



ESTUDIOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN AMÉRICA LATINA

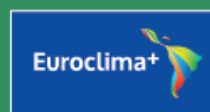
# Simulaciones del precio social del carbono en la infraestructura ferroviaria y comparación entre modos de transporte en países seleccionados de América Latina y el Caribe

Andrés Pica  
Javier Arriagada  
Antonia Rivera  
Vicente Martínez



NACIONES UNIDAS

CEPAL



Financiado por  
la Unión Europea

# Gracias por su interés en esta publicación de la CEPAL



Si desea recibir información oportuna sobre nuestros productos editoriales y actividades, le invitamos a registrarse. Podrá definir sus áreas de interés y acceder a nuestros productos en otros formatos.



[www.cep.al.org/es/publications](http://www.cep.al.org/es/publications)



[www.cep.al.org/apps](http://www.cep.al.org/apps)

# **Simulaciones del precio social del carbono en la infraestructura ferroviaria y comparación entre modos de transporte en países seleccionados de América Latina y el Caribe**

**Andrés Pica  
Javier Arriagada  
Antonia Rivera  
Vicente Martínez**



**NACIONES UNIDAS**



**Financiado por  
la Unión Europea**

Este documento fue preparado por Andrés Pica, Javier Arriagada, Antonia Rivera y Vicente Martínez, Consultores de la Unidad de Economía del Cambio Climático de la División de Desarrollo Sostenible y Asentamientos Humanos de la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), en el marco de las actividades del programa EUROCLIMA+, con financiamiento de la Unión Europea. La coordinación técnica y supervisión del documento estuvieron a cargo de Jimmy Ferrer, Oficial de Asuntos Económicos de la mencionada Unidad de Economía del Cambio Climático.

Ni la Unión Europea ni ninguna persona que actúe en su nombre es responsable del uso que pueda hacerse de la información contenida en la publicación. Los puntos de vista expresados en este estudio son de los autores y no reflejan necesariamente los puntos de vista de la Unión Europea.

Las opiniones expresadas en este documento, que no ha sido sometido a revisión editorial, son de exclusiva responsabilidad de los autores y pueden no coincidir con las de la Organización o las de los países que representan.

Publicación de las Naciones Unidas  
LC/TS.2022/88  
Distribución: L  
Copyright © Naciones Unidas, 2022  
Todos los derechos reservados  
Impreso en Naciones Unidas, Santiago  
S.21-00932

Esta publicación debe citarse como: A. Pica y otros, "Simulaciones del precio social del carbono en la infraestructura ferroviaria y comparación entre modos de transporte en países seleccionados de América Latina y el Caribe", *Documentos de Proyectos* (LC/TS.2022/88), Santiago, Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), 2022.

La autorización para reproducir total o parcialmente esta obra debe solicitarse a la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), División de Documentos y Publicaciones, publicaciones.cepal@un.org. Los Estados Miembros de las Naciones Unidas y sus instituciones gubernamentales pueden reproducir esta obra sin autorización previa. Solo se les solicita que mencionen la fuente e informen a la CEPAL de tal reproducción.

# Índice

|                                                                                                             |           |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Resumen .....</b>                                                                                        | <b>7</b>  |
| <b>Introducción.....</b>                                                                                    | <b>11</b> |
| <b>I. Marco metodológico para el análisis del ciclo de vida de proyectos de transporte interurbano.....</b> | <b>13</b> |
| A. Introducción al análisis de ciclo de vida .....                                                          | 13        |
| B. Ciclo de vida proyectos de carretera.....                                                                | 14        |
| 1. Antecedentes bibliográficos destacados.....                                                              | 14        |
| 2. Metodología y alcance a utilizar en el presente estudio .....                                            | 15        |
| C. Ciclo de vida de proyectos ferroviarios .....                                                            | 19        |
| <b>II. Marco metodológico para la incorporación del PSC en la evaluación de proyectos sociales .....</b>    | <b>27</b> |
| A. Situación base.....                                                                                      | 28        |
| B. Costos y beneficios sociales considerados .....                                                          | 28        |
| <b>III. Definición del caso estudio.....</b>                                                                | <b>31</b> |
| A. Demanda proyectada.....                                                                                  | 32        |
| B. Descripción de los proyectos tipo a analizar .....                                                       | 33        |
| 1. Proyecto ampliación carretera tipo.....                                                                  | 34        |
| 2. Proyecto ferroviario tipo .....                                                                          | 35        |
| 3. Proyecto aviación tipo .....                                                                             | 37        |
| 4. Proyecto dirigible tipo .....                                                                            | 38        |
| C. Consideraciones nacionales de los países seleccionados .....                                             | 38        |
| <b>IV. Emisiones de CO<sub>2</sub> en el ciclo de vida para los casos de estudio.....</b>                   | <b>39</b> |
| A. Emisiones de CO <sub>2</sub> para transporte de pasajeros .....                                          | 39        |
| 1. Emisiones caso base para transporte de pasajeros.....                                                    | 39        |
| 2. Emisiones ampliación de carretera para transporte de pasajeros.....                                      | 40        |

|           |                                                                                                   |    |
|-----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.        | Emisiones proyecto ferroviario para transporte de pasajeros.....                                  | 41 |
| 4.        | Emisiones proyecto aviación para transporte de pasajeros .....                                    | 42 |
| 5.        | Comparación de emisiones.....                                                                     | 44 |
| B.        | Emisiones de CO <sub>2</sub> para transporte de carga.....                                        | 46 |
| 1.        | Emisiones caso base para transporte de carga .....                                                | 46 |
| 2.        | Emisiones ampliación de carretera para transporte de carga .....                                  | 47 |
| 3.        | Emisiones proyecto ferroviario para transporte de carga .....                                     | 48 |
| 4.        | Emisiones proyecto aviación para transporte de carga .....                                        | 49 |
| C.        | Análisis de las emisiones de CO <sub>2</sub> para distintos modos de transporte interurbano ..... | 53 |
| V.        | <b>Incorporación del PSC en la evaluación de proyectos</b> .....                                  | 55 |
| A.        | Evaluación social proyecto ampliación carretera .....                                             | 55 |
| B.        | Evaluación social proyecto ferroviario .....                                                      | 56 |
| C.        | Evaluación social proyecto aviación .....                                                         | 57 |
| VI.       | <b>Recomendaciones</b> .....                                                                      | 59 |
| VII.      | <b>Conclusión</b> .....                                                                           | 61 |
|           | <b>Bibliografía</b> .....                                                                         | 63 |
|           | <b>Anexos</b> .....                                                                               | 65 |
| Anexo 1   | .....                                                                                             | 66 |
| Anexo 2   | .....                                                                                             | 68 |
| Anexo 3   | .....                                                                                             | 69 |
| Anexo 4   | .....                                                                                             | 70 |
| Anexo 5   | .....                                                                                             | 71 |
| Anexo 6   | .....                                                                                             | 71 |
| Anexo 7   | .....                                                                                             | 72 |
| Anexo 8   | .....                                                                                             | 72 |
|           | <b>Cuadros</b>                                                                                    |    |
| Cuadro 1  | Procedimientos que aportan a la huella de carbono de un proyecto.....                             | 14 |
| Cuadro 2  | Emisiones de CO <sub>2</sub> e por construcción de pavimento .....                                | 15 |
| Cuadro 3  | Emisiones obras civiles para una carretera.....                                                   | 16 |
| Cuadro 4  | Factores de emisión de combustibles .....                                                         | 17 |
| Cuadro 5  | Rendimientos por tipo de vehículo .....                                                           | 18 |
| Cuadro 6  | Emisiones de CO <sub>2</sub> e por tipo de vehículo.....                                          | 18 |
| Cuadro 7  | Emisiones asociadas al mantenimiento de una carretera .....                                       | 19 |
| Cuadro 8  | Consumo eléctrico trenes de pasajeros.....                                                        | 22 |
| Cuadro 9  | Consumo eléctrico trenes de carga .....                                                           | 23 |
| Cuadro 10 | Dimensiones de modelos de aviones .....                                                           | 24 |
| Cuadro 11 | Modelos de regresión lineal para diferentes modelos de avión .....                                | 25 |
| Cuadro 12 | Precio social del carbono para Chile.....                                                         | 27 |
| Cuadro 13 | Velocidades promedio en carretera base .....                                                      | 28 |
| Cuadro 14 | Valor social del tiempo de tipo de vehículo .....                                                 | 29 |
| Cuadro 15 | Valor social de combustible por tipo de vehículo.....                                             | 29 |
| Cuadro 16 | Ocupación por tipo de vehículo .....                                                              | 32 |
| Cuadro 17 | Demanda base de pasajeros y de carga .....                                                        | 33 |
| Cuadro 18 | Tasa de crecimiento por año.....                                                                  | 33 |
| Cuadro 19 | Tránsito medio anual por tipo de transporte.....                                                  | 33 |
| Cuadro 20 | Proyección de la demanda total para el horizonte de evaluación (40 años) .....                    | 34 |

|            |                                                                           |    |
|------------|---------------------------------------------------------------------------|----|
| Cuadro 21  | Obras civiles asociadas a un camino representativo.....                   | 34 |
| Cuadro 22  | Distribución por tipo de vehículos.....                                   | 34 |
| Cuadro 23  | Largos viajes promedios para ampliación de carretera.....                 | 35 |
| Cuadro 24  | Elementos infraestructura proyecto representativo.....                    | 35 |
| Cuadro 25  | Características modelos de trenes de pasajeros a evaluar .....            | 35 |
| Cuadro 26  | Características modelos de trenes de carga a evaluar .....                | 36 |
| Cuadro 27  | Velocidades promedio proyecto ferroviario .....                           | 36 |
| Cuadro 28  | Largos viajes promedios para proyecto ferroviario .....                   | 36 |
| Cuadro 29  | Velocidades promedio proyecto aviación .....                              | 37 |
| Cuadro 30  | Largos viajes promedios para proyecto de aviación .....                   | 37 |
| Cuadro 31  | Factores de emisión de generación eléctrica por país .....                | 38 |
| Cuadro 32  | Variación emisiones totales por operación de vehículos .....              | 54 |
| Cuadro 33  | Variación huella de carbono por modo de transporte.....                   | 54 |
| Cuadro 34  | Costos y beneficios sociales CO <sub>2</sub> .....                        | 55 |
| Cuadro 35  | Comparación de indicadores de rentabilidad para distintos escenarios..... | 56 |
| Cuadro 36  | Costos y beneficios sociales CO <sub>2</sub> .....                        | 56 |
| Cuadro 37  | Comparación de indicadores de rentabilidad para distintos escenarios..... | 57 |
| Cuadro 38  | Costos y beneficios sociales CO <sub>2</sub> .....                        | 57 |
| Cuadro 39  | Comparación de indicadores de rentabilidad para distintos escenarios..... | 58 |
| Cuadro A1  | Rieles, durmientes, catenarias y centro de control.....                   | 66 |
| Cuadro A2  | Puentes y túneles .....                                                   | 66 |
| Cuadro A3  | Rieles, durmientes, catenarias y centro de control.....                   | 66 |
| Cuadro A4  | Puentes y túneles .....                                                   | 67 |
| Cuadro A5  | Construcción y mantenimiento de edificios relevantes .....                | 67 |
| Cuadro A6  | Modelo Regina X55 .....                                                   | 68 |
| Cuadro A7  | Modelo Coradia Polyvalent.....                                            | 68 |
| Cuadro A8  | Modelo Spacium .....                                                      | 68 |
| Cuadro A9  | Modelo Talent II .....                                                    | 68 |
| Cuadro A10 | Modelo TRAXX F140 MS.....                                                 | 69 |
| Cuadro A11 | Modelo Prima II .....                                                     | 69 |

## Gráficos

|            |                                                                                             |    |
|------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Gráfico 1  | Distribución TMA por tipo de vehículo .....                                                 | 32 |
| Gráfico 2  | Emisiones de CO <sub>2</sub> e por etapa para caso base .....                               | 40 |
| Gráfico 3  | Emisiones de CO <sub>2</sub> e de una carretera para transporte de pasajeros.....           | 40 |
| Gráfico 4  | Emisiones de CO <sub>2</sub> e por operación de vehículos en una carretera .....            | 41 |
| Gráfico 5  | Huella de carbono de un proyecto ferroviario por país<br>para transporte de pasajeros ..... | 42 |
| Gráfico 6  | Huella de carbono de un proyecto de aviación para transporte de pasajeros.....              | 43 |
| Gráfico 7  | Emisiones de CO <sub>2</sub> por operación de aviones en transporte de pasajeros .....      | 43 |
| Gráfico 8  | Huella de carbono de proyectos de transporte de pasajeros en Chile .....                    | 44 |
| Gráfico 9  | Huella de carbono de proyectos de transporte de pasajeros en Costa Rica.....                | 44 |
| Gráfico 10 | Huella de carbono de proyectos de transporte de pasajeros en Panamá .....                   | 45 |
| Gráfico 11 | Huella de carbono de proyectos de transporte de pasajeros en Nicaragua .....                | 45 |
| Gráfico 12 | Huella de carbono de proyectos de transporte de pasajeros en Honduras.....                  | 46 |
| Gráfico 13 | Emisiones de CO <sub>2</sub> e por etapa para caso base .....                               | 46 |
| Gráfico 14 | Emisiones de CO <sub>2</sub> e de una carretera para transporte de carga .....              | 47 |
| Gráfico 15 | Emisiones de CO <sub>2</sub> por operación de vehículos en transporte de carga.....         | 48 |
| Gráfico 16 | Huella de carbono de un proyecto ferroviario por país para transporte de carga .....        | 48 |
| Gráfico 17 | Huella de CO <sub>2</sub> de proyecto aviación para transporte de carga .....               | 49 |

|            |                                                                                      |    |
|------------|--------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Gráfico 18 | Emisiones de CO <sub>2</sub> por operación de aviones para transporte de carga ..... | 50 |
| Gráfico 19 | Huella de carbono de proyectos de transporte de carga en Chile .....                 | 50 |
| Gráfico 20 | Huella de carbono de proyectos de transporte de carga en Costa Rica .....            | 51 |
| Gráfico 21 | Huella de carbono de proyectos de transporte de carga en Panamá .....                | 51 |
| Gráfico 22 | Huella de carbono de proyectos de transporte de carga en Nicaragua .....             | 52 |
| Gráfico 23 | Huella de carbono de proyectos de transporte de carga en Honduras .....              | 52 |
| Gráfico 24 | Comparación emisiones totales por operación .....                                    | 53 |

## Diagramas

|            |                                                                                                           |    |
|------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Diagrama 1 | Etapas de un ciclo de vida representativo .....                                                           | 14 |
| Diagrama 2 | Procedimiento cálculo de huella de carbono asociado a la etapa de construcción .....                      | 17 |
| Diagrama 3 | Procedimiento cálculo de huella de carbono asociado a la construcción<br>de un proyecto ferroviario ..... | 22 |
| Diagrama 4 | Esquema de etapas de un vuelo .....                                                                       | 25 |



## Resumen

El presente estudio presenta los resultados de las simulaciones realizadas con distintos escenarios de Precio Social de Carbono (PSC), para diferentes soluciones de infraestructura para el transporte interurbano en países de Latinoamérica y el Caribe, en particular: Chile, Costa Rica, Honduras, Nicaragua y Panamá, determinando el impacto en la evaluación social de este tipo de proyectos de inversión y buscando incentivar la generación de propuestas de políticas públicas frente al cambio climático que permitan apoyar al cumplimiento de las metas planteadas en sus Contribuciones Nacionalmente Determinadas (NDCs).

Para el desarrollo del estudio, se aplicó la metodología de Análisis de Ciclo de Vida (ACV) para cada uno de los sectores evaluados (Ampliación carretera, Ferroviario, Aviación y Dirigible), homogeneizando la experiencia regional e internacional relacionada a la temática, considerando como base las etapas de Construcción, Operación, Mantenimiento y Fin de vida útil, considerando 3 escenarios de PCS, según lo propuesto por el Ministerio de Desarrollo Social de Chile: Valor inferior 20,2; Valor central 32,5 y Valor superior 43,2.

La importancia del PCS, radica en que permite incorporar dentro de la evaluación de proyectos los costos o beneficios sociales derivados de los Gases de Efecto Invernadero y compararlo con una situación base (sin proyecto, en este caso una carretera doble vía mantenida), que para este informe, consideró los beneficios por ahorro de tiempo de viaje (USD/h), ahorro de combustible (USD/L) y disminución de emisiones (gCO<sub>2</sub>eq/pkm o tkm), comparados en 4 proyectos con distancias de viaje de 100, 200, 300 y 500km y evaluados para cada uno de los sectores descritos en el párrafo anterior, considerando un Tránsito Medio Anual (TMA) de 30.000.000 vehículos para el año base.

Para todos los escenarios considerados en la evaluación social, se considera un horizonte de evaluación de 40 años, un factor de emisión por generación eléctrica de 0,322 kgCO<sub>2</sub>eq/kWh (valor Nicaragua) y un largo de viaje promedio de 20km para pasajeros (15.119MM pkm) y 80km para carga (45.536MM tkm) respectivamente.

En términos de emisiones de GEI para transporte de pasajeros se obtuvieron los siguientes resultados ordenados de mayores (peor desempeño) a menores (mejor desempeño): Aviación 124,7(gCO<sub>2</sub>eq/pkm); Caso base 71,3(gCO<sub>2</sub>eq/pkm); Ampliación carretera 69,0(gCO<sub>2</sub>eq/pkm); Ferroviario 19,3 [13,7-23,6] (gCO<sub>2</sub>eq/pkm) y Dirigible 10,8(gCO<sub>2</sub>eq/pkm), donde la mayoría de las emisiones derivan de la fase de operación para los distintos modos de transporte, a excepción del ferroviario, donde dominan las emisiones derivadas de la fase de construcción (si la matriz eléctrica es baja en emisiones).

En lo que respecta a las emisiones de GEI para transporte de carga se obtuvieron los siguientes resultados ordenados de mayores (peor desempeño) a menores (mejor desempeño): Aviación 1.235,1 (gCO<sub>2</sub>eq/tkm); Caso base 113,7 (gCO<sub>2</sub>eq/tkm); Ampliación carretera 99,3 (gCO<sub>2</sub>eq/tkm); Dirigible 97,4 (gCO<sub>2</sub>eq/tkm) y Ferroviario 7,9 [5,4-9,7] (gCO<sub>2</sub>eq/pkm) y donde la mayoría de las emisiones derivan de la fase de operación para los distintos modos de transporte, a excepción del ferroviario, de manera análoga a lo que es transporte de pasajeros.

Considerando las emisiones totales para todo el ciclo de vida de las distintas alternativas de transporte interurbano se obtuvieron los siguientes resultados ordenados de mayores (peor desempeño) a menores (mejor desempeño): Aviación 100,4 (Millones TonCO<sub>2</sub>e); Caso base 49,4 (Millones TonCO<sub>2</sub>e); Dirigible 46,8 (Millones TonCO<sub>2</sub>e); Ampliación carretera 41,4 (Millones TonCO<sub>2</sub>e) y Ferroviario 33,4 (Millones TonCO<sub>2</sub>e). Las mayores variaciones de emisiones totales por operación de vehículos respecto al caso base se observan en el Proyecto Ferroviario -32% (mejor desempeño) y Aviación +103% (peor desempeño).

Respecto a la variación de la huella de carbono por modo de transporte para pasajeros, el ranking se ordena de la siguiente forma: Aviación +75%; Ampliación carretera -3%; Ferroviario -75% y Dirigible -85% y para el transporte de carga se tiene: Aviación +986%; Ampliación carretera -13%; Dirigible -14% y Ferroviario -93%.

A continuación, se presenta la evaluación social basada en comparar la carretera de doble vía existente, con los diferentes modos de transporte y el rango superior e inferior del PSC expuesto anteriormente. Para todos los casos se consideró una tasa social de descuento del 6% para descontar los flujos de costos y beneficios. Paralelamente, para la etapa de construcción y mantenimiento se consideraron los dos primeros años.

## **Evaluación social ampliación carretera**

A partir del análisis de las emisiones de Proyecto de Ampliación de la carretera base, se obtienen una variación de los costos sociales en base a los distintos valores de PSC para la etapa de construcción en un rango de 2,1-4,5 [Millones USD] y para la etapa de operación de 35,2-75,3 [Millones USD], de ello se puede apreciar que por cada tonelada emitida en las etapas de construcción y mantenimiento, se evitan cerca de 17 toneladas asociadas a la etapa de operación.

En cuanto a los indicadores de rentabilidad, el VAN sin considerar el PSC es de \$936 MM con una TIR de 16,4%. Considerando el PSC, el rango del VAN es 969-1.006 [MM USD] y la TIR posee rangos de 16,5-16,6[%]. Como se observa, al incluir el PSC, la rentabilidad del proyecto aumenta, debido al incremento en los beneficios asociados a la disminución de emisión de CO<sub>2</sub> por menor uso de combustible debido a la descongestión de la carretera.

## Evaluación social proyecto ferroviario

A partir del análisis de las emisiones del Proyecto de Ampliación de la carretera base, se obtiene una variación de los costos sociales en base a los distintos valores de PSC para la etapa de construcción y mantenimiento en un rango de 3,4-7,3 [MM USD] y para la etapa de operación se obtuvo el siguiente rango 89,4-191,2 [MM USD], de ello se puede apreciar que por cada tonelada emitida en las etapas de construcción y mantenimiento, se evitan cerca de 26 toneladas asociadas a la etapa de operación.

En cuanto a los indicadores de rentabilidad, el VAN sin considerar el PSC es de \$1.459 MM con una TIR de 18,4%. Considerando el PSC, el rango del VAN es 1.557-1.643 [MM USD] y la TIR posee rangos de 18,9-19,4 [%]. Como se observa, al incluir el PSC, la rentabilidad del proyecto aumenta, debido al incremento en los beneficios asociados a la disminución de emisión de CO<sub>2</sub> por menor uso de combustible debido a la descongestión de la carretera y por la utilización de energía eléctrica en vez de combustible, que tiene asociado un menor factor de emisión.

## Evaluación social proyecto aviación

A partir del análisis de las emisiones de Proyecto de Ampliación de la carretera base, se obtienen una variación de los costos sociales en base a los distintos valores de PSC para la etapa de construcción y mantenimiento tienen un rango de 0,1 -0,3 [MM USD] y para la etapa de operación se obtuvo el siguiente rango -365,1 - -761,6 [MM USD], a diferencia de los otros modos de transporte analizados, en este caso no hay un beneficio asociado a la etapa de operación debido a que esta alternativa presenta emisiones mayores en comparación al caso de la carretera base congestionada. Adicionalmente, se puede apreciar que, por cada tonelada emitida en la etapa de construcción y mantenimiento, se emiten más de 3.000 toneladas en la etapa de operación.

En cuanto a los indicadores de rentabilidad, el VAN sin considerar el PSC es de \$-13.213 MM. Considerando el PSC, el rango del VAN es -13.569 MM - -13.975 [MM USD]. Debido a que los flujos del proyecto son negativos, no es posible calcular la TIR. Los flujos negativos se explican debido a que los viajes realizados no descongestionan la carretera base lo suficiente para generar beneficios por disminución en el tiempo de viaje ni ahorro de combustible. La incorporación del PSC acentúa este valor negativo debido a la gran cantidad de emisiones asociadas a la etapa de operación del proyecto.

En lo que respecta a huella de carbono unitaria marginal estimadas para los proyectos de transporte interurbanos, destaca el ferrocarril (mejor carga y 2º mejor para pasajeros) y el dirigible (mejor pasajeros y 2º mejor para carga) como los que presentan menores emisiones de GEI. Adicionalmente desde un punto de vista de rentabilidad social, también se destaca el proyecto ferroviario.

El proyecto de dirigible, no puede ser un sustituto para satisfacer la totalidad de la demanda del proyecto (se analizó un 4%) debido a que funciona bien para viajes mayores a 300km y no permite satisfacer idóneamente viajes de corta distancia (<50km). Sin embargo, pareciera ser una alternativa altamente competitiva con el transporte aéreo de distancias medias (400km-1.200km), dado que tiene tiempos de traslados similares, menores impactos territoriales y huellas de carbono mucho menores.

En términos de soluciones de alta escala de pasajeros y carga, el mejor desempeño económico y ambiental se obtiene para el Proyecto Ferroviario y en segundo lugar para la ampliación de carretera. Es importante destacar que en general los proyectos de ampliación de carreteras no realizan la evaluación ferroviaria.

Para los modos de transporte carretero y aéreo, las emisiones estimadas para la fase de uso representan más del 95% del total, por lo que es importante buscar alternativas que conlleven a la reducción de las emisiones en esta fase.

En términos del impacto en la evaluación social de los proyectos de camino, la incorporación de un PSC en el rango de los valores utilizados tendría un impacto positivo para la evaluación social de proyectos. Cabe destacar, que a mayor PSC la rentabilidad mejora para el caso del Ferrocarril y la ampliación de la carretera. Por otro lado, es recomendable hacer análisis de los proyectos considerando periodos de tiempo más extensos (al menos 40 años).

En términos de impacto total de emisiones, el caso base (sin proyecto) generaba emisiones por 49,4 millones de toneladas de CO<sub>2</sub>e en los 40 años considerados para su ciclo de vida. La opción que permite alcanzar mayor reducción (15, 8 MMTon CO<sub>2</sub>e) es el proyecto ferroviario, seguido por la ampliación de la carretera (8 MMTon CO<sub>2</sub>e) y el dirigible (2,6 MMTon CO<sub>2</sub>e), por el contrario, el proyecto de aviación generaría un incremento de las emisiones (51 MMTon CO<sub>2</sub>e), siendo más del doble del caso base.

En términos de variación de los resultados, la principal diferencia está asociada a la matriz de generación de electricidad, lo que impacta en la huella de carbono de la operación de los proyectos ferroviarios. Las emisiones relacionadas con la etapa de operación varían entre 2,2-12 [gCO<sub>2</sub>eq/pkm] para transporte de pasajeros y 0,9-5,2 [gCO<sub>2</sub>e/Tkm] para carga, siendo Costa Rica el país con el menor valor asociado y Chile el mayor, la diferencia es casi 6 veces para la fase de operación y 2 veces en lo que es todo el ciclo de vida. lo que se debe a la diferencia en los Factores de emisión de sus matrices eléctricas. Con respecto a las emisiones relacionadas con la Construcción y Mantenimiento, en todos los casos menos en Chile, este valor es mayor en comparación con el de la etapa de Operación.

Se concluye que, para el caso analizado, para transporte interurbano de carga y pasajeros, la utilización de proyectos de ferrocarril, pueden ser una solución rentable socialmente y con beneficios de emisiones de CO<sub>2</sub>eq, la alternativa tradicional de ampliar una carretera es una solución válida, pero menos beneficiosa en términos de evaluación social y de emisiones de CO<sub>2</sub>eq. En términos de emisiones es destacable que la solución de dirigible es la opción de transporte con menor huella de carbono unitaria para transporte de pasajeros y la segunda en el caso de transporte de carga (tras ferrocarril), esto lo hace una alternativa interesante para analizar para proyectos que requieren movilizar de manera veloz y con un bajo impacto ambiental carga y/o pasajeros.

## Introducción

El cambio climático es resultado de las emisiones de gases de efecto invernadero que son generadas fundamentalmente por actividades antropogénicas que se emiten a la atmósfera como una consecuencia colateral de diferentes actividades económicas y estilos de vida. El cambio climático se manifiesta fundamentalmente en el aumento de temperatura, modificaciones en los patrones de precipitación, en alzas del nivel del mar, en reducciones de los glaciales y en cambios en los patrones climáticos extremos. Estos cambios o variabilidad climática inciden de diversas formas y tienen numerosas consecuencias sobre las actividades económicas, los estilos de vida, el bienestar de la población y la biodiversidad y ecosistemas.

Tomando en consideración sus causas y efectos, el cambio climático es uno de los grandes retos al que se enfrenta la humanidad en el presente siglo. La comunidad internacional a través del Acuerdo de París se comprometió a trabajar por mantener el aumento de la temperatura global por debajo de los 2°C y hacer un esfuerzo mayor para que este aumento no supere los 1.5°C, y en este contexto, los países presentaron a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático sus metas de reducción de emisiones de GEI mediante sus Contribuciones Nacionalmente Determinadas (NDCs, por su sigla en inglés). Los países de América Latina y el Caribe se han unido a este compromiso y, por lo tanto, al igual que los países del resto del mundo requieren avanzar hacia un cambio estructural con patrones de producción y de consumo que sean más sostenibles y compatibles con la meta climática. Muchos países para avanzar hacia este objetivo han realizado cambios regulatorios, a la política fiscal y a los incentivos económicos; sin embargo, el actual sistema de valoración de las emisiones no necesariamente toma en cuenta todas las variables relevantes y por lo tanto puede estar sesgado.

Muchos países para avanzar hacia este objetivo han realizado cambios regulatorios, a la política fiscal y a los incentivos económicos; sin embargo, el actual sistema de valoración de las emisiones no necesariamente toma en cuenta todas las variables relevantes y por lo tanto puede estar sesgado. Tomando en cuenta lo anterior, la CEPAL, en el marco del Programa EUROCLIMA+, ha estado impulsando la iniciativa regional Precio Social del Carbono (PSC) en países de América Latina y como parte de ello se están realizando estudios que midan el efecto del precio social del carbono en la inversión pública en sectores clave como la energía, transporte y la infraestructura de caminos. Durante

la primera reunión del grupo de trabajo de esta iniciativa los países que hacen parte de esta iniciativa solicitaron que al estudio sobre la infraestructura de caminos se le adicionara un análisis sobre la infraestructura férrea.

En este contexto, resulta importante poder contar con un estudio en el que se presenten los resultados de simulaciones con distintos precios social del carbono sobre una tipología de proyectos de inversión para diferentes modos de transporte interurbanos en los países seleccionados de América Latina. Este estudio será importante insumo para la toma de decisiones en la inversión pública.

## **Objetivos**

Dentro de los objetivos generales del presente estudio, se encuentra realizar simulaciones con distintos escenarios de precios social del carbono para distintas soluciones de infraestructura para el transporte interurbano en Chile, Costa Rica, Honduras, Nicaragua y Panamá, según la información disponible, y determinar cuál sería su impacto sobre una tipología de proyectos de inversión en este sector. Así mismo, se busca contar con simulaciones del precio social del carbono para proyectos de infraestructura asociada a distintos modos de transporte. Con este estudio también se pretende incentivar la generación de propuestas de políticas públicas frente al cambio climático que permitan contribuir al cumplimiento de las metas planteadas en sus NDCs.

## **I. Marco metodológico para el análisis del ciclo de vida de proyectos de transporte interurbano**

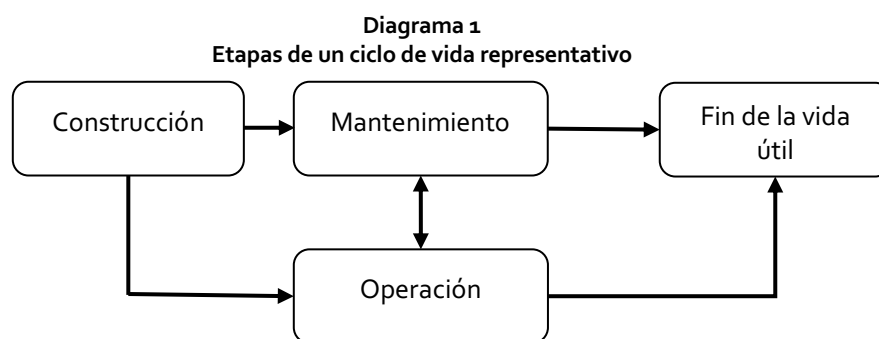
Para realizar un análisis del ciclo de vida de un proyecto de transporte interurbano representativo de países de América Latina, es necesario homogeneizar la experiencia regional y la experiencia internacional relacionada con la temática, lo que permitirá realizar ajustes metodológicos que representen de la mejor manera posible la realidad de cada uno de los países para los distintos tipos de transporte a revisar.

A continuación, se presenta una introducción general al análisis del ciclo de vida y la metodología en detalle para la estimación de las emisiones de CO<sub>2</sub> y otros gases de efecto invernadero, en las que se enfoca este estudio para cada uno de diferentes modos de transporte evaluados.

### **A. Introducción al análisis de ciclo de vida**

El análisis del ciclo de vida (ACV) de un producto es una metodología que intenta identificar, cuantificar y caracterizar los diferentes impactos ambientales potenciales, asociados a cada una de las etapas del ciclo de vida de un producto (Romero, 2003). Esta metodología puede ser aplicada a diferentes productos y servicios con el fin de cuantificar y analizar los impactos ambientales desagregado por etapa, lo cual entrega información relevante al momento de tomar decisiones.

El ciclo de vida propuesto para el presente estudio considera un esquema coherente, confiable y representativo cuyos resultados pudieran ser verificados y comparados con otras investigaciones o informes de literatura. En el diagrama 1 se presenta un esquema simplificado de las etapas de un ciclo de vida, el cual será considerado como base para los diferentes modos de transporte.



Fuente: Elaboración propia.

A partir del diagrama se diferencian cuatro grandes fases: Construcción/Fabricación, Operación, Mantenimiento y Disposición final. El detalle de cada proceso que genera emisiones de CO<sub>2</sub>, y que se considerará para realizar el análisis de ciclo de vida de los países en estudio, se describen en el cuadro 1.

**Cuadro 1**  
**Procedimientos que aportan a la huella de carbono de un proyecto**

| Etapa             | Procedimiento                                                                                                                              |
|-------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Construcción      | Extracción materias primas<br>Transporte materias primas<br>Producción material<br>Transporte material<br>Consumo energético de maquinaria |
| Operación         | Consumo de combustible de vehículos<br>Consumo de electricidad de vehículos                                                                |
| Mantenimiento     | Extracción materias primas<br>Transporte materias primas<br>Producción material<br>Transporte material<br>Consumo energético de maquinaria |
| Disposición final | Transporte de residuos<br>Disposición en vertederos<br>Disposición en relleno sanitario<br>Reciclaje<br>Reutilización                      |

Fuente: Elaboración propia a partir de Vicuña et al. (2020).

## B. Ciclo de vida proyectos de carretera

La presente sección explica el marco metodológico utilizado para analizar las emisiones de GEI en el ciclo de vida de un proyecto de infraestructura de caminos.

### 1. Antecedentes bibliográficos destacados

A continuación, se presenta un resumen de los antecedentes bibliográficos más relevantes en lo que respecta a análisis de ciclo de vida de un proyecto de infraestructura de caminos:



- Simulaciones del precio social del carbono en el sector Infraestructura en países seleccionados de América Latina y el Caribe” (Vicuña et al., 2020): En el documento se propone un marco conceptual para el cálculo de las emisiones de GEI en el ciclo de vida de un camino, describiendo las distintas etapas y ajustándolo a la realidad de los países bajo estudio, pero estas metodologías son extrapolables para otros países de la región de Latinoamérica y el Caribe. Como resultado se obtiene que la etapa de operación de una carretera es la que más aporta debido a las emisiones de los vehículos (sobre el 95% de las emisiones totales), además se analiza cómo afectan diferentes precios sociales del carbono en indicadores de rentabilidad. En todos los casos la rentabilidad social mejora, la TIR aumenta, entre 0,3 % y 1,3% y el VAN entre 6% y 17%, dependiendo del valor del precio social del carbono y del proyecto analizado, esto debido a que los proyectos mejoraban las condiciones de transporte lo que se ve reflejado en una disminución de en los costos de operación.
- Carbon Footprint and environmental impact of Railways Infrastructure (Tuchschnid et al., 2011): El estudio realiza un análisis del ciclo de vida detallado de elementos que forman parte de la infraestructura ferroviaria. Entrega información relevante sobre las obras civiles necesarias para el funcionamiento de una vía, lo cual incluye diferentes tipos de túneles, puentes, entre otros, además de presentar una metodología para la estimación total de las emisiones asociadas al ciclo de vida de la infraestructura asociada a este modo de transporte.
- Environmental assessment of road construction and maintenance policies using LCA (Jullien et al., 2014): El estudio presenta un análisis sobre la influencia de la construcción y mantenimiento para pavimento de asfalto y de concreto a través de un análisis del ciclo de vida. Se realiza para un camino con alto tráfico y un horizonte de evaluación de 30 años, llegando a la conclusión que el mantenimiento presenta alrededor de un tercio de las emisiones y propone otras políticas de mantenimiento con el fin de disminuir esta cifra.

## 2. Metodología y alcance a utilizar en el presente estudio

A continuación, se presenta la metodología a utilizar en el cálculo de las emisiones asociadas a un proyecto de carretera para transporte de pasajeros y de carga para cada una de las etapas del ciclo de vida a considerar.

### Etapas de construcción

Con respecto a la etapa de construcción, esta incluye tanto la producción de materiales como los elementos y actividades necesarias para la construcción de un camino o carretera.

Para este informe, no se detallan los elementos a considerar para el cálculo de las emisiones, tales como inventario y factores de emisión, sino que se utilizan valores dados por otros estudios.

El cuadro 2 presenta las emisiones asociadas a la etapa de construcción a partir de diferentes estudios considerados.

**Cuadro 2**  
**Emisiones de CO<sub>2</sub>e por construcción de pavimento**

| Autor                 | Material | Vida útil | tCO <sub>2</sub> e/km |
|-----------------------|----------|-----------|-----------------------|
| Vicuña et al. (2020)  | Concreto | 20        | 333                   |
| Jullien et al. (2014) | Concreto | 30        | 375                   |
| Promedio              |          |           | 354                   |
| Vicuña et al. (2020)  | Asfalto  | 20        | 86                    |
| Jullien et al. (2014) | Asfalto  | 30        | 100                   |
| Promedio              |          |           | 93                    |

Fuente: Elaboración propia.

Es importante destacar que las emisiones de CO<sub>2</sub>e se calcularon considerando la construcción de una pista, con el fin de poder comparar las emisiones de ambos estudios, ya que las estimaciones originales toman en cuenta otras dimensiones.

Por otra parte, el valor anterior solo toma en cuenta la estimación de las emisiones asociadas al pavimento, sin considerar otras obras civiles. Para esto, se utilizan los valores propuestos por Tuchschnid et al. (2011) para las emisiones de puentes y túneles para proyectos ferroviarios debido a que las características son similares. Por lo tanto, para estimar las emisiones totales de un proyecto, es necesario definir la cantidad y longitud de obras civiles asociado a los diferentes proyectos a evaluar.

El cuadro 3 presenta las emisiones asociadas a las obras civiles necesarias en una carretera para su correcto funcionamiento. Estas emisiones toman en cuenta las diferentes etapas del ciclo de vida sin contar la operación ya que estas están asociadas a las emisiones de los vehículos que transitan por estos.

**Cuadro 3**  
**Emisiones obras civiles para una carretera**

| Elemento de la red | Emisión de CO <sub>2</sub> e<br>(en kgCO <sub>2</sub> e/km año) |
|--------------------|-----------------------------------------------------------------|
| Puente < 200 m     | 67 534                                                          |
| Puente > 200 m     | 136 412                                                         |
| Túnel              | 169 619                                                         |

Fuente: Elaboración propia a partir de Tuchschnid et al. (2011).

Por lo tanto, las emisiones totales de una red dependerán de la cantidad de elementos que la conforman, lo que varía dependiendo de la geografía de cada país.

Finalmente, para obtener la huella de carbono asociada a esta etapa se utiliza el siguiente procedimiento.

- Determinación parámetros del proyecto a evaluar:
  - Longitud de las obras civiles ( $L_{oc}$ )
  - Longitud del pavimento ( $L_{pav}$ )
  - Horizonte de evaluación ( $HE$ ).
- Cálculo de las emisiones asociadas a cada elemento, multiplicando los parámetros anteriores con los valores de los cuadros 2 y 3 respectivamente.

$$E_{pav} = L_{pav}[km] * Emisión\ pavimentación \left[ \frac{kgCO_2}{km} \right]$$

$$E_{oc}[kgCO_2] = L_{oc}[km] * HE[año] * Emisiones\ elementos \left[ \frac{kgCO_2}{km\ año} \right]$$

- Cálculo de las emisiones totales asociadas al proyecto.

$$E_{total}[kgCO_2] = \sum E_{oc}[kgCO_2] + E_{pav}[kgCO_2]$$

- Cálculo de emisiones por Gross tkm. Este valor se calcula tomando en cuenta el peso de los vehículos, pasajeros y carga.

$$Huella\ total = E_{total}/Gt\ km$$

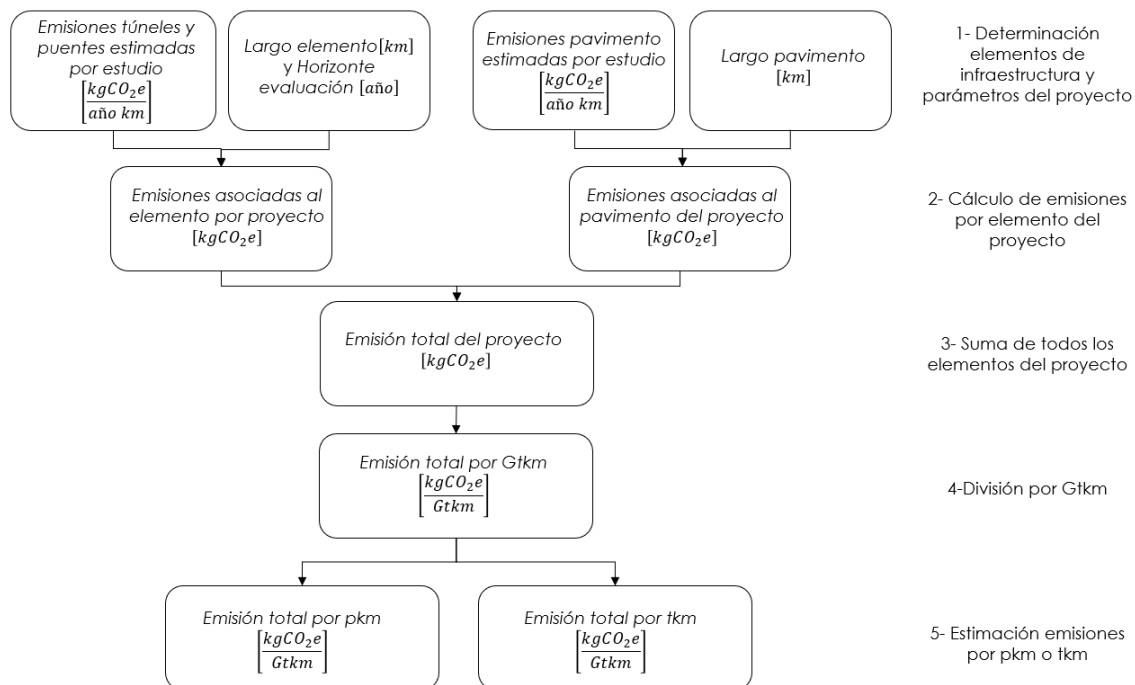
- Cálculo de huella de carbono por pasajero-kilómetro y tonelada-kilómetro

$$\text{Huella Carbono pasajeros} = \text{Huella total} * f_{pas}$$

$$\text{Huella Carbono carga} = \text{Huella total} * f_{carga}$$

Donde  $f_{pas} = Gtkm/pkm$  y  $f_{carga} = Gtkm/tkm$

**Diagrama 2**  
**Procedimiento cálculo de huella de carbono asociado a la etapa de construcción**



Fuente: Elaboración propia.

## Etapa de operación

La etapa de operación de la carretera está directamente relacionada con las emisiones asociadas a la operación de los diferentes vehículos, por lo que se considera como la suma de las emisiones ocasionadas por el tránsito vehicular a lo largo del horizonte de evaluación.

Para estimar las emisiones asociadas a vehículos dedicados al transporte tanto de pasajeros como de carga, se toman en cuenta los factores de emisión asociados a la gasolina y diésel, además de los rendimientos de los diferentes tipos de vehículos a considerar, los cuales se presentan en los cuadros 4 y 5 respectivamente.

**Cuadro 4**  
**Factores de emisión de combustibles**  
(En kgCO<sub>2</sub>e/l)

|                   | Gasolina | Diésel |
|-------------------|----------|--------|
| Factor de emisión | 2,24     | 2,55   |

Fuente: Elaboración propia a partir de IPCC (2006).

**Cuadro 5**  
**Rendimientos por tipo de vehículo**

| Tipo de vehículo    | Rendimiento gasolina<br>(en km/l) |        |
|---------------------|-----------------------------------|--------|
|                     | Gasolina                          | Diesel |
| Automóvil           | 15,6                              | 16     |
| Camión 2 ejes       | 2,35                              | 4,26   |
| Camión 3 o más ejes | -                                 | 1,61   |
| Buses               | -                                 | 3,50   |

Fuente: Elaboración propia a partir de Vicuña et al. (2020).

Los rendimientos por tipo de vehículo son obtenidos comparando diferentes modelos representativos para cada uno de estos.

Con esta información es posible estimar la huella de carbono asociado a cada tipo de vehículo por kilómetro recorrido a través de la siguiente relación:

$$Huella\ de\ carbono\ \left[ \frac{gr\ CO_2e}{km} \right] = \frac{Factor\ emisión\ [kgCO_2e/l]}{Rendimiento[km/l]} * 1000$$

Las emisiones correspondientes a cada tipo de vehículo según su combustible se presentan en el cuadro 6.

**Cuadro 6**  
**Emisiones de CO<sub>2</sub>e por tipo de vehículo**

| Tipo de vehículo    | Emisiones<br>(en grCO <sub>2</sub> /km) |        |
|---------------------|-----------------------------------------|--------|
|                     | Gasolina                                | Diesel |
| Automóvil           | 143,7                                   | 140,1  |
| Camión 2 ejes       | 953,2                                   | 525,4  |
| Camión 3 o más ejes | -                                       | 1386,2 |
| Buses               | -                                       | 525,4  |

Fuente: Elaboración propia.

Con esto es posible calcular las emisiones totales del ciclo de vida de una carretera por cada tipo de vehículo considerando las longitudes de los proyectos correspondientes, el flujo vehicular asociado y el horizonte de evaluación del proyecto.

### **Etapas de mantenimiento**

Con respecto a las emisiones asociadas a la etapa de mantenimiento, se considera una de las políticas utilizadas por Jullien et al. (2014), para concreto y para asfalto. En el cuadro 7 presenta las emisiones asociadas a esta etapa del ciclo de vida.

**Cuadro 7**  
**Emisiones asociadas al mantenimiento de una carretera**

| Material | tCO <sub>2</sub> e/km año |
|----------|---------------------------|
| Concreto | 9,3                       |
| Asfalto  | 2,0                       |

Fuente: Elaboración propia a partir de Jullien et al. (2014).

Al igual que para la etapa de construcción, se consideró la construcción de una pista para que los resultados sean coherentes y comparables entre ellos, por lo que se modificó el resultado original del estudio.

### **Etapas de disposición final**

No se considera emisiones asociadas a la etapa de disposición final, se asume que luego de finalizar el periodo de la evaluación del proyecto, este sigue funcionando, considerando que las mantenciones han sido suficientes para este propósito.

## **C. Ciclo de vida de proyectos ferroviarios**

La presente sección explica el marco metodológico utilizado para analizar las emisiones de GEI en el ciclo de vida de un proyecto de infraestructura ferroviaria.

### **Antecedentes bibliográficos destacados**

A continuación, se presenta un resumen de los antecedentes bibliográficos más relevantes en lo que respecta a análisis de ciclo de vida de un proyecto de infraestructura ferroviaria:

- Carbon Footprint and environmental impact of Railways Infrastructure (Tuchschnid et al., 2011): en este estudio se calculan las emisiones de CO<sub>2</sub> asociadas a cada etapa de la fase de Construcción de un proyecto ferroviario, basando su análisis en el estudio "Treibhausgasemissionen durch die Schieneninfrastruktur und Schienenfahrzeuge in Deutschland" (Schmied & Mottschall, 2010). Entre los resultados es posible observar que la construcción de puentes, túneles y estaciones ferroviarias genera la mayor cantidad de emisiones de CO<sub>2</sub> de la fase de Construcción, mientras que los trabajos de tierra, las traviesas y ballasto, el carril, entre otras, son etapas que no aportan en gran magnitud a las emisiones de esta fase. Luego, se combinan los impactos de cada etapa para generar la huella de carbono para la Construcción, Operación y Mantenimiento de la red ferroviaria, para pasajeros y carga, de nueve países europeos y asiáticos. Como conclusión se obtiene que, los países con producción de electricidad en base a carbono presentan mayores emisiones de CO<sub>2</sub> en la fase de Operación de trenes (Alemania 87% y Bélgica 81%), mientras que, los países con producción de electricidad con bajo contenido de carbono, como por ejemplo energía hidroeléctrica o nuclear, presentan mayor proporción para la Infraestructura (Suiza 96% y Noruega 98%).
- EcoPassenger: Environmental Methodology and Data Update 2016 (Knörr & Hüttermann, 2016): EcoPassenger nace como iniciativa de la Unión Internacional de Ferrocarriles (UIC) para aumentar la conciencia entre los usuarios del transporte acerca de las consecuencias del uso de diferentes medios de transporte. EcoPassenger es una herramienta de internet, fácil de usar, con una metodología científica sólida, la cual permite comparar el consumo de energía, el CO<sub>2</sub> y las emisiones atmosféricas para aviones, automóviles y trenes para el transporte de pasajeros. En este documento se describe la metodología, datos y supuestos que utiliza la herramienta. Por ejemplo, se muestran los consumos específicos de energía para trenes

Europeos: Eléctrico 88,2 Wh/pkm y 30,9 Wh/asiento-km; Diésel 25,2 g/pkm y 8,8 g/asiento-km, también se muestran los factores de emisión para combustibles: Diésel fósil 3,14 gCO<sub>2</sub>/kg Diésel (del tanque a la rueda) y 3,62 gCO<sub>2</sub>/kg Diésel (del pozo a la rueda).

- **EcoTransIT World: Ecological Transport Information Tool for Worldwide Transports Methodology and Data Update 2018** (ifeu heidelberg; INFRAS Berne; IVE Hannover, 2018): EcoTransIT World fue desarrollada por el Instituto para la Investigación Energética y Medioambiental (ifeu) de Heidelberg y los Consultores de Gestión ferroviaria (RMCon) con el fin de cuantificar las emisiones del transporte de mercancías. EcoTransIT compara el consumo energético y las emisiones de las mercancías transportadas por tren, camión, barco y avión. EcoTransIT puede ser utilizado para rutas que atraviesan Austria, Bélgica, Dinamarca, Finlandia, Francia, Alemania, Italia, Luxemburgo, Holanda, Noruega, Polonia, Portugal, Eslovaquia, Eslovenia, España, Suecia, República Checa, Reino Unido y Hungría. (Knörr et al., 2018). En este documento se describe la metodología, datos y supuestos que utiliza la herramienta. Por ejemplo, se muestran los consumos energéticos específicos para distintos trenes según su peso bruto y con cierto nivel de carga, de esta manera un tren eléctrico promedio de 1000 t con una carga del 40% del peso bruto tiene un consumo específico de energía de 63,9 Wh/tkm, mientras que, si la carga es del 60% de su peso, el consumo específico disminuye a 42,7 Wh/tkm; de la misma manera se muestran los consumos específicos de energía para trenes a Diésel.
- **Energy consumption and related air pollution for Scandinavian electric passenger trains** (Andersson, E., & Lukaszewicz, P., 2006): El estudio realiza una revisión y comparación del consumo eléctrico y las emisiones de CO<sub>2</sub> de diferentes trenes en funcionamiento en Suecia. Cuando el factor de carga es cercano al 60% el consumo es de aproximadamente 0,08 kWh/pkm. A diferencia de otros estudios, este realiza la comparación tomando en cuenta el consumo eléctrico real del funcionamiento por más de 10 años. Por último, destacan el aumento de la eficiencia de la red eléctrica, el mejoramiento de aerodinámica y la recuperación de la electricidad cuando se frena, lo que ha resultado en trenes 25-30% más eficientes en comparación a modelos anteriores.

### **Metodología y alcance a utilizar en el presente estudio**

A continuación, se presenta la metodología a utilizar en el cálculo de las emisiones asociadas a un proyecto ferroviario para transporte de pasajeros y de carga para cada una de las etapas del ciclo de vida.

#### **Etapas de construcción y mantenimiento**

El estudio de Tuchschnid et al. (2011) estima las emisiones de distintos contaminantes asociadas a los diferentes elementos que conforman la red tomando en cuenta las etapas de construcción y mantenimiento. A continuación, se presentan las principales actividades y elementos que se toman en cuenta:

- Movimiento de tierras
- Puentes
- Túneles
- Durmientes y balasto
- Rieles
- Postes, catenarias y cableado
- Señalización y comunicación
- Construcción y mantenimiento de edificios relevantes

Por lo tanto, las emisiones asociadas a la infraestructura están asociadas principalmente a los elementos que componen un kilómetro de vía en un terreno regular que no requiera movimientos de tierra importantes como un túnel u otras obras civiles como un puente o viaducto. Con respecto a las obras civiles necesarias, estas tienen sus emisiones asociadas tomando en cuenta la materialidad, longitud, entre otros aspectos y deben ser tomadas como un elemento aparte. Las emisiones asociadas a cada uno de los elementos mencionados anteriormente se encuentran en detalle en anexo 2.

Por lo tanto, las emisiones totales de una red dependerán de la cantidad de elementos que la conforman, lo que varía dependiendo de la geografía de cada país, tipos de rieles a utilizar, y otras variables a considerar.

Finalmente, al igual que para los proyectos de carretera, para obtener la huella de carbono asociada a esta etapa se utiliza el siguiente procedimiento.

- Determinación parámetros del proyecto a evaluar:
  - Longitud de las obras civiles ( $L_{oc}$ ) a considerar.
  - Horizonte de evaluación ( $HE$ ).
  - Kilómetros viajados por pasajeros.
  - Kilómetros viajados por tonelada.
- Cálculo de las emisiones asociadas a cada elemento, multiplicando los parámetros anteriores con los valores del anexo 2.

$$E_{oc}[kgCO_2] = L_{oc}[km] * HE[año] * Emisión\ elemento \left[ \frac{kgCO_2}{km\ año} \right]$$

- Cálculo de las emisiones totales asociadas al proyecto.

$$E_{total}[kgCO_2] = \sum E_{oc}[kgCO_2]$$

- Cálculo de emisiones por Gross tkm. Este valor se calcula tomando en cuenta el peso de los vehículos, pasajeros y carga.

$$Huella\ total = E_{total}/Gt\ km$$

- Cálculo de huella de carbono por pasajero-kilómetro y tonelada-kilómetro

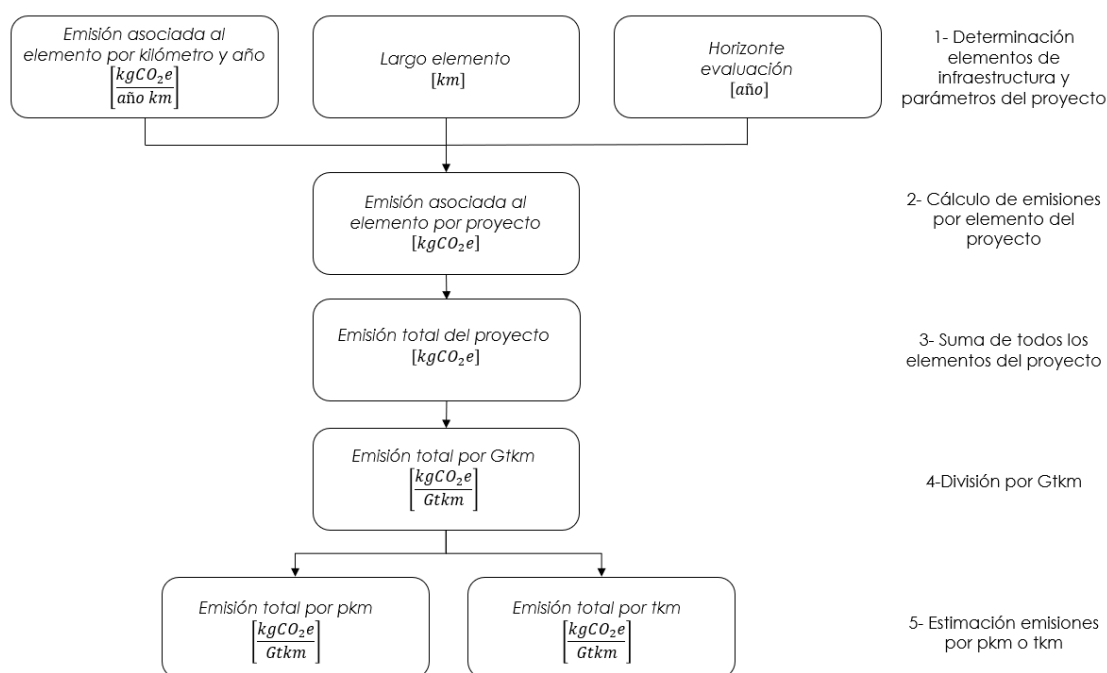
$$Huella\ Carbono\ pasajeros = Huella\ total * f_{pas}$$

$$Huella\ Carbono\ carga = Huella\ total * f_{carga}$$

$$\text{Donde } f_{pas} = Gt\ km/p\ km \text{ y } f_{carga} = Gt\ km/t\ km$$

El diagrama 3 presenta un esquema en modo resumen para la estimación de la huella de carbono, tanto para transporte de pasajeros como de carga para la etapa de construcción de un proyecto ferroviario.

**Diagrama 3**  
**Procedimiento cálculo de huella de carbono asociado a la construcción de un proyecto ferroviario**



Fuente: Elaboración propia.

## Etapa de operación

En primer lugar, es necesario definir los modelos de trenes a evaluar y sus emisiones asociadas a su operación.

Las “Declaraciones Ambientales de Producto” (EPD, por sus siglas en inglés) presentan la información ambiental cuantificada sobre el ciclo de vida de los productos para permitir la comparación entre productos que cumplen la misma función.

Para calcular las emisiones asociadas a la operación de trenes de pasajeros y carga, se estima su consumo eléctrico a partir de la información de los EPD. En el cuadro 8 presenta el consumo eléctrico de los modelos de trenes de pasajeros analizados, asumiendo que todos los asientos de los trenes son utilizados.

**Cuadro 8**  
**Consumo eléctrico trenes de pasajeros**  
 (En kWh/pkm)

| Modelo             | Consumo eléctrico | Fuente                                      |
|--------------------|-------------------|---------------------------------------------|
| Regina X55         | 0,0326            | (Bombardier Transportation Sweden AB, 2012) |
| Spacium            | 0,0172            | (Bombardier Transportation, 2011)           |
| Coradia Polyvalent | 0,0270            | (Alstom, 2015)                              |
| Talent 2           | 0,0287            | (Bombardier, 2012)                          |

Fuente: Elaboración propia a partir de otras fuentes.



Con el consumo eléctrico de los modelos y los factores de emisión de cada país, es posible obtener las emisiones asociadas a la etapa de operación por pasajero-kilómetro para los diferentes países, completando así las emisiones por ciclo de vida de un tren.

Por otra parte, en el anexo 3 se encuentran las fichas resumen para cada modelo de tren de pasajeros, en donde se especifica el país de operación, la capacidad del tren, la distancia recorrida al año, la vida útil, entre otros aspectos relevantes.

De manera análoga, es posible hacer un análisis para el transporte de carga. Para esto, se compararán dos modelos de locomotoras, estimando su consumo eléctrico a partir de la información de los EPD. El cuadro 9 presenta el consumo eléctrico de los modelos de trenes de carga analizados.

**Cuadro 9**  
**Consumo eléctrico trenes de carga**

| Modelo        | Consumo Eléctrico<br>(en kWh/tkm) | Fuente                           |
|---------------|-----------------------------------|----------------------------------|
| TRAXX F140 MS | 0,012                             | Bombardier Transportation (2006) |
| Prima II      | 0,013                             | Alstom (2006b)                   |

Fuente: Elaboración propia.

En el anexo 4 se encuentran las fichas resumen para cada modelo, en donde se especifica el país de operación, el consumo de energía del tren, el peso de la locomotora y el peso total, la distancia recorrida al año, la velocidad máxima que alcanza y la vida útil.

Finalmente, tomando en cuenta lo anterior, es posible estimar las emisiones totales del ciclo de vida de un tren considerando las longitudes de los proyectos correspondientes, el horizonte de evaluación, cantidad de pasajeros transportados y kilómetros recorridos por pasajero.

### **Etapas de disposición final**

No se considera emisiones asociadas a la etapa de disposición final, se asume que luego de finalizar el periodo de la evaluación del proyecto, este sigue funcionando, considerando que las mantenciones han sido suficientes para este propósito.

### **Ciclo de vida de proyectos de aviación**

La presente sección explica el marco metodológico utilizado para analizar las emisiones de GEI en el ciclo de vida de un proyecto de infraestructura de aviación.

### **Antecedentes bibliográficos destacados**

A continuación, se presenta un resumen de los antecedentes bibliográficos más relevantes en lo que respecta a análisis de ciclo de vida de un proyecto de infraestructura de aviación:

- Life Cycle Assessment of the Airbus A330-200 Aircraft (Lopes, 2010): este paper presenta el ciclo de vida completo para un avión Airbus 330, realizando un análisis y cálculo detallado para cada una de sus etapas. Se concluye que el 99% de las emisiones tomando en cuenta el ciclo de vida completo, corresponde a la quema de combustible durante su operación. También toma en cuenta la construcción y el mantenimiento del aeropuerto en sus cálculos.
- Aircraft fuel burn performance study: A data-enhanced modeling approach (Yanto, J., & Liem, R. P., 2018): esta investigación realiza una regresión lineal de la utilización de combustible de diferentes modelos de aviones utilizando información y datos de Base of Aircraft Data (BADA) y Bureau of Transportation Statistics (BTS) flight missions' database 2015. A través

de los datos reales y simulaciones logran obtener una ecuación para más de 60 modelos de avión, con un porcentaje de error pequeño y también presenta como aumenta este error al agrupar ciertos modelos debido a sus características similares. Para calcular la cantidad de combustible en un viaje, se utilizan las variables de Payload o carga total, la cual solo toma en cuenta a los pasajeros y/o carga y la distancia a recorrer total a recorrer.

- ICAO Carbon Emissions Calculator Methodology (2014). (ICAO Organización de Aviación Civil Internacional): este documento presenta una metodología general para estimar las emisiones de CO<sub>2</sub> generadas por un pasajero en un viaje. Esta es la base de una herramienta de internet bajo el mismo nombre, fácil de usar, con una metodología científica sólida, la cual permite calcular las emisiones de CO<sub>2</sub> generadas por un pasajero en un viaje solamente eligiendo el origen y el destino.

### Metodología y alcance a utilizar en el presente estudio

A continuación, se presenta la metodología a utilizar en el cálculo de las emisiones asociadas a un proyecto de aviación para transporte de pasajeros y de carga para cada una de las etapas del ciclo de vida a considerar.

#### Etapas de construcción y mantenimiento

Lopes (2010) propone un valor de  $7,46E-05$  gCO<sub>2</sub>e/pkm, calculado a través de Ecoinvent que incluye la construcción y mantención de un aeropuerto. En el estudio se menciona que Ecoinvent presenta una gran incertidumbre frente a la magnitud de este valor debido a la vida útil de un aeropuerto, la frecuencia de vuelos asociados y la cantidad de pasajeros y kilómetros recorridos por cada vuelo.

#### Etapas de operación

Según Lopes (2010) la etapa de operación representa más del 99% de las emisiones asociadas a la vida útil de un Airbus 330.

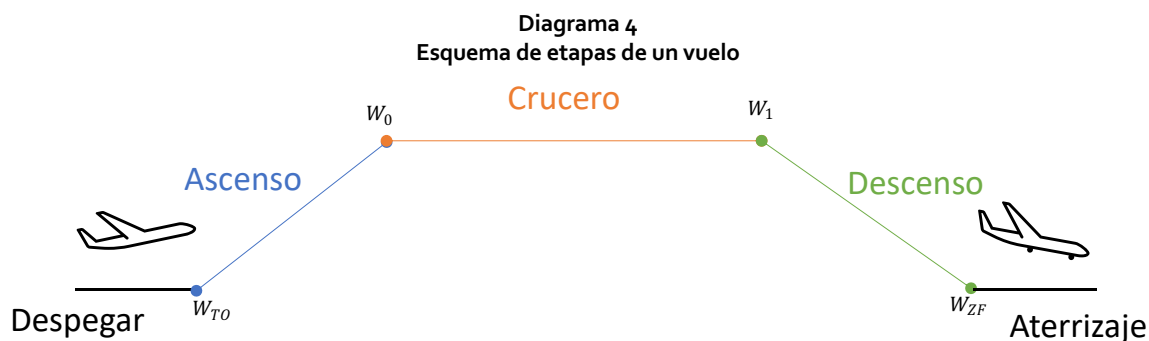
Para estimar las emisiones de esta etapa, en primer lugar, se determinaron los modelos de avión utilizados comúnmente en viajes de corta distancia, en este caso de menos de 1000 kms, con la herramienta EcoTransit, EcoPassenger y la herramienta online de ICAO. Luego, se tomaron en cuenta los modelos de avión más utilizados a nivel mundial para pasajeros y carga para finalmente realizar el análisis los modelos Airbus 319, Airbus 320 y Boeing 737. Estos modelos presentan características similares respecto a su utilización, dimensiones y capacidad tanto de pasajeros como de carga, las cuales se presentan en el cuadro 10.

**Cuadro 10**  
**Dimensiones de modelos de aviones**

| Modelo         | Cantidad de asientos | Longitud (m) | Ancho (m) |
|----------------|----------------------|--------------|-----------|
| Airbus 320     | 174                  | 44,5         | 34,1      |
| Airbus 319     | 156                  | 33,8         | 34,1      |
| Boeing 737-300 | 148                  | 34,3         | 35,8      |

Fuente: Elaboración propia a partir de Airbus (2005b), Airbus (2005a) y Boeing (2006).

Luego, es necesario analizar las etapas de un vuelo y la cantidad de combustible asociado a cada una. El diagrama 4 presenta las etapas de un vuelo, pudiendo incluso no tener la fase de Crucero (*Cruise*) si es que el vuelo es corto. La importancia de esto recae en que la etapa de Despegue (*Climb*) y de Descenso (*Descent*) utilizan una cantidad de combustible mayor a la de crucero, lo que hace que varíe la cantidad de emisiones por pasajero-kilómetro con la longitud de los viajes. Es decir, para vuelos cortos hay una mayor cantidad de emisiones por kilómetros en comparación a vuelos largos.



Fuente: Elaboración propia.

Debido a lo anterior, se utilizan los modelos matemáticos propuestos por Yanto & Liem (2018) con el fin de determinar la cantidad de combustible asociado a diferentes longitudes de transporte a analizar tomando en cuenta el aporte de las diferentes etapas de vuelo. Este estudio analiza diferentes bases de datos y realiza simulaciones que permiten plantear un modelo de regresión lineal para diferentes aviones. El cuadro 11 presenta los modelos de regresión para cada modelo de avión, el número de vuelos analizados y el coeficiente de variación del modelo.

**Cuadro 11**  
**Modelos de regresión lineal para diferentes modelos de avión**

| Modelo Avión          | Modelo de regresión             | N° de vuelos | $R^2$ |
|-----------------------|---------------------------------|--------------|-------|
| Airbus Industrie A319 | $W_f = 2.059R + 0,088P + 164,9$ | 24 113       | 0,996 |
| Airbus Industrie A320 | $W_f = 2.256R + 0,071P + 161,2$ | 29 175       | 0,997 |
| Boeing 737-300        | $W_f = 2,375R + 0,089P + 31,5$  | 11 243       | 0,997 |

Fuente: Elaboración propia a partir de Yanto & Liem (2018).

Donde la variable  $R$  es la cantidad de kilómetros recorridos y  $P$  la carga en kilogramos, la cual está dada por la cantidad de pasajeros o transporte de carga. En los 3 casos, el número de vuelos tomados en cuenta es sobre los 10.000, logrando un valor de  $R^2$  bastante alto, lo que significa que el modelo se ajusta bastante bien a los datos analizados. También es importante notar que la variable  $R$ , asociada a la longitud del vuelo, tiene un impacto mayor en la cantidad de combustible utilizado que la carga del avión.

A continuación, utilizando como base la metodología propuesta por ICAO (2014) para el cálculo de emisiones por pasajero-kilómetro, se proponen los siguientes pasos para estimar las emisiones por pasajero-kilómetro y tonelada-kilómetro según corresponda:

- Definición de cantidad de pasajeros o carga a transportar y longitud del vuelo.
- Estimación de la cantidad de combustible utilizado en el vuelo  $W_f$  con modelos de regresión presentados en el cuadro 11.
- Cálculo de las emisiones totales utilizando el factor de emisión correspondiente, a través de la siguiente relación:

$$\text{Emisión viaje [kgCO}_2\text{]} = 3,16 \left[ \frac{\text{kg CO}_2}{\text{kg combustible}} \right] * W_f [\text{kg combustible}]$$

- Cálculo de las emisiones de CO<sub>2</sub> por pasajero-kilómetro o tonelada-kilómetro tomando en cuenta los parámetros del punto 2.

## **Etapas de disposición final**

No se considera emisiones asociadas a la etapa de disposición final, se asume que luego de finalizar el periodo de la evaluación del proyecto, este sigue funcionando, considerando que las mantenciones han sido suficientes para este propósito.

## **Ciclo de vida de proyectos de dirigibles**

Los dirigibles son una alternativa de transporte aéreo de mayor eficiencia en términos de consumo de energía, pero con un desarrollo acotado a nivel global, debido a la mala reputación que adquirieron tras el accidente del Hindenburg en 1937. Sin embargo, los dirigibles actuales utilizan Helio, lo que los hace más seguros. Las principales ventajas son que es una forma de transporte económico, alta capacidad de carga, facilidad de aterrizaje (sin requerir infraestructura sofisticada), mayor autonomía de vuelo, silenciosos y menores emisiones contaminantes. Esto último lo hacen una posible solución de transporte interurbano sostenible.

A pesar de ser un modo de transporte en desarrollo, solo se obtuvo información a partir de la página web de "Hybrid Air Vehicles"<sup>1</sup>. Esta fuente presenta las emisiones asociadas a un viaje de 423 kilómetros entre Oslo y Estocolmo, el que toma 6 horas y 33 minutos y produciría emisiones de 4,58 kg de CO<sub>2</sub> por pasajero, debido a la falta de información y detalles de este último valor, se asume que este corresponde a la etapa de Operación del ciclo de vida de un dirigible.

A partir del diagrama anterior, se calculan las emisiones de CO<sub>2</sub> totales por viaje. Para esto se considera que el viaje es realizado por 72 personas, equivalente al 80% de la capacidad máxima del dirigible y se obtiene un total de 329,7 kg CO<sub>2</sub>.

Al no ser posible realizar un estudio más acabado sobre este modo de transporte, solo se realiza una comparación de la huella de carbono de este modo de transporte, tomando en cuenta la etapa de operación.

---

<sup>1</sup> [https://www.hybridairvehicles.com/news-and-media/overview/insights/airlander-10-will-provide-a-new-option-for-regional-travel/?fbclid=IwARofyVxXmx4NJq1ukQjTGNDa78\\_yN6s\\_NoF1FJNrqnBMzZe1XwZL-uNL9l](https://www.hybridairvehicles.com/news-and-media/overview/insights/airlander-10-will-provide-a-new-option-for-regional-travel/?fbclid=IwARofyVxXmx4NJq1ukQjTGNDa78_yN6s_NoF1FJNrqnBMzZe1XwZL-uNL9l).

## II. Marco metodológico para la incorporación del PSC en la evaluación de proyectos sociales

Uno de los principales objetivos de este estudio, es incorporar el Precio Social del Carbono (PSC) a la evaluación social de diferentes proyectos de transporte con el fin de determinar cómo es que afecta a los principales indicadores de rentabilidad.

El PSC permite incorporar dentro de las evaluaciones de proyectos los beneficios o costos sociales por disminuir o aumentar las emisiones de Gases de Efecto Invernadero, es decir, para valorar cambios en las emisiones de CO<sub>2</sub> equivalentes (Ministerio de Desarrollo Social, 2017a).

Para la evaluación social de los diferentes proyectos se analizará como influye la incorporación del PSC en los costos sociales asociados a la construcción de la infraestructura necesaria para los diferentes medios de transporte y los beneficios sociales asociados a la disminución de emisiones comparándolo con una situación base.

Por lo tanto, en primer lugar, es necesario calcular las emisiones asociadas a cada proyecto, tomando en cuenta los ciclos de vida presentados en la sección anterior, y valorizar socialmente estos. Se realizará el análisis para 3 escenarios según los precios de carbono propuestos por el Ministerio de Desarrollo Social de Chile, los cuales se presentan en el cuadro 12.

**Cuadro 12**  
**Precio social del carbono para Chile**  
(En USD/tCO<sub>2e</sub>)

| Valor inferior | Valor central | Valor superior |
|----------------|---------------|----------------|
| 20,2           | 32,5          | 43,2           |

Fuente: Elaboración propia a partir de Ministerio de Desarrollo Social (2017a).

Luego, se compararán los indicadores de rentabilidad (VAN y TIR, con el fin de evaluar el impacto que genera el PSC sobre los costos del proyecto, y si este es significativo o no, considerando también un escenario donde el costo de las emisiones de carbono no tenga un valor asociado.

Por último, se compararán las variaciones y costos o beneficios sociales asociados a los diferentes medios de transporte de pasajeros y carga para una misma longitud de proyecto, con el fin de analizar cómo influyen los mismos escenarios de precios de carbono en estos.

Para esto, es necesario definir una situación base con la que comparar la implementación de los diferentes proyectos, además de definir cuáles son los costos y beneficios sociales a considerar para las evaluaciones sociales correspondientes.

## A. Situación base

La situación base consiste en una carretera de doble vía, en buen estado y con una demanda base, la cual se espera que crezca en el futuro próximo, por lo que de no mejorar la infraestructura se producirán eventos de congestión, el detalle se presenta más adelante.

El cuadro 13 presenta las velocidades promedio de la carretera base sin y con el desarrollo de un proyecto que descongestione esta. Se asume una disminución del 20% de la velocidad de los vehículos cuando la carretera base presenta congestión.

**Cuadro 13**  
**Velocidades promedio en carretera base**

| Tipo de transporte | Velocidad promedio<br>(en km/hr) |              |
|--------------------|----------------------------------|--------------|
|                    | Sin proyecto                     | Con proyecto |
| Pasajeros          | 72                               | 90           |
| Carga              | 64                               | 80           |

Fuente: Elaboración propia.

## B. Costos y beneficios sociales considerados

Se consideran los siguientes costos y beneficios para evaluación social de los diferentes modos de transporte analizados.

### Beneficios por ahorros del tiempo de viaje

El beneficio por ahorros de tiempo de viaje se desprende de la comparación entre los consumos de tiempo para movilizarse entre los pares origen destino de análisis, en las situaciones con y sin proyecto, durante el horizonte de evaluación (Ministerio de Desarrollo Social, 2017b). El costo del tiempo de viaje de los vehículos que transitan por el camino depende fundamentalmente de:

- Velocidad de operación vehicular.
- Valor social del tiempo (VST) de los usuarios de los vehículos.

El cuadro 14 presenta el VST Interurbano terrestre propuestos para utilizar en el caso base.

**Cuadro 14**  
**Valor social del tiempo de tipo de vehículo**

| Tipo de transporte | VST<br>(en dólares/hora) | Unidad       |
|--------------------|--------------------------|--------------|
| Pasajeros          | 9,7                      | Por pasajero |
| Carga              | 0,78                     | Por tonelada |

Fuente: Elaboración propia a partir de Ministerio de Desarrollo Social y Familia de Chile (2020).

### Beneficio por ahorro de combustible

Este beneficio viene dado por la diferencia entre el combustible utilizado para cada uno de los proyectos evaluados y el caso base. En el caso del proyecto ferroviario se considera el costo de electricidad en reemplazo del combustible.

En el cuadro 15 se presenta los Precios Sociales de los combustibles utilizados:

**Cuadro 15**  
**Valor social de combustible por tipo de vehículo**

| Tipo de vehículo      | Precio social de combustible<br>(en USD/l) |
|-----------------------|--------------------------------------------|
| Automóvil             | 0,56                                       |
| Buses                 | 0,57                                       |
| Camiones 2 ejes       | 0,57                                       |
| Camiones 3 o más ejes | 0,57                                       |

Fuente: Elaboración propia a partir de Ministerio de Desarrollo Social y Familia de Chile (2020).

### Beneficio por disminución de emisiones

Este beneficio viene dado por la diferencia entre las emisiones de CO<sub>2</sub>e entre los proyectos a evaluar y el proyecto base, para las distintas etapas del ciclo de vida de estos.

Con respecto a la etapa de operación, se consideran la reducción de emisiones relacionado al uso de combustible por descongestionar la carretera base y la disminución o aumento de las emisiones asociadas a la operación de los vehículos de cada proyecto.

Por otra parte, con respecto a la etapa de construcción, no se considera un costo asociado a la infraestructura del caso base, dado que se parte de un proyecto base que se encuentra en operación y los requerimientos de mantención son equivalentes para el caso base y con proyecto.





### III. Definición del caso estudio

Para este estudio, se realiza la evaluación de cuatro proyectos, considerando distancias de viaje de 100, 200, 300 y 500 kilómetros, evaluando en cada uno de estos la utilización de distintos modos de transporte.

Para cada uno de estos escenarios, se estiman las emisiones asociadas a los ciclos de vida de los diferentes modos de transporte, calculando su huella de carbono en unidades de  $\text{grCO}_2\text{e/pkm}$  y  $\text{grCO}_2\text{e/tkm}$  para el transporte de pasajeros y carga respectivamente. Esta unidad es el resultado de una asignación de la cantidad total de gases de efecto invernadero emitidos en todas las fases del ciclo de vida del vehículo. La masa total de GEI emitidos se asigna a equivalentes de  $\text{CO}_2$  (Alstom, 2015).

Además, se estima el total de emisiones de los escenarios tomando en cuenta el horizonte de evaluación de estos.

Por otra parte, junto con este estudio, se entrega una planilla de cálculo que permite la comparación de emisiones de las diferentes alternativas de proyecto, dentro de las principales opciones a cambiar se destacan:

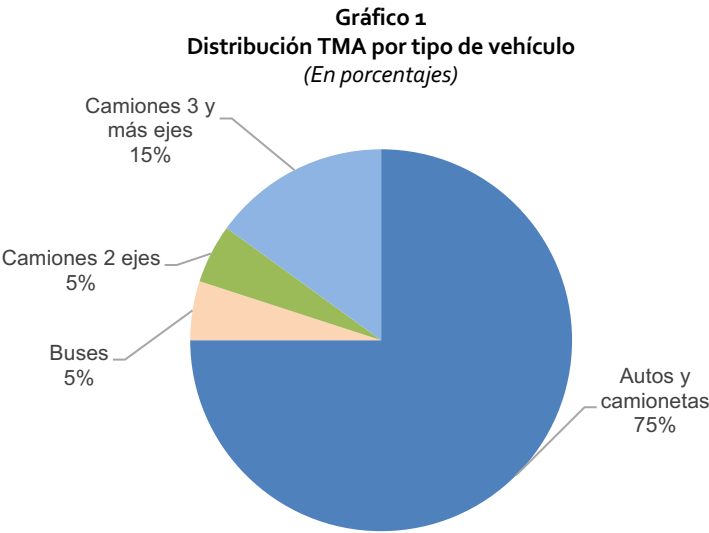
- Modelo de tren de pasajeros.
- Modelo de tren de carga.
- Demanda base.
- Variación de parámetros de la demanda como ocupación de vehículos.
- Factor de emisión eléctrica por país.

Esta herramienta, permite modificar las variables de los diferentes proyectos a evaluar, con el fin de adaptarlas de manera óptima a las características de los países. Mayor detalle sobre el funcionamiento y opciones disponibles se presenta en la planilla.

En primer lugar, se estima una demanda en común, tanto para transporte de pasajeros y de carga, con el fin de poder comparar las emisiones entre los diferentes modos de transporte. Luego, se definen los parámetros utilizados para la estimación de las emisiones de estos.

A. Demanda proyectada

Se propone la estimación de pasajeros y de carga a partir de la situación base. Se asume un Transito Medio Anual (TMA) de 30.000.000 vehículos para el año base, donde la distribución por tipo de vehículos se presenta en el gráfico 1, la cual se mantiene constante en composición en todo el periodo de análisis.



Fuente: Elaboración propia.

Utilizando el TMA anterior y las tasas de ocupación por tipo de vehículo presentados en el cuadro 16, se estima la demanda de pasajeros y de carga para de año 2020, la cual se presenta en el cuadro 17.

| Cuadro 16                      |            |       |
|--------------------------------|------------|-------|
| Ocupación por tipo de vehículo |            |       |
| Parámetro                      | Unidad     | Valor |
| Ocupación autos y camionetas   | p/vehículo | 1,5   |
| Ocupación buses                | p/vehículo | 20    |
| Carga camión 2 ejes            | t/vehículo | 2     |
| Carga camión 3 y más ejes      | t/vehículo | 10    |

Fuente: Elaboración propia.

**Cuadro 17**  
**Demanda base de pasajeros y de carga**

| Tipo de transporte | Unidad  | Valor      |
|--------------------|---------|------------|
| Pasajeros          | p/año   | 63 750 000 |
| Carga              | Ton/año | 48 000 000 |

Fuente: Elaboración propia.

A partir de la demanda base para pasajeros y carga, se asume una tasa de crecimiento para diferentes periodos de tiempo, presentados en el cuadro 18.

**Cuadro 18**  
**Tasa de crecimiento por año**  
(En porcentajes)

| Año   | Tasa de crecimiento |
|-------|---------------------|
| 1-10  | 3                   |
| 11-20 | 2                   |
| 21-40 | 1                   |

Fuente: Elaboración propia.

Luego, se estima el TMA por vehículo para los años del horizonte de evaluación utilizando la distribución del gráfico 1 anterior. Con esto, se obtiene la demanda total de pasajeros y carga por año.

Por otra parte, se asume que la construcción de un proyecto de infraestructura de transporte interurbano va a captar el 20% de esta demanda todos los años. El cuadro 19 presenta un resumen de la demanda total de pasajeros y de carga a utilizar en los diferentes modos de transporte para distintos años a evaluar. El detalle de la demanda de pasajeros y carga se encuentra el anexo 5.

**Cuadro 19**  
**Tránsito medio anual por tipo de transporte**

| Tipo de transporte/año | 1          | 10         | 20         | 30         | 40         |
|------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Pasajeros              | 13 132 500 | 17 1349 34 | 20 887 389 | 23 072 672 | 25 486 584 |
| Carga                  | 9 888 000  | 12 901 597 | 15 726 975 | 17 372 365 | 19 189 898 |

Fuente: Elaboración propia.

## B. Descripción de los proyectos tipo a analizar

A continuación, se describen los principales parámetros y características asociadas a los proyectos representativos tomando en cuenta las longitudes de los proyectos, los diferentes modos de transporte a evaluar y la metodología propuesta en la sección I para cada uno de estos.

Para todos los escenarios considerados en la evaluación social, se considera un horizonte de evaluación de 40 años y un factor de emisión por generación eléctrica de 0,322 kgCO<sub>2</sub>e/kWh, el cual corresponde al valor de Nicaragua ya que este representa un valor cercano al promedio de los 5 países a estudiar.

Además, se considera un largo promedio de viaje de 20 km y 80 km para transporte de pasajeros y carga respectivamente en el caso base. En el cuadro 20 presentan los valores de pasajeros-kilómetros y toneladas-kilómetros al asumir los largos anteriores tomando en cuenta el total para el horizonte de evaluación.

**Cuadro 20**  
**Proyección de la demanda total para el horizonte de evaluación (40 años)**

|           |               |
|-----------|---------------|
| Pasajeros | 15 119 MM pkm |
| Carga     | 45 536 MM tkm |

Fuente: Elaboración propia.

### 1. Proyecto ampliación carretera tipo

Como proyecto tipo para este modo de transporte, se plantea la construcción de una tercera pista de 3,6 metros de ancho, de concreto, en una carretera de doble vía en ambos sentidos. Esta permite el tránsito tanto para vehículos de pasajeros como de carga.

Como se mencionó en la sección II, luego de definir la longitud del proyecto, es necesario estimar otros elementos a considerar en un camino representativo. El cuadro 21 presenta las obras civiles propuestas para el correcto funcionamiento de una carretera para diferentes longitudes del proyecto.

**Cuadro 21**  
**Obras civiles asociadas a un camino representativo**

| Longitud<br>(en km) | Puente <200m<br>(en km) | Puente >200m<br>(en km) | Túnel<br>(en km) |
|---------------------|-------------------------|-------------------------|------------------|
| 100                 | 0,5                     | 0,2                     | 0,3              |
| 200                 | 0,6                     | 0,4                     | 0,3              |
| 300                 | 0,7                     | 0,6                     | 0,3              |
| 500                 | 1                       | 0,8                     | 0,3              |

Fuente: Elaboración propia.

Por otra parte, con respecto al tránsito vehicular, según datos del Ministerio de Desarrollo Social de Chile, se asume una distribución de vehículos que utilizan cada tipo de combustible, la cual se presenta en el cuadro 22.

**Cuadro 22**  
**Distribución por tipo de vehículos**  
(En porcentajes)

| Tipo de vehículo    | Gasolina | Diesel |
|---------------------|----------|--------|
| Automóvil           | 88       | 12     |
| Camión 2 ejes       | 30       | 70     |
| Camión 3 o más ejes | 0        | 100    |
| Buses               | 0        | 100    |

Fuente: Elaboración propia a partir de Ministerio de Desarrollo Social y Familia de Chile (2020).

Con respecto a los parámetros considerados para la evaluación social, se considera un costo social de construcción de \$ 4,1 MM USD por kilómetro construido, tomando como referencia el proyecto “Construcción de terceras pistas ruta 78. Tramo: Santiago-Talagante<sup>2</sup>”.

Además, el cuadro 23 presenta los largos de los viajes asumidos tanto para transporte de carga como de pasajeros.

**Cuadro 23**  
**Largos viajes promedios para ampliación de carretera**

| Tipo de transporte | Largo viaje promedio<br>(en km) |
|--------------------|---------------------------------|
| Pasajeros          | 20                              |
| Carga              | 80                              |

Fuente: Elaboración propia.

## 2. Proyecto ferroviario tipo

Con respecto a la infraestructura, se considera la construcción de una doble vía ferroviaria. Por otra parte, el cuadro 24 presenta los elementos y obras civiles que se toman en cuenta para las diferentes distancias.

**Cuadro 24**  
**Elementos infraestructura proyecto representativo**

| Longitud<br>(en km) | Puente<br><200m<br>(en km) | Puente<br>>200m<br>(en km) | Túnel<br>(en km) | Estación local<br>(u) | Parada local<br>(u) | Sitio para<br>mantenimiento<br>(u) |
|---------------------|----------------------------|----------------------------|------------------|-----------------------|---------------------|------------------------------------|
| 100                 | 0,5                        | 0,2                        | 0,3              | 1                     | 10                  | 1                                  |
| 200                 | 0,6                        | 0,4                        | 0,3              | 1                     | 12                  | 1                                  |
| 300                 | 0,7                        | 0,6                        | 0,3              | 2                     | 16                  | 1                                  |
| 500                 | 1                          | 0,8                        | 0,3              | 4                     | 20                  | 2                                  |

Fuente: Elaboración propia.

Con respecto a la cantidad de paradas locales, se realiza una revisión de diferentes redes europeas y se estima un promedio de una parada cada 10 kms para el tramo de 100 kms y cada 20 kms para el tramo de 500 kms. Por otra parte, es importante destacar que los puentes y túneles considerados son los mismos que para los proyectos de carreteras.

Con respecto al modelo de tren utilizado, el cuadro 25 presenta el consumo eléctrico y capacidad de transporte de pasajeros utilizando un factor de carga del 60%.

**Cuadro 25**  
**Características modelos de trenes de pasajeros a evaluar**

| Modelo             | Consumo Eléctrico<br>(en kWh/pkm) | Capacidad utilizada | Capacidad total |
|--------------------|-----------------------------------|---------------------|-----------------|
| Coradia Polyvalent | 0,029                             | 132                 | 220             |

Fuente: Elaboración propia a partir de Alstom (2015).

<sup>2</sup> [https://bip.ministeriodesarrollosocial.gob.cl/bip2-trabajo/mideplan\\_bip\\_ayuda/informes\\_rentabilidad/032016\\_IATE%203era%20Pistas%20Ruta%2078%20Stgo%20Talagante.pdf](https://bip.ministeriodesarrollosocial.gob.cl/bip2-trabajo/mideplan_bip_ayuda/informes_rentabilidad/032016_IATE%203era%20Pistas%20Ruta%2078%20Stgo%20Talagante.pdf).

El consumo de este modelo es estimado mediante la simulación de viajes con una distancia entre paradas mayor a 40 kilómetros, a diferencia del resto de los modelos presentados anteriormente los cuales son funcionales dentro de una ciudad con distancias cercanas a los 5 kilómetros entre paradas.

Análogo con los trenes de carga, el cuadro 26 presenta el modelo a evaluar con su consumo eléctrico correspondiente y la capacidad de carga de cada uno considerando un factor de carga del 80%.

**Cuadro 26**  
**Características modelos de trenes de carga a evaluar**

| Modelo   | Consumo Eléctrico<br>(en kWh/tkm) | Capacidad<br>utilizada (t) | Capacidad<br>total (t) |
|----------|-----------------------------------|----------------------------|------------------------|
| Prima II | 0,013                             | 1272                       | 1590                   |

Fuente: Elaboración propia a partir de Astrom (2006a).

Con respecto a los parámetros considerados para la evaluación social, se considera un costo social de construcción de \$ 6,35 MM USD por kilómetro construido, tomando como referencia el proyecto "TVS Tren Valparaíso-Santiago<sup>3</sup>", el cual presenta una demanda similar a la estimada para este caso. Por otra parte, el cuadro 27 presenta las velocidades promedio para transporte de pasajeros y de carga.

**Cuadro 27**  
**Velocidades promedio proyecto ferroviario**

|           | Velocidad promedio<br>(en km/hr) |
|-----------|----------------------------------|
| Pasajeros | 120                              |
| Carga     | 90                               |

Fuente: Elaboración propia.

Además, el cuadro 28 presenta los largos de los viajes asumidos tanto para transporte de carga como de pasajeros.

**Cuadro 28**  
**Largos viajes promedios para proyecto ferroviario**

| Tipo de transporte | Largo viaje promedio<br>(en km) |
|--------------------|---------------------------------|
| Pasajeros          | 20                              |
| Carga              | 80                              |

Fuente: Elaboración propia.

Por último, se considera un valor de 0,136 USD/kWh como costo social de energía eléctrica. Este representa el promedio de la tarifa media para todo el segmento industrial de países de Latinoamérica en enero de 2019 (Economía y energía, 2019).

<sup>3</sup> <https://sochitran.cl/static/upload/archivos/sochitran/4196/37/1532564213.pdf>.

### 3. Proyecto aviación tipo

Con respecto a la estimación de las emisiones de los aviones, se considera un peso promedio de 102 kilos por persona (Yanto & Liem 2018), lo cual incluye equipaje y el transporte de 120 personas, lo que es cercano a una ocupación del 80% de un Boeing 737-300 y una ocupación de 70 % para el Airbus A320.

Con respecto a la estimación de las emisiones de los aviones en transporte de carga, se considera una carga promedio de 12 toneladas por viaje, lo cual corresponde a cerca del 80% de la capacidad máxima de un Boeing 737. En ambos casos, se consideran las emisiones asociadas al promedio de estos tres modelos.

Con respecto al precio del combustible, se considera un valor de 0,4 USD/kg, teniendo en consideración el precio promedio del año 2019<sup>4</sup> en Chile.

El cuadro 29 presenta la velocidad de viaje promedio de un avión, sin considerar el tiempo necesario para cargar ni abordar el avión.

**Cuadro 29**  
**Velocidades promedio proyecto aviación**

| Tipo de transporte | Velocidad promedio<br>(en km/hr) |
|--------------------|----------------------------------|
| Pasajeros          | 400                              |
| Carga              | 400                              |

Fuente: Elaboración propia.

Además, el cuadro 30 presenta los largos de los viajes asumidos tanto para transporte de carga como de pasajeros.

**Cuadro 30**  
**Largos viajes promedios para proyecto de aviación**

| Tipo de transporte | Largo viaje promedio<br>(en km) |
|--------------------|---------------------------------|
| Pasajeros          | 500                             |
| Carga              | 500                             |

Fuente: Elaboración propia.

En este caso se consideraron largos de viaje mayores debido a que los aviones tienen que recorrer la totalidad del tramo considerado con todos sus pasajeros y/o carga. Además, no se consideran viajes de menor longitud debido al alto consumo de combustible asociado a viajes cortos.

Al aumentar el largo de los viajes, para mantener los valores propuestos en el cuadro 20, se transporta una menor cantidad de pasajeros y de carga. Por lo tanto, esta solución no es capaz de sustituir completamente la demanda de transporte interurbano y solo permite satisfacer un 4% de la demanda total, lo que no descongestiona la carretera base de manera significativa.

Por otra parte, se propone un costo de inversión de \$ 100 MM USD por cada avión tomando en cuenta los valores de un Airbus A319 y A320<sup>5</sup>, para un total de 60 aviones.

<sup>4</sup> <https://www.indexmundi.com/commodities/?commodity=jet-fuel&currency=clp>.

<sup>5</sup> <https://www.airbus.com/newsroom/press-releases/en/2018/01/airbus-2018-price-list-press-release.html>.

#### 4. Proyecto dirigible tipo

Se propone la utilización del modelo Airlander 10 de la compañía Hybrid Air Vehicules. Con respecto a la estimación de las emisiones para transporte de pasajeros, se considera el transporte de 72 personas con equipaje incluido, lo que corresponde a una tasa de ocupación del 80%.

Con respecto al transporte de carga, se considera una carga promedio de 8 toneladas por viaje, lo que equivale al 80% de la capacidad máxima del Airlander 10.

Símil al proyecto de aviación, se consideran los valores de largo de viajes promedio propuestos en el Cuadro . También se asume que esta solución no es capaz de sustituir completamente la demanda de transporte interurbano y solo permite satisfacer un 4% de la demanda total, lo que no descongestiona la carretera base de manera significativa.

Debido a que no se realiza una evaluación social de este modo de transporte es que no se presenta la velocidad de viaje ni costo de combustible.

### C. Consideraciones nacionales de los países seleccionados

Tal como se mencionó anteriormente, las emisiones asociadas a la fase de operación de los trenes dependen principalmente del consumo de electricidad del tren por kilómetro recorrido y de las emisiones que se producen por la producción de esta electricidad. El primer punto depende del modelo de tren y las condiciones geográficas y/o ambientales del lugar de funcionamiento, y el segundo depende de los tipos de las fuentes generadoras de energía en cada país. A continuación, el cuadro 31 muestra el factor de emisión de la producción de electricidad para los distintos países en estudio.

**Cuadro 31**  
**Factores de emisión de generación eléctrica por país**

| País       | Factor de emisión<br>(en kgCO <sub>2</sub> e/kWh) | Fuente                                 | Detalle  |
|------------|---------------------------------------------------|----------------------------------------|----------|
| Chile      | 0,419                                             | Comisión Nacional de Energía, 2020     | Año 2018 |
| Costa Rica | 0,075                                             | Instituto Meteorológico Nacional, 2018 | Año 2017 |
| Panamá     | 0,224                                             | Ministerio del Medio Ambiente. 2017.   | Año 2016 |
| Nicaragua  | 0,322                                             | Cifuentes, 2020                        | Año 2017 |
| Honduras   | 0,313                                             | Cifuentes, 2020                        | Año 2018 |

Fuente: Elaboración propia.

En el cuadro anterior se aprecia que el país con el factor de emisión menor es Costa Rica, el cual cuenta con una matriz energética bastante limpia en términos de CO<sub>2</sub>, donde dos tercios corresponde a unidades hidroeléctricas, un 11% proveniente de centrales eólicas y 6% de centrales geotérmicas (Cifuentes, 2020). Por otra parte, Chile cuenta con el mayor factor de emisión en comparación a los países estudiados, siendo más de 5 veces el valor de Costa Rica y casi el doble del factor de emisión de Panamá.



## **IV. Emisiones de CO<sub>2</sub> en el ciclo de vida para los casos de estudio**

A continuación, se presentan los resultados obtenidos para el cálculo de las emisiones de CO<sub>2</sub> para diferentes medios de transporte de pasajeros y de carga utilizando la metodología propuesta anteriormente.

En cada caso, se compara con las emisiones correspondientes a las etapas del ciclo de vida de la situación base.

### **A. Emisiones de CO<sub>2</sub> para transporte de pasajeros**

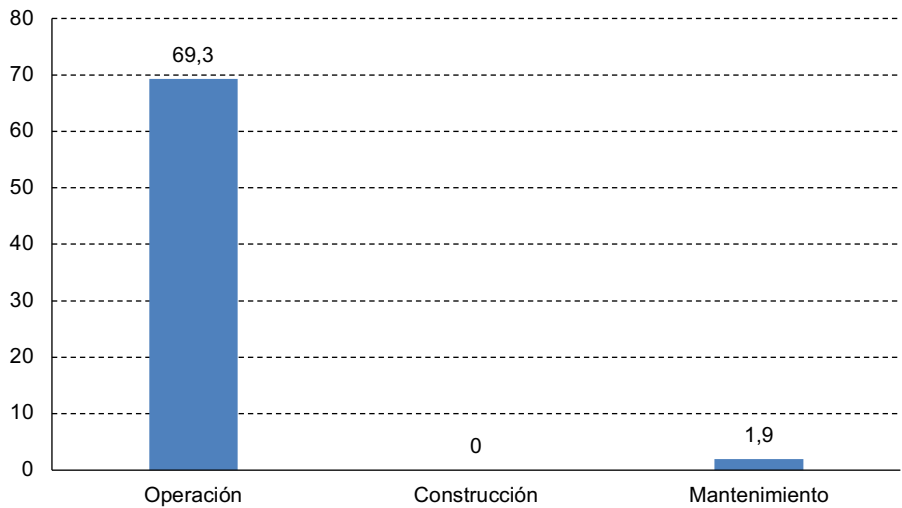
A continuación, se presentan las estimaciones de emisiones asociadas al transporte de pasajeros para los diferentes modos de transporte.

#### **1. Emisiones caso base para transporte de pasajeros**

En el gráfico 2 presenta las emisiones de CO<sub>2</sub>e asociadas a las distintas etapas del ciclo de vida analizadas del caso base, para posteriores comparaciones con los proyectos a evaluar.

Se observa que el principal aporte a la huella de carbono está dado por la Operación de los vehículos. Además, no se considera la etapa de Construcción debido a que se utiliza infraestructura existente. Por último, la etapa de Mantenimiento aporta menos del 3% de las emisiones totales.

**Gráfico 2**  
**Emisiones de CO<sub>2</sub>e por etapa para caso base**  
*(En emisiones de CO<sub>2</sub> gCO<sub>2</sub>e/pkm)*

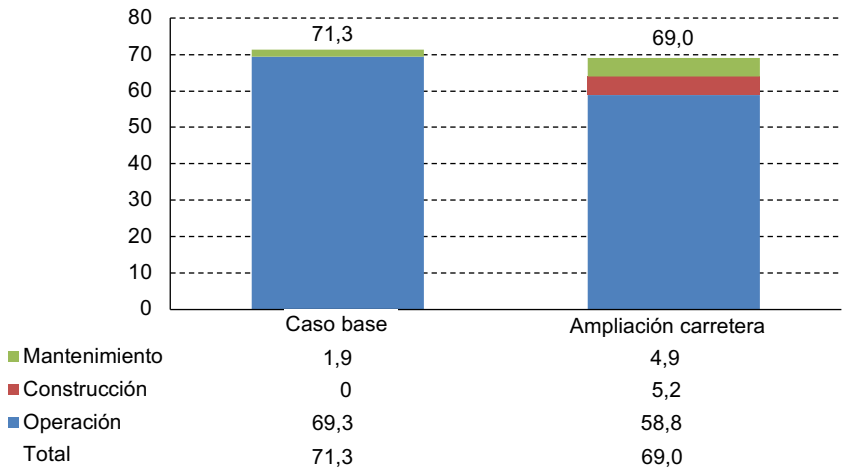


Fuente: Elaboración propia.

**2. Emisiones ampliación de carretera para transporte de pasajeros**

El gráfico 3 presenta las emisiones por etapa del ciclo de vida considerando automóviles y buses.

**Gráfico 3**  
**Emisiones de CO<sub>2</sub>e de una carretera para transporte de pasajeros**  
*(En emisiones de CO<sub>2</sub> gCO<sub>2</sub>e/pkm)*



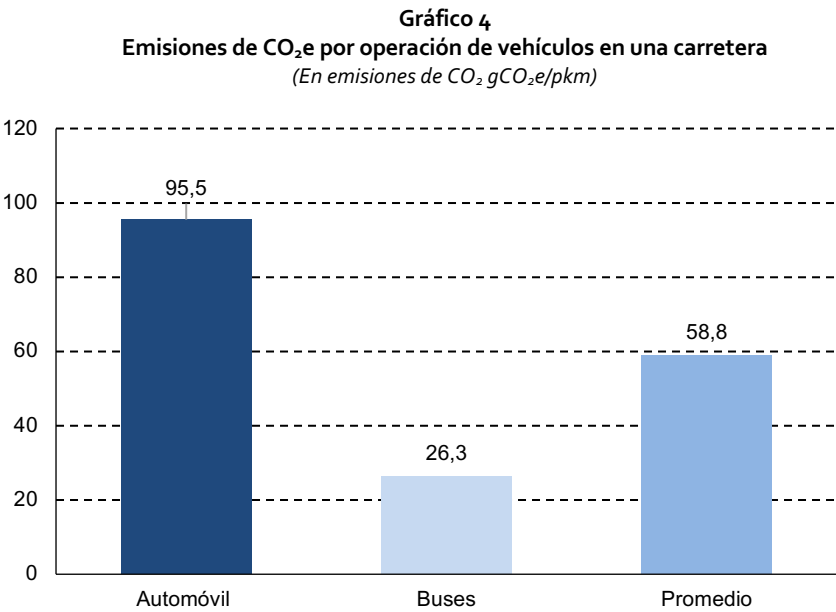
Fuente: Elaboración propia.

Se puede notar claramente como la etapa de Operación es la que contribuye con la mayor parte de las emisiones. Luego, la etapa de Construcción aporta con un 8% del total y finalmente la etapa de Mantenimiento también representa el 7%.

En comparación al caso base, el proyecto de expansión a una tercera vía presenta menor cantidad de emisiones en la etapa de operación. Esto se explica debido a que el caso base presenta un aumento

en el consumo de combustible asociado al aumento de tráfico. Además, presenta una mayor huella asociada a la etapa de Mantenimiento, debido a que el flujo vehicular en esta es menor. Tomando en cuenta todas las etapas, la ampliación de la carretera presenta una disminución de 2,1 gCO<sub>2</sub>e/pkm en comparación al caso base.

Por otra parte, el gráfico 4 presenta el detalle de las emisiones de la etapa de Operación, considerando los distintos tipos de vehículos utilizados.



Fuente: Elaboración propia.

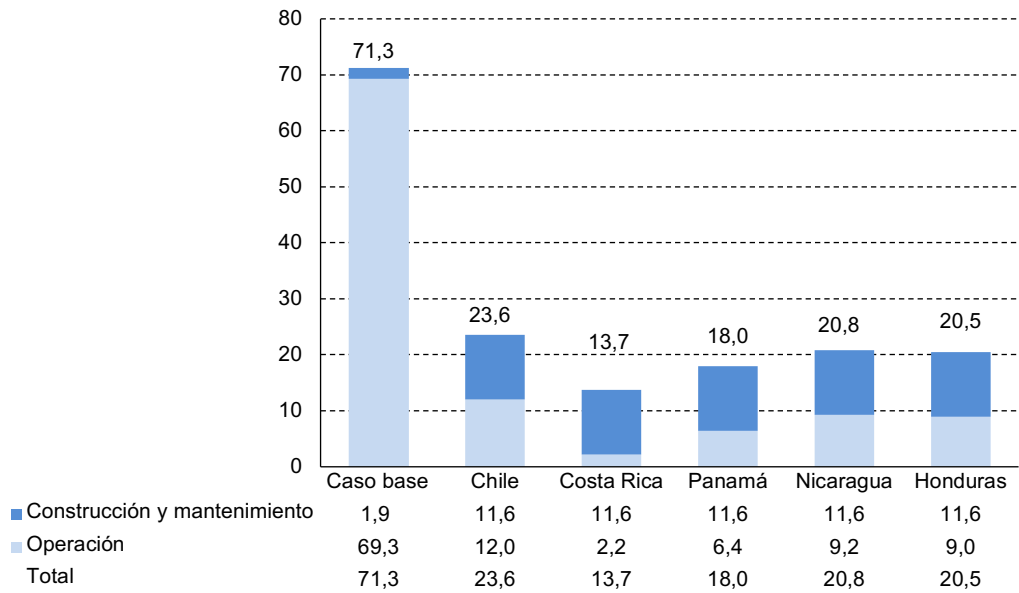
A pesar de que los buses tienen un mayor consumo de combustible por kilómetro, la cantidad de pasajeros transportados hace que la huella por persona sea menor en comparación a los otros vehículos.

Por otra parte, con respecto a las emisiones asociadas a la etapa de Construcción de la infraestructura, se presenta el detalle de emisiones por elemento de cada proyecto en el anexo 6.

**3. Emisiones proyecto ferroviario para transporte de pasajeros**

Debido a que las emisiones asociadas a la etapa de operación están relacionadas directamente con el factor de emisión de cada país, el gráfico 5 presenta la huella de carbono en cada uno de estos.

**Gráfico 5**  
**Huella de carbono de un proyecto ferroviario por país para transporte de pasajeros**  
*(En emisiones de CO<sub>2</sub> gCO<sub>2</sub>e/pkm)*



Fuente: Elaboración propia.

Las emisiones relacionadas con la etapa de operación varían entre 2,2-12 [gCO<sub>2</sub>e/pkm], siendo Costa Rica el país con el menor valor asociado y Chile el mayor, lo que se debe a la diferencia en los Factores de emisión de sus matrices eléctricas. Con respecto a las emisiones relacionadas con la Construcción y Mantenimiento, en todos los casos menos en Chile, este valor es mayor en comparación con el de la etapa de Operación.

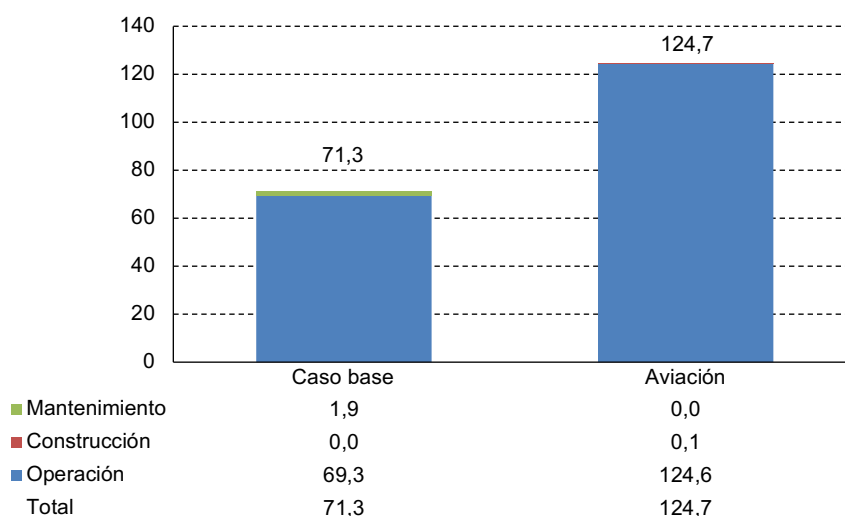
El anexo 7 presenta las emisiones asociadas a la etapa de Operación de todos los modelos analizados, los cuales se diferencian principalmente en la capacidad de transporte de pasajeros y el consumo eléctrico de cada uno.

Finalmente, con respecto a las emisiones asociadas etapa de Construcción de la infraestructura, se presenta el detalle de emisiones por elemento de cada proyecto en el anexo 8.

**4. Emisiones proyecto aviación para transporte de pasajeros**

El gráfico 6 presenta las emisiones por etapa del ciclo de vida de un proyecto de aviación considerando un viaje de 500 kilómetros y las emisiones correspondientes al caso base.

**Gráfico 6**  
**Huella de carbono de un proyecto de aviación para transporte de pasajeros**  
*(En emisiones de CO<sub>2</sub> gCO<sub>2</sub>e/pkm)*

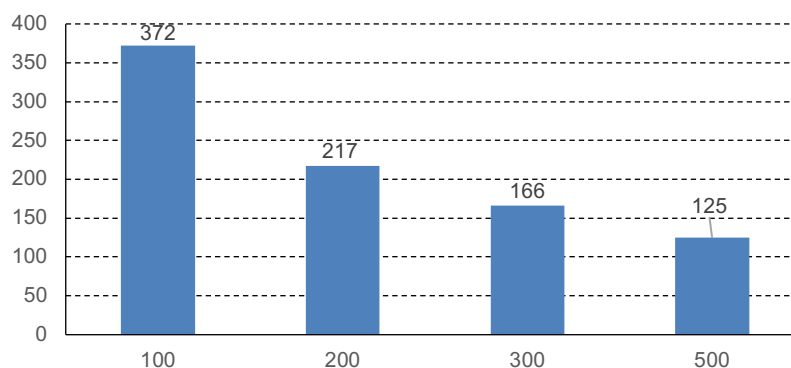


Fuente: Elaboración propia.

Se puede notar claramente como la etapa de Operación es la que contribuye con casi el 100% de las emisiones. Por otra parte, las etapas de Construcción y mantenimiento representan menos del 0,1%. En comparación con el caso base, la huella de carbono por pasajero-kilómetro es casi el doble, siendo la etapa de operación la que mayor influye en ambos casos.

Debido al gran aporte de la etapa de Operación, se analiza en mayor detalle. A diferencia de los otros modos de transporte, los aviones presentan un consumo de combustible por kilómetro que depende de la longitud del viaje. En el gráfico 7 presenta el promedio de las emisiones asociadas a la operación del transporte aéreo de pasajeros para los tres modelos de avión analizados.

**Gráfico 7**  
**Emisiones de CO<sub>2</sub> por operación de aviones en transporte de pasajeros**  
*(En emisiones de CO<sub>2</sub> gCO<sub>2</sub>e/pkm)*



Fuente: Elaboración propia.

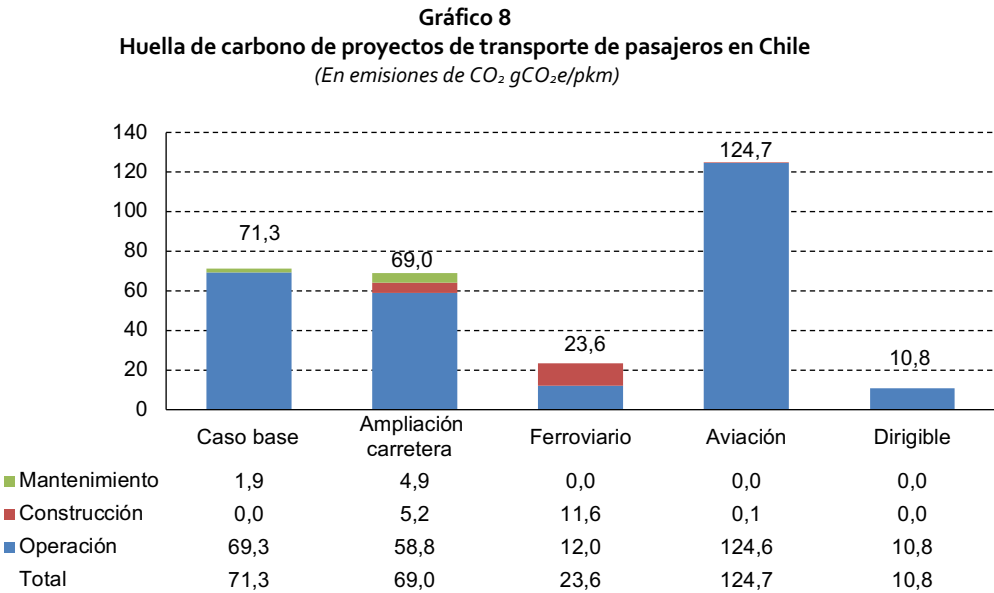
Como se aprecia en el gráfico anterior, a medida que aumentan los kilómetros viajados, disminuyen las emisiones por pasajero-kilómetro, esto debido a que se utiliza, relativamente, una mayor cantidad de combustible en el despegue y en el aterrizaje. Por lo tanto, al aumentar los kilómetros de viaje, la cantidad de combustible utilizado aumenta en una relación menor.

5. Comparación de emisiones

A continuación, se realiza una comparación de la huella de carbono tomando en cuenta los diferentes modos de transporte analizados por país.

Chile

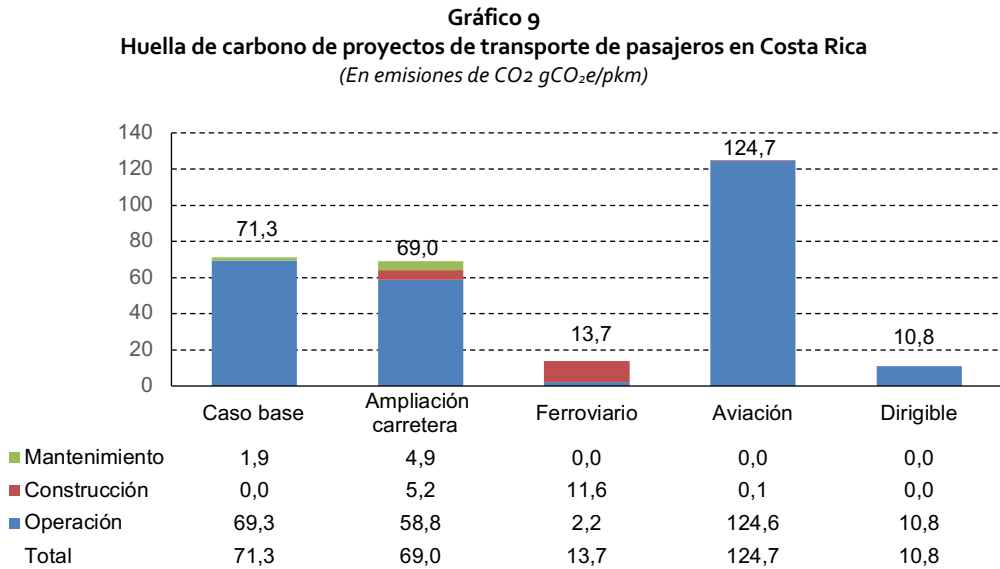
En el gráfico 8 presenta las emisiones de los diferentes modos de transporte analizados por etapa de ciclo de vida, tomando en cuenta el factor de emisión eléctrico de Chile.



Fuente: Elaboración propia.

Costa Rica

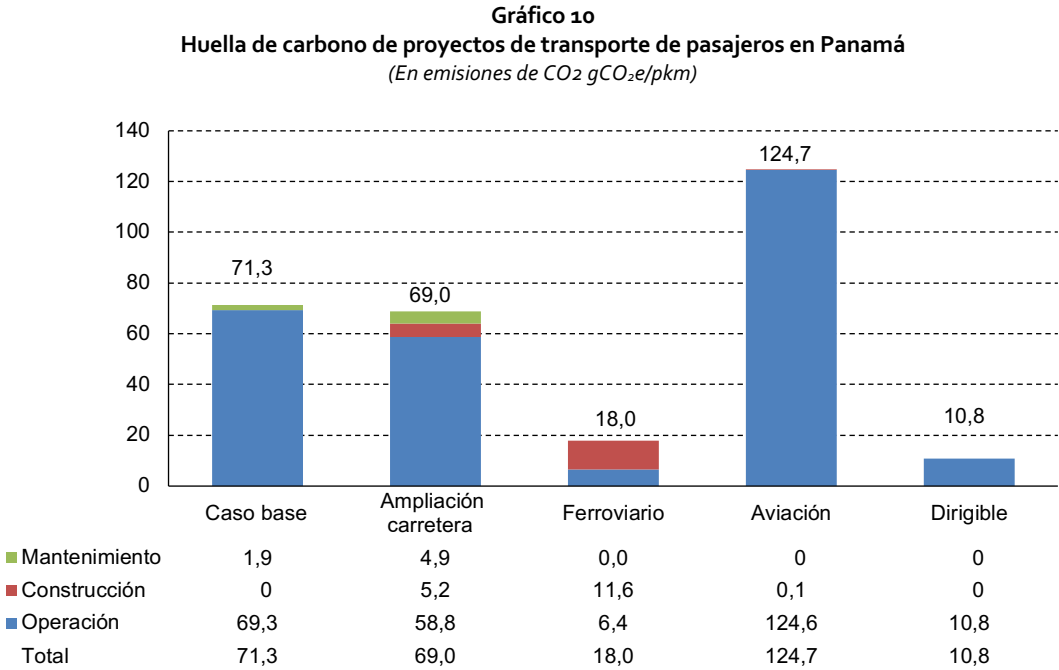
En el gráfico 9 presenta las emisiones de los diferentes modos de transporte analizados por etapa de ciclo de vida, tomando en cuenta el factor de emisión eléctrica de Costa Rica.



Fuente: Elaboración propia.

Panamá

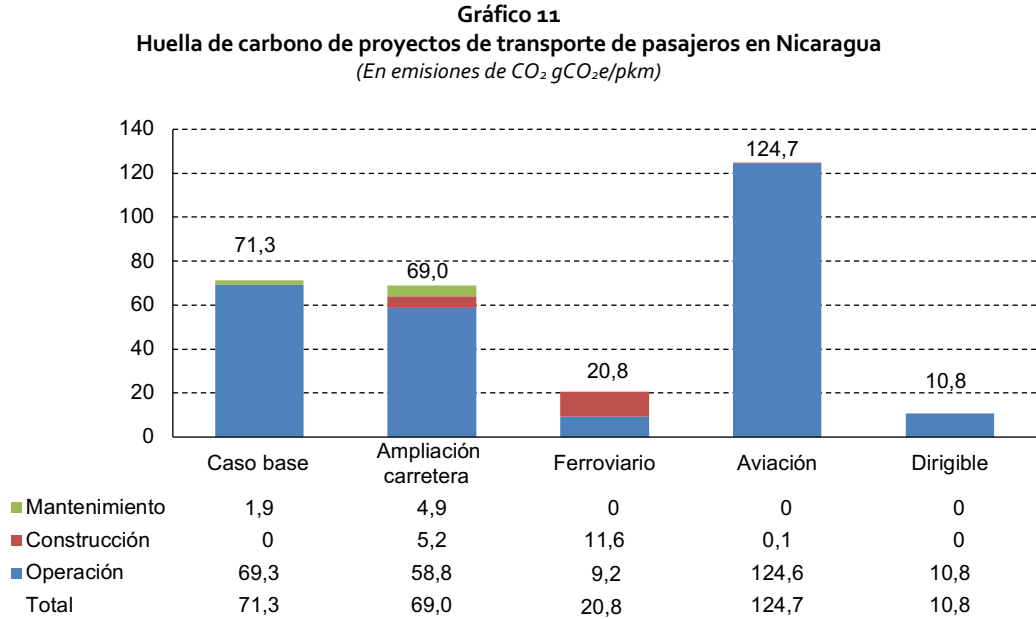
El gráfico 10 presenta las emisiones de los diferentes modos de transporte analizados por etapa de ciclo de vida, tomando en cuenta el factor de emisión eléctrica de Panamá.



Fuente: Elaboración propia.

Nicaragua

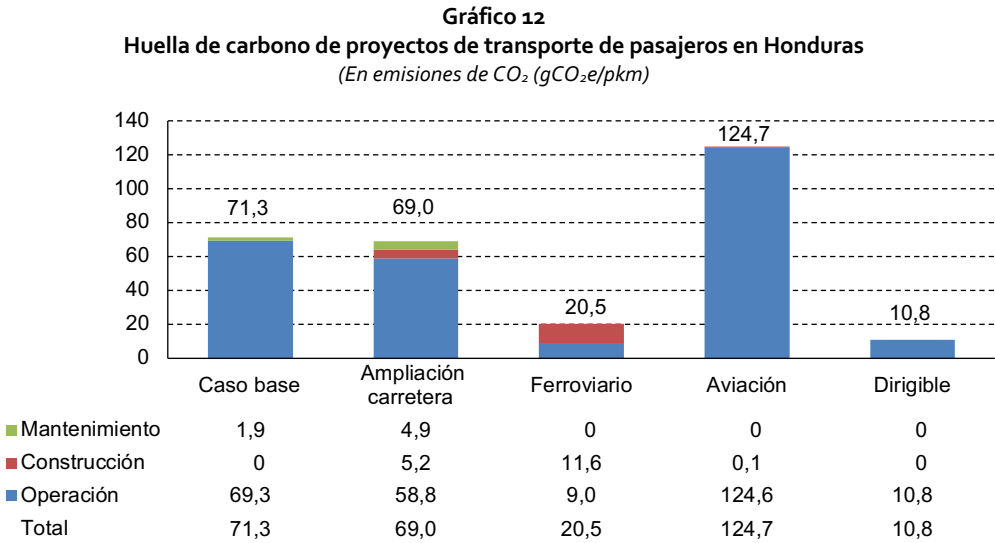
En el gráfico 11 presenta las emisiones de los diferentes modos de transporte analizados por etapa de ciclo de vida, tomando en cuenta el factor de emisión eléctrica de Nicaragua.



Fuente: Elaboración propia.

Honduras

El gráfico 12 presenta las emisiones de los diferentes modos de transporte analizados por etapa de ciclo de vida, tomando en cuenta el factor de emisión eléctrica de Honduras.



Fuente: Elaboración propia.

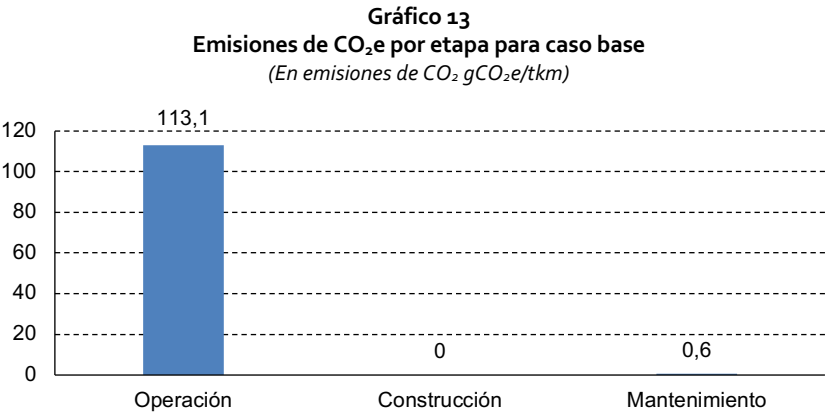
A partir de la comparación anterior, es posible apreciar que el tren es el tipo de transporte con una menor huella de carbono total asociada, esto principalmente por el uso de energía eléctrica y la gran cantidad de pasajeros que puede transportar en cada viaje. Este valor es menor al 30% que el caso base y cercano al 15% del transporte en avión.

B. Emisiones de CO<sub>2</sub> para transporte de carga

A continuación, se presentan las estimaciones de emisiones asociadas al transporte de carga para los diferentes modos de transporte.

1. Emisiones caso base para transporte de carga

En primer lugar, en el gráfico 13 presenta las emisiones de CO<sub>2</sub>e asociadas a las distintas etapas del ciclo de vida analizadas del caso base, para posteriores comparaciones con los proyectos evaluados.



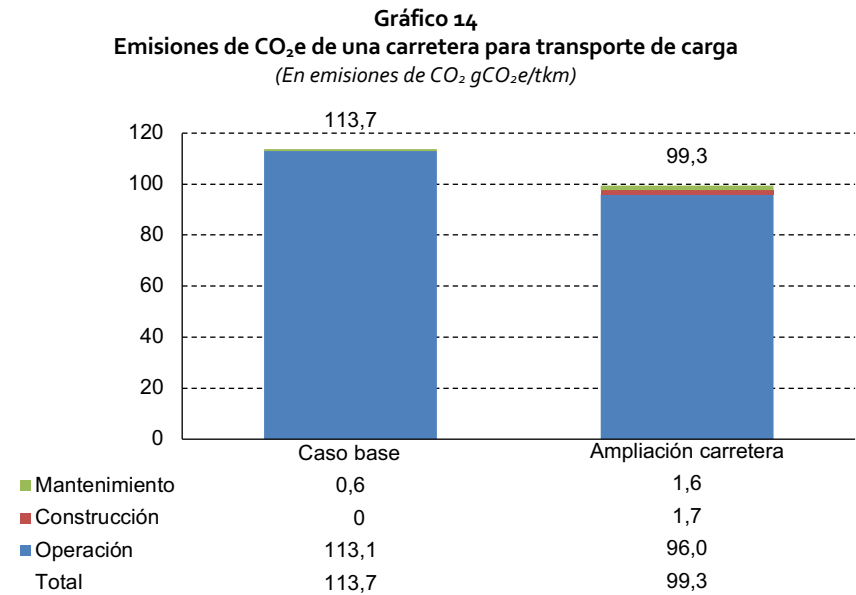
Fuente: Elaboración propia.



Se observa que el principal aporte a la huella de carbono está dado por la Operación de los vehículos. Además, no se considera la etapa de Construcción debido a que se utiliza infraestructura existente. Por último, la etapa de Mantenimiento aporta menos del 1% de las emisiones totales.

2. Emisiones ampliación de carretera para transporte de carga

En el gráfico 14 presenta las emisiones por etapa del ciclo de vida considerando el tránsito de camiones de carga.



Fuente: Elaboración propia.

La etapa de Operación representa el 95% de las emisiones totales. La etapa de Construcción aporta con un 2% del total y finalmente la etapa de Mantenimiento también representa el 2%.

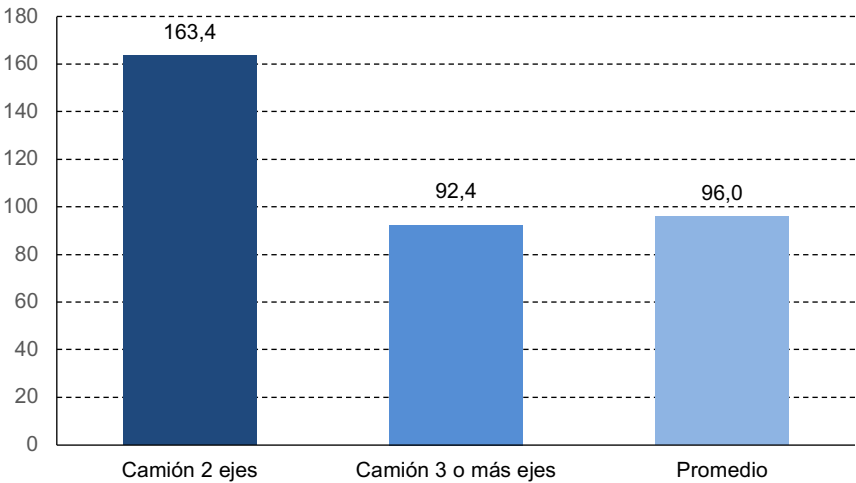
En comparación al caso base, el proyecto de expansión a una tercera vía presenta una disminución de 17 gCO<sub>2</sub>e/tkm en la etapa de operación, esto debido a que el caso base presenta un aumento en el consumo de combustible asociado al aumento de tráfico. Además, presenta una mayor huella asociada a la etapa de Mantenimiento, debido a que el flujo vehicular en esta es menor.

Por otra parte, en el gráfico 15 presenta la huella de carbono asociada a la operación de cada tipo de vehículo que transporta carga en un camino o carretera.

Aunque las emisiones asociadas a la operación de un camión de 2 ejes son sobre los 160 gCO<sub>2</sub>e/tkm, el promedio de este proyecto está más cercano a las emisiones de un camión de 3 o más ejes debido cantidad de carga y flujo vehicular asociado a este tipo de vehículo.

Con respecto a las emisiones de la infraestructura, el detalle de emisiones por elemento de cada proyecto se encuentra en el anexo 6.

**Gráfico 15**  
**Emisiones de CO<sub>2</sub> por operación de vehículos en transporte de carga**  
*(En emisiones de CO<sub>2</sub> gCO<sub>2</sub>e/tkm)*

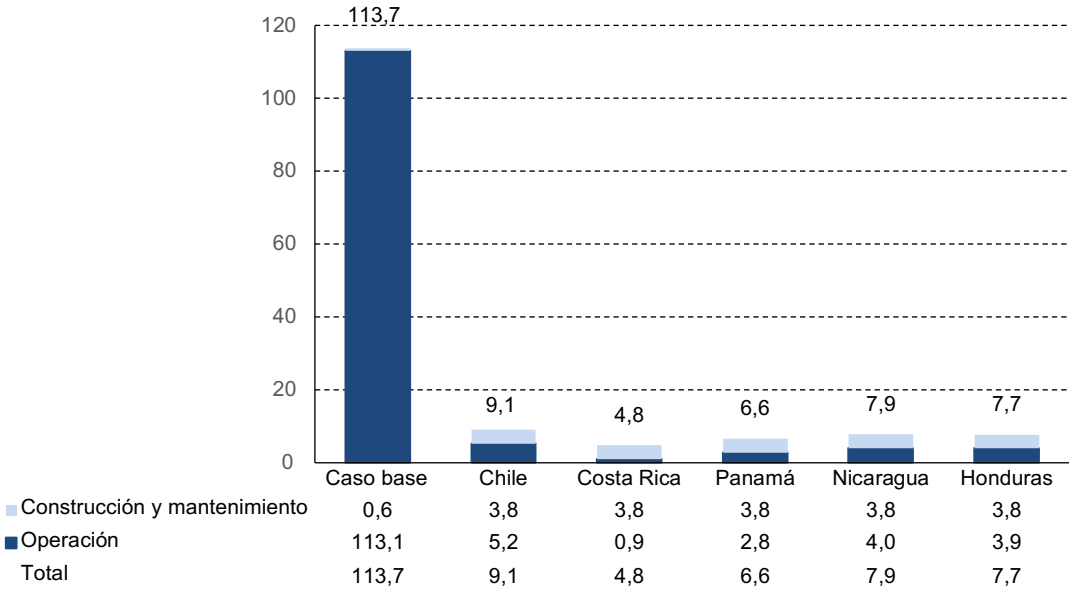


Fuente: Elaboración propia.

**3. Emisiones proyecto ferroviario para transporte de carga**

Debido a que las emisiones asociadas a la etapa de operación están relacionadas directamente con el factor de emisión de cada país, el gráfico 16 presenta la huella de carbono en cada uno de estos.

**Gráfico 16**  
**Huella de carbono de un proyecto ferroviario por país para transporte de carga**  
*(En emisiones de CO<sub>2</sub> gCO<sub>2</sub>e/tkm)*



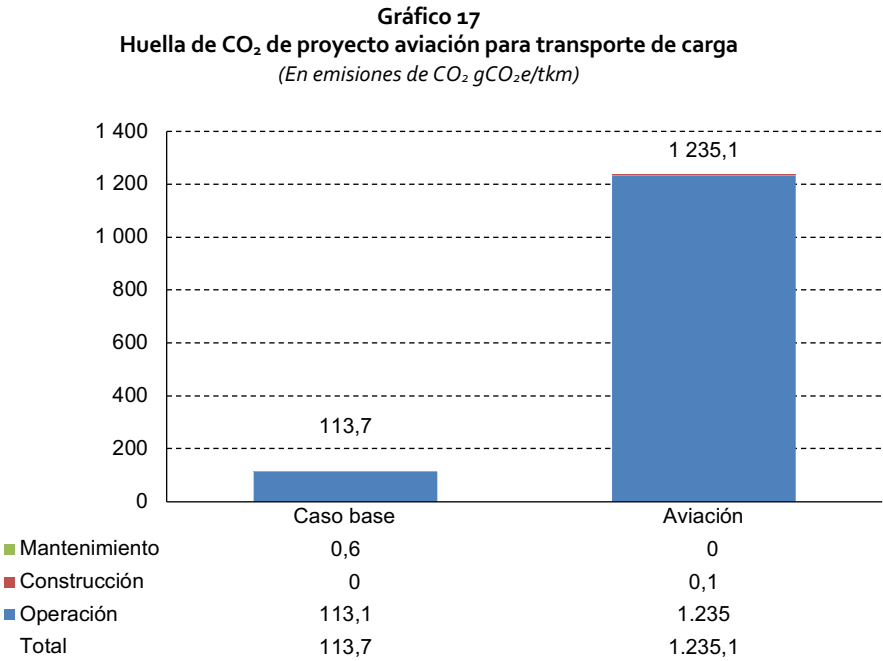
Fuente: Elaboración propia.

Las emisiones relacionadas con la etapa de operación varían entre 0,9-5,2 [grCO<sub>2</sub>e/tkm], siendo Costa Rica el país con el menor valor asociado y Chile el mayor. Con respecto a las emisiones relacionadas con la Construcción y Mantenimiento, el valor es un 55% mayor que en el caso base.

Finalmente, el Anexo 9 presenta los modelos de carga analizados, los cuales se diferencian principalmente en la capacidad de transporte. Con respecto a las emisiones de la infraestructura ferroviaria, se presenta el detalle de emisiones por elemento de cada proyecto en el anexo 8.

4. Emisiones proyecto aviación para transporte de carga

El gráfico 17 presenta las emisiones por etapa del ciclo de vida de un proyecto de aviación considerando un viaje de 500 kilómetros y las emisiones correspondientes al caso base.

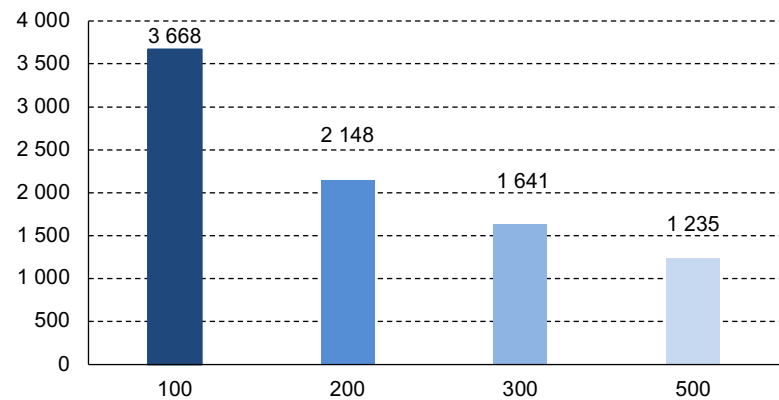


Fuente: Elaboración propia.

Se puede notar claramente como la etapa de Operación es la que contribuye con casi el 100% de las emisiones. Por otra parte, las etapas de Construcción y mantenimiento representan menos del 0,1%. En comparación con el caso base, la huella de carbono por tonelada-kilómetro es más de diez veces, siendo la etapa de operación la que mayor influye en ambos casos.

Por otra parte, a diferencia de los otros modos de transporte, los aviones presentan un consumo de combustible por kilómetro que depende de la longitud del viaje. El gráfico 18 presenta el promedio de las emisiones asociadas a la operación del transporte aéreo de pasajeros para los tres modelos de avión analizados.

**Gráfico 18**  
**Emisiones de CO<sub>2</sub> por operación de aviones para transporte de carga**  
(En emisiones de CO<sub>2</sub> (gCO<sub>2</sub>e/tkm))



Fuente: Elaboración propia.

Al igual que en el transporte de pasajeros, a medida que aumentan los kilómetros viajados, disminuyen las emisiones por tonelada-kilometro, esto debido a que se utiliza una mayor cantidad de combustible en el despegue y en el aterrizaje. Por lo tanto, al aumentar los kilómetros de viaje, la cantidad de combustible utilizado aumenta en una relación menor.

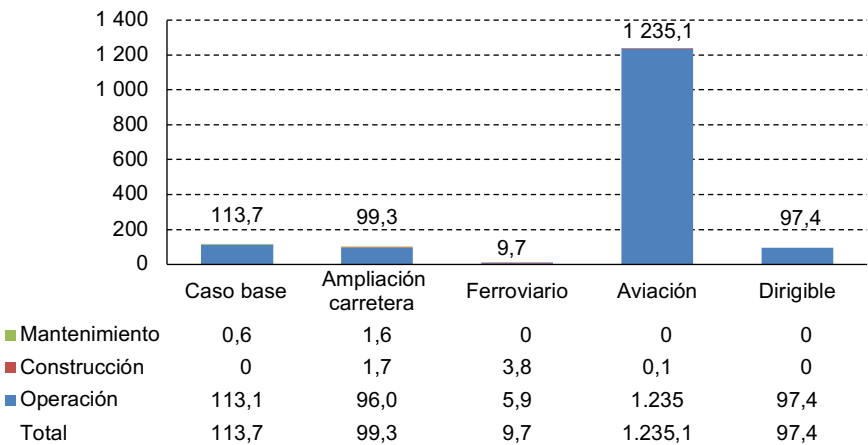
**Comparación de emisiones**

A continuación, se realiza una comparación de la huella de carbono tomando en cuenta los diferentes modos de transporte analizados por país.

**Chile**

El gráfico 19 presenta las emisiones de los diferentes modos de transporte analizados por etapa de ciclo de vida, tomando en cuenta el factor de emisión eléctrico de Chile.

**Gráfico 19**  
**Huella de carbono de proyectos de transporte de carga en Chile**  
(En Emisiones de CO<sub>2</sub> gCO<sub>2</sub>e/tkm)

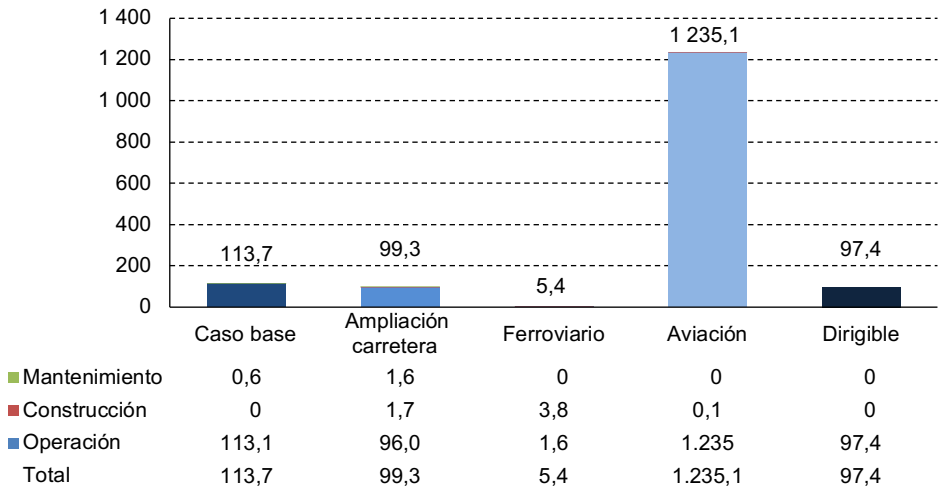


Fuente: Elaboración propia.

Costa Rica

El gráfico 20 presenta las emisiones de los diferentes modos de transporte analizados por etapa de ciclo de vida, tomando en cuenta el factor de emisión eléctrico de Costa Rica.

Gráfico 20  
Huella de carbono de proyectos de transporte de carga en Costa Rica  
(En emisiones de CO<sub>2</sub> gCO<sub>2</sub>e/tkm)

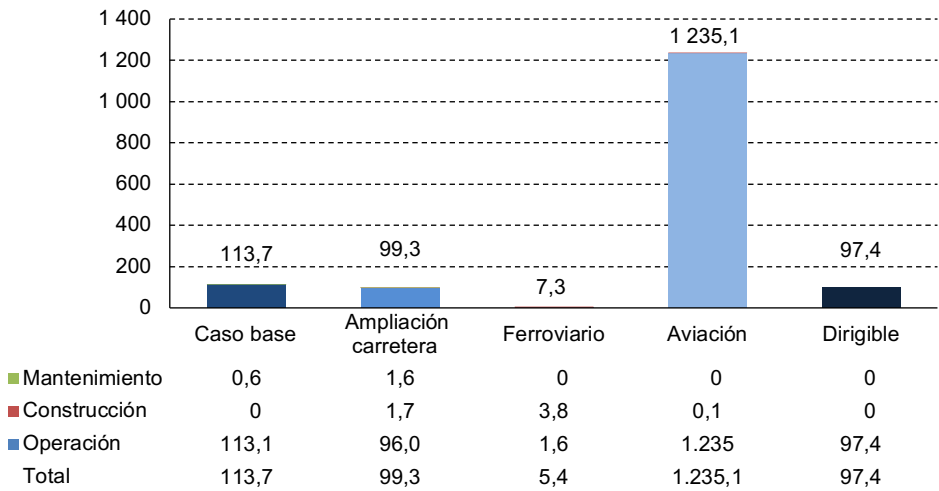


Fuente: Elaboración propia.

Panamá

El gráfico 21 presenta las emisiones de los diferentes modos de transporte analizados por etapa de ciclo de vida, tomando en cuenta el factor de emisión eléctrico de Panamá.

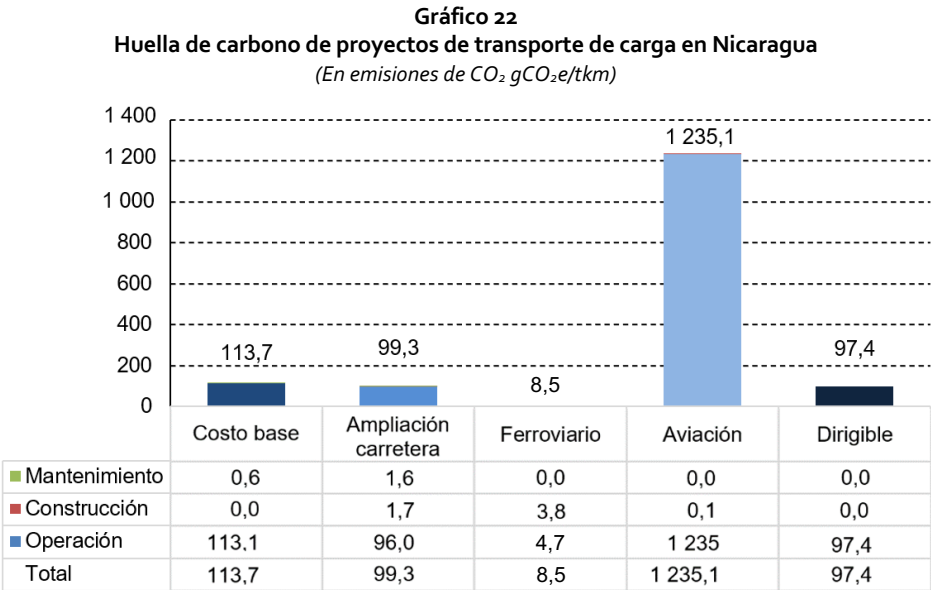
Gráfico 21  
Huella de carbono de proyectos de transporte de carga en Panamá  
(En emisiones de CO<sub>2</sub> gCO<sub>2</sub>e/tkm)



Fuente: Elaboración propia.

Nicaragua

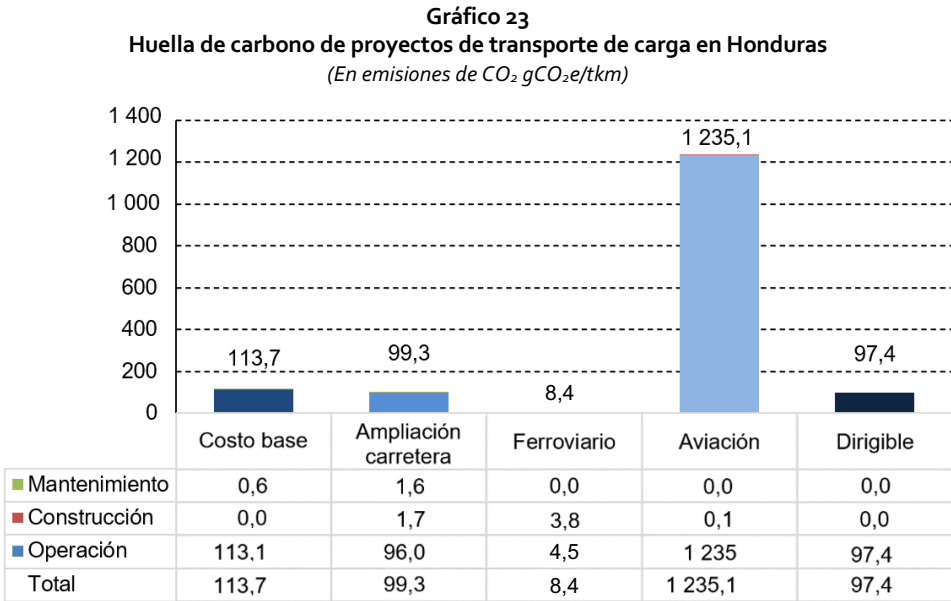
El gráfico 22 presenta las emisiones de los diferentes modos de transporte analizados por etapa de ciclo de vida, tomando en cuenta el factor de emisión eléctrico de Nicaragua.



Fuente: Elaboración propia.

Honduras

El gráfico 23 presenta las emisiones de los diferentes modos de transporte analizados por etapa de ciclo de vida, tomando en cuenta el factor de emisión eléctrico de Honduras.



Fuente: Elaboración propia.

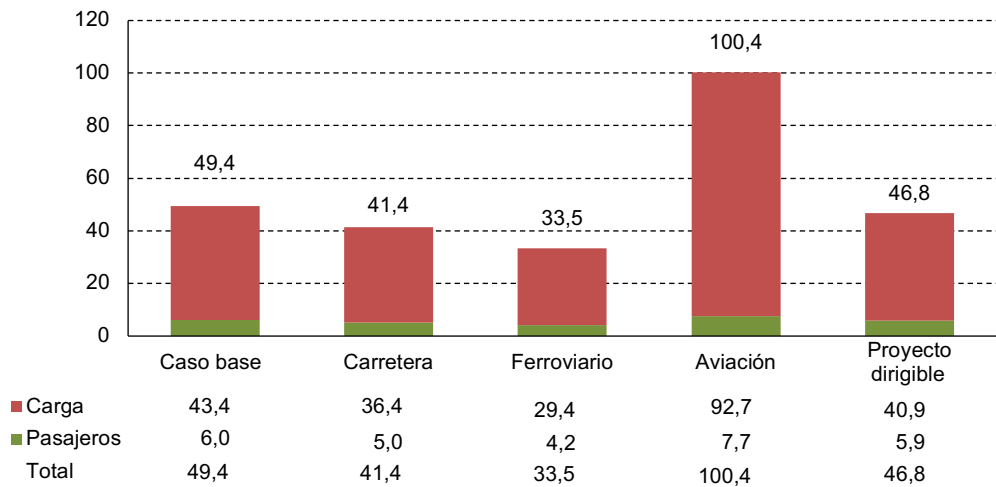
C. Análisis de las emisiones de CO<sub>2</sub> para distintos modos de transporte interurbano

A partir de la comparación anterior, es posible apreciar que el tren es el tipo de transporte con una menor huella de carbono total asociada, esto principalmente por el uso de energía eléctrica y la gran cantidad de carga que puede transportar en cada viaje. Con respecto al transporte aéreo, se aprecia que sus emisiones totales son casi 8 veces mayores a las de un camión de 3 o más ejes y más de 100 veces que las de un tren.

Esta gran diferencia entre el tren y el avión se explica, principalmente, por la capacidad de carga que te tiene que cada uno de estos medios de transporte y de los modelos analizados, ya que un avión Boeing 737-300 tiene una capacidad máxima aproximada de 17 toneladas mientras que un tren modelo PRIMA II tiene una capacidad máxima de 1590 toneladas. Esto, sumado a que las emisiones por kilómetro son mayores en los aviones llevan a presentar esta diferencia tan marcada en su huella de carbono.

En el gráfico 24 presenta la comparación de las emisiones totales de Nicaragua, esta toma en cuenta las emisiones de los vehículos que transitan por la carretera base y la operación de los vehículos de cada proyecto en particular tanto para transporte de pasajeros como de carga.

Gráfico 24  
Comparación emisiones totales por operación  
(En emisiones totales MM tonCO<sub>2</sub>e)



Fuente: Elaboración propia.

Las emisiones de asociadas al transporte de pasajeros varían entre 4,3 y 7,9 MM ton CO<sub>2</sub>e, lo que es coherente al analizar la huella de carbono de cada uno de los modos de transporte. Por otra parte, las emisiones asociadas al transporte de carga presentan, en todos los casos, la mayor parte del total de las emisiones. Esto es, principalmente, debido a que existe una mayor cantidad de demanda de este tipo de transporte.

De la figura anterior, se aprecia que el proyecto ferroviario es el que presenta una menor emisión total, tanto para transporte de pasajeros como de carga y el proyecto de aviación la mayor cantidad para ambos.

Aunque los dirigibles presentan una huella de carbono menor que la mayoría de los modos de transporte, esta diferencia no se ve reflejada en las emisiones totales debido a se consideran una menor cantidad de viajes realizados, debido al largo del viaje, por lo tanto, no es suficiente para descongestionar la carretera base.

El cuadro 32 presenta la variación de las emisiones totales con respecto al caso base, tomando en cuenta tanto el transporte de carga como de pasajeros.

**Cuadro 32**  
**Variación emisiones totales por operación de vehículos**

|                             | Emisiones totales<br>(en MM ton CO <sub>2</sub> ) | Variación con respecto<br>al caso base<br>(en porcentajes) |
|-----------------------------|---------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|
| Caso base                   | 49,4                                              |                                                            |
| Proyecto carretera ampliada | 41,4                                              | -16                                                        |
| Proyecto ferroviario        | 33,5                                              | -32                                                        |
| Proyecto aviación           | 100,4                                             | 103                                                        |
| Proyecto dirigible          | 46,8                                              | -5                                                         |

Fuente: Elaboración propia.

Se observa que, en todos los casos menos en el proyecto de aviación, hay una disminución de las emisiones en comparación al caso base.

Finalmente, el cuadro 33 presenta la variación de la huella de carbono por medio de transporte en comparación al caso base. De esta manera, a diferencia de las emisiones totales, es posible comparar directamente las emisiones asociadas a los vehículos sin que afecte el transporte asociado a la carretera base.

**Cuadro 33**  
**Variación huella de carbono por modo de transporte**

|                             | Huella transporte<br>pasajeros<br>(en gCO <sub>2</sub> e/pkm) | Variación con<br>respecto<br>al caso base<br>(en porcentajes) | Huella transporte<br>carga<br>(en gCO <sub>2</sub> e/tkm) | Variación con respecto<br>al caso base<br>(en porcentajes) |
|-----------------------------|---------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|
| Caso base                   | 71,3                                                          | -                                                             | 113,7                                                     | -                                                          |
| Proyecto carretera ampliada | 69,0                                                          | -3                                                            | 99,3                                                      | -13                                                        |
| Proyecto ferroviario        | 20,8                                                          | -71                                                           | 8,5                                                       | -93                                                        |
| Proyecto aviación           | 124,7                                                         | 75                                                            | 1 235,1                                                   | 986                                                        |
| Proyecto dirigible          | 10,8                                                          | -85                                                           | 97,4                                                      | -14                                                        |

Fuente: Elaboración propia.

Se puede apreciar que, en términos de demanda marginal, la reducción de la Huella de Carbono más alta para el transporte de pasajeros en el Dirigible (-85%), seguido del proyecto ferroviario (-71%) y por último la ampliación de la carretera (-3%). En lo que respecta al transporte de carga, la opción de menores emisiones es el ferroviario (-93%), seguido bastante de lejos por el Proyecto de Dirigible (-14%) y la ampliación de la carretera (-13%). En lo que respecta a las soluciones de aviación, se aprecia como es de esperarse, un fuerte incremento en las emisiones, frente al caso base, tanto para pasajeros (75%) como para carga (986%).



## V. Incorporación del PSC en la evaluación de proyectos

A continuación, se presenta la evaluación social de un proyecto para diferentes modos de transporte, considerando los distintos precios de carbono. Para todos los casos se consideró una tasa social de descuento del 6% para descontar los flujos de costos y beneficios.

La evaluación se basa en comparar la carretera de doble vía existente con la situación luego de la construcción del proyecto que descongestiona la carretera existente.

### A. Evaluación social proyecto ampliación carretera

A partir del análisis de las emisiones de un proyecto de ampliación de la carretera base, se obtienen los siguientes resultados. En primer lugar, el cuadro 34 presenta el valor presente de los costos y beneficios sociales asociados a las etapas del ciclo de vida analizados anteriormente.

| <b>Cuadro 34</b>                                   |                                                                                          |                                                                          |
|----------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|
| <b>Costos y beneficios sociales CO<sub>2</sub></b> |                                                                                          |                                                                          |
|                                                    | Costos sociales CO <sub>2</sub> etapas de construcción<br>y mantenimiento<br>(en MM USD) | Beneficios sociales CO <sub>2</sub> etapa<br>de operación<br>(en MM USD) |
| Proyecto con PSC inferior                          | 2,1                                                                                      | 35,2                                                                     |
| Proyecto con PSC central                           | 3,4                                                                                      | 56,6                                                                     |
| Proyecto con PSC superior                          | 4,5                                                                                      | 75,3                                                                     |

Fuente: Elaboración propia.

Con respecto a los costos sociales de construcción, se consideran en los dos primeros años, es decir, cuando ocurre la inversión. Por otra parte, el mantenimiento se considera luego de estos dos primeros años, distribuido de manera uniforme a lo largo del horizonte de evaluación. De la tabla anterior, se aprecia que por cada tonelada emitida en las etapas de construcción y mantenimiento se evitan cerca de 17 toneladas asociadas a la etapa de operación.

Finalmente, el cuadro 35 presenta los indicadores de rentabilidad del proyecto para los diferentes escenarios con PSC analizados.

**Cuadro 35**  
**Comparación de indicadores de rentabilidad para distintos escenarios**

|                           | VAN<br>(en MM de dólares) | Cambio porcentual<br>con respecto a<br>proyecto sin PSC | Tir<br>(en porcentaje) | Cambio porcentual<br>con respecto a<br>proyecto sin PSC |
|---------------------------|---------------------------|---------------------------------------------------------|------------------------|---------------------------------------------------------|
| Proyecto sin PSC          | 936                       | -                                                       | 16,4                   | -                                                       |
| Proyecto con PSC inferior | 969                       | 4                                                       | 16,5                   | 0,6                                                     |
| Proyecto con PSC central  | 989                       | 6                                                       | 16,6                   | 1,0                                                     |
| Proyecto con PSC superior | 1 006                     | 8                                                       | 16,6                   | 1,3                                                     |

Fuente: Elaboración propia.

El análisis por escenario presenta una variación desde un 4% para PSC inferior, hasta un 8% en el VAN del proyecto, en el caso del PSC superior. Por otra parte, la TIR también mejora [0,6%-1,3%].

Al incluir el PSC, la rentabilidad del proyecto aumenta, debido al incremento en los beneficios asociados a la disminución de emisión de CO<sub>2</sub> por menor uso de combustible debido a la descongestión de la carretera.

## B. Evaluación social proyecto ferroviario

A continuación, se presentan los principales resultados de la evaluación social de un proyecto ferroviario. El cuadro 36 presenta el valor presente de los costos y beneficios sociales asociados a las etapas del ciclo de vida analizados anteriormente.

**Cuadro 36**  
**Costos y beneficios sociales CO<sub>2</sub>**

|                           | Costos sociales CO <sub>2</sub> etapas de<br>Construcción y Mantenimiento<br>(en MM de dólares) | Beneficios sociales CO <sub>2</sub> etapa de operación<br>(en MM de dólares) |
|---------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|
| Proyecto con PSC inferior | 3,4                                                                                             | 89,4                                                                         |
| Proyecto con PSC central  | 5,5                                                                                             | 143,8                                                                        |
| Proyecto con PSC superior | 7,3                                                                                             | 191,2                                                                        |

Fuente: Elaboración propia.

Con respecto a los costos sociales de construcción y mantenimiento, se consideran en los dos primeros años, es decir, cuando ocurre la inversión. De la tabla anterior, se aprecia que por cada tonelada emitida en las etapas de construcción y mantenimiento se evitan cerca de 26 toneladas asociadas a la etapa de operación.

Por otra parte, el cuadro 37 presenta los indicadores de rentabilidad del proyecto para los diferentes escenarios con PSC analizados.

**Cuadro 37**  
**Comparación de indicadores de rentabilidad para distintos escenarios**

|                           | VAN<br>(en MM de dólares) | Cambio porcentual<br>con respecto a<br>proyecto sin PSC | Tir<br>(en porcentaje) | Cambio porcentual con<br>respecto a proyecto<br>sin PSC |
|---------------------------|---------------------------|---------------------------------------------------------|------------------------|---------------------------------------------------------|
| Proyecto sin PSC          | 1 459                     | -                                                       | 18,4                   | -                                                       |
| Proyecto con PSC inferior | 1 557                     | 6,7                                                     | 18,9                   | 2,6                                                     |
| Proyecto con PSC central  | 1 597                     | 9,5                                                     | 19,2                   | 4,2                                                     |
| Proyecto con PSC superior | 1 643                     | 12,6                                                    | 19,4                   | 5,5                                                     |

Fuente: Elaboración propia.

El análisis por escenario presenta una variación desde un 6,7 % para PSC inferior, hasta un 12,5 % en el VAN del proyecto, en el caso del PSC superior. En términos netos, en el caso inferior representa una diferencia de \$ 98 MM USD. Por otra parte, la TIR también mejora [2,6%-5,5%].

Al incluir el PSC, la rentabilidad del proyecto aumenta, debido al incremento en los beneficios asociados a la disminución de emisión de CO<sub>2</sub> por menor uso de combustible debido a la descongestión de la carretera y por la utilización de energía eléctrica en vez de combustible, que tiene asociado un menor factor de emisión.

## C. Evaluación social proyecto aviación

A continuación, se presentan los resultados de la evaluación social de un proyecto de aviación. El cuadro 38 presenta el valor presente de los costos y beneficios sociales asociados a las etapas del ciclo de vida analizados anteriormente.

**Cuadro 38**  
**Costos y beneficios sociales CO<sub>2</sub>**

|                           | Costos sociales CO <sub>2</sub> etapas de<br>Construcción y Mantenimiento<br>(en MM de dólares) | Beneficios sociales CO <sub>2</sub> etapa<br>de operación<br>(en MM de dólares) |
|---------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|
| Proyecto con PSC inferior | 0,1                                                                                             | -365,1                                                                          |
| Proyecto con PSC central  | 0,2                                                                                             | -573,0                                                                          |
| Proyecto con PSC superior | 0,3                                                                                             | -761,6                                                                          |

Fuente: Elaboración propia.

Con respecto a los costos sociales de construcción y mantenimiento, se consideran en los dos primeros años, es decir, cuando ocurre la inversión.

A diferencia de otros modos de transporte analizados, en este caso no hay un beneficio asociado a la etapa de operación debido a que esta alternativa presenta emisiones mayores en comparación al caso de la carretera base congestionada. Por cada tonelada emitida en la etapa de construcción y mantenimiento, se emiten más de 3.000 toneladas en la etapa de operación.

Por otra parte, el cuadro 39 presenta el VAN del proyecto para los escenarios con PSC analizados.

**Cuadro 39**  
**Comparación de indicadores de rentabilidad para distintos escenarios**

|                           | VAN<br>(en MM de dólares) | Cambio porcentual con respecto<br>a proyecto sin PSC |
|---------------------------|---------------------------|------------------------------------------------------|
| Proyecto sin PSC          | -13.213                   | -                                                    |
| Proyecto con PSC inferior | -13.569                   | 2,7                                                  |
| Proyecto con PSC central  | -13.786                   | 4,3                                                  |
| Proyecto con PSC superior | -13.975                   | 5,8                                                  |

Fuente: Elaboración propia.

Debido a que los flujos del proyecto son negativos, no es posible calcular la TIR para ningún escenario. Se observa un empeoramiento del VAN del 2,7% en el caso del PSC inferior hasta 5,8% en el caso del PSC más alto.

Los flujos negativos se explican debido a que los viajes realizados no descongestionan la carretera base lo suficiente para generar beneficios por disminución en el tiempo de viaje ni ahorro de combustible. La incorporación del PSC acentúa este valor negativo debido a la gran cantidad de emisiones asociadas a la etapa de operación del proyecto.

## VI. Recomendaciones

En lo que respecta a huella de carbono unitaria marginal estimadas para los proyectos de transporte interurbanos, destaca el ferrocarril (mejor carga y 2° mejor para pasajeros) y el dirigible (mejor pasajeros y 2° mejor para carga) como los que presentan menores emisiones de GEI. Por lo que desde un punto de vista ambiental resulta recomendable promover el uso de estas soluciones, adicionalmente desde un punto de vista de rentabilidad social, podemos destacar que el proyecto ferroviario también fue el que alcanzó mayor rentabilidad social. El proyecto de dirigible, no puede ser un sustituto para satisfacer la totalidad de la demanda del proyecto (se analizó un 4%) debido a que funciona bien para viajes mayores a 300 km y no permite satisfacer idóneamente viajes de corta distancia (iguales o menores a 50 km), adicionalmente no fue posible evaluarlo debido a la falta de información relativa a costos, sin embargo pareciera ser una alternativa altamente competitiva con el transporte aéreo de distancias medias (400 km-1.200 km), dado que tiene tiempos de traslados similares, menores impactos territoriales y huellas de carbono mucho menores, esto lo harían una solución altamente atractiva para transporte interurbano en zonas en que se desea un impacto ambiental mínimo, por ejemplo el Amazonas.

En términos de soluciones de alta escala de pasajeros y carga, el mejor desempeño económico y en ambiental (emisiones de GEI) se obtiene para el Proyecto Ferroviario y en segundo lugar para la ampliación de carretera. Es importante destacar que en general los proyectos de ampliación de carreteras no realizan la evaluación de la alternativa de implementar un proyecto ferroviario, es recomendable cambiar esta práctica, debido a que el presente estudio sugiera que esta solución puede proveer una mayor rentabilidad social, junto con aportar a la mitigación de las emisiones de GEI de manera sustancial.

Para los modos de transporte carretero y aéreo, las emisiones estimadas para la fase de uso representan más del 95% del total de las emisiones en el ciclo de vida, lo que es consecuente con lo reportado en la literatura. Por lo que es importante buscar alternativas que conlleven a la reducción de las emisiones en esta fase como, por ejemplo: el cambio de combustible de los vehículos (biocombustibles, hidrógeno verde, combustibles sintéticos verdes o vehículos eléctricos), soluciones de cambio modal (traspasar una parte del transporte interurbano de carga y pasajeros a medios de menos emisiones, como el ferrocarril, marítimo y el dirigible), entre otros.

En términos del impacto en la evaluación social de los proyectos de camino, la incorporación de un PSC en el rango de los valores utilizados por el Ministerio de Desarrollo Social de Chile (20,2 a 43,2 USD/t CO<sub>2</sub>), tendría un impacto positivo para la evaluación social de proyectos de caminos, dado que lo hace más rentable en todos los casos analizados. Cabe destacar que a mayor PSC la rentabilidad social mejora para el caso del Ferrocarril y la ampliación de la carretera. Por otro lado, es recomendable hacer análisis de los proyectos considerando periodos de tiempo más extensos (al menos 40 años), permitiendo comparar alternativas en el ciclo de vida del camino. Para que esto se vea reflejado es relevante considerar tasas de descuento menores (5% o menos) o decrecientes en el tiempo.

## VII. Conclusión

En el presente estudio, se propone una metodología y una herramienta para el cálculo de las emisiones de GEI en el ciclo de vida de diferentes proyectos de transporte interurbano de pasajeros y de carga, planteando proyectos representativos de ampliación de carretera, ferroviarios, aviación y dirigibles, esto se aplicó para los diferentes países bajo estudio, pero se podría aplicar a otros países con relativa facilidad. Complementariamente se realizó un ejercicio de evaluación social simplificado, para proyectos genéricos, que permite analizar el impacto del uso de un PSC en las evaluaciones sociales de proyectos de Ampliación de carreteras, ferroviarios y aviación, para dirigibles, no fue posible hacer una evaluación social, dada la poca información sobre proyectos del tipo.

El caso estudio comparó la situación de una carretera de 500km, que, debido a un crecimiento proyectado de su demanda, se analizan alternativas para evitar su saturación, en base a los proyectos descritos. Se realizó la comparación de la huella de carbono asociada a proyectos ferroviarios, de carretera y de transporte aéreo utilizando una demanda propuesta. En cada uno de estos proyectos se determinó las contribuciones a las emisiones tanto de los vehículos en si como de la infraestructura asociada para el correcto funcionamiento de estos.

En términos de impacto total de emisiones, el caso base (sin proyecto) generaba emisiones por 49,4 Millones de toneladas de CO<sub>2</sub>e en los 40 años considerados para su ciclo de vida. La opción que permite alcanzar mayor reducción (15,8MMTon CO<sub>2</sub>e) es el proyecto ferroviario, seguido por la ampliación de la carretera (8MMTon CO<sub>2</sub>e) y el dirigible (2,6MM), por el contrario, el proyecto de aviación generaría un incremento de las emisiones (51MMtonCO<sub>2</sub>e), siendo más del doble del caso base.Ton CO<sub>2</sub>e.

Dado que los modos de transporte aéreo no logran sustituir la demanda de transporte para tramos intermedios de la carretera, el impacto de los proyectos en las emisiones marginales de cada pasajero/tonelada transportada varía. De hecho, se puede apreciar que, en términos de demanda marginal, la reducción de la Huella de Carbono más alta para el transporte de pasajeros en el Dirigible (-85%), seguido del proyecto ferroviario (-71%) y por último la ampliación de la carretera (-3%). En lo que respecta al transporte de carga, la opción de menores emisiones es el ferroviario (-93%), seguido bastante de lejos por el Proyecto de Dirigible (-14%) y la ampliación de la carretera (-13%). En lo que respecta a las soluciones de aviación, se aprecia como es de esperarse, un fuerte incremento en las emisiones, frente al caso base, tanto para pasajeros (75%) como para carga (986%).

En términos de variación de los resultados, para los distintos países, la principal diferencia está asociada a la matriz de generación de electricidad, lo que impacta en la huella de carbono de la operación de los proyectos ferroviarios. Las emisiones relacionadas con la etapa de operación varían entre 2,2-12 [grCO<sub>2</sub>e/pkm] para transporte de pasajeros y 0,9-5,2 [grCO<sub>2</sub>e/Tonkm] para carga, siendo Costa Rica el país con el menor valor asociado y Chile el mayor, la diferencia es casi 6 veces para la fase de operación y 2 veces en lo que es todo el ciclo de vida. Lo que se debe a la diferencia en los Factores de emisión de sus matrices eléctricas. Con respecto a las emisiones relacionadas con la Construcción y Mantenimiento, en todos los casos menos en Chile, este valor es mayor en comparación con el de la etapa de Operación. Resulta interesante analizar como variarían las emisiones asociadas a los proyectos ferroviarios utilizando para los próximos años considerando el horizonte de evaluación de los proyectos, debido a que los países se han comprometido con NDCs lo que implicaría que a futuro la generación de energía debiera ser más limpia y sustentable para los próximos años.

En términos de evaluación social tenemos que, de los 3 proyectos evaluados, la ampliación de la carretera (VAN 936 MMUSD y TIR 16,4%) y el ferrocarril (VAN 1.459MMUSD y TIR 18,4%) son rentables socialmente, mientras que el proyecto de Aviación (VAN -13.213MMUSD y TIR NA) no es rentable. En cuanto al impacto de la incorporación del PSC a la evaluación original, estos resultados se acentúan, teniendo que el proyecto más rentable es el Ferrocarril (VAN [1.557-1.643] MMUSD y TIR [18,9%-19,4%]), seguido por la ampliación de la carretera (VAN [969-1.006]MMUSD y TIR [16,5%-16,6%]), por su parte el proyecto de aviación (VAN [-13.975 - -13.569]MMUSD y TIR NA) empeora su rentabilidad.

De esto se puede concluir que, para el caso analizado, para transporte interurbano de carga y pasajeros, la utilización de proyectos de ferrocarril, pueden ser una solución rentable socialmente y con beneficios de emisiones de CO<sub>2</sub>e, la alternativa tradicional de ampliar una carretera es una solución válida, pero menos beneficiosa en términos de evaluación social y de emisiones de CO<sub>2</sub>e. En términos de emisiones es destacable que la solución de dirigible es la opción de transporte con menor huella de carbono unitaria, para transporte de pasajeros y la segunda en el caso de transporte de carga (tras ferrocarril), esto lo hace una alternativa interesante para analizar para proyectos que requieren movilizar de manera veloz y con un bajo impacto ambiental carga y/o pasajeros.



## Bibliografía

- Airbus (2005a), A319 Aircraft Characteristics - Airport and Maintenance Planning. 397.
- \_\_\_\_\_(2005b), A320 Aircraft Characteristics - Airport and Maintenance Planning. 397.
- Alstom, (2015), Coradia Polyvalent: Environmental Product Declaration.
- \_\_\_\_\_(2006a), Environmental Product Declaration Prima II.
- \_\_\_\_\_(2006b), Environmental Product Declaration: Prima II. 04, 1–19.
- Andersson, E., & Lukaszewicz, P. (2006), Energy Consumption and Related Air Pollution for Scandinavian Electric Passenger Trains.
- Boeing (2006), Boeing 737 Airplane Characteristics for Airport Planning. *The Economic Journal*, 80(318), 307. <https://doi.org/10.2307/2230120>.
- Bombardier (2012), *Environmental Product Declaration - TALENT 2*. 8.
- Bombardier Transportation (2011), *SPACIUM: Environmental Product Declaration*.
- \_\_\_\_\_(2006), *Environmental Product Declaration: TRAXX F140 MS*.
- Bombardier Transportation Sweden AB (2012), *REGINA Intercity X55: Environmental Product Declaration*. 2–6.
- Cifuentes, L. A. (2020), *efecto del impuesto al CO<sub>2</sub> en el sector energía de países selectos de Latinoamérica y el Caribe Informe Final Tabla de Contenidos*.
- Comision Nacional de Energia (2020), Factores de emisión-Energía Abierta|Comisión Nacional de Energía.
- Economía y energía (2019), *Competitividad y Costo de la Energía*. <https://www.energiaestrategica.com/wp-content/uploads/2020/01/Informe-Competitividad-vf.pdf?x55464>.
- ICAO (2014), *ICAO Carbon Emissions Calculator Methodology Version 7 June 2014 Table of Contents*. June.
- ifeu heidelber; INFRAS Berne; IVE Hannover (2018), *Ecological Transport Information Tool for Worldwide Transports: Methodology and Data Update 2018*. May.
- Instituto Meteorológico Nacional (2018), Factores de emisión gases efecto invernadero.
- IPCC (2006), CAPÍTULO 3. Combustión Móvil. *Directrices Del IPCC de 2006 Para Los Inventarios Nacionales de Gases de Efecto Invernadero*, 2, 78.
- Jullien, A., Dauvergne, M., & Cerezo, V. (2014), Environmental assessment of road construction and maintenance policies using LCA. *Transportation Research Part D*.
- Knörr, W., Heidt, C., Notter, B., Läderach, A., Biemann, K., & Antes, R. (2018), Ecological Transport Information Tool for Worldwide Transports. Methodology and Data. In Update.

- Knörr, W., & Hüttermann, R. (2016), *EcoPassenger: Environmental Methodology and Data Update 2016*. 49(0), 0–27.
- Lopes, J. V. de O. F. (2010), Life Cycle Assessment of the Airbus A330-200 Aircraft. *Assessment*, 140. [https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/395142223995/Tese\\_JoaoVascoLopes.pdf](https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/395142223995/Tese_JoaoVascoLopes.pdf).
- Ministerio de Ambiente (2017), primer informe de Panamá ante la CMNUCC.
- Ministerio de Desarrollo Social (2017a), *Estimación del Precio Social del CO<sub>2</sub>*. <http://sni.ministeriodesarrollosocial.gob.cl/download/precio-social-co2-2017/>.
- \_\_\_\_\_(2017b), *METODOLOGÍA DE FORMULACIÓN Y EVALUACIÓN DE PROYECTOS DE TRANSPORTE INTERURBANO*. 2. [http://cdr.eionet.europa.eu/es/eu/mmr/arto7\\_inventory/ghg\\_inventory/%0Ahttp://www.magrama.gob.es/es/cambio-climatico/temas/comercio-de-derechos-de-emision/](http://cdr.eionet.europa.eu/es/eu/mmr/arto7_inventory/ghg_inventory/%0Ahttp://www.magrama.gob.es/es/cambio-climatico/temas/comercio-de-derechos-de-emision/).
- Ministerio de Desarrollo Social y Familia de Chile (2020), *Precios Sociales 2020*.
- Romero, B. (2003), El análisis del ciclo de vida y la gestión ambiental. *Boletín IiE*, 91–97. [http://www.icesi.edu.co/blogs/mercadeosostenible2012\\_02/files/2012/10/ACV\\_MEDIO-AMBIENTE.pdf](http://www.icesi.edu.co/blogs/mercadeosostenible2012_02/files/2012/10/ACV_MEDIO-AMBIENTE.pdf).
- Schmied, M., & Mottschall, M. (2010), *Treibhausgasemissionen durch die Schieneninfrastruktur und Schienenfahrzeuge in Deutschland*.
- Tuchschnid, M., Knörr, W., Schach, A., Mottschall, M., & Schmied, M. (2011), *Carbon Footprint and environmental impact of railway infrastructure*. 49(0), 30–40.
- Vicuña, V., Marín, C., Pica, A., & Rivera, A. (2020), " *Simulaciones del precio social del carbono en el sector Infraestructura en países seleccionados de América Latina y el Caribe*".
- Yanto, J., & Liem, R. P. (2018), Aircraft fuel burn performance study: A data-enhanced modeling approach. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 65, 574–595. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2018.09.014>.

## Anexos

## Anexo 1

### Emisiones por elemento de infraestructura ferroviaria

#### Single Track

**Cuadro A1**  
**Rieles, durmientes, catenarias y centro de control**

| Item                                              | Emisiones<br>(en kgCO <sub>2</sub> /año km) |
|---------------------------------------------------|---------------------------------------------|
| Concrete sleeper, single track                    | 5 184                                       |
| Rail UIC 60, single track                         | 6 090                                       |
| Wire of catenary, single track                    | 353                                         |
| mast & overhead wiring, concrete, single track    | 1 367                                       |
| Signals (per km single track)                     | 33                                          |
| cable for telecommunication (per km single track) | 380                                         |
| cable drain (per km single track)                 | 295                                         |
| Railway control centre, building                  | 227                                         |
| Railway control centre, electrical installations  | 965                                         |
| Earthwork, single track new constructed lines     | 5 933                                       |

Fuente: Elaboración propia a partir de Tuchschnid et al. (2011).

**Cuadro A2**  
**Puentes y túneles**

| Item                          | Emisiones<br>(en kgCO <sub>2</sub> /año km) |
|-------------------------------|---------------------------------------------|
| Viaduct, single track (>200m) | 154 925                                     |
| Small bridge, concrete        | 67 534                                      |
| Iron bridge                   | 136 412                                     |
| Tunnel, Open pit              | 285 351                                     |
| Tunnel, Mining                | 169 619                                     |

Fuente: Elaboración propia a partir de Tuchschnid et al. (2011).

#### Doble Track

**Cuadro A3**  
**Rieles, durmientes, catenarias y centro de control**

| Item                                           | Emisiones<br>(en kgCO <sub>2</sub> /año km) |
|------------------------------------------------|---------------------------------------------|
| Concrete sleeper, double track                 | 10 340                                      |
| Rail UIC 60, double track                      | 12 180                                      |
| Wire of catenary, double track                 | 706                                         |
| Mast & overhead wiring, concrete, double track | 2 734                                       |
| Signals (per km double track)                  | 56                                          |

| Item                                              | Emisiones<br>(en kgCO <sub>2</sub> /año km) |
|---------------------------------------------------|---------------------------------------------|
| Cable for telecommunication (per km double track) | 634                                         |
| Cable drain (per km double track)                 | 491                                         |
| Railway control centre, building                  | 227                                         |
| Railway control centre, electrical installations  | 965                                         |
| Earthwork, double track new constructed lines     | 9 791                                       |

Fuente: Elaboración propia a partir de Tuchschnid et al. (2011).

#### **Cuadro A4** **Puentes y túneles**

| Item                          | Emisiones<br>(en kgCO <sub>2</sub> /año km) |
|-------------------------------|---------------------------------------------|
| Viaduct, Double track (>200m) | 258 209                                     |
| Small bridge, concrete        | 112 557                                     |
| Iron bridge                   | 227 353                                     |
| Tunnel, Open pit              | 475 585                                     |
| Tunnel, Mining                | 282 699                                     |

Fuente: Elaboración propia a partir de Tuchschnid et al. (2011).

#### **Cuadro A5** **Construcción y mantenimiento de edificios relevantes**

| Item                                      | Emisiones<br>(en kgCO <sub>2</sub> /año km) |
|-------------------------------------------|---------------------------------------------|
| Junction for intercity trains             | 164 714                                     |
| Junction for local trains                 | 68 142                                      |
| Stop for local trains                     | 10 407                                      |
| Railway station (stop for freight trains) | 156 005                                     |
| Site for maintenance / repair-ing         | 122 083                                     |
| Transformer Substation:                   | 55 43                                       |

Fuente: Elaboración propia a partir de Tuchschnid et al. (2011).

## Anexo 2

### Ficha resumen para trenes de pasajeros

**Cuadro A6**  
**Modelo Regina X55**

| Modelo                                          | Regina X55           |
|-------------------------------------------------|----------------------|
| País de operación                               | Suecia               |
| Combinación electricidad                        | 99% Hidro  1% Viento |
| Consumo de energía tren                         | 8,04 kWh/km          |
| Consumo de energía tren estimado                | 0,065 kWh/pkm        |
| Número de pasajeros (considera factor de carga) | 123                  |
| Distancia recorrida al año                      | 400000 km            |
| Velocidad máxima                                | 200 km/h             |
| Vida útil                                       | 25 años              |

Fuente: Elaboración propia a partir de Bombardier Transportation Sweden AB (2012).

**Cuadro A7**  
**Modelo Coradia Polyvalent**

| Modelo                                          | Coradia Polyvalent |
|-------------------------------------------------|--------------------|
| País de operación                               | Francia            |
| País de construcción                            | Francia            |
| Consumo de energía tren                         | 0,0172 kWh/pkm     |
| Número de pasajeros (considera factor de carga) | 220                |
| Distancia recorrida al año                      | 150000 km          |
| Velocidad máxima                                | 160 km/h           |
| Vida útil                                       | 40 años            |

Fuente: Elaboración propia a partir de Alstom (2015).

**Cuadro A8**  
**Modelo Spacium**

| Modelo                                          | Spacium                                                          |
|-------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|
| País de operación                               | Francia                                                          |
| Combinación electricidad                        | 78% Nuclear  12% Hidro  4% Gas natural  4% Carbón duro  2% Otros |
| Consumo de energía tren                         | 24,6 kWh/km (reostático)  16,1 kWh/km (regeneración)             |
| Consumo de energía tren estimado                | 0,027 kWh/pkm (reostático)  0,018 kWh/pkm (regeneración)         |
| Número de pasajeros (considera factor de carga) | 906                                                              |
| Distancia recorrida al año                      | 20000 km                                                         |
| Velocidad máxima                                | 140 km/h                                                         |
| Vida útil                                       | 40 años                                                          |
| Material reciclado                              | 35%                                                              |

Fuente: Elaboración propia a partir de Bombardier Transportation (2011).

**Cuadro A9**  
**Modelo Talent II**

| Modelo                                          | Coradia Polyvalent |
|-------------------------------------------------|--------------------|
| País de operación                               | Alemania           |
| Consumo de energía tren                         | 6,35 kWh/km        |
| Número de pasajeros (considera factor de carga) | 111                |
| Distancia recorrida al año                      | 250000 km          |
| Velocidad máxima                                | 160 km/h           |
| Vida útil                                       | 32 años            |

Fuente: Elaboración propia a partir de Bombardier (2012).

## Anexo 3

### Ficha resumen para trenes de carga

**Cuadro A10**  
**Modelo TRAXX F140 MS**

| Modelo                     | TRAXX F140 MS |
|----------------------------|---------------|
| País de operación          | Europa        |
| Consumo de energía tren    | 12 Wh/tkm     |
| Peso locomotor             | 84,7 t        |
| Peso total                 | 1260 t        |
| Distancia recorrida al año | 150000 km     |
| Velocidad máxima           | 140 km/h      |
| Vida útil                  | 30 años       |

Fuente: Elaboración propia a partir de Bombardier Transportation (2006).

**Cuadro A11**  
**Modelo Prima II**

| Modelo                     | Prima II              |
|----------------------------|-----------------------|
| País de operación          | Europa                |
| Consumo de energía tren    | 12,5 Wh/tkm (Francia) |
| Peso locomotora            | 88 t                  |
| Peso total                 | 1590 t                |
| Distancia recorrida al año | 150000 km             |
| Velocidad máxima           | 80 km/h               |
| Vida útil                  | 30 años               |

Fuente: Elaboración propia a partir de Alstom (2006a).

Anexo 4  
Demanda estimada por año para trasporte de pasajeros y carga

| Tipo de transporte | Año     | 0 | 1          | 2          | 3          | 4          | 5          | 6          | 7          | 8          | 9          | 10         |
|--------------------|---------|---|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Pasajeros          | p/año   | 0 | 13 132 500 | 13 526 475 | 13 932 269 | 14 350 237 | 14 780 744 | 15 224 167 | 15 680 892 | 16 151 319 | 16 635 858 | 17 134 934 |
| Carga              | Ton/año | 0 | 9 888 000  | 10 184 640 | 10 490 179 | 10 804 885 | 11 129 031 | 11 462 902 | 11 806 789 | 12 160 993 | 12 525 823 | 12 901 597 |

| Tipo de transporte | 11         | 12         | 13         | 14         | 15         | 16         | 17         | 18         | 19         | 20         |
|--------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Pasajeros          | 17 391 958 | 17 652 837 | 17 917 630 | 18 186 394 | 18 459 190 | 18 736 078 | 19 017 119 | 19 302 376 | 19 591 912 | 19 885 790 |
| Carga              | 13 095 121 | 13 291 548 | 13 490 921 | 13 693 285 | 13 898 684 | 14 107 165 | 14 318 772 | 14 533 554 | 14 751 557 | 14 972 830 |

| Tipo de transporte | 21         | 22         | 23         | 24         | 25         | 26         | 27         | 28         | 29         | 30         |
|--------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Pasajeros          | 19 985 219 | 20 085 145 | 20 185 571 | 20 286 499 | 20 387 931 | 20 489 871 | 20 592 320 | 20 695 282 | 20 798 758 | 20 902 752 |
| Carga              | 15 047 694 | 15 122 933 | 15 198 548 | 15 274 540 | 15 350 913 | 15 427 668 | 15 504 806 | 15 582 330 | 15 660 242 | 15 738 543 |

| Tipo de transporte | 31         | 32         | 33         | 34         | 35         | 36         | 37         | 38         | 39         | 40         | Total       |
|--------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|-------------|
| Pasajeros          | 21 007 266 | 21 112 302 | 21 217 864 | 21 323 953 | 21 430 573 | 21 537 726 | 21 645 414 | 21 753 641 | 21 862 410 | 21 971 722 | 755 962 900 |
| Carga              | 15 817 236 | 15 896 322 | 15 975 803 | 16 055 682 | 16 135 961 | 16 216 641 | 16 297 724 | 16 379 212 | 16 461 108 | 16 543 414 | 569 195 595 |

Fuente: Elaboración propia.



## Anexo 5

### Emisiones de infraestructura de una carretera de un proyecto representativo

| Longitud<br>(km) | Carretera<br>(CO <sub>2</sub> kg/y) | Puente < 200m<br>(CO <sub>2</sub> kg/y) | Puente > 200m<br>(CO <sub>2</sub> kg/y) | Long tunel<br>(CO <sub>2</sub> kg/y) | Total<br>(ton CO <sub>2</sub> /y) | Total proyecto<br>(CO <sub>2</sub> e) |
|------------------|-------------------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------------|
| 100              | 2 497 750                           | 33 767                                  | 27 282                                  | 50 886                               | 2 610                             | 52 194                                |
| 200              | 4 995 500                           | 40 520                                  | 54 565                                  | 50 886                               | 5 141                             | 102 829                               |
| 300              | 7 493 250                           | 47 274                                  | 81 847                                  | 50 886                               | 7 673                             | 153 465                               |
| 500              | 12 488 750                          | 67 534                                  | 109 130                                 | 50 886                               | 12 716                            | 254 326                               |

Fuente: Elaboración propia.

## Anexo 6

### Operación modelos de trenes de pasajeros

| Modelo             | Consumo Eléctrico<br>(kWh/pkm) | Operación <sup>a</sup><br>(gCO <sub>2</sub> e/pkm) | Capacidad |
|--------------------|--------------------------------|----------------------------------------------------|-----------|
| Regina X55         | 0,065                          | 20,952                                             | 245       |
| Coradia Polyvalent | 0,017                          | 5,544                                              | 220       |
| Spacium            | 0,027                          | 8,703                                              | 906       |
| TALENT 2           | 0,058                          | 18,608                                             | 221       |

Fuente: Elaboración propia a partir de EPD de Alstom (2015) y Bombardier Transportation (2011).

<sup>a</sup> Tomando como FE energía eléctrica de Nicaragua.

## Anexo 7

### Emisiones de infraestructura ferroviaria de un proyecto representativo

| Longitud<br>(km) | Vía férrea<br>(CO <sub>2</sub> kg/y) | Puente < 200m<br>(CO <sub>2</sub> kg/y) | Puente > 200m<br>(CO <sub>2</sub> kg/y) | Túnel<br>(CO <sub>2</sub> kg/y) | Estación Local<br>(CO <sub>2</sub> kg/y) | Parada local<br>(CO <sub>2</sub> kg/y) | Sitio para<br>mantenimiento<br>(CO <sub>2</sub> kg/y) | Transformer<br>Substation<br>(CO <sub>2</sub> kg/y) | Total<br>(ton CO <sub>2</sub> /y) | Total<br>proyecto<br>(CO <sub>2</sub> e) |
|------------------|--------------------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------|---------------------------------|------------------------------------------|----------------------------------------|-------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------------|
| 100              | 3 812 400                            | 56 279                                  | 45 471                                  | 84 810                          | 136 284                                  | 104 070                                | 122 083                                               | 5 543                                               | 4 367                             | 87 339                                   |
| 200              | 7 624 800                            | 67 534                                  | 90 941                                  | 84 810                          | 204 426                                  | 124 884                                | 122 083                                               | 5 543                                               | 8 325                             | 166 500                                  |
| 300              | 11 437 200                           | 78 790                                  | 136 412                                 | 84 810                          | 272 568                                  | 166 512                                | 122 083                                               | 11 086                                              | 12 309                            | 246 189                                  |
| 500              | 19 062 000                           | 112 557                                 | 181 882                                 | 84 810                          | 408 852                                  | 208 140                                | 244 166                                               | 11 086                                              | 20 313                            | 406 270                                  |

Fuente: Elaboración propia.

## Anexo 8

### Operación modelos de trenes de carga

| Modelo        | Consumo Eléctrico<br>(kWh/tkm) | Operación <sup>a</sup><br>(gCO <sub>2</sub> e/tkm) | Peso mínimo (t) | Peso máximo (t) |
|---------------|--------------------------------|----------------------------------------------------|-----------------|-----------------|
| TRAXX F140 MS | 0,012                          | 3,868                                              | 85              | 1260            |
| PRIMA II      | 0,013                          | 4,029                                              | 88              | 1590            |

Fuente: Elaboración propia a partir de EPD de Alstom (2015) y Bombardier Transportation (2011).

<sup>a</sup> Tomando como FE energía eléctrica de Nicaragua.

El precio social del carbono es un instrumento de política con el que es posible incidir, a través de decisiones de inversión pública, en el estilo de desarrollo de los países. En este estudio se propone una metodología y una herramienta para el cálculo de las emisiones de gases de efecto invernadero en el ciclo de vida de diferentes proyectos de transporte interurbano de pasajeros y de carga, planteando proyectos representativos de ampliación de carreteras, ferroviarios, de aviación y de dirigibles. Esta metodología podría aplicarse a otros países no incluidos en este estudio con relativa facilidad. Se lleva a cabo un ejercicio de evaluación social simplificado, para proyectos genéricos, que permite analizar el impacto del uso de un precio social del carbono en las evaluaciones sociales de proyectos de ampliación de carreteras, ferroviarios y de aviación. Los resultados indican que, en los casos analizados, los proyectos de ferrocarril pueden ser una solución rentable socialmente y con beneficios respecto de las emisiones expresadas en dióxido de carbono equivalente (CO<sub>2</sub>e) para el transporte interurbano de carga y pasajeros. La alternativa tradicional de ampliar una carretera es una solución válida, pero menos beneficiosa en términos de evaluación social y emisiones de CO<sub>2</sub>e.