



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH
Escola d'Enginyeria de Barcelona Est

TRABAJO FIN DE GRADO

Grado en Ingeniería Eléctrica

**ANÁLISIS Y EVOLUCIÓN DE LAS EMISIONES PRODUCIDAS
POR AERONAVES**



Memoria y Anexos

Autor: Antonio Morales Torres
Director: Pablo Buenestado Caballero
Convocatoria: Junio 2020

Resumen

El presente TFG consiste en el análisis y evolución de las emisiones producidas por aeronaves, empezando con una breve introducción a los conceptos más básicos que permitirán entender el desarrollo del trabajo, donde se estudiará principalmente las emisiones producidas cuando el avión viaja a velocidad de crucero.

Seguidamente, se detallará como se clasifican dichas emisiones, cuál es el origen de cada una de ellas y cómo reaccionan con la atmósfera. Además de esto, se estudiarán los marcos regulatorios que rigen los diferentes organismos y cuál es la metodología utilizada para obtener dichos datos.

En la parte central del trabajo, se estudiarán en detalle las series temporales de tres contaminantes (CO_2 , NO_x y SO_2), delimitando el área de estudio a Cataluña y mediante la construcción de mapas de calor, con el objetivo de analizar la influencia de los diferentes factores que puedan afectar al cómputo total, como el tráfico aéreo, la afectación de las crisis, o los cambios en los marcos regulatorios.

Por último, se considerará un posible escenario futuro a raíz de la crisis de la COVID-19, así como un análisis sobre la afectación al clima y al medio ambiente del conjunto de emisiones que llegan a producir las aeronaves.

Resum

El present TFG consisteix en l'anàlisi i evolució de les emissions produïdes per aeronaus, començant amb una breu introducció als conceptes més bàsics que permetran entendre el desenvolupament del treball, on s'estudiarà principalment les emissions produïdes quan l'avió viatja a velocitat de creuer.

Seguidament, es detallarà com es classifiquen aquestes emissions, quin es l'origen de cadascuna d'elles i com reaccionen amb l'atmosfera. A més a més, s'estudiaran els marcs reguladors que regeixen els diferents organismes i quina es la metodologia utilitzada per obtenir aquestes dades.

En la part central del treball, s'estudiarà en detall les series temporals de tres contaminants (CO_2 , NO_x y SO_2), delimitant l'àrea d'estudi a Catalunya i mitjançant la construcció de mapes de calor, amb l'objectiu d'analitzar l'influència dels diferents factors que pugin afectar al còmput total, com el tràfic aeri, la afectació de les crisis, o els canvis en els marcs reguladors.

Per últim, es considerarà un possible escenari futur arran de la crisi de la COVID-19, així com un anàlisi sobre l'afectació al clima i al medi ambient del conjunt de les emissions que arriben a produir les aeronaus.

Abstract

The present TFG consists of the analysis and evolution of the emissions produced by aircraft, starting with a brief introduction to the most basic concepts that will allow to understand the development of the study, where the emissions produced when the aircraft travels at cruising speed will be mainly studied.

Next, it will be detailed how these emissions are classified, which is the origin of each one of them and how they react with the atmosphere. In addition, the regulatory frameworks that govern the different organizations and the methodology used to obtain these data will be studied.

In the central part of the study, the time series of three pollutants (CO_2 , NO_x and SO_2) will be studied in detail, delimiting the area of study to Catalonia and by the means of the construction of heat maps, with the aim of analysing the influence of the different factors that may affect the total calculation, such as air traffic, the effect of crisis, or changes in the regulatory frameworks.

Finally, a possible future scenario will be considered as a result of the COVID-19 crisis, as well as an analysis of the effect on the climate and the environment of all the emissions produced by aircraft.



Glosario

ATC: Del inglés, *Air Traffic Control*, es un servicio que ofrece información, apoyo y organiza la gestión de las aeronaves desde torres de control situadas en los diferentes aeropuertos.

CAEP: Siglas que definen el Comité sobre la protección del medio ambiente y la aviación, que forma parte de la Organización de Aviación Civil Internacional

Cirros: Tipo de nube blanca compuesta por cristales de hielo.

Compuesto aducto: Producto formado por dos moléculas A y B que se unen de forma directa sin que se produzcan cambios estructurales en ellas.

CORSIA: Del inglés, *Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation*, es un proyecto que presenta un enfoque de mitigación de emisiones para la industria aeronáutica global.

COVID-19: Enfermedad infecciosa causada por el coronavirus y que se puede propagar de persona a persona.

Efecto invernadero antropogénico: Efecto invernadero causado por el ser humano sobre el medio ambiente.

Fotólisis: Descomposición química que sufre una molécula a causa de la acción de los rayos ultravioleta.

Hollín: Sustancia negra y muy fina que forma el humo, mayoritariamente está compuesta por carbón y se adhiere a las superficies.

IPCC: Del inglés, *Intergovernmental Panel on Climate Change*, es una organización internacional de Naciones Unidas cuya misión es proveer una visión objetiva y científica sobre el cambio climático.

ISA: Del inglés, *International Standard Atmosphere*, es un modelo de la atmósfera que permite obtener valores de temperatura, presión y densidad del aire en función de la altitud.

Jet A-1: Es el combustible más utilizado para abastecer aviones con motores de turbina de gas.

LTO: Del inglés, *Landing and Take-Off*, se refiere al conjunto de acciones que se producen hasta el momento del despegue y después del aterrizaje, se cuentan por ciclos.

Velocidad de crucero: Se considera aquella velocidad constante que mantiene una aeronave en condiciones normales, sin sufrir variaciones de altura.

Número Mach: Es una medida de velocidad relativa que se define como el cociente entre la velocidad del objeto y la velocidad del sonido en el medio que se mueve dicho objeto.

OACI: Representa las siglas de la Organización de Aviación Civil Internacional. Es el organismo especializado de las Naciones Unidas que establece los criterios generales de regulación en la aviación civil.

pH: Es una medida utilizada para determinar el grado de acidez de una disolución.

RNAV: Del inglés, *Random NAVigation*, es un sistema de navegación en área, que permite ir de un punto a otro mediante cualquier rumbo.

SARPs: Del inglés, *Standard And Recommended Practices*, son las especificaciones técnicas y operacionales adoptadas por la OACI, que afectan a la seguridad operacional y el medio ambiente, entre otros.

SLS: Del inglés, *Standard Sea Level*, definen unas condiciones atmosféricas para realizar cálculos físicos.

Sublimación: Consiste en el paso de un cuerpo en estado sólido al estado gaseoso y viceversa, sin pasar por el estado líquido.

Troposfera: Capa de la atmósfera terrestre que está en contacto con la tierra, tiene entre 8 y 14 km de espesor según donde se encuentre.

Índice

RESUMEN	I
RESUM	II
ABSTRACT	III
GLOSARIO	V
1. PREFACIO	1
1.1. Origen del trabajo	1
1.2. Motivación	1
2. INTRODUCCIÓN	3
2.1. Objetivos y alcance del trabajo.....	3
2.2. Limitaciones del proyecto.....	4
2.3. Herramientas utilizadas	5
3. CONCEPTOS PREVIOS	7
3.1. Fases de vuelo	7
3.2. Tipos de motores, combustible y reacción química.....	9
4. CLASIFICACIÓN DE EMISIONES CONTAMINANTES	11
4.1. Emisiones de efecto invernadero	11
4.1.1. CO ₂	11
4.1.2. CH ₄	12
4.1.3. N ₂ O.....	13
4.1.4. H ₂ O.....	13
4.2. Gases precursores del ozono.....	14
4.2.1. NO _x	14
4.2.2. CO	16
4.2.3. COVDM	16
4.3. Material particulado	17
4.4. Estelas de condensación	18

4.4.1.	Estelas pasajeras	19
4.4.2.	Estelas persistentes.....	20
4.4.3.	Estelas persistentes que se expanden.....	20
4.5.	Gases acidificantes.....	21
4.5.1.	SO ₂	21
4.5.2.	NO _x	22
5.	MARCOS REGULATORIOS	25
5.1.	Organismos internacionales y convenios.....	25
5.2.	Organismos comunitarios.....	28
6.	METODOLOGÍA	29
6.1.	Área delimitada.....	29
6.2.	Aerovías y rutas de navegación aéreas	30
6.3.	Método de obtención de datos.....	32
6.3.1.	Cálculo de CO ₂	32
6.3.2.	Cálculo de NO _x	33
6.3.3.	Cálculo de SO ₂	37
6.4.	Incertidumbres en la metodología.....	38
7.	ANÁLISIS	39
7.1.	CO ₂	39
7.1.1.	Mapas de calor.....	39
7.1.2.	Evolución.....	42
7.1.3.	Afectación por agentes externos.....	45
7.2.	NO _x	46
7.2.1.	Mapas de calor.....	46
7.2.2.	Evolución.....	49
7.2.3.	Afectación por agentes externos.....	50
7.3.	SO ₂	52
7.3.1.	Mapa de calor	52
7.3.2.	Evolución.....	55
7.3.3.	Afectación por agentes externos.....	56

7.4. Predicción futura con la aparición de la COVID-19	57
7.5. Predicción futura previa a la aparición de la COVID-19	59
7.5.1. CO ₂	59
7.5.2. NO _x	60
7.5.3. SO ₂	62
8. ANÁLISIS DEL IMPACTO AMBIENTAL	63
CONCLUSIONES	67
PRESUPUESTO	69
BIBLIOGRAFÍA	71
ANEXO A	77
ANEXO B	79



Índice de figuras

Figura 1. Procedimiento de certificación de emisiones de la OACI en el ciclo LTO. _____	7
Figura 2. Fases de vuelo. _____	8
Figura 3. Proporciones de emisiones en modo crucero. _____	12
Figura 4. Esquema de formación de aerosoles con material particulado y estelas de condensación. _____	14
Figura 5. Ciclo neto del NO _x en la parte alta de la troposfera. _____	15
Figura 6. Comparativa tamaño material particulado. _____	17
Figura 7. Modelo probabilístico (Appleman, 1953) de formación de estelas de condensación en Latitudes medias. _____	18
Figura 8. Gráfico cambio de estado de vapor de agua para estelas pasajeras. _____	19
Figura 9. Gráfico para el cambio de estado del vapor de agua para estelas persistentes. _____	20
Figura 10. Gráfico para el cambio de estado del vapor de agua para estelas persistentes que se expanden. _____	21
Figura 11. Ciclo de formación del ácido nítrico y óxidos de nitrógeno. Figura adaptada a partir de la original. _____	23
Figura 12. Área delimitada mediante una línea roja. _____	29
Figura 13. Representación de las diferentes fases de vuelo y sus límites. _____	30
Figura 14. Representación de las RNAV (azul) y la ubicación de los principales aeropuertos en el área delimitada. _____	31

Figura 15. Principio del método de flujo de combustible.	34
Figura 16. $EINO_{x,ref}$ vs. $W_{fuel,ref}$ para el motor CF6-80C2B1F.	36
Figura 17. Valores corregidos del índice de emisión vs flujo de combustible para el motor CF6-80C2B1F.	36
Figura 18. Evolución del contenido de sulfuro en combustible para aviones en Reino Unido desde 1986 hasta 2008.	37
Figura 19. Mapa de calor del CO ₂ para el año 1970.	39
Figura 20. Mapa de calor del CO ₂ para el año 2000.	40
Figura 21. Mapa de calor del CO ₂ para el año 2018.	40
Figura 22. Zonas con mayor impacto en el área delimitada.	41
Figura 23. Serie temporal de la evolución de las emisiones de CO ₂ en las dos zonas seleccionadas.	42
Figura 24. Porcentaje rutas por continentes producidas en la zona 1.	43
Figura 25. Distribución del tipo de rutas y distancia recorrida en la zona 1.	43
Figura 26. Porcentaje rutas por continentes producidas en la zona 2.	44
Figura 27. Distribución del tipo de rutas en la zona 2.	44
Figura 28. Serie temporal de la evolución de las emisiones de CO ₂ en las dos zonas seleccionadas y con marcadores temporales.	45
Figura 29. Mapa de calor del NO _x para el año 1970.	46

Figura 30. Mapa de calor del NO _x para el año 2000. _____	47
Figura 31. Mapa de calor del NO _x para el año 2015. _____	47
Figura 32. Zonas con mayor impacto en el área delimitada. _____	48
Figura 33. Serie temporal de la evolución de las emisiones de NO _x en las dos zonas seleccionadas. _____	49
Figura 34. Serie temporal de la evolución de las emisiones de NO _x en las dos zonas seleccionadas y con marcadores temporales. _____	50
Figura 35. Implementación de la tecnología de mitigación del NO _x a través de las certificaciones de los motores. _____	51
Figura 36. Mapa de calor del SO ₂ para el año 1970. _____	52
Figura 37. Mapa de calor del SO ₂ para el año 2000. _____	53
Figura 38. Mapa de calor del SO ₂ para el año 2015. _____	53
Figura 39. Zonas con mayor impacto en el área delimitada. _____	54
Figura 40. Serie temporal de la evolución de las emisiones de SO ₂ en las dos zonas seleccionadas. _____	55
Figura 41. Serie temporal de la evolución de las emisiones de SO ₂ en las dos zonas seleccionadas y las operaciones en el Aeropuerto de Barcelona - El Prat. _____	56
Figura 42. Comparación de la serie temporal de las emisiones de SO ₂ y de CO ₂ para las dos zonas seleccionadas. _____	56
Figura 43. Evolución del tráfico en el Aeropuerto de Barcelona desde el 1 de marzo al 3 de junio. _____	57

Figura 44. Posibles escenarios de recuperación del tráfico aéreo con fecha de 24 de abril. _____	58
Figura 45. Evolución y previsión de las emisiones de CO ₂ en Europa. _____	59
Figura 46. Evolución y previsión de las emisiones de CO ₂ en las zonas de estudio. _____	60
Figura 47. Evolución y previsión de las emisiones de CO ₂ en Europa. _____	61
Figura 48. Evolución y previsión de las emisiones de NO _x en las zonas de estudio. _____	61
Figura 49. Evolución y previsión de las emisiones de SO ₂ en las zonas de estudio. _____	62
Figura 50. Forzamiento radiativo causado por la aviación en el mundo durante el año 2005. ____	64

1. Prefacio

1.1. Origen del trabajo

La idea de la realización de este trabajo comienza en el año 2017 cuando entro a trabajar en la empresa de Handling Iberia en el Aeropuerto de Barcelona-El Prat. Para entonces, la contaminación y la problemática del cambio climático ya eran elementos muy presentes en la sociedad. En mi caso en particular, el impacto causado fue mayor al vivirlo día tras día. Fue entonces cuando realmente tomé conciencia del volumen de tráfico aéreo y de la problemática que ello conllevaba. Me surgieron muchas dudas y preguntas sobre todo lo que envuelve al sector de la aviación.

1.2. Motivación

La principal finalidad es saber cuál es la afectación real al medio ambiente, cuantificar y entender la composición de las emisiones que se producen, principalmente en la fase de crucero. Bajo mi punto de vista, esta fase permite un análisis más realista de la situación, ya que ofrece unos valores más regulares y que no dependerán tanto del tráfico en el aeropuerto o de si hay acumulación de aviones en cola esperando órdenes para despegar.



2. Introducción

Hace cincuenta años, el transporte aéreo se consideraba un lujo que solo unos pocos privilegiados podían permitirse. Las aerolíneas, controladas por los estados, establecían los precios, horarios y rutas. A partir de 1978, Estados Unidos desregularizó el control sobre los horarios y las tarifas y con ello, el mercado global cambió. Nuevas aerolíneas aparecieron y el precio del petróleo se desplomó, provocando una bajada de los precios de los billetes y un aumento de la demanda de este servicio, que se tradujo en un mayor número de usuarios y un mayor número de trayectos a escala global.

Con el paso del tiempo, la tecnología también mejoró. Los aviones ya eran más eficientes y gracias a las mejoras aerodinámicas y operacionales, se redujeron los tiempos de vuelo y el consumo de combustible. Años más tarde, aparecieron las primeras aerolíneas low-cost, al alcance de cualquier bolsillo.

El transporte aéreo se había vuelto un recurso imprescindible para cualquier persona, creando un nuevo nivel de confort y dejando atrás los largos e incómodos viajes en tren o coche. Muchos estaban encantados con las nuevas ventajas que el transporte aéreo les proporcionaba, pero no tantos se pararon a pensar en los inconvenientes que ello conllevaba. Uno de esos inconvenientes, es que el transporte aéreo se erigió como la única fuente de emisiones contaminantes producida en la atmósfera a partir de los 6 km de altitud.

El origen de dichas emisiones reside en la combustión que se produce en los motores del avión. Dicho combustible está compuesto por una mezcla de hidrocarburos con un pequeño porcentaje de azufre que, reacciona con el aire y se producen diferentes elementos tales como el CO_2 , $\text{H}_2\text{O}_{(\text{vap})}$, NO_x , SO_2 , CO y material particulado (PM).

2.1. Objetivos y alcance del trabajo

En función de lo comentado anteriormente, el principal objetivo es analizar la evolución de las emisiones contaminantes producidas por aeronaves. Este estudio queda acotado al rango de altitudes superiores a los 7.500 metros, cuya altura delimita el espacio aéreo superior y que coincide cuando el avión viaja a velocidad de crucero. El área a estudiar estará delimitada por los límites de la Comunidad Autónoma de Cataluña y parte de la zona marítima colindante.

Las emisiones a analizar serán las que se produzcan en mayor proporción y, por lo tanto, que provocan una afectación mayor. Más en concreto, se analizará en detalle la evolución temporal del dióxido de carbono, los óxidos de nitrógeno (NO_x) y el dióxido de azufre. Como consecuencia de la evolución del proyecto, también se tratarán otros objetivos más específicos:

- Analizar cómo se producen estas emisiones y qué reacciones provocan en la atmósfera.
- Analizar las regulaciones internacionales y europeas que rigen el espacio aéreo y los niveles de emisiones contaminantes permitidos.
- Entender las metodologías utilizadas para obtener las cantidades de emisiones totales.
- Analizar las principales aerovías y rutas aéreas que pasan por Cataluña para detectar zonas más afectadas.
- Generar series temporales que muestren la evolución de las emisiones en las zonas más afectadas de forma cronológica.
- Analizar la influencia de agentes externos y de la aplicación de normativas en las series temporales.
- Realizar una predicción para escenarios futuros a partir de los resultados obtenidos.
- Analizar el impacto ambiental de dichas emisiones.

2.2. Limitaciones del proyecto

Con el objetivo de acotar el rango de estudio y poder concentrar el análisis, se han establecido unas limitaciones en el proyecto.

En primer lugar, se ha delimitado a nivel geográfico el área a tratar. Esta quedará comprendida entre la longitud 0,3 grados hasta 3,3 grados y en cuanto a la latitud, entre 40,5 grados y 42,8 grados.

En segundo lugar, en lo que respecta a la altitud del vuelo. Queda limitado a la máxima altitud de vuelo de cada trayecto, que coincide cuando el vuelo queda estabilizado y viaja a velocidad de crucero. Para establecer igualdad entre todos los vuelos, se define a partir de los 100 primeros km de vuelo y antes de los últimos 100 km antes de aterrizar.

Por último, quedan excluidos del proyecto vuelos que circulen por debajo de 7.500 metros de altitud, altura que se considera espacio aéreo inferior, así como los recorridos que se guían mediante reglas de vuelo visual (VFR).

2.3. Herramientas utilizadas

Para la realización del proyecto se han utilizado diversas herramientas de software. Estas han ayudado a mostrar de una manera más clara los diferentes tipos de información.

La más utilizada ha sido Excel, cuya función ha sido organizar todos los valores extraídos de la base de datos en formato .txt, para cada uno de los años analizados en la serie temporal y para cada contaminante estudiado. Dichos datos se han formateado y filtrado para el área de estudio. Además, se han creado otras hojas de cálculo con información más específica y concreta para analizar otros parámetros.

Otra herramienta utilizada ha sido MATLAB, a dónde se le han importado los datos ya organizados de Excel. Esta ha permitido la elaboración de mapas de calor para diversos años y contaminantes, facilitando el análisis en superficie.

También se ha utilizado el software AutoCAD, dónde se le ha importado la carta de navegación aérea proporcionada por Aena. Gracias a esta herramienta, se visualiza de forma muy clara el área delimitada y las diferentes rutas que se recorren en ella, ya que permite hacer señalizaciones y marcas de forma precisa.

Por último, se ha utilizado la herramienta *Airline Route Mapper*. Esta permite visualizar las diferentes rutas aéreas y muestra información detallada sobre origen, destino y distancia entre ambos puntos.



3. Conceptos previos

3.1. Fases de vuelo

Si dividimos un trayecto en avión en diferentes fases, se podría resumir en las siguientes:

- Fase LTO
- Fase Ascenso/Descenso
- Fase Crucero

En la fase LTO (Aterrizaje y Despegue) se desarrollan todas las acciones que lleva a cabo una aeronave desde que está aparcada y se pone en marcha para despegar, hasta cuando aterriza y vuelve a aparcar. Los datos referentes a las duraciones y, por lo tanto, del consumo en esta etapa varían ampliamente dependiendo del aeropuerto, del tráfico aéreo y en consecuencia del tiempo en llevar a cabo este proceso.

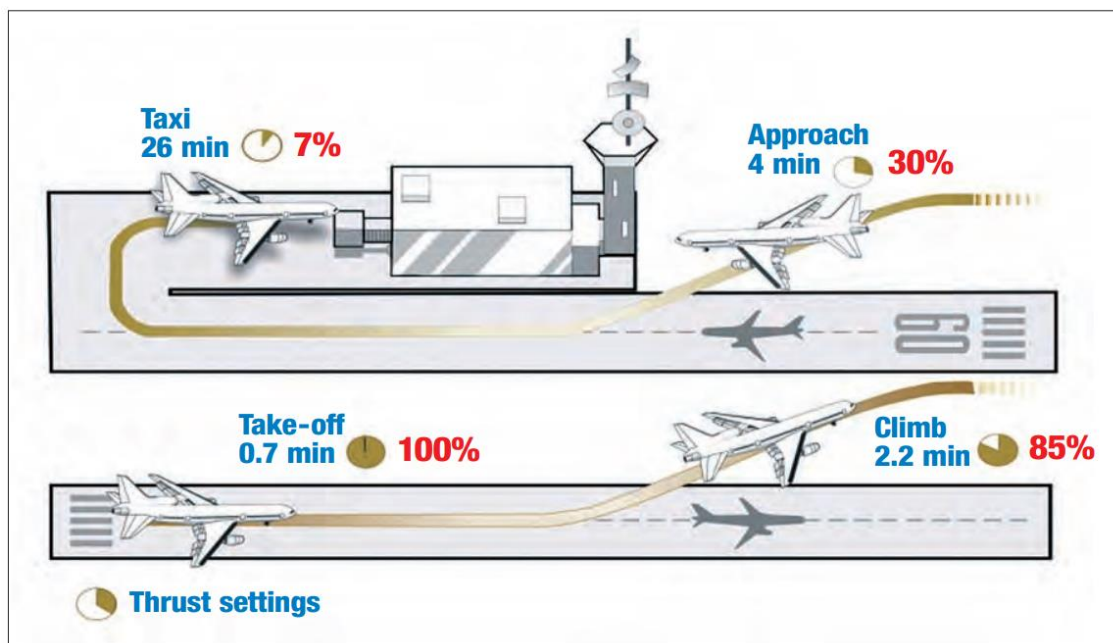


Figura 1. Procedimiento de certificación de emisiones de la OACI en el ciclo LTO. Fuente: OACI (2010) pg.27

La OACI (2010) estima que el tiempo aproximado en esta fase es de 32 minutos y 54 segundos. El estado "taxi" es el mayoritario: el avión está esperando, ya sea en el momento del despegue o en el aterrizaje, dependiendo del tránsito de cada aeropuerto. Es la fase para la que existen las regulaciones

más estrictas, debido a que afectan a la calidad del aire local y se estiman mediante el número total de ciclos LTO que se producen en los aeropuertos. Esta fase se extiende hasta que la aeronave alcanza los 1000 metros de altura.

La segunda fase consiste en el ascenso/descenso, donde la aeronave supera los 1000 metros de altitud y alcanza los 11.000 metros aproximadamente, dependiendo de la aeronave y de su peso. Esto ocurre de forma inversa en el descenso. La duración aproximada de esta segunda fase depende directamente de la velocidad del avión y su ángulo de ascenso/descenso, aunque la OACI (2015) especifica que el patrón típico de la fase LTO se produce a pocos kilómetros del aeropuerto, seguido de la fase de ascenso/descenso, que abarca los primeros 100 km desde el despegue, así como los últimos 100 km antes de aterrizar.

Por último, tenemos la fase crucero, se produce una vez el avión se estabiliza a una altura y puede volar a una mayor velocidad debido a la menor resistencia del aire. En lenguaje aeronáutico, las velocidades de los aviones se conocen en relación al número Mach, donde Mach 1 equivale a la velocidad del sonido. A día de hoy, los aviones comerciales más modernos pueden volar a una velocidad máxima Mach 0.90, no obstante, la mayoría oscilan el rango entre 800 y 915 km/h, que equivale a una velocidad Mach 0.75-0.85. Para el cálculo del número Mach, hay que tener en cuenta que la velocidad del sonido varía también según la altitud.

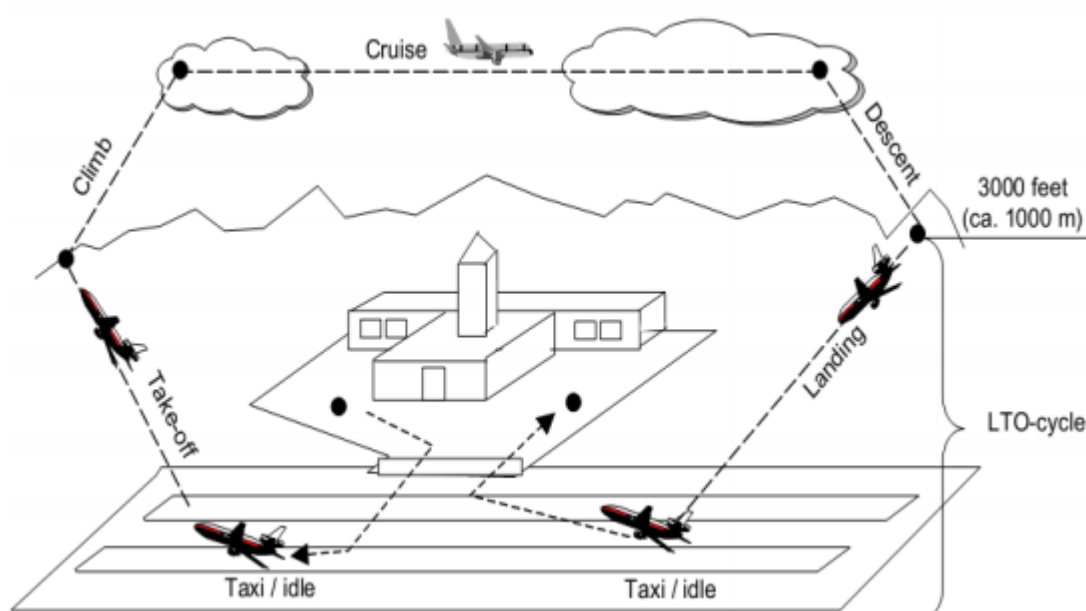


Figura 2. Fases de vuelo. Fuente: Lene Sørensen y Niels Kilde. (2006) pg.5

3.2. Tipos de motores, combustible y reacción química

Las aeronaves producen emisiones contaminantes debido a la combustión que se produce en sus motores y su consiguiente expulsión de los gases. Además, estos gases entran en contacto con el aire, donde se producen complejas interacciones debido a la altitud y condiciones climáticas.

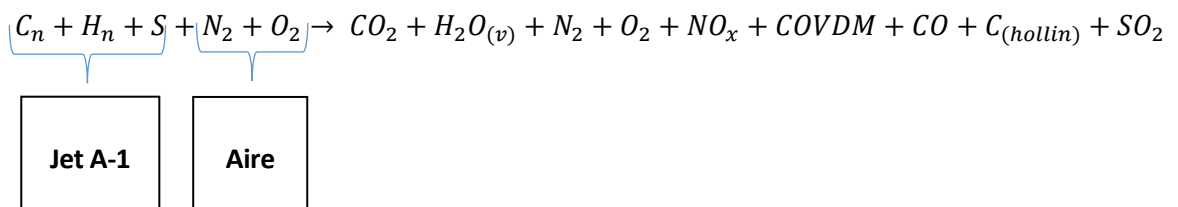
Existen varios tipos de motores, pero en la actualidad los dos que predominan son los turbofán y los de turbohélice. Antiguamente los predominantes eran los turborreactores, menos eficientes a bajas velocidades y más ruidosos, pero después de la segunda guerra mundial se fueron remplazando por los turbofán. En la actualidad solo quedan algunos aviones de combate antiguos con este tipo de motor.

El combustible utilizado para estos motores es el Jet A-1, coloquialmente conocido como queroseno, y cuya composición química equivaldría a un 85% de carbono y un 15% de hidrógeno líquido. Consiste en una mezcla de diferentes tipos de hidrocarburos con un pequeño porcentaje de azufre. Según Rachner (1998), el Jet A-1 equivale a la fórmula $C_{12}H_{23}$ y 1 kg de este, completamente oxidado, produce 3156 gramos de CO_2 y 1237 gramos de H_2O .

El aire, el otro factor en esta reacción de combustión, está compuesto por nitrógeno en un 78% y por oxígeno en un 21%, además de pequeñas fracciones de otros componentes con concentraciones inferiores al 1%.

Una vez tenemos estos dos elementos en juego, los motores captan el aire atmosférico y lo combinan dentro del motor con el combustible, tras pasar por compresores y turbinas, lo que provoca una reacción de combustión y que expulsa dichos gases por la tobera para lograr impulsar el avión.

Si tratamos estos dos componentes como una reacción química obtendríamos lo siguiente:





4. Clasificación de emisiones contaminantes

Las emisiones se pueden separar en varios grupos.

En primer lugar, existen las emisiones de efecto invernadero. Estos gases son capaces de absorber y retener el calor emitido por la superficie terrestre, provocando que no escapen a la atmósfera y aumentando la temperatura global del planeta.

En segundo lugar, se encuentran los gases precursores del ozono. Estos gases reaccionan con los componentes químicos de la troposfera y estratosfera, provocando la formación de moléculas de ozono.

En tercer lugar, aparecen emisiones de material particulado. Se trata de sustancias en estado sólido o líquido que son vertidas directamente a la atmósfera y se catalogan según su tamaño. Sirven como núcleos de condensación para el vapor de agua.

En cuarto lugar, tenemos la formación de estelas de condensación, provocadas a causa de la congelación del vapor de agua, pero que requieren de unas condiciones específicas para que se produzcan.

En quinto lugar, se sitúan los gases acidificantes. Estos se dispersan con facilidad y caen directamente en la superficie en forma de depósitos, ya sea húmedos o secos.

4.1. Emisiones de efecto invernadero

4.1.1. CO₂

Es el elemento que más contribuye al efecto invernadero antropogénico. Se produce en la oxidación del carbono que contiene el combustible durante la combustión.

En un escenario ideal, todo el carbono del combustible debería convertirse en CO₂. Sin embargo, en un escenario real no existen procesos perfectos, por lo que de la ineficiencia producida en la combustión genera pequeñas cantidades de carbono no oxidado o parcialmente oxidado.

El comportamiento del CO₂ es simple, no afecta de manera importante en procesos de destrucción o de creación en la atmósfera. Su principal efecto es el impacto directo que produce en la concentración

de dióxido de carbono en la atmósfera, absorbiendo la radiación emitida en la superficie de la tierra y en la parte baja de la atmósfera. Debido a su gran estabilidad, permanece en la atmósfera durante décadas y se mezcla con otras emisiones de CO₂ emitidas por otras fuentes.

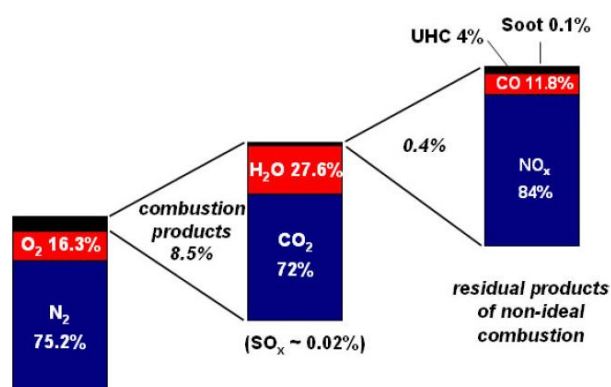


Figura 3. Proporciones de emisiones en modo crucero. Fuente: IPCC (1999)

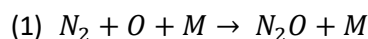
Según el IPCC (1999), tal y como se puede apreciar en la figura 3, un 72% del total de emisiones producidas por la combustión son CO₂, siendo el elemento claramente mayoritario en este proceso. Aún así, esta reacción solo representa el 8,5% del proceso que permite mover la aeronave, siendo el 91,5% restante aire que es devuelto a la atmósfera, mayoritariamente en forma de aire frío, con una concentración de aire caliente en la tobera final.

4.1.2. CH₄

El metano se produce a causa de la combustión incompleta de los hidrocarburos contenidos en el queroseno. Si bien es cierto que a bajas temperaturas de combustión es más probable la aparición de este gas, en el caso específico tratado en este trabajo, cuando el avión viaja en la fase crucero Wiesen et al., (1994) señalan que las emisiones de CH₄ son insignificantes. Y a pesar de que en las pautas del IPCC de 2006 se siguen señalando que la aviación produce estas emisiones, se añade en una nota conforme solo se tienen en cuenta en la fase LTO, debido a que el conocimiento científico actual no permite incluir otros gases (p. ej., N₂O y CH₄) en el cálculo de las emisiones crucero. (IPCC, 1999)

4.1.3. N₂O

El N₂O se genera de la reacción química del nitrógeno en estado gaseoso junto con el oxígeno y un tercer elemento (M):



De la misma forma que el metano, del óxido nitroso también se han hecho diversos estudios donde se concluye que en condiciones de velocidad de crucero las emisiones de N₂O no contribuyen de forma significativa para el recuento. (Wiesen et al., 1994)

4.1.4. H₂O

El segundo material que se expulsa en mayor cantidad después del dióxido de carbono es el vapor de agua. Se genera en la reacción de combustión del combustible fósil y dependiendo de las condiciones donde se encuentre se emite en forma líquida o gaseosa. En el caso particular de la aviación en unas condiciones aire caliente y húmedo se produce en forma de vapor.

De la misma manera que el CO₂, sus emisiones son proporcionales al consumo de combustible y la cantidad de vapor de agua resultante se puede calcular de manera sencilla sabiendo el total de Jet A-1 consumido.

No obstante, las emisiones de H₂O son pequeñas respecto el vapor de agua que se evapora de la superficie de la tierra. Según el IPCC (1999), cuando se produce en la troposfera se elimina en una o dos semanas debido a las precipitaciones, mientras que cuando se produce en la estratosfera (a partir de los 15km de altitud), podría tardar desde meses a años en ser eliminado.

Otro de los efectos que provoca el vapor de agua, es la creación de estelas de condensación y cirros bajo unas condiciones específicas alterando el ciclo natural del agua, cuya explicación se detalla en el [apartado 4.4](#). Además, favorece la creación de aerosoles, es decir, sirve como medio de transporte para todo tipo de partículas en suspensión, ya sea tanto partículas de hollín o de azufre, producidas en la combustión del Jet A-1. En la siguiente figura se puede observar el proceso de formación de estos aerosoles, aunque la comunidad científica todavía cataloga el conocimiento de estos efectos como muy bajo y con unos márgenes de incertidumbre muy elevados. (Wilcox, 2012)

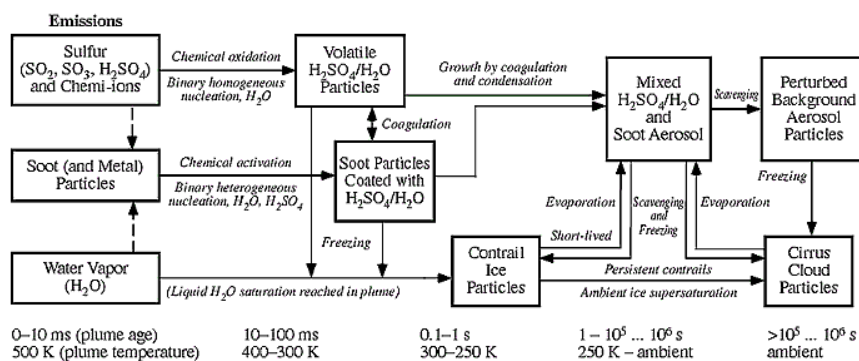


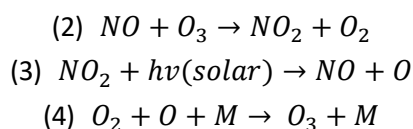
Figura 4. Esquema de formación de aerosoles con material particulado y estelas de condensación. Fuente: IPCC (1999)

4.2. Gases precursores del ozono

4.2.1. NO_x

La emisión de óxido nítrico se produce debido a la oxidación en condiciones de altas temperaturas y presión del nitrógeno que contiene el aire. Es importante diferenciar las emisiones de NO_x producidas en la parte alta de la troposfera, cercana a la capa de ozono, a las emitidas en parte inferior de la troposfera. La principal diferencia reside en la concentración de moléculas de oxígeno atómico O, que es mayor a menor altura. Las concentraciones de ozono (O_3) van cogiendo protagonismo a medida que superamos los 10km de altura hasta llegar a los 20 km, donde se encuentra la capa de ozono.

En la parte alta de la troposfera, el NO reacciona con facilidad con el O_3 , creando NO_2 y O_2 . Lo que supone la pérdida de una molécula de ozono por una de oxígeno. Por su parte, el NO_2 sufre fotólisis y se reconvierte en NO junto con una molécula atómica de oxígeno tal y como se muestra en las siguientes reacciones. El ciclo producido entre el NO y el NO_2 se produce con gran facilidad durante el día debido a la luz solar y por ello se les considera como a ambos como un grupo, el NO_x .



El ciclo se cierra cuando las moléculas restantes de oxígeno reaccionan entre ellas con un tercer elemento (M) y vuelven a formar ozono, quedando así en un balance neto y sin efecto en el ozono.

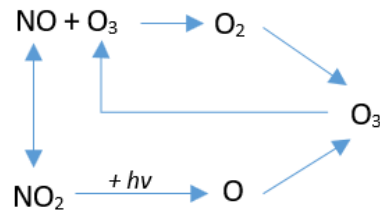
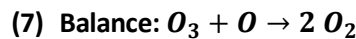
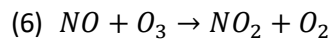
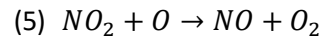


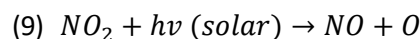
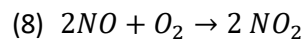
Figura 5. Ciclo neto del NO_x en la parte alta de la troposfera. Fuente: Elaboración propia.

No obstante, según Jacob (1999) una fracción de las moléculas de NO_2 reaccionan con el oxígeno atómico y se vuelve a producir la reacción del NO con el ozono. En esta ocasión el ciclo no queda cerrado y se produce un balance negativo del ozono, que se convierte en dos moléculas de oxígeno.

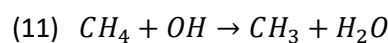


En un futuro, si se desarrollan aeronaves que viajan por encima de la troposfera y aún más cerca de la capa de ozono, esta situación se podría ver incrementada de manera radical favoreciendo la destrucción de la capa de ozono.

Por otra parte, pese a que en niveles altos de la troposfera el NO_x no tiene un factor de creación de ozono, sino todo lo contrario, cuando se emite las partes más bajas de la troposfera es capaz de generar O_3 . Se produce una reacción con el oxígeno que luego, mediante la luz solar, provoca la creación de oxígeno atómico para finalmente componer este ozono troposférico.



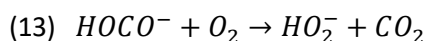
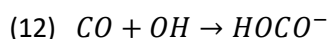
Además de favorecer la creación del ozono, el óxido de nitrógeno favorece la reducción del metano en la atmósfera. Esto se produce a causa del incremento de los niveles de OH en la atmósfera, particularmente en los trópicos, a partir de la creación del O_3 a través de reacciones más complejas y del CO (Holmes et al., 2011), y se genera así una reducción en las concentraciones de CH_4 mediante la siguiente ecuación:



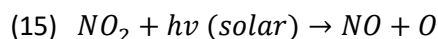
4.2.2. CO

El monóxido de carbono se produce principalmente debido a la combustión incompleta del Jet A-1. No es frecuente encontrarlo en velocidades de crucero en los aviones modernos, siempre que se encuentren en buenas condiciones. Aviones más antiguos y con una eficiencia más baja sí que producen CO en mayor cantidad. Este se produce principalmente mientras la aeronave se encuentra en fase LTO, ya que sus motores no funcionan a pleno rendimiento y tienen que controlar la velocidad dependiendo del tráfico del aeropuerto.

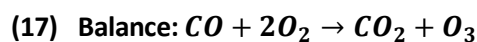
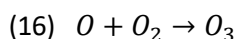
El proceso de creación del ozono requiere de la presencia de radicales OH, así como de óxido de nitrógeno, unos intermediarios vitales para finalmente acabar produciendo ozono troposférico. En primer lugar, el monóxido de carbono se oxida mediante el radical OH, provocando el compuesto aducto HOCO, altamente inestable y que rápidamente se convierte en un hidroperóxido.



El hidroperóxido reacciona con monóxido de nitrógeno y de la misma forma que en el apartado anterior, el dióxido de nitrógeno mediante la luz solar liberará un átomo de oxígeno que quedará libre.



Este átomo de oxígeno en el aire generará el ozono troposférico, quedando así un balance neto no solo de generación de ozono, sino también de CO₂.



4.2.3. COVDM

Los compuestos orgánicos volátiles diferentes del metano (COVDM, en inglés NMVOC) engloban el conjunto de hidrocarburos que no son metano y que se producen en la quema del combustible. Para la creación del ozono siguen la misma reacción que en el apartado anterior, ya que son muy volátiles a temperatura ambiente. Además, se combinan con facilidad con otros contaminantes atmosféricos como los óxidos de nitrógeno y la luz solar, creando ozono a nivel de suelo y contribuyendo a la

creación de esmog. Debido a que son altamente perjudiciales para la salud y a su facilidad de evaporación, están debidamente regulados y en elementos como pinturas o barnices se requiere una autorización especial para su uso.

4.3. Material particulado

Las principales partículas que se pueden encontrar en un motor de un avión son hollín y partículas de azufre, ambas proceden del combustible utilizado y se emiten directamente en la atmósfera. En general, se clasifican dependiendo de su tamaño. Aun así, aunque las más frecuentes y las que están sometidas a regulación son las MP_{10} y $MP_{2,5}$, correspondientes a un diámetro de 10 μm y 2,5 μm , debido a que se encuentran en mayor cantidad respecto a las otras de menor tamaño.

En el caso de los motores, el último informe de la OACI (2019) señala que la mayoría partículas emitidas en las aeronaves tienen un diámetro inferior a $PM_{2,5}$, es decir, inferior a 2,5 μm , y que principalmente tienen un diámetro de entre 10 nm y 120 nm. Las partículas de este tamaño se consideran partículas ultrafinas y van aumentando de tamaño a medida que el motor trabaja su potencia, hasta alcanzar valores de 50 nm de media cuando viaja en modo crucero y con una potencia del 98% del motor (Rindlisbacher, 2017).

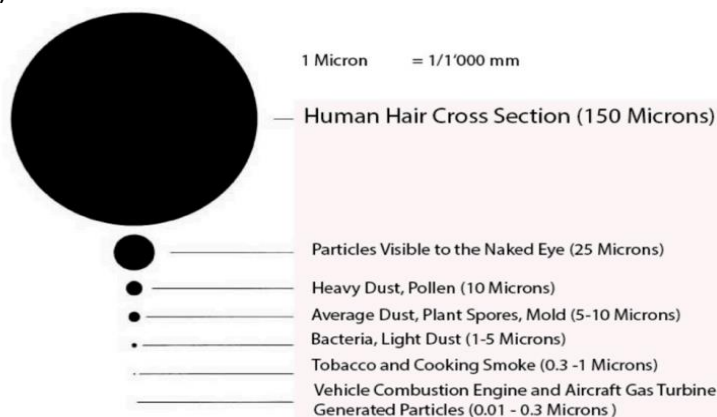


Figura 6. Comparativa tamaño material particulado. Fuente: OACI (2016) pg.1

Asimismo, tanto las partículas de azufre como el hollín, se pueden combinar mediante la condensación del vapor de agua para la formación de aerosoles, así como para la creación de estelas de condensación y cirros bajo unas condiciones concretas, cuya formación se explicará en el siguiente apartado.

4.4. Estelas de condensación

Las estelas de condensación consisten en nubes de hielo generadas a causa de la condensación del vapor de agua. Estas requieren unas condiciones de aire caliente y húmedo que, cuando entra en contacto con la atmósfera superior, cuyo aire es frío y seco, puede transformarse para formar estas estelas, ya sean temporales o más persistentes. Una estela de condensación solo necesita vapor de agua para formarse, pero la existencia de material particulado ayuda a que estos núcleos de concentración sean más grandes y que sea más probable que aparezcan nubes tipo cirro y estratosféricas.

Pese a la dificultad de cuantificar con exactitud cuando se producirá una estela y cuando no, a finales de la primera guerra mundial se diseñaron modelos probabilísticos con el objetivo de que la estela no delatase al avión. En este modelo intervienen diversos factores, siendo el primero de ellos la latitud y la estación del año. Luego, se tiene en cuenta el porcentaje de humedad relativa (RH), la presión y la temperatura del aire. Con todos estos factores se puede hacer una aproximación de la probabilidad con la que aparecerán estas estelas, tal y como se puede observar en la siguiente figura.

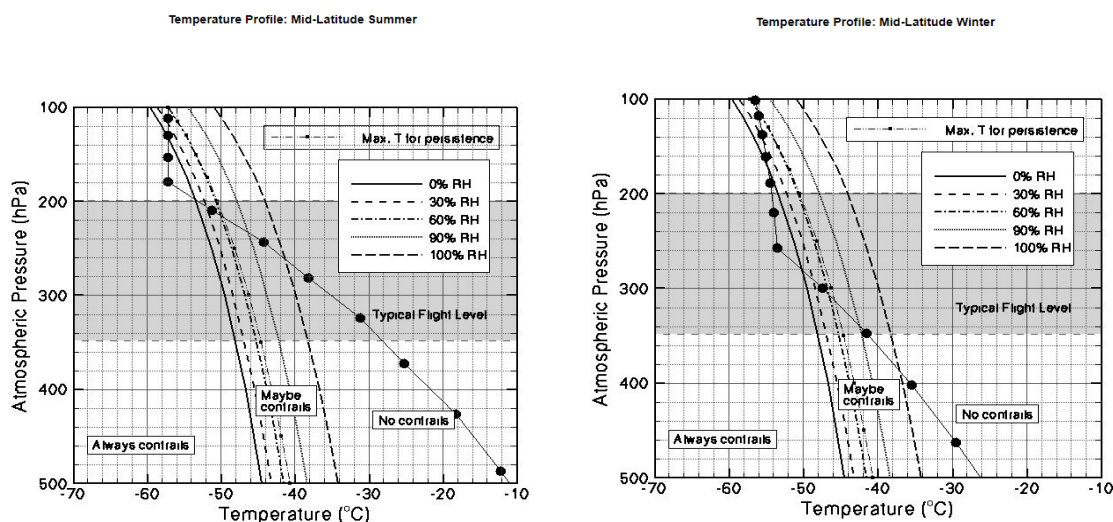


Figura 7. Modelo probabilístico (Appleman, 1953) de formación de estelas de condensación en Latitudes medias. Fuente: NASA (2018)

Las alturas más habituales de vuelo en modo crucero oscilan entre los 7.500 y los 12.000 metros de altitud, que en términos de presión se encuentra por encima de los 400 hPa hasta los 150 hPa aproximadamente, aunque esto puede variar dependiendo de las condiciones meteorológicas.

A pesar de que estos modelos se hicieron en 1953, se han hecho revisiones de los mismos en 1996 por Schumann en su "On conditions for contrail formation from aircraft exhausts" teniendo en cuenta nuevos modelos de avión, pero concluyen que estos siguen siendo vigentes con algunas leves modificaciones.

Además, se pueden dar tres tipos diferentes de estelas de condensación y se clasifican según su longevidad.

4.4.1. Estelas pasajeras

Las estelas pasajeras se producen principalmente cuando el aire es seco y permanecen muy poco tiempo en la atmósfera. La importancia de la humedad del aire se puede apreciar en la siguiente figura.

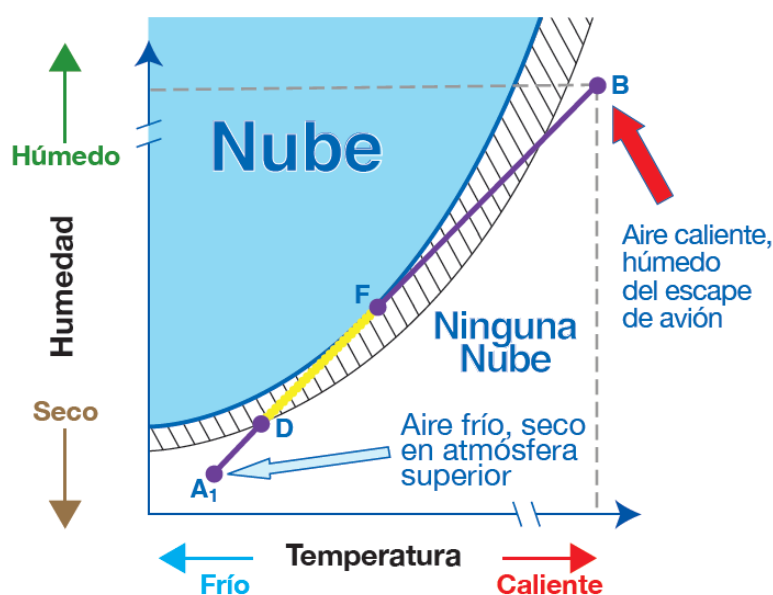


Figura 8. Gráfico cambio de estado de vapor de agua para estelas pasajeras. Fuente: NASA (2018).

El área rayada representa el área de sublimación y la curva marcada en color azul, la curva de condensación. Por lo que, dependiendo de lo húmeda y fría que esté la atmósfera, cruzará más o menos la curva de condensación que será la que defina cuando se crea una nube y cuando no.

En este caso en concreto, existe un punto F de formación de la estela, pero que rápidamente vuelve al área de sublimación y llega al punto D, punto de disipación de la estela, hasta dejar atrás esa zona y desaparecer velozmente.

4.4.2. Estelas persistentes

Las estelas persistentes se producen cuando el aire es más frío y por lo tanto el vapor de agua permanece mucho más tiempo de forma condensada, es decir, en forma de nube. Según la Organización Meteorológica Mundial (OMM, del inglés WMO), estas estelas persistentes se consideran cirros una vez han persistido al menos durante diez minutos y se clasifican como *Cirrus homogenitus*.

En la siguiente figura, al igual que en las estelas pasajeras, podemos ver el punto F, marcado como punto de formación de la estela. Permanece en este estado hasta que llega al punto D, punto donde las gotas de agua se empiezan a evaporar, pero persisten los cristales de agua. Después, los cristales de hielo se subliman hasta que las condiciones de la atmósfera cambian para que esta estela atraviese la curva de sublimación y se disipe.

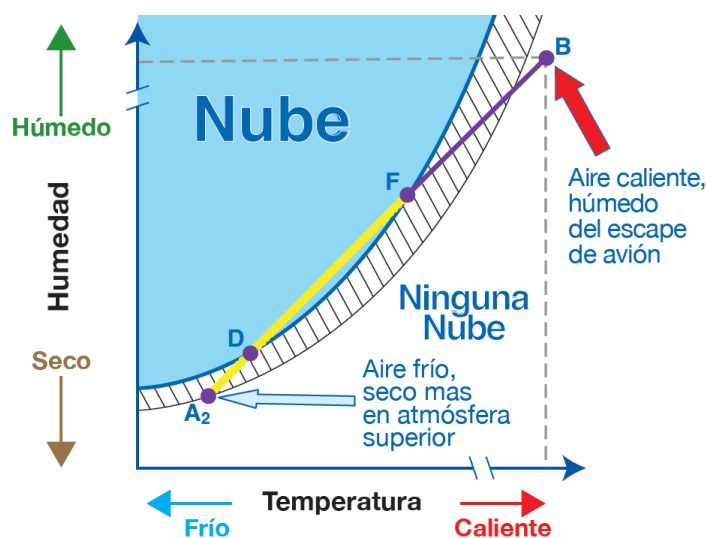


Figura 9. Gráfico para el cambio de estado del vapor de agua para estelas persistentes. Fuente: NASA (2018).

4.4.3. Estelas persistentes que se expanden

Las estelas persistentes que se expanden se producen en situaciones donde el aire de la atmósfera está frío y húmedo, por lo que, a diferencia de las estelas persistentes, la recta no llega a salir del área de sublimación. Esto provoca que los cristales de hielo no se lleguen a evaporar, pero las gotas de agua sí, quedando así una estela que se va extendiendo en lugar de estar concentrada como en el caso anterior.

De igual manera que las estelas persistentes, se clasifican como Cirros si se mantienen durante al menos diez minutos en el aire. En la siguiente figura se puede ver la trayectoria del cambio de estado.

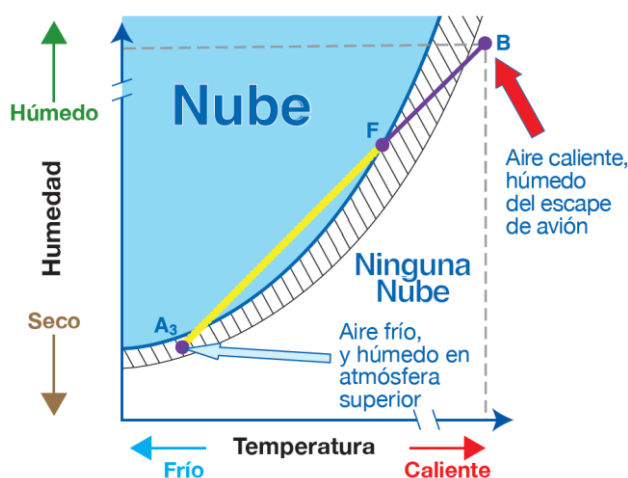
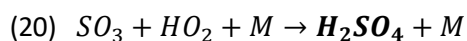
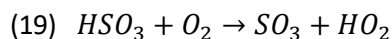
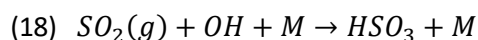


Figura 10. Gráfico para el cambio de estado del vapor de agua para estelas persistentes que se expanden. Fuente: NASA (2018).

4.5. Gases acidificantes

4.5.1. SO₂

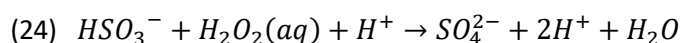
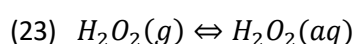
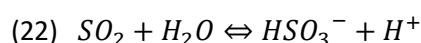
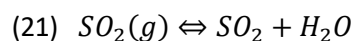
El dióxido de azufre se produce en la combustión del Jet A-1, ya que un porcentaje de su composición incorpora azufre. En la atmósfera, el SO₂ se oxida debido a la presencia de los radicales OH que se forman cuando la luz solar ultravioleta reacciona con el vapor de agua y el ozono. Una vez creado el HSO₃ este reacciona de manera muy rápida con el oxígeno para acabar resultando en ácido sulfúrico (H₂SO₄).



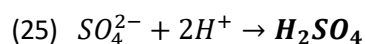
La primera reacción se forma de manera muy lenta, por lo que podría parecer que estos gases tendrían tiempo de desplazarse largas distancias debido al viento, provocando lluvias ácidas lejos de donde se originaron estos gases. No obstante, en 1980 los investigadores Freiberg y Schwartz demostraron que

el dióxido de azufre sufría una oxidación muy rápida y se producía de manera mayoritaria en las zonas donde este se originaba.

En estos estudios se muestra como la oxidación del dióxido de azufre se produce principalmente en las gotas de las nubes y también en la lluvia, donde el SO_2 se disocia al ion (HNO_3) y provoca la oxidación en estado líquido de manera muy rápidamente el peróxido de hidrógeno (H_2O_2).



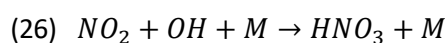
Por lo que finalmente se obtiene:



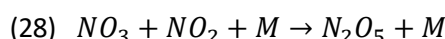
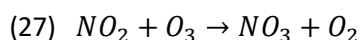
Esta reacción depende principalmente del peróxido de hidrógeno, por lo que no se producirá de manera habitual a menos que su concentración en la atmósfera sea muy elevada.

4.5.2. NO_x

Los óxidos de nitrógeno, además de pertenecer al grupo de precursores de ozono, pertenecen al conjunto de emisiones acidificantes. De la misma manera que el dióxido de azufre, el dióxido de nitrógeno se oxida durante el día mediante el radical OH, provocando así HNO_3 .

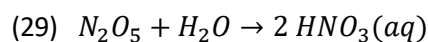


Mientras que, durante la noche, el radical OH desaparece y el ozono actúa como oxidante provocando así la creación de N_2O_5 .



El N_2O_5 presenta una forma muy estable, por lo que puede permanecer en el aire horas o incluso días, pudiendo transformarse en HNO_3 de forma acuosa a través del agua. En caso de no reaccionar con el

agua, vuelve a tomar la forma de NO_2 o NO_3 debido a la radiación solar. Además, se puede ver transportado a largas distancias de su zona de emisión.



Todos estos compuestos forman un ciclo que se va transformando constantemente, provocando una acidificación en las lluvias que, dependiendo de la concentración, afectará de mayor o menor manera a la acidez del pH de las precipitaciones, ya sea en forma de depósito seco o húmedo.

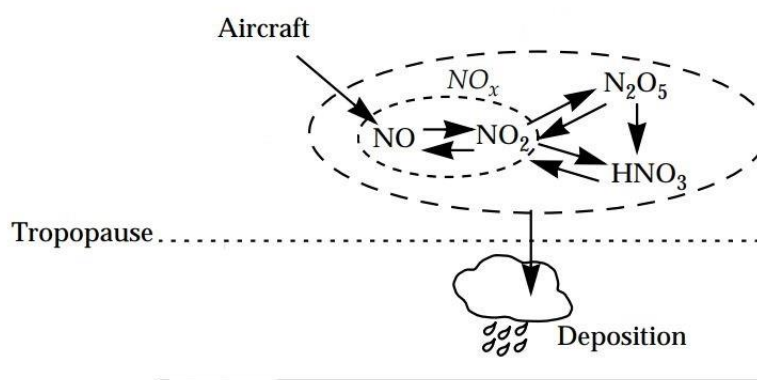


Figura 11. Ciclo de formación del ácido nítrico y óxidos de nitrógeno. Figura adaptada a partir de la original. Fuente: Jacob (1999). Chapter 10. pg.172.



5. Marcos regulatorios

Los marcos regulatorios están divididos en varios niveles, según su procedencia y el conjunto de países a los que afecten.

En primer lugar, los organismos internacionales y los convenios específicos, así como sus respectivos protocolos. Estos marcan las referencias y los estándares en la fabricación de los motores, limitando así sus emisiones, y también establecen compromisos con los países miembros para lograr unos objetivos de manera conjunta.

En segundo lugar, los organismos comunitarios ya sean organismos europeos, americanos o asiáticos. Estos organismos ratifican y certifican los estándares establecidos por los organismos internacionales, además, pueden ampliar y mejorar las normativas llegando a acuerdos a una escala más reducida.

5.1. Organismos internacionales y convenios

La Organización de Aviación Civil Internacional (OACI) es el organismo especializado en aviación de la ONU, que trabaja con todos los estados miembros y grupos de la industria para alcanzar consensos sobre las normas y métodos normativos (SARPs). Establecen los estándares de emisiones de los motores, cuyos fabricantes tienen que certificar que cumplen para ser introducidos en circulación.

Además, existe un Comité técnico de la OACI sobre la protección del medio ambiente y la aviación (originalmente llamado CAN, después CAEE y finalmente CAEP) que se encarga de determinar tanto la eficiencia como la confiabilidad de estos certificados. También desarrolla metodologías para controlar las emisiones de manera más efectiva o incluso programas internacionales y nacionales de investigación para establecer nuevos objetivos de emisiones.

Estas evaluaciones y propuestas se han ido desarrollando a raíz la creación de la OACI en 1944 y consisten en las siguientes:

- CAEE2: Es la primera edición del Anexo 16, Volumen II, que más tarde fue rebautizado como CAEP/1. Trata sobre el alcance sobre las emisiones producidas por aeronaves, realizado en 1981. Es el primer informe donde se señalaban los principales impactos medioambientales causados por la aviación y se establecían las primeras limitaciones a nivel internacional en cuanto a las emisiones como el NO_x, CO y el material particulado (PM).

- CAEP/2, CAEP/4, CAEP/6, CAEP/8: Estos cuatro estudios, realizados en los años 1992, 1998, 2004 y 2010 respectivamente, se encargan con el objetivo de reducir las emisiones de NO_x, por lo que en cada CAEP se establecen nuevas restricciones y obligaciones para reducir estos valores.
- CAEP/10: En 2016 se realiza la primera edición del Anexo 16, Volumen III. En este volumen se añaden las emisiones de CO₂ junto con los otros contaminantes ya tratados en el Volumen II, debido a la importancia creciente del problema con el cambio climático. Además, se introduce un nuevo estándar para limitar el material particulado.
- CAEP/11: En 2019 se realiza una nueva revisión de las emisiones de material particulado, pero en este caso tratando de controlar las dimensiones de estas partículas.

En lo que respecta a los convenios, el principal convenio que rige la aviación internacional se produjo en 1944, el mismo año de la creación de la OACI, y es conocido como el **Convenio de Chicago**. Actualizó las bases normativas sobre la aviación y estableció el derecho público internacional aeronáutico.

En 1979 se firmó el **Convenio de Ginebra sobre la Contaminación Transfronteriza de Larga Distancia**, con el objetivo principal de proteger el medio ambiente contra la contaminación atmosférica que puede afectar a varios países. Se establecieron ocho protocolos respecto los siguientes ámbitos:

- Financiación a largo plazo del programa de cooperación para la vigilancia continua y la evaluación del transporte a gran distancia de contaminantes atmosféricos en Europa (EMEP). Firmado en 1984. Entrada en vigor en 1988.
- Reducción de las emisiones de azufre al menos en un 30 %. Firmado en 1985. Entrada en vigor en 1987.
- Óxidos de nitrógeno. Firmado en 1988. Entrada en vigor en 1991.
- Compuestos orgánicos volátiles (COV). Firmado en 1991. Entrada en vigor en 1997.
- Reducción adicional de las emisiones de azufre. Firmado en 1994. Entrada en vigor en 1998.
- Contaminantes orgánicos persistentes (COP). Firmado en 1998. Entrada en vigor en 2003.
- Metales pesados. Firmado en 1998. Entrada en vigor en 2003.
- El **Protocolo de Gotemburgo** relativo a la reducción de la acidificación, de la eutrofización y del ozono en la troposfera. Firmado en 1999. Entrada en vigor en 2005.

Este último protocolo, tiene el fin de controlar y reducir las emisiones de NO_x, SO₂, NH₃ y COVNM, marcando unos valores límite para cada parte. Asimismo, en 2012 fue revisado y se establecieron nuevos compromisos de reducción, añadiendo también unos valores máximos para el material particulado menor a 2,5 micras (PM_{2,5}), incluido el hollín. En el caso de España, estos valores están recogidos en el BOE-A-2019-11459 y dichos compromisos quedan fijados a partir del año 2020.

Tabla 1. Límites máximos de emisiones y compromisos de reducción en España para los años posteriores a 2020 según el BOE-A-2019-11459 para el Protocolo de Gotemburgo.

Contaminante	Cantidad (Gigagramos)	Porcentaje variación respecto 2005
SO ₂	1282	- 67%
NO _x	1292	- 41%
COVNM	809	- 22%
NH ₃	365	- 3%
PM _{2,5}	93	- 15%

En 1992 fue adoptada la **Convención Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático** con el fin de estabilizar las concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera, de forma que no sean peligrosas para el sistema climático. A raíz de esta convención, se estableció el **Protocolo de Kioto** que fue aprobado en 1995, aunque no entró en vigor hasta el año 2005. En él se concretaron objetivos de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero en el conjunto de las partes un 5% respecto a los niveles de 1990, en un primer período de 2008 a 2012. Se dieron negociaciones con el objetivo de establecer un segundo período desde 2013 a 2020, pero finalmente no hubo una ratificación suficiente por las partes. No obstante, en 2013 la Unión Europea y otros 29 países se comprometieron a realizar nuevas reducciones de sus emisiones de gases de efecto invernadero.

En 2015 se produjo el **Acuerdo de París**, con el objetivo principal de mantener el aumento de la temperatura media mundial por debajo de 2°C con respecto niveles preindustriales, así como promover un desarrollo con bajas emisiones de efecto invernadero.

5.2. Organismos comunitarios

El principal organismo comunitario que afecta a nuestra área de estudio es la Agencia Estatal de Seguridad Aérea. Esta es responsable de certificar cualquier tipo de aprobación de aeronavegabilidad en lo que a diseños se refiere, así como supervisar el cumplimiento de las obligaciones de los estados miembros.

Por otro lado, la Comisión Europea junto con la Agencia Europea del Medio Ambiente, ratifica los compromisos acordados a nivel internacional y propone medidas más específicas para el conjunto de la Unión Europea.

En el caso del **Protocolo de Kioto**, en su primer período, la Comisión Europea acordó una reducción mayor a la propuesta por los organismos internacionales. Se comprometieron a una reducción del 8% en el conjunto de la Unión, repartiendo y estableciendo unos límites máximos nacionales de emisiones de gases invernadero. En el caso de España, este reparto les permitía aumentar estos límites en un 15% respecto el año 1990, mientras que otros países, como Alemania, se les asignó una reducción del 21%.

En lo que respecta al segundo período, que comprende entre 2013 y 2020, no hubo un consenso a nivel internacional. Sin embargo, la Unión Europea estableció un compromiso en el año 2008 para ese mismo período un Paquete de Energía y Cambio Climático, con el objetivo de reducir las emisiones respecto 1990 un 20% en el conjunto de la Unión siguiendo la **Directiva 2008/101/CE**.

En el ámbito exclusivamente de la aviación, el Parlamento Europeo incluyó las emisiones de CO₂ en el sistema de comercio de emisiones en el año 2012. Y, finalmente en el año 2014, mediante un nuevo reglamento (Reglamento (UE) N.º 421/2014) que modificaba la **Directiva 2003/87/CE**, se empezó a exigir estas obligaciones únicamente a los vuelos operados entre los países miembros de Espacio Económico Europeo. Esta directiva abarcó los años 2013-2016. En 2017 se amplió a un segundo período entre 2017-2020 a la espera de un plan internacional dirigido por la OACI de reducción y compensación de CO₂, llamado CORSIA diseñado a partir del año 2021.

6. Metodología

Con el objetivo de analizar cómo y dónde se producen estas emisiones, cuál ha sido su evolución y cómo ha ido variando a lo largo de los años, se ha decidido utilizar una base de datos de Centro Común de Investigación de la Comisión Europea, comúnmente conocido por sus siglas en inglés, JRC, que se refieren al Joint Research Center.

Esta base de datos se conoce como EDGAR, cuyas siglas se refieren a Emissions Database for Global Atmospheric Research. Dispone de información muy extensa que abarca desde 1970 hasta 2018 para las emisiones de CO₂. Para las emisiones de NO_x y SO₂, comprende desde 1970 hasta 2015. Además, incorpora multitud de información de otros muchos contaminantes, divida por sectores y por países. Dichas emisiones vienen referenciadas por puntos que sitúan por coordenadas en todo el planeta, con una precisión de 0,1 grados por latitud y longitud. También se realiza una división por fase de vuelo.

6.1. Área delimitada

El área seleccionada queda limitada por las siguientes coordenadas:

- Longitud: Desde los 0,3 grados hasta los 3,3 grados.
- Latitud: Desde los 40,5 grados hasta los 42,8 grados.

Estas limitaciones se han hecho en base a la superficie de Cataluña, además de una porción del mar Mediterráneo, tal y como se puede apreciar en la siguiente figura. El objetivo consiste en visualizar el impacto de rutas internacionales que cruzan por esa zona, además de incluir la principal área de entrada y salida del Aeropuerto de Barcelona - El Prat.

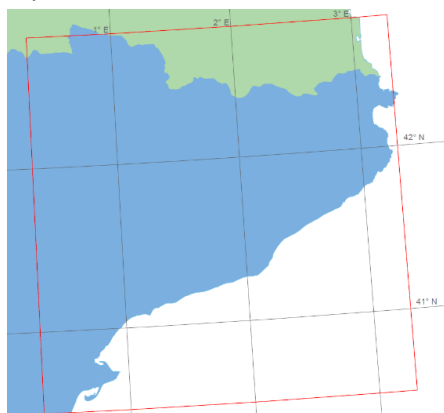


Figura 12. Área delimitada mediante una línea roja. Fuente: Elaboración propia

En cuanto a la altitud, siguiendo las indicaciones de la OACI (2015), se considera constante en la fase crucero, por lo que en cada trayecto se considerará la misma altura y la fase estará limitada tomando como referencia los primeros 100 km y los 100 km últimos antes de aterrizar. Como se puede observar en la siguiente figura, esta altitud queda totalmente definida y puede ser diferente de un vuelo a otro dependiendo del modelo y el peso, pero estas variaciones son reducidas y se toma como una única referencia a la hora de hacer su recuento.

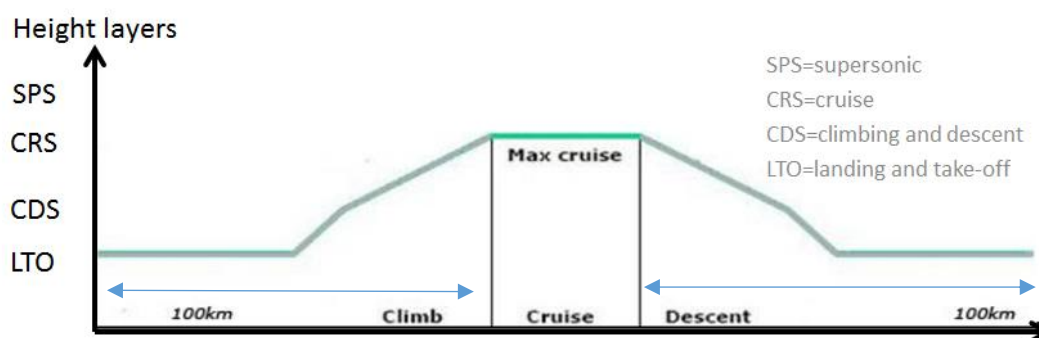


Figura 13. Representación de las diferentes fases de vuelo y sus límites. Fuente: Janssens-Maenhout, et al. (2019) pg.22

6.2. Aerovías y rutas de navegación aéreas

Con el objetivo de identificar las principales rutas que atraviesan el área de estudio, se ha utilizado la Carta de Radionavegación del Espacio Aéreo Superior de agosto de 2010, proporcionada por Aena. En ella se muestran las rutas a partir del nivel de vuelo FL245, es decir, a partir de 24500 pies de altitud, lo que equivale a 7467,6 km de altitud. Dicho plano se puede encontrar en el Anexo A.

Para simplificar y facilitar la visualización del plano, se ha extrapolado la información más relevante para el objetivo de este trabajo mediante el software AutoCAD, representando las rutas de navegación aéreas (RNAV). Estas RNAV permiten la circulación en ambos sentidos, respetando siempre una distancia vertical mínima de 1000 pies, es decir, 300 metros entre los niveles de vuelo de cada aeronave permitiendo así un mayor aprovechamiento del espacio aéreo. Esta nueva distancia fue implementada en España en el año 2002, gracias a la mejora de los sistemas de navegación, que previamente requería de una distancia mínima de 2000 pies.

Los sentidos de estas rutas vienen marcados por los niveles de vuelo, mientras que los impares (FL310, FL330, etc.) señalan que el avión viaja hacia el este, los niveles de vuelo pares (FL300, FL320, etc.) marcan que el avión viaja rumbo oeste. En cuanto a dos aeronaves que viajan en el mismo nivel, la OACI (2007) estipula la distancia mínima sobre una aeronave que precede a otra en 10 minutos, siempre que se pueda determinar frecuentemente la posición y la velocidad de dicha aeronave. En la siguiente figura se muestran dichas RNAV y los principales aeropuertos situados dentro del área delimitada.

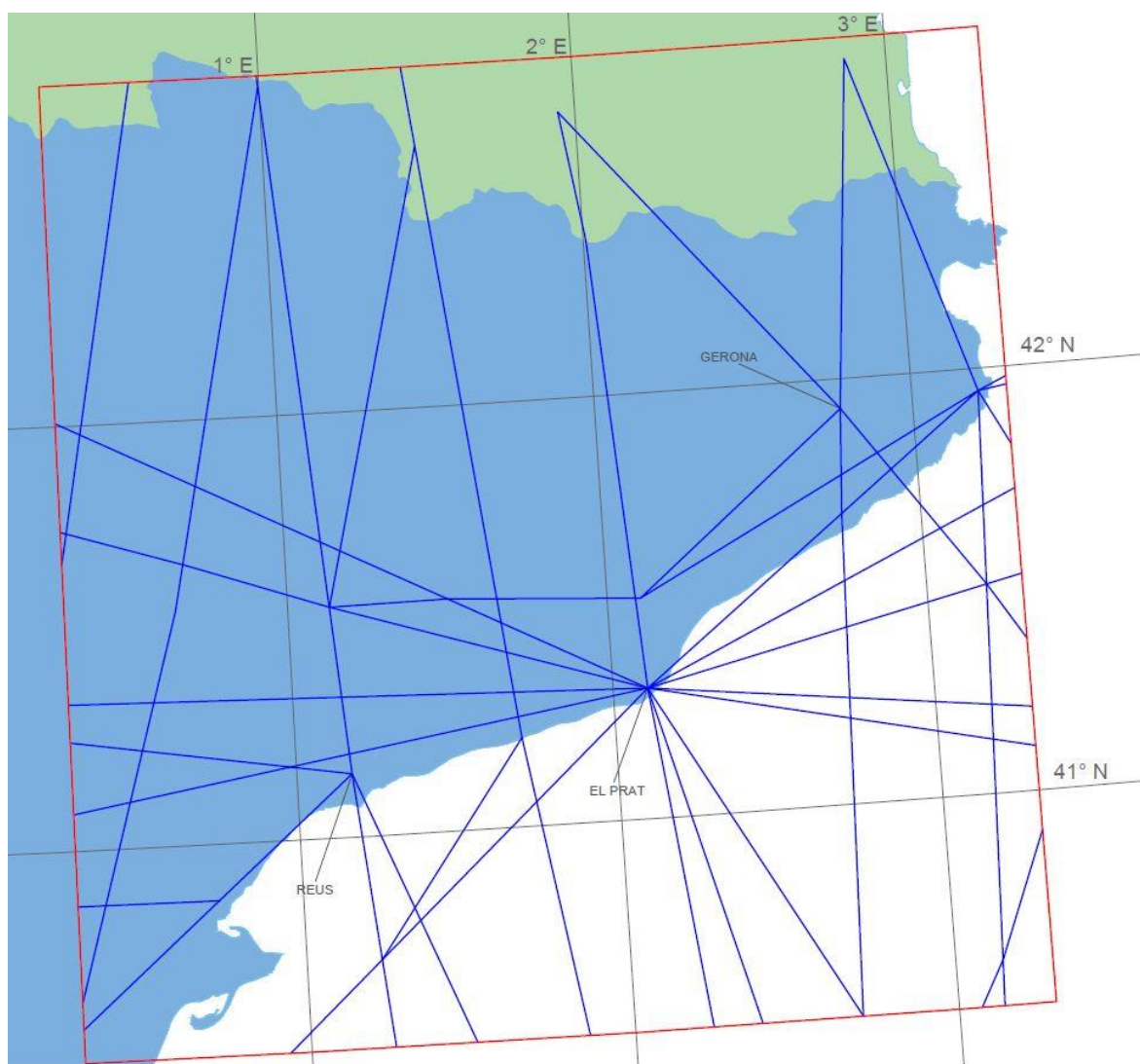


Figura 14. Representación de las RNAV (azul) y la ubicación de los principales aeropuertos en el área delimitada. Fuente: Elaboración propia

6.3. Método de obtención de datos

La OACI dispone de una base de datos donde registra cada vuelo que se ha producido: la compañía operadora, tipo de aeronave, la hora y el día de su despegue, el aeropuerto origen, el aeropuerto destino, la hora y el día en que aterriza. A partir de esta base de datos, cuyo acceso requiere de una suscripción anual, se obtiene toda la lista de vuelos que se producen en todo el mundo, por lo que es necesario convertir todos los vuelos a una misma franja horaria para poder organizarlos correctamente.

Estos datos no contienen información sobre la trayectoria por lo que, para su análisis se requiere crear una trayectoria a partir de los diferentes planes de vuelo ya establecidos para cada ruta y que cada compañía determina para cada tipo de aeronave. Estos datos se combinan con otras fuentes como los datos que proporcionan las ATC (Air Traffic Control), así como radares de vuelo, para obtener una trayectoria más precisa.

En el caso de no tener ninguna información sobre la trayectoria, se crea una artificialmente a partir de un software llamado CARAT (Computer Aided Route Allocation Tool), que determina el camino más corto entre los dos aeropuertos mediante las diferentes rutas globales. Una vez determinada la trayectoria, se clasifica cada fase de vuelo correspondiente según las directrices anteriormente mencionadas.

Después, se utilizan modelos matemáticos que representan cada tipo de avión con su correspondiente motor, los cuales vienen recogidos en el software PIANO (Project Interactive Analysis and Optimization), donde a partir de la trayectoria, se obtiene el combustible consumido por segundo en todas y cada una de las fases.

6.3.1. Cálculo de CO₂

Para el cálculo de las emisiones producidas de CO₂ se utiliza la referencia proporcionada por Rachner (1998), previamente mencionada, donde el Jet A-1 equivale a la fórmula C₁₂H₂₃ y 1 kg de este, completamente oxidado, produce 3156 gramos de CO₂ y 1237 gramos de H₂O.

Utilizando estos datos como base, se considera que se produce una oxidación total del CO₂ y se substraen la parte que se oxida parcialmente en forma de CO, teniendo en cuenta la diferencia de masa molar de ambos componentes (44g el CO₂ y 28g el CO). En cuanto a la parte no oxidada en forma de

hidrocarburos (incluidos dentro de los COVDM), debido al desconocimiento de la relación hidrogeno/carbono que se genera y a que en porcentaje representa menos del 1% en la oxidación, se desprecia del cálculo. Por lo tanto, resulta en la siguiente ecuación:

$$(30) \quad EICO_2 \left(\frac{g \text{ CO}_2}{kg \text{ Jet A-1}} \right) = EICO_{2,ideal} - \frac{44}{28} \cdot EICO$$

En el caso concreto del consumo de combustible en fase crucero, se considera que la eficiencia del motor es muy cercana al 100% y la parte no oxidada o parcialmente oxidada es negligible. Esta distinción cobra más importancia cuando se trata de la fase LTO, donde el motor trabaja con rendimientos inferiores, y se pueden obtener los parámetros a partir de las tablas que proporciona la OACI en su base de datos para ciclos LTO. Por lo tanto, la ecuación corregida para el cálculo de CO₂ en fase crucero sería la siguiente:

$$(31) \quad CO_2(g) = EICO_2 \cdot CC_{jetA-1} (kg) = 3156 \frac{g \text{ CO}_2}{kg \text{ Jet A-1}} \cdot CC_{jetA-1} (kg)$$

En dicha ecuación, a partir del índice de emisiones del CO₂ y multiplicándolo por el combustible consumido (CC_{jetA-1}), obtendremos la cantidad total, en gramos, que se produce de dióxido de carbono.

6.3.2. Cálculo de NO_x

El cálculo del óxido de nitrógeno añade un componente de complejidad en comparación con el CO₂, ya que este proceso depende la temperatura y de la presión del motor, y dichos datos no son públicos. Por lo tanto, existen diferentes metodologías para estimar este valor de una manera precisa.

No obstante, todas ellas se basan en el mismo principio, que consiste en transformar el valor de combustible consumido por segundo obtenido a través de PIANO. Seguidamente, se referencia mediante cuatro valores certificados en diferentes puntos de funcionamiento, que proporciona la OACI, que están establecidos a una altitud respecto el nivel del mar (SLS) y en unas condiciones de presión específicas (ISA). A partir de dichos valores, se establece una curva que permite establecer una referencia y gracias a ello, obtener un valor del índice de emisiones del NO_x para cualquier tipo de presión y de temperatura.

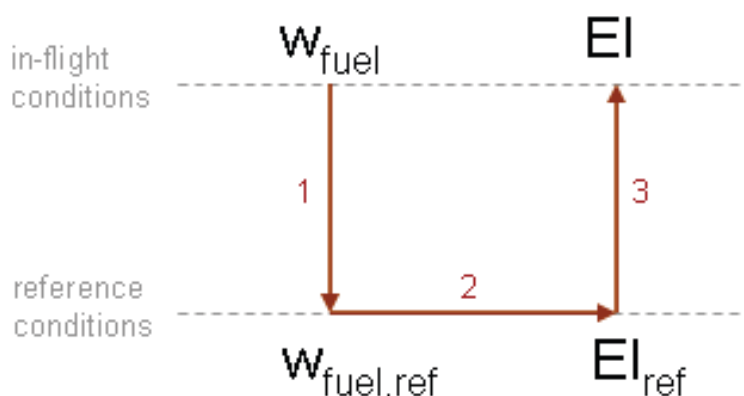


Figura 15. Principio del método de flujo de combustible. Fuente: Schaefer, M., Bartosch, S. (2013) pg.5

El método utilizado en esta base de datos es conocido como DLR (que corresponden a las siglas del Centro Aeroespacial Alemán) y consiste en referenciar del valor obtenido w_{fuel} en kg/s a partir de los valores estandarizados ISA (International Standard Atmosphere), donde se obtienen los valores de presión y temperatura según la altitud de la aeronave, cuya tabla se adjunta en el Anexo B Anexo B. Para ello, se utilizan las siguientes ecuaciones, siendo $T_{t,1}$ y $p_{t,1}$ los valores obtenidos en dicha tabla para la altitud en la que se encuentra cada aeronave:

$$(32) \quad T_{3,corr} = \frac{T_3}{\theta_{total}} \quad \text{donde} \quad \theta_{total} = \frac{T_{t,1}}{288,15 \text{ K}}$$

$$(33) \quad P_{3,corr} = \frac{p_3}{\delta_{total}} \quad \text{donde} \quad \delta_{total} = \frac{p_{t,1}}{101,325 \text{ kPa}}$$

Debido al desconocimiento de los valores p_3 y T_3 , este método establece una relación a través de referenciar el flujo de combustible respecto a los que proporciona la OACI en cuatro puntos de funcionamiento en la fase LTO en diferentes porcentajes de aceleración del motor (en concreto, 7%, 30%, 85% y 100%). De esta manera se podrá representar la curva referenciada para obtener los valores reales del índice de emisión. A partir de θ_{total} y de δ_{total} , que corresponden a los valores referidos de temperatura y presión, se obtiene el valor de flujo de combustible referenciado mediante la siguiente ecuación:

$$(34) \quad w_{ref,fuel} = \frac{W_{fuel}}{\delta_{total} \cdot \sqrt{\theta_{total}}}$$

La fórmula original para el cálculo del índice de emisión del óxido de nitrógeno viene dada por Sullivan (1975) y es la siguiente:

$$(35) \quad EINO_x = const \cdot p_3^a \cdot e^{b \cdot T_3}$$

Para evitar utilizar p_3 y T_3 , debido a su desconocimiento, se utiliza una simplificación, que asume que la eficiencia del compresor politrópico y la eficiencia de la combustión es constante, esto permite eliminar el término T_3 en el exponente, resultando la siguiente ecuación:

$$(36) \quad EINO_x = const \cdot p_3^a \cdot T_3^b$$

Después, se combina con las ecuaciones anteriormente mencionadas para p_3 y T_3 y se establece la siguiente relación:

$$(37) \quad \frac{EINO_x}{EINO_{x,corr}} = \frac{EINO_x}{EINO_{x,ref}} = \delta_t^a \cdot \theta_t^b$$

Esta relación es válida ya que para los valores ISA y SLS, los coeficientes δ_t y θ_t son igual a 1, por lo que la relación se cumple siempre y cuando los valores estén referenciados sobre los parámetros certificados de la OACI. En cuanto a los exponentes, un estudio de Bahr (1991) determina que el exponente de la presión a es 0,4 y que el exponente de la temperatura b más adecuado es 3, quedando así totalmente definida la ecuación.

Por lo tanto, el índice de emisión se puede calcular mediante la siguiente ecuación:

$$(38) \quad EINO_x = EINO_{x,ref} \cdot \delta_t^{0,4} \cdot \theta_t^3 = EINO_{x,ref} \cdot \left(\frac{p_{t,1}}{101,325 \text{ kPa}}\right)^{0,4} \cdot \left(\frac{T_{t,1}}{288,15 \text{ K}}\right)^3$$

Este método queda validado, ya que cuando se representa cualquier valor, sin importar las condiciones ni de presión ni de temperatura, y se corrigen respecto el valor de referencia, todos los puntos se alinean y siguen la misma curva parabólica. En la figura 16, se pueden observar diferentes valores obtenidos mediante experimentos del DLR, y como, en la figura 17, quedan todos ordenados siguiendo la curva parabólica gracias a la corrección.

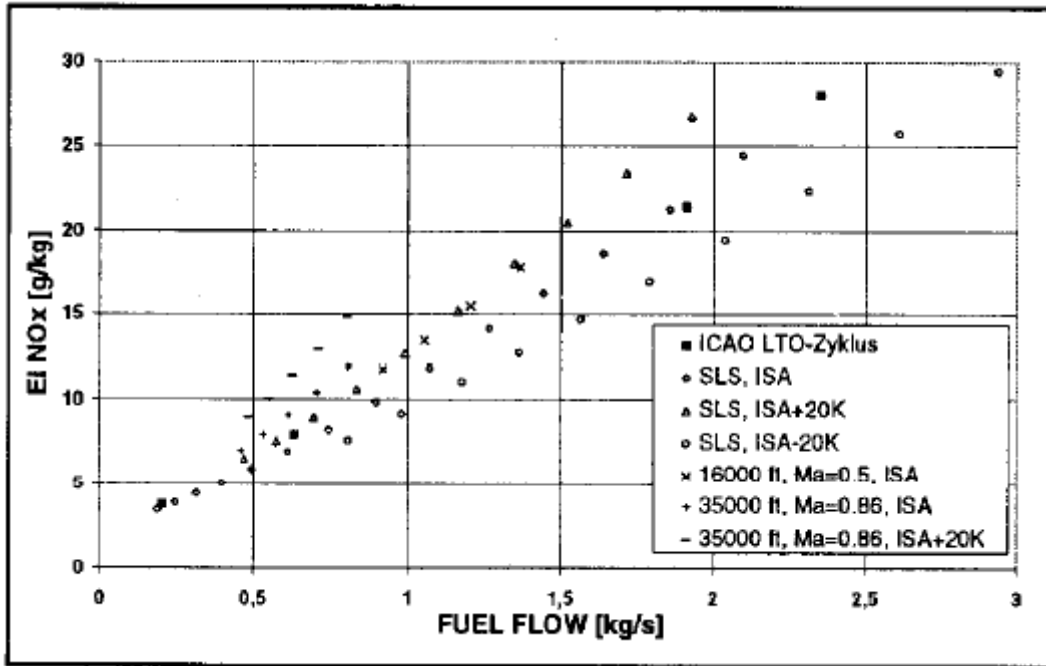


Figura 16. $EINO_{x,ref}$ vs. $W_{fuel,ref}$ para el motor CF6-80C2B1F. Fuente: Doppelheuer, A., y M Lecht. (1998) pg.4

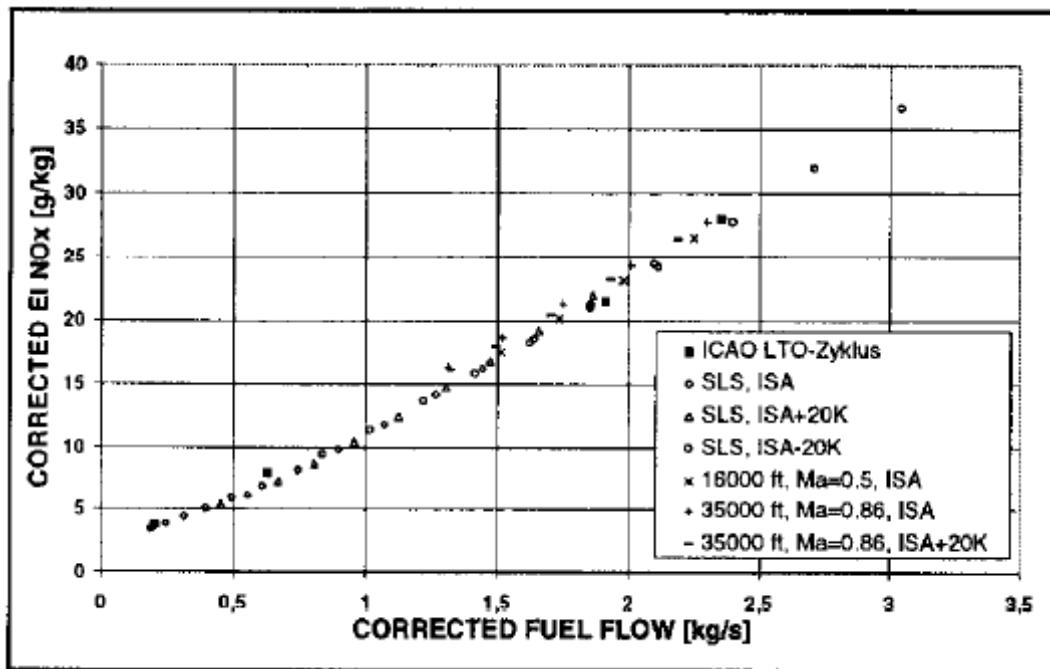


Figura 17. Valores corregidos del índice de emisión vs flujo de combustible para el motor CF6-80C2B1F. Fuente: Doppelheuer, A., and M Lecht. (1998) pg.4

6.3.3. Cálculo de SO₂

El cálculo del dióxido de azufre depende directamente del porcentaje de azufre que contenga el combustible utilizado, por lo que no tiene un valor fijo y el único requisito exigido a las refinerías es que no excedan un 0,3% en masa del total del combustible. Según el IPCC (1999), la mayoría de combustibles no exceden el 0,1% en masa, tal y como han demostrado a partir de estudios, que muestran las tendencias desde 1986.

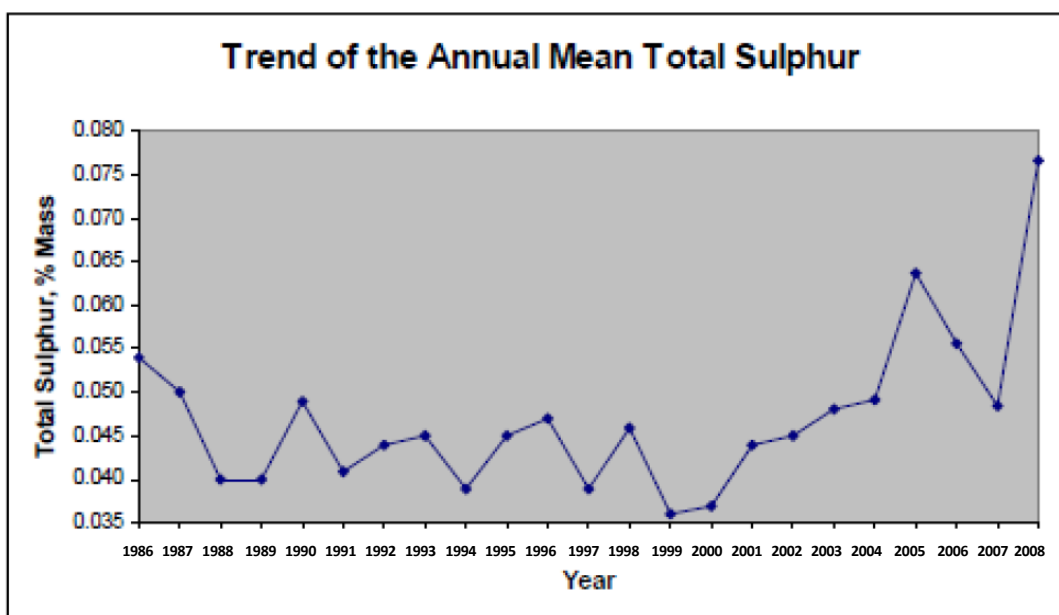


Figura 18. Evolución del contenido de sulfuro en combustible para aviones en Reino Unido desde 1986 hasta 2008.
Fuente: Miller, Mike et al. (2009) pg.40

Debido a la imposibilidad de calcular de manera precisa el porcentaje de azufre utilizado en cada vuelo, Schumann (2002) señala un intervalo de índice de emisión entre 0,6 y 1 g SO₂ / kg combustible. Se determina también que el índice de emisión a utilizar será de 0,8 g SO₂ / kg combustible, reconociendo que la metodología no es tan precisa como para otros contaminantes. Aun así, es un valor ampliamente aceptado y que utilizan también la mayoría de inventarios globales.

6.4. Incertidumbres en la metodología

Una de las principales incertidumbres es el efecto del viento, ya que altera la velocidad relativa respecto al suelo y altera la distancia real recorrida, ya sea haciendo el trayecto más largo o más corto. Este efecto viene parcialmente incluido en la base de datos ya que en los vuelos donde existe información del radar ya queda reflejado en el tiempo de vuelo, mientras que en las trayectorias modeladas esto no ocurre. Se estima que de media esta diferencia significa un incremento del 1,5%.

Otro factor de incertidumbre es la modelización de la atmósfera en el uso de la ISA como modelo matemático, ya que la temperatura de entrada al motor afecta el rendimiento del mismo, y la variación media de la temperatura diaria puede tener pequeñas desviaciones. En conjunto, se considera que la desviación del combustible quemado debido al rendimiento del motor es inferior al 1%.

También genera incertidumbre que un avión lleve más combustible del necesario para no tener que repostar en el destino, principalmente por motivos económicos. Esto genera un aumento en el peso y su consecuente incremento en el consumo del combustible. Según el IPPC (1999), este exceso de combustible genera un 0,5% más de consumo, pero debido a la falta de información en el peso total del avión en el despegue no se puede tener en cuenta este factor.

En lo que respecta a las incertidumbres generadas por el cálculo de las emisiones, se ha comparado la metodología utilizada para el cálculo del NO_x con otras que disponían de información más concreta respecto la relación de presión y temperatura (metodología p3-T3) y se observa una desviación máxima de un 5%. Además, tal y como se ha mencionado en el apartado de cálculo de emisiones de SO₂, el valor de índice de emisión proporcionado incorpora una incertidumbre, debido a la dificultad a la hora de determinar un valor concreto de porcentaje de masa del azufre en cada vuelo.

En cuanto a incertidumbres generadas por falta de información, en esta base de datos no se incluyen vuelos que sigan normas VFR, es decir, Reglas de Vuelo Visual que no requieren de plan de vuelo y no siguen las rutas marcadas en las Reglas de Vuelo Instrumentales (IFR).

7. Análisis

En este apartado se van a analizar los resultados obtenidos para cada tipo de emisión. En primer lugar, mediante la representación de un mapa de calor para identificar las zonas con mayor afectación y luego a través de la representación de la serie temporal de dichas zonas.

7.1. CO₂

7.1.1. Mapas de calor

A partir de la base de datos, se han recreado los mapas de calor mediante MATLAB para entender la afectación en el área delimitada. Para representar dichos mapas se ha utilizado la metodología de interpolación *biharmornic spline*, que consiste en una combinación lineal de funciones de Green centradas en cada uno de los puntos de la base datos y que se resuelve mediante un sistema lineal de ecuaciones. Esta metodología es especialmente útil en este caso, ya que está pensada para analizar datos no uniformes y permite una visión más fidedigna de los resultados separando claramente unas zonas de otras. En los mapas se puede observar que, pese a la variación de los valores en las distintas zonas, hay dos áreas donde la afectación es mayor en comparación con el resto tal y como se puede ver en las siguientes figuras.

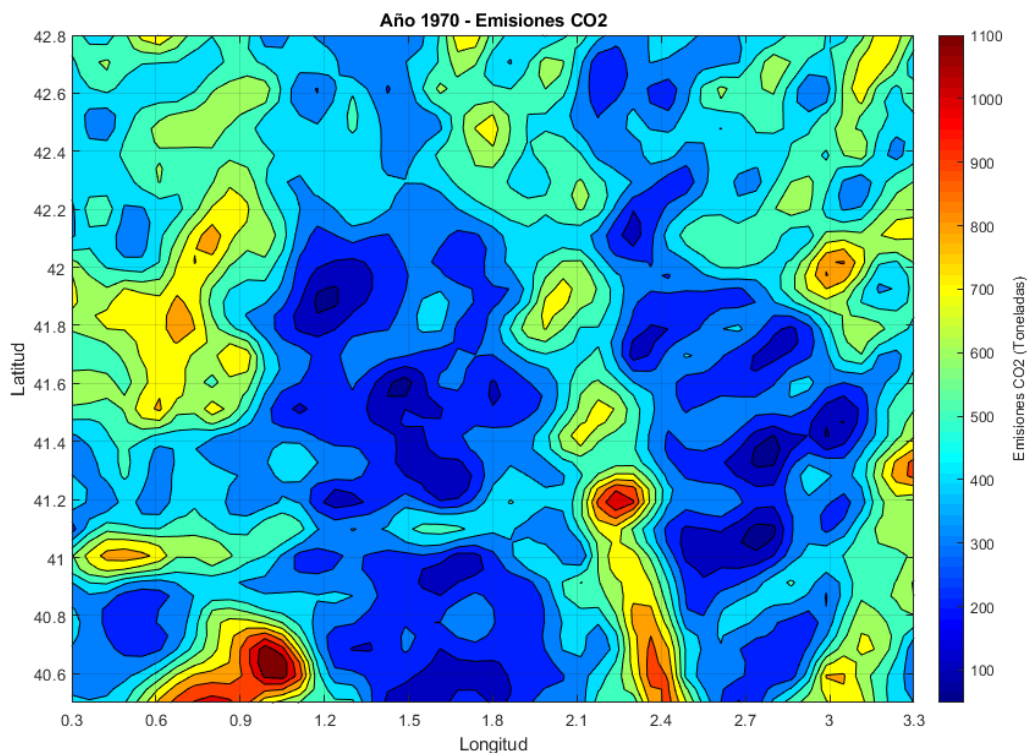


Figura 19. Mapa de calor del CO₂ para el año 1970. Fuente: Elaboración propia.

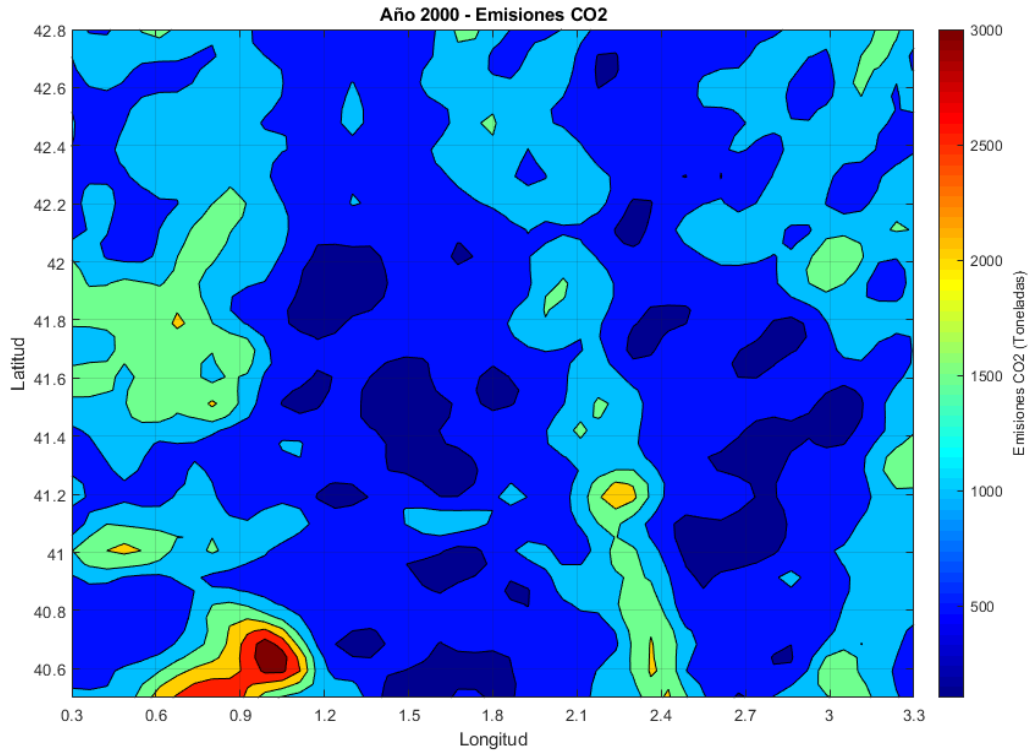


Figura 20. Mapa de calor del CO2 para el año 2000. Fuente: Elaboración propia.

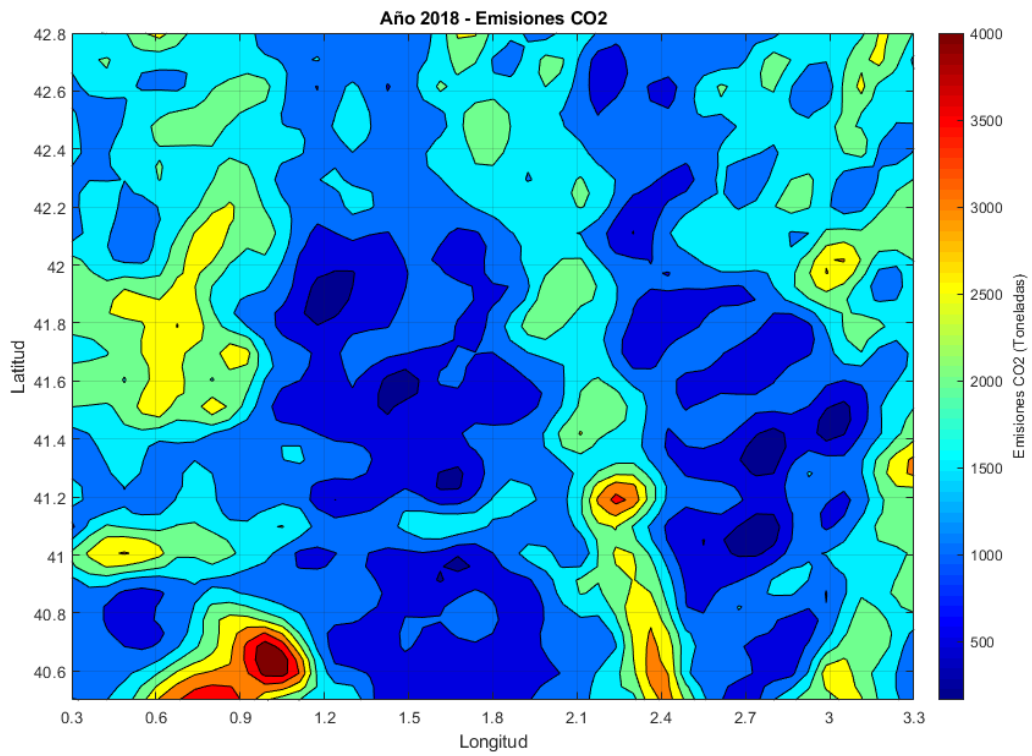


Figura 21. Mapa de calor del CO2 para el año 2018. Fuente: Elaboración propia.

Estas dos áreas corresponden a los siguientes puntos:

- Zona 1:
 - Latitud: 40,6 grados
 - Longitud: 1 grado
- Zona 2:
 - Latitud: 41,2 grados
 - Longitud: 2,2 grados

Si situamos estas zonas en el mapa con las rutas, la zona 1 (color verde) queda ubicada al este del Delta del Ebro, mientras que la zona 2 (color naranja) queda situada en las cercanías del Aeropuerto de Barcelona - El Prat.

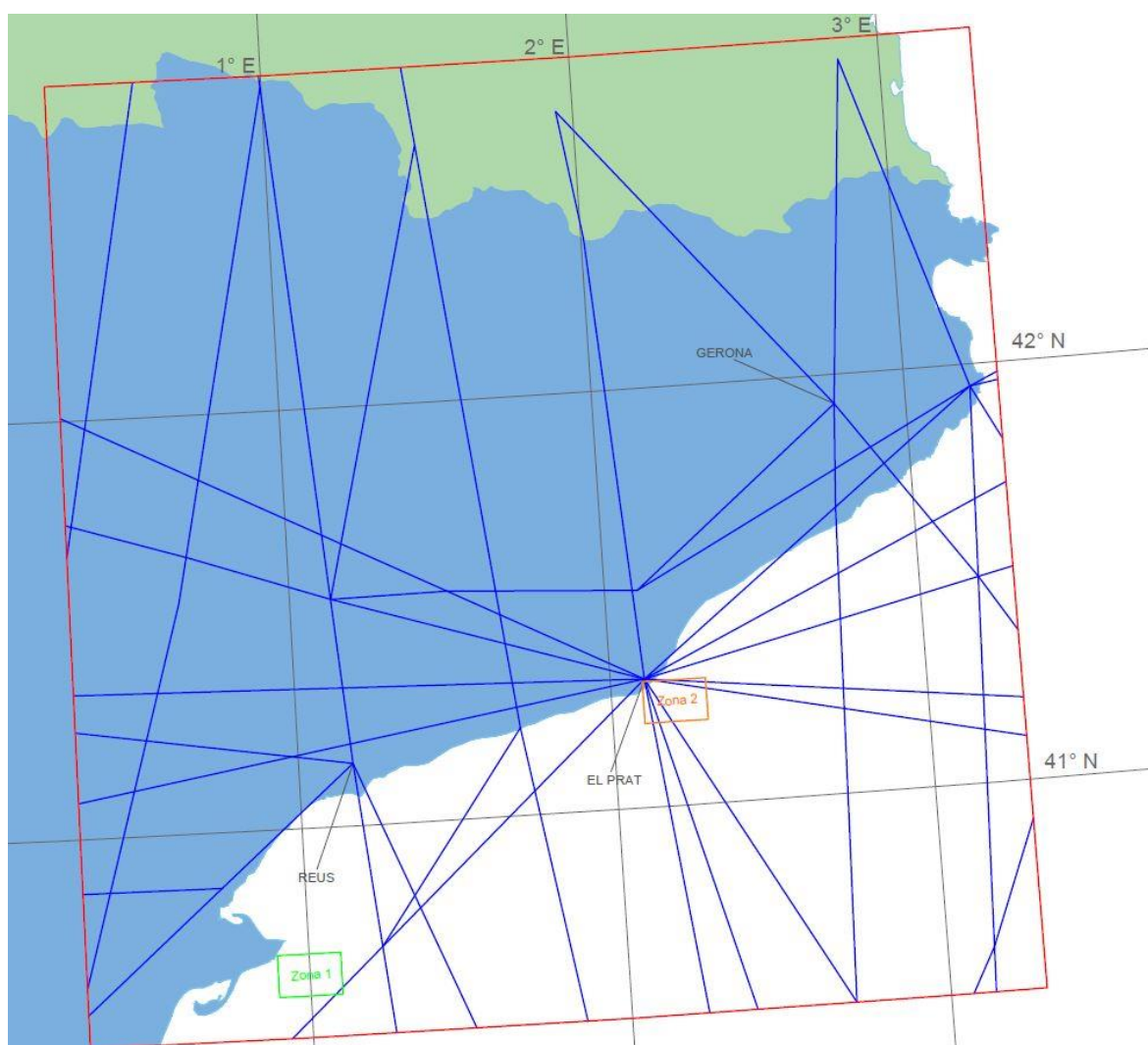


Figura 22. Zonas con mayor impacto en el área delimitada. Fuente: Elaboración propia.

7.1.2. Evolución

Representando la serie temporal para cada una de las zonas, se obtiene la siguiente figura.

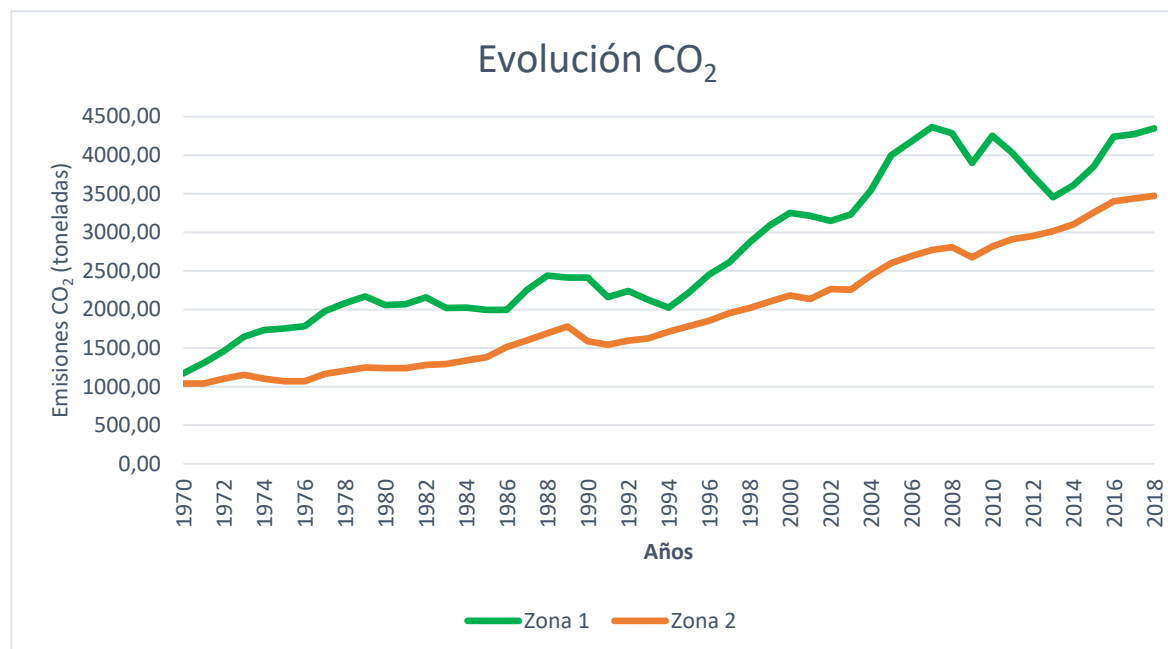


Figura 23. Serie temporal de la evolución de las emisiones de CO₂ en las dos zonas seleccionadas. Fuente: Elaboración propia.

Se puede observar de manera clara que la tendencia de las emisiones de dióxido de carbono en ambas zonas es ascendente, que coincide con el aumento del tránsito aéreo en los últimos años. Esta tendencia también nos indica como, a pesar de las mejoras en el rendimiento de los aviones más modernos para consumir menos combustible, estas son totalmente insuficientes y avanzan a un ritmo mucho más lento en comparación con el aumento de las operaciones aéreas. Por el contrario, sorprende que la zona 1 pueda tener más tráfico y, por lo tanto, más emisiones que la zona 2 que está situada muy cercana al principal aeropuerto de Cataluña.

Para entender el flujo real en estas dos zonas seleccionadas, se han analizado todas las rutas que atraviesan cada una de las zonas para conocer la procedencia de estos trayectos y poder caracterizar las áreas. Esto se ha hecho mediante el uso del software *Airline Route Mapper*, que permite observar las trayectorias de estas rutas y que, pese a que luego pueda haber pequeñas variaciones en dichas rutas, ayuda a tener una imagen cualitativa del tráfico.

En la primera zona se observan un total de 63 rutas, que permiten un total de 126 trayectos diferentes, ya que existen los dos sentidos en dichas rutas. En ellas, la mayoría de trayectos se producen entre

ciudades europeas, siendo así hasta en un 68% de los trayectos, mientras que la segunda combinación se produce entre Europa y el continente africano. También se producen rutas entre otros continentes, pero son una clara minoría, tal y como se puede ver en la siguiente figura.

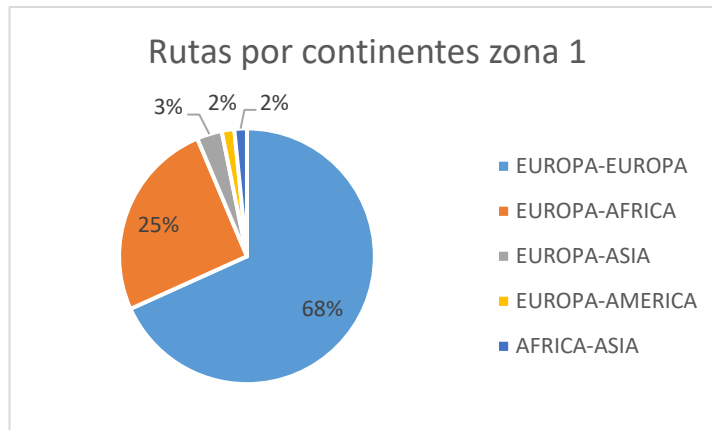


Figura 24. Porcentaje rutas por continentes producidas en la zona 1. Fuente: Elaboración propia.

Entrando un poco más en detalle, se puede observar como hasta el 70% del total de las rutas se producen de manera exclusiva en el ámbito internacional, es decir, pese a que el avión tenga procedencia Española, finaliza su trayecto fuera del estado español. Dichos trayectos se caracterizan por recorrer una distancia media de 1900 km, siendo mayoritarios los vuelos que superan los 1000 km de distancia, y que por lo tanto, convierte a esta zona en un punto de paso de un buen número de rutas aéreas.

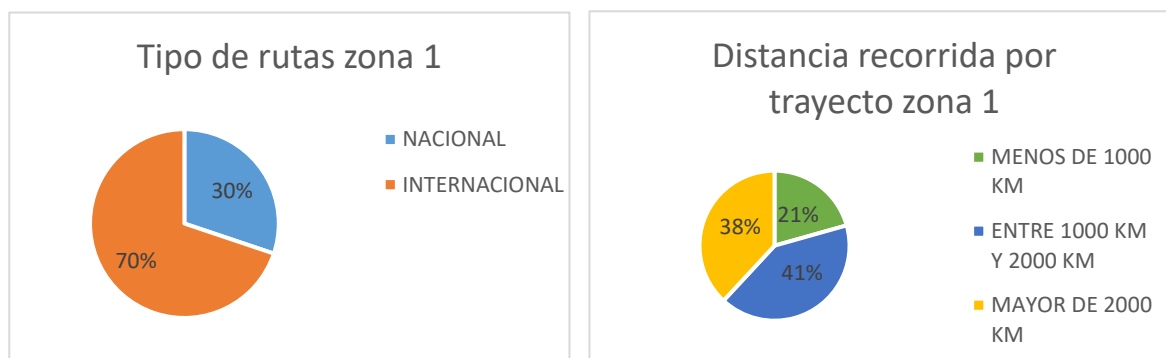


Figura 25. Distribución del tipo de rutas y distancia recorrida en la zona 1. Fuente: Elaboración propia.

En lo que respecta a la zona 2, se observan un total de 92 rutas, lo que resulta en 184 trayectos en ambos sentidos. Más del 60% del total de rutas, se producen exclusivamente en el ámbito europeo, seguidas de las rutas que unen Europa con el continente africano y con el asiático.

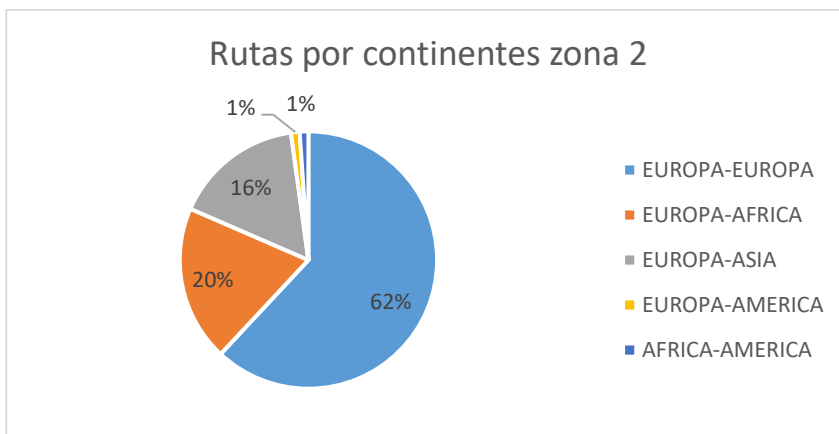


Figura 26. Porcentaje rutas por continentes producidas en la zona 2. Fuente: Elaboración propia.

De nuevo, entrando en detalle en el tipo de rutas que se producen, se observa una clara mayoría de las rutas internacionales respecto las nacionales. En esta zona un 93,5% pertenece a rutas internacionales, mientras que las nacionales solo ocupan un 6,5%, quedando de uso exclusivo para los trayectos entre Barcelona con el aeropuerto de Palma de Mallorca y Mahón.

Un dato a recalcar, es la importancia del Aeropuerto de Barcelona el Prat, que involucra al 46,5% de las rutas que atraviesan esa zona en el ámbito internacional (y un 100% de las nacionales). La mayor parte de los trayectos en esta zona pertenecen a la fase de ascenso/descenso de la aeronave, encontrándose dentro de los últimos o primeros 100 km del trayecto. Como consecuencia, las emisiones de CO₂ son menores que en la zona 1, pese a tener un número mayor de rutas atravesando la zona, ya que una parte importante de los aviones no se sitúan en la fase de crucero.

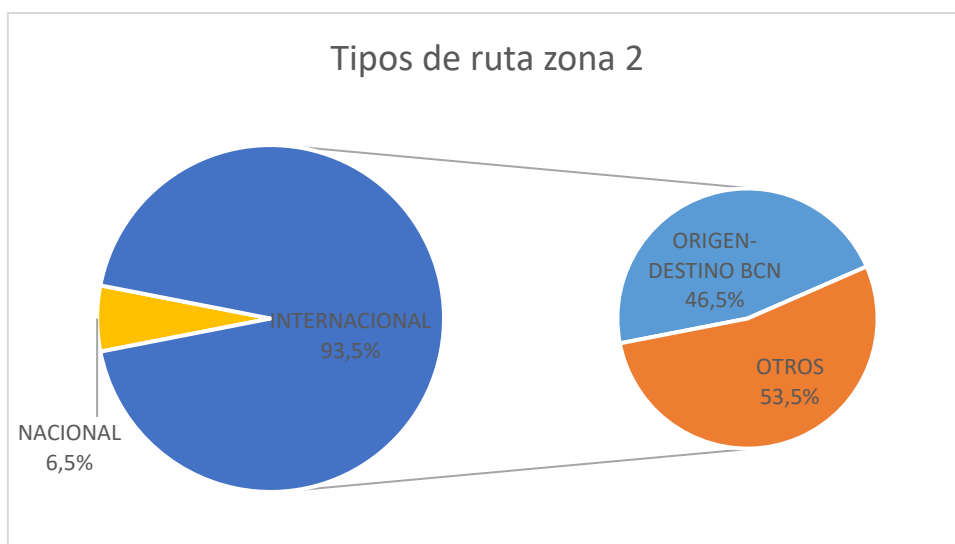


Figura 27. Distribución del tipo de rutas en la zona 2. Fuente: Elaboración propia.

7.1.3. Afectación por agentes externos

En la Figura 23 donde se muestra la evolución de la serie temporal del dióxido de carbono en ambas zonas, a pesar de la clara tendencia ascendente se observan varios períodos donde se produce un descenso anómalo que rompe con lo esperado. Principalmente, estas situaciones vienen dadas por eventos que se producen a nivel mundial, como, por ejemplo: crisis producidas por el petróleo, guerras, atentados o crisis sanitarias. En la siguiente figura se sitúan algunos de los eventos más importantes en la serie temporal para ver su afectación real.

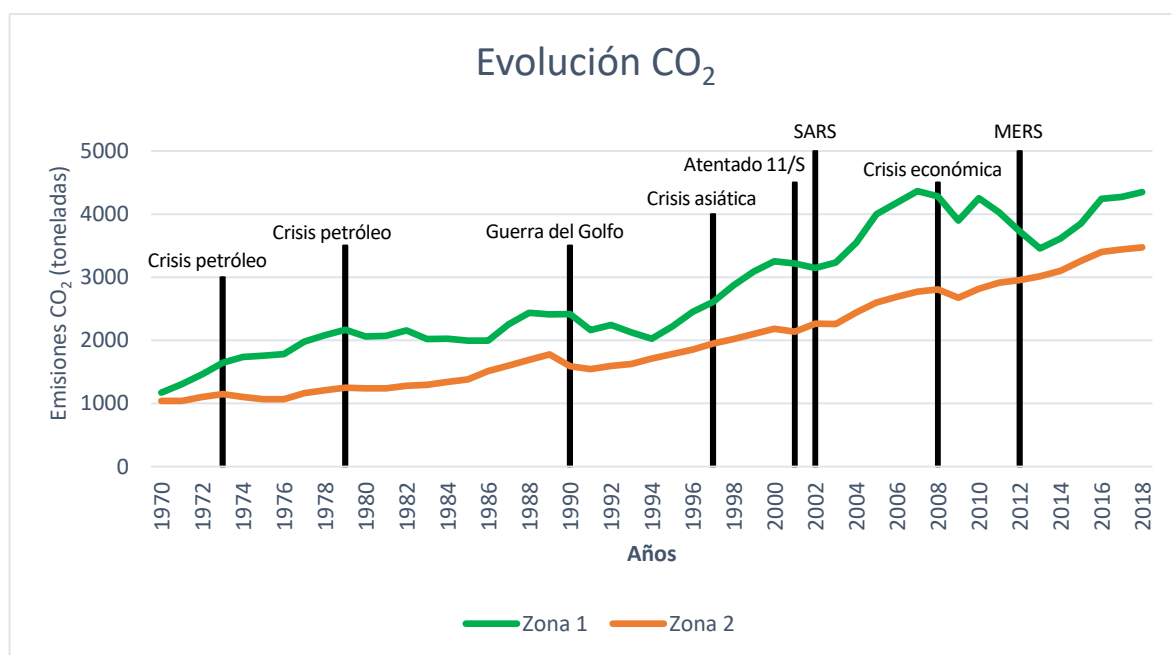


Figura 28. Serie temporal de la evolución de las emisiones de CO₂ en las dos zonas seleccionadas y con marcadores temporales. Fuente: Elaboración propia.

A partir de los diferentes eventos producidos en la escala temporal, se observa como la mayoría de crisis producidas no tienen un impacto relevante ya que no afectan al tráfico aéreo. Esto es debido a que se producen lejos de las zonas estudiadas, como la crisis asiática o la proliferación de enfermedades como el SARS o el MERS. Por otro lado, se aprecia una reducción clara a partir de otros eventos que sí afectan el tráfico aéreo como la Guerra del Golfo, el atentado del 11/S producido en World Trade Center y la crisis económica producida en 2008.

También es importante recalcar que, a pesar de estas reducciones causadas por eventos externos a la aviación, también influyen otros factores como puede ser la variación en la demanda del turismo en los diferentes países. Aun así, la tendencia ha seguido la misma línea ascendente y cuando ha habido una crisis, se ha recuperado en un máximo de 3 años.

No obstante, desde el año 2016 parece que esta tendencia podría estar perdiendo fuerza. Principalmente gracias a la colaboración de toda la comunidad internacional y europea en su lucha por el cambio climático. La implementación del CAEP/10 aplica restricciones más severas a las emisiones de CO₂, mediante el uso de tecnología y mejorando los protocolos operacionales que, sumados al proyecto CORSIA (se empezará a implementar en 2021), previsiblemente ayudarán a estabilizar esta tendencia para que no siga aumentando.

7.2. NO_x

7.2.1. Mapas de calor

De la misma manera que para el dióxido de carbono, para representar dichos mapas, se ha utilizado la metodología de interpolación *biharmónica spline* que consiste en una combinación lineal de funciones de Green centradas en cada uno de los puntos de la base datos y que se resuelve mediante un sistema lineal de ecuaciones. Esta metodología es especialmente útil en este caso, ya que está pensada para analizar datos no uniformes y permite una visión más fidedigna de los resultados separando claramente unas zonas de otras. En los mapas se puede observar que, pese a la variación de los valores en las distintas zonas, hay dos áreas donde la afectación es mayor en comparación con el resto, tal y como se puede ver en las siguientes figuras, que corresponden a las mismas zonas que en el análisis del CO₂.

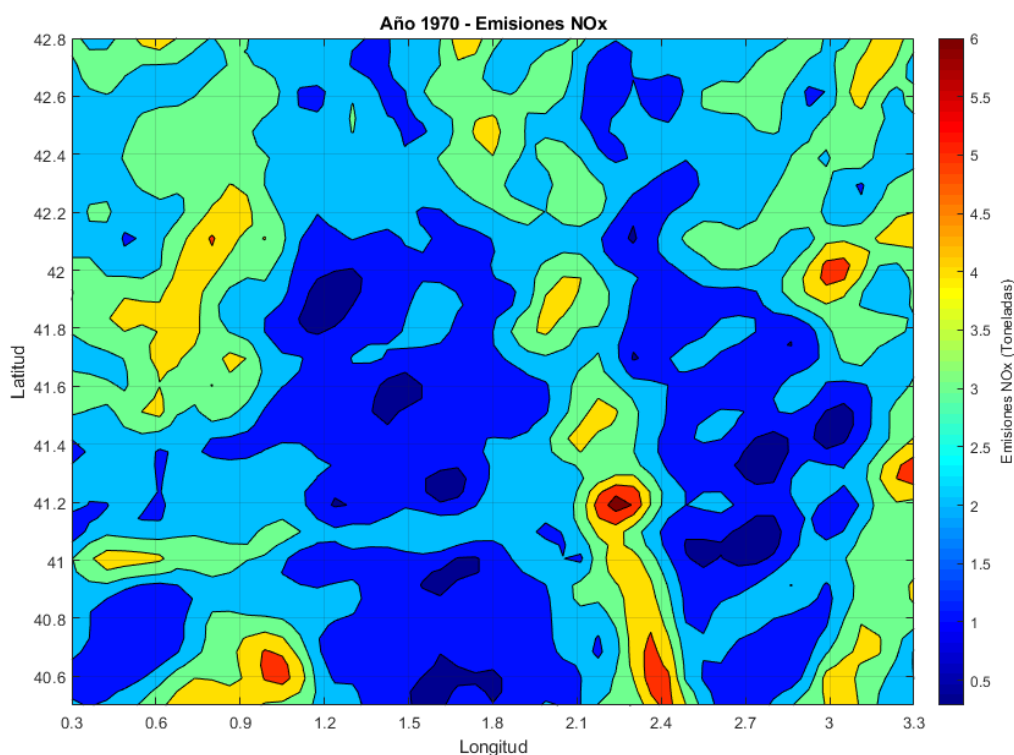


Figura 29. Mapa de calor del NO_x para el año 1970. Fuente: Elaboración propia.

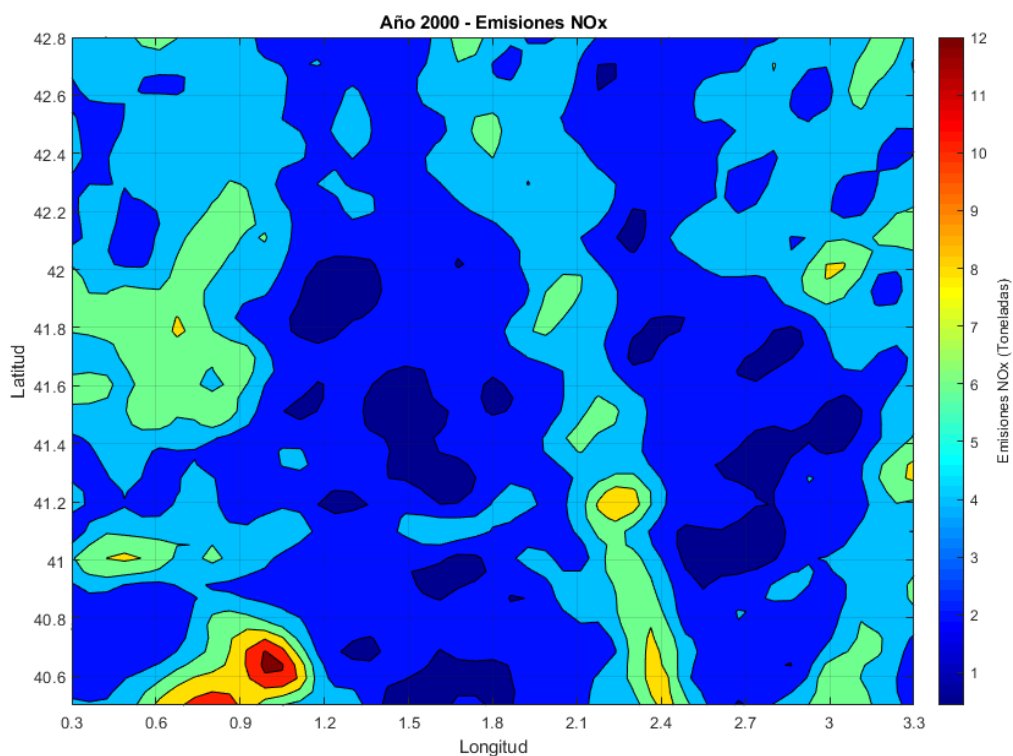


Figura 30. Mapa de calor del NO_x para el año 2000. Fuente: Elaboración propia.

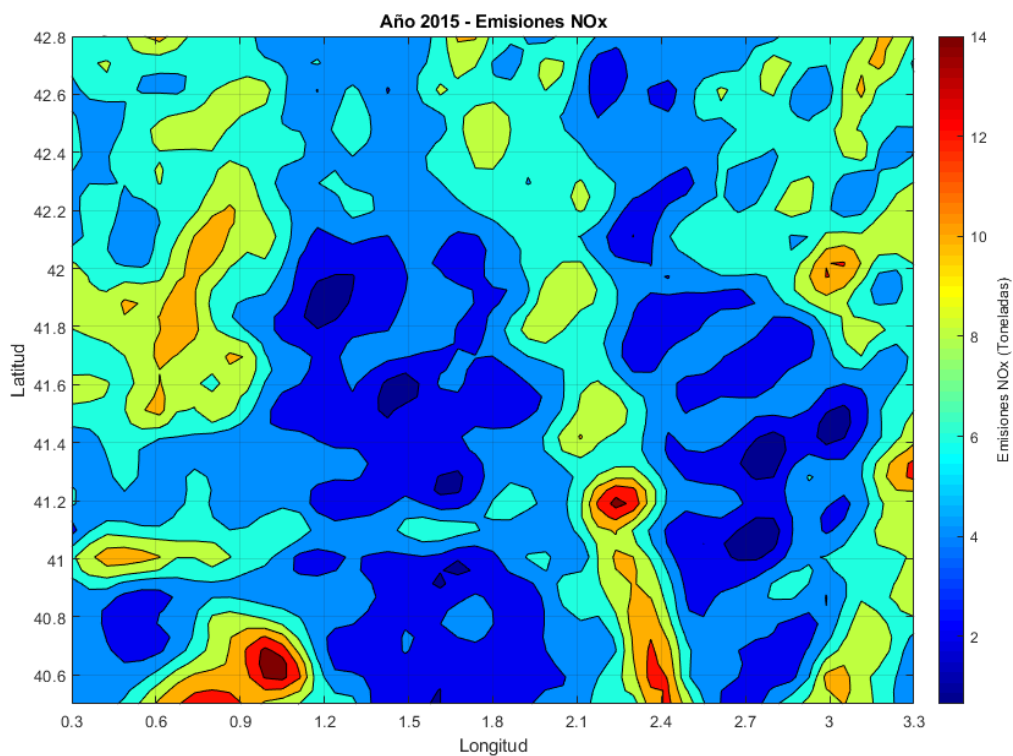


Figura 31. Mapa de calor del NO_x para el año 2015. Fuente: Elaboración propia.

Estas dos áreas corresponden a los siguientes puntos:

- Zona 1:
 - Latitud: 40,6 grados
 - Longitud: 1 grado
- Zona 2:
 - Latitud: 41,2 grados
 - Longitud: 2,2 grados

Si situamos estas zonas en el mapa con las rutas, la zona 1 (color verde) queda ubicada al este del Delta del Ebro, mientras que la zona 2 (color naranja) queda situada en las cercanías del Aeropuerto de Barcelona - El Prat.

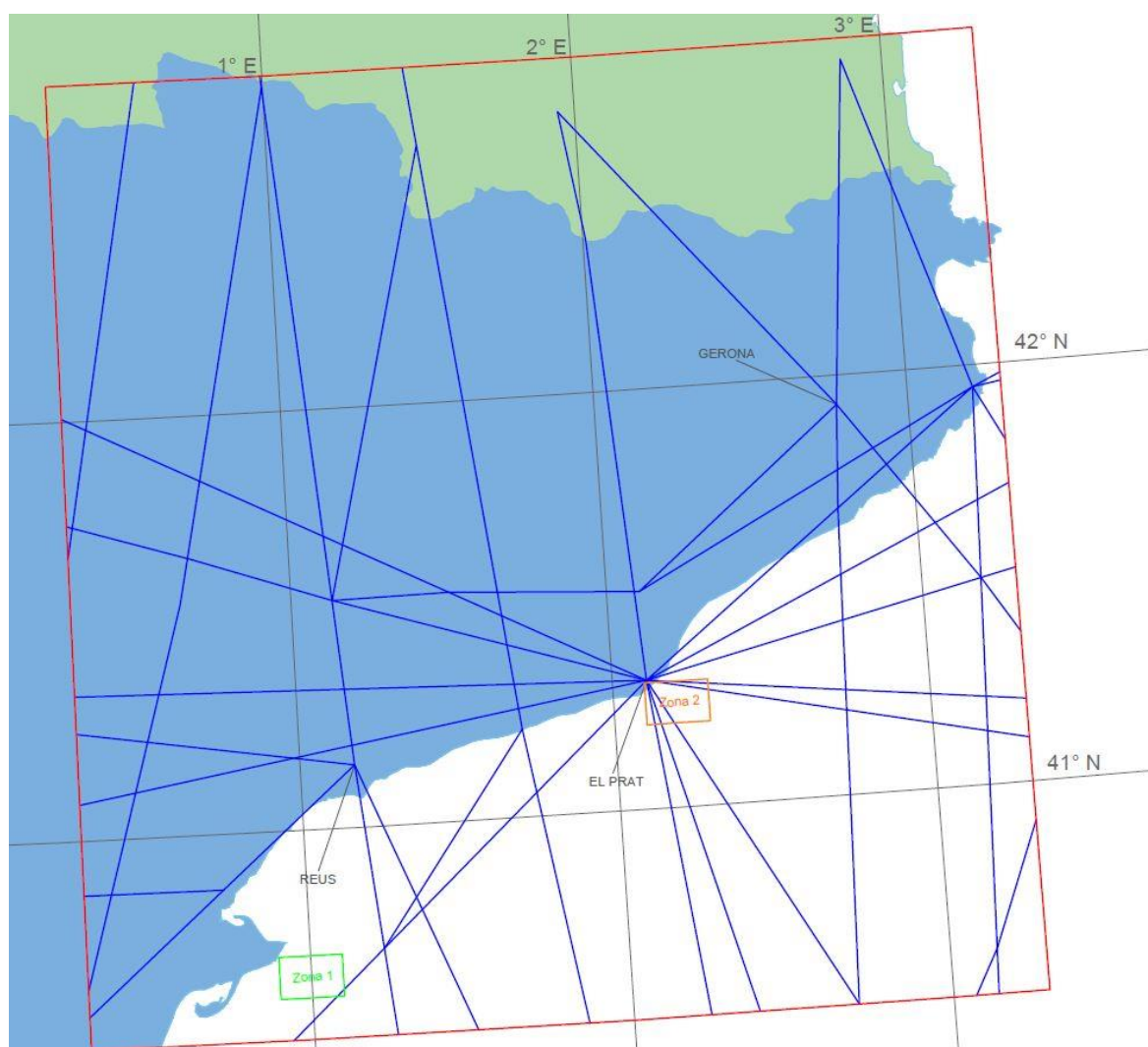


Figura 32. Zonas con mayor impacto en el área delimitada. Fuente: Elaboración propia.

7.2.2. Evolución

Representando la serie temporal para cada una de las zonas, se obtiene la siguiente figura.

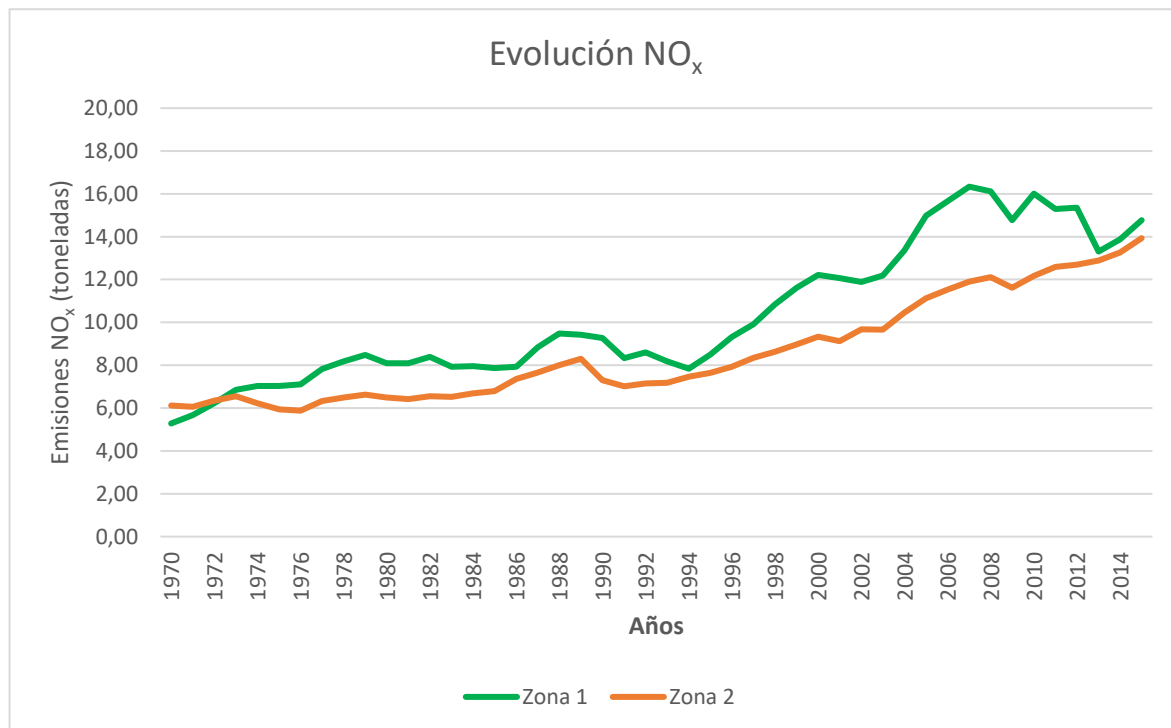


Figura 33. Serie temporal de la evolución de las emisiones de NO_x en las dos zonas seleccionadas. Fuente: Elaboración propia.

De la misma manera que en la serie temporal del dióxido de carbono, se aprecia una clara tendencia ascendente de las emisiones de óxido de nitrógeno. A pesar de no ser tan pronunciada como en el anterior componente, ya que no llega a triplicar el total de emisiones desde el origen de la serie temporal. Además, también se observa que la diferencia en toneladas entre ambas zonas se mantiene bastante pareja en comparación con la anteriormente observada para el CO₂, hecho a destacar ya que, a pesar de seguir teniendo una vinculación directa con la cantidad de tráfico aéreo que circula por ambas zonas, se produce en unas condiciones muy diferentes para cada una de las zonas.

La zona 1 pertenece a un área de tránsito de aeronaves mayormente con influencia europea y africana, tal y como se muestra en la Figura 24, que se caracteriza por la utilización de una flota de aviones que rondan los 10,7 años de antigüedad de media para Europa según fuentes consultadas en Eurostat. Por otra parte, para el país africano este número asciende hasta una media de 14,5 años de antigüedad según fuentes consultadas en Statista.

Sin embargo, la zona 2 tiene una mayor influencia de aeronaves asiáticas, tal y como se puede observar en la Figura 26, cuya antigüedad es mucho menor gracias al mayor potencial económico en comparación con la economía africana. Esto supone que la antigüedad media de dichas aeronaves de

procedencia asiática es de 8,2 años de antigüedad, lo que genera una gran diferencia respecto la zona 1.

Estos datos cobran una gran importancia si se tienen en cuenta las consecutivas revisiones que se producen desde el año 1981. Esto tiene el objetivo de reducir de manera paulatina el límite máximo de emisiones g/kN de óxido de nitrógeno, que pese a estar pensados para controlar las emisiones de NO_x en cuanto a ciclos LTO, también afectan a las producidas en fase crucero.

7.2.3. Afectación por agentes externos

Dichas revisiones promovidas por la OACI, provenientes del CAEP, fueron aplicadas en los años 1981, 1992, 1998, 2004 y 2010. No fue hasta los años 1986, 1996, 2004, 2008 y 2014 respectivamente que no entraron en vigor y pasaron a ser los nuevos estándares de obligado cumplimiento para todos los nuevos motores manufacturados. Dichas reducciones se aplican al límite anterior y se distribuyen de la siguiente manera:

- CAEP/1: Establece el primer límite en 100 g/kN.
- CAEP/2: Reduce en un 20% el límite del CAEP/1, hasta 80 g/kN.
- CAEP/4: Reduce en un 16% el límite del CAEP/2, hasta 67 g/kN.
- CAEP/6: Reduce en un 12% el límite del CAEP/4, hasta 59 g/kN.
- CAEP/8: Reduce en un 15% el límite del CAEP/6, hasta 50 g/kN.

Y situando en la serie temporal dichas normativas, queda establecido de la siguiente manera:

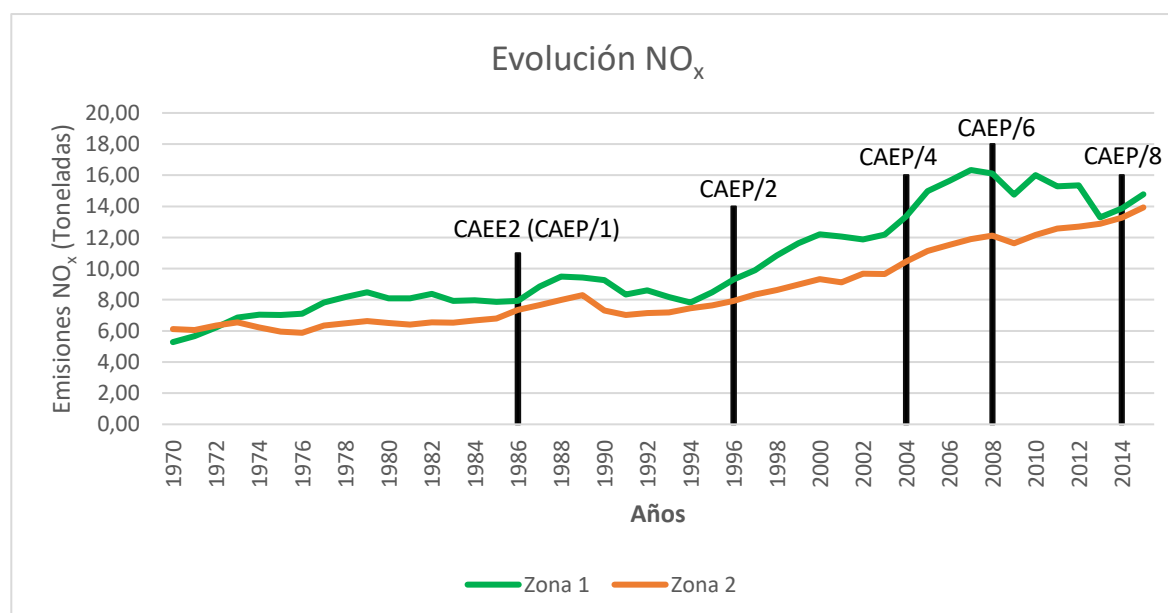


Figura 34. Serie temporal de la evolución de las emisiones de NO_x en las dos zonas seleccionadas y con marcadores temporales. Fuente: Elaboración propia.

Pese a la importancia y la relevancia de dichos estándares, su influencia parece no afectar a la serie temporal a corto plazo. A pesar de su gran importancia, los resultados se dilatan en el tiempo debido a que desde su fabricación hasta que los nuevos modelos se convierten en las opciones más utilizadas pueden pasar hasta 10 años, tiempo suficiente para que aparezca otro nuevo estándar y así consecutivamente. En comparación con el CO₂, estas normativas han sido el principal factor que ha hecho que las emisiones no asciendan al ritmo del dióxido de carbono.

Esto queda corroborado gracias a una figura proporcionada por la EASA, que muestra de una manera clara la implementación de la tecnología de mitigación del NO_x gracias a los estándares CAEP y cómo ha evolucionado a lo largo de la serie temporal.

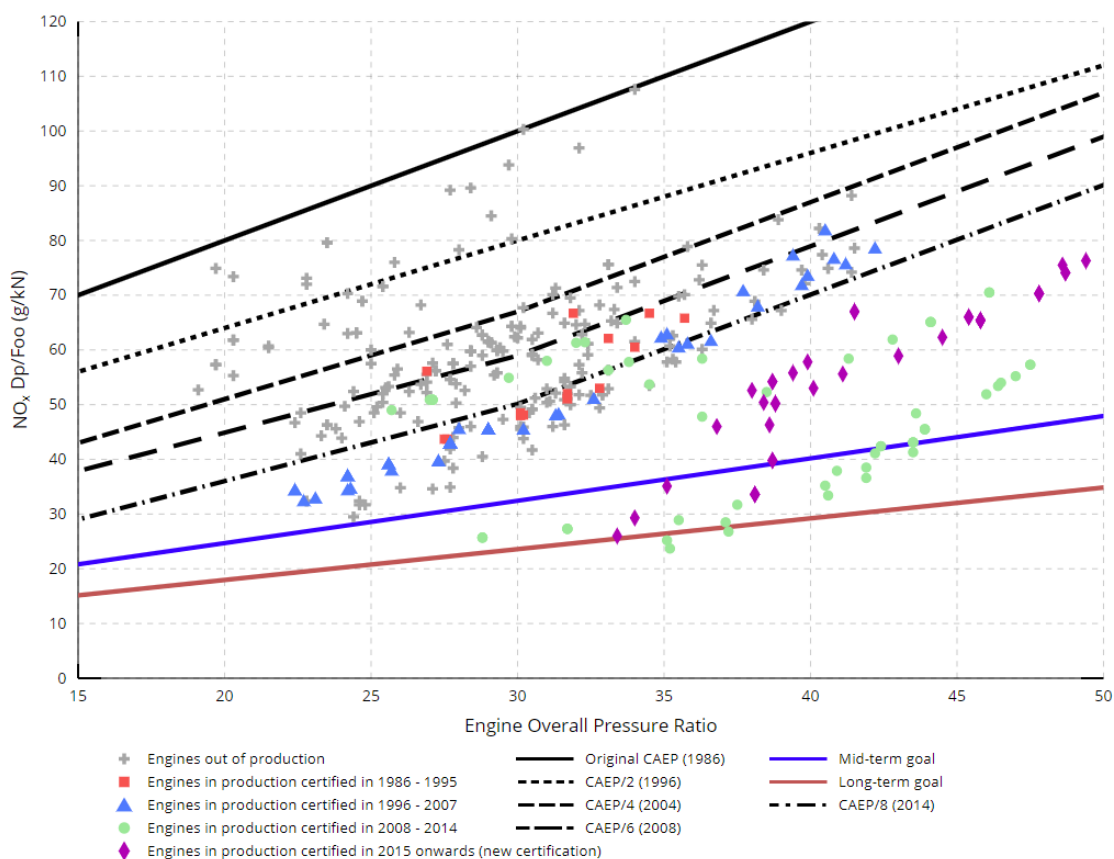


Figura 35. Implementación de la tecnología de mitigación del NO_x a través de las certificaciones de los motores. Fuente: EASA. (2018)

7.3. SO₂

7.3.1. Mapa de calor

A partir de la base de datos, se han recreado los mapas de calor mediante MATLAB para entender la afectación en el área delimitada. Para representarlos se ha utilizado la metodología de interpolación *biharmornic spline* que consiste en una combinación lineal de funciones de Green centradas en cada uno de los puntos de la base datos y que se resuelve mediante un sistema lineal de ecuaciones. Esta metodología es especialmente útil en este caso, ya que está pensada para analizar datos no uniformes y permite una visión más fidedigna de los resultados separando claramente unas zonas de otras. En los mapas, se puede observar que, pese a la variación de los valores en las distintas zonas, hay dos áreas donde la afectación es mayor en comparación con el resto tal y como se puede ver en la siguiente figura. Ambas corresponden a las mismas zonas que en el análisis del dióxido de carbono y el óxido de nitrógeno.

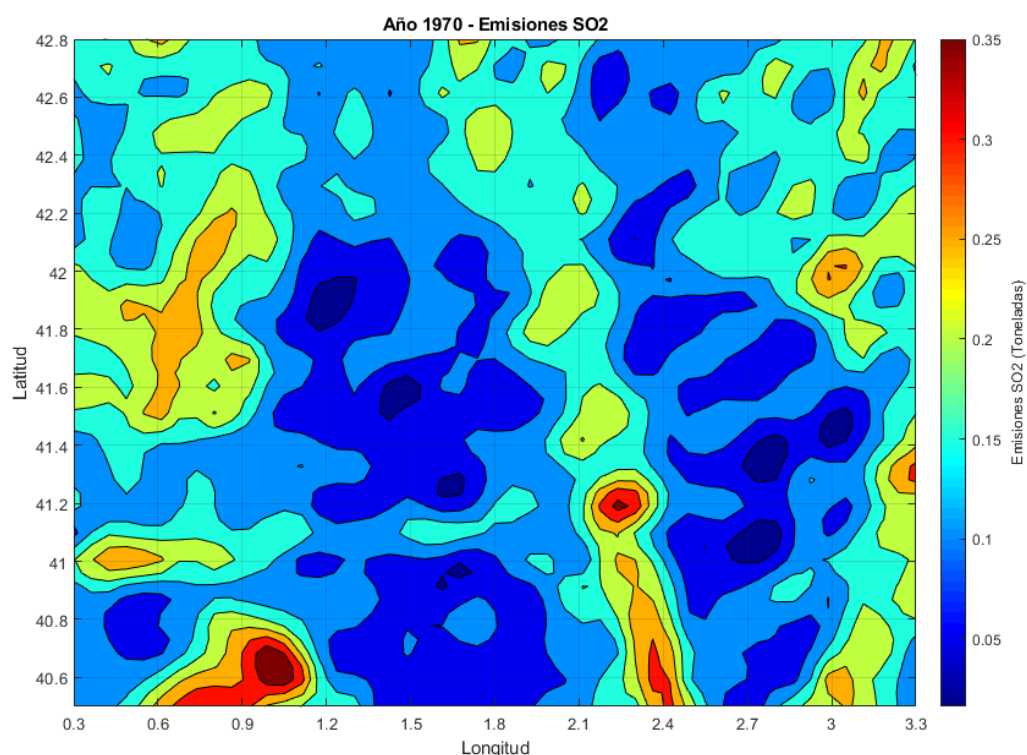


Figura 36. Mapa de calor del SO₂ para el año 1970. Fuente: Elaboración propia.

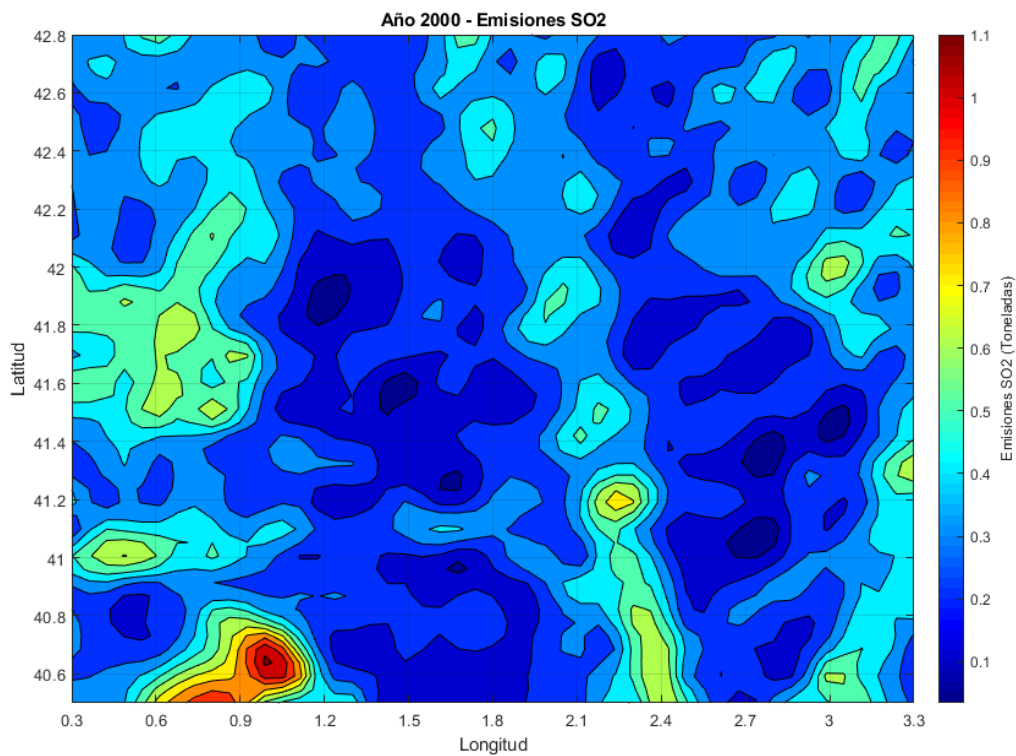


Figura 37. Mapa de calor del SO₂ para el año 2000. Fuente: Elaboración propia.

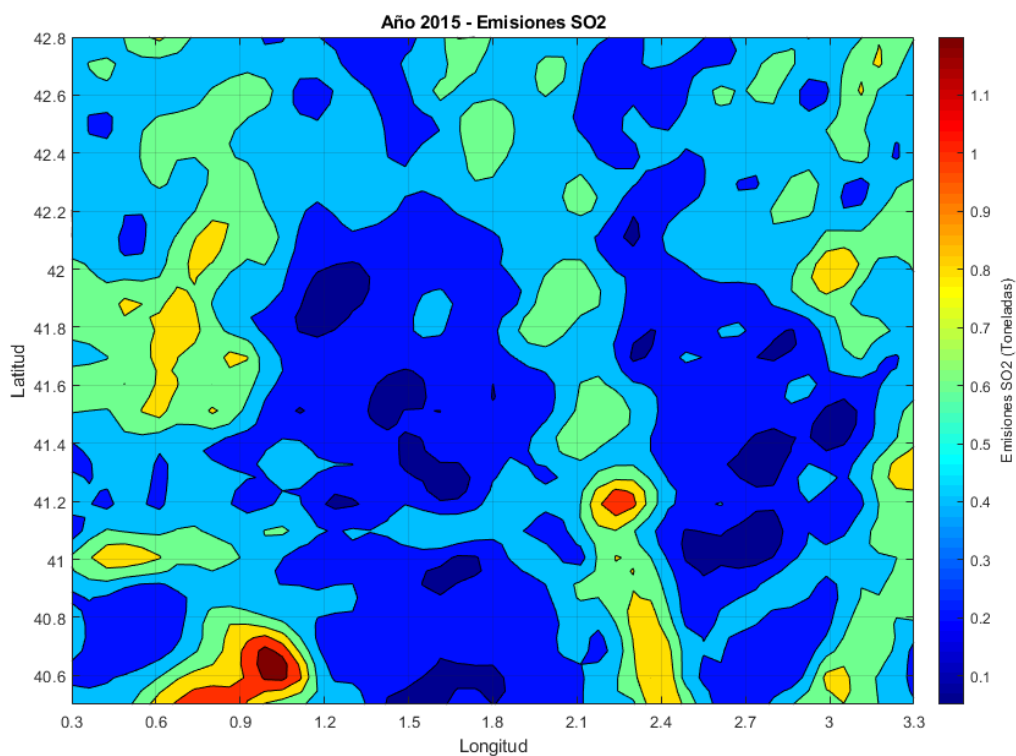


Figura 38. Mapa de calor del SO₂ para el año 2015. Fuente: Elaboración propia.

Estas dos áreas corresponden a los siguientes puntos:

- Zona 1:
 - Latitud: 40,6 grados
 - Longitud: 1 grado
- Zona 2:
 - Latitud: 41,2 grados
 - Longitud: 2,2 grados

Si situamos estas zonas en el mapa con las rutas, la zona 1 (color verde) queda ubicada al este del Delta del Ebro, mientras que la zona 2 (color naranja) queda situada en las cercanías del Aeropuerto de Barcelona - El Prat.

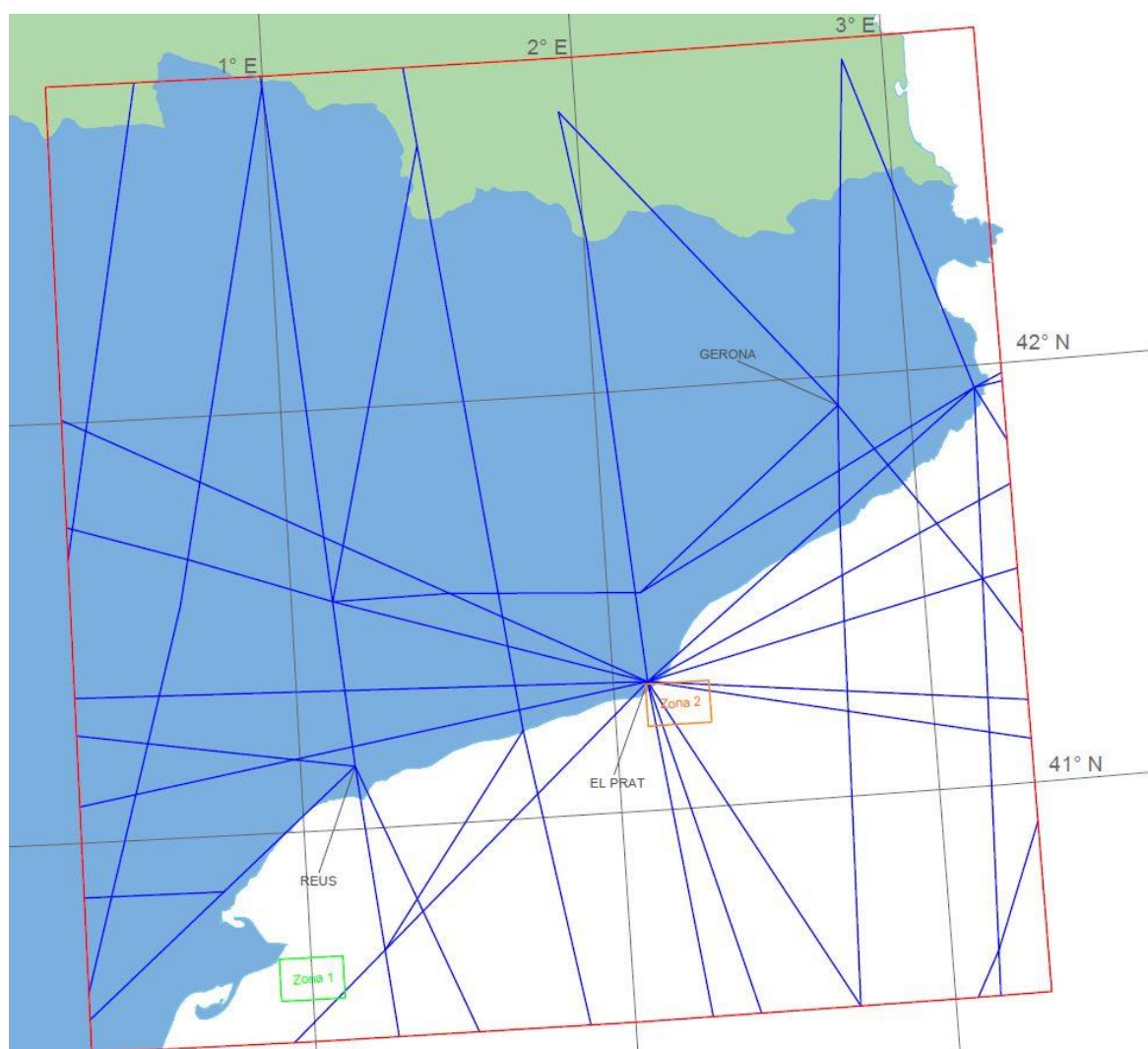


Figura 39. Zonas con mayor impacto en el área delimitada. Fuente: Elaboración propia.

7.3.2. Evolución

Representando la serie temporal para cada una de las zonas, se obtiene la siguiente figura.

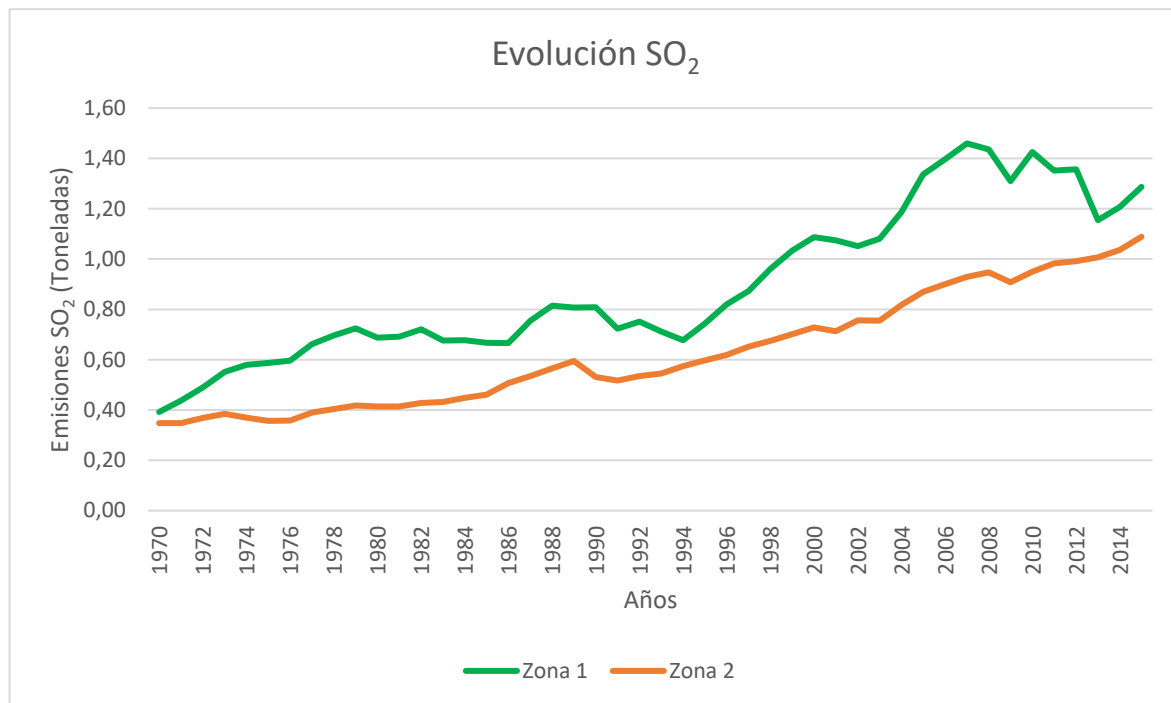


Figura 40. Serie temporal de la evolución de las emisiones de SO₂ en las dos zonas seleccionadas. Fuente: Elaboración propia.

De la misma manera que en los dos contaminantes analizados anteriormente, la tendencia vuelve a ser claramente ascendente en el conjunto de la serie temporal. En el dióxido de azufre, debido a la dificultad a la hora de estimar el porcentaje en masa que incorpora el Jet A-1 en cada trayecto, utiliza un valor fijo en su índice de emisión, por lo que el crecimiento obtenido depende únicamente de los diferentes flujos de tráfico y operaciones en dichas zonas.

La dificultad de analizar el número total de operaciones en las dos zonas de estudio y la tendencia, hace muy complejo entender la evolución real del tráfico en la serie temporal. La serie histórica del tráfico del Aeropuerto de Barcelona – El Prat nos ayuda a tener una imagen de la tendencia en el número de operaciones a lo largo de la serie temporal. En ella, se puede observar una clara tendencia ascendente hasta el año 2008 de la crisis económica, donde se produce una frenada muy abrupta y se observa la dificultad de recuperar los valores de operaciones de dichos años.

Esta curva, por tanto, es un reflejo bastante fiel de la evolución de las emisiones de SO₂ y de su clara dependencia del número de operaciones que se efectúan anualmente.

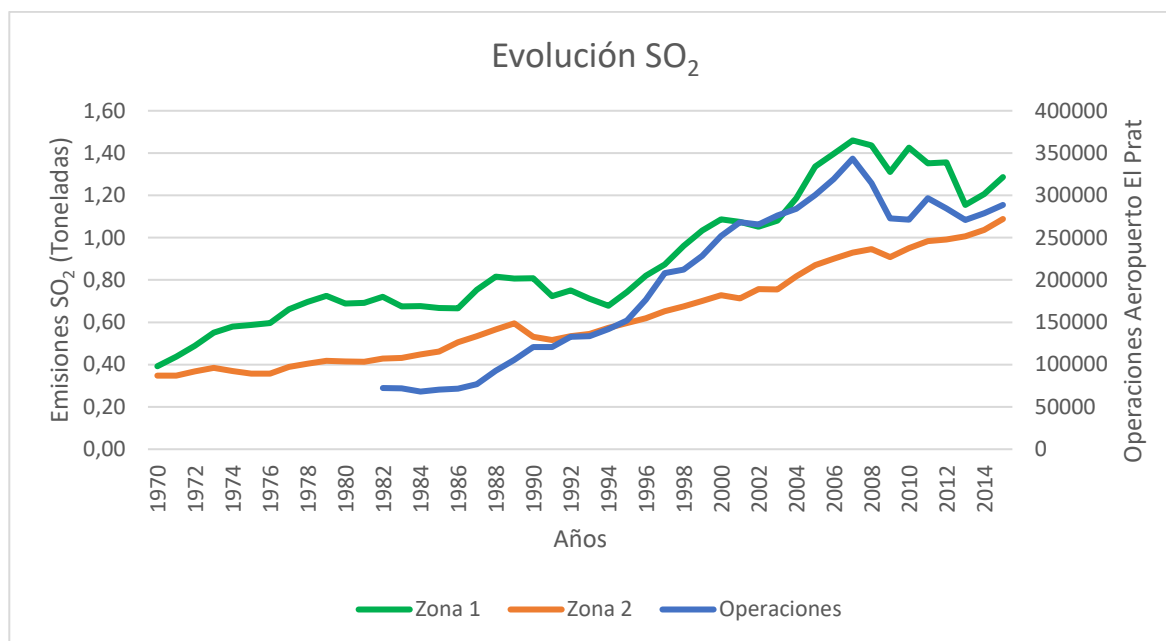


Figura 41. Serie temporal de la evolución de las emisiones de SO₂ en las dos zonas seleccionadas y las operaciones en el Aeropuerto de Barcelona - El Prat. Fuente: Elaboración propia.

7.3.3. Afectación por agentes externos

Esta dependencia del número de operaciones que se producen en cada zona, se puede apreciar de manera muy clara si la comparamos con las emisiones que se producen en cada una de las zonas de CO₂, por lo que se ve afectada por agentes externos de la misma forma.

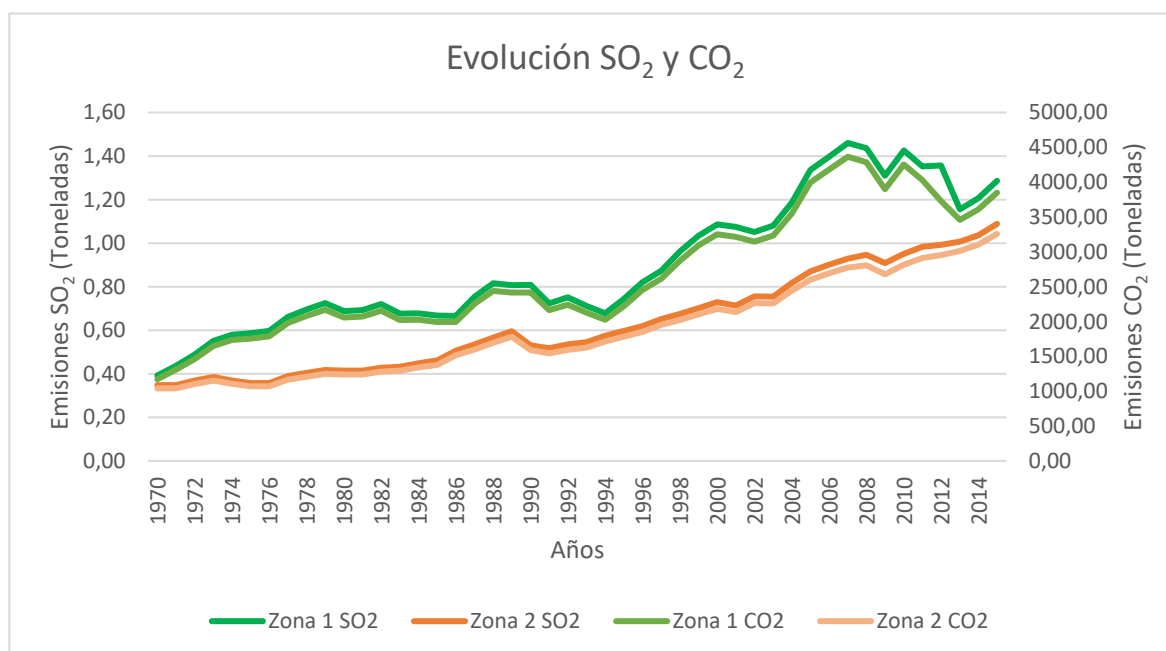


Figura 42. Comparación de la serie temporal de las emisiones de SO₂ y de CO₂ para las dos zonas seleccionadas. Fuente: Elaboración propia.

Por lo tanto, los contaminantes cuya metodología de cálculo está vinculada al consumo de combustible y por ende al tráfico que circula por dicha zona, su capacidad de mejora queda reducida a una disminución del uso del combustible y su evolución será prácticamente idéntica.

7.4. Predicción futura con la aparición de la COVID-19

En un escenario normal, siguiendo la línea histórica del crecimiento de las emisiones contaminantes estudiadas y teniendo en cuenta los acuerdos a nivel internacional para reducir dichos valores, el escenario más plausible era una ralentización en el crecimiento de las tendencias ascendentes, en los próximos 15-20 años, siempre y cuando no existiesen factores externos que alterasen dicho escenario. Pero como siempre sucede en la historia, diferentes crisis van sucediendo con el paso de los años, afectando en mayor o menor medida a los diferentes países del mundo. En este caso, un nuevo agente externo, un coronavirus respiratorio muy contagioso, la COVID-19, que ha afectado a todos los países a unos niveles jamás vistos.

Uno de los sectores más afectados ha sido el de la aviación, debido a las restricciones establecidas por los diferentes gobiernos de evitar desplazamientos, de respetar la distancia de seguridad y de evitar espacios muy concurridos. La aviación cumple todos los parámetros necesarios que podrían permitir que el virus siga propagándose entre los diferentes países de forma descontrolada. Esto ha provocado una grave crisis en el sector, produciéndose en Europa un descenso del 89% del tráfico aéreo respecto el año anterior en el mes de abril. En lo que respecta al Aeropuerto de Barcelona, un descenso del 95% respecto el año anterior tal y como muestra la siguiente figura.

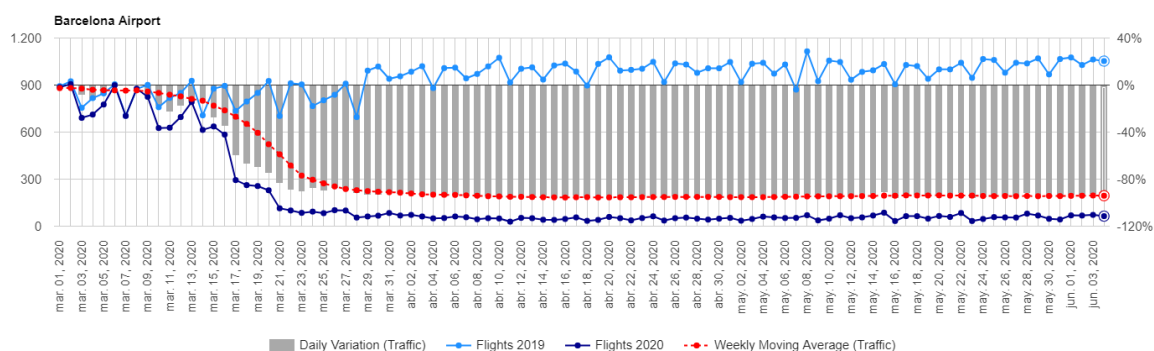


Figura 43. Evolución del tráfico en el Aeropuerto de Barcelona desde el 1 de marzo al 3 de junio. Fuente: EUROCONTROL (2020)

La cantidad de emisiones producidas tiene una gran dependencia del volumen de tráfico total y esto causará un gran descenso de las emisiones a corto plazo, rompiendo con las previsiones esperadas a todos los niveles. Debido al todavía desconocimiento sobre la evolución de la pandemia y sobre la posibilidad de una segunda ola, resulta muy atrevido realizar una predicción que sea capaz de reflejar

lo que pasará, ya que otro período de confinamiento global mermaría la recuperación del sector de manera drástica.

Aun así, EUROCONTROL (2020) dibuja dos posibles escenarios para la recuperación del tráfico aéreo a corto plazo en Europa, en caso de no existir una segunda ola en otoño. En primer lugar, muestra un escenario donde los distintos países de la unión europea no llevan a cabo medidas de forma coordinada. Luego un segundo escenario donde, si se llevan a cabo medidas coordinadas entre los países miembros, se logra una recuperación del tráfico aéreo más efectiva y, por ende, más rápida.

EUROCONTROL Draft Traffic Scenarios - 24 April 2020 (base year 2019)

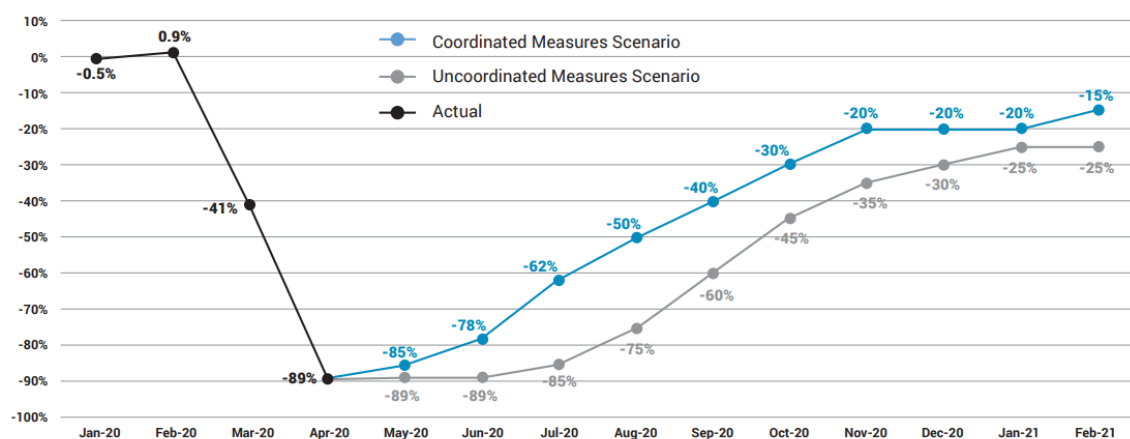


Figura 44. Posibles escenarios de recuperación del tráfico aéreo con fecha de 24 de abril. Fuente: EUROCONTROL (2020)

Pese a estas previsiones, la OACI estima una caída al cierre del año de entre un 49% y un 64% en cuanto al tráfico internacional desde Europa y una caída de entre un 40% y un 55% en cuanto a tráfico intra-europeo. En conjunto, podría suponer una reducción superior al 45% en cuanto al flujo de aeronaves al cierre del año 2020, haciendo que las emisiones contaminantes tomaran valores similares a los producidos en el año 1993 gracias a la ausencia de vuelos. Dichos valores volverían a aumentar de forma paulatina en los años posteriores hasta llegar a valores pre-covid en un lapso de no más de 3-4 años, siempre que se encontrase una vacuna o tratamiento efectivo durante el año 2021, permitiendo una vuelta a la normalidad de manera segura y que hiciese recuperar la confianza en el transporte aéreo.

Las medidas adoptadas por el CAEP y las mejoras de cara al futuro de la OACI incorporadas en el plan CORSIA deberían empezar a surgir efecto para estabilizar las emisiones a medio plazo (15-20 años). Es habitual que una crisis pueda provocar un descenso muy rápido de las emisiones, pero a largo plazo quedan como hechos anecdóticos, y la única manera de cambiar la tendencia reside en la constitución de procedimientos, normativas y estándares capaces de regular las emisiones contaminantes.

7.5. Predicción futura previa a la aparición de la COVID-19

7.5.1. CO₂

El escenario futuro estimado antes de la aparición de esta crisis a corto y medio plazo era bien diferente. La tendencia ascendente en el tráfico aéreo y, en consecuencia, un aumento en los valores totales de todos los tipos de emisiones era el escenario más plausible. Acompañaba también la situación económica favorable y sin ninguna crisis grave en los últimos años, lo que estaba permitiendo un crecimiento favorable a todos los niveles en la mayoría de países. A nivel europeo, la Agencia Europea de Seguridad Aérea (2019) establecía tres distintos escenarios en cuanto a la evolución de las emisiones totales de CO₂.

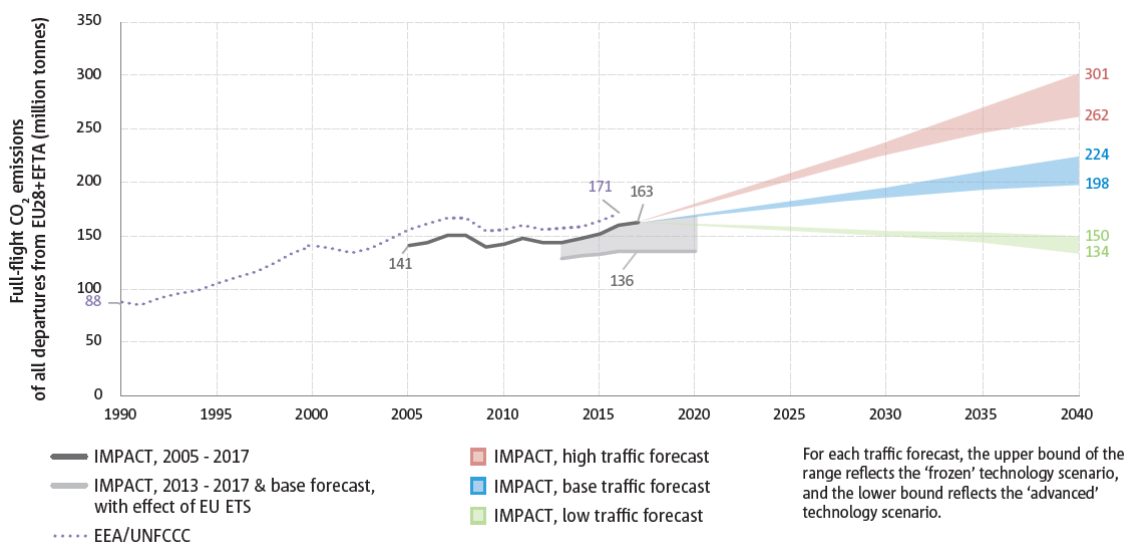


Figura 45. Evolución y previsión de las emisiones de CO₂ en Europa. Fuente: EASA (2019)

Estos escenarios proponían diferentes intervalos según la previsión del tráfico aéreo. El más probable de los tres era el azul, que seguiría la tendencia esperada sin producirse ninguna alteración excepcional. El ancho de esta línea añadía un grosor que se refiere al margen de mejora si hubiese un avance importante en cuanto a la tecnología utilizada. No era de esperar que hubiese un gran cambio en esta tendencia a corto plazo y medio que permitiese estabilizar la tendencia hasta el año 2030 cuando se puedan visualizar los resultados del plan CORSIA, que hasta 2024 no entrará en la fase 1, y que en 2021 entrará en fase piloto.

Si comparamos estos resultados con la proyección de las líneas de tendencia que se obtendrían en las dos zonas de estudio hasta 2025, quedaría muy cercano a los valores esperados que se producirían en ese período.

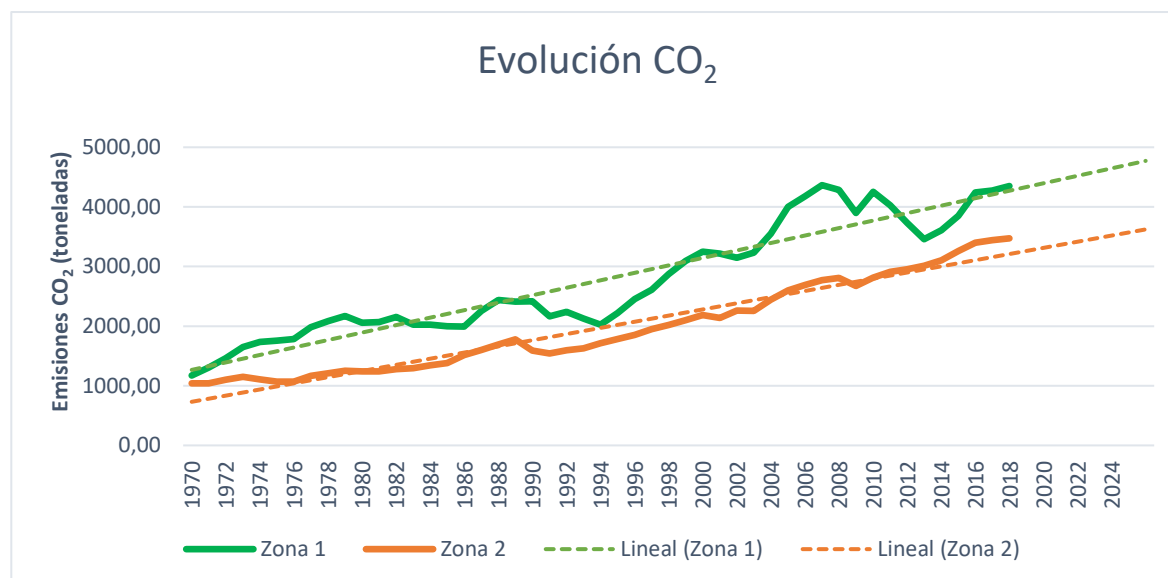


Figura 46. Evolución y proyección de las emisiones de CO₂ en las zonas de estudio. Fuente: Elaboración propia.

Por lo tanto, la gran vinculación del dióxido de carbono con el tráfico aéreo y el poco margen de mejora posible debido a la tecnología, hacen que este escenario futuro que hubiese sido, sin la aparición de la COVID-19, una extensión de la tendencia actual a corto plazo.

7.5.2. NO_x

En lo que respecta a las emisiones de NO_x, el escenario que plantea la EASA (2019) vuelve a mostrar tres escenarios dependiendo del impacto del tráfico aéreo. De igual manera que en CO₂ el escenario más factible era el intermedio, pintado de azul. En este caso, se volvía a observar el margen de mejora dependiendo de las mejoras en la tecnología.

A diferencia del CO₂ se aprecia una banda muy amplia. Si tenemos en cuenta que la OACI está revisando y cada vez siendo más estricta con las normativas CAEP que van mejorando cada 6-8 años, la previsión de la EASA (2019) estimaba que para 2036 todas las aeronaves ya cumplirán al 100% los objetivos del CAEP/8. Esto provocaría que a corto plazo la tendencia siguiese siendo creciente hasta el año 2030, cuando las mejoras en la tecnología empezarían a curvar esta tendencia, para luego comenzar a reducir estos valores.

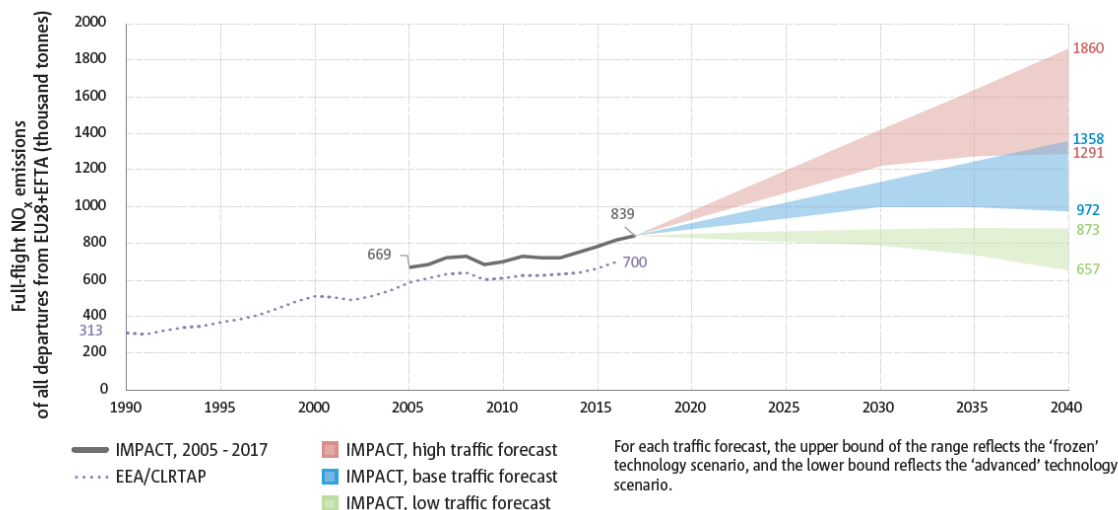


Figura 47. Evolución y previsión de las emisiones de CO2 en Europa. Fuente: EASA (2019)

Extrapolando las mismas tendencias a las dos zonas de estudio, se observaría un ascenso en las emisiones hasta el año 2025, siguiendo la recta de regresión proyectada para los próximos 10 años. No sería hasta el año 2030, cumpliendo las previsiones de la EASA, que esta tendencia podría verse afectada y empezar a decrecer a largo plazo.

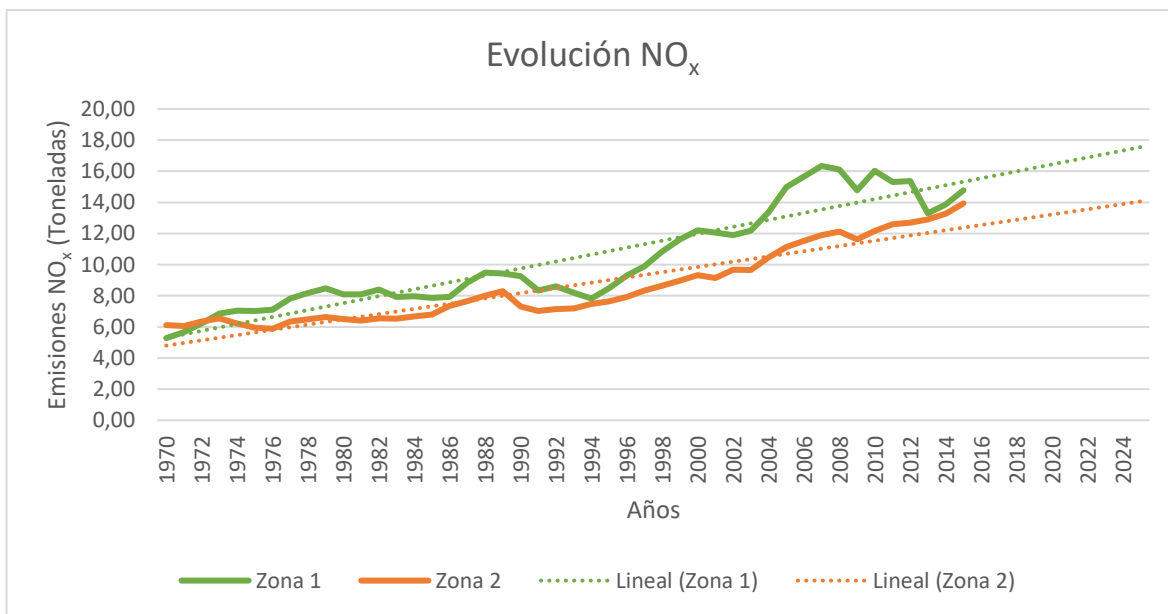


Figura 48. Evolución y previsión de las emisiones de NOx en las zonas de estudio. Fuente: Elaboración propia.

7.5.3. SO₂

En lo referente al dióxido de azufre, en el análisis de la serie temporal ya se observó su gran vinculación al tráfico aéreo y su similitud con el crecimiento de las emisiones de dióxido de carbono. Pero a diferencia del CO₂, el azufre tiene por delante un escenario totalmente diferente.

Pese a que los valores en cuanto a porcentaje están muy por debajo del límite legal permitido, Miller (2009) señala que los costes de una reducción de los valores de azufre en el Jet A-1 podrían ser muy elevados. A pesar de que existe la intención en reducirlos, la solución no parece estar tanto en una mejora en los procesos de refinación del combustible, si no en la utilización de otros tipos de biocombustibles que directamente ya no utilizasen azufre.

Sin embargo, esto es un proceso lento que a corto y medio plazo no vería alteración ninguna en la serie temporal, por lo que seguiría la tendencia esperada. Sería a partir del año 2035, 2040 y en adelante cuando se empezaría a ver un uso mayor de estos biocombustibles de forma más habitual, en compañías comerciales.

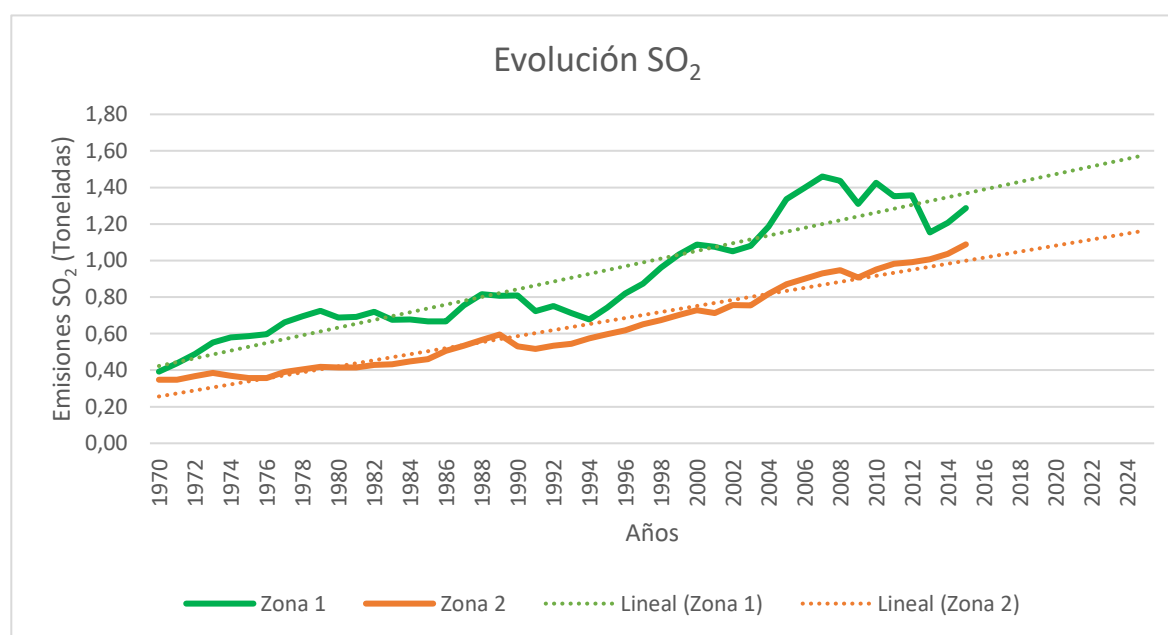


Figura 49. Evolución y previsión de las emisiones de SO₂ en las zonas de estudio. Fuente: Elaboración propia

8. Análisis del impacto ambiental

El principal problema de estas emisiones contaminantes es el gran impacto ambiental que producen. Sus cantidades han ido en aumento año tras año hasta llegar a unos niveles que empiezan a ser preocupantes, forzando a los diferentes gobiernos a tomar medidas para evitar que la temperatura global de la tierra siga aumentando. Y más en concreto, las emisiones que se producen cuando el avión viaja a velocidad de crucero, se emiten directamente en la parte superior de la troposfera, a una altitud donde únicamente los aviones son capaces de generar emisiones contaminantes.

El término utilizado por las entidades ambientales cuando se refieren al impacto ambiental es el forzamiento radiativo o climático, que el IPCC (2018) define como “La variación, expresada en W/m^2 , del flujo radiativo (la descendente menos la ascendente) en la tropopausa, debida a una variación del causante externo del cambio climático”. Esto significa que es la diferencia entre la insolación que se recibe mediante la luz solar, que es absorbida por la Tierra, y la energía que vuelve a ser irradiada al espacio y que no es retenida. En este punto entran en juego los causantes externos que no permiten que esta energía vuelva a ser irradiada al espacio, siendo retenida a causa de dichas emisiones contaminantes.

Aunque no todas las emisiones contaminantes tienen la capacidad de retener esta energía, tanto el hecho de retener como el hecho de ayudar a esta liberación hacia el espacio, se considera forzamiento radiativo, positivo en el caso de absorber y negativo en el caso de permitir que se escape. El conocimiento científico sobre la cuantificación real del efecto de la aviación es todavía bajo, exceptuando el dióxido de carbono, ya que, debido a su comportamiento más simple, solo depende de la combustión y no de transformaciones posteriores que se produzcan en la troposfera.

No obstante, lo que sí se conoce con claridad es el efecto que tiene cada uno de los diferentes contaminantes en forma de forzamiento radiativo positivo o negativo. Los principales componentes que actúan provocando un forzamiento radiativo positivo son:

- CO_2
- NO_x mediante la producción de ozono
- H_2O (vapor)
- Hollín en forma de aerosol
- Estelas de condensación
- Cirros inducidos

Entre ellos, el hollín se puede considerar negligible, ya que a velocidad de crucero se encuentra en proporciones inferiores al 0,1% del total. Además, en lo que respecta a la creación de cirros inducidos, se hace una estimación ya que todavía no hay el suficiente conocimiento como para determinarlo de manera fiable.

Por el contrario, los principales componentes que actúan provocando un forzamiento radiativo negativo consisten en los siguientes:

- NO_x mediante la reducción del metano
- SO₂ en forma de aerosol

Una vez definido el sentido de cada uno de los elementos que alteran el flujo radiativo, Lee et al., (2009) determinan de manera cuantitativa la afectación a nivel mundial en cuanto a forzamiento radiativo durante el año 2005.

Aviation Radiative Forcing Components in 2005

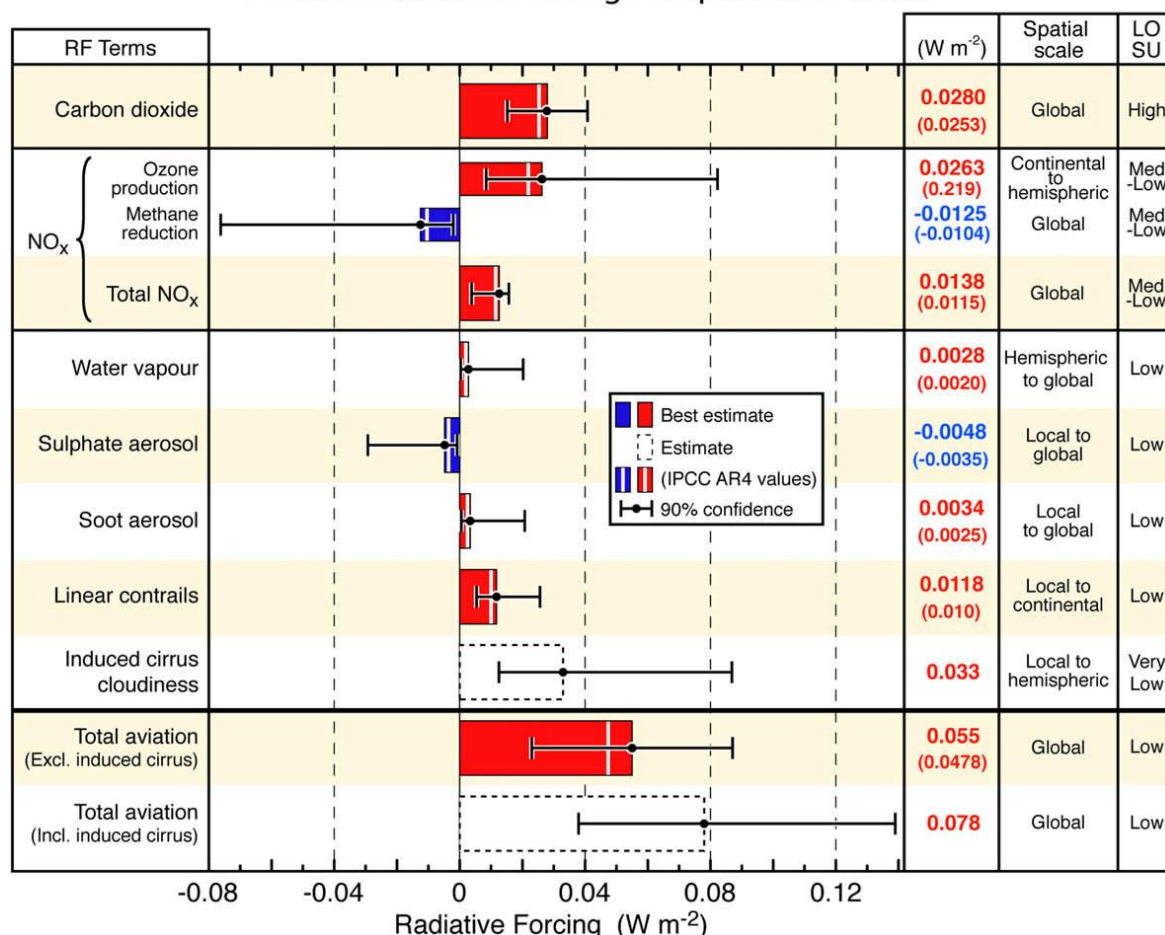


Figura 50. Forzamiento radiativo causado por la aviación en el mundo durante el año 2005. Fuente: Lee, David S. (2009)

Debido a la complejidad a la hora de calcular este forzamiento radiativo a una escala menor como las dos zonas que habían sido seleccionadas para el análisis de los diferentes agentes contaminantes, se han utilizado los resultados que existen a nivel mundial. A pesar de que no nos permiten observar unos resultados cuantitativos más precisos, nos ayudan a hacernos una idea relativa de la afectación de cada uno de los contaminantes. En el caso más específico del área seleccionada, las cantidades totales serían mucho menores.

En dicha figura se puede observar la importancia del CO₂ en cuanto a los valores que genera en W/m². Al mismo tiempo, el todavía gran desconocimiento de la afectación de otras emisiones como pudiera ser la producción del ozono y la reducción del metano a partir de la generación del óxido de nitrógeno, donde se establecen unos intervalos de confianza del 90% muy amplios. También es preocupante la estimación de la influencia de los cirros inducidos que se generan a causa de la gran cantidad de operaciones que se producen a lo largo de un día. Aun así, no existe una evidencia científica clara capaz de cuantificarlo con exactitud, pero que se estima que su efecto podría ser incluso superior al causado por dióxido de carbono.

Pese a la falta de concreción y amplitud de los intervalos establecidos, sirve como una muy buena base para entender la importancia y la afectación en cuanto a niveles de calentamiento de la superficie y de cómo, si sigue la tendencia actual, acabará siendo un problema de una envergadura mayor. Añadido al deshielo de los glaciares, los fenómenos climáticos extremos que cada vez son más frecuentes, su afectación a los ecosistemas y su biodiversidad.



Conclusiones

Los resultados obtenidos reflejan algo muy claro. A pesar de todos los esfuerzos efectuados por las organizaciones internacionales y europeas para reducir los niveles de los diferentes tipos de emisiones, estos no están siendo lo suficientemente eficaces y no logran contrarrestar los efectos del imparable aumento de la demanda y del tráfico aéreo.

A pesar de las influencias externas que hayan podido afectar al sector a causa de las diferentes crisis, que han provocado un descenso temporal en las emisiones, estas han acabado rebotando, volviendo a sus niveles normales y de vuelta en la tendencia. Además, las metodologías de cálculo de emisiones tienen margen de mejora y podrían ser más precisas, con la ayuda de las compañías aéreas, en un ejercicio de transparencia necesario para obtener los datos más fidedignos posibles.

Y es que, a pesar de ser un análisis muy concreto, con una zona delimitada y en unas determinadas condiciones en cuanto al nivel de vuelo, no deja de ser el reflejo de lo que ocurre en muchas otras partes del planeta donde se alcanzan niveles de emisiones muy superiores a los que podemos tener en Cataluña, afectando no solo al cambio climático, sino también a la salud humana directamente.

La falta de concienciación y el desconocimiento sobre la afectación real en nuestras vidas, suman un cóctel perfecto que provoca que la mayoría de personas cuando oye hablar de emisiones contaminantes producidas por aeronaves, solo piense en CO₂ y cambio climático. La realidad es que también existe una afectación en muchos otros ámbitos, aunque sea a unos niveles inferiores y que es importante poner en valor para poder revertir la situación lo antes posible.

Por lo tanto, es necesario un esfuerzo mayor por parte de todos los agentes involucrados, si realmente se quiere contrarrestar la tendencia actual a medio y largo plazo. A pesar de que la mayoría de países se han puesto de acuerdo y se han planteado objetivos comunes, es conveniente ser prudente y esperar a ver qué resultados se obtienen de dichas medidas para valorar si realmente están siendo efectivas o no.



Presupuesto

En el trabajo actual no se ha requerido de la compra de materiales físicos ya que se ha realizado íntegramente de manera telemática, pero si se han producido costes humanos y de los recursos de soporte utilizados para desarrollar la memoria.

En primer lugar, se han calculado los costes de recursos humanos necesarios, divididos en las diferentes tareas, a partir de las horas dedicadas y con un coste unitario por hora.

	Horas (h)	Coste unitario (€/h)	Coste total (€)
Recopilación de información y estudio previo	90	15	1.350,00 €
Uso de herramientas de software	75	15	1.125,00 €
Redacción de memoria	270	15	4.050,00 €
TOTAL			6.300,00 €

En segundo lugar, se detallan los recursos de soporte utilizados. En ellos se incluyen licencias de software, el hardware utilizado que fue comprado hace tres años y cuyo coste se muestra amortizado y el consumo eléctrico empleado. A todo ello se le añade el IVA (Impuesto sobre el Valor Añadido).

	Coste total (€)
MATLAB student suite license	69,00 €
Office Hogar y Estudiantes 2019	149,00 €
Equipo informático (3 años antigüedad)	300,00 €
Consumo eléctrico	120,00 €
TOTAL	638,00 €
IVA (21%)	133,98 €
TOTAL (IVA INCLUIDO)	771,98 €

Por último, se suman los costes totales de los recursos humanos y los costes totales de los recursos de soporte utilizados, para obtener así el coste total de este trabajo.

	Coste total (€)
Coste de los recursos humanos	6.525,00 €
Coste de los recursos de soporte	771,98 €
Coste total del trabajo	7.296,98 €



Bibliografía

- Bahr, D. W. 1996. "Aircraft Turbine Engine NOx Emission Abatement." In *Unsteady Combustion*, 243–64. Springer Netherlands. [Consulta: 01/05/2020]. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/978-94-009-1620-3_10>.
- Boletín Oficial del Estado. 2019. "Instrumento de aceptación de la Modificación del Texto y de los Anexos II a IX y la incorporación de nuevos Anexos X y XI al Protocolo al Convenio de 1979 sobre contaminación atmosférica transfronteriza a gran distancia, relativo a la reducción de la acidificación, de la eutrofización y del ozono en la troposfera, adoptadas en Ginebra el 4 de mayo de 2012." [Consultado: 29/03/2020]. Disponible en: <https://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-2019-11459>.
- Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. 2015. "Acuerdo de París." [Consultado: 30/03/2020]. Disponible en: <https://unfccc.int/files/meetings/paris_nov_2015/application/pdf/paris_agreement_spanish.pdf>.
- Crippa et al. 2019. "EDGAR v5.0 Global Greenhouse Gas Emissions." Emissions Database for Global Atmospheric Research. European Commission, Joint Research Centre (JRC). [Consulta 16/01/2020]. Disponible en: <https://edgar.jrc.ec.europa.eu/overview.php?v=50_GHG>.
- Crippa, M., G. Oreggioni, Guizzardi D., M. Muntean, E. Schaaf, E. Lo Vullo, E. Solazzo, F. Monforti-Ferrario, J.G.J. Olivier, and E. Vignati. 2019. "Fossil CO2 and GHG Emissions of All World Countries." European Commission. [Consulta: 17/01/2020]. Disponible en: <<https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/41811494-f131-11e8-9982-01aa75ed71a1/language-en>>.
- Crippa, Monica, Diego Guizzardi, Marilena Muntean, Edwin Schaaf, Frank Dentener, John A. Van Aardenne, Suvi Monni, et al. 2018. "Gridded Emissions of Air Pollutants for the Period 1970-2012 within EDGAR v4.3.2." *Earth System Science Data*. Copernicus GmbH. [Consulta: 18/01/2020]. Disponible en: <<https://doi.org/10.5194/essd-10-1987-2018>>.
- Doppelheuer, A., and M Lecht. 1998. "Influence of Engine Performance on Emission Characteristics." RTO-Symposium of AVT on Gas Turbine Engine Combustion, Emissions and Alternative Fuels, no. October: 16. [Consulta: 01/05/2020]. Disponible en: <<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.453.4717&rep=rep1&type=pdf>>.
- EASA. 2018. "Continued Implementation of Latest NOx Mitigation Technology within Certified Engines | European Aviation Environmental Report." [Consulta: 30/05/2020]. Disponible en:

<<https://www.easa.europa.eu/eaer/figures-tables/continued-implementation-latest-nox-mitigation-technology-within-certified-engines>>.

2019. “European Aviation Environmental Report”. [Consulta: 23/06/2020]. Disponible en: <<https://ec.europa.eu/transport/sites/transport/files/2019-aviation-environmental-report.pdf>>.

EUROCONTROL. 2020. “COVID-19 Impact on the European Air Traffic Network.” [Consulta: 23/06/2020]. Disponible en: <<https://www.eurocontrol.int/covid19>>.

2020. “Daily Traffic Variation - States.” [Consulta: 06/06/20]. Disponible en: <<https://www.eurocontrol.int/Economics/DailyTrafficVariation-Airports.html>>.

European Commission. 2017. “How Old Is the EU’s Commercial Aircraft Fleet?” Eurostat Webpage. [Consulta: 30/05/2020]. Disponible en: <<https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-eurostat-news/-/EDN-20171207-1?inheritRedirect=true>>.

Freiberg, J. E., and S E Schwartz. 1981. “Oxidation of SO₂ in Aqueous Droplets: Mass-Transport Limitation in Laboratory Studies and the Ambient Atmosphere.” *Atmospheric Environment* (1967) 15 (7): 1145–54. [Consulta: 24/03/2020]. Disponible en: <https://www.bnl.gov/envsci/schwartz/pubs/Oxidation_SO2.pdf>.

Holmes, M Elizabeth, Jeffrey P Chanton, Malak M Tfaily, and Andrew Ogram. 2015. “CO₂ and CH₄ Isotope Compositions and Production Pathways in a Tropical Peatland.” *Global Biogeochemical Cycles* 29 (1): 1–18. [Consulta: 07/06/2020]. Disponible en: <<https://doi.org/10.1002/2014GB004951>>.

Intergovernmental Panel on Climate Change. Working Group I and III., Penner, Joyce E., 1999. “Aviation and the Global Atmosphere: A Special Report of IPCC Working Groups I and III in Collaboration with the Scientific Assessment Panel to the Montreal Protocol on Substances That Deplete the Ozone Layer.” Cambridge University Press. [Consulta: 16/04/2020]. Disponible en: <<https://www.grida.no/climate/ipcc/aviation/index.htm>>.

International Cloud Atlas. “Explanatory Remarks and Special Clouds.” [Consulta 22/03/2020] Disponible en: <<https://cloudatlas.wmo.int/explanatory-remarks-and-special-clouds-cirrus.html>>.

IPCC. 1999. “IPCC Aviation and the Global Atmosphere - 3.2. Aerosol Emission and Formation in Aircraft Plumes.” [Consulta: 23/06/2020]. Disponible en: <<https://www.grida.no/climate/ipcc/aviation/avf3-1.htm>>.

1999. "IPCC Aviation and the Global Atmosphere - 7.5. Combustion Technology." [Consulta: 23/06/2020]. Disponible en: <<https://www.grida.no/climate/ipcc/aviation/099.htm>>.
2013. "Glosario [Planton, S. (ed.).]" En: Cambio Climático 2013. Bases físicas. [Consulta: 07/06/2020]. Disponible en:
<https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/08/WGI_AR5_glossary_ES.pdf>.
- Jacob, Daniel J. 1999. "Introduction to Atmospheric Chemistry." Princeton University Press. [Consulta: 25/02/2020]. Disponible en:
<<http://acmg.seas.harvard.edu/publications/jacobbook/index.html>>.
- Janssens-Maenhout, Greet, Monica Crippa, Diego Guizzardi, Marilena Muntean, Edwin Schaaf, Frank Dentener, Peter Bergamaschi, et al. 2019. "Supplement - of EDGAR v4.3.2 Global Atlas of the Three Major Greenhouse Gas Emissions for the Period 1970-2012." Earth System Science Data 11 (3): 959–1002. [Consulta: 20/04/2020]. Disponible en: <<https://www.earth-syst-sci-data.net/11/959/2019/essd-11-959-2019-supplement.pdf>>.
- Lee, David S., David W. Fahey, Piers M. Forster, Peter J. Newton, Ron C.N. Wit, Ling L. Lim, Bethan Owen, and Robert Sausen. 2009. "Aviation and Global Climate Change in the 21st Century." Atmospheric Environment 43 (22–23): 3520–37. [Consulta: 07/06/2020]. Disponible en: <<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.04.024>>.
- Lene Sørensen, and Niels Kilde. 2006. "Emission Inventory Guidebook." [Consulta: 23/06/2020]. Disponible en: <<https://www.eea.europa.eu/publications/EMEP/CorinaIR4/B851vs2.4.pdf>>.
- Miller, Mike, Peter Brook, and Chris Evers. 2009. "Reduction of Sulphur Limits in Aviation Fuel Standards (SULPHUR)." European Aviation Safety Agency. EASA.2008/C11. [Consulta: 25/04/2020]. Disponible en: <<https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/2009-SULPHUR-Reduction%20of%20sulphur%20limits%20in%20aviation%20fuel%20standards-Final%20Report.pdf>>.
- Ministerio de Fomento. "Separación Vertical Mínima Reducida (RVSM) - Aviación Civil." [Consulta: 21/04/2020]. Disponible en :
<https://web.archive.org/web/20080311090454/http://www.fomento.es/MFOM/LANG_CAST/ELLANO/DIRECCIONES_GENERALES/AVIACION_CIVIL/NAVEGACION/PROGRAMAS/RVSM/>.
- Ministerio de Transportes, Movilidad y Agencia Urbana. 2020. "OACI. Participación en organismos internacionales." [Consulta: 29/03/2020]. Disponible en: <<https://www.mitma.gob.es/areas-de-actividad/aviacion-civil/organismos-internacionales/oaci>>.

Ministerio para la Transición Ecológica. 2019. “Iniciativas Internacionales. Convenio de Ginebra de 1979 sobre contaminación atmosférica transfronteriza a gran distancia” [Consulta: 29/03/2020].

Disponible en:

https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/emisiones/pol-med/iniciativas_internacionales.aspx.

Muntean, Marilena; Guizzardi, Diego; Schaaf, Edwin; Crippa, Monica; Solazzo, Efisio; Olivier, Jos (2019):

“Emissions Database for Global Atmospheric Research, version v5.0_FT_2017 (fossil CO2 time-series).” European Commission, Joint Research Centre (JRC) [Dataset]. Disponible en:

https://data.europa.eu/doi/10.2904/JRC_DATASET_EDGAR.

NASA. 2018. “Contrail Education - Science.” [Consulta 21/03/2020]. Disponible en: [https://science-](https://science-edu.larc.nasa.gov/contrail-edu/science.html)

[edu.larc.nasa.gov/contrail-edu/science.html](https://science-edu.larc.nasa.gov/contrail-edu/science.html).

OACI. 2007. “Gestión Del Tránsito Aéreo – Procedimientos para los servicios de navegación aérea.”

Documento 4444.ATM/501. [Consulta: 21/04/2020]. Disponible en:

<https://www.icao.int/SAM/Documents/2010/ASTERIX/07%20%20DOC4444.pdf>.

2010. “Aviation Outlook Overview.” [Consulta: 23/06/2020]. Disponible en:

https://www.icao.int/environmental-protection/Documents/EnvironmentReport-2010/ICAO_EnvReport10-Outlook_en.pdf.

2016. “CHAPTER 3. NEW PARTICULATE MATTER STANDARD FOR AIRCRAFT GAS TURBINE ENGINES.” Rindlisbacher, Theo, and Jacob, S. Daniel. [Consultado: 02/04/2020]. Disponible en:

https://www.icao.int/environmental-protection/Documents/EnvironmentalReports/2016/ENVReport2016_pg85-88.pdf.

2020. “Effects of Novel Coronavirus (COVID-19) on Civil Aviation: Economic Impact Analysis Air Transport Bureau Contents.” [Consulta: 07/06/2020]. Disponible en:

https://www.icao.int/sustainability/Documents/COVID-19/ICAO_Coronavirus_Econ_Impact.pdf.

Rachner, Michael (1998). “Die Stoffeigenschaften von Kerosin Jet A-1.” DLR-Mitteilungen 98-01 (1).

[Consulta: 16/04/2020]. Disponible en:

https://elib.dlr.de/3185/1/Kerosene-Properties_Rachner_%20DLR-Mitteilung-98-01%2BErrata.pdf.

Rindlisbacher, Theo. 2017. “Ultrafine Particles from Aircraft Engines and Precautionary Measures.”

Federal Office of Civil Aviation. Switzerland. [Consultado: 02/04/2020]. Disponible en:

<https://www.imk->

aaf.kit.edu/ufp/downloads/K_2_Theo_Rindlisbacher_Ultrafine%20particles%20from%20Aircraft%20Engines%20%E2%80%93%20Precautionary%20Measures.pdf>.

Schaefer, M., Bartosch, S. 2013. Overview on Fuel Flow Correlation Methods for the Calculation of NO_x, CO and HC Emissions and Their Implementation into Aircraft Performance Software. Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt (DLR), Institut für Antriebstechnik, Köln. [Consulta: 24/04/2020]. Disponible en:

<https://www.researchgate.net/publication/271210746_Overview_on_fuel_flow_correlation_methods_for_the_calculation_of_NOx_CO_and_HC_emissions_and_their_implementation_into_aircraft_performance_software/citations>.

Schumann, U. 1996. "On Conditions for Contrail Formation from Aircraft Exhausts." Meteorologische Zeitschrift 5 (1): 4–23. [Consulta: 28/02/2020]. Disponible en:

<<https://doi.org/10.1127/metz/5/1996/4>>.

2003. "Causes and Consequences of Global Environmental Change." In Encyclopedia of Global Environmental Change, 3:688. [Consulta: 25/04/2020]. Disponible en:

<<https://elib.dlr.de/9477/1/arem.pdf>>.

Statista. 2019. "Aviation Industry - Aircraft Fleet Age 2019 | Statista." [Consulta: 30/05/2020].

Disponible en: <<https://www.statista.com/statistics/751440/aviation-industry-aircraft-fleet-age-by-region/>>.

Sullivan, D. A., and P. A. Mas. 1975. "A Critical Review of NO_x Correlations for Gas Turbine Combustors." In Proceedings of the ASME Turbo Expo. Vol. 1975-Janua. [Consulta: 30/04/2020].

Disponible en: <<https://doi.org/10.1115/75-WA/GT-7>>.

Unión europea. 2010. "Paquete de Medidas Sobre Clima y Energía Hasta 2020. Directiva 2009/28/CE

del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de abril de 2009, relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables y por la que se modifican y se derogan las Directivas 2001/77/CE y 2003/30/CE." [Consultado: 31/03/2020]. Disponible en: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/HTML/?uri=LEGISSUM:2001_8&from=EN>.

Wiesen, P., J. Kleffmann, R. Kurtenbach, and K. H. Becker. 1994. "Nitrous Oxide and Methane Emissions from Aero Engines." Geophysical Research Letters 21 (18): 2027–30. [Consulta: 21/01/2020].

Disponible en: <<https://doi.org/10.1029/94GL01709>>.

Wilcox, L. J., K. P. Shine, and B. J. Hoskins. 2012. "Radiative Forcing Due to Aviation Water Vapour Emissions." Atmospheric Environment 63 (December): 1–13. [Consulta: 17/04/2020]. Disponible

en: <<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.08.072>>.

- Winther, Morten, Kristin Rypdal, Lene Sørensen, Manfred Kalivoda, Monica Bukovnik, Niels Kilde, Riccardo De Lauretis, et al. 2019. "1.A.3.a Aviation 2019." EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2019. [Consulta: 22/01/2020]. Disponible en : <<https://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2019/part-b-sectoral-guidance-chapters/1-energy/1-a-combustion/1-a-3-a-aviation>>.
- Wuebbles, Don, Mohan Gupta, and Malcolm Ko. 2007. "Evaluating the Impacts of Aviation on Climate Change." Eos 88 (14): 157. [Consulta: 27/01/2020]. Disponible en: <<https://doi.org/10.1029/2007EO140001>>.
- Yunos, Siti Nur Mariani Mohd, Mohammad Fahmi Abdul Ghafir, and Abas Ab Wahab. 2017. "Aircraft LTO Emissions Regulations and Implementations at European Airports." In AIP Conference Proceedings. Vol. 1831. American Institute of Physics Inc. [Consulta: 30/05/2020]. Disponible en: <<https://doi.org/10.1063/1.4981147>>.

Anexo A



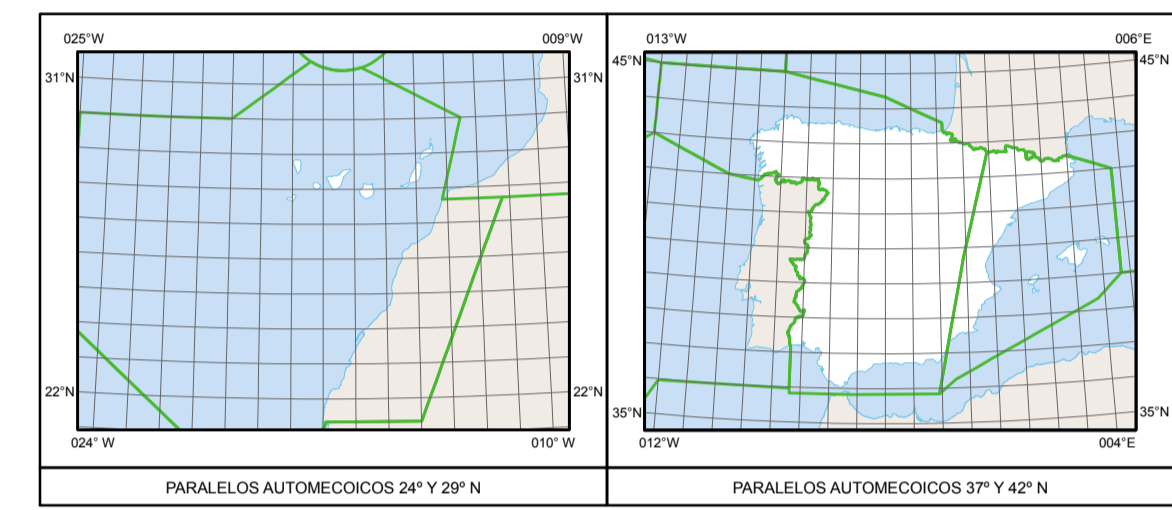


CARTA RADIONAVEGACIÓN ESPACIO AÉREO SUPERIOR

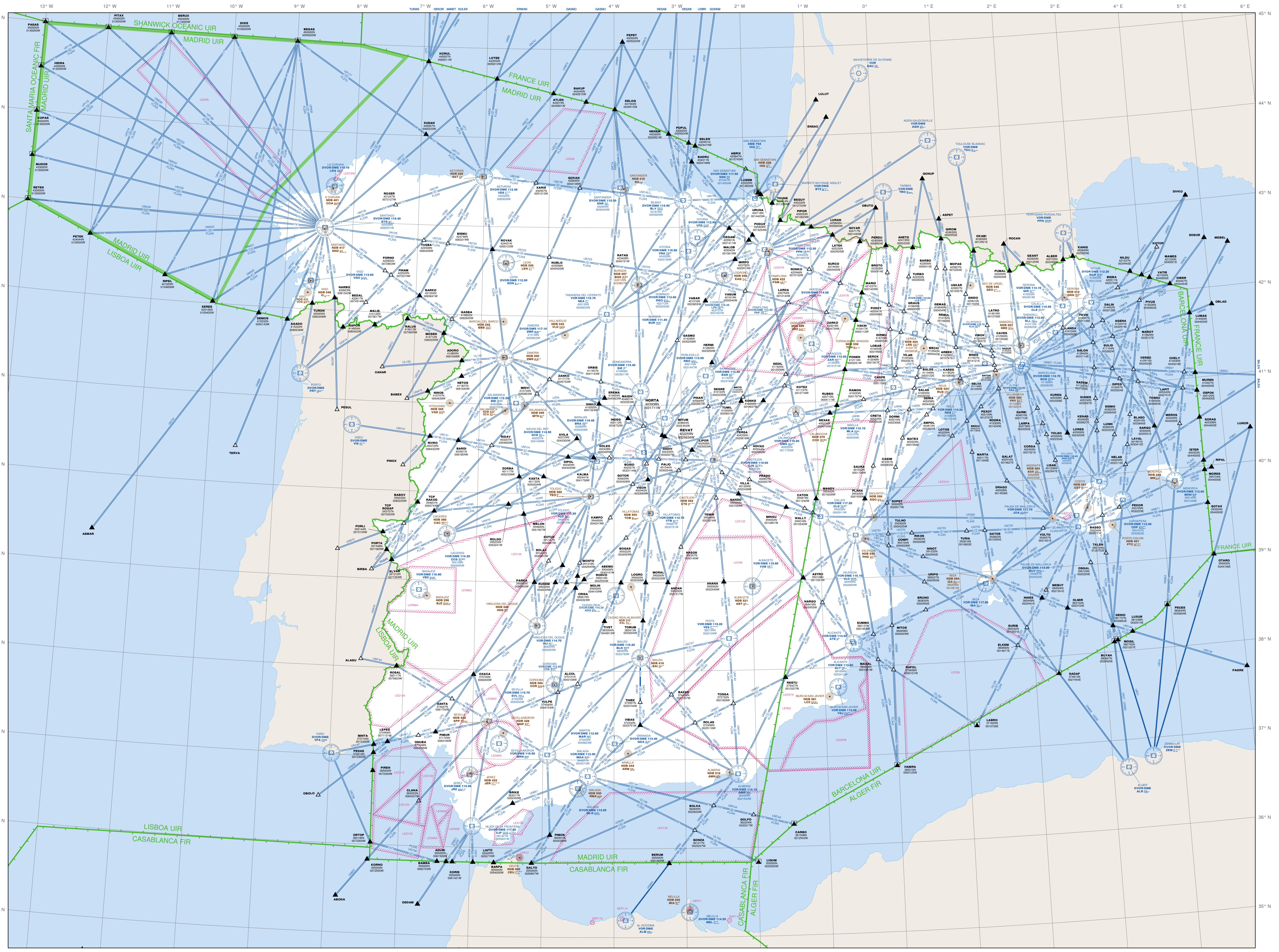
EDICIÓN AGOSTO 2010. Información actualizada hasta el 26 de Agosto de 2010
Para más información ver ENR 3 del AIP-ESPAÑA
Consultar NOTAM y SUP en vigor

ESCALA 1:2.000.000

PROYECCIÓN LAMBERT
DECLINACIÓN MAGNÉTICA ENERO 2010



Publica DIVISION DE INFORMACION AERONAUTICA - Juan Ignacio Luca de Tena, 14 - 28027 - Madrid - ESPAÑA
Tel: +34 913 213 363 Fax: +34 913 213 167 Impreso en el CEEAF D.L. M. 6876-2003
www.aena.es as@aena.es ISBN: 978-84-92499-63-3



LEYENDA		
VOR		
VOR/DME		
VORTACAN		
NDB		
RUTA ATS AEROVIA	Designador de aerovía Rumbo magnético. Distancia en millas náuticas Mínimo utilizable en el tramo	UB-623 FL345
RUTA DE NAVEGACION DE AREA (RNAV)	Designador de aerovía Rumbo magnético. Distancia en millas náuticas Mínimo utilizable en el tramo	UN-869 FL245
REGION SUPERIOR DE INFORMACION DE VUELO (UIR)		UIR MADRID UIR BARCELONA
AREA TERMINAL DE CONTROL (TMA)	Nombre TMA Límite superior Límite inferior Dependencia que proporciona el servicio	MADRID TMA 300 M AGL MADRID ACC
AREAS DE TRANSICION RVSM		
PUNTOS DE NOTIFICACION	Obligatorio A Petición RVSM	
PUNTO DE NOTIFICACION NO BALIZADO	Nombre Coordenadas geográficas	SADAF 374113N 002184E
PUNTO DE TRANSFERENCIA DE CONTROL		TOP LODRIO 3000N 00338W
ZONAS PELIGROSAS, PROHIBIDAS Y RESTRICCIONES	Identificación del área Letras indicativas de nacionalidad	LEDB
RADIOAYUDAS	Nombre Tipo de Radioayuda y frecuencia Indicativo y Morse Coordenadas Geográficas	CASTEJON DVOR/DME 116.60 CUN 251.1 402219N 002241W

Anexo B

Tabla 2. International Standard Atmosphere

ALTITUDE (Feet)	TEMP. (°C)	PRESSURE			PRESSURE RATIO $\delta = P/P_0$	DENSITY $\sigma = \rho/\rho_0$	Speed of sound (kt)	ALTITUDE (meters)
		hPa	PSI	In.Hg				
40 000	- 56.5	188	2.72	5.54	0.1851	0.2462	573	12 192
39 000	- 56.5	197	2.58	5.81	0.1942	0.2583	573	11 887
38 000	- 56.5	206	2.99	6.10	0.2038	0.2710	573	11 582
37 000	- 56.5	217	3.14	6.40	0.2138	0.2844	573	11 278
36 000	- 56.3	227	3.30	6.71	0.2243	0.2981	573	10 973
35 000	- 54.3	238	3.46	7.04	0.2353	0.3099	576	10 668
34 000	- 52.4	250	3.63	7.38	0.2467	0.3220	579	10 363
33 000	- 50.4	262	3.80	7.74	0.2586	0.3345	581	10 058
32 000	- 48.4	274	3.98	8.11	0.2709	0.3473	584	9 754
31 000	- 46.4	287	4.17	8.49	0.2837	0.3605	586	9 449
30 000	- 44.4	301	4.36	8.89	0.2970	0.3741	589	9 144
29 000	- 42.5	315	4.57	9.30	0.3107	0.3881	591	8 839
28 000	- 40.5	329	4.78	9.73	0.3250	0.4025	594	8 534
27 000	- 38.5	344	4.99	10.17	0.3398	0.4173	597	8 230
26 000	- 36.5	360	5.22	10.63	0.3552	0.4325	599	7 925
25 000	- 34.5	376	5.45	11.10	0.3711	0.4481	602	7 620
24 000	- 32.5	393	5.70	11.60	0.3876	0.4642	604	7 315
23 000	- 30.6	410	5.95	12.11	0.4046	0.4806	607	7 010
22 000	- 28.6	428	6.21	12.64	0.4223	0.4976	609	6 706
21 000	- 26.6	446	6.47	13.18	0.4406	0.5150	611	6 401
20 000	- 24.6	466	6.75	13.75	0.4595	0.5328	614	6 096
19 000	- 22.6	485	7.04	14.34	0.4791	0.5511	616	5 791
18 000	- 20.7	506	7.34	14.94	0.4994	0.5699	619	5 406
17 000	- 18.7	527	7.65	15.57	0.5203	0.5892	621	5 182
16 000	- 16.7	549	7.97	16.22	0.5420	0.6090	624	4 877
15 000	- 14.7	572	8.29	16.89	0.5643	0.6292	626	4 572
14 000	- 12.7	595	8.63	17.58	0.5875	0.6500	628	4 267
13 000	- 10.8	619	8.99	18.29	0.6113	0.6713	631	3 962
12 000	- 8.8	644	9.35	19.03	0.6360	0.6932	633	3 658
11 000	- 6.8	670	9.72	19.79	0.6614	0.7156	636	3 353
10 000	- 4.8	697	10.10	20.58	0.6877	0.7385	638	3 048
9 000	- 2.8	724	10.51	21.39	0.7148	0.7620	640	2 743
8 000	- 0.8	753	10.92	22.22	0.7428	0.7860	643	2 438
7 000	+ 1.1	782	11.34	23.09	0.7716	0.8106	645	2 134
6 000	+ 3.1	812	11.78	23.98	0.8014	0.8359	647	1 829
5 000	+ 5.1	843	12.23	24.90	0.8320	0.8617	650	1 524
4 000	+ 7.1	875	12.69	25.84	0.8637	0.8881	652	1 219
3 000	+ 9.1	908	13.17	26.82	0.8962	0.9151	654	914
2 000	+ 11.0	942	13.67	27.82	0.9298	0.9428	656	610
1 000	+ 13.0	977	14.17	28.86	0.9644	0.9711	659	305
0	+ 15.0	1013	14.70	29.92	1.0000	1.0000	661	0
- 1 000	+ 17.0	1050	15.23	31.02	1.0366	1.0295	664	- 305