calcula considerando tanto el recorrido cargado como el retorno vacío del vehículo:

$$\text{Consumo} = (\text{Viajes} \times \text{Distancia} \times \text{Consumo}_{\text{cargado}}) + (\text{Viajes} \times \text{Distancia} \times \text{Consumo}_{\text{vacío}})$$

Las emisiones directas asociadas al uso del combustible se estiman mediante:

$$\text{Emisiones}_{TTW} = \text{Consumo} \times FE_{TTW}$$

Las emisiones asociadas a la producción y suministro de energía se estiman como:

$$\text{Emisiones}_{WTT} = \text{Consumo} \times FE_{WTT}$$

Finalmente, las emisiones totales del ciclo energético se obtienen como:

$$\text{Emisiones}_{WTW} = \text{Emisiones}_{TTW} + \text{Emisiones}_{WTT}$$

Las emisiones se reportan tanto en términos absolutos como mediante indicadores de intensidad logística.

5. Metodología de estimación por tramo

La estimación de emisiones de gases de efecto invernadero se realiza para los distintos tramos logísticos identificados en la cadena cárnica uruguaya. Cada tramo representa un flujo específico de transporte dentro del sistema logístico, caracterizado por el tipo de mercancía transportada, la distancia recorrida, el volumen movilizado y la tecnología de transporte utilizada.

Para cada tramo se definieron los datos de actividad logística (volumen transportado, distancias promedio y número de viajes) a partir del análisis de los flujos logísticos del sector cárnico en Uruguay. Sobre estos flujos se evalúan distintos escenarios tecnológicos de transporte orientados a la reducción de emisiones.

Los datos de actividad utilizados para la estimación de emisiones en los distintos tramos logísticos se obtuvieron a partir del análisis de estudios sectoriales sobre la cadena cárnica en Uruguay. En particular, se utilizaron los resultados del trabajo “Diagnóstico de la logística y el transporte de la cadena cárnica en Uruguay” elaborado por (DI Pascua, 2026), así como el análisis de flujos logísticos presentado por (Souto G. T., 2018) para el Banco Interamericano de Desarrollo (BID).

El estudio de (DI Pascua, 2026) proporciona estimaciones detalladas sobre los movimientos logísticos de ganado y carne dentro del territorio nacional, incluyendo volúmenes transportados, distancias promedio, configuraciones de transporte y características operativas de los principales tramos logísticos de la cadena cárnica.

Por su parte, el trabajo de (Souto G. T., 2018) permite contextualizar la estructura territorial de la cadena logística agroindustrial en Uruguay e identificar los principales corredores logísticos utilizados para el transporte de ganado y productos cárnicos.

A partir de estas fuentes se definieron los parámetros de actividad utilizados en el modelo de estimación de emisiones, incluyendo volúmenes transportados, distancias promedio de transporte, número de viajes y configuraciones logísticas representativas de cada tramo. Cuando fue necesario adaptar la información para su aplicación en el modelo, los parámetros se derivaron a partir de relaciones entre toneladas transportadas, capacidad típica de los vehículos y distancias logísticas representativas.

Las emisiones se estiman aplicando el modelo de cálculo descrito en la Sección 4, que incluye los consumos energéticos por tecnología, los factores de emisión del

ciclo energético y las ecuaciones utilizadas para el cálculo de emisiones Well-to-Wheel (WTW).

Las emisiones se reportan tanto en términos absolutos (t CO₂e/año) como mediante indicadores de intensidad logística, expresados como kg CO₂e por tonelada transportada y g CO₂e por tonelada-kilómetro.

ESCENARIOS TECNOLÓGICOS DE TRANSPORTE EVALUADOS

Para los tramos de transporte carretero se evaluaron distintos escenarios tecnológicos aplicados a camiones de carga pesada. En todos los casos se mantiene constante el nivel de actividad logística (volumen transportado, número de viajes y distancias), variando únicamente la tecnología energética utilizada.

Los escenarios considerados incluyen:

Escenario base

- Camión pesado diésel convencional.

Escenarios de mejora incremental

- Diésel con mejoras de eficiencia operativa (optimización logística, eco-driving y neumáticos de baja resistencia).
- Diésel con mezcla de biodiésel.
- Diésel con mezcla de biodiésel y mejoras de eficiencia.

Escenarios con combustibles alternativos

- Diésel renovable (HVO).
- Camiones alimentados con biometano.

Escenarios de electrificación

- Camiones eléctricos a batería (BEV).

Escenarios basados en hidrógeno

- Camiones con celda de combustible (FCEV).
- Camiones con motor de combustión interna a hidrógeno (H₂-ICE).

Las emisiones asociadas a cada escenario se estiman considerando tanto las emisiones directas del vehículo (Tank-to-Wheel, TTW) como las emisiones asociadas a la producción del combustible o energía (Well-to-Tank, WTT).

ESCENARIOS DE REFRIGERACIÓN EVALUADOS

En los tramos de transporte que utilizan vehículos refrigerados, el modelo incluye además las emisiones fugitivas asociadas al refrigerante utilizado en las unidades frigoríficas.

Para representar estas emisiones se consideraron tres configuraciones tecnológicas de refrigeración:

- **R404A** (escenario base utilizado actualmente en gran parte del transporte refrigerado).
- **R452A**, como sustituto de menor potencial de calentamiento global.
- **CO₂ (R744)** como refrigerante natural de muy bajo potencial de calentamiento global.

Las emisiones se estiman considerando la carga típica de refrigerante por unidad frigorífica y una tasa representativa de fugas durante la operación del sistema de refrigeración.

La incorporación de estos escenarios permite evaluar el efecto combinado de las tecnologías de transporte y de los sistemas de refrigeración en los tramos de la cadena logística que requieren mantenimiento de la cadena de frío.

TRAMO T1 – TRANSPORTE DE GANADO ENTRE ESTABLECIMIENTOS

Descripción del tramo

El tramo T1 corresponde al transporte de ganado bovino entre establecimientos ganaderos dentro de la fase primaria de la cadena logística cárnica en Uruguay. Este movimiento se asocia principalmente a los procesos de recría, reposición y traslado de animales entre predios durante las distintas etapas productivas (cría, recría e internada), previas al envío a faena o exportación en pie.

En términos logísticos, este flujo conecta predios ganaderos ubicados en distintas regiones del país y se realiza mediante transporte carretero especializado para animales vivos, utilizando camiones jaula configurados generalmente como tractocamión con semirremolque ganadero.

Dentro de la representación simplificada de la cadena logística utilizada en este estudio, este tramo se ubica completamente dentro de la fase primaria del sistema productivo y constituye uno de los principales flujos de transporte previos a las etapas industriales de la cadena.

Datos de actividad

- Cabezas movilizadas promedio: **4.021.159 animales/año**
- Peso promedio por animal: **314 kg**
- Toneladas transportadas: **1.262.644 t/año**
- Viajes promedio: **80.423 viajes/año**
- Carga promedio por viaje: **50 animales**
- Distancia promedio de transporte: **114 km**
- Retorno vacío del vehículo: **100 %**

TRAMO T2 – EXPORTACIÓN DE GANADO EN PIE

Descripción del tramo

El tramo T2 corresponde al transporte de ganado bovino destinado a exportación en pie. Este flujo conecta establecimientos ganaderos con centros de cuarentena y posteriormente con los puertos de salida del país desde donde se realizan los embarques internacionales de animales vivos.

En el modelo logístico utilizado en este estudio, el flujo promedio de exportación en pie se representa inicialmente mediante transporte carretero especializado para ganado vivo entre predios ganaderos y centros de cuarentena a puerto de Montevideo. Adicionalmente, para una fracción del flujo se analizan corredores logísticos multimodales específicos asociados a configuraciones de transporte hacia el Puerto de Montevideo.

En particular, se evalúan dos corredores logísticos representativos: el corredor Ruta 5, asociado a la cuarentena ubicada en Florida (Paraje Goñi), y el corredor Ruta 3, asociado a la cuarentena ubicada en Paysandú. En estos casos se comparan alternativas de transporte carretero directo con configuraciones multimodales que incorporan transporte ferroviario o fluvial, según corresponda.

Datos de actividad del flujo promedio

Los parámetros de actividad utilizados para representar el flujo promedio de exportación en pie son los siguientes:

- Cabezas movilizadas promedio: **241.916 animales/año**
- Peso promedio por animal: **291 kg**
- Toneladas transportadas: **70.398 t/año**
- Viajes promedio: **4.171 viajes/año**
- Carga promedio por viaje: **58 animales**
- Distancia promedio: **100 km**
- Retorno vacío del vehículo: **100 %**

Datos de actividad de corredores específicos

Además del flujo promedio de exportación en pie, el modelo analiza dos corredores logísticos específicos hacia el Puerto de Montevideo, asociados a las cuarentenas ubicadas en Florida (Paraje Goñi) y Paysandú. Estos corredores se utilizan como casos de estudio para evaluar configuraciones logísticas alternativas que combinan transporte carretero con transporte ferroviario o fluvial.

La distribución del flujo de exportación en pie entre corredores se estimó a partir del análisis de los flujos logísticos de la cadena cárnica en Uruguay presentados por (Souto G. T., 2018), elaborados a partir de información del Instituto Nacional de Carnes (INAC) y del Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca (MGAP).

A partir de dicho análisis, el flujo total de exportación en pie se distribuyó de manera simplificada entre tres grupos de corredores logísticos:

- Ruta 5: 50 % del flujo total
- Ruta 3: 30 % del flujo total
- Otros corredores nacionales: 20 %

Los corredores Ruta 5 y Ruta 3 se modelan explícitamente en el análisis debido a su relevancia logística y a la disponibilidad de alternativas multimodales potenciales.

Corredor Ruta 5

Este corredor representa el transporte asociado a la cuarentena ubicada en Florida (Paraje Goñi), vinculada al eje logístico de la Ruta Nacional 5.

Datos de actividad

- Cabezas movilizadas promedio: **12.095,8 animales/año**
- Peso promedio por animal: **291 kg**
- Toneladas transportadas: **3.519,9 t/año**
- Viajes promedio en camión: **241,9 viajes/año**
- Carga promedio por viaje: **50 animales/viaje**
- Distancia promedio carretera directa al puerto: **180 km**

Configuración multimodal carretera + ferrocarril

Para analizar una alternativa multimodal, el corredor se desagrega en dos tramos logísticos:

Tramo carretero corto

Este tramo corresponde al transporte de ganado desde la cuarentena de Paraje Goñi hasta la estación ferroviaria más cercana, donde se realiza la transferencia de carga al sistema ferroviario.

- Distancia promedio: 2 km
- Vehículo: camión pesado
- Retorno vacío del vehículo: 100 %

Tramo ferroviario

El transporte de larga distancia se realiza mediante tren hasta el Puerto de Montevideo.

- Distancia promedio ferroviaria: 150 km
- Toneladas transportadas: 3.519,9 t/año

El número de trenes se estimó a partir de una capacidad operativa representativa de trenes de carga, utilizada únicamente con fines de modelización logística. A partir de dicha capacidad se estiman aproximadamente:

- **24 trenes/año**

Este valor permite representar la escala operativa del flujo sin afectar el cálculo de emisiones, ya que las emisiones ferroviarias se estiman en función del indicador tonelada-kilómetro (t·km).

Corredor Ruta 3

Este corredor representa el transporte asociado a la cuarentena ubicada en Paysandú, vinculada al eje logístico de la Ruta Nacional 3.

Datos de actividad

- Cabezas movilizadas promedio: **7.257,5 animales/año**
- Peso promedio por animal: **291 kg**
- Toneladas transportadas: **2.111,9 t/año**
- Viajes promedio en camión: **125,1 viajes/año**
- Carga promedio por viaje: **58 animales/viaje**
- Distancia promedio carretera directa al puerto: **450 km**

Configuración multimodal carretera + transporte fluvial

Para este corredor se analiza una alternativa logística que combina transporte carretero y transporte fluvial a través del río Uruguay.

Tramo carretero corto

Este tramo corresponde al transporte de ganado desde la cuarentena ubicada en Paysandú hasta el Puerto de Paysandú, donde se realiza la transferencia de carga al transporte fluvial.

- Distancia promedio: 55–60 km
- Vehículo: camión pesado
- Retorno vacío del vehículo: 100 %

Tramo fluvial

Desde el Puerto de Paysandú, el transporte se realiza por vía fluvial hasta el Puerto de Montevideo.

- Distancia fluvial aproximada: 455,6 km
- Toneladas transportadas: 2.111,9 t/año

Las emisiones del transporte fluvial se estiman utilizando factores de emisión modales expresados en kg CO₂e/t·km, de acuerdo con los parámetros definidos en la Sección 4.

Consideraciones metodológicas

En los escenarios multimodales, las emisiones se estiman de forma independiente para cada tramo logístico (carretero, ferroviario o fluvial) y posteriormente se agregan para obtener el resultado total del corredor.

En el caso del transporte ferroviario y fluvial, las emisiones se calculan utilizando factores de emisión modales por tonelada-kilómetro. Por este motivo, el eventual retorno vacío de estos modos no se modela explícitamente, asumiéndose que dicho comportamiento operativo se encuentra implícitamente representado en la intensidad promedio del factor modal utilizado.

Escenarios tecnológicos evaluados

Para el tramo de exportación de ganado en pie se evaluaron distintos escenarios tecnológicos de transporte aplicados a los movimientos logísticos del sistema. Dado que el tramo incluye configuraciones logísticas de distinta escala, se distinguen dos tipos de aplicación de escenarios: tramos largos de transporte principal y tramos cortos de conexión logística.

Escenarios evaluados en tramos largos

En los tramos largos de transporte carretero —correspondientes al transporte principal entre establecimientos ganaderos, centros de cuarentena y el Puerto de Montevideo— se evaluaron los siguientes escenarios tecnológicos:

Escenario base

- Camión pesado diésel convencional.

Escenarios de mejora incremental

- Diésel con mejoras de eficiencia operativa.
- Diésel con mezcla de biodiésel.
- Diésel con mezcla de biodiésel y mejoras de eficiencia.

Escenarios con combustibles alternativos

- Diésel renovable (HVO).
- Camiones alimentados con biometano.

Escenarios de electrificación

- Camiones eléctricos a batería (BEV).

Escenarios basados en hidrógeno

- Camiones con celda de combustible (FCEV).
- Camiones con motor de combustión interna a hidrógeno (H₂-ICE).

Estos escenarios permiten evaluar el efecto de distintas alternativas de descarbonización sobre los flujos logísticos de larga distancia.

Escenarios evaluados en tramos cortos

En los tramos cortos de conexión logística, correspondientes a los movimientos entre centros de cuarentena y los nodos de transferencia modal, se evaluaron un conjunto reducido de escenarios tecnológicos, considerando que estos trayectos presentan distancias muy cortas y operaciones logísticas específicas.

Los tramos cortos considerados en el modelo corresponden a:

- Transporte entre la cuarentena de Paraje Goñi y la estación ferroviaria (corredor Ruta 5).
- Transporte entre la cuarentena de Paysandú y el puerto de Paysandú (corredor Ruta 3).

Para estos tramos se evaluaron los siguientes escenarios:

- Camión diésel convencional (escenario base)
- Diésel con mejoras de eficiencia operativa
- Camión eléctrico a batería (BEV)

La selección de estos escenarios responde a la naturaleza de los trayectos cortos, donde tecnologías como la electrificación pueden resultar particularmente adecuadas debido a las distancias limitadas y a la disponibilidad de infraestructura de carga en nodos logísticos.

TRAMO T2 – TRANSPORTE DE GANADO A FAENA

Descripción del tramo

El tramo T2 corresponde al transporte de ganado bovino desde los establecimientos ganaderos hacia las plantas industriales de faena. Este flujo conecta la fase primaria de producción ganadera con la etapa industrial de procesamiento dentro de la cadena logística cárnica.

El transporte se realiza principalmente mediante camiones jaula especializados para transporte de animales vivos, configurados como camiones pesados o tractocamiones con semirremolque ganadero. Los traslados se efectúan desde

predios ganaderos distribuidos en todo el territorio nacional hacia plantas frigoríficas habilitadas.

En el modelo logístico utilizado en este estudio, este tramo se representa como transporte carretero directo entre establecimientos ganaderos y plantas de faena, utilizando una distancia promedio nacional estimada a partir de registros de movimientos animales del Sistema Nacional de Información Ganadera (SNIG) del MGAP.

Sobre este mismo flujo logístico se evalúan distintos escenarios tecnológicos de transporte, manteniendo constantes los parámetros de actividad.

Datos de actividad del tramo

Los parámetros de actividad utilizados para representar el transporte de ganado a faena se presentan a continuación.

- **Cabezas movilizadas promedio:** 2.324.145 animales/año
- **Peso promedio por animal:** 492 kg
- **Toneladas transportadas:** 1.143.479 t/año

El número de viajes se estimó considerando una carga promedio de **33 animales por camión**, valor representativo para el transporte de ganado hacia plantas frigoríficas.

- **Viajes promedio:** 70.429 viajes/año

La distancia promedio recorrida entre establecimientos ganaderos y plantas de faena se estimó en:

- **Distancia promedio:** 185 km

Se asume que el camión retorna vacío una vez realizada la descarga de animales en la planta frigorífica.

- **Retorno vacío:** 100 %

Los parámetros de actividad se basan en el análisis logístico de la cadena cárnica desarrollado por (DI Pascua, 2026) a partir de información del SNIG y MGAP, así como en la caracterización del sistema productivo presentada por (Souto G. T., 2018).

TRAMO T6B – EXPORTACIÓN DE CARNE POR VÍA AÉREA

Descripción del tramo

El tramo T6b corresponde al transporte de carne bovina destinada a exportación mediante transporte aéreo. Este flujo conecta las plantas frigoríficas con el Aeropuerto Internacional de Carrasco, desde donde se realizan envíos internacionales de productos cárnicos hacia mercados que requieren tiempos de entrega reducidos.

Dentro de la cadena logística cárnica, este flujo representa un volumen menor en comparación con las exportaciones marítimas, pero resulta relevante para determinados productos de alto valor, particularmente cortes premium refrigerados.

El transporte interno hasta el aeropuerto se realiza mediante camiones refrigerados, representados en el modelo como camiones simples refrigerados, que trasladan la carne desde las plantas frigoríficas hasta la terminal de carga aérea manteniendo la cadena de frío durante todo el trayecto. (DI Pascua, 2026) (Rosselli, Carriquiry, Pérez, & Varela, 2022).

En el modelo logístico utilizado en este estudio, este tramo se representa mediante transporte carretero directo entre las plantas frigoríficas y el aeropuerto.

Datos de actividad del tramo

Los parámetros de actividad utilizados para representar este tramo son los siguientes:

- **Toneladas transportadas:** 2.421 t/año
- **Distancia promedio:** 108 km
- **Viajes promedio:** 1.047 viajes/año
- **Tipo de vehículo:** camión simple refrigerado
- **Retorno vacío:** 100 %

TRAMO T6 – EXPORTACIÓN DE CARNE POR PUERTO/CARRETERA

Descripción del tramo

El tramo T6 corresponde al transporte de carne bovina desde las plantas frigoríficas hacia los puntos de salida del país utilizados en la exportación. Este flujo

comprende principalmente el transporte de carne en contenedores refrigerados hacia el Puerto de Montevideo, pero también incluye una fracción de exportaciones realizadas por carretera hacia destinos regionales.

En consecuencia, el flujo promedio representado en el modelo no corresponde exclusivamente a exportación portuaria, sino a un promedio logístico ponderado de exportación puerto/carretera, construido a partir de información de comercio exterior y localización de frigoríficos. La distancia media del tramo refleja esta combinación de destinos logísticos y no una única ruta física.

El transporte interno se realiza mediante camiones pesados portacontenedor refrigerado, manteniendo la cadena de frío desde la salida del frigorífico hasta el punto de salida del país.

Adicionalmente, para una fracción del flujo total que va al puerto se analizan dos corredores logísticos específicos asociados a configuraciones más detalladas de transporte:

- Corredor Ruta 5 (Tacuarembó-Durazno), con alternativa carretera + ferrocarril.
- Corredor Ruta 3 (Paysandú-Salto), con alternativa carretera + fluvial, incluyendo el reposicionamiento de contenedores vacíos requerido para la prestación del servicio.

Datos de actividad del flujo promedio

Los parámetros de actividad utilizados para representar el flujo promedio de exportación puerto/carretera son los siguientes:

- **Toneladas movilizadas promedio:** 374.121 t/año
- **Viajes ida promedio:** 22.186 viajes/año
- **Distancia ida promedio:** 166 km
- **Retorno vacío:** 100 %

La distancia promedio utilizada corresponde a una distancia ponderada del conjunto del flujo exportador, e incluye tanto exportaciones realizadas mediante contenedores hacia el Puerto de Montevideo como una fracción de exportaciones realizadas por carretera. (DI Pascua, 2026)

Este flujo promedio se representa mediante transporte carretero directo con camión pesado refrigerado, y se utiliza como caso general para comparar los escenarios tecnológicos aplicados al transporte de exportación.

Corredores logísticos analizados

Además del flujo promedio, el modelo analiza dos corredores logísticos específicos asociados a configuraciones territoriales relevantes para la exportación de carne.

Corredor Ruta 3 – Paysandú–Salto

Este corredor representa el transporte de carne desde frigoríficos localizados en el litoral oeste, principalmente en el eje **Paysandú–Salto**, hacia el sistema exportador.

En el caso base, este flujo se modela como transporte carretero directo con los siguientes parámetros:

- **Toneladas movilizadas promedio:** 31.471 t/año
- **Viajes ida promedio:** 1.368 viajes/año
- **Distancia ida promedio:** 492 km
- **Retorno vacío:** 100 %

La alternativa multimodal para este corredor se desagrega en tres componentes:

a) Frigorífico a Puerto de Paysandú

Corresponde al transporte carretero inicial desde los frigoríficos de Paysandú y Salto hasta el Puerto de Paysandú, donde se realiza la transferencia al modo fluvial.

- **Toneladas movilizadas promedio:** 31.471 t/año
- **Viajes ida promedio:** 1.368 viajes/año
- **Distancia ida promedio:** 100 km
- **Capacidad de referencia:** 21 toneladas por contenedor
- **Retorno vacío:** 100 %

La distancia utilizada corresponde a una **distancia ponderada** entre frigoríficos de Paysandú y Salto y el Puerto de Paysandú.

b) Transporte fluvial Paysandú–Montevideo

Desde el Puerto de Paysandú, la carne continúa por vía fluvial hasta el Puerto de Montevideo.

- **Toneladas transportadas:** 31.471 t/año
- **Viajes ida promedio:** 11 viajes/año

- **Distancia fluvial:** 450 km
- **Capacidad de referencia:** 2.800 t por viaje (buque *Provincias Unidas*)

Las emisiones del tramo fluvial se estiman mediante factores modales expresados en kg CO₂e/t·km, por lo que no se modela explícitamente el retorno vacío.

c) Retorno de contenedores vacíos Montevideo–Paysandú/Salto

Dado que el servicio requiere el reposicionamiento de contenedores vacíos desde Montevideo hacia el origen para posibilitar la carga del producto, este movimiento se incorpora explícitamente en el análisis, en línea con el criterio adoptado bajo ISO 14083.

Los parámetros utilizados para este movimiento son:

- **Toneladas de referencia del flujo:** 31.471 t/año
- **Viajes ida promedio:** 1.368 viajes/año
- **Distancia ida promedio:** 492 km
- **Tipo de movimiento:** transporte de contenedor vacío
- **Retorno vacío adicional del camión:** no se incluye explícitamente, al no ser atribuible exclusivamente al servicio analizado

Este tramo se estima por separado y luego se agrega a la alternativa multimodal del corredor.

Corredor Ruta 5 – Tacuarembó–Durazno

Este corredor representa el transporte de carne desde frigoríficos ubicados en el eje Tacuarembó–Durazno, con destino al sistema exportador.

En el caso base, este flujo se modela como transporte carretero directo con los siguientes parámetros:

- **Toneladas movilizadas promedio:** 74.858 t/año
- **Viajes ida promedio:** 3.255 viajes/año
- **Distancia ida promedio:** 296,7 km
- **Retorno vacío:** 100 %

La alternativa multimodal para este corredor se desagrega en tres componentes:

a) Frigorífico a terminal ferroviaria

Corresponde al transporte carretero desde los frigoríficos hacia los puntos de transferencia ferroviaria.

- **Toneladas movilizadas promedio:** 74.858 t/año
- **Viajes ida promedio:** 3.255 viajes/año
- **Distancia ida promedio:** 91,3 km
- **Capacidad de referencia:** 21 toneladas por contenedor
- **Retorno vacío:** 100 %

La distancia utilizada corresponde a un promedio ponderado por toneladas entre:

- Durazno → Carlos Reyles = 38 km
- Tacuarembó → Paso de los Toros = 139 km

b) Transporte ferroviario a Montevideo

Desde la terminal ferroviaria, la carga continúa por tren hasta Montevideo.

- **Toneladas transportadas:** 74.858 t/año
- **Viajes ida promedio:** 45 viajes/año
- **Distancia ferroviaria promedio:** 253,2 km

La distancia ferroviaria corresponde a un promedio ponderado por toneladas entre:

- Carlos Reyles → Montevideo = 240 km
- Paso de los Toros → Montevideo = 265 km

Las emisiones del tramo ferroviario se estiman mediante factores modales expresados en kg CO₂e/t·km, por lo que no se modela explícitamente el retorno vacío.

c) Retorno de contenedores vacíos a frigorífico

Al igual que en el corredor Ruta 3, se incluye el reposicionamiento de contenedores vacíos desde Montevideo hacia el origen como parte del servicio logístico.

Los parámetros utilizados son:

- **Toneladas de referencia del flujo:** 74.858 t/año

- **Viajes ida promedio:** 3.255 viajes/año
- **Distancia ida promedio:** 296,7 km
- **Tipo de movimiento:** transporte de contenedor vacío
- **Retorno vacío adicional del camión:** no se modela explícitamente, al no ser atribuible exclusivamente al servicio analizado

La distancia corresponde a un promedio ponderado por toneladas entre:

- Durazno → Montevideo = 188 km
- Tacuarembó → Montevideo = 394 km

Consideraciones metodológicas

La estimación de emisiones para el tramo de exportación de carne se realiza aplicando el modelo de cálculo definido en la sección 4, el cual considera las emisiones del ciclo energético completo mediante el enfoque Well-to-Wheel (WTW). Este enfoque integra las emisiones directas del vehículo durante la operación (Tank-to-Wheel, TTW) y las emisiones asociadas a la producción y suministro de la energía utilizada (Well-to-Tank, WTT).

En el caso del flujo promedio de exportación puerto/carretera, el transporte se modela como un tramo carretero único, representado mediante una distancia promedio ponderada que refleja el conjunto de destinos de exportación. Este enfoque permite representar de forma simplificada el flujo exportador agregado sin reconstruir individualmente cada ruta logística.

Para los corredores logísticos específicos, el transporte se desagrega en los distintos tramos operativos que componen el servicio logístico (por ejemplo, transporte carretero inicial, transporte ferroviario o fluvial y eventuales movimientos de reposicionamiento). Las emisiones se estiman de manera independiente para cada tramo y posteriormente se agregan para obtener el resultado total del corredor.

En los tramos ferroviarios y fluviales, las emisiones se calculan utilizando factores de emisión modales expresados por tonelada-kilómetro (kg CO₂e/t·km). En estos casos, el retorno vacío no se modela explícitamente, asumiéndose que dicho comportamiento operativo se encuentra implícitamente representado en la intensidad promedio de los factores modales utilizados.

En el caso del transporte carretero de contenedores, se asume un retorno vacío del vehículo del 100 % una vez realizada la descarga de la carga en el puerto o punto

de salida. Cuando el servicio logístico requiere el reposicionamiento de contenedores vacíos para permitir la operación de exportación, este movimiento se modela explícitamente como un tramo adicional de transporte carretero. La inclusión de estos movimientos responde al criterio metodológico de considerar los desplazamientos necesarios para la prestación del servicio logístico, en línea con los principios establecidos en ISO 14083 para la cuantificación de emisiones del transporte de mercancías.

Finalmente, los distintos escenarios tecnológicos de transporte se aplican sobre los mismos niveles de actividad logística (toneladas transportadas, distancias y número de viajes). De esta manera, las diferencias observadas en las emisiones entre escenarios responden exclusivamente a los cambios en la tecnología energética utilizada, el consumo energético del vehículo y los factores de emisión asociados a cada vector energético.

TRANSPORTE INTERNO DE CARNE

Descripción general del tramo

El transporte interno de carne corresponde a los movimientos logísticos realizados dentro del mercado doméstico, desde las plantas frigoríficas hacia centros de distribución, cámaras de almacenamiento, comercios u otros destinos internos. Estos flujos se realizan mediante transporte carretero refrigerado y presentan configuraciones operativas diferenciadas según el volumen transportado, la distancia recorrida y el tipo de vehículo utilizado.

En el modelo logístico utilizado en este estudio, el transporte interno se representa mediante cuatro subtramos, correspondientes a las categorías vehiculares consideradas para la distribución doméstica (ver sección 4) (DI Pascua, 2026):

- Camión pesado (hasta 28 t)
- Camión mediano (5500-8000 kg)
- Camión simple (1500 -3000 kg)
- Utilitario (600 -1000 kg)

En todos los casos se asume mantenimiento de la cadena de frío durante el transporte.

Escenarios tecnológicos evaluados

Para los subtramos de transporte interno se aplican los escenarios tecnológicos de transporte definidos en la Sección 5.1. En los subtramos con vehículos pesados, medianos y simples se evaluaron:

- diésel convencional,
- diésel con mejoras de eficiencia,
- diésel con mezcla de biodiésel,
- diésel con mezcla de biodiésel y mejoras de eficiencia,
- HVO,
- biometano,
- BEV,
- FCEV,
- H₂-ICE.

En el caso de los **utilitarios**, el análisis se concentra en las tecnologías efectivamente representativas de este tipo de vehículo. Por tanto, se evaluaron:

- diésel convencional,
- diésel con mejoras de eficiencia,
- diésel con mezcla de biodiésel,
- diésel con mezcla de biodiésel y mejoras de eficiencia,
- HVO,
- biometano,
- BEV.

Los escenarios basados en hidrógeno no se consideran aplicables a utilitarios en este estudio.

Escenarios de refrigeración evaluados

Dado que el transporte interno se realiza mediante vehículos refrigerados, se incorporan también las emisiones fugitivas asociadas al refrigerante utilizado en la unidad frigorífica del vehículo.

Se evaluaron los siguientes escenarios de refrigeración:

- R404A (escenario base),
- R452A (sustituto de menor GWP),
- CO₂ - R744 (refrigerante natural).

Para la estimación de estas emisiones se utilizaron cargas de refrigerante diferenciadas según el tipo de vehículo:

- 8 kg para camión pesado,
- 5 kg para camión mediano,
- 5 kg para camión simple,
- 3 kg para utilitario.

En todos los casos se asumió una tasa anual de fuga del 15 %.

Subtramo interno - camión pesado

Descripción

Este subtramo representa los movimientos internos de carne realizados mediante camiones pesados refrigerados, utilizados para el traslado de mayores volúmenes entre plantas, cámaras y centros logísticos.

Datos de actividad

- **Toneladas movilizadas promedio:** 35.296 t/año
- **Viajes ida promedio:** 2.486 viajes/año
- **Distancia ida promedio:** 175,5 km
- **Retorno vacío:** 100 %

Consideraciones específicas

Este subtramo se modela utilizando parámetros representativos de camión pesado refrigerado (ver sección 4). Las emisiones de refrigeración se estiman con una carga de 8 kg de refrigerante por unidad.

Subtramo interno – camión mediano

Descripción

Este subtramo representa la distribución interna de carne realizada mediante camiones medianos refrigerados, utilizados en trayectos intermedios dentro de la red logística doméstica.

Datos de actividad

- **Toneladas movilizadas promedio:** 78.443 t/año
- **Viajes ida promedio:** 17.195 viajes/año
- **Distancia ida promedio:** 135 km
- **Retorno vacío:** 100 %

Consideraciones específicas

Para este subtramo se utilizaron consumos representativos de camión mediano y factores de emisión consistentes con las tecnologías evaluadas (ver sección 4). Las emisiones fugitivas de refrigeración se estiman considerando una carga de 5 kg de refrigerante por unidad frigorífica.

Subtramo interno – camión simple

Descripción

Este subtramo corresponde a la distribución interna de carne en camiones simples refrigerados, utilizados para cargas menores y trayectos de distribución de menor escala.

Datos de actividad

- **Toneladas movilizadas promedio:** 48.568 t/año
- **Viajes ida promedio:** 25.838 viajes/año
- **Distancia ida promedio:** 104,5 km
- **Retorno vacío:** 100 %

Consideraciones específicas

El subtramo se modela con parámetros propios de camión simple refrigerado (ver sección 4). Las emisiones asociadas a refrigeración se estiman con una carga de 5 kg de refrigerante por unidad.

Subtramo interno – utilitarios

Descripción

Este subtramo representa la distribución interna de menor escala realizada mediante vehículos utilitarios refrigerados, utilizados para entregas urbanas o movimientos con cargas reducidas.

Datos de actividad

- **Toneladas movilizadas promedio:** 10.427 t/año
- **Viajes ida promedio:** 24.021 viajes/año
- **Distancia ida promedio:** 100 km
- **Retorno vacío:** 100 %

Consideraciones específicas

El subtramo de utilitarios presenta la menor capacidad de carga y, por tanto, las mayores intensidades de emisión por tonelada transportada dentro del conjunto del transporte interno. Para este subtramo se evaluaron únicamente tecnologías representativas de vehículos livianos, excluyéndose las opciones basadas en hidrógeno. Las emisiones de refrigeración se estiman con una carga de 3 kg de refrigerante por unidad frigorífica.

Consideraciones metodológicas

Las emisiones de cada subtramo se estiman aplicando el modelo de cálculo definido en la Sección 4, bajo enfoque Well-to-Wheel (WTW). En todos los casos se considera retorno vacío del 100 % para el vehículo luego de la descarga.

Las diferencias entre subtramos responden principalmente a:

- la categoría vehicular utilizada,
- la capacidad de carga efectiva,
- la distancia recorrida,
- y la intensidad energética del transporte.

6. Evaluación de escenarios de refrigerantes

En los tramos de la cadena logística que requieren transporte refrigerado (carne para mercado interno, exportación e importación), las emisiones no solo provienen del consumo energético de los vehículos, sino también de las fugas de gases refrigerantes. El análisis compara el impacto del refrigerante estándar actual (R404A) frente a una alternativa de transición (R452A) y una solución de impacto casi nulo (CO₂ / R744). Dado que no se contaba con mayor información se realizó un análisis con fines comparativos con datos estandarizados por ello no se suma al total de los tramos y se presentan por separado.

TRAMO T6B: EXPORTACIÓN POR AEROPUERTO

Este tramo utiliza vehículos de menor porte, lo que incrementa la intensidad de emisiones por tonelada transportada.

Tabla 5. Emisiones fugitivas por escenario de refrigerante – Tramo T6b

Refrigerante	Emisiones anuales (t CO ₂ e)	kg CO ₂ e/t	g CO ₂ e/t-km
R404A	2,96	1,22	11,31
R452A	1,61	0,66	6,14
CO ₂ (R744)	0,00075	0,0003	0,0029

Los resultados indican que la sustitución de R404A por R452A reduce las emisiones fugitivas en un 45 %, mientras que la transición a sistemas basados en CO₂ (R744) elimina prácticamente este impacto ambiental.

TRAMO T6: EXPORTACIÓN A PUERTO (CARRETERA Y MULTIMODAL)

Tabla 6. Emisiones fugitivas por escenario de refrigerante – Tramo T6

Refrigerante	Emisiones (kg CO ₂ e/año)	kg CO ₂ e/t	g CO ₂ e/t-km
R404A	4.731,6	0,01	0,08
R452A	2.569,2	0,01	0,04
CO ₂ (R744)	1,2	≈0	0,00002

Dada la escala masiva de este flujo (374.000 t/año), el indicador por tonelada es bajo, pero el volumen total de emisiones es relevante. Se observa la misma tendencia que en tramo anterior.

TRAMO DE IMPORTACIÓN DE CARNE

Presenta un perfil de emisiones por unidad transportada similar al tramo de exportación, debido al uso de equipos de frío de alta capacidad.

Tabla 7. Emisiones fugitivas por escenario de refrigerante – Tramo Importación de Carne

Refrigerante	Emisiones (kg CO ₂ e/año)	kg CO ₂ e/t	g CO ₂ e/t·km
R404A	4.731,6	0,14	0,40
R452A	2.569,2	0,07	0,22
CO ₂ (R744)	1,2	0,00003	0,00010

DISTRIBUCIÓN INTERNA: UTILITARIOS, CAMIÓN SIMPLE Y MEDIANO

Los vehículos de distribución capilar (utilitarios) muestran la mayor intensidad relativa por tonelada debido a su reducida capacidad de carga.

Tabla 8. Emisiones fugitivas por escenario de refrigerante – Tramo Interno

Modo de Transporte	R404A (Base)	R452A (Transición)	R744 (CO ₂)
Utilitarios	1,70	0,92	0,00043
Camión Simple	0,28	0,15	0,00007
Camión Mediano	0,28	0,15	0,00007
Camión Grande	0,76	0,41	0,00019

CONCLUSIONES PARA MITIGACIÓN

1. **Impacto del R404A:** Este gas representa una carga ambiental significativa debido a su alto GWP (3.943 según IPCC AR5). En tramos de baja escala como los utilitarios, su impacto en la intensidad total es más visible.
2. **Mitigación Inmediata:** La adopción de **R452A** permite una reducción directa del **45 %** de las emisiones por fugas sin requerir cambios estructurales mayores en los equipos de refrigeración actuales.

3. **Meta de Descarbonización Profunda:** El uso de **CO₂ (R744)** como refrigerante natural reduce el impacto de las fugas a niveles técnicamente despreciables (**reducción >99.9 %**), alineándose con las mejores prácticas internacionales y los objetivos de sostenibilidad del LATU para la cadena cárnica.

7. Resultados

En esta sección se presentan todas las tablas de resultados para los flujos logísticos analizados, incorporando el desglose tecnológico completo para cada segmento. El escenario Diésel (baseline) actúa como referencia técnica para calcular el potencial de mitigación.

TRAMO T1 – MOVIMIENTOS ENTRE ESTABLECIMIENTOS

Representa los traslados de animales en etapas de cría, recria y reposición en el sector primario.

Tabla 9. Resultados Tramo 1- Transporte entre establecimientos

Tecnología	Emisiones Totales (t CO2e/año)	kg CO2e/t	g CO2e/t-km	% Var. vs Baseline
Diésel (baseline)	21.379	17	149	-
Diésel + eficiencia	18.172	14	126	-15,0%
Diésel B7	20.420	16	142	-4,5%
Diésel B7 + eficiencia	17.357	14	121	-18,8%
HVO	3.850	3,0	26,8	-82,0%
Biometano	3.715	3,0	26	-82,6%
BEV (SIN 2022-2024)	1.090	0,86	7,57	-94,9%
FCEV (SIN 2022-2024)	3.520	2,79	24,44	-83,5%
H ₂ -ICE (SIN 2022-2024)	4.690	3,72	32,59	-78,1%
BEV (SIN 2024)	160	0,13	1,11	-99,3%
FCEV (SIN 2024)	515	0,41	3,58	-97,6%
H ₂ -ICE (SIN 2024)	687	0,54	4,77	-96,8%

El análisis del tramo T1 pone de manifiesto la complejidad de descarbonizar el sector primario uruguayo debido a la dispersión geográfica y el uso intensivo de rutas secundarias. La intensidad base de 149 g por tonelada-kilómetro refleja una operativa de recolección atomizada donde los vehículos suelen operar lejos de los centros de recarga eléctrica pesada. Se observa que mientras las mejoras

operativas de eficiencia aportan una mejora incremental del 15%, los combustibles renovables *drop-in* como el HVO permiten reducciones masivas inmediatas sin alterar la logística rural actual. La transición hacia el escenario eléctrico de 2024 representa el límite teórico de mitigación, logrando una huella operativa despreciable, aunque su factibilidad técnica en este tramo depende del despliegue extensivo de infraestructura de carga pesada en departamentos ganaderos de baja densidad.

Gráfico 1. Intensidad de emisiones tramo 1.

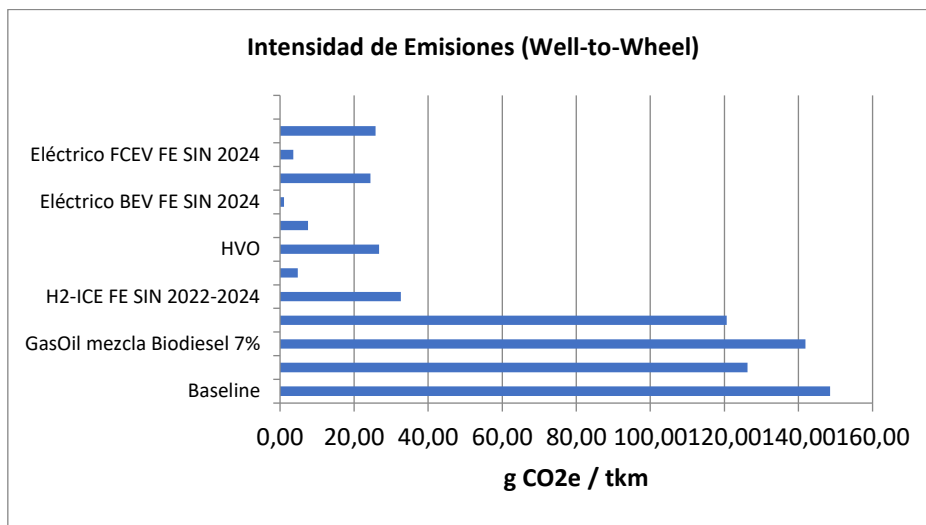
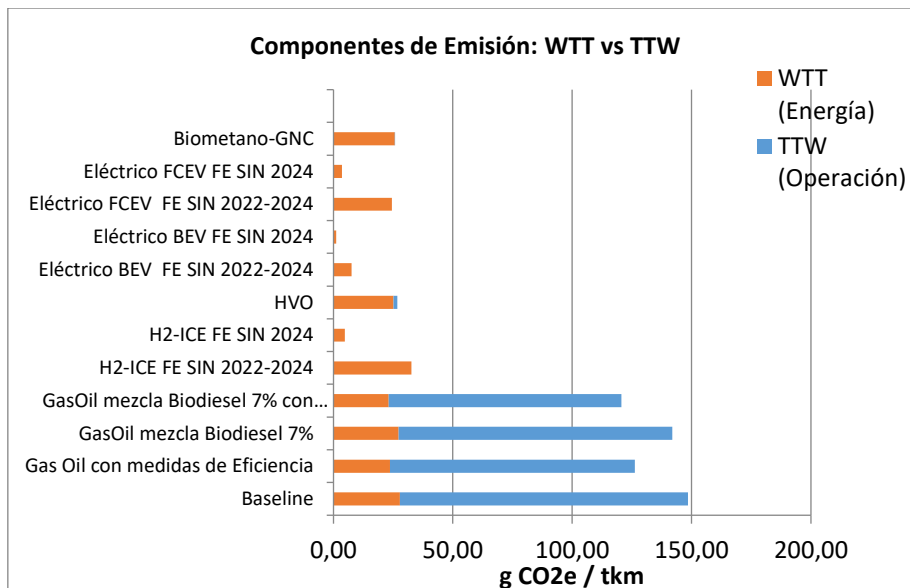


Gráfico 2. Componentes de emisión tramo 1



En relación con la comparación entre combustibles fósiles y las alternativas eléctricas, H₂ y HVO, es importante señalar que los valores totales de los

combustibles fósiles resultan superiores debido a que incluyen las emisiones correspondientes a la etapa Tank-to-Wheel (TTW). Esta etapa representa las emisiones directas durante la operación del vehículo y constituye una proporción relevante del total. Por el contrario, las tecnologías eléctricas, de hidrógeno y HVO no presentan emisiones TTW en el punto de uso, por lo que sus totales reflejan únicamente las etapas previas del ciclo.

TRAMO T2 – TRANSPORTE DE GANADO A FAENA

Presenta el mayor flujo (aproximadamente 41% de la huella total).

Tabla 10. Resultados Tramo 2- Transporte de ganado a faena

Tecnología	Emisiones Totales (t CO2e/año)	kg CO2e/t	gCO2e/t-km	% Var. vs Baseline
Diésel (baseline)	30.382	27	144	-
Diésel + eficiencia	25.825	23	122	-15,0%
Diésel B7	29.020	25	137	-4,5%
Diésel B7 + eficiencia	24.667	22	117	-18,8%
HVO	5.472	4,8	25,9	-82,0%
Biometano	5.280	5,0	25	-82,6%
BEV (SIN 2022-2024)	1.550	1,35	7,32	-94,9%
FCEV (SIN 2022-2024)	5.000	4,37	23,64	-83,5%
H ₂ -ICE (SIN 2022-2024)	6.670	5,83	31,52	-78,1%
BEV (SIN 2024)	227	0,20	1,07	-99,3%
FCEV (SIN 2024)	732	0,64	3,46	-97,6%
H ₂ -ICE (SIN 2024)	976	0,85	4,61	-96,8%

Este tramo constituye el mayor emisor absoluto de la cadena logística. La discusión de resultados subraya que la baja densidad de carga inherente al animal vivo penaliza drásticamente la eficiencia energética por tonelada transportada frente a la carne procesada.

El impacto del retorno vacío del 100%, motivado por razones sanitarias y de especialización extrema del equipo jaula, duplica efectivamente la huella operativa por unidad de carga útil. Se observa que la brecha entre el BEV y las soluciones de hidrógeno verde favorece la electrificación directa por su mayor eficiencia térmica, logrando intensidades de apenas 1,07 g por tonelada-kilómetro con FE de SIN 2024, consolidándose como el objetivo prioritario para la descarbonización masiva de la cadena nacional. A corto plazo implementación de medidas de eficiencia energética

pueden incidir en una reducción de 15 % o más (dependiendo de las medidas adoptadas) sin necesidad de transformación tecnológica.

Gráfico 3. Intensidad de emisiones transporte a faena.

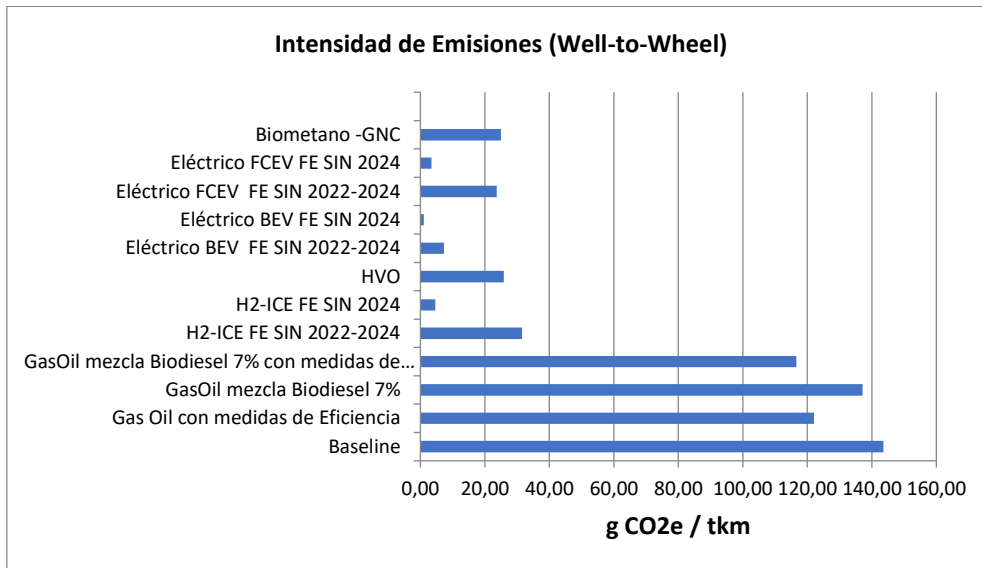
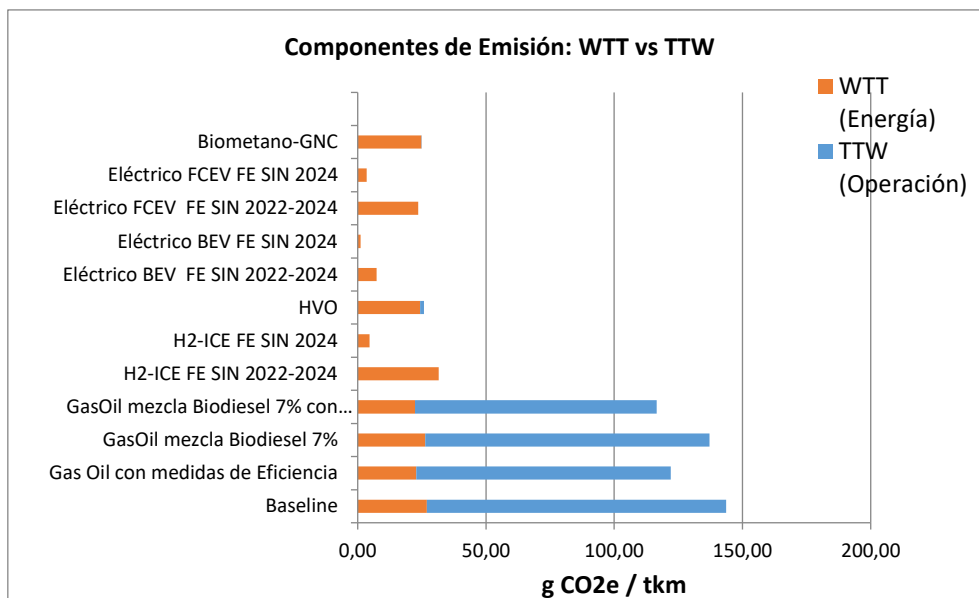


Gráfico 4. Componentes de emisión transporte a faena.



TRAMO T2E - EXPORTACIÓN DE GANADO EN PIE (FLUJO GENERAL)

Representa el flujo promedio de animales destinados a la exportación en pie antes de su salida del país.

Tabla 11. Resultados Tramo 2e exportación de ganado en pie (flujo general)

Tecnología	Emisiones Totales (t CO2e/año)	kg CO2e/t	g CO2e/t-km	% Var. vs Baseline
Diésel (baseline)	973	14	138	-
Diésel + eficiencia	827	12	117	-15,0%
Diésel B7	929	13	132	-4,5%
Diésel B7 + eficiencia	790	11	112	-18,8%
HVO	175	2,5	24,9	-82,0%
Biometano	169	2	24	-82,6%
BEV (SIN 2022-2024)	49,6	0,70	7,04	-94,9%
FCEV (SIN 2022-2024)	160	2,27	22,74	-83,6%
H ₂ -ICE (SIN 2022-2024)	213	3,03	30,32	-78,1%
BEV (SIN 2024)	7,26	0,10	1,03	-99,3%
FCEV (SIN 2024)	23,4	0,33	3,33	-97,6%
H ₂ -ICE (SIN 2024)	31,2	0,44	4,44	-96,8%

Los resultados para el flujo general de exportación de ganado en pie muestran una intensidad de emisiones base similar al transporte hacia faena, caracterizada por la baja densidad de carga útil del animal vivo. El análisis indica que la sensibilidad al tipo de combustible es muy elevada en este tramo, donde la transición hacia energías renovables como el HVO permite capturar ahorros significativos de forma inmediata (>80%).

Gráfico 5. Intensidad de emisiones tramo 2 transporte de ganado en pie para exportación.

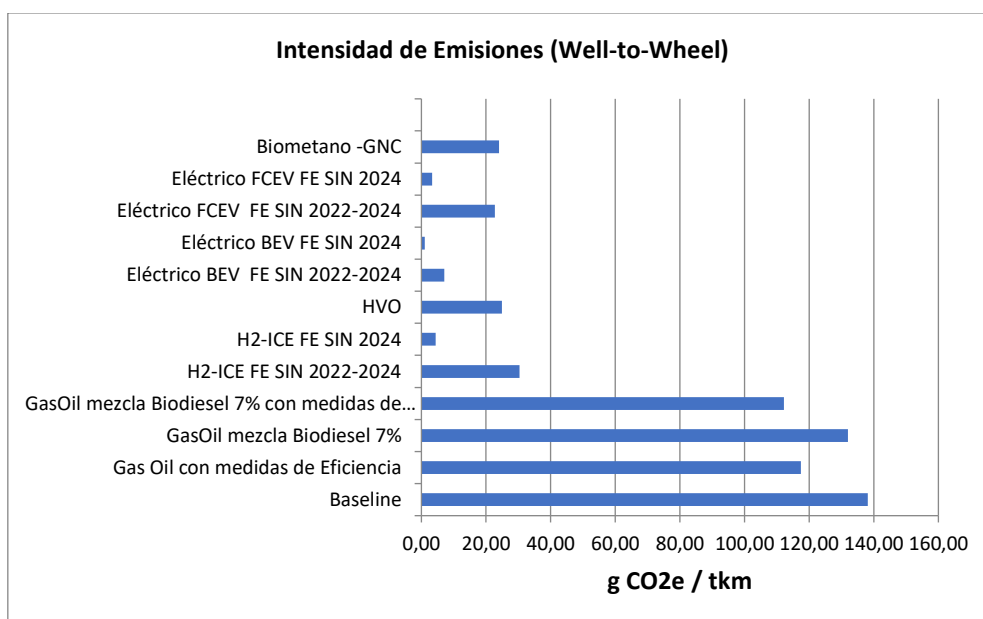
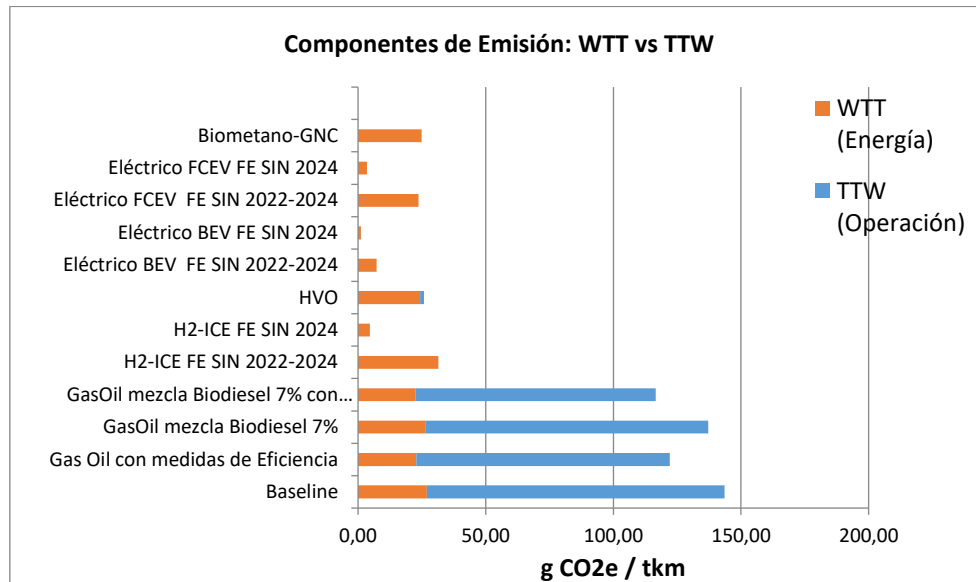


Gráfico 6. Componentes de emisión tramo 2 transporte de ganado en pie para exportación.



Las medidas eficiencia energética podrían reducir un 15 % el indicador de emisiones manteniendo la tecnología actual. Esto se puede incrementar implementando mezcla de gasoil-biodiesel (modelado al 7 %).

La adopción de la tecnología BEV bajo el mix eléctrico de 2024 permitiría descarbonizar este flujo de divisas casi en su totalidad, garantizando que el transporte doméstico del ganado exportado tenga una huella de carbono residual despreciable en el mercado internacional (99% de reducción).

EXPORTACIÓN GANADO EN PIE – CORREDORES ESTRATÉGICOS

Corredor Ruta 3 (G. Pie Litoral - Multimodal)

Tabla 12. Resultados Exportación ganado en pie-corredor ruta 3

Configuración / Tecnología (Segmento Carretero)	Emisiones Totales (t CO2 e/año)	% Var. vs Carretera Directa
Carretera Directa Diésel (Baseline)	131,00	-
Multimodal Camión Diésel + Barcaza	33,91	-74,1%
Multimodal Camión B7 + Barcaza	30,61	-76,6%
Multimodal Camión BEV + Barcaza	16,53	-87,4%

El análisis del corredor Ruta 3 para el transporte de ganado en pie evidencia el impacto significativo que puede tener el cambio modal en la reducción de emisiones del sistema logístico. Los resultados muestran que la incorporación de transporte fluvial en el corredor permite reducir la huella de carbono total en más de un 74 % respecto al escenario de transporte carretero directo, incluso manteniendo el uso de combustibles fósiles en el tramo carretero corto que conecta la infraestructura de cuarentena con el puerto. Este resultado se explica principalmente por la mayor eficiencia energética del transporte fluvial para el movimiento de grandes volúmenes de carga, debido a su menor resistencia al movimiento y a la mayor capacidad de carga por unidad de combustible consumido.

Cuando el tramo carretero corto se electrifica mediante el uso de camiones eléctricos a batería, la reducción total de emisiones del corredor alcanza aproximadamente un 87 %, eliminando prácticamente las emisiones operativas en el nodo portuario de Paysandú y reduciendo de forma sustancial la huella asociada al transporte terrestre. En el contexto energético de Uruguay, caracterizado por una matriz eléctrica con alta participación de energías renovables, esta combinación tecnológica ofrece un potencial significativo de mitigación.

Gráfico 7. Intensidad de emisiones Exportación ganado en pie-corredor ruta 3.

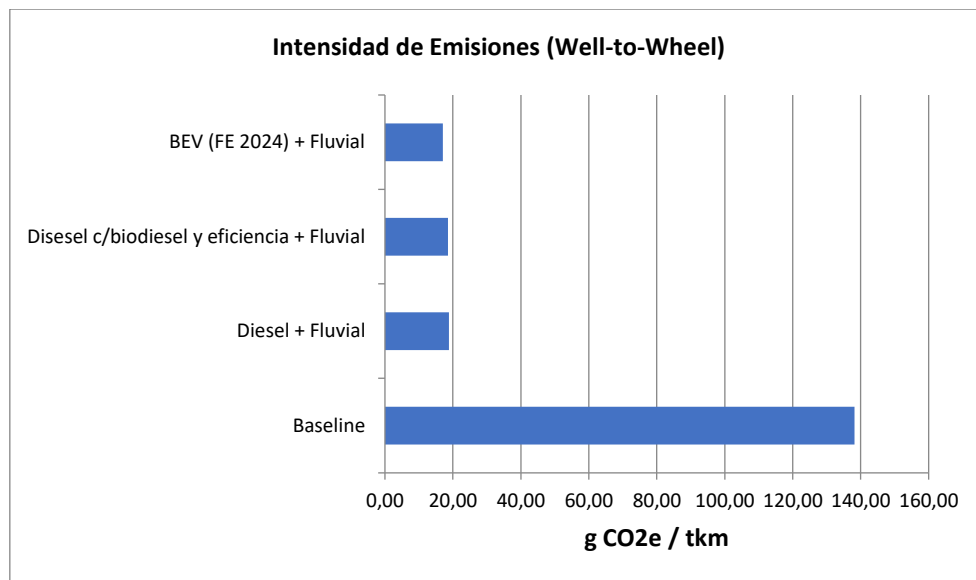
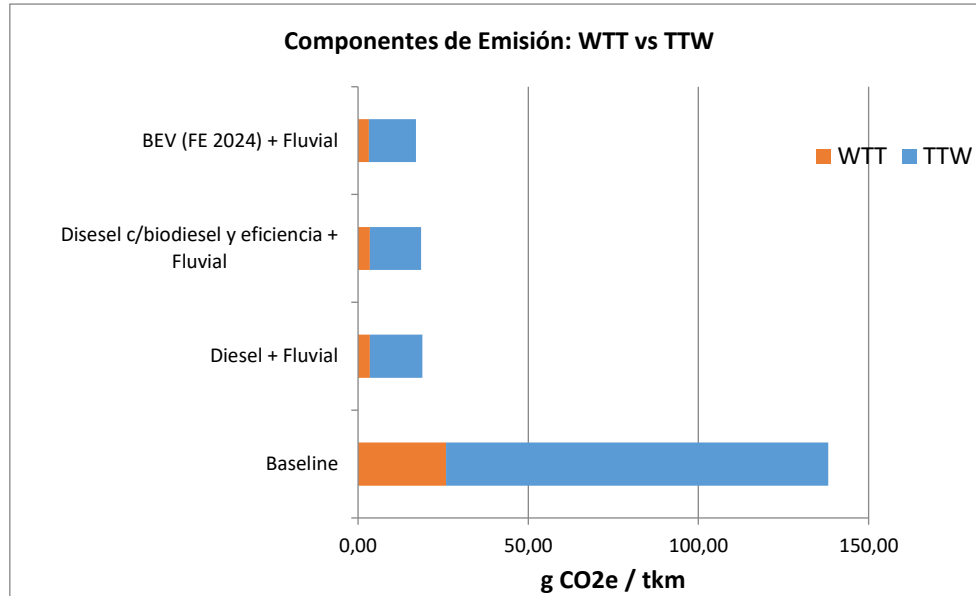


Gráfico 8. Componentes de emisión Exportación ganado en pie-corredor ruta 3.



Corredor Ruta 5 (G. Pie Centro - Multimodal)

Tabla 13. Resultados Exportación ganado en pie-corredor ruta 5

Configuración / Tecnología (Segmento Carretero)	Emisiones Totales (t CO2e/año)	% Var. vs Carretera Directa
Carretera Directa Diésel (Baseline)	88,00	-
Multimodal Camión Diésel + Tren	19,29	-78,1%
Multimodal Camión B7 + Tren	19,11	-78,3%
Multimodal Camión BEV + Tren	18,33	-79,2%

En el corredor central Ruta 5, el modo ferroviario domina el desempeño ambiental sistémico. Se observa que la reducción lograda por el tren es tan significativa que la tecnología del camión de enlace para el tramo de 2 km tiene un peso marginal en el balance total del corredor, independientemente de la tecnología. La discusión técnica subraya que el ferrocarril actúa como un agente de descarbonización masiva, permitiendo mover carga viva con una eficiencia energética que supera ampliamente las capacidades de optimización de la flota carretera convencional.

Gráfico 9. Intensidad de emisiones Exportación ganado en pie-corredor ruta 5.

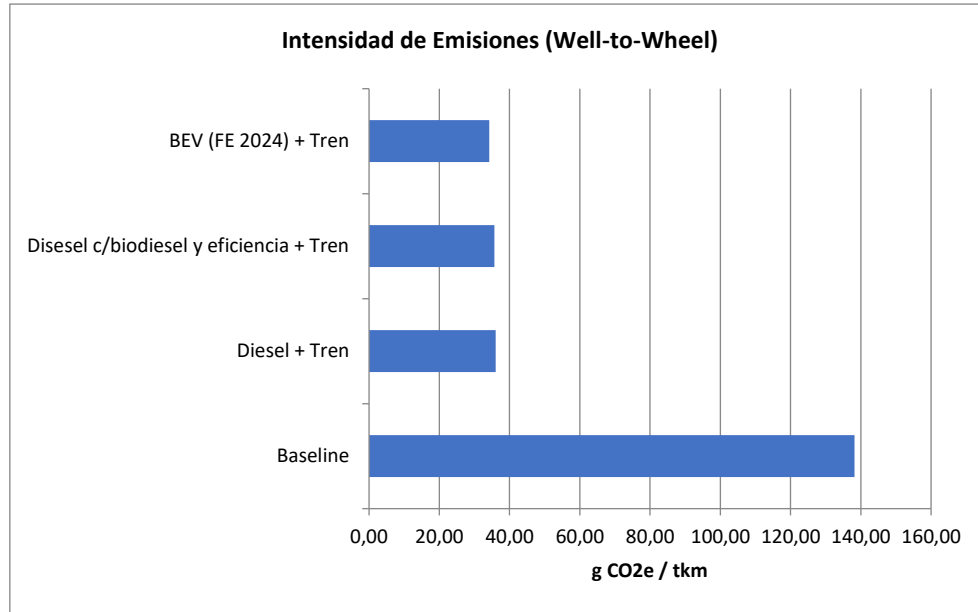
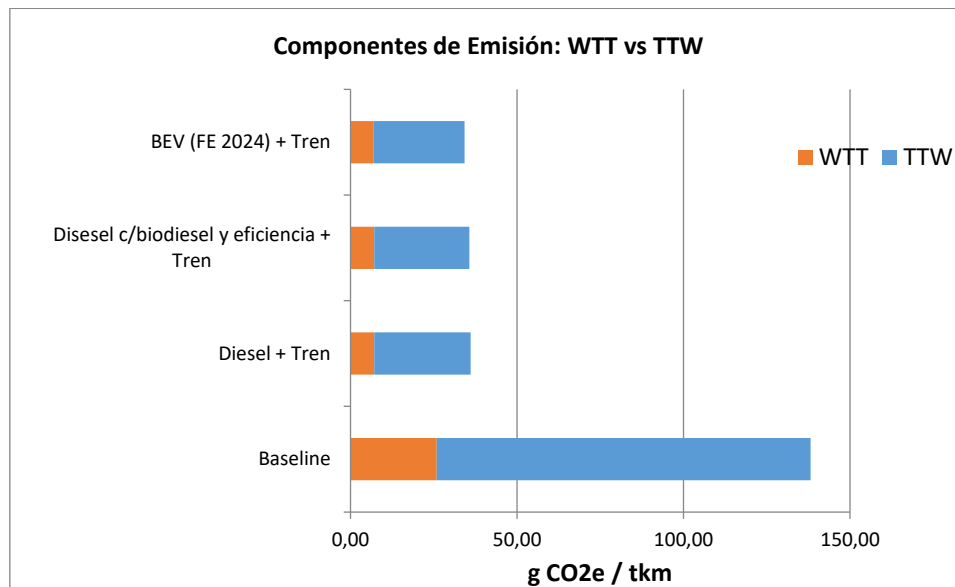


Gráfico 10. Componentes de emisión Exportación ganado en pie-corredor ruta 5.



No obstante, la implementación de estas configuraciones multimodal presenta diversas limitaciones operativas y económicas. En particular, el tramo carretero corto entre los centros de cuarentena y el puerto puede presentar costos de flete relativamente elevados por tonelada transportada, debido a que se trata de recorridos de muy corta distancia donde los costos fijos de movilización del vehículo (tiempo de carga, espera, maniobras y retorno) tienen un peso significativo en el costo total del servicio. En este tipo de operaciones, el costo por

tonelada transportada puede resultar proporcionalmente mayor que en trayectos de media o larga distancia.

Adicionalmente, la adopción de esquemas multimodales implica la necesidad de coordinación entre los distintos operadores logísticos, infraestructura portuaria/férrea adecuada, equipamiento de carga y descarga y planificación de las frecuencias de transporte fluvial. Estos factores pueden introducir costos adicionales y complejidades operativas en comparación con el transporte carretero directo.

Por lo tanto, si bien los resultados muestran un potencial significativo de reducción de emisiones mediante la integración de transporte fluvial, férreo y electrificación del enlace terrestre, la viabilidad de estas configuraciones dependerá no solo de su desempeño ambiental, sino también de su competitividad económica y de la capacidad de adaptación de la infraestructura y la organización logística de los corredores.

TRAMO T6 - EXPORTACIÓN DE CARNE (FLUJO PROMEDIO PUERTO/CARRETERA)

Flujo principal de carne procesada y refrigerada empaquetada.

Tabla 14. Resultados tramo 6 Exportación de Carne por Puerto /Carretera

Tecnología	Emisiones Totales tCO ₂ e/año	kg CO ₂ e/t	g CO ₂ e/t·km	% Var. vs Baseline
Diésel (baseline)	8.588	23	138	-
Diésel + eficiencia	7.300	20	118	-15,0%
Diésel B7	8.203	22	132	-4,5%
Diésel B7 + eficiencia	6.972	19	112	-18,8%
HVO	1.547	4,1	24,9	-82,0%
Biometano	1.492	4,0	24	-82,6%
BEV (SIN 2022-2024)	438	1,17	7,05	-94,9%
FCEV (SIN 2022-2024)	1.413	3,78	22,76	-83,5%
H ₂ -ICE (SIN 2022-2024)	1.880	5,04	30,34	-78,1%
BEV (SIN 2024)	64	0,17	1,03	-99,3%
FCEV (SIN 2024)	207	0,55	3,33	-97,6%
H ₂ -ICE (SIN 2024)	276	0,74	4,44	-96,8%

La exportación de carne permite una densidad de carga muy superior al animal vivo, optimizando el uso de la capacidad útil de los camiones pesados portacontenedores. Los resultados confirman que, para este flujo industrial, la

transición hacia el HVO y la posterior electrificación basada en el mix eléctrico nacional logran intensidades de apenas 1,03 g/tkm. Este nivel de descarbonización profunda transforma la logística nacional en un valor agregado estratégico de sostenibilidad para el producto final en mercados globales.

Gráfico 11. Intensidad de emisiones Exportación de Carne por Puerto /Carretera.

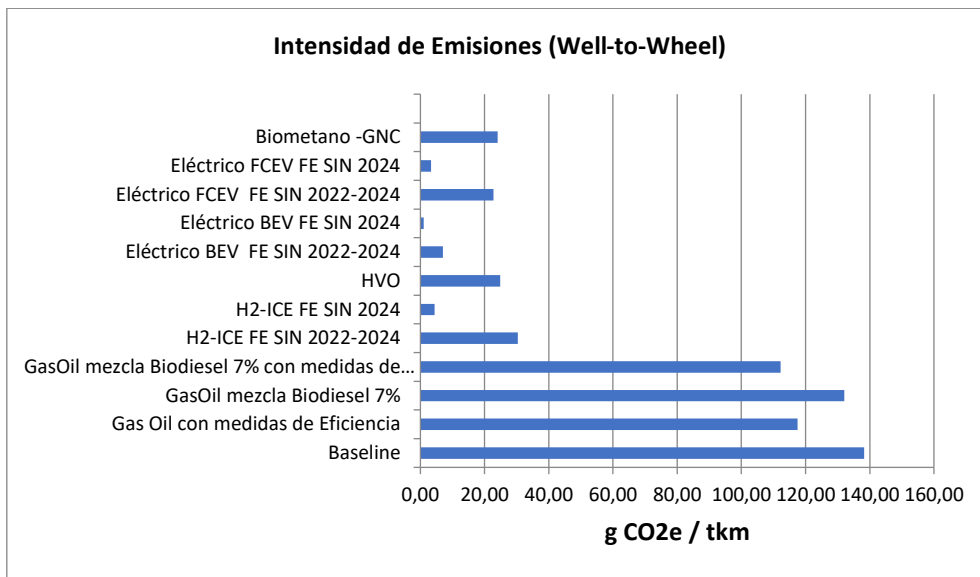
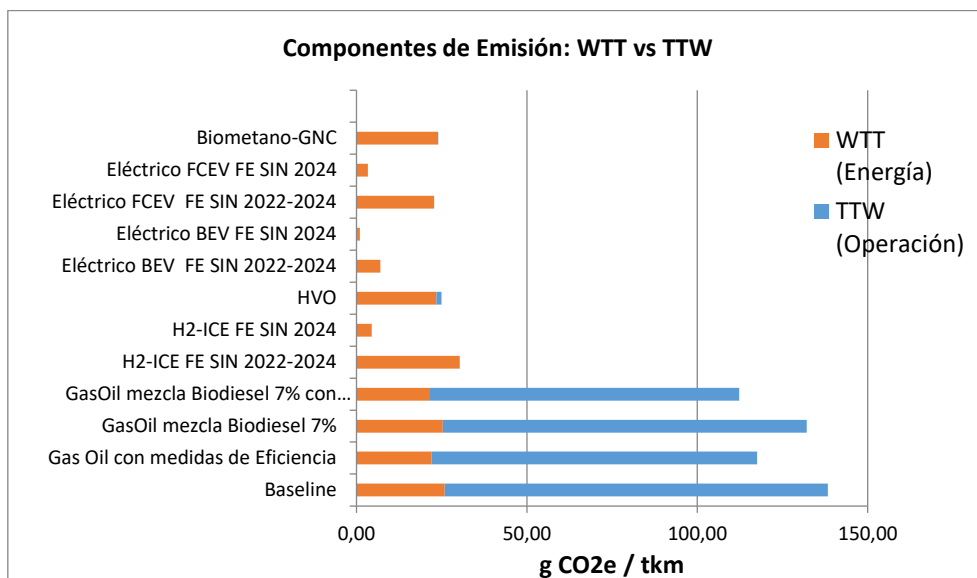


Gráfico 12. Componente de emisión Exportación de Carne por Puerto /Carretera.



Al igual que en tramos anteriores en plazos cortos se puede lograr descarbonizaciones graduales con tecnología actual en base a medidas de eficiencia energética y uso de biocombustibles.

SEGMENTOS DEL CORREDOR CARNE RUTA 3 (PAYSANDÚ-SALTO FLUVIAL)

Ruta 3 Carne – Traslado Frigorífico a Puerto Paysandú

Tabla 15. Resultados tramo 6 Exportación de Carne corredor ruta 3-carretero

Tecnología	Emisiones Totales (t CO ₂ e/año)	% Var. vs Baseline
Diésel (baseline)	319,07	-
BEV (SIN 2024)	2,38	-99,3%

Ruta 3 Carne – Tramo Fluvial (Paysandú a Montevideo)

Tabla 16. Resultados tramo 6 Exportación de Carne corredor ruta 3-fluvial

Modo	Emisiones Totales (t CO ₂ e/año)	g CO ₂ e/t-km
Fluvial/Cabotaje	638,42	45,1

Ruta 3 Carne – Retorno de Contenedores Vacíos (Montevideo a Origen)

Tabla 17. Resultados tramo 6 Exportación de Carne corredor ruta 3-retorno de contenedor

Tecnología	Emisiones Totales (t CO ₂ e/año)	% Var. vs Baseline
Diésel (baseline)	672,77	-
BEV (SIN 2024)	4,85	-99,3%

El análisis del corredor fluvial de exportación de carne sobre la Ruta 3 muestra que la distribución de emisiones del sistema logístico depende no solo del transporte de la carga útil, sino también de los movimientos auxiliares necesarios para sostener la operación, particularmente el reposicionamiento de contenedores.

En el tramo carretero corto entre los frigoríficos y el puerto de Paysandú, las emisiones son relativamente bajas debido a la corta distancia recorrida. No obstante, la comparación tecnológica evidencia diferencias significativas: el escenario diésel genera 319,07 t CO₂e/año, mientras que la electrificación mediante vehículos BEV reduce las emisiones a 2,38 t CO₂e/año, lo que representa una reducción cercana al 99,3 %. Este resultado se explica por la eliminación de las emisiones directas de combustión y por la baja intensidad de carbono del sistema eléctrico nacional.

Gráfico 13. Intensidad de emisiones Exportación de Carne corredor ruta 3.

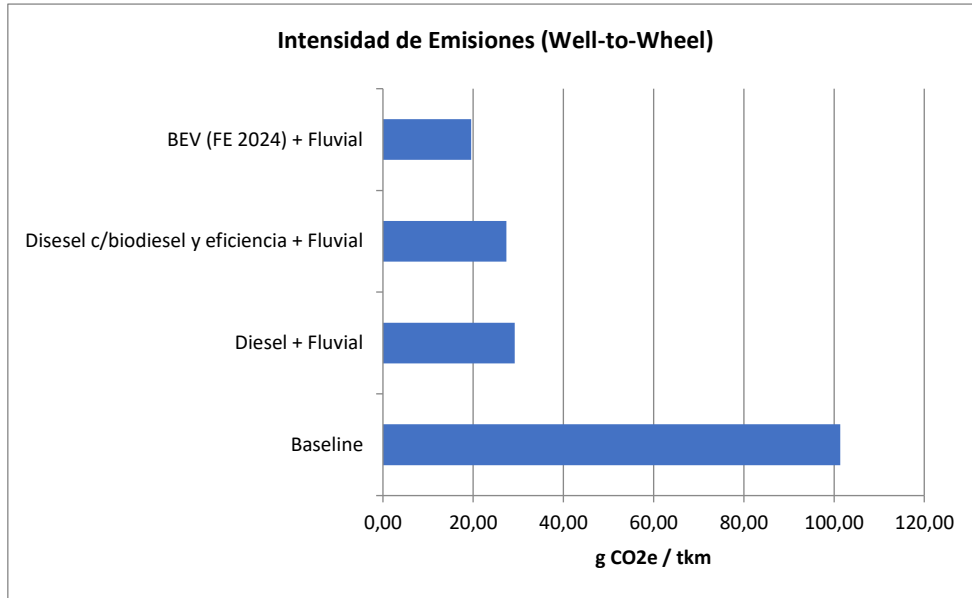
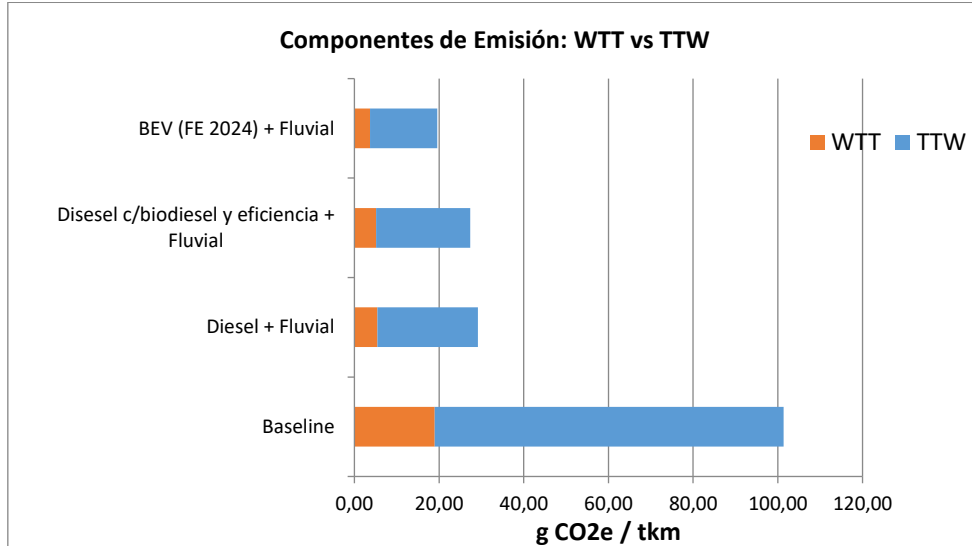


Gráfico 14. Intensidad de emisiones Exportación de Carne corredor ruta 3.



El transporte fluvial entre Paysandú y Montevideo constituye el tramo principal del corredor en términos de distancia. Si bien registra 638,42 t CO₂e/año, su intensidad de 45,1 g CO₂e/t-km refleja una mayor eficiencia energética respecto al transporte carretero para grandes volúmenes de carga, lo que confirma el potencial de la multimodalidad para reducir emisiones en corredores logísticos de exportación.

Uno de los resultados más relevantes es el impacto del retorno de contenedores vacíos. Este tramo genera 672,77 t CO₂e/año en el escenario diésel, superando

incluso las emisiones del transporte fluvial de la carga útil. Este comportamiento responde a la necesidad logística de reposicionar equipamiento vacío para sostener el flujo de exportaciones. La electrificación de este tramo reduce las emisiones a 4,85 t CO₂e/año (-99,3 %), mostrando que la electrificación del transporte terrestre puede evitar que el transporte en vacío erosione los beneficios ambientales de la multimodalidad.

En conjunto, los resultados muestran que la eficiencia climática del corredor depende no solo del modo principal de transporte, sino también de la gestión de los flujos logísticos asociados, particularmente del manejo del retorno de contenedores y de la electrificación de los tramos carreteros cortos.

SEGMENTOS DEL CORREDOR CARNE RUTA 5 (TACUAREMBÓ-DURAZNO FERROVIARIO)

Ruta 5 Carne – Traslado Frigorífico a Terminal Ferroviaria

Tabla 18. Resultados tramo 6 Exportación de Carne corredor ruta 5-carretero

Tecnología	Emisiones Totales (t CO ₂ e/año)	% Var. vs Baseline
Diésel (baseline)	692,91	-
BEV (SIN 2024)	5,17	-99,3%

Ruta 5 Carne – Tramo Ferroviario (Goñi a Montevideo)

Tabla 20. Resultados tramo 6 Exportación de Carne corredor ruta 5-férreo

Modo	Emisiones Totales (t CO ₂ e/año)	g CO ₂ e/t-km
Tren (Ferrocarril Central)	657,71	34,7

Ruta 5 Carne – Retorno de Contenedores Vacíos (Montevideo a Origen)

Tabla 21. Resultados tramo 6 Exportación de Carne corredor ruta 5-retorno de contenedores

Tecnología	Emisiones Totales (t CO ₂ e/año)	% Var. vs Baseline
Diésel (baseline)	965,05	-
BEV (SIN 2024)	6,95	-99,3%

La rehabilitación del transporte ferroviario permite movilizar grandes volúmenes de carga con una intensidad de emisiones significativamente menor que el transporte carretero. Los resultados muestran que el balance total de emisiones del corredor depende en gran medida de la gestión del retorno de contenedores vacíos, de forma similar a lo observado en el corredor de la Ruta 3. Mientras el tren absorbe el transporte de la carga útil con una elevada eficiencia de escala, el reposicionamiento de contenedores por carretera mediante camiones diésel constituye el principal foco de ineficiencia remanente dentro del eje exportador.

Gráfico 15. Intensidad de emisiones Exportación de Carne corredor ruta 5.

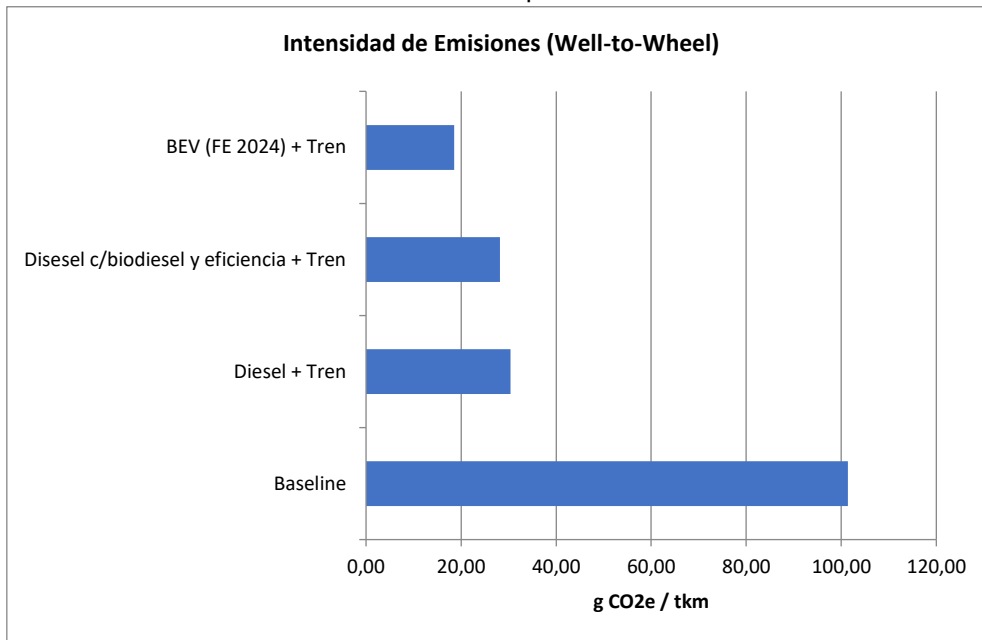
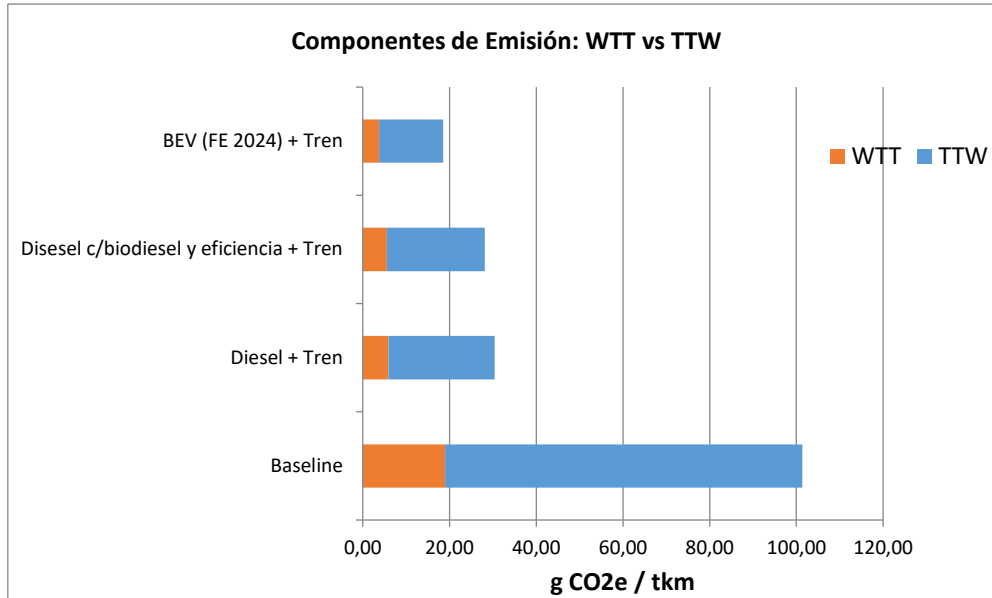


Gráfico 16. Componentes de emisión Exportación de Carne corredor ruta 5.



Al igual que en los corredores de exportación de ganado en pie, la viabilidad de estas configuraciones multimodales depende de múltiples factores. Entre los más relevantes se encuentran la interoperabilidad entre modos de transporte, la coordinación logística entre nodos del sistema y los costos operativos asociados a cada alternativa.

TRAMO T6B – EXPORTACIÓN DE CARNE (AÉREA)

Distribución al Aeropuerto de Carrasco con camiones simples refrigerados.

Tabla 22. Resultados tramo T6b Exportación de carne por aeropuerto

Tecnología	Emisiones Totales (tCO2e/año)	kg CO2e/t	g CO2e/t-km	% Var. vs Baseline
Diésel (baseline)	132	54	504	-
Diésel + eficiencia	112	46	429	-15,2%
Diésel B7	126	52	482	-4,5%
Diésel B7 + eficiencia	107	44	409	-18,9%
HVO	24	9,8	90,8	-81,8%
Biometano	35	15	135	-73,5%
BEV (SIN 2022-2024)	9,50	3,93	36,35	-92,8%
BEV (SIN 2024)	1,39	0,57	5,32	-98,9%
FCEV (SIN 2024)	5,12	2,11	19,56	-96,1%
H ₂ -ICE (SIN 2024)	6,35	2,62	24,29	-95,2%

El transporte aéreo presenta la mayor intensidad operativa de la cadena (>500g/tkm para diesel). Este resultado responde a la utilización de vehículos simples con cargas útiles reducidas y un retorno vacío ineludible. Para este tipo de flujos premium, la descarbonización vía BEV (reducción del 99 %) es estratégica para evitar que el transporte doméstico domine la huella total del producto. Al igual que los otros tramos las opciones de corto plazo con tecnología existente puede ser puntos iniciales para a descarbonización.

Gráfico 17. Intensidad de emisiones Exportación de Carne por aeropuerto.

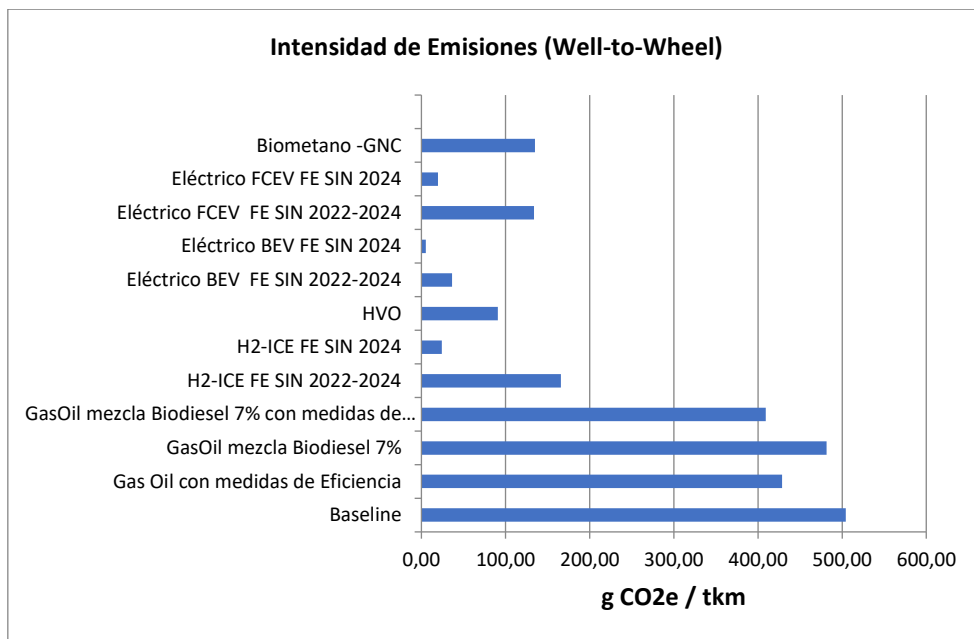
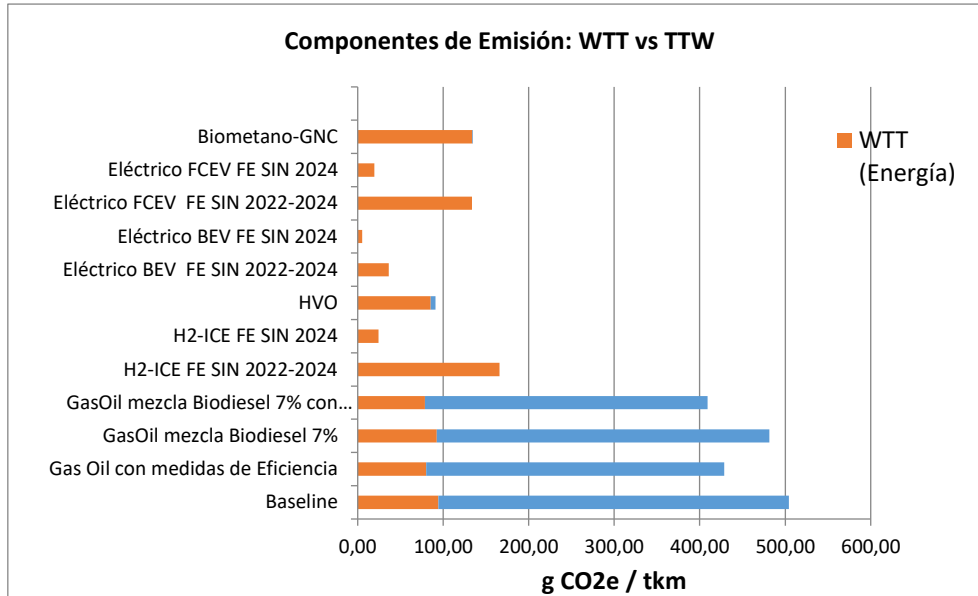


Gráfico 18. Componente de emisión Exportación de Carne por aeropuerto.



TRAMO T7 – IMPORTACIÓN DE CARNE

Traslado de carne importada hacia centros de acopio nacionales.

Tabla 23. Resultados tramo 7 importación de carne

Tecnología	Emisiones Totales (tCO2e/año)	Kg CO2e/t	gCO2 e/t-km	% Var. vs Baseline
Diésel (baseline)	1.185	34	101	-
Diésel + eficiencia	1.007	29	86	-15,0%
Diésel B7	1.132	32	97	-4,5%
Diésel B7 + eficiencia	962	28	82	-18,8%
HVO	213	6,1	18,3	-82,0%
Biometano	206	6	18	-82,6%
BEV (SIN 2022-2024)	60,41	1,73	5,17	-94,9%
FCEV (SIN 2022-2024)	194,97	5,59	16,69	-83,5%
H ₂ -ICE (SIN 2022-2024)	260	7,45	22,25	-78,1%
BEV (SIN 2024)	8,84	0,25	0,76	-99,3%
FCEV (SIN 2024)	28,50	0,82	2,44	-97,6%
H ₂ -ICE (SIN 2024)	38,04	1,09	3,26	-96,8%

El tramo de importación presenta intensidades moderadas debido al uso de camiones pesados. El análisis resalta que la electrificación permite consolidar una cadena de suministro externa de bajas emisiones operativas en el tramo nacional, alineando la logística de importación con los estándares climáticos del resto de la cadena.

Gráfico 19. Intensidad de emisión Importación de Carne.

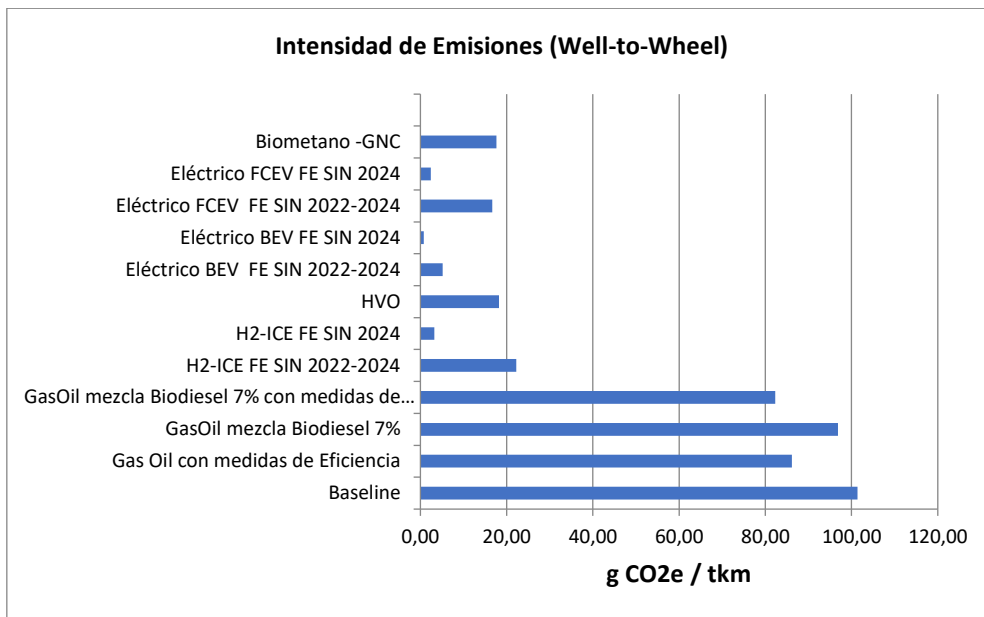
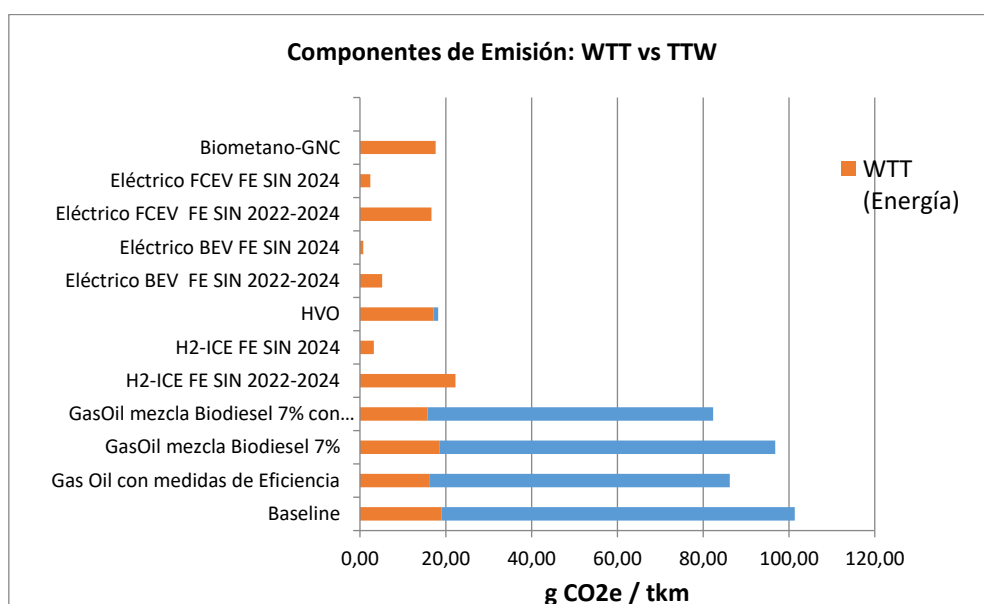


Gráfico 20. Componente de emisión Importación de Carne.



COMERCIALIZACIÓN INTERNA (DESGLOSE POR PORTE DE VEHÍCULO)

Camión Mediano (Distribución)

Tabla 24. Resultados Transporte interno-Camión mediano

Tecnología	Emisiones Totales (tCO ₂ e/año)	kg CO ₂ e/t	g CO ₂ e/t-km	% Var. vs Baseline
Diésel (baseline)	4.253	54	402	-
Diésel + eficiencia	3.615	46	341	-15,0%
Diésel B7	4.062	52	384	-4,5%
Diésel B7 + eficiencia	3.453	44	326	-18,8%
HVO	766	9,8	72,3	-82,0%
Biometano	1.031	13	97	-75,8%
BEV (SIN 2022-2024)	209,38	2,67	19,77	-95,1%
FCEV (SIN 2022-2024)	767,11	9,78	72,44	-82,0%
H ₂ -ICE (SIN 2022-2024)	940	11,99	88,80	-77,9%
BEV (SIN 2024)	30,60	0,39	2,89	-99,3%
FCEV (SIN 2024)	112	1,43	10,60	-97,4%
H ₂ -ICE (SIN 2024)	137,61	1,75	12,99	-96,8%

Camión Grande (Distribución)

Tabla 25. Resultados Transporte interno-Camión grande

Tecnología	Emisiones Totales (tCO ₂ e/año)	kg CO ₂ e/t	g CO ₂ e/t-km	% Var. vs Baseline
Diésel (baseline)	1.017	29	164	-
Diésel + eficiencia	864	24	140	-15,0%
Diésel B7	971	28	157	-4,5%
Diésel B7 + eficiencia	826	23	133	-18,8%
HVO	183	5,2	29,6	-82,0%
Biometano	177	5,0	29	-82,6%
BEV (SIN 2022-2024)	51,85	1,47	8,37	-94,9%
FCEV (SIN 2022-2024)	167,35	4,74	27,02	-83,5%
H ₂ -ICE (SIN 2022-2024)	223	6,32	36,03	-78,1%
BEV (SIN 2024)	7,59	0,21	1,23	-99,3%
FCEV (SIN 2024)	24,50	0,69	3,95	-97,6%
H ₂ -ICE (SIN 2024)	32,65	0,93	5,27	-96,8%

Camión Simple (Distribución)

Tabla 26. Resultados Transporte interno-Camión simple

Tecnología	Emisiones Totales (t CO ₂ e/año)	kg CO ₂ e/t	g CO ₂ e/t·km	% Var. vs Baseline
Diésel (baseline)	3.148	65	620	-
Diésel + eficiencia	2.676	55	527	-15,0%
Diésel B7	3.007	62	592	-4,5%
Diésel B7 + eficiencia	2.556	53	504	-18,8%
HVO	567	11,7	111,7	-82,0%
Biometano	800	16	158	-74,6%
BEV (SIN 2022-2024)	166,05	3,42	32,72	-94,7%
BEV (SIN 2024)	24,30	0,50	4,79	-99,2%

Vehículos Utilitarios (Distribución Urbana)

Tabla 27. Resultados Transporte interno-Utilitario

Tecnología	Emisiones Totales (ttCO ₂ e/año)	kg CO ₂ e/t	g CO ₂ e/t·km	% Var. vs Baseline
Diésel (baseline)	1.036	99	994	-
Diésel + eficiencia	881	84	845	-15,0%
Diésel B7	990	95	949	-4,4%
Diésel B7 + eficiencia	841	81	807	-18,8%
HVO	187	17,9	179	-81,9%
Biometano	208	20	199	-79,9%
BEV (SIN 2022-2024)	45,55	4,37	43,69	-95,6%
BEV (SIN 2024)	6,67	0,64	6,39	-99,4%

El análisis de la distribución interna de carne muestra que la intensidad de emisiones del transporte depende fuertemente del porte del vehículo y de la eficiencia de carga del sistema logístico. En general, a medida que disminuye el tamaño del vehículo y la carga útil transportada, aumenta significativamente la intensidad de emisiones por tonelada-kilómetro. Esto refleja una característica estructural de la logística de distribución: los vehículos más pequeños transportan menores volúmenes y operan con mayor frecuencia en circuitos fragmentados, lo que reduce la eficiencia energética del sistema.

En los camiones medianos, el escenario base presenta una intensidad de 402 gCO₂e/t·km, con emisiones totales de 4.253 tCO₂e/año. Las mejoras de eficiencia

permiten reducciones moderadas cercanas al 15 %, mientras que la incorporación de mezclas B7 genera reducciones limitadas, del orden del 4–5 %, coherentes con el bajo contenido renovable del combustible. En contraste, los combustibles renovables avanzados como HVO y biometano permiten reducciones mucho más significativas, del orden de 75–82 % respecto al escenario base. Las tecnologías electrificadas muestran los mayores beneficios: los BEV reducen las emisiones en más de 95 % bajo el factor de emisión promedio del sistema eléctrico 2022–2024, y hasta 99 % cuando se considera el factor de emisión del SIN 2024.

Para los camiones grandes, la intensidad de emisiones es considerablemente menor (164 gCO₂e/t·km en el escenario base), lo que evidencia el efecto de las economías de escala en el transporte pesado. La mayor capacidad de carga permite distribuir el consumo energético sobre un mayor volumen de producto transportado. El patrón de reducción entre tecnologías es similar al observado en camiones medianos: mejoras incrementales para eficiencia y B7, reducciones sustanciales para combustibles renovables, y los mayores beneficios para tecnologías electrificadas, con reducciones cercanas al 95–99 % en los escenarios BEV.

Los camiones simples presentan intensidades de emisiones intermedias (620 g CO₂e/t·km en el escenario base), reflejando su menor capacidad de carga respecto a los camiones de mayor porte. Nuevamente, las medidas de eficiencia y el uso de mezclas bajas de biodiésel generan reducciones relativamente limitadas, mientras que los combustibles renovables avanzados permiten reducciones superiores al 75 %. Las tecnologías eléctricas muestran el mayor potencial de mitigación, con reducciones cercanas al 95–99 %, dependiendo del factor de emisión del sistema eléctrico considerado.

Finalmente, los vehículos utilitarios utilizados en distribución urbana presentan la mayor intensidad de emisiones de toda la cadena logística, alcanzando 994 g CO₂e/t·km en el escenario base. Este comportamiento se explica por la combinación de baja capacidad de carga, alta frecuencia de recorridos y el consumo energético constante asociado al sistema de refrigeración (este no fue modelado en el presente trabajo). En este segmento, la fragmentación logística penaliza fuertemente la eficiencia ambiental del sistema. En consecuencia, la electrificación de las flotas urbanas aparece como una de las estrategias de mitigación más efectivas, con reducciones superiores al 95 % en los escenarios BEV.

Para los vehículos de baja capacidad de carga no se modelaron escenarios basados en hidrógeno, debido a que actualmente no existe disponibilidad comercial de esta tecnología en ese segmento. Los desarrollos de vehículos de hidrógeno, tanto con celda de combustible (FCEV) como con motores de combustión a hidrógeno (H₂-ICE), se concentran principalmente en el transporte pesado y de larga distancia,

donde las limitaciones de autonomía y tiempo de recarga de otras tecnologías son más críticas. En cambio, en aplicaciones de distribución urbana y vehículos utilitarios, la electrificación mediante baterías constituye actualmente la principal vía tecnológica de descarbonización disponible en el mercado.

En conjunto, los resultados muestran que la eficiencia climática de la distribución interna depende tanto del tipo de tecnología utilizada como de la eficiencia logística del sistema de transporte. Mientras que las tecnologías electrificadas ofrecen el mayor potencial de reducción de emisiones, la optimización del tamaño de los vehículos, la consolidación de cargas y la planificación de rutas también desempeñan un papel clave para mejorar el desempeño ambiental del transporte en la etapa de comercialización interna.

8. Discusión

La narrativa de los resultados confirma que la huella logística de la carne en Uruguay está definida por la densidad de la carga y la obligatoriedad del retorno vacío. El transporte de ganado vivo siempre presentará intensidades superiores al de carne procesada debido a las restricciones físicas de bienestar animal que impiden optimizar el volumen del vehículo. Uruguay posee una ventaja estratégica única en su matriz eléctrica renovable, la cual permite que la transición tecnológica hacia el BEV se traduzca en una descarbonización casi total del ciclo Well-to-Wheel de forma inmediata, a diferencia de otros mercados donde la recarga eléctrica aún depende de fuentes fósiles. La jerarquía de reducción sitúa a la electrificación como líder absoluto, con los combustibles renovables drop-in como puentes de transición necesarios para los tramos pesados rurales.

DISCUSIÓN TRANSVERSAL DE RESULTADOS POR TECNOLOGÍA

El análisis comparativo de escenarios realizado para los distintos tramos de la cadena logística muestra un patrón consistente: las tecnologías con menor intensidad de emisiones son, en general, aquellas que sustituyen completamente la combustión fósil en el vehículo y aprovechan vectores energéticos de baja huella de carbono.

En términos globales, el orden de desempeño climático observado en los resultados del estudio puede resumirse, en términos generales, como sigue: BEV como alternativa de menor emisión, seguido por FCEV, luego H₂-ICE, después HVO y biometano, posteriormente diésel con medidas de eficiencia, luego diésel B7 con

o sin eficiencia, y finalmente diésel convencional como escenario de mayor impacto.

Este orden no implica que todas las tecnologías se comporten exactamente igual en cada tramo, pero sí refleja una tendencia robusta del modelo: a medida que disminuye la dependencia de combustibles fósiles y aumenta la participación de electricidad renovable o combustibles renovables avanzados, la huella WTW del transporte disminuye de forma sustancial.

En el caso uruguayo, esta tendencia se ve reforzada por la baja intensidad de carbono del sistema eléctrico nacional, que mejora especialmente el desempeño de las tecnologías electrificadas.

Vehículos eléctricos a batería (BEV)

En casi todos los tramos analizados, los vehículos eléctricos a batería presentan los menores valores de emisiones. La razón principal es doble. Por un lado, el motor eléctrico tiene una eficiencia energética claramente superior a la de los motores de combustión; por otro, la electricidad del sistema uruguayo presenta una huella de carbono relativamente baja, lo que reduce fuertemente las emisiones WTT del vector energético. Esta combinación hace que la electrificación directa sea, desde el punto de vista del modelo, la acción de mayor potencial de descarbonización.

Desde el punto de vista del desarrollo tecnológico, los BEV son hoy la tecnología de cero emisiones locales más madura dentro del transporte pesado por carretera. Fabricantes como Scania, Volvo y MAN ya comercializan camiones eléctricos pesados (VOLVO, s.f.).

No obstante, su aplicabilidad no es homogénea en todos los segmentos. Los BEV resultan especialmente atractivos en recorridos cortos y medios, operaciones con base fija, distribución urbana o regional y corredores con posibilidad de recarga planificada. En cambio, en tramos de larga distancia, con baja disponibilidad de infraestructura o con alta exigencia de carga útil y flexibilidad operativa, siguen existiendo limitaciones asociadas a autonomía, tiempos de recarga, peso de baterías e inversión inicial. Aun así, el estado del arte indica que la tecnología está avanzando rápidamente y que su campo de aplicación se está ampliando hacia usos antes considerados difíciles de electrificar.

Vehículos eléctricos con celda de combustible (FCEV)

Los FCEV muestran, en general, el segundo mejor desempeño del conjunto, aunque normalmente por detrás del BEV. Esto se explica por una cuestión estructural: aun cuando el vehículo no emite en el tubo de escape, el hidrógeno debe producirse previamente, y esa producción incorpora pérdidas energéticas adicionales respecto a la electrificación directa. Es decir, para mover un camión con hidrógeno

primero hay que convertir electricidad en hidrógeno y luego hidrógeno en electricidad dentro del vehículo, mientras que en un BEV la electricidad se usa de forma mucho más directa.

Desde la perspectiva tecnológica, los FCEV están menos maduros comercialmente que los BEV, pero han avanzado de forma sostenida. A nivel industrial, Hyundai mantiene despliegues, a través de su estrategia de hidrógeno continúa el desarrollo de esta tecnología para larga distancia.

Motores de combustión interna a hidrógeno (H₂-ICE)

Los escenarios H₂-ICE presentan, en términos generales, mejores resultados que el diésel, pero suelen quedar por detrás de los FCEV y claramente por detrás de los BEV. La lógica es consistente con la eficiencia del sistema: el hidrógeno se usa aquí en un motor térmico, con eficiencias menores que una celda de combustible. Por eso, aun usando el mismo vector energético, el consumo específico de hidrógeno tiende a ser mayor y la intensidad WTW también.

En cuanto al estado del arte, esta tecnología todavía se encuentra en una fase temprana y más acotada que las otras dos rutas de cero emisiones locales.

Su posible ventaja está en la cercanía conceptual con la tecnología de motores convencionales y en ciertos casos de uso exigentes; sin embargo, en el marco de este estudio no aparece como la opción óptima desde el punto de vista climático. En la práctica, puede interpretarse más como una vía de transición o de aplicación específica que como la solución de mayor eficiencia sistémica para la descarbonización del transporte pesado.

HVO

El HVO aparece de forma consistente entre las alternativas de mejor desempeño dentro de los combustibles líquidos. En la mayoría de los tramos, logra reducciones muy importantes frente al diésel convencional y, en varios casos, se aproxima al desempeño de algunas rutas basadas en hidrógeno. Su fortaleza principal no reside en una mayor eficiencia del vehículo, sino en la menor huella de carbono del combustible en el análisis WTW.

Desde el punto de vista tecnológico y comercial, el HVO tiene una ventaja muy importante: es un combustible drop-in. Scania y Volvo indican que todos sus motores de combustión interna pueden operar con HVO renovable sin modificaciones, Esto hace que, a diferencia de las tecnologías de cero emisiones locales, el HVO pueda reducir emisiones usando gran parte de la flota e infraestructura existentes. (VOLVO, s.f.)

Por esa razón, el HVO aparece como una de las alternativas más robustas para reducciones de corto y mediano plazo, especialmente en segmentos donde la electrificación o el hidrógeno aún presentan barreras operativas. Sus limitantes están menos en el vehículo y más en la disponibilidad sostenible del combustible, el costo, la trazabilidad de materias primas y la competencia por oferta. Aun así, desde la lógica del modelo, constituye una de las opciones más relevantes para descarbonizar rápidamente sin esperar una renovación total de flota.

Biometano

El biometano también muestra reducciones importantes y, en varios tramos, valores cercanos a HVO. Conceptualmente, combina dos atributos atractivos: permite aprovechar una tecnología vehicular ya disponible y, al mismo tiempo, se alinea bien con enfoques de economía circular cuando proviene de residuos orgánicos o efluentes.

En términos de mercado, los camiones a gas están bastante más desarrollados que los de hidrógeno. (VOLVO, s.f.).

Sin embargo, el desempeño real del biometano depende de la disponibilidad local del combustible, de la infraestructura de carga y del origen del gas renovable. En algunos casos del modelo, el biometano queda levemente por detrás de HVO o incluso de tecnologías eléctricas, precisamente porque la eficiencia del sistema y las emisiones upstream siguen siendo relevantes. Aun así, para carga pesada y distancias largas, puede ser una alternativa intermedia técnicamente realista y ya disponible comercialmente.

Diésel con mejoras de eficiencia

Las medidas de eficiencia constituyen la alternativa incremental más inmediata y transversal. Su ventaja es clara: no requieren un cambio de vector energético ni una sustitución completa de la flota para empezar a generar resultados. Los beneficios observados en el modelo son moderados (15 %), pero consistentes, y responden a mejoras en aerodinámica, motorización, neumáticos, conducción y gestión operativa.

El estado del arte en este punto es muy sólido: los fabricantes siguen lanzando mejoras en eficiencia para vehículos térmicos. La principal limitación es que, aun optimizado, el diésel sigue siendo un combustible fósil. Por eso, estas medidas deben leerse como una estrategia de mejora inmediata y de bajo arrepentimiento, pero no como una solución suficiente de largo plazo si el objetivo es una descarbonización profunda.

Diésel B7 con eficiencia

Los escenarios con B7 (Diesel + 7 % de Biodiesel) muestran mejoras relativamente acotadas respecto al diésel puro. Esto es coherente con el hecho de que se trata de mezclas bajas, donde el grueso de la energía sigue proviniendo del combustible fósil. Por eso, aun cuando la incorporación de biodiésel mejora marginalmente el balance WTW, el orden de magnitud del cambio es mucho menor que en HVO, biometano o electrificación.

Cuando se combina con eficiencia, mejora algo más el desempeño, pero sigue sin cambiar la lógica estructural del sistema. Por tanto, puede considerarse una medida incremental sumamente útil, aunque insuficiente como estrategia central de descarbonización a largo plazo.

Diésel convencional

El diésel base se mantiene sistemáticamente como el escenario de mayor emisión en todos los tramos. Esto responde a tres factores: elevada fracción fósil del combustible, emisiones directas en combustión y menor eficiencia global frente a las rutas eléctricas. Aun así, sigue siendo la referencia operativa del sistema actual por razones conocidas: capilaridad de abastecimiento, alta autonomía, flexibilidad, costo de capital relativamente bajo y madurez total de la tecnología.

Desde una perspectiva de discusión, el diésel no debe interpretarse solo como baseline metodológico, sino también como el punto de comparación que evidencia la magnitud del cambio requerido. Cuanto más se aleja una alternativa del perfil del diésel en términos de fuente energética, eficiencia y ciclo de vida, mayor es la reducción observada.

CONFIGURACIONES MULTIMODALES: CORREDORES RUTA 5 Y RUTA3

Para el flujo de exportación de ganado en pie, los resultados de ambos corredores confirman que la incorporación del modo alternativo genera reducciones de emisiones de gran magnitud respecto al transporte carretero directo. En el corredor Ruta 5, la configuración multimodal camión diésel más tren permite reducir las emisiones totales del corredor en un 78,1 %. Un aspecto técnicamente relevante es que la tecnología del camión de enlace (diésel, diésel + biodiesel o BEV) tiene un impacto marginal en este corredor, dado que el tramo carretero entre la cuarentena de Paraje Goñi y la estación ferroviaria es de apenas 2 km: la diferencia entre el escenario con camión diésel y el escenario con camión BEV es mínima.

El ferrocarril domina el desempeño ambiental del corredor con independencia del enlace terrestre. En el corredor Ruta 3, la incorporación del transporte fluvial reduce las emisiones de la configuración con camión diésel en un 74,1 % y 87,4 %

cuando el tramo carretero corto se electrifica con BEV. A diferencia de Ruta 5, aquí el enlace carretero de 55–60 km hasta el Puerto de Paysandú tiene un peso más significativo en el balance total, por lo que la elección tecnológica del camión de conexión sí incide de forma visible en el resultado del corredor.

Para el flujo de exportación de carne procesada, los resultados de los corredores revelan un elemento de complejidad ausente en el caso del ganado en pie: el reposicionamiento de contenedores vacíos. Este movimiento (necesario para sostener el servicio logístico) genera emisiones que deben atribuirse al corredor y que, en el escenario diésel, pueden superar incluso al tramo modal principal.

En el corredor Ruta 5, el retorno de contenedores vacíos genera 965,05 t CO₂e/año, superando tanto el tramo carretero inicial frigorífico-terminal ferroviaria (692,91 t CO₂e/año) como el tramo ferroviario (657,71 t CO₂e/año). En el corredor Ruta 3 se observa la misma dinámica: el retorno de contenedores con camión diésel (672,77 t CO₂e/año) supera al tramo fluvial Paysandú–Montevideo (638,42 t CO₂e/año). Este resultado subraya que la eficiencia ambiental del modo alternativo puede verse erosionada si los tramos carreteros auxiliares no se descarbonizan de forma integrada. La electrificación mediante BEV de los tramos terrestres (tanto del enlace inicial como del retorno de contenedores) reduce las emisiones de estos segmentos en torno al 99,3 %, dejando como fuente dominante de emisiones del corredor el tramo ferroviario en Ruta 5 o el tramo fluvial en Ruta 3, con intensidades de 34,7 y 45,1 g CO₂e/t·km respectivamente, muy inferiores a las del transporte carretero directo.

No obstante, la viabilidad de estas configuraciones está condicionada por factores operativos y económicos que el análisis de emisiones no captura según se detalla en las conclusiones de la Parte 1 del presente estudio. A continuación, se destacan algunos aspectos críticos a tenerse en cuenta mas allá de la optimización respecto a las emisiones de GEI:

- Los trasbordos entre diferentes medios (de camión a barco, por ejemplo) aumentan el riesgo de lesiones y estrés, impactando en el bienestar animal.
- Requiere una coordinación logística compleja y mayor planificación para evitar fallos.
- La dependencia de múltiples modos de transporte con diferentes responsables aumenta la posibilidad de retrasos en las entregas.
- Depende de la disponibilidad de infraestructuras adecuadas para el manejo seguro de animales en puntos de trasbordo.

ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LAS TECNOLOGÍAS SEGÚN SUS COMPONENTES WTT Y TTE

El análisis de resultados permite identificar que las diferencias observadas entre tecnologías se explican fundamentalmente por la distribución relativa de las emisiones entre los componentes Tank-to-Energy (TTE) y Well-to-Tank (WTT). Mientras que el componente TTE refleja las emisiones directas generadas durante la operación del vehículo, el componente WTT representa las emisiones asociadas a la producción, procesamiento y distribución del vector energético utilizado.

La comparación entre tecnologías muestra tres patrones principales en el comportamiento de estas dos componentes.

Tecnologías basadas en combustibles fósiles (diésel y mezclas bajas de biodiésel)

En las tecnologías basadas en diésel convencional, la mayor parte de las emisiones del sistema se concentra en el componente TTE, dado que el carbono contenido en el combustible se libera directamente durante la combustión en el motor. El componente WTT en estos casos representa una fracción menor del total, asociada principalmente a las emisiones de extracción, refinado y transporte del combustible.

Cuando se incorporan mezclas bajas de biodiésel, como B7, el patrón general se mantiene prácticamente sin cambios. La proporción de emisiones asociadas al componente TTE sigue siendo dominante porque la fracción fósil del combustible continúa representando la mayor parte de la energía utilizada. Por esta razón, las reducciones observadas en los escenarios con B7 son relativamente limitadas.

Las mejoras de eficiencia en vehículos diésel afectan tanto el componente TTE como el WTT al reducir el consumo total de combustible por unidad de transporte. Sin embargo, estas mejoras no modifican la estructura de emisiones del sistema, que sigue dominada por las emisiones directas de combustión.

Combustibles renovables líquidos y gaseosos (HVO y biometano)

En el caso de combustibles renovables como HVO o biometano, la distribución entre WTT y TTE cambia de forma significativa. Aunque estos combustibles también se utilizan en motores de combustión interna y por lo tanto mantienen un componente TTE, el carbono emitido durante la combustión proviene de biomasa o de residuos orgánicos y no de carbono fósil.

Por esta razón, en los enfoques de ciclo de vida utilizados en el modelo, el componente TTE presenta emisiones netas significativamente menores, mientras

que el componente WTT adquiere mayor relevancia relativa, ya que incluye las emisiones asociadas a la producción, procesamiento y transporte del combustible renovable.

En estos escenarios, la intensidad total de emisiones depende fuertemente de la ruta de producción del combustible. Cuando el combustible proviene de residuos o subproductos, las emisiones WTT pueden ser relativamente bajas, lo que explica las reducciones importantes observadas respecto al diésel convencional.

Tecnologías basadas en electrificación (BEV)

Los vehículos eléctricos a batería (BEV) presentan un comportamiento completamente distinto desde el punto de vista del balance WTT-TTE. En estos sistemas, el componente TTE es prácticamente nulo, ya que no se produce combustión durante la operación del vehículo.

En consecuencia, la totalidad de las emisiones del sistema se concentra en el componente WTT, asociado a la generación de la electricidad consumida. En contextos donde el sistema eléctrico tiene una baja intensidad de carbono, como es el caso de Uruguay, el componente WTT resulta relativamente bajo, lo que explica los valores mínimos de emisiones observados para esta tecnología en la mayoría de los tramos analizados.

Este resultado pone de manifiesto que el desempeño climático de la electrificación depende fuertemente de la intensidad de carbono del sistema eléctrico utilizado para la recarga.

Tecnologías basadas en hidrógeno (FCEV y H₂-ICE)

Las tecnologías basadas en hidrógeno también presentan un desplazamiento importante de las emisiones hacia el componente WTT, ya que el hidrógeno debe ser producido previamente mediante procesos energéticamente intensivos, como la electrólisis del agua o el reformado de gas natural.

En los vehículos con celda de combustible (FCEV), el hidrógeno se convierte nuevamente en electricidad dentro del vehículo para alimentar un motor eléctrico. Desde el punto de vista del componente TTE, las emisiones operativas son prácticamente nulas, ya que el único producto de la reacción electroquímica es vapor de agua.

Sin embargo, el componente WTT puede ser significativo, dependiendo de la fuente de energía utilizada para producir el hidrógeno. Incluso cuando el hidrógeno es producido mediante electrólisis con electricidad renovable (para este informe se estimó en función del FE del SIN), el sistema incorpora pérdidas energéticas

adicionales asociadas a la conversión de electricidad en hidrógeno, compresión, almacenamiento y reconversión en electricidad.

En el caso de los motores de combustión a hidrógeno (H₂-ICE), el comportamiento es intermedio. Aunque el combustible no contiene carbono, y por lo tanto no genera emisiones de CO₂ durante la combustión, el motor sigue funcionando bajo un ciclo térmico con menores eficiencias que un sistema de celda de combustible. Además, el hidrógeno consumido por kilómetro tiende a ser mayor, lo que incrementa el peso relativo del componente WTT en el balance total.

DESEMPEÑO POR GRUPOS TECNOLÓGICOS

En conjunto, los resultados sugieren tres grandes grupos tecnológicos.

El primero es el de máxima mitigación, liderado por BEV y, en segundo término, por FCEV, especialmente cuando la electricidad usada tiene baja huella de carbono. Son las rutas más alineadas con una descarbonización profunda, aunque exigen infraestructura y renovación tecnológica.

El segundo grupo es el de transición robusta, donde destacan HVO y biometano. Estas opciones no siempre alcanzan los mínimos absolutos de emisiones del BEV, pero ofrecen ventajas importantes de implementación porque aprovechan tecnologías vehiculares ya disponibles y pueden desplegarse más rápido en ciertos corredores.

El tercer grupo es el de mejoras incrementales, integrado por eficiencia, Diesel + Biodiesel + eficiencia. Son medidas valiosas para reducir emisiones en el corto plazo, pero no alteran de manera estructural la dependencia del sistema respecto a los combustibles fósiles.

En términos generales, el mejor desempeño climático se logra cuando coinciden tres condiciones:

- 1 Alta eficiencia del tren motriz,
- 2 Vector energético de baja huella de carbono y
- 3 Adecuada compatibilidad entre la tecnología y la función logística del tramo.

Por eso, aunque el orden global está claro, la priorización real por tramo debe considerar también autonomía, infraestructura, costos, peso útil, frecuencia operativa y madurez tecnológica.

9. Bibliografía

- Department for Environment, Food & Rural Affairs. (2025). *K government greenhouse gas conversion factors for company reporting: 2025*. Department for Environment, Food & Rural Affairs. Obtenido de <https://www.gov.uk/government/publications/greenhouse-gas-reporting-conversion-factors-2025>
- DI Pascua, I. (2026). *Diagnóstico de la logística y el transporte de la*. Informe elaborado para el Programa Euroclima de la Unión Europea, FIAP, Instituto Nacional de Logística (INALOG).
- Edwards, R., Hass, H., Larivé, J., Lonza, L., & Maas, H. (2020). *Well-to-Wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the European context*. European Commission.
- European Commission. (2021). *Sustainable and smart mobility strategy*.
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2006). *2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories*. Institute for Global Environmental Strategies (IGES). Obtenido de <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/>
- International Council on Clean Transportation. (2022). *Fuel-cell electric tractor-trailers: Technology, costs, and performance*. Obtenido de <https://theicct.org/wp-content/uploads/2022/07/fuel-cell-tractor-trailer-tech-fuel-1-jul22.pdf>
- International Energy Agency. (2017). *The future of trucks: Implications for energy and the environment*. Obtenido de <https://iea.blob.core.windows.net/assets/6e5c1a3a-bb14-4f20-bb92-0ed0f9b86751/TheFutureofTrucks.pdf>
- International Energy Agency. (2023). *Transport sector CO₂ emissions and energy consumption analysis*.
- International Organization for Standardization. (2023). *ISO 14083: Greenhouse gases — Quantification and reporting of greenhouse gas emissions arising from transport chain operations*.
- International Renewable Energy Agency. (2020). *Green hydrogen cost reduction: Scaling up electrolyzers to meet the 1.5°C climate goal*. Obtenido de

<https://www.irena.org/publications/2020/Dec/Green-hydrogen-cost-reduction>

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

Presidencia de la República. (2008). *Decreto N° 523/008: Reglamentación de la producción y comercialización de agrocombustibles*. Diario Oficial N° 27.318.

Rosselli, P., Carriquiry, F., Pérez, M., & Varela, D. (2022). *El mercado de transporte*. NOTA TÉCNICA No IDB-TN-02458, BID.

Smart Freight Centre. (2023). *GLEC Framework for Logistics Emissions Accounting and Reporting*. Smart Freight Centre. Obtenido de https://smart-freight-centre-media.s3.amazonaws.com/documents/GLEC_FRAMEWORK_v3.2_21_10_25_1.pdf

Souto, G. T. (2018). *Logística de las cuatro principales cadenas agroindustriales del Uruguay*. Nota técnica IDB-TN-1558., Banco Interamericano de Desarrollo. Obtenido de <https://publications.iadb.org/publications/spanish/document/Log%C3%ADstica-de-las-cuatro-principales-cadenas-agroindustriales-del-Uruguay.pdf>

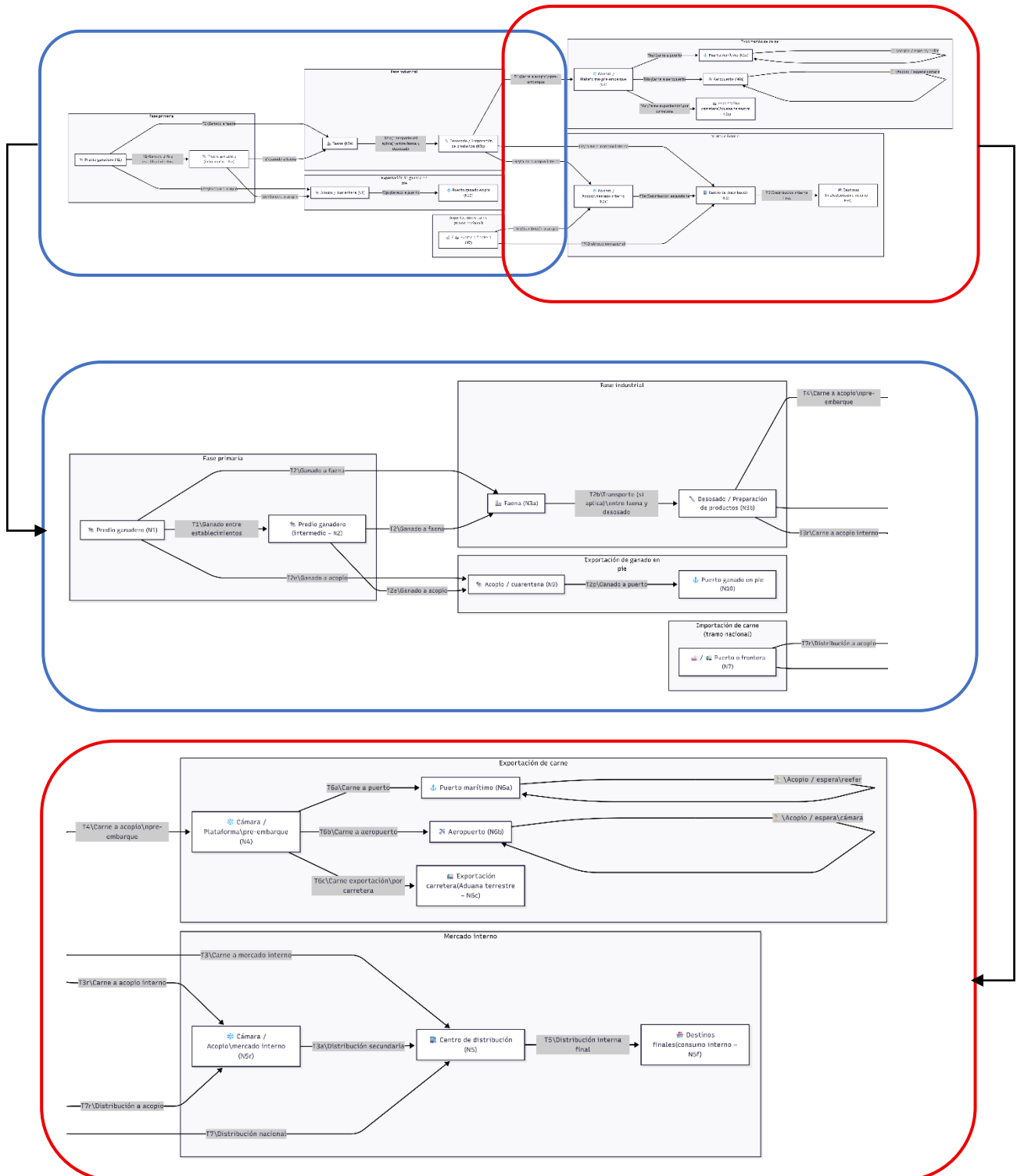
Souto, G. T. (2018). *Logística de las cuatro principales cadenas agroindustriales del Uruguay*. Nota técnica Bid-TN-1558, Banco Interamericano de Desarrollo. doi:<http://dx.doi.org/10.18235/0001460>

Transport & Environment. (2020). *Comparison of hydrogen and battery electric trucks: Methodology and underlying assumptions*. Obtenido de https://www.transportenvironment.org/uploads/files/2020_06_TE_comparison_hydrogen_battery_electric_trucks_methodology.pdf

VOLVO. (s.f.). Obtenido de <https://www.volvotrucks.com/en-en/trucks.html>

10. Anexos

ANEXO 1 - MODELO LOGÍSTICO COMPLETO DE LA CADENA CÁRNICA BOVINA UTILIZADO COMO BASE CONCEPTUAL PARA EL ANÁLISIS DE EMISIONES





Cofinanciado por
la Unión Europea

