

INFORME TÉCNICO



2012

Huella de carbono de la construcción de
una línea ferroviaria de alta velocidad

Elaborado por

ineco

En colaboración con

ecodes
tiempo de actuar

CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN	1
2.	OBJETO Y ALCANCE	3
3.	METODOLOGÍA DE CÁLCULO	4
3.1.	INTRODUCCIÓN.....	4
3.2.	ESTANDARIZACIÓN DE PROYECTOS	5
3.3.	DESCRIPCIÓN DE LÍMITES DEL SISTEMA Y FASES CONSIDERADAS.....	6
3.3.1.	Proyectos de construcción de plataforma.....	6
3.3.2.	Proyectos de montaje de vía	9
3.4.	HIPÓTESIS Y SISTEMA DE CÁLCULO DE LA HUELLA DE CARBONO	10
3.4.1.	Proyectos de construcción de plataforma.....	11
3.4.2.	Proyectos de construcción de vía	12
3.4.3.	Obtención de los factores de emisión.....	12
3.5.	APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA- RESULTADOS.....	14
3.6.	AMPLIACIÓN DEL MÉTODO DE CÁLCULO.....	16
4.	BIBLIOGRAFÍA	17

Informe elaborado gracias a la colaboración de empleados de Ineco, dentro del Programa de Voluntariado Corporativo.

1. INTRODUCCIÓN

El cambio climático y el calentamiento global son actualmente unas de las principales cuestiones asociadas al desarrollo sostenible y sus repercusiones se extienden a todos los niveles de la sociedad y de la estructura económica.

Desde la entrada en vigor del Protocolo de Kioto en 2005, numerosas organizaciones reguladas han tenido que proveer anualmente inventarios de sus emisiones de gases de efecto invernadero (GEI)¹. Como consecuencia de ello apareció el concepto de la **huella de carbono**, que es la cantidad de gases de efecto invernadero, expresados en términos de CO₂ equivalente², que son directa e indirectamente generados durante una actividad o durante el ciclo de vida de un producto o servicio.

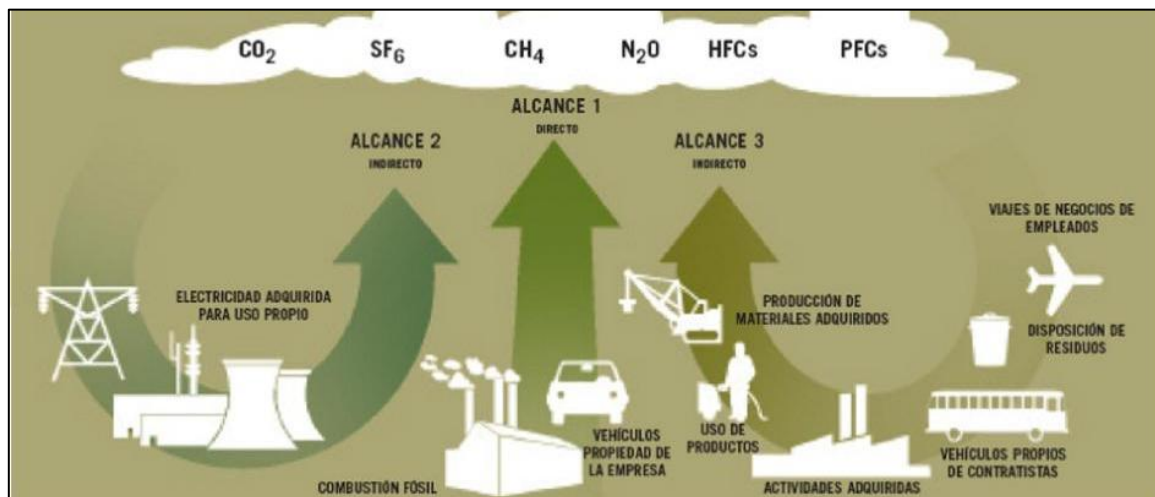


Figura 1: Alcances operacionales y emisiones a través de la cadena de valor (Fuente: Estándar Corporativo de Contabilidad y Reporte, GHG Protocol)

Las distintas organizaciones, tanto públicas como privadas, deben ser capaces de entender y gestionar adecuadamente sus emisiones de GEI si quieren demostrar una gestión sostenible de sus actividades y servicios y mantener el éxito a largo plazo en un entorno empresarial competitivo. Un sistema bien diseñado y mantenido de inventario corporativo de GEI, que se alinea con las cuestiones específicas de negocio, es una herramienta empresarial esencial y se considera cada vez más como un importante indicador de buenas prácticas de gestión.

Muchos gobiernos están tomando actualmente medidas para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero a través de políticas nacionales que incluyen la introducción de programas de comercio de emisiones, impuestos sobre el carbono o la energía, así como regulaciones y normas en materia de eficiencia energética y emisiones.

¹Gas de efecto invernadero (GEI): Componente gaseoso de la atmósfera, tanto natural como antropogénico, que absorbe y emite radiación a longitudes de onda específicas dentro del espectro de radiación infrarroja emitida por la superficie de la tierra, la atmósfera y las nubes. Los principales GEI son: dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O), hidrofluoro carbonos (HFC), perfluorocarbonos (PFC) y hexafluoruro de azufre (SF₆). (Definición de la norma UNE-EN ISO 14064-1).

²CO₂ equivalente: Unidad para comparar la fuerza de radiación de un GEI con el dióxido de carbono. (Definición de la norma UNE-EN ISO 14064-1).

Mediante una adecuada medición y gestión de las emisiones de CO₂, las organizaciones pueden reducir el consumo de energía de sus actividades y por tanto reducir el impacto ambiental asociado así como los costes operativos.

Por otra parte, estándares de sostenibilidad voluntarios como el Global Reporting Initiative (GRI), están influyendo en parte en los procesos de selección de contratistas. Las emisiones de CO₂ son un aspecto importante de estos estándares y por ello, la forma en la que una organización gestione sus emisiones y su posible afección al cambio climático influirá cada vez más en los procesos de contratación.

La industria de la construcción es un sector complejo, con diferentes tipos de empresas que operan en distintos puntos de la cadena de valor, que se extiende a través de la financiación, el diseño, la fabricación de materiales, la construcción, la operación y el mantenimiento. Debido a la gran variedad de empresas relacionadas con el sector de la construcción, es importante que se elaboren y empleen metodologías capaces de mostrar líneas distintas de responsabilidad de las emisiones de CO₂ en la cadena de valor de la construcción.

En los últimos años se han desarrollado diversas metodologías de cálculo de emisiones de CO₂ que podrían aplicarse al ciclo de vida de una línea ferroviaria, pero la mayoría de ellas se centran principalmente en la fase de operación, así como en el suministro de energía y de materiales y no consideran en detalle las emisiones directas asociadas a la maquinaria empleada en la fase de construcción de la infraestructura.

El presente informe recoge la metodología desarrollada por Ineco para calcular las emisiones de CO₂ asociadas a la fase de construcción de una línea de alta velocidad. La sistemática plantea complementar a otras metodologías ya existentes e internacionalmente reconocidas.

Para el desarrollo de esta metodología se han consultado y tenido en consideración diversos estándares internacionales, entre otros el protocolo de gases de efecto invernadero “GHG Protocol” y la norma ISO 14064-1 “Especificación con orientación, a nivel de las organizaciones, para la cuantificación y el informe de las emisiones y remociones de gases de efecto invernadero”, así como diversos estudios publicados relacionados con esta materia.

2. OBJETO Y ALCANCE

El objeto de este informe es explicar la metodología elaborada por Ineco para calcular la huella de carbono, es decir, las emisiones de gases de efecto invernadero (en adelante GEI) asociadas a la fase de construcción de líneas ferroviarias de Alta Velocidad.

Se excluye, por tanto, la fabricación del material rodante y la fase de operación de la línea, así como las operaciones de mantenimiento tanto del material rodante como de la infraestructura. Así mismo, no se ha contemplado en este estudio la construcción de estaciones ni de centros de gestión de red por considerar que se trata de una tipología diferente de proyectos (edificación), no directamente ligados a la construcción de la línea ferroviaria.

La sistemática de cálculo desarrollada se ha centrado en las emisiones directas de GEI (calculadas como CO₂ equivalente) asociadas a la ejecución de obras de construcción de una línea de alta velocidad, considerando las fases más relevantes de dicha construcción así como las unidades de obra y la maquinaria empleada más representativas en relación a la generación de dichas emisiones.

Adicionalmente, la metodología desarrollada se ha complementado con el cálculo de emisiones indirectas asociadas a la obtención y/o fabricación de los principales materiales utilizados en la construcción de la línea ferroviaria (hormigón, acero y balasto). En este caso, sin embargo, el cálculo se refiere a emisiones de CO₂ y no de CO₂ equivalente - ya que la sistemática de cálculo se apoya en los factores de emisión facilitados por la base de datos Ecoinvent v2.0 y ésta contempla únicamente emisiones de CO₂.

3. METODOLOGÍA DE CÁLCULO

3.1. INTRODUCCIÓN

Tomando como base el amplio conocimiento de Ineco en la realización de proyectos de líneas ferroviarias de Alta Velocidad, se ha desarrollado una metodología de cálculo de las emisiones de GEI (expresadas como CO₂equivalente) asociadas a la ejecución de dichos proyectos de construcción siguiendo la sistemática que se presenta a continuación:



Figura 2: Esquema del desarrollo de la metodología de cálculo de la huella de carbono asociada a la construcción de una línea de Alta Velocidad

Para la elaboración de esta metodología de cálculo de la huella de carbono se han analizado numerosos proyectos de construcción de líneas de alta velocidad con objeto de identificar las principales actividades, unidades de obra y maquinaria asociada - que puede generar emisiones de gases de efecto invernadero- para, posteriormente, calcular los factores de emisión para cada máquina/equipo y unidad de obra ejecutada.

A continuación se describen las distintas fases del estudio y desarrollo metodológico así como los principales resultados obtenidos.

3.2. ESTANDARIZACIÓN DE PROYECTOS

La construcción de una línea ferroviaria de alta velocidad implica, de forma general, el desarrollo de los siguientes proyectos:

- ✓ **Construcción de plataforma:** incluye la explanación de los terrenos (movimiento de tierras) y su tratamiento (capa de forma y sub-balasto), drenaje, estructuras necesarias (viaductos, túneles, pasos superiores e inferiores), instalaciones ferroviarias (canaletas para cables), reposición de servidumbres y servicios afectados, así como obras complementarias (cerramientos, caminos de servicio, etc.).
- ✓ **Montaje de vía:** contempla la ejecución de la superestructura (balasto, traviesas y carril), además de instalaciones ferroviarias (canalizaciones para cables, cerramiento y accesos a la traza).
- ✓ **Electrificación:** incluye la puesta en obra de la catenaria, ejecución de subestaciones de tracción, centros de transformación, instalación de líneas, etc.
- ✓ **Señalización y comunicaciones:** contempla la instalación de instalaciones y equipos para la señalización y control del tráfico, telecomunicaciones, seguridad, etc.



Figuras 3 y 4: Construcción de líneas ferroviarias de Alta Velocidad

Tras analizar los diferentes tipos de proyectos indicados, se ha decidido centrar la presente metodología en los dos primeros por considerarse los más representativos, entendiendo que son los que pueden aportar la parte más significativa de las emisiones asociadas a la construcción de las líneas de alta velocidad. Y ello, por una doble razón:

- La primera es que la experiencia de Ineco indica que el grueso de las obras de construcción se debe a lo que comúnmente se denomina “obra civil”, esto es, la ejecución de plataforma y montaje de vía, ya que el resto de proyectos está más enfocado a suministro y puesta en obra de instalaciones y equipos para los que, además, la obra

civil requerida (canalización de cables, cimentación de postes de catenaria, etc.) ya se ha contemplado en los proyectos anteriormente mencionados.

- La segunda se debe a que parte de la bibliografía consultada³ concluye que, de las emisiones de carbono derivadas de la construcción de líneas de alta velocidad, las asociadas a los proyectos mencionados a continuación ponen más del 98% del total, es decir, que las emisiones derivadas de la electrificación, señalización, comunicaciones y subsistemas auxiliares es despreciable frente a las asociadas a plataforma y montaje de vía.

3.3. DESCRIPCIÓN DE LÍMITES DEL SISTEMA Y FASES CONSIDERADAS

Como se ha comentado anteriormente, la metodología de cálculo elaborada se ha centrado en la determinación de las emisiones directas asociadas a la construcción de una línea ferroviaria de alta velocidad, analizando y seleccionando para ello las fases más relevantes así como las unidades de obra y la maquinaria empleada más representativas en relación a la generación de emisiones de gases de efecto invernadero a la atmósfera.

A continuación se indican las unidades de obra más relevantes seleccionadas para cada una de las tipologías de proyectos de construcción considerados.

3.3.1. Proyectos de construcción de plataforma

Dentro de esta tipología de proyectos, se han considerado como representativas las actividades de movimiento de tierras necesario para realizar la explanación - terraplenes (o rellenos de terreno) y desmontes (terreno que es preciso retirar o excavar) - y la ejecución de las principales estructuras (viaductos y túneles) necesarias para dar continuidad a la traza.

El resto de actividades (drenaje, reposiciones de servicios, etc.) conllevan menor movimiento de maquinaria y utilización de materiales por lo que su huella de carbono se considera irrelevante frente a lo indicado en el primer párrafo.

Este mismo criterio ha sido utilizado en otros estudios de huella de carbono similares. Además, para hacernos una idea, el presupuesto que representa el movimiento de tierras y las estructuras (incluyendo las tareas ambientales que dichas actividades conllevan) sobre el total de un proyecto de plataforma es de - aproximadamente - el 90%.

A continuación se indican las unidades de obra que se han tomado como representativas de cada una de las dos actividades mencionadas.

3.3.1.1. Movimiento de tierras

Dentro de este capítulo se han considerado las siguientes unidades de obra principales:

³“Carbon Footprint of High Speed Rail”. Estudio desarrollado por SYSTRA para la UIC (International Union of Railways), noviembre de 2011.

- Excavación con medios mecánicos y con explosivos, tanto para desmontes como para la ejecución de túneles.
- Formación de terraplén, con material de la excavación de la traza o procedente de préstamos. Esta unidad de obra contempla también otros rellenos de obra como cuñas de transición o relleno sobre túnel artificial.
- Relleno en formación de vertedero, con el material sobrante.
- Transporte de material a vertedero o procedente de préstamo a una distancia mayor de 10 km.



Figuras 5 y 6: Movimiento de tierras

3.3.1.2. Estructuras de ingeniería civil

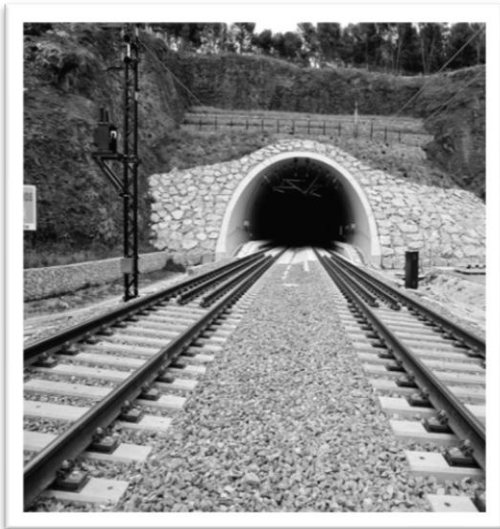
Dentro de este capítulo se han considerado las siguientes estructuras:

- Viaductos: A este respecto se ha considerado principalmente la puesta en obra del hormigón, distinguiendo entre hormigón armado y pretensado, y la del acero diferenciando en barras para armar y acero especial para pretensar.
- Túneles: Las principales unidades analizadas se indican a continuación:
 - Excavación de túnel en avance y destroza
 - Uso de hormigón en revestimiento.



Figuras 7 y 8: Viaductos

Para la excavación se ha considerado una tipología de terreno en función del índice RMR (Rock Mass Rating), que representa el índice de calidad de la roca según distintos parámetros del terreno. En concreto, se ha seleccionado para el análisis un terreno medio con $35 < \text{RMR} < 50$.



Figuras 9 y 10: Túneles

No se ha considerado la excavación con tuneladora porque la mayor parte de las obras de túneles se realizan mediante el sistema de avance y destroza debido a los condicionantes económicos y técnicos que supone la primera (su uso sólo es rentable a partir de una determinada longitud de túnel y requiere elevados radios de curvatura).

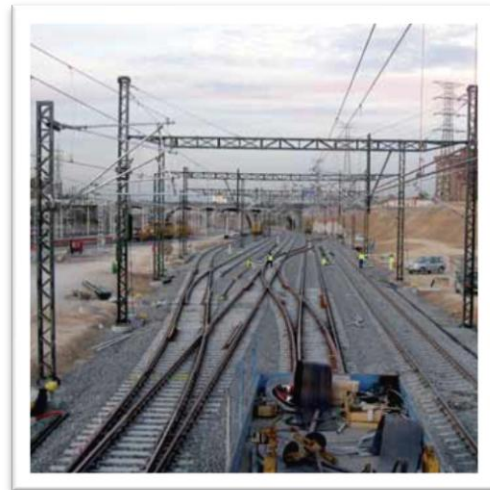
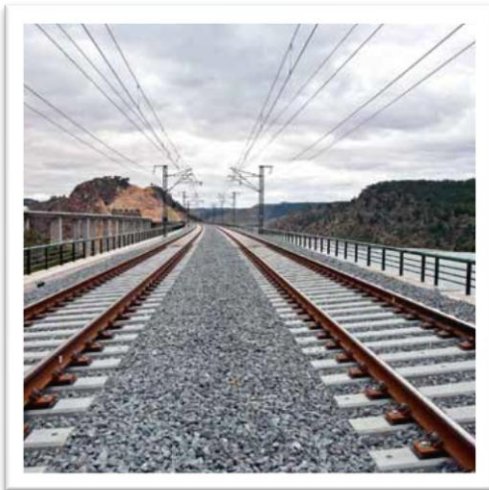
Así mismo, en este caso no se ha contemplado el acero en el revestimiento de hormigón por considerarlo despreciable frente al utilizado en la ejecución de viaductos.

3.3.2. Proyectos de montaje de vía

Para la aplicación de la metodología de cálculo de huella de carbono, se ha tomado como estándar la vía doble montada sobre balasto.

Las líneas de alta velocidad se ejecutan en España en vía doble, ya sea sobre balasto o en placa. Sin embargo, se ha considerado únicamente el primer caso debido a dos razones:

- La primera es que la mayor parte del trazado se ejecuta en vía sobre balasto, dejando la vía en placa para puntos singulares como estaciones, viaductos y túneles (estos últimos, sólo a partir de determinadas longitudes).
- La segunda es que se considera que la puesta en obra de la vía en balasto es la que genera mayores emisiones de CO₂, debido a la maquinaria necesaria para el extendido y nivelación del conjunto de la superestructura. Las emisiones de la vía en placa van asociadas a la fabricación del hormigón en mayor medida que a su puesta en obra (estas emisiones pueden calcularse con la “metodología complementaria” propuesta en el apartado 3.6 de este informe).



Figuras 11 y 12: Montaje de vía

Para estandarizar los proyectos de montaje de vía, se ha tomado como representativa la actividad de construcción de la superestructura que incluye el extendido de balasto, la colocación de traviesas, carril y de aparatos de vía, así como los levantes de vía necesarios (para asegurar la geometría de la vía) y la soldadura del carril. Esta actividad representa más del 80% del presupuesto de ejecución material del proyecto.

El resto de actividades (canalizaciones de cables, riegos con gravilla, etc.) conllevan menor movimiento de maquinaria y utilización de materiales por lo que su huella de carbono se considera irrelevante frente a la superestructura.

Las principales unidades de obra seleccionadas y analizadas se indican a continuación:

- Transporte y descarga de balasto desde cantera a zonas de acopio.

- Transporte y descarga de balasto desde zonas de acopio hasta la traza, ya sea en camión o en tren tolva.
- Colocación de traviesas sobre lecho de balasto.
- Montaje de vía sobre balasto.
- Levante de vía en estado previo a la recepción: corresponde a trabajos de primera nivelación de la vía.
- Levante de vía en estado recepción: corresponde a trabajos de segunda nivelación de la vía.

3.4. HIPÓTESIS Y SISTEMA DE CÁLCULO DE LA HUELLA DE CARBONO

En el sistema de cálculo desarrollado partimos de los datos principales del proyecto, o macro magnitudes, que son las indicadas a continuación:

- ✓ Longitud del tramo, expresado en metros lineales (m).
- ✓ Excavaciones, que asimilamos a desmontes y túneles, expresado en volumen de tierras extraídas (m³).
- ✓ Rellenos, que asimilamos a terraplenes y formación de vertederos, expresado en volumen de tierras aportadas (m³).
- ✓ Hormigón, que se estima aplicado en su totalidad a la ejecución de estructuras (aunque en la práctica se utiliza en otros capítulos como drenaje, etc. pero que no se consideran representativos en comparación con las estructuras), expresado en volumen (m³).
- ✓ Acero: lo asimilamos a la ejecución de estructuras, como en el caso anterior, expresado en peso (t).
- ✓ Longitud total de túneles, expresado en metros lineales (m).

10

En primer lugar, asignamos estos datos a las unidades de obra identificadas como representativas, desglosando para cada una de ellas la maquinaria y/o equipos empleados y sus rendimientos, de acuerdo con las bases de datos de ADIF.

A continuación se asignan los factores de emisión correspondientes a la maquinaria/equipos anteriormente identificados, empleando la *Guía de inventario de emisiones* de la Agencia Europea de Medio Ambiente, EMEP/EEA Air pollutant emission inventory guide book - 2009 (anteriormente denominada EMEP CORINAIR emission inventory guide book), según se describe en el apartado 3.4.3 de este informe.

La herramienta de cálculo elaborada para la presente metodología relaciona las macro magnitudes arriba indicadas con las unidades de obra, y éstas a su vez con la maquinaria/equipos empleados, sus rendimientos y factores de emisión, obteniendo así las emisiones de GEI, expresadas como CO₂ equivalente.

Finalmente, disponiendo de la longitud del tramo, se pueden expresar dichas emisiones como kg o t CO₂equivalente/km.

A continuación se indican los principios de cálculo para cada una de las tipologías de proyecto y unidades de obra consideradas.

3.4.1. Proyectos de construcción de plataforma

Se contemplan únicamente los capítulos de movimiento de tierras y estructuras.

En el capítulo de estructuras no se contemplan los pasos superiores e inferiores por considerar que su ejecución no es representativa respecto a la de las grandes estructuras que suponen los viaductos y túneles.

3.4.1.1. Movimiento de tierras

Se asume que las unidades de obras representativas del movimiento de tierras son las de ejecución de desmontes (excavación) y terraplenes (relleno), así como el transporte de las tierras resultantes de la excavación y/o necesarias para el relleno.

Así, se han tomado dos unidades de obra de excavación: con medios mecánicos y con explosivos, asignando un porcentaje de distribución entre ambos del 80% frente al 20%, respectivamente.

Además, como disponemos del volumen total de tierras excavadas, es necesario repartir este dato entre lo que corresponde a la ejecución de desmontes y lo que corresponde a túneles. Para ello, se descuenta aquí lo correspondiente a estos últimos, calculando el volumen de túnel a partir del dato de longitud de túneles (dato de partida del proyecto, que hay que introducir) y de una sección media libre de 95 m².

Para la estimación de lo que suponen los rellenos, se han identificado dos unidades de obra: terraplén (con material de excavación de la traza o de préstamo) y relleno en formación de vertedero, asignando a cada una de ellas, respectivamente, un porcentaje del 35% y del 65% de la medición total de rellenos (dato de partida del proyecto, a introducir en la herramienta de cálculo).

Finalmente, se contempla el transporte del material a vertedero o procedente de préstamo (a distancia mayor de 10 km) estimando que éste representa aproximadamente un 5% del total del volumen de excavación y relleno del proyecto.

3.4.1.2. Estructuras

Para el cálculo de emisiones correspondientes a la ejecución de viaductos se parte del hormigón total utilizado (dato de partida del proyecto, a introducir en la herramienta de cálculo), del que descontamos el volumen destinado a revestimiento de túneles. Una vez obtenido el volumen utilizado en viaductos, se estima que el 90% es hormigón armado frente al 10% de hormigón pretensado.

Del mismo modo, partiendo del dato de acero total utilizado (se desprecia el que se utiliza en el revestimiento de túneles), se calcula que el 90% se destina a armaduras y el 10% es acero especial para pretensar.

En el caso de túneles, se considera la puesta en obra de hormigón de revestimiento asignándole el volumen que resulta de multiplicar la superficie de revestimiento, calculada como un anillo de 30 cm de espesor (partiendo de una superficie libre de túnel de 95 m²), por la longitud total de túneles, que es un dato de partida.

Además, se considera la unidad de obra correspondiente a la excavación del túnel mediante el sistema de avance y destroza - en un terreno medio (clase C, con $35 < \text{RMR} < 50$) - para un volumen de excavación calculado como se indica en el apartado 3.4.1.1. Se estima, por otra parte, que el 45% de la excavación se realiza en avance y el restante 55%, en destroza.

3.4.2. Proyectos de construcción de vía

Se contempla únicamente el capítulo de superestructura, de acuerdo con la estandarización de los proyectos indicada en el apartado 3.3.2.

3.4.2.1. Superestructura

Se parte del supuesto de que las unidades de obra representativas son el transporte y extendido del balasto, el montaje de traviesas y carril y las dos nivelaciones de vía.

Partiendo de la longitud del tramo en estudio (dato a incorporar en la herramienta de cálculo), se calcula el volumen de balasto necesario, estimando que se requieren 6 m³ de balasto por cada metro lineal de vía doble. Para su transporte, se estima que la distancia media entre cantera y acopio es de 40 km y que, desde acopio a puesta en obra, el transporte se realiza en camión - para el 20% del material - y en tren tolva - para el restante 80%.

Para calcular las emisiones que supone la puesta en obra de las traviesas y la vía se calcula el número de las primeras, sabiendo que la distancia entre ellas es de 60 cm, y se utiliza el dato de longitud del tramo, teniendo en cuenta que se trata de vía doble.

Finalmente, se consideran la primera y segunda nivelación utilizando las unidades de obra de levante de vía contempladas en la base de datos de Adif - levante de vía en estado previo a recepción y levante de vía en estado de recepción, con bateadora pesada - sabiendo que ambas se realizan a lo largo de todo el tramo y teniendo en cuenta que se trata de vía doble (esto es, multiplicándolo por dos).

3.4.3. Obtención de los factores de emisión

La herramienta de cálculo elaborada para la presente metodología relaciona las fases y unidades de obra más relevantes de la actividad de construcción de la línea de alta velocidad con la maquinaria empleada en cada una de ellas, sus rendimientos y sus respectivos factores de emisión.

CONSTRUCCIÓN DE PLATAFORMA

Cálculo de emisiones		Emisiones (g/h)								
1. Movimiento de tierras y demoliciones		NOx	N2O	CH4	CO	NMVOOC	PM	NH3	FC	CO2
1.1 Excavación con medios mecánicos										
Unidad (m3)	0									
Maquinaria	Tiempo (h)									
PALA CARGADORA 375 HP, TIPO CAT-988 O SIMILAR	0,003	2.537,5	96,5	13,8	1.379,1	358,6	148,9	0,6	70.056,3	219.808,0
RETROEXCAVADORA 75 HP	0,003	507,5	19,3	2,7	275,8	71,7	38,6	0,1	14.342,2	45.000,0
EXCAVADORA SOBRE ORUGAS CON ESCARIFICADOR TIPO D-7, O SIMILAR	0,003	1.015,0	38,6	5,5	551,6	143,4	77,2	0,2	28.684,4	90.000,1
CAMIÓN DE 400 HP, DE 32 t	0,016	2.146,5	6,2	1,8	79,4	12,9	19,4	0,9	119.350,8	374.474,1
Total por m3		46,5	0,6	0,1	7,9	1,9	1,1	0,0	2.248,9	7.056,0
TOTAL (g)		0	0	0	0	0	0	0	0	0
1.2 Excavación con explosivos										
Unidad (m3)	0									
Maquinaria	Tiempo (h)									
EQUIPO COMPLETO DE MAQUINARIA DE PERFORACIÓN EN DESMONTE	0,005	690,0	26,3	3,8	375,0	97,5	52,5	0,2	19.000,0	59.614,2
PALA CARGADORA 375 HP, TIPO CAT-988 O SIMILAR	0,002	2.537,5	96,5	13,8	1.379,1	358,6	148,9	0,6	70.056,3	219.808,0
RETROEXCAVADORA 75 HP	0,003	507,5	19,3	2,7	275,8	71,7	38,6	0,1	14.342,2	45.000,0
EXCAVADORA SOBRE ORUGAS CON ESCARIFICADOR TIPO D-7, O SIMILAR	0,002	1.015,0	38,6	5,5	551,6	143,4	77,2	0,2	28.684,4	90.000,1
CAMIÓN DE 400 HP, DE 32 t	0,013	2.146,5	6,2	1,8	79,4	12,9	19,4	0,9	119.350,8	374.474,1
Total por m3		36,5	0,4	0,1	5,7	1,4	0,8	0,0	1.792,1	5.622,8
TOTAL (g)		0	0	0	0	0	0	0	0	0

MONTAJE DE VIA

Cálculo de emisiones		Emisiones (g/h)								
1. Superestructura de vía		NOx	N2O	CH4	CO	NMVOOC	PM	NH3	FC	CO2
1.1 TRANSPORTE Y DESCARGA DE BALASTO (Desde cantera a acopio)										
Unidad (m3/km)	0									
Maquinaria	Tiempo (h)									
CAMIÓN DE 400 HP, DE 32 t	0,002	2.146,5	6,2	1,8	79,4	12,9	19,4	0,9	119.350,9	374.474,2
PALA CARGADORA 375 HP, TIPO CAT-988 O SIMILAR	0,002	2.537,5	96,5	13,8	1.379,1	358,6	148,9	0,6	70.056,3	219.808,0
Total por m3		9,4	0,2	0,0	2,9	0,7	0,3	0,0	378,8	1.188,6
TOTAL (g)		0	0	0	0	0	0	0	0	0
1.2 TRANSPORTE EN CAMION DE BALASTO TIPO "A"										
Unidad (m3)	0									
Maquinaria	Tiempo (h)									
CAMIÓN DE 400 HP, DE 32 t	0,041	2.146,5	6,2	1,8	79,4	12,9	19,4	0,9	119.350,9	374.474,2
PALA CARGADORA 375 HP, TIPO CAT-988 O SIMILAR	0,009	2.537,5	96,5	13,8	1.379,1	358,6	148,9	0,6	70.056,3	219.808,0
EXTENDEDORA DE BALASTO GUIADA POR CABLE	0,02	478,4	18,2	2,6	338,0	67,6	44,2	0,1	13.780,0	43.236,0
RODILLO VIBRATORIO AUTOPROPULSADO 8 A 10 t	0,02	1.015,8	38,6	5,5	552,0	143,5	77,3	0,2	28.706,1	90.067,9
Total por m3		140,7	2,3	0,4	33,5	8,0	4,6	0,0	6.373,6	19.997,8
TOTAL (g)		0	0	0	0	0	0	0	0	0

Figura 13. Herramienta de cálculo de emisiones elaborada para el proyecto (Plataforma/Vía)

En general, las emisiones de cada GEI procedentes de las diferentes unidades de obra se calculan multiplicando el rendimiento de estas fuentes (de acuerdo con las bases de datos de Adif) por el factor de emisión correspondiente. Dichos factores de emisión se han obtenido utilizando la potencia de cada máquina o equipo empleado (en kW) multiplicada por el rango de potencia (en g/kWh) obtenido de la guía de inventario de emisiones de la Agencia Europea de Medio Ambiente, EMEP/EEA Air pollutant emission inventory guide book 2009 (anteriormente denominada EMEP CORINAIR emission inventory guide book).

Las emisiones de CO₂, por su equivalencia 1:1 con el CO₂ equivalente (en adelante CO₂e) se consideran directamente CO₂e⁴, es decir, no es necesario realizar cálculos de conversión de unidades.

Sin embargo, para el caso de otros gases de efecto invernadero - junto con el CO₂, los principales son el metano (CH₄) y los óxidos nitrosos (N₂O), sí es necesario realizar el cálculo de equivalencia. Así, el equivalente de dióxido de carbono de dichos contaminantes se ha

⁴CO₂ equivalente es la unidad para comparar la fuerza de radiación de un gas de efecto invernadero con el dióxido de carbono (según definición de la norma UNE ISO 14064-1:2006).

calculado-siguiendo la norma UNE ISO 14064-1:2006 - utilizando la masa de cada uno de ellos, multiplicada por su potencial de calentamiento global (ver tabla 1).

No se han incluido en el cálculo otros gases como los hidrofluorocarbonos, perfluorocarbonos o el hexafluoruro de azufre por no considerarse representativos en relación con la emisión de la maquinaria.

Gas	Fórmula química	Potencial de Calentamiento Global (de la referencia [6])
Dióxido de carbono	CO ₂	1
Metano	CH ₄	21
Óxido nitroso	N ₂ O	310

Tabla 1. Potenciales de calentamiento global de los gases de efecto invernadero

3.5. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA- RESULTADOS

La metodología desarrollada se ha validado mediante su aplicación a varios ejemplos de proyectos de tramos de líneas de alta velocidad españolas con distintas características.

En todos los casos se han considerado tramos de líneas ferroviarias de alta velocidad, en vía doble y sobre balasto, variando sin embargo la tipología del terreno y el tipo de estructuras asociadas a la construcción de la línea (túneles y viaductos).

En la siguiente tabla se presentan los resultados del cálculo de las emisiones directas de CO₂, expresadas como CO₂ equivalente (CO₂e), asociadas a las obras de construcción para los proyectos analizados. En este caso no se han tenido en cuenta las emisiones indirectas asociadas a la fabricación/obtención de materiales empleados:

Tipología del tramo	Long.tramo (km)	Long.túneles (km)	Long. viaductos (km)	CO ₂ e ⁵ (t)	CO ₂ e(t)/km
1.Tramo en terreno abrupto con 3 túneles y 3 viaductos	6,52	3,88	1,6	46.550,46	7.135,78
2.Tramo en terreno abrupto con 3 túneles y 2 viaductos	11,20	9,53	0,27	106.861,35	9.541,19
3.Tramo en orografía llana con un túnel y sin viaductos	8,35	0,77	0	26.239,93	3.141,41
4.Tramo en orografía llana sin túneles ni viaductos	11,67	0	0	10.446,39	895,30

Tabla 2. Resultados del cálculo de emisiones de GEI para varios proyectos

Del análisis de los resultados anteriores puede concluirse que la cantidad de CO₂e emitido varía en función de la tipología de tramo, siendo notablemente superior en el caso de orografía o terreno abrupto ya que requiere la construcción de estructuras más complejas como

⁵Para el cálculo de las emisiones de CO₂ e, se han considerado el conjunto de emisiones de CO₂, CH₄ y N₂O.

túneles y viaductos, que en el caso de líneas construidas en orografía más llana. La construcción de túneles y la longitud de los mismos tiene además una notable repercusión en la cantidad de emisiones asociadas, siendo más relevante que en el caso de la construcción de viaductos.

Tipología del tramo	tCO ₂ ePlat.	% CO ₂ ePlat.	t CO ₂ e Vía	% CO ₂ e Vía
1.Tramo en terreno abrupto con 3 túneles y 3 viaductos	43.808,60	94,11	2.741,86	5,89
2.Tramo en terreno abrupto con 3 túneles y 2 viaductos	102.153,96	95,59	4.707,39	4,41
3.Tramo en orografía llana con un túnel y sin viaductos	22.729,18	86,62	3.510,75	13,38
4.Tramo en orografía llana sin túneles ni viaductos	5.542,30	53,05	4.904,09	46,95

Tabla 3. Distribución de las emisiones de GEI según tipo de proyecto (Plataforma/Vía)

Por otra parte, tal como se refleja en la tabla anterior, en los proyectos analizados la construcción de la plataforma representa un mayor porcentaje de las emisiones que la construcción de la vía, siendo esta diferencia más significativa en el caso de terreno abrupto con construcción de túneles y viaductos, en el que la construcción de la plataforma supone en torno al 95% de las emisiones directas. En el caso de terreno llano y sin estructuras complejas el porcentaje de emisiones asociadas a la construcción de la plataforma se reduce, representando aproximadamente un 55% del total.

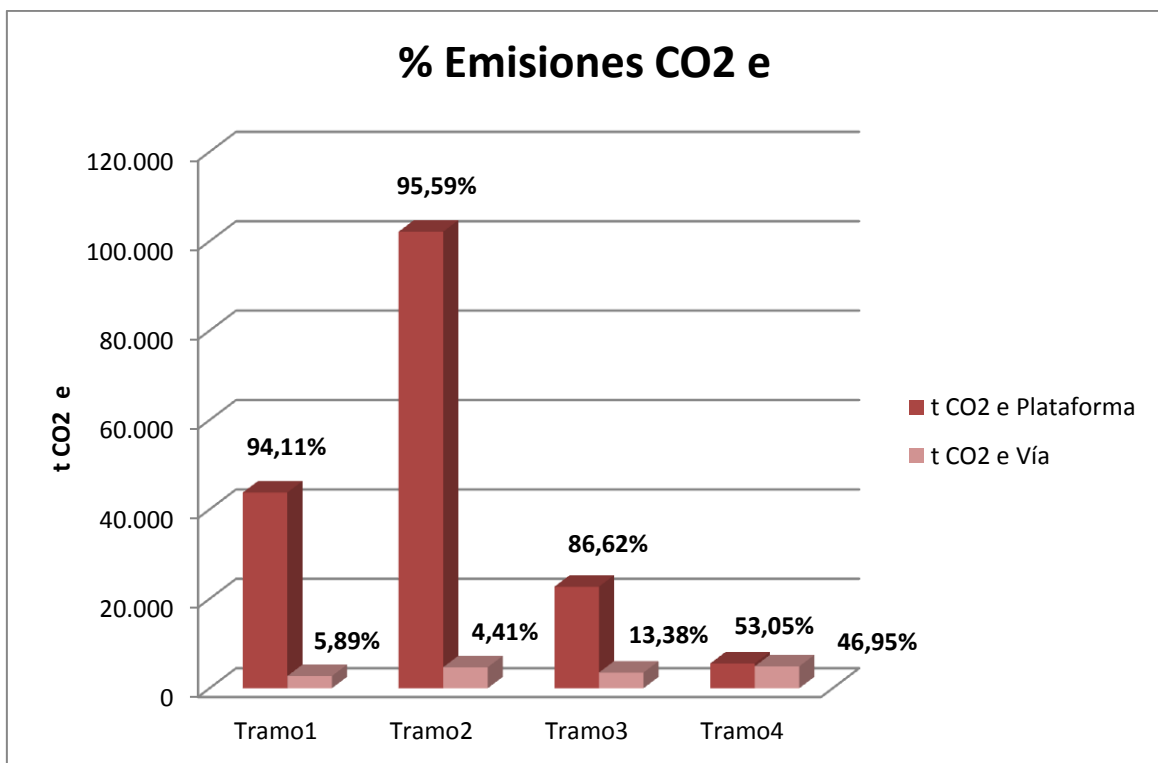


Figura 14. Distribución de las emisiones de GEI según tipo de proyecto (Plataforma/Vía)

3.6. AMPLIACIÓN DEL MÉTODO DE CÁLCULO

Como complemento a la metodología de cálculo de emisiones directas asociadas a la construcción de líneas de alta velocidad se propone ampliar dicha sistemática, considerando también las emisiones indirectas asociadas a la fabricación u obtención de los principales materiales empleados en las obras.

En este caso el sistema de cálculo se plantea únicamente para emisiones de CO₂ y no CO₂ equivalente, puesto que se propone emplear los factores de emisión de la base de datos Ecoinvent V.2.0, que incluye únicamente las emisiones de CO₂ por considerarlo la principal fuente de gases de efecto invernadero.

En esta segunda opción de cálculo, se sumarían a las emisiones de CO₂ generadas directamente por la maquinaria y equipos empleados en las obras de construcción, las emisiones indirectas asociadas a los materiales empleados, principalmente hormigón, acero y balasto.

Los factores de emisión asociados a la obtención de dichos materiales se indican a continuación:

Material (según base Ecoinvent)	Unidad	Material en la obra	Factor (kg CO ₂)
Grava triturada (en mina)	m ³	Balasto	0,004
Hormigón (demandado en planta)	m ³	Hormigón	318,72
Acero de baja aleación (en planta)	kg	Acero	1,629

16

Tabla 4. Factores de emisión de materiales principales (según Base Ecoinventv2.0)

En la siguiente tabla se presentan los resultados de las emisiones de CO₂ totales (directas de la obra e indirectas asociadas a la obtención de materiales) calculadas para los mismos proyectos analizados en el apartado anterior.

Como se puede observar, los datos de la primera columna - CO₂ (t) obra - son inferiores a los indicados en la tabla 2 del apartado anterior. Esto se debe a que aquéllos se refieren a CO₂e mientras que, aquí, hablamos de CO₂ por lo que se ha sustraído la parte correspondiente al CO₂e aportado por el metano y el óxido nitroso.

Tipología del tramo	CO ₂ (t) obra	CO ₂ (t) materiales	CO ₂ totales(t)	% CO ₂ Obra	% CO ₂ Materiales
1.Tramo en terreno abrupto con 3 túneles y 3 viaductos	43.359,80	86.126,13	129.485,94	33,49	66,51
2.Tramo en terreno abrupto con 3 túneles y 2 viaductos	99.562,94	140.609,52	240.172,46	41,45	58,55
3.Tramo en orografía llana con un túnel y sin viaductos	24.827,50	21.169,71	45.997,21	53,98	46,02
4.Tramo en orografía llana sin túneles ni viaductos	10.151,94	6.366,03	16.517,96	61,46	38,54

Tabla 5. Resultados del cálculo de emisiones directas e indirectas de CO₂ para varios proyectos

Como se deduce de los datos anteriores, en los dos primeros casos de terreno abrupto con construcción de estructuras complejas (túneles y viaductos) las emisiones indirectas asociadas a la obtención de materiales representan un porcentaje mayor (aproximadamente un 62% de media) que las emisiones directas asociadas a las obras. Sin embargo, en los casos de orografía llana sin estructuras complejas se invierte esta situación y las emisiones directas asociadas a las obras representan un mayor porcentaje (aproximadamente un 58%) en comparación con las indirectas asociadas a los materiales.

4. BIBLIOGRAFÍA

- Estándar Corporativo de Contabilidad y Reporte del Protocolo GHG (“Protocolo de Gases Efecto Invernadero”).
- Norma UNE-ISO 14064-1:2006 Gases de efecto invernadero. Parte 1: Especificación con orientación, a nivel de las organizaciones, para la cuantificación y el informe de las emisiones y remociones de gases de efecto invernadero.
- Construction CO2 Measurement Protocol ENCORD (European Network of Construction Companies for Research and Development - Red Europea de Empresas de la Construcción para la Investigación y Desarrollo).
- Guía de inventario de emisiones de la Agencia Europea de Medio Ambiente, EMEP/EEA Air pollutant emission inventory guide book- 2009.
- Carbon Footprint of High Speed Rail (UIC-International Union of Railways).
- 1^{er} Bilan Carbone ferroviaire global (La Ligne á Grande Vitesse Rhin-Rhône au service d’une Europe durable). ADEME-RFF-SNCF.