

ESTUDIO DE LA EFECTIVIDAD MEDIOAMBIENTAL DE MEDIDAS RESTRICTIVAS A LOS VUELOS DOMÉSTICOS EN ESPAÑA

2ª Edición



COIAE

Informe del Colegio Oficial de Ingenieros
Aeronáuticos de España.

Diciembre de 2023.

D. Óscar Castro Álvarez, colegiado 5083.

CONTENIDO

1.	RESUMEN EJECUTIVO	3
2.	PRÓLOGO A LA SEGUNDA EDICIÓN	4
3.	INTRODUCCIÓN Y CONTEXTO.....	5
4.	ESCENARIOS DE IMPLEMENTACIÓN	7
5.	IMPACTO EN OPERACIONES	9
6.	METODOLOGÍA	10
7.	ESTUDIO DE EMISIONES	12
7.1.	MARCO EUROPEO	12
7.1.	PUENTE AÉREO	13
7.2.	RUTAS AÉREAS CON ALTERNATIVAS FERROVIARIAS VIABLES	14
8.	ALTERNATIVAS.....	16
9.	CONCLUSIONES.....	19
10.	BIBLIOGRAFÍA.....	20

1. RESUMEN EJECUTIVO

- El objetivo de este informe es el de analizar la posible eficiencia medioambiental de medidas restrictivas a los vuelos domésticos en favor del transporte por tren de alta velocidad en España. Para ello se analizará datos de tráfico y emisiones de CO₂ correspondientes a los años 2019 y 2022.
- Se estudiarán dos segmentos de trayectos aéreos con alternativa ferroviaria de menos de 3 horas, más factible, y de 4 horas para entender el máximo potencial de reducción de emisiones. También se incluye un análisis más detallado del caso del puente aéreo Madrid-Barcelona. En estos dos últimos aeropuertos el volumen de operaciones potencialmente afectados por una medida de este tipo supondría menos del 5% del total.
- Las emisiones de CO₂ asociadas a la construcción de vías de alta velocidad suponen un factor fundamental a la hora de evaluar la eficiencia medioambiental del ferrocarril. Con el tráfico actual, se ha estimado que la línea Madrid-Barcelona necesitarán más de 40 años para amortizar estas emisiones, y ello sin tener en cuenta otros efectos negativos adicionales.
- El volumen de CO₂ correspondiente a las emisiones de todas las conexiones aéreas susceptibles de ser reemplazadas por trenes de alta velocidad en menos de 3 horas en 2022 supuso el 0,05% de las emisiones totales en España de CO₂ en España ese año, y únicamente un 0,13% de las emisiones nacionales del sector del transporte.
- En el escenario de rutas con alternativa de tren en menos de 4 h, el máximo ahorro alcanzable se limitaría al 0,08% de las emisiones totales en España en 2022, muy por debajo de las emisiones de los ferrocarriles con locomotoras diésel todavía existentes en la red ferroviaria nacional.
- El potencial de reducción de emisiones de CO₂ si se reemplazara el puente aéreo Madrid-Barcelona por conexión ferroviaria, con datos de 2022, podría alcanzar 70,8 ktCO₂, lo que supondría aproximadamente el 0,41% de las emisiones totales de la aviación española. En el cálculo no se han tenido en cuenta las emisiones de CO₂ durante la construcción de la vía férrea.
- El largo tiempo de construcción de las vías de alta velocidad (de 18 a 26 años de media), más el período de amortización medioambiental posterior necesario, hace que para cuando las posibles nuevas líneas contribuyesen de forma neta a la reducción de emisiones, la aviación ya deberá ser neutra en emisiones de carbono.
- Existe un claro potencial de reducción de emisiones en la interconexión eficiente de la aviación comercial y el transporte por tren. Esto pasaría por medidas como

habilitar más enlaces tren-aeropuerto o implementar billetes únicos intermodales.

- La aviación tiene a su disposición herramientas realmente útiles para la reducción significativa de sus emisiones, como los combustibles sostenibles de aviación (SAF), la propulsión eléctrica, con baterías o pilas de hidrógeno, el sistema de comercio de emisiones (EU ETS), así como medidas de eficiencia en operaciones y gestión aérea. La Unión Europea acaba de aprobar medidas para potenciar todas estas vías.
- El transporte por tren debe jugar un papel fundamental en el transporte sostenible del futuro, aunque no necesariamente a través de la alta velocidad.

2. PRÓLOGO A LA SEGUNDA EDICIÓN

Únicamente han pasado poco más de dos años desde que el Colegio de Ingenieros Aeronáuticos de España publicase la primera edición de este informe en julio de 2021. Sin embargo, el COIAE consideró necesaria esta actualización para cumplir una serie de objetivos.

En primer lugar, ante el avance de propuestas políticas que buscan limitar vuelos domésticos en España, resulta fundamental confirmar los cálculos de ahorros y emisiones a fin de que cualquier proyecto de legislación en este sentido cuente con datos fiables. Para ello, la metodología empleada en esta edición utiliza cálculos directos de emisiones por rutas en base a sus características específicas, tanto de volumen como de las aeronaves mayoritariamente empleadas.

Además, para validar el enfoque utilizado, los resultados totales se han cotejado con el estudio exhaustivo del *International Council on Clean Transportation* (ICCT) dedicado a las emisiones de aviación [15].

Respecto al marco de análisis, en esta edición se amplía considerando el volumen de pasajeros en 2019 para tres segmentos de reemplazo del transporte aéreo por ferroviario:

- Puente aéreo Madrid – Barcelona
- Rutas aéreas con alternativa ferroviaria con una duración menor a las 3 horas.
- Rutas aéreas con alternativa ferroviaria con una duración menor a las 4 horas.

Además, una vez superada la drástica caída de tráfico aéreo debido a la pandemia de COVID, se ha extendido el análisis con datos de 2022.

Por último, y para contextualizar mejor la escala de los ahorros potenciales de emisiones mediante la restricción de vuelos, estos se han comparado con el conjunto de los vuelos peninsulares¹, el tráfico aéreo doméstico, las emisiones de la aviación española, las

¹ En base a datos de AENA, IBESTAT e ISTAC

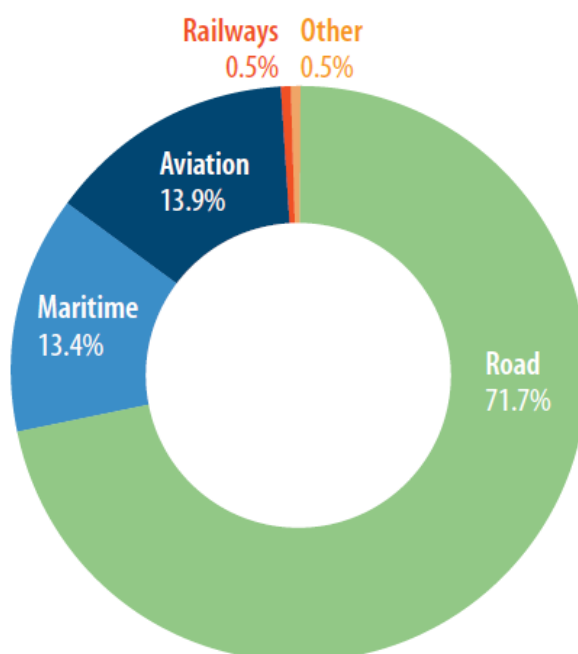
emisiones nacionales debidas al transporte y el total de las emisiones anuales de CO2 en España.

En resumen, esta segunda edición busca aportar una evaluación aún más sólida de la efectividad de las medidas de prohibición de vuelos propuesta, dotándola de contexto y perspectiva de escala, que sirva de base para un debate constructivo e informado sobre las mismas.

3. INTRODUCCIÓN Y CONTEXTO

El desafío de la sostenibilidad medioambiental de la aviación ha conseguido atraer la atención de la opinión pública en los últimos años. La urgencia de la grave crisis climática que afrontamos hace que se busquen soluciones rápidas, en ocasiones sin todo el análisis en profundidad que sería recomendable, a un problema que abarca todos los sectores de la economía.

En el área del transporte, esta búsqueda lleva inevitablemente a confrontar las credenciales medioambientales de los diferentes modos de movilidad disponibles, usando principalmente las emisiones de efecto invernadero como su medida. Para situar el debate, la Figura 1 recoge la contribución de los diferentes modos de transporte a nivel europeo. Es conveniente precisar que estas estimaciones no incluyen las emisiones asociadas a la construcción de las infraestructuras, cuya relevancia trataremos más adelante.



Source: EEA

Figura 1. Distribución de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) del transporte en Europa en 2018 [3]

En este contexto, dejando de lado el transporte por carretera y el marítimo, diferentes iniciativas políticas en Europa han planteado la posibilidad de una prohibición de vuelos comerciales en rutas cortas, siempre que cuenten con una alternativa ferroviaria viable. A modo de ejemplo, en junio de 2020 Austria condicionó su paquete de ayuda a su aerolínea de bandera con la eliminación de vuelos que pudiesen realizarse por tren en menos de 3 horas. Esta medida afectó principalmente a la ruta Viena-Salzburgo, que pasó a ser operada por un servicio reforzado de trenes desde el propio aeropuerto vienés [5].

Sin embargo, ha sido una iniciativa legislativa francesa, aprobada en mayo de 2023, la que ha suscitado la mayor repercusión al prohibir los vuelos con alternativa ferroviaria de menos de dos horas y media, aunque con excepciones en base a los horarios de tren disponibles y para vuelos de conexión, entre otras [14]. Únicamente tres rutas se han visto afectadas (Conexiones de París Orly con Burdeos, Lyon y Nantes) y el impacto en las emisiones está siendo minúsculo. Las 55.000 toneladas de CO₂ que se reducirán anualmente suponen el **2,6%** de las correspondientes a vuelos domésticos, y solo el **0,01%** de las emisiones de CO₂ en Francia durante 2019². La organización medioambiental independiente *Transport & Environment*, incluso con una estimación previa mucho más optimista, consideraba que este tipo de medidas buscan principalmente satisfacer la inquietud medioambiental de la opinión pública, aunque no supongan ningún beneficio real [17].

En España el debate se inició hace ya unos años alrededor de la ruta entre Madrid y Barcelona, donde organizaciones ecologistas y algunas entidades políticas propusieron medidas similares. De hecho, en el documento a largo plazo España 2050, publicado por el gobierno en 2021, se copia directamente la propuesta francesa, aunque sin ningún tipo de detalles. Por último, una medida de estas características, prohibiendo los vuelos con alternativa ferroviaria con una duración de menos de dos horas y media, y exceptuando los de conexión, se ha incluido en el acuerdo de gobierno firmado por el PSOE y Sumar en octubre de este año³.

El objetivo de este informe es el de analizar, por medio de estimaciones contrastadas y en diferentes escenarios, la posible eficiencia medioambiental de una medida de estas características en España, en la que se prohibiesen determinados vuelos domésticos en favor del transporte por tren. Los cálculos se centrarán en las emisiones de CO₂, gas de efecto invernadero de larga vida con una dinámica bien identificada, sin considerar otros impactos de la aviación actualmente objeto de estudio como el del NO_x o las estelas de condensación. A este respecto, es importante tener en cuenta la necesidad de considerar la posible entrada en servicio en los próximos años de vuelos descarbonizados, en los que gracias a la investigación y aplicación de tecnologías sostenibles puedan eliminar estos impactos negativos. Es el caso de la aviación eléctrica, ya sea con baterías o con pilas de

² https://www.lemonde.fr/les-decodeurs/article/2023/05/24/l-interdiction-des-vols-interieurs-courts-en-france-une-mesure-vidée-de-sa-substance_6174641_4355770.html

³ <https://www.newtral.es/psoe-sumar-vuelos-cortos/20231025/>

hidrógeno, que precisamente es en rutas de corto alcance donde se prevé que primero pueda entrar en servicio.

Como trasfondo, conviene recordar los compromisos asumidos por el conjunto de la industria aeronáutica europea para la total descarbonización del sector en 2050, incluyendo objetivos intermedios. Esta ambición, alineada con la estrategia comunitaria del *European Green Deal* y con la propuesta legislativa “*Fit for 55*” de la Comisión Europea [10], se ve reforzada en España con el compromiso de alcanzar emisiones netas cero en los principales aeropuertos para 2040⁴.

Parece también oportuno destacar que, en la propia propuesta de la Comisión, se estima que la industria de la aviación emplea alrededor de **400.000 trabajadores** de forma directa en la Unión Europea, aportando un **2,1% del PIB**. El sector aeronáutico se identifica como un elemento clave para cohesión social y regional, promoviendo el turismo, la actividad económica y conectando a las personas [11].

Finalmente, cabe señalar que el análisis realizado utiliza datos de tráfico y emisiones correspondientes a los años 2019 y 2022, dejando de lado el período álgido de la pandemia del COVID durante el que, además del insoportable coste en vidas humanas, este terrible azote cambió radicalmente los hábitos de transporte, y muy en particular el tráfico aéreo.

4. ESCENARIOS DE IMPLEMENTACIÓN

Este estudio se centrará en la evaluación de las emisiones de CO2 asociadas a rutas aéreas domésticas susceptibles de ser reemplazadas por alternativas ferroviarias viables en tres escenarios progresivos:

- Puente aéreo Madrid – Barcelona
- Trayectos en tren de menos de 3h
- Trayectos en tren de menos de 4h

Esta distribución se ajusta a las características de las rutas de alta velocidad disponibles en España, además de singularizar la más importante y objeto principal del debate: los vuelos entre Madrid y Barcelona, con el **6%** de los **42.865.609 pasajeros nacionales** en 2019 (Datos AENA).

⁴<https://portal.aena.es/es/corporativa/aena-invertira-alrededor-550-millones-euros-en-plan-accion-climatica-en-periodo-2021-2030.html?p=1237548067436>

Ruta	Pasajeros en 2019	Pasajeros en 2022	Incremento 2022 /2019	Alternativa tren
Madrid - Barcelona	2.575.114	1.715.762	-33%	< 3h
Madrid – Sevilla	486.914	392.418	-19%	< 3h
Madrid - Málaga	357.619	523.494	46%	< 3h
Madrid-Valencia	338.923	308.560	-9%	< 3h
Madrid - Alicante	299.684	280.067	-7%	< 3h
Barcelona - Valencia	85.465	60.781	-29%	< 3h
Madrid – Santiago de Compostela	715.539	498.887	-30%	< 4h
Madrid – A Coruña	681.508	538.795	-21%	< 4h
Madrid - Asturias	548.114	326.828	-40%	< 4h
Madrid – Jerez de la Frontera	302.104	188.123	-38%	< 4h
Madrid – Granada/Jaén	199.170	127.753	-36%	< 4h
Madrid - Pamplona	177.290	122.495	-31%	< 4h
Madrid – La Rioja	12.752	7.600	-40%	< 4h

Tabla 1. Pasajeros en rutas potencialmente sustituibles por tren en menos de 4h en 2019 y 2022(AENA)

Para la selección de las rutas señaladas como potencialmente sustituibles por conexión ferroviaria no se han tenido en cuenta limitaciones como la disponibilidad de frecuencias de tren, ni la necesidad de intercambios. El motivo es el de obtener el máximo potencial de reducción de emisiones, aun asumiendo que sería difícilmente alcanzable en términos prácticos. Finalmente, y con el mismo enfoque, se ha incorporado la ruta de alta velocidad Madrid – Asturias, recientemente inaugurada.

Por otra parte, se estimarán las emisiones propias de la alternativa en tren, tanto durante su operación y, en el caso del AVE Madrid-Barcelona, también se realizará un estudio con el CO2 liberado durante la construcción de las infraestructuras necesarias. Esto nos permitirá calcular el potencial real de reducción de emisiones de CO2 con una medida de tipo restrictivo a la aviación. Finalmente, y para contextualizar los valores obtenidos, estas reducciones potenciales se compararán con el conjunto de las emisiones en vuelos peninsulares, la aviación doméstica, el transporte en su conjunto y el total de CO2 emitido anualmente en España.

5. IMPACTO EN OPERACIONES

Antes de entrar en el estudio de las emisiones, se va a analizar también el volumen de operaciones que podría verse afectado por estas medidas restrictivas en tres de los principales aeropuertos en España, y que presentan un mayor potencial de aplicación:

- Madrid-Barajas
- Barcelona-El Prat
- Málaga-Costa del Sol

En defensa de las medidas restrictivas para vuelos domésticos es habitual añadir el argumento de que se promovería así la descongestión de los aeropuertos implicados, eliminando la necesidad de ampliaciones, o reduciendo otros impactos medioambientales locales como el ruido. Para evaluar este hipotético beneficio se han revisado las operaciones de los tres aeropuertos en 2019. En los dos primeros se ha extraído el número total de operaciones que se reducirían con la supresión del puente aéreo frente al total anual. En el tercero se ha repetido el mismo ejercicio con las conexiones a Madrid y Barcelona, dos de sus principales rutas, y que en el último caso exigiría recorridos en alta velocidad de, al menos, 5 horas. La Figura 2 muestra la reducida importancia de las operaciones analizadas frente al volumen total en los aeropuertos, por lo que este beneficio adicional se puede considerar prácticamente marginal.

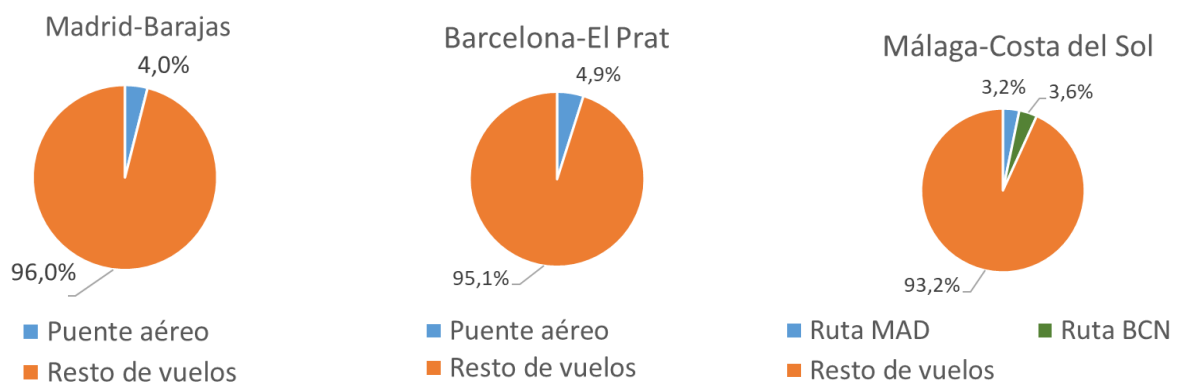


Figura 2 Volumen relativo de operaciones del puente aéreo MAD-BCN y conexiones del aeropuerto de Málaga

Es importante señalar además que la liberación de slots para operaciones en estos aeropuertos, resultado de una hipotética prohibición de rutas domésticas, abriría la posibilidad de que fuesen ocupados con vuelos internacionales, el tipo mayoritario de sus rutas. Como es evidente, este reemplazo implicaría un serio incremento de emisiones, dada la mayor distancia de vuelo.

6. METODOLOGÍA

El cálculo de emisiones del transporte aéreo realizado en este informe se fundamenta en un cálculo directo del CO₂ emitido en base a la distancia de las rutas, la ocupación media de los vuelos en España en 2019 (**79,9%**) y el tipo de aeronaves empleado de forma mayoritaria en los diferentes segmentos domésticos. El impacto climático de la aviación mediante otras emisiones (no-CO₂, como las estelas de condensación de corta permanencia) excede el marco de este análisis y, aunque sin duda no es despreciable, su cuantificación presenta todavía muchas dificultades [9].

La metodología empleada en este estudio, recomendada por la Agencia Europea de Medio Ambiente (EEA), EMEP y Eurocontrol⁵, se aplica de forma individualizada para las rutas susceptibles de ser substituidas por el transporte ferroviario. Las distancias de vuelo se han calculado como trayectorias directas más 25 km adicionales (tráfico, ineficiencias en rutas). Para los recorridos por ferrocarril se ha estimado distancias un 18% mayores que las aéreas (basado en los datos de la ruta MAD-BCN).

Para estimar las emisiones de los tráficos de referencia (peninsular, doméstico y globales), se han utilizado datos oficiales [20] [21] y estudios sistemáticos [15], realizando cálculos según el número total de pasajeros, las distancias de referencia⁶ y la composición de las flotas de las aerolíneas españolas para dichas rutas: A320-A321 (CEO & NEO), B737-NG, CRJ-200, CRJ-1000, E195-E2 & ATR72-600.

Cabe señalar que estas emisiones específicas de CO₂ por pasajero y km se han calculado teniendo en cuenta los diferentes segmentos del vuelo, incluyendo el ciclo de despegue y ascenso con un mayor consumo de combustible. Esto se refleja en unos mejores datos cuanto mayor es la distancia recorrida. Estos valores corresponden únicamente a la operación (TtW⁷), dada la dificultad de incluir datos fiables en la parte de producción de combustible (WtT⁸) en ambos medios de transporte. La EEA utiliza un factor de conversión de **3,15 kg de CO₂** emitido por cada kg de combustible de aviación consumido.

La Tabla 2 recoge las intensidades de carbono medias por segmento de la aviación doméstica en 2019 así obtenidas. A modo de comprobación, se incluye el dato medio calculado para el conjunto de los vuelos (**100,6 gCO₂/km·pax**) y la estimación independiente realizada por el ICCT para los vuelos domésticos en España ese mismo año, demostrando la consistencia del enfoque aquí empleado, incluso con cierto margen de seguridad.

⁵ <https://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2023>

⁶ A la distancia mínima en cada conexión se le han añadido 25 km adicionales por desvíos y esperas.

⁷ Tank to Wheel

⁸ Well to Tank

Tipos de rutas	Distancia media	Intensidad de carbono (g/km·pax)
Puente Aéreo	530 km	115,7
Peninsulares		
Pen. - Baleares		
Pen. – Canarias	1806 km	81,2
Interinsulares	291 km	127,22
Ceuta y Melilla		
Estimación media para vuelos domésticos (2019)		100,6
Comprobación con datos 2019 en Graver et al. [15]		96,9

Tabla 2. Intensidades de carbono calculadas según segmentos del tráfico doméstico en España

Para la estimación del impacto medioambiental del tren de alta velocidad utilizaremos datos recogidos en Bueno et al. (2017, Ref. [6]), avalados por la Agencia Europea del Medioambiente [1], aunque siempre con la prudencia de saberlos estimaciones. Las emisiones correspondientes a la operación del tren (**32 gCO₂/km·pax**) se calculan en base al CO₂ liberado durante la generación eléctrica (288 gCO₂/kWh) en España, 6 veces por encima del sistema eléctrico francés [7]. Frente a alegaciones de que el suministro eléctrico ferroviario ostenta una certificación renovable, habría que señalar que se trataría simplemente de un caso de *carbon leakage*, ya que dicha certificación no cambiaría el mix energético español y sus emisiones totales. Es más, un incremento de la demanda eléctrica total podría forzar la entrada en línea de más plantas generadoras alimentadas por combustibles fósiles.

Una hipótesis implícita en el análisis de eficiencia potencial de las medidas restrictivas a la aviación comercial doméstica consiste en que el tráfico aéreo de pasajeros en las rutas señaladas se trasladase en su totalidad a la alternativa ferroviaria, sin tener en cuenta las excepciones por vuelos de conexión, contempladas en las medidas propuestas, ni opciones alternativas como el uso de vehículos terrestres, o incluso aviación privada.

Finalmente, cabe destacar que, a pesar de ciertas divergencias en la metodología y supuestos considerados, las cifras globales obtenidas en este análisis son consistentes con los resultados de otros estudios publicados recientemente, si bien no necesariamente coincidan las conclusiones derivadas de los mismos [19].

7. ESTUDIO DE EMISIONES

7.1. MARCO EUROPEO

En el ámbito intraeuropeo, los vuelos de menos de 500 km suponen un significativo 24,1% del total de pasajeros aéreos, aunque solo contribuyen con un **3,8%** de las emisiones de CO₂ [3]. Si se extendiese el alcance a 1000 km, y se descontasen las conexiones no susceptibles de reemplazo ferroviario (por ejemplo, en vuelos a islas), el potencial máximo de reducción de emisiones subiría hasta un **6-11%** del total. No obstante, es necesario situar este rango potencial en el contexto de las emisiones totales de la aviación europea, donde supondría solo el **2-4%** del total (Figura 3 [18]).

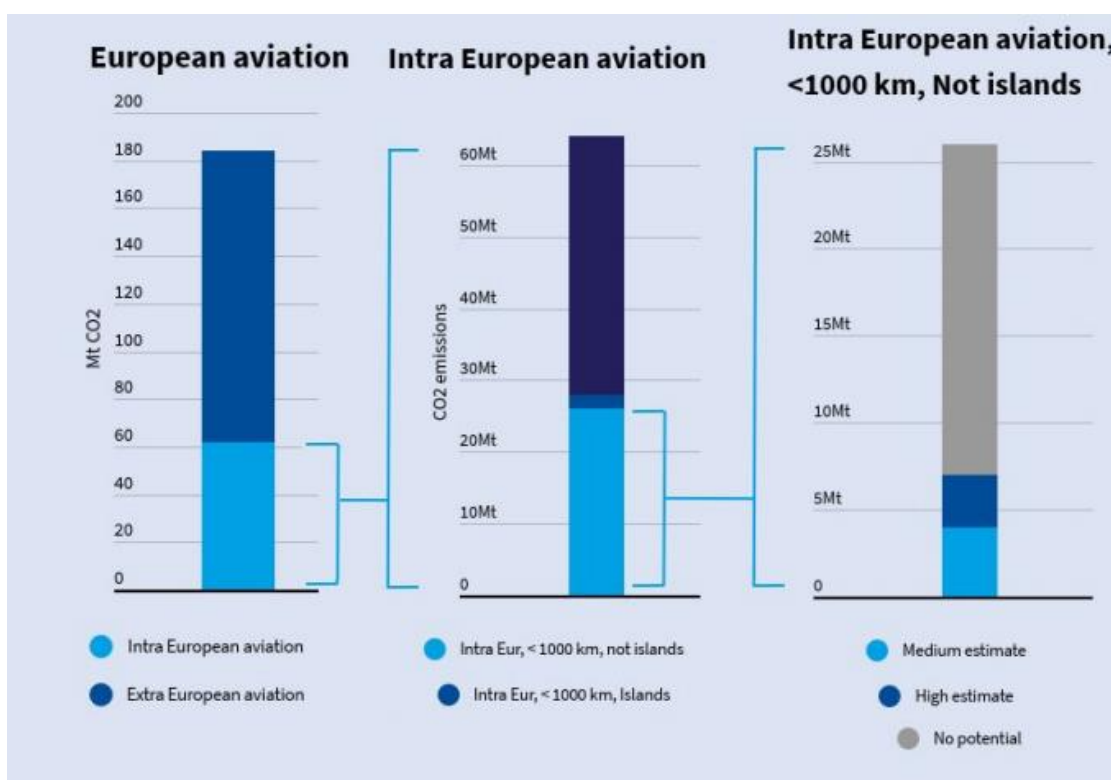


Figura 3 Potencial máximo de reducción de emisiones de aviación por cambio al ferrocarril en Europa [18]

A la hora de realizar este tipo de estudios hipotéticos, en los que se analiza el potencial de reducción de emisiones suprimiendo la aviación de corto alcance, habitualmente no se tiene en cuenta el coste medioambiental de implementar la alternativa. Esto resulta particularmente engañoso al no considerar las emisiones asociadas a la construcción de líneas de tren de alta velocidad, cuyo volumen puede llegar incluso a desaconsejarlas en base a las emisiones de CO₂ de su ciclo de vida completo.

7.1. PUENTE AÉREO

Vamos a estudiar más en detalle el caso de la línea de ferrocarril de alta velocidad Madrid-Barcelona para entender mejor cómo se amortiza el impacto inicial en emisiones de CO₂, producidas debido a la construcción de la infraestructura, con el ahorro potencial de emisiones durante su operación.

Desde su entrada en servicio en 2008 este servicio ferroviario ha conseguido una cuota del **62%** (2018) en el transporte de pasajeros entre ambas ciudades [12], lo que podemos cifrar grosso modo en unos **4 millones** de pasajeros al año, que en su mayoría se pasaron del avión al tren incluso a pesar de los precios elevados. La Tabla 3 muestra un cálculo aproximado de la amortización de los **6,9 Mt** de CO₂ emitidas durante la construcción de la línea de alta velocidad [6], lo que nos lleva a un período de **40 años** hasta que, finalmente, el cambio de semejante volumen de pasajeros se haga medioambientalmente rentable. Esto supone situarse en el horizonte del **2050**, año para el que la industria aeronáutica en su conjunto se ha comprometido a alcanzar las emisiones netas cero de CO₂. Por supuesto, si se considerase un transvase completo de pasajeros a la ruta ferroviaria desde su puesta en marcha se reducirían los plazos, pero incluso en ese escenario poco realista estaríamos todavía lejos de compensar las emisiones de su construcción (unos 25 años).

En otros casos de vías de alta velocidad como la Y vasca, objeto de un estudio detallado [6], ni siquiera con plazos de 100 años y en el mejor escenario se amortizarían las emisiones de su construcción.

Ruta entre Madrid y Barcelona	Transvase de usuarios (Mpax)	Distancia (km)	Intensidad de carbono (gCO ₂ /pax·km)	Emisiones anuales (ktCO ₂ /año)	Emisiones construcción línea AVE (MtCO ₂)	Ahorro anual emisiones (ktCO ₂ /año)	Años para amortizar emisiones línea AVE
Tren AVE	4	627	32	80,3	6,9	165,0	41,8
Puente Aéreo	-4	530	115,7	-245,3			

Tabla 3. Estimación de amortización de emisiones CO₂ en la construcción de la línea de alta velocidad Madrid-Barcelona. Elaboración propia a partir de datos referenciados.

Merece la pena destacar que este análisis tampoco tiene en cuenta la progresiva descarbonización del transporte aéreo hasta ese objetivo último en 2050, impulsada, por ejemplo, por la obligatoriedad de la incorporación creciente de Combustible Sostenible de Aviación (SAF⁹) en Europa a partir de 2025 (**6%** obligatorio en 2030¹⁰). Aún más, tampoco se considera el efecto pernicioso acumulado de las emisiones de CO₂ durante el período de amortización de las emisiones en infraestructura. El dióxido de carbono es un gas de efecto invernadero de larga permanencia, por lo que el CO₂ liberado durante la construcción de la línea tiene un impacto mucho mayor en el calentamiento global que las reducciones del mismo volumen de emisiones en el futuro.

⁹ Sustainable Aviation Fuel

¹⁰ <https://www.easa.europa.eu/community/topics/refuel-eu>

Otros efectos, como el impacto del ferrocarril de alta velocidad sobre el territorio y el efecto barrera, tampoco se suelen considerar debido a la dificultad de su evaluación, aunque sin duda son muy relevantes. En base a datos de la Agencia Europea del Medioambiente se estima que en nuestro entorno este daño sobre el territorio es alrededor de 10 veces mayor en la red ferroviaria de alta velocidad que la de los aeropuertos [3].

Por otra parte, no se puede despreciar en absoluto las emisiones asociadas a la construcción de aeropuertos, aunque su relevancia resulta mucho menor por las dimensiones en comparación con líneas férreas de larga distancia, por una parte, y que cada aeropuerto da servicio a múltiples rutas, por otra.

7.2. RUTAS AÉREAS CON ALTERNATIVAS FERROVIARIAS VIABLES

Desde una visión más global, y para situar las emisiones del transporte en contexto, el Inventario Nacional Gases de Efecto Invernadero 2019 estimó la contribución de la aviación doméstica en un **1,2%** del total de emisiones de CO₂ en España, frente al **1,3%** del transporte marítimo o el **33,3%** del transporte por carretera [16].

Usando estos valores de emisiones totales y las estadísticas detalladas de pasajeros de vuelos domésticos en España en 2019¹¹, se han estimado las emisiones de CO₂ asociadas a las conexiones aéreas en rutas con alternativa ferroviaria en los tres segmentos ya señalados (Tabla 4).

2019	CO2 actual rutas aéreas (kt)	CO2 alternativa tren (kt)	Reducción máxima CO2 (kt)	Reducción / Vuelos peninsulares	Reducción / Vuelos domésticos	Reducción / Aviación España	Reducción / Transporte España	Reducción / Emisiones Tot. España
Puente Aéreo	157.9	51.7	106.2	12.7%	3.4%	0.54%	0.12%	0.04%
Rutas con alter. tren < 3 h	228.3	74.7	153.6	18.4%	4.9%	0.78%	0.17%	0.06%
Rutas con alter. tren < 4 h	372.6	121.9	250.6	30.0%	8.0%	1.27%	0.27%	0.10%

Tabla 4. Resumen de reducciones potenciales de emisiones de CO₂ en 2019 con medidas restrictivas al tráfico doméstico con alternativa ferroviaria. Comparativa con emisiones de referencia de tráfico aéreo, transporte y total en España.

Los cálculos para el potencial de reducción de emisiones se han repetido con los datos de 2022, una vez superada la distorsión en el tráfico de pasajeros por la pandemia COVID (Tabla 5). La reducción de pasajeros en el puente aéreo podría deberse a la introducción de nuevos operadores de ferrocarril, sin necesidad de intervención regulatoria.

¹¹ Datos: AENA y Dirección General de Aviación Civil

2022	CO2 actual rutas aéreas (kt)	CO2 alternativa tren (kt)	Reducción máxima CO2 (kt)	Reducción / Vuelos peninsulares	Reducción / Vuelos domésticos	Reducción / Aviación España	Reducción / Transporte España	Reducción / Emisiones Tot. España
Puente Aéreo	105.2	34.4	70.8	12.6%	2.4%	0.41%	0.08%	0.03%
Rutas con alter. tren < 3 h	176.7	57.8	118.9	21.2%	4.0%	0.68%	0.13%	0.05%
Rutas con alter. tren < 4 h	276.7	90.5	186.2	33.2%	6.3%	1.07%	0.21%	0.08%

Tabla 5. Resumen de reducciones potenciales de emisiones de CO2 en 2022 con medidas restrictivas al tráfico doméstico con alternativa ferroviaria. Comparativa con emisiones de referencia de tráfico aéreo, transporte y total en España.

De los datos presentados cabe destacar que, en el escenario más optimista de alternativa ferroviaria de hasta 4 h, la reducción de emisiones con medidas restrictivas a la aviación ahorraría únicamente un **8%** de las emisiones del tráfico aéreo doméstico en 2019, y un **6,3%** con datos de 2022. Respecto a las emisiones totales en España, este ahorro no superaría el **0,10%** en 2019 y solo un **0,08%** en 2022.

Si se limitase la medida al escenario más realista de las rutas aéreas con alternativa por tren menor a 3 horas, la reducción de emisiones supondría el **0,68%** de las emisiones de la aviación en España, el **0,13%** del CO2 del transporte, y únicamente el **0,05%** de las emisiones totales en España en 2022.

Con el fin de proporcionar más contexto a estas cifras, se han incluido en la Figura 4 los potenciales de reducción de CO2 ya señalados para 2019 y 2022 junto con dos valores de emisiones asociadas al ferrocarril:

- Las emisiones de CO2 correspondientes a la construcción de la línea de alta velocidad Madrid-Barcelona anualizadas para una vida útil de 60 años
- El volumen de CO2 correspondiente a las emisiones de los ferrocarriles con locomotoras diésel todavía existentes en España en 2019 [16].

Como se aprecia, estas emisiones del transporte ferroviario con propulsión a diésel son equivalentes o superan la mayor reducción posible con las medidas restrictivas de rutas aéreas. Por otra parte, solo con las emisiones asociadas con la construcción de la línea AVE entre Madrid y Barcelona se alcanzan niveles similares a la reducción potencial con rutas de menos de 3 horas.

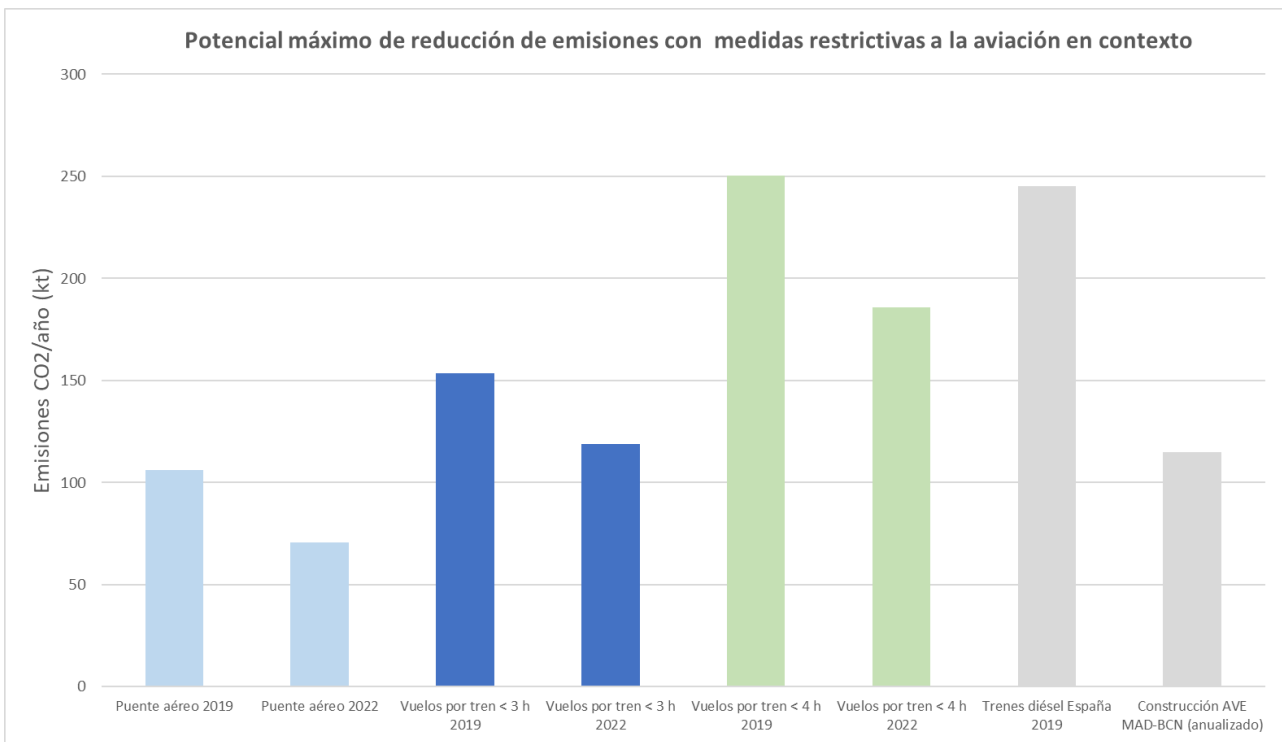


Figura 4 Emisiones de CO2 de vuelos domésticos en España con alternativa ferroviaria en contexto. Elaboración propia a partir de datos referenciados (2019 y 2022)

8. ALTERNATIVAS

En el marco de la urgencia climática que nos amenaza, entender los agentes y mecanismos que contribuyen de forma más significativa al calentamiento global debe ser la prioridad para todos. Solo así se podrá implementar medidas efectivas de reducción de emisiones que palien la situación actual. El transporte aéreo, en su conjunto y en la medida que le toca, también debe asumir su responsabilidad y trabajar en soluciones de calado para alcanzar el objetivo de la descarbonización para 2050.

En este contexto, conviene destacar que las emisiones asociadas tanto a la generación de electricidad que alimenta la alta velocidad como a la aviación intraeuropea están cubiertas por EU ETS, el sistema europeo de comercio de emisiones, que ha certificado significativas reducciones en el impacto de la aviación desde su implementación¹², y que la Unión Europea va a ampliar y reforzar en el corto plazo [10].

Desde una perspectiva más amplia, tal vez la disyuntiva entre el avión y el tren podría tratarse, en gran medida, de un falso dilema. Si bien las emisiones del ferrocarril, una vez construido, son claramente menores por kilómetro y pasajero, los ámbitos de aplicación de ambos medios de transporte, y por tanto las oportunidades de reducción de emisiones por reemplazo, se solapan menos de lo que podría suponerse. Además, el largo tiempo

¹² 193 Mt CO2 (2013-2020) EEA / EASA / Eurocontrol: *European Aviation Environmental Report 2019*.

de construcción de las vías (de **18 a 26 años** de media [3]), más el período de amortización medioambiental posterior necesario, hace que para cuando las posibles nuevas líneas contribuyesen de forma neta a la reducción de emisiones, la aviación ya deberá ser medioambientalmente sostenible.

Sin embargo, como recoge la hoja de ruta de la Unión Europea en movilidad sostenible [12], más que contraponerlos, existe un claro potencial en la interconexión eficiente de ambos medios de transporte. Con un esfuerzo en construcción limitado, habilitar estos enlaces tren-aeropuerto podría contribuir a la reducción de emisiones y otros problemas asociados al tráfico por carretera, al mismo tiempo que hacer superfluas algunas conexiones aéreas claramente ineficientes. Para hacerlo realidad también sería preciso implementar billetes únicos intermodales, que extendieran los derechos actuales de los pasajeros aéreos al tren.

La misma hoja de ruta también recoge las grandes herramientas en las que hoy en día trabaja la industria de la aviación para reducir sus emisiones: los combustibles sostenibles de aviación (SAF) y la propulsión alternativa eléctrica o por hidrógeno. Todo el esfuerzo de investigación, económico y legislativo que se invierta en estos ámbitos repercutirá en beneficios medioambientales no solo para los vuelos domésticos, sino para la media y larga distancia, el mayor desafío en emisiones que afronta la aviación [8]. Cabe destacar los mandatos ya en marcha en países como Noruega o Francia sobre el uso de SAF, o el ya señalado por parte de la Comisión Europea [11], así como otro tipo de normativas específicas que fomenten la innovación y aplicación de estas tecnologías.

El área de las operaciones en tierra y gestión del tráfico aéreo ofrece también grandes oportunidades de reducción de emisiones en aviación, sin la necesidad de lograr primero grandes avances tecnológicos. Cuando finalmente se implemente el Cielo Único Europeo, lastrado por problemas políticos más que técnicos, se podría ahorrar entre un **8,6%** y un **11,2%** de las emisiones en todos los vuelos intraeuropeos. Otras medidas como la supresión de la práctica del *tankering* (cargar combustible allí donde resulte más económico, con el sobrepeso asociado) también supondrá un ahorro en emisiones de CO₂ de la aviación europea del **0,54%**. Esta medida, recogida en la nueva legislación europea [11], acabará con el abuso por distorsiones en el coste de repostaje [2]. No conviene perder de vista que, aunque pueda parecer modesta, esta última reducción de emisiones señalada es del orden de magnitud de las analizadas en este informe, aunque probablemente no tan llamativa.

La utilidad medioambiental de las tasas a la aviación, mediante impuestos directos o sobre el combustible convencional, también genera un gran debate. Aunque su efectividad se ha puesto en cuestión, se sugiere un posible papel positivo al conectar su recaudación con la inversión en medidas de descarbonización [4]. Por otra parte, parece claro que puede constituir una herramienta útil a la hora de favorecer el cambio hacia combustibles sostenibles. De hecho, la Comisión Europea también recoge una medida en ese sentido en su paquete de medidas “*Fit for 55*”, tanto para los combustibles de uso aéreo como marítimo [10].

En lo que respecta al ferrocarril, cabe destacar la gran oportunidad de reducción de emisiones asociadas a las numerosas líneas servidas por locomotoras diésel todavía en uso en España, como ya se señaló anteriormente. Esta reducción no tendría que venir necesariamente por medio de una electrificación masiva, tal vez no eficiente para tráficos reducidos, sino por la introducción de biodiésel en máquinas convencionales o, como busca implementar un proyecto europeo liderado por la española CAF, mediante locomotoras propulsadas por hidrógeno¹³.

Las conexiones ferroviarias transfronterizas de corto alcance, claramente mejorables en la actualidad, podrían también contribuir a eliminar tráfico aéreo y por carretera donde no sean eficientes.

Por último, en las conexiones de largo alcance ferroviario también podría ser de interés el evaluar la alternativa de las líneas convencionales, con un impacto de construcción menor, frente a las de la alta velocidad. Además de facilitar una transición hacia el ferrocarril del tráfico por carretera, tanto de pasajeros como de mercancías, y el consiguiente ahorro de emisiones, también podría servir mejor otros fines como una mayor vertebración del territorio. En este aspecto, es muy interesante la propuesta de organizaciones ecologistas para la implantación de un sistema ferroviario de horarios cadenciados integrados (HCI)¹⁴. En cualquiera de los casos, estos largos recorridos ferroviarios deberían ofrecer precios asequibles, evitando así el riesgo de volver a restringir los viajes en favor de pasajeros con una capacidad económica privilegiada.

¹³ <https://www.caf.net/es/sala-prensa/nota-prensa-detalle.php?e=316>

¹⁴ <https://es.greenpeace.org/es/noticias/propuesta-mejorar-tren/>

9. CONCLUSIONES

El debate sobre la prohibición de rutas aéreas para su sustitución por conexiones de ferrocarril se centra en el rango de hasta los 500 km. En distancias más largas, o en trayectos cortos pero con una orografía compleja, la propia Agencia Medioambiental Europea no se atreve a dictaminar si el resultado neto resultaría beneficioso en cuanto al impacto sobre nuestro entorno [1]. En cualquier caso, si aun así se decidiera valorar cualquier medida restrictiva sobre la aviación doméstica, resultará fundamental proteger la innovación e implementación de tecnologías de propulsión descarbonizada, como recoge el proyecto de ley francesa ya mencionado.

En nuestra opinión, y a la vista de los datos presentados, esta disyuntiva entre tren y avión a la hora de realizar un viaje, por los motivos ya expuestos, parece ser una cuestión marginal a la hora de afrontar el desafío medioambiental del calentamiento global. Tal vez podría reformularse hacia cómo aprovechar, de manera conjunta y eficiente, ambas formas de transporte para reducir de forma real las emisiones contaminantes. Por supuesto, esto solo se podrá abordar en el contexto del resto de medios de movilidad, si se pretende, de verdad, alcanzar beneficios significativos.

Un problema complejo, como el de las emisiones de gases de efecto invernadero en la aviación, no se puede resolver con recetas sencillas. El abanico de medidas “*Fit for 55*”, propuesto por la Comisión Europea, es una buena muestra de ello [10]. Las medidas cosméticas o publicitarias pueden volverse incluso contraproducentes, al crear la impresión de que sí se está actuando de manera decisiva, cuando no es el caso. Como argumentan desde T&E, una organización europea de referencia en cuanto al análisis de la sostenibilidad en el transporte, “lo que necesitamos es menos ecologismo simbólico y más cambio real” [17].

Para conseguir este cambio significativo en la aviación comercial, reduciendo las emisiones primero, y eliminándolas en el horizonte del 2050, será necesario avanzar con todas las herramientas y estrategias disponibles (gestión de tráfico eficiente, SAF, mejoras graduales y propulsiones alternativas, compensación y medidas económicas), aplicadas en el conjunto de los segmentos del tráfico aéreo. El esfuerzo de la industria, pero también el apoyo e implicación de los poderes públicos y los propios viajeros, será clave para conseguirlo.

10. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Agencia Europea del Medioambiente (2021). *Transport and environment report 2020. Train or plane?* EEA Report No 19/2020
- [2] Aviation Sustainability Unit (20 de abril de 2021). *Flying the 'perfect green flight': How can we make every journey as environmentally friendly as possible?* Eurocontrol. Think Paper #10.
- [3] Aviation Sustainability Unit (3 de junio de 2021). *Plane and train: Getting the balance right.* Eurocontrol. Think Paper #11.
- [4] Aviation Sustainability Unit (Octubre de 2020). *Does taxing aviation really reduce emissions?* Eurocontrol. Think Paper #7.
- [5] Bannon, E. (30 de junio de 2020). *Austrian Airlines' bailout 'climate conditions' explained.* Transport & Environment. <https://www.transportenvironment.org/publications/austrian-airlines-bailout-climate-conditions-explained>.
- [6] Bueno, G.; Hoyos, D. y Capellán-Pérez, I. (2017). *Evaluating the environmental performance of the High Speed Rail project in the Basque Country, Spain.* Research in Transportation Economics, Volume 62.
- [7] Carbon Footprint (Junio de 2019). *Country Specific Electricity Grid Greenhouse Gas Emission Factors.* www.carbonfootprint.com
- [8] Castro Alvarez, O. y Martín Santana, E. (Febrero de 2022) *La Sostenibilidad Medioambiental en el Sector Aeronáutico.* Colegio Oficial de Ingenieros Aeronáuticos de España.
- [9] Castro Alvarez, O. (2023) *La Sostenibilidad Medioambiental en el Sector Aeronáutico. Adenda 2022.* Colegio Oficial de Ingenieros Aeronáuticos de España.
- [10] Comisión Europea (14 de julio de 2021). *Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. 'Fit for 55': delivering the EU's 2030 climate target on the way to climate neutrality.*
- [11] Comisión Europea (14 de julio de 2021). *RefuelEU aviation. Proposal for a regulation of the European Parliament and of the Council on ensuring a level playing field for sustainable air transport.*
https://ec.europa.eu/info/sites/default/files/refueleu_aviation_-_sustainable_aviation_fuels.pdf
- [12] Comisión Europea (9 de diciembre de 2020). *Estrategia de movilidad sostenible e inteligente: encauzar el transporte europeo de cara al futuro.*
- [13] Gobierno de España (2021). *España 2050. Fundamentos y propuestas para una estrategia nacional de Largo Plazo.*

- [14] Gobierno de Francia. *Proyecto de ley de resiliencia climática (Loi climat-résilience)*: <https://www.ecologie.gouv.fr/loi-climat-resilience>.
- [15] Graver, B.; Rutherford, D. and Zhang, K. (Octubre de 2020). *CO2 emissions from commercial aviation 2013, 2018 and 2019*. The International Council on Clean Transportation.
- [16] Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (Marzo de 2021). *Informe de inventario nacional de gases de efecto invernadero (1990-2019)*. Gobierno de España. https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/sistema-espanol-de-inventario-sei-/es-2021-nir_tcm30-523942.pdf
- [17] Murphy, A. (29 de abril de 2021). *France's ban on short-haul flights is more symbolic than it is effective*. Transport & Environment. <https://www.transportenvironment.org/newsroom/blog/france%E2%80%99s-ban-short-haul-flights-more-symbolic-it-effective>
- [18] Transport & Environment (Julio de 2020). *Maximising air to rail journeys Reducing intra-EU aviation emissions through modal shift to rail: limits and opportunities*.
- [19] Muñoz Nieto, P. (18 de octubre de 2020). *Eliminación de vuelos cortos en España. Estudio de impacto y viabilidad*. Ecologistas en Acción. <https://www.ecologistasenaccion.org/300386>
- [20] Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (Marzo de 2023). *Informe de inventario nacional de gases de efecto invernadero (1990-2021)*. Gobierno de España
- [21] Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (1 de septiembre de 2023). *Nota informativa sobre el avance de emisiones de gases de efecto invernadero correspondientes al año 2022*. Gobierno de España. https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/sistema-espanol-de-inventario-sei-/avance_GEI_2022.pdf