



universidad  
de león



# Escuela de Ingenierías Industrial, Informática y Aeroespacial

## GRADO EN INGENIERÍA AEROESPACIAL

Trabajo de Fin de Grado

AVIACIÓN Y CAMBIO CLIMÁTICO: ANÁLISIS DE UNA  
RELACIÓN BIDIRECCIONAL Y SU INFLUENCIA EN LAS  
TURBULENCIAS EN AIRE CLARO

AVIATION AND CLIMATE CHANGE: ANALYSIS OF A  
BIDIRECTIONAL RELATIONSHIP AND ITS INFLUENCE ON  
CLEAR AIR TURBULENCE

Autor: Lucía Benítez Fernández  
Tutor: Eduardo García-Ortega

(Julio, 2023)

**UNIVERSIDAD DE LEÓN**  
**Escuela de Ingenierías Industrial, Informática y**  
**Aeroespacial**

**GRADO EN INGENIERÍA AEROESPACIAL**  
**Trabajo de Fin de Grado**

**ALUMNO:** Lucía Benítez Fernández

**TUTOR:** Eduardo García-Ortega

**TÍTULO:** Aviación y cambio climático: análisis de una relación bidireccional y su influencia en las turbulencias en aire claro

**TITLE:** Aviation and climate change: analysis of a bidirectional relationship and its influence on clear air turbulence

**CONVOCATORIA:** Julio, 2023

**RESUMEN:**

El objetivo de este trabajo es estudiar la relación bidireccional existente entre la aviación y el clima. Se comienza estudiando la contaminación atmosférica producida por las aeronaves y la repercusión que tiene sobre problemas globales como el cambio climático. Se analizan los principales gases contaminantes asociados a la aviación y distintas métricas utilizadas para medir el cambio climático como los índices RF, GWP y GTP, así como la certificación de las emisiones de las aeronaves. A continuación, se analiza esta relación desde el otro punto de vista, investigando el impacto que los cambios en el clima ejercen sobre la aviación, modificando las rutas de tiempo mínimo y aumentando la aparición de zonas de turbulencia durante los vuelos. Tras definir el origen y la formación de los distintos tipos de turbulencia existentes y la relación que guardan con el cambio climático, se enfoca el estudio en la turbulencia en aire claro (CAT), analizando la viabilidad de los distintos métodos de detección, por ejemplo, la tecnología LIDAR, y de los modelos numéricos empleados actualmente en el pronóstico de CAT.

**ABSTRACT:**

The purpose of this research work is to study the bidirectional relationship between aviation and climate. It begins by analyzing the air pollution produced by aircraft and the impact it has on global problems such as climate change. The main polluting gases associated with aviation and different metrics used to measure climate change such as the RF, GWP and GTP index are studied, as well as the certification of aircraft emissions. Next, the impact that climate changes have on aviation is studied, modifying minimum time routes and increasing the appearance of turbulence zones during flights. After defining the origin and formation of the different types of turbulence and the relationship they have with climate change, this study focuses on clear air turbulence (CAT), analyzing the feasibility of the different detection methods, mainly LIDAR technology, and the numerical models currently used in CAT forecasting.

**Palabras clave:** aviación, cambio climático, estelas de condensación, turbulencias en aire claro, LIDAR

<b>Firma del alumno:</b>	<b>VºBº Tutor/es:</b>
--------------------------	-----------------------

# Índice de contenidos

Glosario de abreviaturas, signos, símbolos, unidades y términos.....	6
Índice de tablas.....	8
Índice de figuras.....	9
Introducción.....	11
<b>1. Cambio Climático.....</b>	<b>12</b>
<b>1.1. EVIDENCIAS: FENÓMENOS A PEQUEÑA Y GRAN ESCALA .....</b>	<b>13</b>
<b>1.2. EFECTO INVERNADERO.....</b>	<b>17</b>
1.2.1 Balance energético de la Tierra.....	17
<b>1.3. OSCURECIMIENTO GLOBAL .....</b>	<b>18</b>
1.3.1. Evidencias del oscurecimiento global .....	21
1.3.2. Consecuencias del oscurecimiento global .....	22
<b>1.4. MÉTRICAS DEL CAMBIO CLIMÁTICO .....</b>	<b>25</b>
1.4.1. Índice RF .....	26
1.4.2. Índice GWP .....	28
1.4.3. Índice GTP.....	29
<b>2. Contaminación producida por las aeronaves.....</b>	<b>30</b>
<b>2.1. FORMAS DE CONTAMINACIÓN DE LAS AERONAVES .....</b>	<b>30</b>
<b>2.2. GASES EMITIDOS POR LAS AERONAVES .....</b>	<b>31</b>
2.2.1. CO <sub>2</sub> .....	31
2.2.2. Vapor de agua .....	34
2.2.3. CH <sub>4</sub> .....	36
2.2.4. NO <sub>x</sub> .....	37
2.2.5. CO .....	38
2.2.6. Aerosoles y otras partículas .....	38
<b>2.3. CALIDAD LOCAL DEL AIRE. CERTIFICACIÓN DE EMISIONES .....</b>	<b>39</b>
<b>3. Relación del cambio climático y la turbulencia en aviación .....</b>	<b>43</b>
<b>4. Turbulencia atmosférica.....</b>	<b>50</b>
<b>4.1. MECANISMOS DE FORMACIÓN DE TURBULENCIA .....</b>	<b>50</b>
<b>4.2. FACTORES DE DISEÑO QUE MOTIVAN LA APARICIÓN DE TURBULENCIA.....</b>	<b>52</b>
<b>4.3. SITUACIONES DONDE APARECE TURBULENCIA.....</b>	<b>52</b>
<b>4.4. TIPOS DE TURBULENCIA .....</b>	<b>53</b>
4.4.1. Turbulencia convectiva .....	54
4.4.2. Turbulencia de ondas de montaña.....	55

4.4.3.	Turbulencia en aire claro.....	56
<b>5.</b>	<b>Métodos de detección de CAT .....</b>	<b>60</b>
<b>5.1.</b>	<b>MEDICIONES DE AERONAVES.....</b>	<b>60</b>
5.1.1.	LIDAR .....	60
5.1.2.	Otros sistemas a bordo .....	62
<b>5.2.</b>	<b>MEDICIONES EN TIERRA .....</b>	<b>62</b>
5.2.1.	Radiosondeos .....	62
5.2.2.	Perfilador de vientos .....	63
5.2.3.	Radar Doppler .....	64
5.2.4.	LIDAR de investigación en tierra .....	64
<b>5.3.</b>	<b>MEDICIONES SATELITALES.....</b>	<b>65</b>
<b>6.</b>	<b>Modelos de predicción de CAT.....</b>	<b>67</b>
<b>6.1.</b>	<b>TASA DE DISIPACIÓN DE REMOLINOS (EDR).....</b>	<b>68</b>
<b>6.2.</b>	<b>ÍNDICE DE ELLROD .....</b>	<b>73</b>
<b>6.3.</b>	<b>ÍNDICE GWD .....</b>	<b>74</b>
<b>6.4.</b>	<b>ÍNDICE DISS .....</b>	<b>74</b>
<b>6.5.</b>	<b>TASA DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA CINÉTICA TURBULENTA (TKE) .....</b>	<b>76</b>
<b>6.6.</b>	<b>ENFOQUES ESTADÍSTICOS .....</b>	<b>77</b>
<b>7.</b>	<b>Limitaciones y desarrollo futuro de nuevas técnicas de pronóstico de CAT .....</b>	<b>78</b>
<b>7.1.</b>	<b>PRINCIPALES LIMITACIONES.....</b>	<b>78</b>
<b>7.2.</b>	<b>NECESIDADES DE DESARROLLO I+D .....</b>	<b>79</b>
<b>8.</b>	<b>Discusión y conclusiones .....</b>	<b>80</b>
	<b>Cronograma del desarrollo del trabajo.....</b>	<b>83</b>
	<b>Agradecimientos.....</b>	<b>84</b>
	<b>Bibliografía.....</b>	<b>85</b>

# Glosario de abreviaturas, signos, símbolos, unidades y términos

**IPCC:** Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el cambio climático

**FL:** Flight Level

**INDOEX:** The Indian Ocean Experiment

**DTR:** Diurnal Temperature Range

**NASA:** National Aeronautics and Space Administration

**RF:** forzamiento radiativo

**GWP:** Global Warming Potential

**GTP:** Global Temperature Potential

**OACI:** Organización de Aviación Civil Internacional

**GCP:** Global Carbon Project

**NOAA:** National Oceanic and Atmospheric Administration

**nvPM:** partículas no volátiles

**LTO:** Landing and Take-Off

**MTOW:** Maximum Take-Off Weight

**SCM:** Sistemas Convectivos de Mesoescala

**CLP:** Capa Límite Planetaria

**LIDAR:** Light Detection and Ranging

**AGL:** Above Ground Level

**KHI:** Kevin-Helmholtz instability

**DELICAT:** Demonstration of Lidar Based Clear Air Turbulence Detection

**WAFCs:** World Area Forecast Centres

**EDR:** Eddy Dissipation Rate

**PSD:** Power Spectral Energy Density

**GWD:** Gravity Wave Drag

**DISS:** Turbulent Dissipation

**ITFA:** Integrated turbulence forecast algorithm

**NWP:** Numerical Weather Prediction

**PIREP:** Pilot Reports of Turbulence

# Índice de tablas

Tabla 1.1: Variaciones de temperatura media, mínima, máxima y rango de temperatura diurna para dos períodos. Los datos están expresados en °C/década. Fuente: adaptado de [22].....	24
Tabla 1.2: Valores de GWP y GTP para dióxido de carbono, metano y óxidos de nitrógeno. Fuente: [23] .....	29
Tabla 3.1: Comparación de los tiempos de vuelo entre JFK y LHR para estaciones y presiones diversas, comparando los niveles preindustriales (CTL) con la concentración de CO <sub>2</sub> duplicada. Fuente: [35].....	48
Tabla 4.1: Nivel de turbulencia en función del número de Richardson. Fuente: elaboración propia (adaptado de [46], [47]) .....	58
Tabla 4.2: Estabilidad atmosférica en función del número de Richardson. Fuente: elaboración propia (adaptado de [46]) .....	58
Tabla 5.1: Bandas espectrales empleadas en la detección de fenómenos relacionados con CAT desde el espacio. Fuente: elaboración propia (adaptado de [53]) .....	65
Tabla 6.1: Clasificación de la turbulencia. Fuente: [60] .....	72



# Índice de figuras

Figura 1.1: Principales impactos del cambio climático sobre la aviación. Fuente: [3].....	12
Figura 1.2: Balance energético de la Tierra. Fuente: [10] .....	17
Figura 1.3: Efecto de los aerosoles sobre el oscurecimiento global. Fuente: [12].....	20
Figura 1.4: Comparativa del calentamiento provocado por la presencia de nubes altas VS enfriamiento provocado por la presencia de nubes bajas. Fuente: [13] .....	20
Figura 1.5: Aerosoles emitidos de 1950-1980 y de 1980-2000. Fuente: adaptado de [21] .....	22
Figura 1.6: Evolución de la temperatura media global de 1960 a 2000. Fuente: [22].....	24
Figura 1.7: Variaciones en la DTR global. Fuente: [22].....	25
Figura 1.8: Valores medios de RF en $\text{mW}/\text{m}^2$ para distintos medios de transporte en el año 2000 respecto a época preindustrial. Fuente: [24] .....	27
Figura 1.9: Forzamiento radiativo de las emisiones del sector aeronáutico en los años 1992 y 2000. Fuente: [25].....	28
Figura 2.1: Concentración de $\text{CO}_2$ en la atmósfera a lo largo de los años. Fuente: [27] ....	32
Figura 2.2: Estela de corta duración. Fuente: [31] .....	35
Figura 2.3: Estela persistente. Fuente: [31].....	36
Figura 2.4: Ciclo LTO para la certificación de emisiones según OACI. Fuente: [8] .....	40
Figura 3.1: Distribución de viento horizontal en niveles preindustriales (arriba) y duplicando la concentración de $\text{CO}_2$ (abajo). Fuente: [35] .....	44
Figura 3.2: Rutas de tiempo mínimo entre Nueva York y Londres a 200 hPa. La línea negra representa el círculo máximo. Fuente: [35] .....	46
Figura 3.3: Tiempos de vuelo entre Nueva York y Londres. Fuente: [35] .....	47
Figura 4.1: Turbulencia térmica. Fuente: [39].....	51
Figura 4.2: Efecto de la estela turbulenta de una aeronave sobre otra. Fuente: [41].....	53
Figura 4.3: Principales fuentes de turbulencia presentes en aviación. Fuente: [37] .....	54
Figura 4.4: Turbulencia de onda de montaña. Fuente: [42] .....	55
Figura 4.5: Rotor lenticular originado por una onda de montaña. Fuente: [45].....	56
Figura 5.1: Perfilador de viento de AEMET en el aeropuerto Adolfo Suárez Madrid-Barajas. Fuente: [51] .....	63

Figura 5.2: Imagen de viento Doppler durante un día despejado. Fuente: [52].....	64
Figura 5.3: Bandas de cirros asociadas a la aparición de CAT. Fuente: [53] .....	66
Figura 6.1: Escalas de turbulencia en aviación. Fuente: [53] .....	68
Figura 6.2: Concepto de capa límite laminar y turbulenta. Fuente: [57] .....	71
Figura 6.3: Distribuciones logarítmicas de los índices analizados. Fuente: [61] .....	75
Figura 6.4: Funciones de distribución de probabilidad para los modelos de CAT definidos. Fuente: [61] .....	76

# Introducción

En la actualidad, unos 100.000 vuelos diarios de media recorren nuestro planeta y se contabilizan más de 4 mil millones de pasajeros anuales por todo el mundo [1], con una clara tendencia a seguir aumentando. El sector aeronáutico ya representa el 1,5% del PIB industrial en España, con unos 16.500 millones de euros y una cifra superior a 190 mil puestos de trabajo creados [2]. La realidad es que el sector de la aviación no para de crecer y, aunque actualmente sus limitaciones se encuentran en lo que se refiere a la seguridad y a las infraestructuras disponibles, en un futuro cercano también podría verse limitado por las emisiones contaminantes.

A raíz de problemas de actualidad como el cambio climático global, la conciencia medioambiental está aumentando y se están estableciendo políticas y estrategias en el sector del transporte para hacerlo más sostenible. De aquí nace la importancia de disponer de métricas capaces de cuantificar el impacto real que la aviación ejerce sobre el clima de un modo preciso y objetivo.

Este trabajo se centra en estudiar la contaminación atmosférica que producen las aeronaves, y analiza que, en realidad, esta relación es bidireccional, debido a que el impacto que el clima tiene sobre la aviación también es relevante. Fenómenos a pequeña y gran escala derivados del cambio climático – como las tormentas más intensas o el incremento de turbulencia – hacen modificar las rutas de tiempo mínimo de los vuelos, teniendo una clara repercusión sobre la organización y los costes, además de los daños humanos y estructurales sobre las aeronaves asociados a ese aumento de probabilidad de toparse con zonas turbulentas durante el vuelo.

En concreto, se enfoca el análisis en la turbulencia en aire claro, una de las principales causas de accidentes aéreos debidos a la meteorología. A pesar de que, afortunadamente, constituyen un bajo porcentaje del total de siniestros, es importante desarrollar sistemas para detectar dicha turbulencia, así como elaborar modelos numéricos con una mayor resolución para elaborar pronósticos de gran fiabilidad.

# 1. Cambio Climático

En este apartado se abordará el estudio de las principales evidencias del cambio climático y la relación que guardan con el mundo de la aviación. Para ello, resulta de interés hacer una distinción entre los fenómenos que se producen a gran escala – resueltos mediante modelos atmosféricos - de los que ocurren a pequeña escala. El principal inconveniente de estos últimos se encuentra en que están enmarcados en una escala espaciotemporal inferior a la que son capaces de resolver los modelos atmosféricos usados en la actualidad. Como profundizaremos más adelante, estos fenómenos incluyen la formación de hielo en la estructura de las aeronaves, la aparición de turbulencia originada por diversos factores o la cizalladura vertical del viento a bajas altitudes. Para obtener conclusiones de alta fiabilidad, estos fenómenos deben estudiarse con modelos de reducción de escala, utilizando una serie de parametrizaciones físicas que explican estos fenómenos que ocurren a escalas tan pequeñas. Para ello, se emplean técnicas como de postprocesamiento estadístico de los datos o empleando nuevos modelos atmosféricos que aún siguen en desarrollo.

La figura 1.1 resume de un modo esquemático los impactos más relevantes que el cambio climático causa sobre el sector de la aviación.

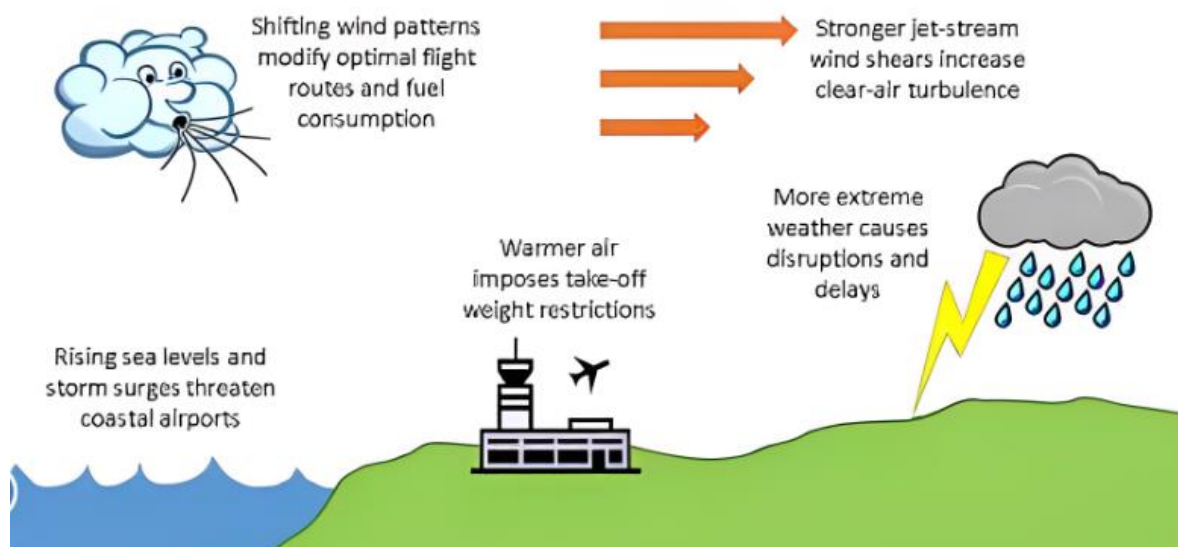


Figura 1.1: Principales impactos del cambio climático sobre la aviación. Fuente: [3]

## 1.1. EVIDENCIAS: FENÓMENOS A PEQUEÑA Y GRAN ESCALA

Como acabamos de analizar, conviene diferenciar los fenómenos a gran y pequeña escala. Dentro de los fenómenos producidos a gran escala, encontramos los siguientes:

- Crecimiento de las temperaturas máximas alcanzadas: este efecto quizás sea el más conocido. Los estudios más recientes del IPCC [4] sostienen que la temperatura de nuestro planeta aumenta y lleva una tendencia a seguir creciendo durante las siguientes décadas. Esto se debe, en gran medida, a los gases de efecto invernadero, de los que hablaremos con detalle más adelante.

Podemos encontrar la relación que tiene este efecto con la aviación de una forma sencilla. Si tenemos temperaturas máximas más altas, la densidad del aire será menor. Recordando la fórmula básica que define la fuerza de sustentación producida por una aeronave:

$$L = \frac{1}{2} \rho v^2 S C_L$$

*Ecuación 1.1: Expresión de la sustentación producida por una aeronave*

Siendo  $\rho$  la densidad del aire,  $v$  es la velocidad del viento,  $S$  denota la superficie alar y  $C_L$  es el coeficiente de sustentación.

Es fácil comprobar que la densidad del aire es proporcional a la sustentación generada. Por tanto, una menor densidad implica una fuerza de sustentación también menor. Esto puede tener implicaciones importantes, sobre todo, en los despegues. El rendimiento en el despegue será peor, y por tanto se necesitarían o bien pistas con una mayor longitud, o bien una limitación en la carga útil o de combustible de las aeronaves.

Este fenómeno requeriría un estudio con más detalle para distintas zonas geográficas, ya que [3] recoge que, en las regiones subtropicales, y especialmente si son aeropuertos situados a grandes altitudes, este problema se agrava. En la actualidad, ya existen medidas implementadas en aeropuertos de gran altitud situados en América Central, América del Sur y Medio Oriente para mitigar este problema. Consiste en hacer una programación de los vuelos de larga distancia para las últimas horas de la tarde y durante la noche, donde las temperaturas son más frescas. Sin embargo, esto puede generar otros problemas adicionales relacionados con la nubosidad inducida por las estelas, ya que, durante las

horas nocturnas, el enfriamiento motiva la aparición de nubes altas. Este problema limita todavía más el intervalo en el que se pueden llevar a cabo ciertas operaciones de aeronaves sin problemas en estas regiones.

Los estudios de investigación realizados hasta el momento sostienen de una forma clara que la temperatura global continuará creciendo durante las próximas décadas. En [5] se estima que, en el próximo siglo, la temperatura aumentará entre 2,5 y 10 grados Fahrenheit.

Así mismo, el impacto de las consecuencias provocadas por el cambio climático en cada región geográfica será ligeramente distinto y cambiará con el tiempo, de igual manera que los distintos sistemas ambientales reaccionarán y sufrirán un proceso de adaptación a estos cambios de diferente forma. Por tanto, los costes netos asociados a los daños y perjuicios derivados del cambio climático serán importantes y aumentarán con los años.

- Aumento del nivel medio del mar: Las principales causas de este aumento son la mayor cantidad de agua proveniente del deshielo, y también la expansión del agua al estar a una mayor temperatura.

Las medidas tomadas desde el año 1880 del nivel medio del mar reflejan que ha aumentado aproximadamente 0,2 metros. Además, en [6] sostienen que para el año 2100, aumentará entre 0,3 y 2,4 metros. Durante los próximos siglos, esta tendencia se mantendrá y el nivel del mar seguirá aumentando incluso a mayores tasas que en la actualidad.

Además, este aumento en el nivel del mar se sumará a las mareas altas y las tormentas repentinas motivadas por el cambio en el clima, lo que se traduce en un aumento de las inundaciones en determinadas zonas geográficas.

- Cambios de la corriente en chorro: el estudio de este problema es de gran interés actualmente entre la comunidad científica y es el que más nos ocupa analizar en este trabajo. La corriente en chorro atmosférica correspondiente a latitudes medias se crea y se mantiene debido a la diferencia entre las temperaturas de los polos y los trópicos. La teoría de la física, junto con las observaciones captadas por distintos satélites desde el espacio y también los modelos meteorológicos y climáticos apuntan a que esta variación de

temperatura evoluciona de un modo un tanto complejo. Dentro de los cambios en la corriente en chorro pueden darse varios supuestos.

Uno de ellos es que los patrones de viento más influyentes en la corriente en chorro tengan efecto sobre los tiempos de vuelo y las rutas óptimas, y por tanto, en el consumo de combustible.

Otro supuesto consiste en relacionar esta corriente con la turbulencia en aire claro. A altitudes de crucero, esta corriente presentará una mayor cizalladura, lo que se puede traducir en una reducción de la estabilidad atmosférica que aumentará la probabilidad de aparición de dichas turbulencias, como estudiaremos en los siguientes apartados.

- Huracanes y tormentas de mayor intensidad: el calentamiento del clima trae consigo cambios en los patrones de precipitación, así como en la frecuencia e intensidad de las tormentas y de los huracanes. Diversos estudios realizados en Estados Unidos [7] afirman que cada vez son más frecuentes las fuertes precipitaciones, y también que la frecuencia, la intensidad y la duración de los huracanes ha ido en aumento. Estos cambios que hacen más intensos los fenómenos meteorológicos requieren modificar las rutas a seguir y los tiempos óptimos de vuelo.

- Olas de calor más intensas, sequía: informes recientes expedidos por OACI [3], [8] afirman que el aumento de las temperaturas viene acompañado de olas de frío más suaves y olas de calor más intensas, ya que habrá una considerable reducción en la humedad del suelo.

Por otra parte, encontramos los fenómenos a pequeña escala. Se trata de fenómenos meteorológicos que, con los modelos atmosféricos que tenemos en la actualidad, son complejos de analizar. Esto es debido a que están ligados a escalas de espacio y tiempo mucho menores. Para encontrar respuestas fiables a estos fenómenos, es necesario emplear esquemas de parametrizaciones físicas, además de modelos atmosféricos y un procesamiento de los datos estadísticos más avanzados. Algunos de los más relevantes y que tienen una evidente relación con la aviación se explican brevemente.

- Turbulencia en aire claro: se categoriza como un fenómeno a pequeña escala. Sin embargo, la causa que genera este tipo de turbulencias - la cizalladura de la corriente - se

encuentra en una escala mucho más grande y se puede estudiar y llegar a un resultado confiable mediante modelos meteorológicos, como veremos posteriormente.

· Hielo en las aeronaves: la formación de hielo en el fuselaje de las aeronaves es un serio problema al que se enfrenta el sector de la aviación, sobre todo la aviación de cercanías, que emplea aeronaves cuyos motores disponen de una potencia limitada y unos sistemas antihielo un tanto rudimentarios en muchos casos. La formación de gotas sobreenfriadas de gran tamaño, en rangos de temperatura comprendidos entre  $-4^{\circ}\text{C}$  y  $-14^{\circ}\text{C}$ , depende de diversos factores, principalmente de la cantidad de vapor de agua, de las corrientes existentes y de la concentración de aerosoles y otras pequeñas partículas que motivan la aparición de dichas gotas. El aumento generalizado de las temperaturas y también de la humedad en ciertas latitudes, junto con flujos dinámicos más activos, hacen más favorables las condiciones para la formación de hielo [9].

Por lo tanto, es de gran importancia revisar, y si fuera necesario modificar, las regulaciones existentes en la actualidad relativas a los aviones bimotores realizando operaciones sobre espacios aéreos oceánicos. En el caso de producirse una pérdida de potencia en uno de los motores o la bajada de presión en la cabina, exigiría a la aeronave situarse en niveles de vuelo en los que podría formarse hielo, generalmente entre FL130 y FL160 [3].

· Tormentas de arena y polvo: los períodos de sequía más prolongados irán estrechamente relacionados con el aumento tanto en frecuencia como en intensidad de las tormentas de arena y polvo, además de la existencia de vientos más fuertes en latitudes subtropicales. Estos fenómenos hacen necesario un análisis en profundidad de los impactos que pueden tener en estas regiones la regularidad de los vuelos, así como su seguridad.



## 1.2. EFECTO INVERNADERO

### 1.2.1 Balance energético de la Tierra

Para explicar por qué surge este fenómeno y sus consecuencias, vamos a analizar primero el equilibrio energético de la Tierra. En la siguiente figura podemos ver un resumen de lo que ocurre cuando la energía proveniente del Sol llega a nuestro planeta.

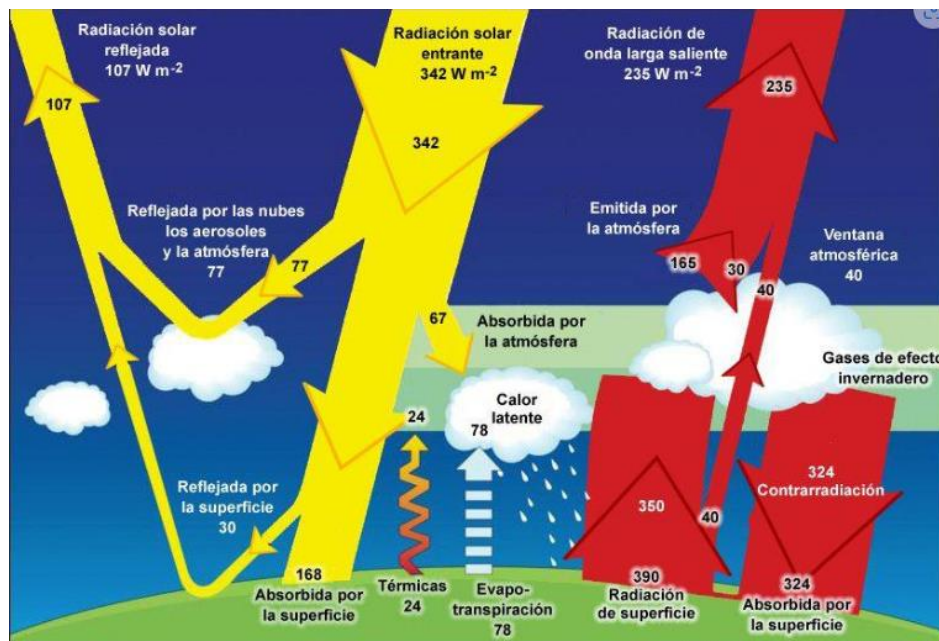


Figura 1.2: Balance energético de la Tierra. Fuente: [10]

La atmósfera terrestre debe mantener un equilibrio entre la energía que recibe del Sol y la que emite en forma de radiación infrarroja, para mantener la temperatura de la superficie terrestre en un rango que haga posible el desarrollo de la vida. Es evidente que este estado de equilibrio implica que la cantidad de radiación recibida debe ser igual a la radiación que es devuelta al espacio (que será la suma de la reflejada y de la infrarroja). El balance de energía se produce tanto por causas naturales como por actividades humanas, se trata de un forzamiento radiativo que conlleva interacciones de los flujos de radiación, provocando cambios en el sistema climático, así como diversos fenómenos atmosféricos y oceánicos.

El fenómeno conocido como efecto invernadero se trata de un proceso natural mediante el cual ciertos gases, conocidos como gases de efecto invernadero, emiten y absorben energía en el espectro infrarrojo. Es decir, tienen como función retener una parte de la energía calorífica que llega del Sol, para así mantener un rango de temperatura que permita

el desarrollo normal de la vida en la Tierra, por lo que este fenómeno es imprescindible y beneficioso. En concreto sabemos que, si no existiera atmósfera, la temperatura media de la superficie de nuestro planeta se situaría en torno a los  $-18^{\circ}\text{C}$ . En cambio, con la presencia de estos gases conseguimos que esta temperatura inicial aumente unos  $33^{\circ}\text{C}$ , consiguiendo una temperatura media de  $15^{\circ}\text{C}$  que hace posible la creación y supervivencia de los ecosistemas y de la vida humana.

Sin embargo, el desarrollo de actividades humanas como el transporte o la industria, donde se queman combustibles fósiles, aumenta la concentración de estos gases de efecto invernadero en la atmósfera. Este aumento hace que los gases retengan más radiación, calentando la superficie terrestre de forma similar a lo que sucede en un invernadero, y llevándola a temperaturas superiores a las que habría si no existiera la atmósfera. Esto cambia las condiciones de vida en nuestro planeta, y convierte este fenómeno – a priori necesario y beneficioso – en un riesgo para la vida en nuestro planeta. Esto es lo que se conoce como el efecto invernadero antropogénico.

Aunque lo más normal es que estos gases contaminantes se emitan en capas bajas de la atmósfera, el sector de la aviación difunde dichas sustancias en capas superiores, lo que favorece que se mantengan durante un tiempo mayor suspendidos en la atmósfera, pudiendo tener un impacto más grave sobre el medioambiente.

Los principales gases de efecto invernadero son el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), el metano ( $\text{CH}_4$ ) y el vapor de agua; aunque se pueden incluir otros como los óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ), el ozono ( $\text{O}_3$ ), aerosoles y otras pequeñas partículas.

### 1.3. OSCURECIMIENTO GLOBAL

El oscurecimiento global se puede definir como la reducción de la radiación procedente del Sol que llega a la superficie de nuestro planeta. Este fenómeno se produce de forma gradual y principalmente se basa en un enfriamiento de la superficie terrestre debido al incremento del albedo que ocasionan las nubes bajas.

A priori, si analizamos este fenómeno de una manera simple, podríamos afirmar que existe una evidente contrariedad entre este efecto, que enfría la superficie, y el efecto

invernadero, que la calienta. De hecho, el oscurecimiento global ha ocultado en parte el calentamiento global, llevando a subestimar el impacto de los gases de efecto invernadero. No obstante, esta discrepancia tiene diversos matices que es necesario estudiar con más profundidad.

Entre las causas que motivan la aparición de este efecto, todo apunta a que el incremento de las partículas suspendidas en la atmósfera – como el hollín y otros aerosoles y compuestos que contienen azufre – son los principales responsables. Estas sustancias absorben la radiación procedente del Sol y la reflejan. Además de esto, las partículas contaminantes actúan como núcleos de condensación, permitiendo que el vapor de agua se condense sobre ellas, formando pequeñas gotitas de tamaño microscópico. Estas gotitas pueden crecer unas a expensas de otras dando lugar a gotas de mayor tamaño, para después transformarse en nubes con una mayor reflectividad. Esta clase de nubes tiene tendencia a acumular una mayor cantidad de agua, haciendo que las precipitaciones ligeras sean menos frecuentes, pero que se incremente el riesgo de fuertes tormentas que puedan dar lugar a inundaciones.

Este fenómeno depende de la región geográfica estudiada, aunque diversas fuentes sostienen que, de forma global, la reducción de la radiación solar se encuentra en torno al 4% durante tres décadas, desde 1970 hasta 1990 [11]. Sin embargo, a partir de 1990 la tendencia ha cambiado. La NASA ha tomado mediciones con satélites y se puede confirmar que en esa década, coincidiendo con la aplicación de políticas de reducción de emisiones contaminantes, la presencia de aerosoles en la atmósfera ha disminuido, y con ello también el oscurecimiento global. En la siguiente gráfica se puede apreciar con claridad el cambio de tendencia a partir de 1991.

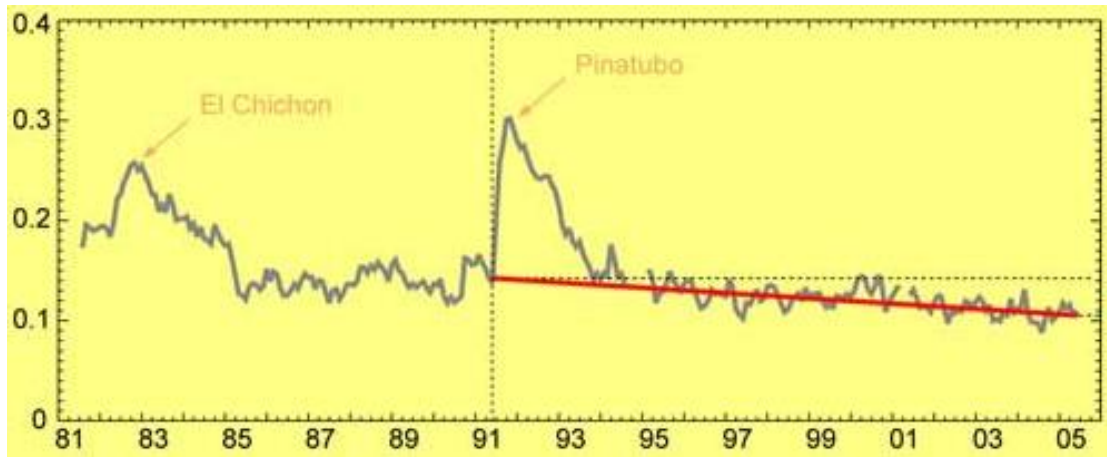


Figura 1.3: Efecto de los aerosoles sobre el oscurecimiento global. Fuente: [12]

En la Figura 1.4, podemos apreciar la diferencia que existe en el comportamiento de las nubes altas, como puede ser el caso de los cirros, frente a las nubes bajas, por ejemplo, los cúmulos. En el primero de los casos, la superficie se calienta debido a que el albedo es bajo, es decir, se refleja poca radiación, y por tanto hay una baja emisión infrarroja. En cambio, las nubes bajas son capaces de reflejar más radiación, por lo que la emisión infrarroja crece y se produce un enfriamiento de la superficie.

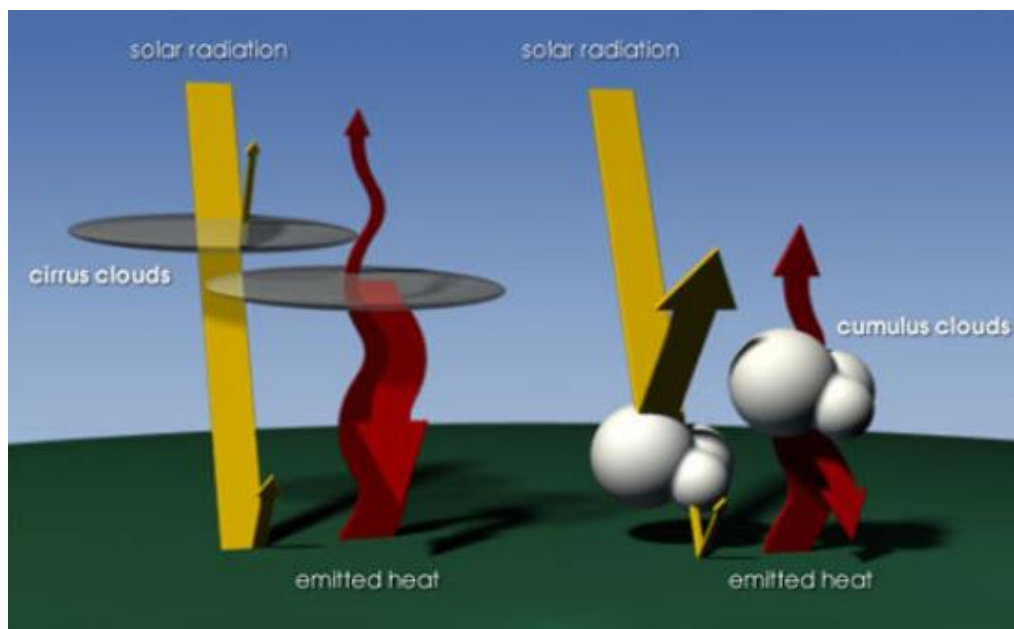


Figura 1.4: Comparativa del calentamiento provocado por la presencia de nubes altas VS enfriamiento provocado por la presencia de nubes bajas. Fuente: [13]

### 1.3.1. Evidencias del oscurecimiento global

Existen múltiples evidencias de la presencia de este fenómeno. En concreto, podemos analizarlo desde tres perspectivas distintas.

La primera de ellas es que la radiación solar que llega a la superficie de nuestro planeta es menor. En [14] se revela que la cantidad de radiación procedente del Sol que llegaba a la superficie de nuestro planeta se había reducido más de un 10% en comparación con los últimos treinta años.

También se llevaron a cabo estudios hacia 1960 sobre la intensidad de los rayos solares para elaborar un estudio de sistemas de regadío para la Organización Agrícola Israelí. En este estudio, pudo concluir que la luz del Sol se había reducido un 22% en Israel [15] y este fenómeno fue bautizado como oscurecimiento global (en inglés Global Dimming).

De la misma forma, en [16] se llegó a las mismas conclusiones en los Alpes de Baviera. Tras un gran número de estudios en distintas zonas geográficas, se estimó que la radiación solar incidente había decrecido un 16% en Gran Bretaña, alrededor de un 10% en Estados Unidos y en la Antártida; y en torno a un 30% en Rusia [17]. Las latitudes medias en el hemisferio Norte del planeta experimentaron la mayor reducción de la energía incidente, especialmente la comprendida en el espectro infrarrojo y visible.

La segunda evidencia de este fenómeno de oscurecimiento global la encontramos al analizar la evaporación que se produce cada día en una lámina de agua con un cierto espesor. Esta técnica evaporimétrica es conocida como la tasa de evaporación en bandeja.

Considerando la siguiente hipótesis: si la temperatura está creciendo a causa del calentamiento global, la evaporación debería ser entonces mayor. Sin embargo, gracias a estos estudios de la tasa de evaporación podemos saber que, hasta 1990, ha ocurrido justo lo contrario. En concreto, en [18] se afirma que las observaciones tomadas durante 50 años apuntan a una clara disminución de esa tasa de evaporación. Esto podría tener un impacto negativo sobre el medioambiente, ya que supone alteraciones en el ciclo natural del agua, pudiendo acarrear consecuencias como sequías en determinadas regiones geográficas.

Otra evidencia que merece la pena analizar es la relación que guardan las estelas de condensación de las aeronaves con este fenómeno de oscurecimiento global. Para ello, nos

remontamos al 11 de septiembre de 2001 cuando, tras los atentados en Nueva York, se cerró el tráfico aéreo de líneas comerciales. Las conclusiones extraídas de la observación atmosférica sin la presencia de estas estelas sostienen que la temperatura creció 1°C en tan sólo tres días [19].

Este hecho llevó a la comunidad científica a pensar que el impacto real de las estelas de condensación era mucho mayor del que se creía hasta el momento, haciendo disminuir la temperatura de una forma alarmante. También fue un resultado bastante cuestionado por los científicos, porque parecía incoherente con el calentamiento global.

En el año 1999 se realizó un experimento conocido como INDOEX [20], cuya finalidad era hacer mediciones de los aerosoles y otros gases contaminantes presentes en la atmósfera a causa del sector del transporte en el océano Índico. Se recopilaron datos durante 4 años y se pudo observar que los aerosoles, además de impedir el paso de la radiación solar, motivaban la reflectividad de las nubes, haciendo que los rayos incidentes fueran devueltos al espacio y no alcanzaran la superficie de la Tierra.

En la Figura 1.5 se puede comparar la reducción de aerosoles y partículas contaminantes emitidas a la atmósfera a partir de 1980 respecto a 1950, gracias a las políticas adoptadas.

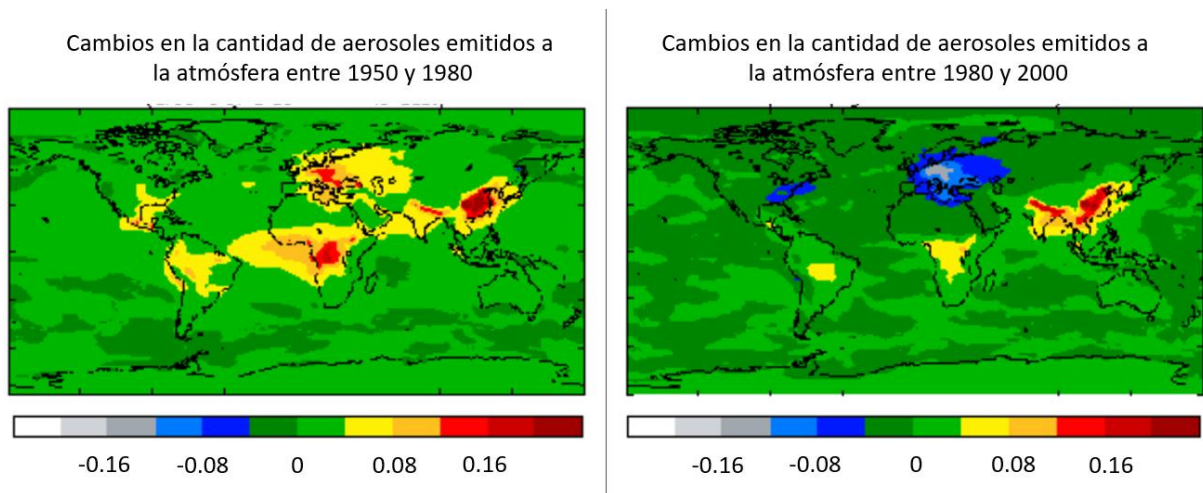


Figura 1.5: Aerosoles emitidos de 1950-1980 y de 1980-2000. Fuente: adaptado de [21]

### 1.3.2. Consecuencias del oscurecimiento global

Como hemos apuntado en el apartado anterior, el oscurecimiento global ha afectado al ciclo del agua, disminuyendo la tasa de evaporación. Estas alteraciones en el ciclo

hidrológico pueden conllevar un mayor riesgo de inundaciones y fuertes tormentas en unas regiones y de sequías en otras zonas.

También oculta los efectos del efecto invernadero – que calienta el planeta – con el enfriamiento de este. Como ya habíamos estudiado en la Figura 1.3, a partir de 1990 el oscurecimiento global empezó a mostrar una tendencia descendente, y por eso los efectos observados asociados al calentamiento del planeta se intensificaron durante los últimos años.

A continuación, explicaremos cuáles son los principales efectos de ese fenómeno en lo relativo a las variaciones de temperaturas experimentadas.

- La temperatura media en la Tierra cambia: para explicar este primer efecto nos apoyamos en la gráfica de la Figura 1.6. Podemos observar que se encuentra dividido en dos partes. En la primera de ellas, que comprende de 1960 hasta mediados de la década de los 80, donde todavía era evidente el oscurecimiento global, se puede apreciar un aumento moderado de las temperaturas, en torno a  $0,036^{\circ}\text{C}$  por década. Cabe destacar que, durante este período, el oscurecimiento global ha mitigado el aumento de la temperatura en torno a un 60-70%. Sin embargo, desde finales de los 80 en adelante se observa un crecimiento de las temperaturas mucho mayor, cuando el oscurecimiento global ya no era eficaz, experimentándose aumentos de hasta  $0,38^{\circ}\text{C}$  por década [22].

Esto es una evidencia de que la evolución de las temperaturas en estos últimos años tiene una clara dependencia con la capacidad de la atmósfera para almacenar una mayor cantidad de energía, provocando el incremento de las temperaturas.

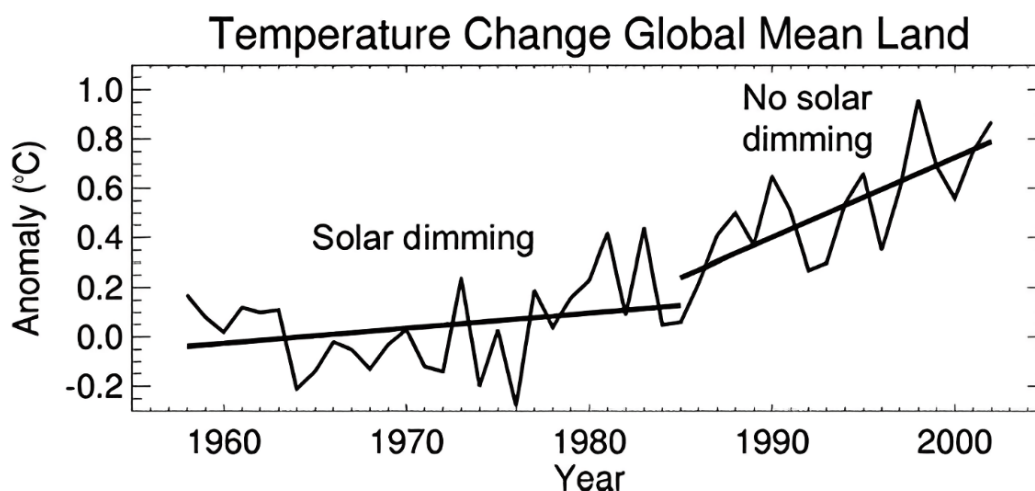


Figura 1.6: Evolución de la temperatura media global de 1960 a 2000. Fuente: [22]

· Ligeros cambios en las temperaturas mínimas y máximas diarias: para explicar este efecto, resulta útil estudiar la influencia en la temperatura de la energía solar y de la energía térmica por separado. La radiación solar tan sólo afectará de forma importante a la temperatura máxima, ya que sólo actúa durante el día. En cambio, la temperatura mínima dependerá en gran medida de los intercambios térmicos que se producen durante la noche, en ausencia de flujo solar. Durante este período, la superficie terrestre se enfría, y esto depende de la capacidad de absorción y emisión de energía que tenga la atmósfera.

	1958-1985	1985-2002	Cambio relativo
T significa	0,036 (0,04)	0,38 (0,08)	+0,34
T min	0,11 (0,04)	0,40 (0,08)	+0,29
T máx	-0,04 (0,04)	0,37 (0,08)	+0,41
DTR	-0,15 (0,01)	-0,03 (0,02)	+0,12

Tabla 1.1: Variaciones de temperatura media, mínima, máxima y rango de temperatura diaria para dos períodos. Los datos están expresados en °C/década. Fuente: adaptado de [22]

En la Tabla 1.1 aparecen representadas las variaciones en las temperaturas medias globales, mínimas y máximas diarias y también el rango de temperaturas diurnas para los dos períodos considerados, el primero bajo la influencia del oscurecimiento y el segundo sin este efecto. Los datos que aparecen entre paréntesis son el resultado de hacer una



regresión lineal, tomando estimaciones con una incertidumbre de 1-sigma, a partir de los datos de temperaturas recopilados.

Analizando estas cifras, se afirma que durante el segundo período, sin la presencia del oscurecimiento, las temperaturas mínimas y máximas crecen de forma significativa. Además, la temperatura máxima crece a mayor ritmo que la temperatura mínima, siendo coherente con la hipótesis establecida de que el oscurecimiento ya no ejercía ninguna influencia, haciendo que la temperatura máxima aumentara en igual medida que la mínima.

· Variación en el rango de temperatura diurna (DTR): para analizar este efecto, nos apoyamos en la siguiente gráfica.

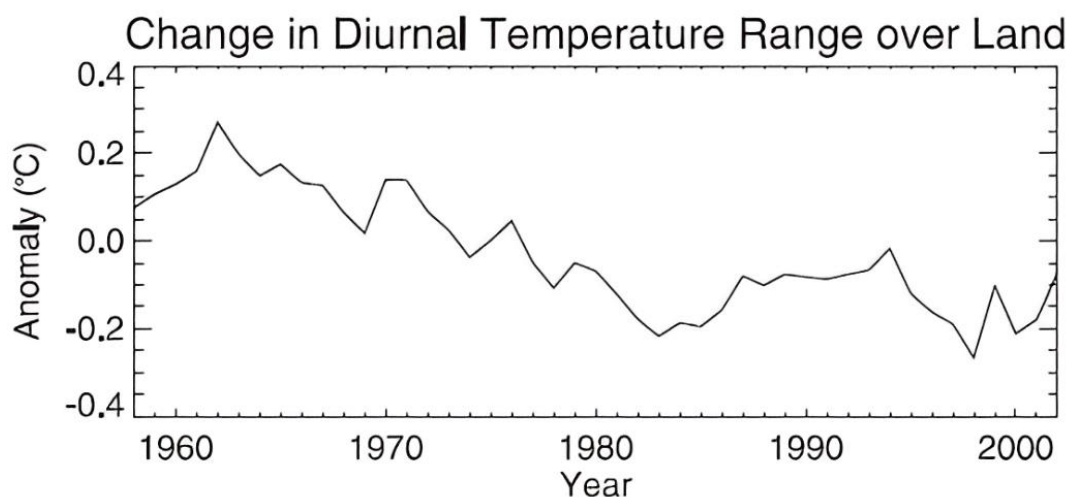


Figura 1.7: Variaciones en la DTR global. Fuente: [22]

Es sencillo de ver que en la primera etapa (desde 1960 hasta 1985), el rango de temperatura diurna experimenta un claro decrecimiento. En cambio, a partir de esa fecha, cuando el oscurecimiento global se reduce, este rango de temperaturas tiende a aumentar.

#### 1.4. MÉTRICAS DEL CAMBIO CLIMÁTICO

Para implementar políticas eficaces de mitigación y así poder atajar este problema global, necesitamos cuantificar el impacto del cambio climático sobre nuestro planeta. Se definen para ello ciertos parámetros métricos, que deben estar correctamente fundamentados

desde el punto de vista científico, además de ser sencillos de comprender. Estas herramientas serán de gran utilidad para hacer comparaciones del alcance de emisiones de distintas sustancias, además de servir como guía para orientar las políticas y las decisiones futuras, por ejemplo, en el proceso de diseño y de operaciones de nuevas aeronaves.

A la hora de seleccionar una métrica, es imprescindible que esté estrechamente ligada al parámetro que se desea estudiar, para que los resultados sean confiables. Para analizar el impacto que tiene el sector del transporte sobre el medio ambiente se utilizan comúnmente tres métricas distintas, las cuales se explican a continuación.

#### 1.4.1. Índice RF

Este término significa forzamiento radiativo – también conocido como forzamiento climático - y es una herramienta que se encarga de medir la diferencia entre la radiación solar que recibe la Tierra y la que devuelve al espacio. Es decir, cuantifica el desequilibrio radiativo que surge a causa de las variaciones en la composición de la atmósfera, en el albedo o en la nubosidad, debido a las acciones humanas. Por tanto, un forzamiento radiativo positivo indica que la radiación solar recibida es superior a la devuelta al espacio. Esta energía sobrante que ganamos causa el calentamiento del planeta. Del mismo modo, si estamos ante un índice RF negativo, estaremos perdiendo energía, lo que causará el enfriamiento de la Tierra.

Generalmente, se suelen tomar las mediciones desde la tropopausa o la parte superior de la atmósfera, en unidades de Vatio por metro cuadrado de superficie terrestre. La expresión 1.2 representa la relación existente entre el forzamiento radiativo y la variación de la temperatura media superficial, siendo  $\lambda$  el parámetro de sensibilidad climática.

$$\Delta T = \lambda \cdot RF$$

*Ecuación 1.2: Relación entre el cambio de temperatura y el forzamiento radiativo. Fuente: [23]*

En la figura 1.8 se observa la comparativa de los valores de forzamiento radiativo en distintos medios de transporte en el año 2000 en comparación con la época preindustrial.

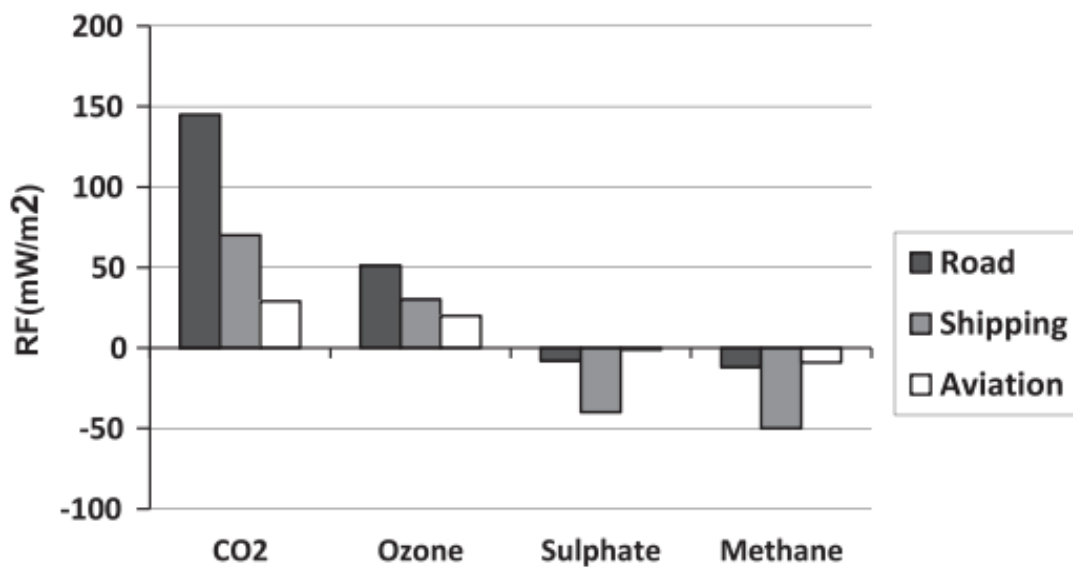


Figura 1.8: Valores medios de RF en  $mW/m^2$  para distintos medios de transporte en el año 2000 respecto a época preindustrial. Fuente: [24]

Los períodos de integración utilizados son distintos porque cada sustancia tiene su tiempo de vida. Por ejemplo, debemos tener en cuenta que el dióxido de carbono tiene una vida atmosférica bastante larga, y por ello su forzamiento radiativo depende de las emisiones presentes y también de la acumulación de esta sustancia en el pasado.

Las emisiones debidas al sector de la aviación son considerablemente inferiores a las que produce el transporte marítimo o terrestre. No obstante, su principal inconveniente se encuentra en que se realizan a altitudes de crucero, a unos 10 ó 12 km. A estas altitudes, la eficiencia radiativa de sustancias como el ozono se incrementa, y por eso es la aviación el sector que genera un mayor incremento del forzamiento radiativo del ozono por unidad de óxidos de nitrógeno emitido.

La figura 1.9 representa el índice RF de las emisiones asociadas al sector de la aviación para distintas sustancias contaminantes, estableciendo una comparación entre los años 1992 y 2000.

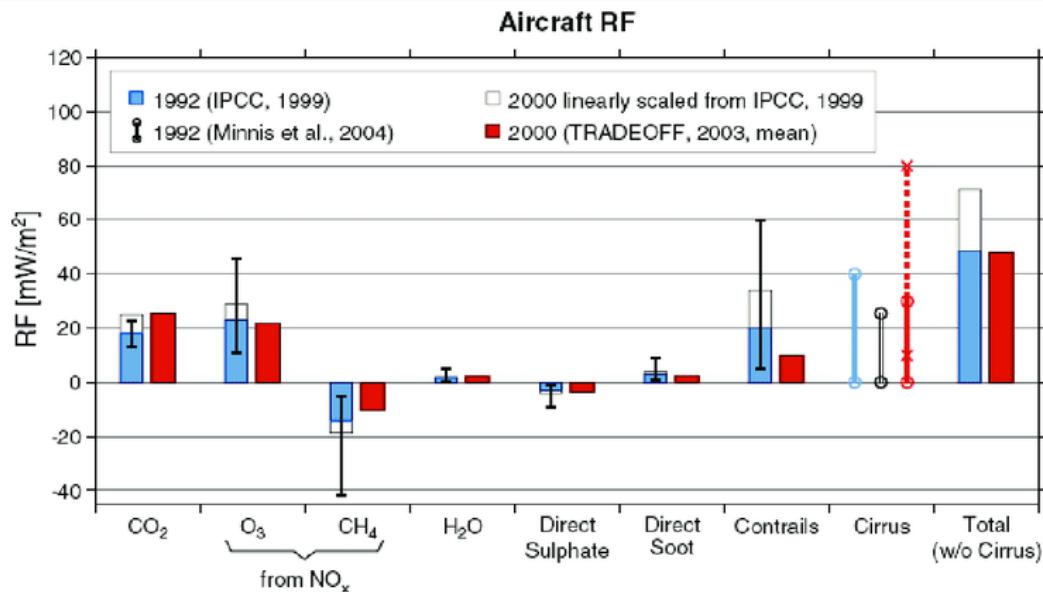


Figura 1.9: Forzamiento radiativo de las emisiones del sector aeronáutico en los años 1992 y 2000.

Fuente: [25]

#### 1.4.2. Índice GWP

Esta métrica [24] representa el potencial de calentamiento global y hace referencia al forzamiento radiativo acumulado de una cierta sustancia en un período de tiempo concreto, resultante de emitir una unidad de masa del gas estudiado respecto a un gas de referencia, que comúnmente se trata del dióxido de carbono. Dicho de manera más sencilla, nos indica la capacidad de una sustancia de atrapar calor en comparación con el CO<sub>2</sub> en un cierto período de tiempo, que normalmente es de 100 años pero que también puede ser de 20 ó 500 años.

Uno de los aspectos más relevantes a la hora de estudiar esta métrica es que tiene en cuenta la vida media de cada especie, y por eso el impacto es distinto para un cierto período temporal. Tenemos así que el índice GWP será máximo cuando el período considerado represente la vida media de dicha sustancia. Esta capacidad de las sustancias contaminantes de atrapar el calor, creando así el efecto invernadero, depende fundamentalmente de su vida media, del espectro en el que se encuentra por su longitud de onda y de su capacidad para absorber la radiación infrarroja.

Acronym, Common Name or Chemical Name	Chemical Formula	GWP 20-year	GWP 100-year	GTP 20-year	GTP 50-year	GTP 100-year
Carbon dioxide	CO <sub>2</sub>	1	1	1	1	1
Methane	CH <sub>4</sub>	84	28	67	14	4
Fossil methane†	CH <sub>4</sub>	85	30	68	15	6
Nitrous Oxide	N <sub>2</sub> O	264	265	277	282	234

Tabla 1.2: Valores de GWP y GTP para dióxido de carbono, metano y óxidos de nitrógeno. Fuente:

[23]

### 1.4.3. Índice GTP

Esta métrica significa potencial de temperatura global y comenzó a usarse recientemente [24]. Nos informa sobre el impacto que tienen los gases contaminantes en el cambio climático, combinando el índice GWP con los datos analíticos extraídos de modelos climáticos. De una forma similar al índice GWP, este nos informará de la variación de temperatura producida por el gas de estudio para un cierto período de tiempo, en comparación con la variación producida al emitir la misma cantidad de masa de un gas de referencia, comúnmente el CO<sub>2</sub>.

La reciente implementación de esta métrica todavía genera cierta incertidumbre, considerándose más fiable el índice GWP.

En función del contexto considerado y del parámetro al que queramos prestar especial atención, seleccionaremos la métrica y el horizonte temporal más apropiado. Dichas métricas mencionadas facilitan la evaluación y la implementación de políticas eficaces para alcanzar unos objetivos determinados.

## 2. Contaminación producida por las aeronaves

En este capítulo se abordará el estudio de las diversas formas de contaminación de las aeronaves sobre el medioambiente y se centrará en estudiar los principales gases contaminantes presentes en la atmósfera.

### 2.1. FORMAS DE CONTAMINACIÓN DE LAS AERONAVES

Aunque este trabajo está orientado a estudiar la contaminación atmosférica, existen otros tipos de contaminación producida por las aeronaves que es interesante comentar de forma breve.

- Contaminación atmosférica: es el principal objeto de estudio en este trabajo. Los gases contaminantes y partículas emitidos por los tubos de escape de las aeronaves modifican la composición de la atmósfera, alterando de forma significativa las cantidades de dióxido de carbono, metano y ozono a nivel del suelo. Esto tiene una repercusión de gran importancia sobre la calidad del aire, en especial en los aeropuertos y las regiones cercanas a estos, lo que se traduce en un impacto negativo sobre la salud y el bienestar. Se estima que el sector de la aviación es el responsable de alrededor del 2% de las emisiones de carbono a nivel global [26]. Ante esta cifra, podríamos pensar que no es muy relevante. Como habíamos analizado anteriormente, el principal problema de la aviación recae en que las emisiones de otros gases a altitudes de crucero pueden afectar de forma significativa a alterar el clima.

- Contaminación acústica: este impacto sobre el medioambiente es debido al ruido que generan los aerorreactores, el movimiento de las aeronaves durante sus operaciones y también el ruido aerodinámico. Para hacer frente a este problema, la OACI impone como requisito obligatorio la certificación acústica de todas las aeronaves para concederles el certificado de tipo.

· Impacto sobre el paisaje: la construcción de aeropuertos e infraestructuras necesarias para las operaciones de las aeronaves modifica el entorno y elimina ciertas especies animales que puedan resultar peligrosas para la actividad aérea.

## 2.2. GASES EMITIDOS POR LAS AERONAVES

Seguidamente, se hará un estudio del impacto en la atmósfera de los principales gases contaminantes originados durante el proceso de combustión.

### 2.2.1. CO<sub>2</sub>

El carbono es el cuarto elemento más presente en todo el universo y el CO<sub>2</sub> se trata de un gas fundamental para la existencia de la vida en nuestro planeta. Este carbono, al combinarse con oxígeno, da lugar al dióxido de carbono. Durante miles de años, el ciclo natural de CO<sub>2</sub> se ha desarrollado con normalidad, encontrándose en un estado de equilibrio natural. El problema recae en que, debido a la actividad humana, las emisiones de esta sustancia han aumentado de forma preocupante, y en la actualidad se trata del gas que más contribuye al efecto invernadero antropogénico.

En primer lugar, explicaremos cómo se emite el CO<sub>2</sub>.

- Fuentes naturales: procede del ciclo natural del carbono, de las plantas, los océanos y también de los humanos.
- Fuentes antropogénicas: son debidas a la actividad humana. Por ejemplo, la quema de los combustibles fósiles o la deforestación.
- Sumideros de carbono: el océano y ciertos organismos, sobre todo la vegetación, reabsorben el carbono emitido a la atmósfera.

En la Figura 2.1 se muestra la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera terrestre desde hace 800 mil años, encontrándose en valores comprendidos entre 172 y 299 partes por millón. Sin embargo, desde 1950 hasta la actualidad observamos un crecimiento mucho más brusco, llegando dicha concentración hasta las 408 partes por millón, en tan sólo setenta años, y con un evidente indicio de seguir aumentando con el paso de los años.

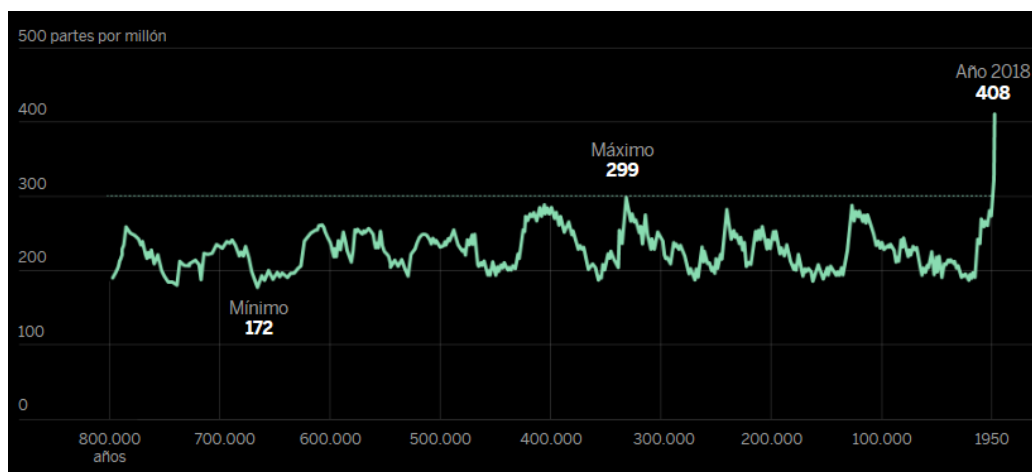


Figura 2.1: Concentración de CO<sub>2</sub> en la atmósfera a lo largo de los años. Fuente: [27]

Según [27], las emisiones de CO<sub>2</sub> a nivel global se encuentran en niveles sin precedentes, viéndose afectados los sumideros naturales de carbono a causa del cambio climático. Estos informes del GCP son elaborados por un equipo de más de un centenar de científicos, entre ellos una gran cantidad de expertos de la NOAA, y sostienen que la concentración de dióxido de carbono en el año 2022, atendiendo a la Figura 2.1, alcanzará 417,2 partes por millón, lo que significa un aumento del más del 50% respecto a los niveles preindustriales. La cantidad de CO<sub>2</sub> anual más alta que se ha registrado en toda la historia es de 40900 millones de toneladas y corresponde al año 2019. Si esta tendencia continúa, habrá un 50% de probabilidad de que la temperatura global aumente más rápido que hasta ahora, un aumento superior a 1,5°C. En 2022, se estimaron unas emisiones de 36600 millones de toneladas, algo superior a los niveles de años anteriores a la pandemia de COVID-19. En concreto, la quema del petróleo es el elemento que más contribuye al aumento de dichas emisiones. En [28] se advierte que, para alcanzar unas emisiones netas nulas para el año 2050, sería necesaria una reducción del uso de los combustibles fósiles, o bien aumentar los sumideros naturales en torno a los mil cuatrocientos millones de toneladas de este gas. Esta drástica disminución la podríamos equiparar al decrecimiento de las emisiones durante las restricciones en los vuelos comerciales durante el año 2020 debido al COVID-19.

El principal problema del dióxido de carbono es que permanece en la atmósfera durante mucho tiempo, entre 50 y 200 años. Por eso, el porcentaje emitido por la aviación se mezcla



con el procedente de otras fuentes y es difícil de cuantificar con precisión qué cantidad corresponde a las aeronaves.

#### *Cantidad de CO<sub>2</sub> generada por los combustibles de aviación*

Las emisiones de los distintos combustibles de aviación son ligeramente distintas. A continuación, mencionamos los combustibles más empleados en aeronaves y lo que contamina cada uno de ellos.

- **JP-5 y JP-8:** estos combustibles se usan principalmente en aeronaves militares. Son derivados del queroseno y están compuestos de una mezcla de hidrocarburos con alcanos. La principal diferencia es que el JP-5 es más seguro por tener un punto de inflamación mayor, por lo que su uso está centrado en aeronaves embarcadas, donde existe un riesgo de incendio relativamente elevado. No obstante, el más usado en la actualidad es el JP-8, ya que tiene un peso molecular mayor, y por tanto su volatilidad es menor. En cuanto a las emisiones, se generan 9,75 kg de CO<sub>2</sub> por galón, lo que equivale a 2,579 kg de CO<sub>2</sub> por cada litro en combustión.

- **Queroseno:** este tipo de combustible es el más común en aeronaves con motor a reacción. Se obtiene a partir de un proceso de destilación del petróleo y en su combustión se producen 9,75 kg de dióxido de carbono por galón, es decir, 2,579 kg por litro.

- **Gasolina de aviación:** el Avgas 100LL es el combustible utilizado en aeronaves con motores de pistón. Tiene una gran capacidad para adaptarse a condiciones de presión y temperatura muy diversas, que se dan durante el ciclo de funcionamiento de estos motores. A diferencia de los anteriores, genera 8,31 kilogramos de CO<sub>2</sub> por galón, lo que equivale a 2,198 kg por cada litro, un porcentaje ligeramente menor que en los dos casos anteriores.

Los datos de las emisiones han sido extraídos de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA).

#### *Medidas tecnológicas y operativas para la reducción de CO<sub>2</sub>*

Ante la probabilidad de que el sector de la aviación siga dependiendo de los combustibles fósiles en los próximos años, es necesario estudiar nuevas formas para conseguir una eficiencia superior del combustible, logrando reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> y también el

consumo de combustible. En los aviones de la actualidad, aproximadamente el 20% de los costes operativos corresponden al combustible [29] y se intenta que esta cifra siga disminuyendo. Esto se puede conseguir de diversas maneras:

Haciendo una reducción del peso total de la aeronave, utilizando nuevos procesos de fabricación y materiales compuestos o aleaciones más ligeras. En concreto, el Boeing 787 ha reducido su peso casi a la mitad utilizando fibra de carbono y otros compuestos en lugar del diseño convencional de aluminio.

Otra opción consiste en reducir la resistencia aerodinámica, implementando los avances en los campos de la aerodinámica, estructuras y materiales. Actualmente, hay nuevos diseños en estudio. Uno de ellos se denomina BWB y consiste en una aeronave sin cola, es una especie de ala volante que consigue una eficiencia aerodinámica mucho mayor, además de reducir el peso. No obstante, estas nuevas ideas presentan algunos problemas relativos a la presurización y a las infraestructuras aeroportuarias que será necesario seguir estudiando y optimizando.

Otras mejoras en el rendimiento de los motores se consiguen con técnicas de enfriamiento y de combustión más avanzadas, el uso de nuevos materiales y revestimientos y otras tecnologías en desarrollo. Se espera que, gracias a estos avances, se consiga una reducción del 15% en el combustible empleado [30].

La última idea que vamos a plantear es el uso de otros combustibles con menor concentración de carbono, como el metanol, el etanol, la energía nuclear o el biodiésel. Hoy en día, la mayoría de estas alternativas no son viables por motivos diversos: costes, infraestructuras, producción, almacenamiento o seguridad.

### 2.2.2. Vapor de agua

El vapor de agua se trata del gas más relevante para el efecto invernadero natural. Las moléculas de H<sub>2</sub>O suspendidas en la atmósfera retienen la radiación incidente y la reflejan en todas direcciones, provocando el calentamiento de la superficie. El vapor de agua sigue un ciclo hidrológico de forma natural, primero se condensa y después cae en forma de precipitación. Las actividades humanas provocan un aumento en la cantidad del vapor de agua, estrechamente relacionado con las emisiones de metano.

A altitudes de vuelo, con unas condiciones específicas de humedad y temperatura, el vapor de agua puede generar estelas de condensación. Se trata de una especie de nube de hielo, que forman las aeronaves cuando el vapor de agua se condensa en torno a partículas diminutas, generalmente de hollín, producidas en la combustión. Estas estelas también se forman cuando el vapor de agua que sale del motor se mezcla con el que se encuentra suspendido en el aire. Dichas partículas se enfrían a gran velocidad, y si las condiciones de humedad permiten que esa mezcla se sature, el vapor de agua se condensa y aparecen estas estelas.

#### *Tipos de estelas de condensación*

Según el tiempo de visibilidad de la estela, podemos diferenciar varias clases.

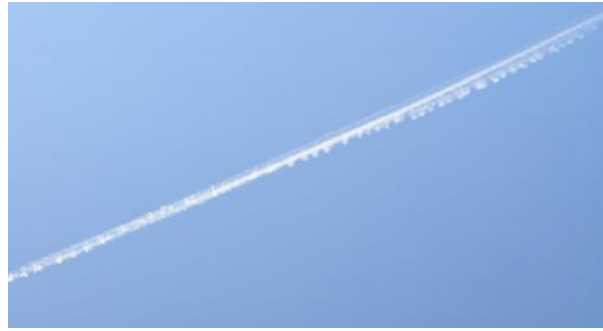
- **Estelas de corta duración:** surgen cuando la concentración de vapor de agua es reducida, por tanto, las partículas de hielo formadas se subliman con gran rapidez, por eso desaparecen prácticamente con el paso del avión.



*Figura 2.2: Estela de corta duración. Fuente: [31]*

- **Estelas persistentes, sin propagación:** aparecen cuando las condiciones de humedad son grandes y por tanto las partículas no se convierten en gas. Permanecen en el cielo durante horas después del paso de la aeronave, pero no se propagan ni aumentan su tamaño.

- **Estelas persistentes, con propagación:** su mecanismo de formación es similar a las anteriores, con la diferencia de que en este caso, la humedad es todavía mayor, similar al nivel de condensación. A causa de esto, el vapor de agua presente en la atmósfera se puede condensar con facilidad uniéndose a las partículas de hielo que forman la estela. Estas estelas se caracterizan por ser más parecidas a una nube, con formas irregulares y van haciéndose más grandes, además de ser movidas por el viento.



*Figura 2.3: Estela persistente. Fuente: [31]*

La formación de estelas de condensación depende, además de las condiciones de temperatura y humedad atmosféricas, del tipo de motor y de la distancia volada. Cuando existe una concentración elevada de estas estelas, pueden motivar la formación de cirros. Actualmente, se está estudiando [32] [31] si estas nubes inducidas estimulan el calentamiento del planeta y si las estelas tienen un efecto contaminante o tan sólo son un indicador de los cambios en la temperatura global, aún existe cierta incertidumbre sobre este aspecto. Lo que sí se sabe con certeza es que a medida que la temperatura aumenta, también lo hace la cantidad de vapor retenido y esto trae cambios en el ciclo hidrológico.

### 2.2.3. CH<sub>4</sub>

Después del dióxido de carbono, el gas que más afecta al efecto invernadero es el metano. Al igual que el CO<sub>2</sub>, puede generarse de forma natural o artificial. Entre los procesos de la naturaleza que generan metano, encontramos principalmente los humedales, durante la descomposición de material orgánico por las bacterias en ambientes sin oxígeno. También se emite durante la producción y distribución del petróleo y el gas natural, ya que es su principal componente. El metano también lo generan las actividades humanas, principalmente la quema de combustibles fósiles y los vertederos. Por otra parte, las cuevas son los principales sumideros de CH<sub>4</sub>, debido a que este gas desaparece en los entornos subterráneos con una humedad elevada.

La principal característica de este gas es su gran capacidad para retener el calor, consiguiendo en 100 años un impacto 25 veces superior que el CO<sub>2</sub>. Sin embargo, sus consecuencias no son tan graves debido a que tiene un tiempo de vida en la atmósfera considerablemente menor, entre 10 y 15 años.

#### 2.2.4. NO<sub>x</sub>

Los óxidos de nitrógeno están estrechamente ligados a la formación de ozono en toda la troposfera y en la parte inferior de la estratosfera. Esto provoca cambios en la oxidación que alteran el tiempo de vida del CH<sub>4</sub>, afectando a la troposfera a nivel global. Por eso, los óxidos nitrosos son capaces de modificar la abundancia de dichos gases de efecto invernadero, alterando el balance radiativo de nuestro planeta. Cerca del suelo apenas se producen emisiones, un porcentaje de emisión mayor del 90% ocurre en altitudes superiores a 3000 pies [33].

Para estudiar el impacto de los NO<sub>x</sub> en la atmósfera, debemos tener en cuenta que depende de la altitud a la que se realicen las emisiones. En un rango comprendido entre los 5 y los 15 kilómetros de altitud – en la troposfera y la estratosfera inferior - se produce una cantidad neta de ozono, que se incrementa si aumentamos las emisiones. En cambio, en capas más altas de la estratosfera, un aumento de las emisiones de estos óxidos implicará una disminución del ozono. Esto implica que las zonas de la atmósfera donde se producen la mayoría de los vuelos posean una mayor concentración de ozono, mostrando una tendencia a calentar la superficie terrestre.

Del mismo modo que las emisiones de NO<sub>x</sub> aumentan los niveles de ozono, son capaces de disminuir la concentración de metano, que causará un enfriamiento de la superficie. Esto sucede porque la fotólisis del ozono generado reacciona con el vapor de agua para formarse el radical OH, y la principal consecuencia es la disminución del metano.

En [8] se indica que el impacto de las emisiones de NO<sub>x</sub> causa un efecto neto de calentamiento de la Tierra, aunque algunos estudios recientes sostienen que este efecto se podría revertir si se tienen en cuenta nuevos procesos u otras parametrizaciones más precisas. Estas emisiones tienen un impacto considerable sobre la calidad local del aire y por tanto afectan a la salud humana. A raíz de esta preocupación, se han aprobado nuevos estándares más estrictos relativos a las emisiones de NO<sub>x</sub> y se trabaja en el diseño de motores con rendimientos superiores de las emisiones producidas en la cámara de combustión. No obstante, el interés por conseguir temperaturas de combustión más elevadas para obtener un consumo específico menor se opone a estas mejoras en el NO<sub>x</sub> emitido.

A mayores altitudes, el aumento en la concentración de ozono y la disminución de la vida del metano son más predominantes.

#### 2.2.5. CO

Este compuesto surge por un proceso de combustión incompleta, porque la mezcla de aire y combustible no dispone del oxígeno suficiente para quemarse en su totalidad, y se produce CO en lugar de CO<sub>2</sub>. Se trata de un gas muy peligroso, ya que impide la entrada de oxígeno al organismo. Si su concentración pasa de 0,32%, causa la muerte en tan sólo treinta minutos.

La producción de esta sustancia está limitada a determinadas condiciones de funcionamiento del motor, principalmente en las operaciones en frío, mientras se calienta y cuando aumentamos la potencia. En estas situaciones, se produce una mayor cantidad de monóxido de carbono. En cambio, durante el crucero con el motor caliente, apenas se produce esta sustancia, ya que hay oxígeno suficiente para hacer una combustión completa.

#### 2.2.6. Aerosoles y otras partículas

En la reacción de combustión que se lleva a cabo en los motores a reacción de las aeronaves, también se expulsan pequeñas partículas como subproductos de la combustión.

Las principales partículas emitidas son carbono negro y hollín ultrafino y son conocidas como partículas no volátiles (nvPM). Estas partículas se encuentran principalmente en el escape de los motores, aunque también se originan por el desgaste que sufren los frenos y los neumáticos de las aeronaves durante las operaciones de aterrizaje. Tienen como principal característica que son ultrafinas e invisibles para el ojo humano. Las partículas no volátiles de los motores a reacción tienen un tamaño medio inferior a las que emiten los motores diésel tradicionales. En concreto, poseen un diámetro comprendido entre los 15 y los 60 nanómetros.

En general, las partículas más relevantes son el hollín – que absorbe la radiación y provoca calentamiento – y los aerosoles de sulfato, que, a diferencia de los anteriores, contribuyen a la aparición del oscurecimiento global, provocando el enfriamiento del planeta.

En la actualidad, se están analizando y desarrollando técnicas y métodos novedosos de muestreo para cuantificar con más exactitud el número y la masa de partículas no volátiles emitidas por los motores de reacción. Así mismo, los fabricantes han comenzado a añadir mediciones de nvPM en las certificaciones de los motores. Supone un gran desafío, ya que resulta muy complicado tener una medición muy precisa de estas partículas, además de medirse en condiciones un tanto complicadas a altas temperaturas y velocidades, como es propio en los escapes de los motores. Además, la falta de métodos adecuados para la calibración de los instrumentos encargados de medir los niveles de estas partículas dificulta aún más esta tarea. Además, el hecho de que no exista una definición química exacta de los materiales que forman estas partículas también lo hace una tarea complicada.

En el caso de los gases emitidos, el método es más sencillo. Se puede hacer una simulación de las condiciones en el escape elaborando una mezcla con las cantidades precisas, que posteriormente sirve para cuantificar las cantidades de NO<sub>x</sub>, CO y HC. Sin embargo, hacer simulaciones con partículas resulta complicado. A las incertidumbres derivadas de las propias mediciones se suma la ausencia de unos estándares sólidos de calibración. Por eso, los datos recogidos en los inventarios de emisiones también deberán ser tomados con cierta precaución, y deberán existir una serie de metodologías para corregir las pérdidas de una forma precisa.

En los últimos años, los principales estudios y desarrollos se han centrado en mejorar los métodos de muestreo de nvPM. Así, se consigue un conocimiento más preciso sobre parámetros de gran interés, como puede ser la morfología de las partículas, su estructura interna, su tamaño y su densidad efectiva. Un conocimiento más profundo y amplio de la naturaleza y composición de dichas partículas permitirá el desarrollo de estudios más fiables y precisos sobre el impacto ambiental y en la salud que estas partículas puedan crear.

### 2.3. CALIDAD LOCAL DEL AIRE. CERTIFICACIÓN DE EMISIONES

Gracias a la atmósfera puede existir la vida en la Tierra como la conocemos. Por eso, si su composición se altera de forma significativa, podría derivar en problemas de salud. Por

esto, es de gran importancia que se lleven a cabo políticas que regulen la calidad del aire, asegurando que no afecte a la salud pública.

Podemos diferenciar cuatro productos principales de la combustión, y de cada uno de ellos la OACI en el Anexo 16, Parte 2 fija ciertos niveles máximos que pueden estar presentes en la atmósfera. Estas sustancias son *las partículas sólidas visibles, conocidas como humo, los hidrocarburos no quemados (HC), el monóxido de carbono (CO) y los óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>)* [26] Las emisiones de las tres primeras sustancias que se han mencionado se pueden reducir gracias al uso de nuevas tecnologías, ya que son creadas a causa de ciertas imperfecciones durante el proceso de combustión en los motores. Sin embargo, los óxidos de nitrógeno se forman al mezclarse oxígeno y nitrógeno en la cámara de combustión, a unas temperaturas muy elevadas. Esto supone un problema porque cuanto mayor sea la temperatura de combustión, mayores eficiencias se consiguen. Es por esto por lo que se han establecido unos límites bastante exigentes sobre las emisiones de estos óxidos.

La certificación de las emisiones de los motores de las aeronaves se lleva a cabo con ensayos en banco de pruebas, mediante reglajes de empuje que permiten determinar las emisiones de gases y humo de los motores. Estas condiciones de ensayo son definidas por OACI en el volumen 2 del anexo 16 [34]. En la figura 2.4 se representa el ciclo de funcionamiento LTO considerado, con los siguientes tiempos y empujes:

Durante la fase de aproximación, se toma un empuje con un valor del 30% el empuje nominal durante un tiempo de 4 minutos. En el rodaje en tierra, el valor del empuje es 7% el valor nominal durante 26 minutos. A continuación, en la fase de despegue se toma el empuje máximo disponible, es decir, el valor nominal, durante 0,7 minutos. Por último, la fase de ascenso dura unos 2,2 minutos con un empuje del 85% el valor nominal.

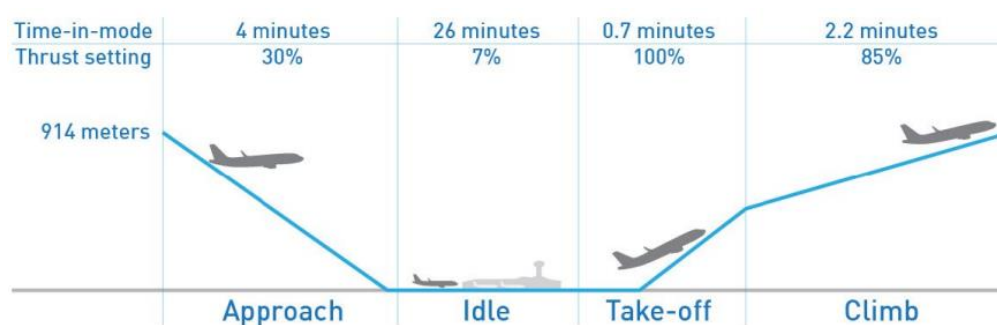


Figura 2.4: Ciclo LTO para la certificación de emisiones según OACI. Fuente: [8]



Tras hacer el ciclo LTO en un banco de pruebas, se cuantifican las emisiones producidas. OACI en [34] define el índice de humo máximo reglamentario SN, siendo  $F_0$  el empuje nominal del motor. El resultado extraído de la ecuación 2.1 deberá tomarse como el valor máximo permitido, siempre y cuando sea menor de 50. Si esto no se cumple, deberá tomarse el valor de 50 como el índice máximo admisible.

$$SN = 83,6 \cdot F_0^{-0,274}$$

*Ecuación 2.1: Índice de humo máximo permitido. Fuente: [34]*

Por su parte, las emisiones gaseosas de motores turborreactores y turbofán para velocidades subsónicas se podrán cuantificar en base a las siguientes relaciones, siendo  $D_p$  la masa total de gases contaminantes emitidos durante el ciclo LTO llevado a cabo y  $F_0$  el empuje nominal del motor.

Para hidrocarburos:  $\frac{D_p}{F_0} = 19,6$

Para monóxido de carbono:  $\frac{D_p}{F_0} = 118$

Para óxidos de nitrógeno, esta relación es distinta según diversos parámetros, como el año de fabricación del motor, su relación de presiones o su empuje nominal. A continuación, se recogen las expresiones para los motores más recientes, pudiéndose consultar el resto de las relaciones en el volumen 2 del Anexo 16 de OACI [34]. El parámetro  $\pi_0$  denota la relación de presión de referencia.

- Motores con una relación de presión inferior o igual a 30:

· Empuje nominal superior a 89 kN:

$$\frac{D_p}{F_0} = 7,88 + 1,4080 \cdot \pi_0$$

· Empuje nominal entre 26,7 kN y 89 kN:

$$\frac{D_p}{F_0} = 40,052 + 1,5681 \cdot \pi_0 - 0,3615 \cdot F_0 - 0,0018 \cdot F_0 \cdot \pi_0$$

- Motores con una relación de presión comprendida entre 30 y 104,7:
  - Empuje nominal superior a 89 kN:

$$\frac{D_p}{F_0} = -9,88 + 2 \cdot \pi_0$$

- Empuje nominal entre 26,7 kN y 89 kN:

$$\frac{D_p}{F_0} = 41,9435 + 1,505 \cdot \pi_0 - 0,5823 \cdot F_0 + 0,005562 \cdot F_0 \cdot \pi_0$$

- Motores con una relación de presión superior a 104,7:

$$\frac{D_p}{F_0} = 32 + 1,6 \cdot \pi_0$$

Dichas mediciones se tomarán utilizando sondas de muestreo, en zonas próximas a la tobera de los motores, y las muestras serán enviadas a una serie de analizadores mediante una serie de conductos de muestreo a unos 160°C. Los analizadores tienen distintos principios de funcionamiento en función de la sustancia a examinar. Por ejemplo, los encargados del monóxido y dióxido de carbono son analizadores infrarrojos sin dispersión, y los que miden los óxidos de nitrógeno lo hacen mediante un método químico-luminiscente, cuantificando la intensidad de la radiación mientras el NO y el ozono reaccionan para dar lugar a distintos NO<sub>x</sub>. Los detalles precisos sobre las condiciones de funcionamiento de cada sistema se pueden consultar en [34].

### 3. Relación del cambio climático y la turbulencia en aviación

En el capítulo anterior, se ha llevado a cabo un análisis del impacto que la aviación ejerce sobre el clima en nuestro planeta, a través de las emisiones de gases de efecto invernadero. Sin embargo, ya existen claras evidencias de que esa relación es recíproca, debido a que dichos cambios en el clima también afectan de forma significativa al sector de la aviación.

En concreto, la cizalladura del viento cobra más fuerza en latitudes medias de las zonas más altas de la troposfera y en la estratosfera inferior, causando un efecto desestabilizante en la atmósfera y motivando la aparición de turbulencia en aire claro [35]. Además de esto, el cambio climático causa un calentamiento del aire en la superficie, y por consiguiente su densidad disminuye, haciéndolo también la sustentación generada por la aeronave. Este hecho hace que se deba modificar la distancia de pista necesaria para el despegue, o aumentar las restricciones de peso máximo al despegue (MTOW).

A continuación, se hará un análisis del impacto que tiene el cambio climático en las rutas a seguir y los tiempos de vuelo de las aeronaves. A pesar de ser un tema al que no se ha prestado demasiada atención, es de vital importancia para minimizar el consumo de combustible, en especial, en el sector de la aviación comercial.

Sabemos que el camino más corto entre dos puntos de la superficie terrestre es el círculo máximo, que resulta equivalente a una línea recta sobre la superficie esférica. Sin embargo, las aeronaves no suelen seguir esta ruta, sino que realizan pequeñas desviaciones para llevar a su favor el viento de cola y así incrementar la velocidad durante el crucero y minimizar el tiempo de vuelo. En la figura 3.1 podemos apreciar cómo los vientos provocados por la corriente en chorro se intensifican en el Atlántico Norte durante el invierno, en las capas de la troposfera superior y en la estratosfera inferior, cuando la concentración de dióxido de carbono se duplica. La escala situada en la parte derecha indica la magnitud de los vectores velocidad del viento expresados en m/s y la línea negra representa la ruta de círculo máximo entre los aeropuertos de Nueva York y Londres.

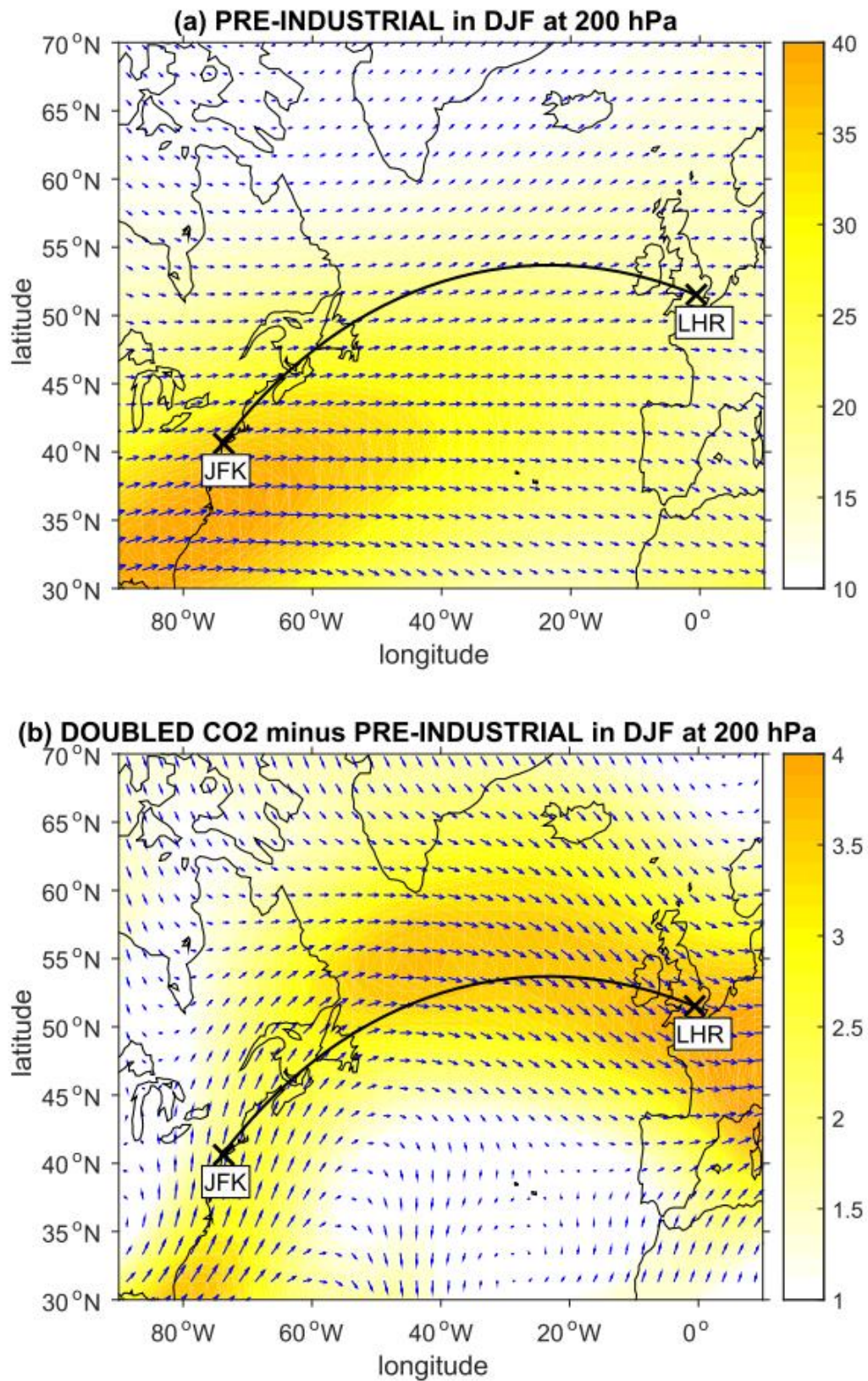


Figura 3.1: Distribución de viento horizontal en niveles preindustriales (arriba) y duplicando la concentración de CO<sub>2</sub> (abajo). Fuente: [35]

Tomando como ejemplo la ruta que une los aeropuertos de Nueva York (JFK) y Londres (LHR) se ha calculado que, durante el vuelo de crucero, si se duplica la concentración de CO<sub>2</sub> en la atmósfera, la componente de viento de cola aumenta un 14,8%, pasando de 21,4 a 24,6 m/s [35]. Esta fuente también recoge datos de un vuelo entre estas dos ciudades del 8 de enero de 2015, que batió el récord ya que tan sólo duró 5 horas y 16 minutos, a causa de un viento de cola muy intenso, provocado por una corriente en chorro extraordinariamente acelerada.

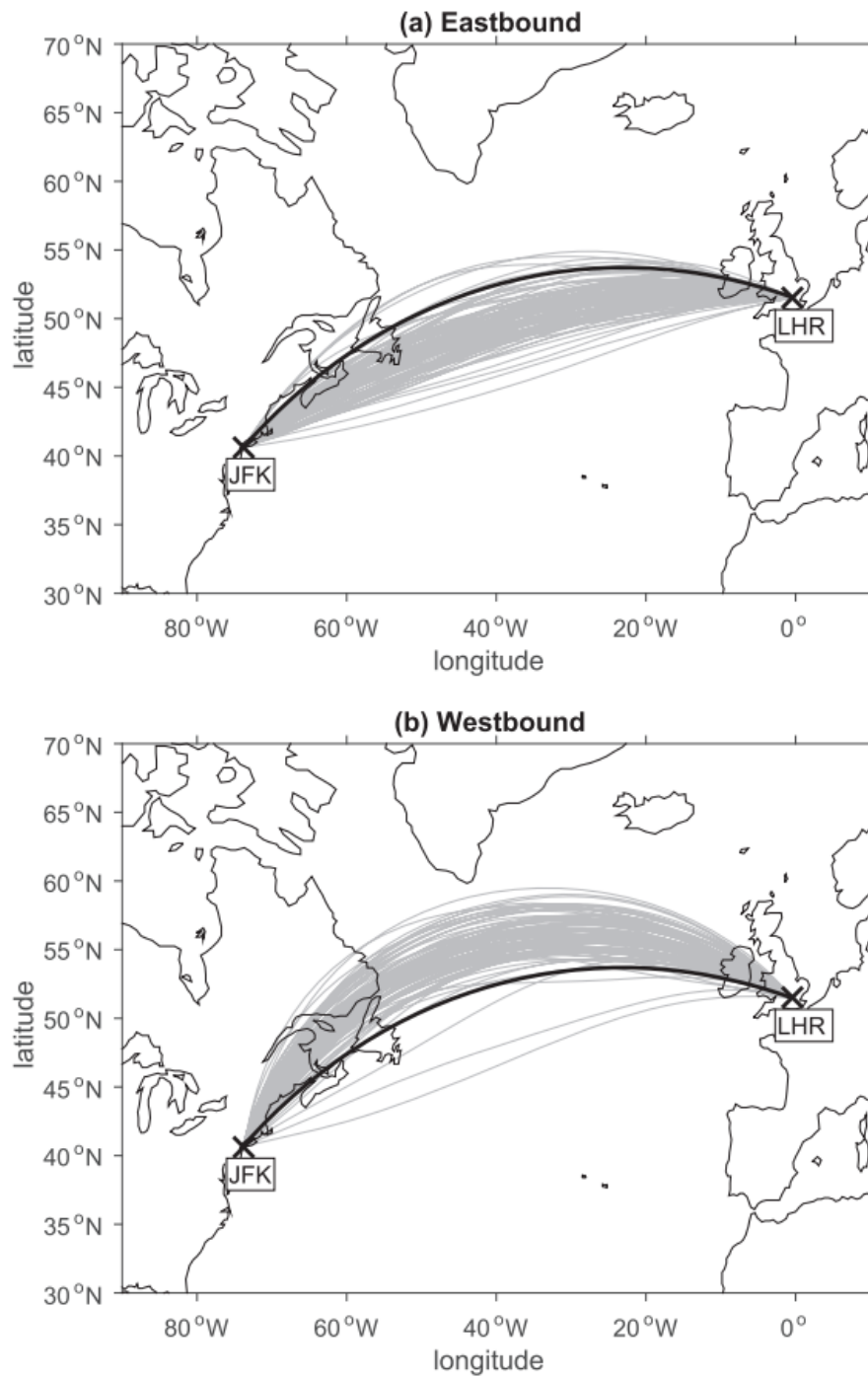


Figura 3.2: Rutas de tiempo mínimo entre Nueva York y Londres a 200 hPa. La línea negra representa el círculo máximo. Fuente: [35]

Los gráficos de la figura 3.3 representan las distribuciones de probabilidad de los tiempos de vuelo mínimos entre los aeropuertos JFK y LHR, representando el gráfico de la parte superior el viaje hacia el este y el inferior hacia el oeste, ambos medidos a unas condiciones de 200 hPa durante un total de 20 inviernos. Las líneas negras discontinuas representan el

tiempo de vuelo siguiendo el círculo máximo en ausencia de viento. Para la realización de estas simulaciones se ha usado el modelo climático GFDL-CM2.1 [35].

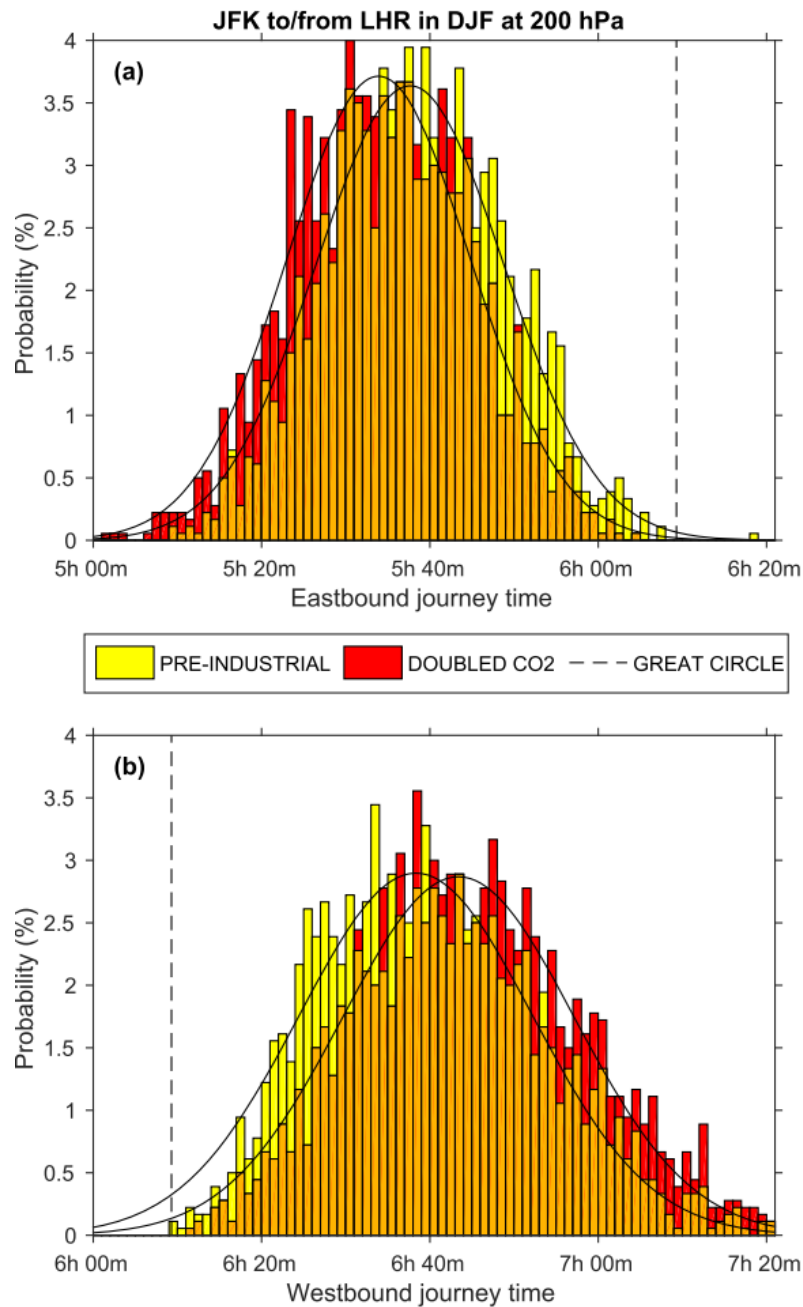


Figura 3.3: Tiempos de vuelo entre Nueva York y Londres. Fuente: [35]

Es sencillo de ver que los vuelos realizados en dirección oeste requieren un tiempo de vuelo mayor que los vuelos hacia el este, debido a la distribución de los vientos de la figura 3.1. Además, la mayor concentración de CO<sub>2</sub> en la atmósfera altera dichas distribuciones, haciendo que los viajes hacia el este sean aún más cortos y los viajes al oeste lleven más

tiempo [35]. En concreto, el tiempo medio si viajamos dirección este disminuye unos 4 minutos, y hacia el oeste aumenta unos 5 minutos 18 segundos, asumiendo en ambos casos un intervalo de confianza del 95%.

Del mismo modo, en la tabla 3.1 se calculan las rutas que minimizan el tiempo de vuelo entre Nueva York y Londres para el resto de las estaciones y con diferentes condiciones de presión. Estableciendo una comparación entre las estimaciones extraídas en niveles preindustriales con las obtenidas al duplicar la concentración de CO<sub>2</sub>, se observa un aumento medio de los tiempos de vuelo, tanto en los viajes de ida como de vuelta. Además, esta variación es menor en verano y en primavera y mayor en otoño e invierno.

Season and pressure level	Eastbound			Westbound			Round-trip 2×CO <sub>2</sub> -CTL
	CTL	2×CO <sub>2</sub>	2×CO <sub>2</sub> -CTL	CTL	2×CO <sub>2</sub>	2×CO <sub>2</sub> -CTL	
DJF at 200 hPa	5:38:22	5:34:22	-4:00	6:40:26	6:45:44	+5:18	+1:18
MAM at 200 hPa	5:48:07	5:44:59	-3:08	6:28:28	6:32:18	+3:50	+0:42
JJA at 200 hPa	5:41:55	5:40:24	-1:31	6:33:38	6:35:42	+2:04	+0:33
SON at 200 hPa	5:35:53	5:30:52	-5:01	6:43:11	6:50:03	+6:52	+1:51
DJF at 150 hPa	5:42:57	5:38:22	-4:35	6:37:12	6:43:05	+5:53	+1:18
DJF at 250 hPa	5:35:38	5:32:19	-3:19	6:41:43	6:46:35	+4:52	+1:33

*Tabla 3.1: Comparación de los tiempos de vuelo entre JFK y LHR para estaciones y presiones diversas, comparando los niveles preindustriales (CTL) con la concentración de CO<sub>2</sub> duplicada.*

*Fuente: [35]*

Esta duplicación en la concentración de CO<sub>2</sub> presente en la atmósfera también motiva la aparición de zonas de CAT. En [36], [37] se predice un aumento tanto de la fuerza como de la frecuencia de aparición de CAT. En concreto, los estudios mencionados indican que la intensidad de CAT experimentará un aumento de entre un 10 y un 40%, mientras que la frecuencia de aparición de CAT extrema o severa aumentará entre un 40 y un 170%.

Estos datos muestran el evidente impacto que el cambio climático causa en el sector de la aviación. Los tiempos de vuelo aumentan y con ello también el consumo de combustible y los gases emitidos a la atmósfera, además del incremento de coste asociado. En [35] se estima que se aumentarán las emisiones de CO<sub>2</sub> unos 70 millones de kg cada año, teniendo en cuenta solamente los vuelos transatlánticos. Este consumo extra llevará asociado un aumento en el coste de 20 millones de dólares por aeronave cada año.



No obstante, es necesario seguir investigando en el desarrollo de modelos climáticos con campos de viento más precisos, además de estudiar otros tipos de rutas, por ejemplo, las transpacíficas o transpolares. Se trata de una tarea complicada y limitada en gran medida por los recursos computacionales existentes, pues hoy en día no es viable el cálculo de la ruta que minimiza el tiempo para cada condición meteorológica que se dé cada día.

Del mismo modo que interesa seguir la ruta que minimiza el tiempo de vuelo para reducir así el consumo de combustible, también es importante tener en cuenta que esta ruta probablemente no será la que minimice el potencial de turbulencia ni el impacto sobre el clima, ya que dependerá de las emisiones de los gases contaminantes y de las estelas de condensación que se formen.

Otro estudio [37] sugiere que el aumento de temperatura global debido al cambio climático no es uniforme, pues las capas atmosféricas responden de forma distinta. Mientras la parte superior de la troposfera tropical tiende a calentarse a una mayor velocidad, debido al calor latente liberado; la parte baja de la estratosfera se enfriará debido a los gases de efecto invernadero. Este gradiente de temperatura propiciará la aparición de viento térmico con una fuerza de cizalladura vertical más intensa, y como consecuencia, más zonas de turbulencia en latitudes medias. En concreto, apuntan a que la CAT se intensificará de manera global durante todas las estaciones, pudiendo llegar a tener en 2050-2080 una frecuencia de aparición de CAT en verano similar a la CAT que existe en invierno actualmente. Por eso, los fabricantes y las compañías aéreas deberán adoptar medidas para asegurarse de no infringir los límites de certificación de las aeronaves y evitar, en la medida de lo posible, un aumento de daños estructurales de las mismas, así como de lesiones de los pasajeros.

## 4. Turbulencia atmosférica

La turbulencia atmosférica constituye un peligro de gran importancia para el sector de la aviación, por los daños materiales que causa a las aeronaves y las lesiones a la tripulación y los pasajeros a bordo. En general, la turbulencia es compleja de predecir y aún existe mucha incertidumbre de cómo se comporta. Entre los años 1980 y 2008 hubo 234 accidentes de aviación debidos a la turbulencia, contabilizando 298 lesiones de gravedad y 3 fallecimientos [37]. No obstante, el número de accidentes de aviación debidos a la meteorología representa una parte muy reducida del total y con el paso de los años va decreciendo, gracias al desarrollo de nuevos modelos de predicción que permiten un conocimiento más profundo del comportamiento de dichos fenómenos. Según [38], entre 1970 y 1999, los cuatro factores que han provocado un mayor número de accidentes debidos a fenómenos meteorológicos son, ordenados por número de accidentes, el engelamiento, la cizalladura del viento, la turbulencia y la baja visibilidad. Este tipo de accidentes ocurren con más frecuencia durante el aterrizaje y el despegue y durante el invierno, sobre todo en los accidentes provocados por la acumulación de hielo en las alas. Por otra parte, la fase de crucero es a priori la más segura, pero el hecho de que la tripulación y los pasajeros no lleven abrochado el cinturón de seguridad la convierte en la fase de mayor vulnerabilidad en cuanto a la turbulencia, ya que habrá una mayor probabilidad de provocar lesiones [37].

Además, la turbulencia supone un coste significativo para el sector, de forma directa o indirecta. Una de ellas es la desviación de la ruta que minimiza el tiempo de vuelo a causa de la turbulencia. [37] confirma que alrededor del 5% de los vuelos deben salirse de esa ruta óptima, con un coste que cada año ronda los 16 millones de dólares. Del mismo modo, también sostiene que en torno al 15% de esas modificaciones no habrían sido necesarias si hubiera una detección más eficaz de la turbulencia, principalmente mediante sistemas LIDAR, de los que hablaremos más adelante.

### 4.1. MECANISMOS DE FORMACIÓN DE TURBULENCIA

Desde el punto de vista físico, la turbulencia consiste en un tipo de flujo caracterizado por un movimiento desordenado de las partículas. Los cambios en los vectores de velocidad

crean torbellinos y se produce una transmisión de energía de grandes escalas a otras inferiores. El flujo atmosférico nunca es laminar en su totalidad, y es lo que provoca que las aeronaves experimenten aceleraciones lineales y angulares, provocando cambios en su dirección y también en su altitud y actitud.

Se pueden clasificar en función de diversos factores. Si nos referimos a su intensidad, las turbulencias pueden ser ligeras, moderadas, severas, y en el peor de los casos extremas, donde controlar la aeronave es casi imposible. Otra posible clasificación es atendiendo a la causa de su formación y encontramos dos grandes grupos que se explican a continuación.

En primer lugar, se encuentra la formación de turbulencia por causas térmicas, donde el calentamiento de la superficie provoca corrientes ascendentes que en ocasiones dan lugar a la creación de cumulonimbos. Este tipo de turbulencia se observa durante el día en capas bajas de la atmósfera y tiene un efecto más significativo en las operaciones de despegue y aterrizaje.

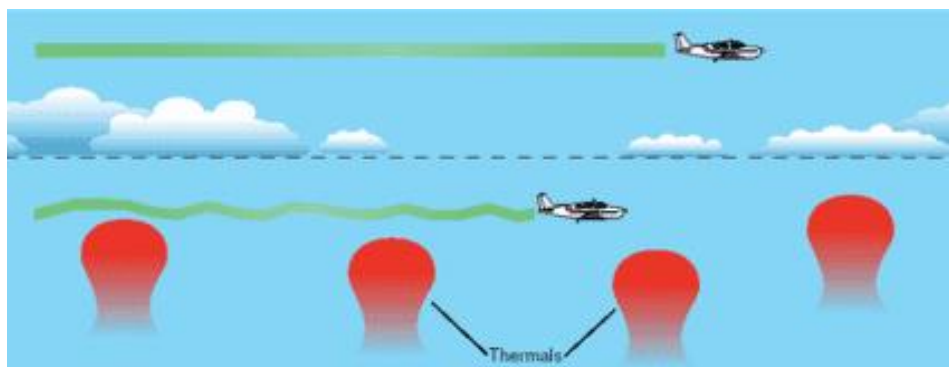


Figura 4.1: Turbulencia térmica. Fuente: [39]

Por otra parte, la turbulencia puede ser mecánica, se puede formar debido a la fricción existente entre dos masas de aire, o entre una masa de aire y el terreno. Esta fuerza de rozamiento se crea debido al propio terreno y también a los gradientes de presión o la aparición de frentes y motiva la creación de torbellinos. A mayor irregularidad del terreno y mayor velocidad del viento, más fuerte será la turbulencia originada.

La altura que alcanzarán los remolinos generados varía en función del tipo de obstáculo que se trate, formando la capa límite planetaria. En terrenos llanos o con pocos accidentes geográficos, la CLP está situada a una altura de 600 metros sobre el suelo, es decir, sólo se notará la fricción del aire con la superficie hasta esa altura aproximadamente. Sin embargo,

en zonas montañosas, estos remolinos que causan turbulencia se propagan a alturas mucho mayores, llegando a tener espesores de la CLP en torno a los 1000 metros [40]. Ejemplos de este tipo de turbulencia pueden ser la CAT o la turbulencia creada por ondas de montaña.

#### 4.2. FACTORES DE DISEÑO QUE MOTIVAN LA APARICIÓN DE TURBULENCIA

Los principales factores de diseño de las aeronaves que influyen en la aparición de turbulencia durante el vuelo son los siguientes:

En primer lugar, el ángulo existente entre las alas y el fuselaje influye de forma significativa, siendo la configuración en ala delta el diseño más favorable, usado principalmente en aeronaves supersónicas.

También sabemos que la intensidad de la turbulencia es directamente proporcional a la velocidad de vuelo y a la longitud de las alas. Es decir, cuanto más rápido volemos y más largas sean las alas de la aeronave, el impacto de la turbulencia será más intenso. En cambio, con el peso guarda una relación inversa, ya que cuanto más ligera sea la aeronave, mayor impacto tendrá la turbulencia.

#### 4.3. SITUACIONES DONDE APARECE TURBULENCIA

De manera general, la turbulencia puede aparecer en las siguientes situaciones:

- En la capa de fricción, especialmente durante las fases de despegue y aterrizaje, donde la altura es reducida.
- Al atravesar una nube, especialmente los cumulonimbus, se originan corrientes ascendentes y descendentes que causan turbulencia, como se explicará más adelante.
- En los frentes fríos y cálidos.
- En ausencia de nubosidad y tormentas, volando a una altura superior a la capa de fricción planetaria, puede aparecer la turbulencia en aire claro, de la que hablaremos con más profundidad en los siguientes apartados.
- Turbulencia inducida por la estela de otras aeronaves. Los vórtices de punta de ala generados por la diferencia de presión entre el intradós y el extradós pueden afectar a otras que vuelan detrás si la distancia entre ellas no es la adecuada. En este tipo de

turbulencia se debe tener en cuenta las dimensiones de las aeronaves, ya que una aeronave de pequeño tamaño atravesando la estela de otra mucho mayor puede originar una gran fuerza de alabeo que termine en una pérdida de control de la misma. También es importante en las fases más críticas, esto es, en el aterrizaje y el despegue. Los controladores aéreos deben tener en cuenta las dimensiones de las aeronaves para fijar la separación adecuada y evitar este tipo de turbulencia.

- En zonas montañosas: La barrera montañosa hace que el flujo incidente se ondule y se generen remolinos que dan lugar a turbulencia, como explicaremos más adelante.

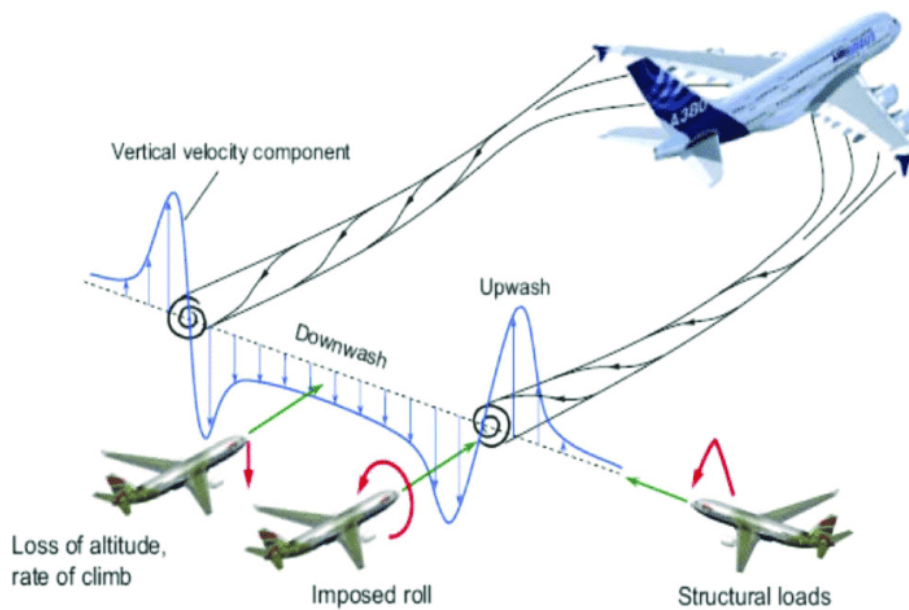


Figura 4.2: Efecto de la estela turbulenta de una aeronave sobre otra. Fuente: [41]

#### 4.4. TIPOS DE TURBULENCIA

En este apartado se estudiarán las principales fuentes de turbulencia existentes. La figura 4.3 muestra de forma sencilla e intuitiva un resumen de los distintos tipos de turbulencia.

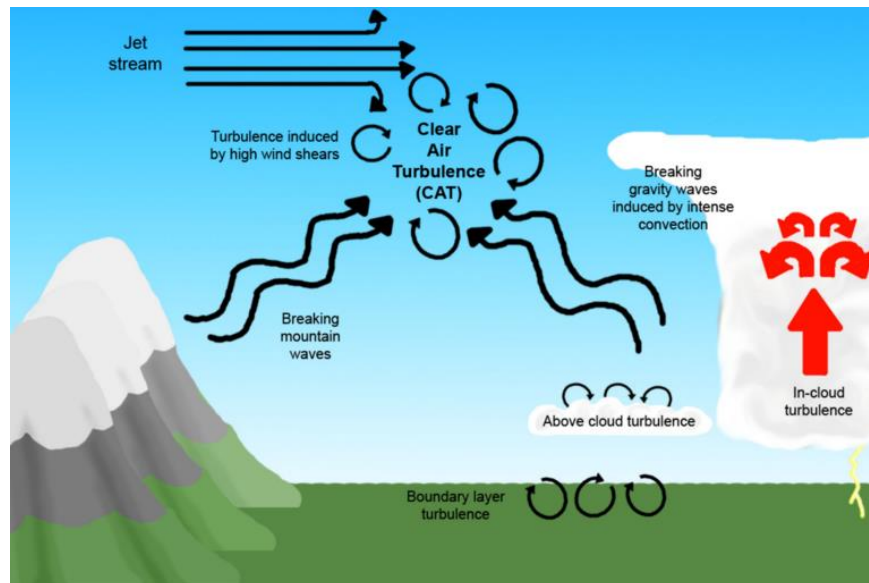


Figura 4.3: Principales fuentes de turbulencia presentes en aviación. Fuente: [37]

#### 4.4.1. Turbulencia convectiva

Este tipo de turbulencia se origina por las corrientes ascendentes y descendentes de los cumulonimbus, cuando la aeronave atraviesa una nube de este tipo. Una de las principales causas de la formación de estas turbulencias es el flujo inestable de salida durante las tormentas en la parte superior de la troposfera. En las simulaciones estudiadas en [37] se afirma que la cizalladura vertical del viento es muy intensa en las regiones de salida de los SCM, reduciendo el número de Richardson y fomentando así la aparición de la inestabilidad de Kevin-Helmholtz, una de las fuentes de turbulencia más conocida. Además, esta fuerte cizalladura vertical y la variación de la flotabilidad con la altitud pueden alterar parámetros importantes de las ondas de gravedad, principalmente su longitud de onda. Por consiguiente, si tenemos frecuencias muy bajas – es decir, longitudes de onda muy grandes – o si la fuerza de cizallamiento es muy elevada, la onda de gravedad podría llegar a romperse. Es por esto que la corriente en chorro guarda una estrecha relación con la aparición de turbulencia. A menor anchura del chorro, de mayor magnitud será la fuerza de cizalladura y la ruptura de dicha onda se producirá en una zona más cercana a la parte superior del cumulonimbus.

En cuanto al pronóstico de este tipo de turbulencia, en [37] se analiza que, combinando las predicciones de turbulencia con los modelos numéricos de meteorología, se pueden mejorar de forma significativa las predicciones, pero aún queda mucho margen de mejora.

#### 4.4.2. Turbulencia de ondas de montaña

Este tipo de turbulencia guarda bastantes similitudes con las anteriores. En este caso, es el terreno quien origina las ondas de gravedad, que se propagan hasta que la fuerza de cizalladura del viento toma un valor crítico y ocasiona su ruptura.

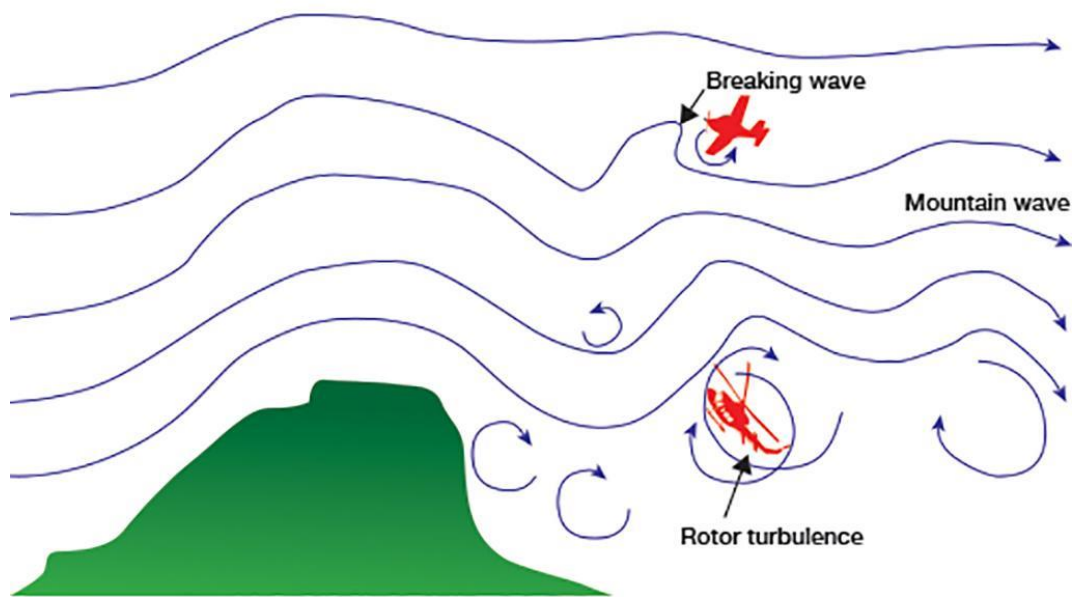


Figura 4.4: Turbulencia de onda de montaña. Fuente: [42]

Para la aparición de esta turbulencia no es necesario que exista una gran ondulación del aire, pues los remolinos alrededor de las montañas también se originan en presencia de flujo laminar, a priori bastante estable. La onda de montaña formada origina movimientos ascendentes y descendentes del aire, y la intensidad de la turbulencia dependerá en gran medida de la magnitud y de la dirección del viento incidente. Cuando el viento es fuerte y sopla de forma perpendicular o con un ángulo similar a la zona montañosa, más intensa será la turbulencia ocasionada y se percibirá a distancias mayores. De forma general, las aeronaves deberán cruzar la zona montañosa a una altura igual a 2,5 veces la elevación de dicho obstáculo para evitar el efecto de la turbulencia [43].

El caso más peligroso dentro de este tipo de turbulencia es la formación de un rodillo turbulento denominado rotor, que se forma debido a que las ondas a sotavento de la barrera montañosa quedan atrapadas. El rotor que más riesgo conlleva es el que se crea en la primera cresta de dicha onda, aproximadamente a unos 10 km de la montaña. Además, el hecho de encontrarse a bajas alturas disminuye el margen de maniobra, de ahí que sean especialmente peligrosos en aviación. Estos rotores tienen unos diámetros comprendidos entre 1000 y 3000 metros, alcanzando velocidades verticales de hasta 5000 pies por minuto [44]. En la figura 4.5 se puede observar el aspecto que adquieren este tipo de cúmulos. En concreto, dicha imagen fue tomada en marzo de 2011 en el Macizo de Fuentes Carrionas, en la provincia de Palencia [45].



*Figura 4.5: Rotor lenticular originado por una onda de montaña. Fuente: [45]*

#### 4.4.3. Turbulencia en aire claro

La CAT es un tipo de turbulencia cuya principal característica es que aparece en ausencia de nubosidad y de tormentas. Como se ha mencionado anteriormente, la fase del vuelo con más probabilidad de sufrir CAT es durante el vuelo de crucero, a altitudes superiores a 10.000 pies. Este tipo de turbulencia es una de las causas principales de accidentes relativos a la meteorología. En concreto, [36] afirma que el 24% de estos accidentes son producidos por la presencia de CAT, mientras que el 65% son debidos a la presencia de turbulencia en general.



### *Número de Richardson*

El principal fenómeno – y uno de los más conocidos hasta el momento - que motiva la aparición de CAT es la fuerza de cizalladura del viento, estrechamente relacionada con la corriente en chorro. Para comprender bien este fenómeno, es necesario definir un parámetro adimensional conocido como el número de Richardson, que nos muestra la relación entre la energía potencial y cinética de un determinado fluido y que se puede expresar mediante la siguiente relación:

$$Ri = \frac{N^2}{(\delta U / \delta z)^2} = \frac{(g/\theta)(\delta\theta/\delta z)}{(\delta U / \delta z)^2}$$

*Ecuación 4.1: Número de Richardson*

Siendo N la frecuencia de Brunt-Väisälä o frecuencia de flotación, U la velocidad horizontal, z la altitud, g la aceleración de la gravedad y  $\theta$  la temperatura potencial. Dicho de otra forma, este parámetro representa la relación entre la estratificación y la fuerza de cizalladura vertical.

Típicamente, se considera que la zona de inestabilidad ocurre cuando  $Ri < 0,25$ , es decir, con una cizalladura intensa y un valor de estratificación reducido. No obstante, dependiendo del modelo numérico que se utilice, este umbral de turbulencia podrá ser ligeramente distinto.

Las tablas 4.1 y 4.2 muestran respectivamente una clasificación del nivel de turbulencia y de la estabilidad atmosférica en función del número de Richardson.

Número de Richardson	Tipo de flujo	Nivel de turbulencia debido a la flotabilidad	Nivel de turbulencia debido a la cizalladura
$Ri > 0$ (valores grandes)	Laminar	No hay (muy estable)	Pequeña
$Ri > 0$ (valores pequeños)	Turbulento	No hay (estable)	Grande
$Ri < 0$ (valores pequeños)	Turbulento	Pequeña	Grande
$Ri < 0$ (valores grandes)	Turbulento	Grande	Pequeña

Tabla 4.1: Nivel de turbulencia en función del número de Richardson. Fuente: elaboración propia (adaptado de [46], [47])

Número de Richardson	Estabilidad atmosférica
$Ri = 0$	Neutra
$Ri < 0$	Inestable
$Ri > 0$	Estable
$Ri < -0,03$	Convección libre
$Ri > -0,03$	Convección forzada
$Ri > 0,25$	Estable
$0,21 < Ri < 0,25$	Inestabilidad Kevin-Helmholtz

Tabla 4.2: Estabilidad atmosférica en función del número de Richardson. Fuente: elaboración propia (adaptado de [46])

En ciertas regiones atmosféricas donde hay una fuerte cizalladura, como puede ser el caso de la corriente en chorro, se produce un aumento significativo del denominador de la expresión, haciendo que el número de Richardson ambiental decrezca, hasta que alcanza un valor donde aparece la turbulencia. Por eso, es fundamental estudiar y comprender el comportamiento de la corriente en chorro y la influencia que ejerce sobre la turbulencia en aire claro.

Del estudio realizado en [35] y en [37] de las rutas de tiempo mínimo entre las ciudades de Nueva York y Londres, se llega a la conclusión de que los cambios de la corriente en chorro tienen una clara influencia en la turbulencia experimentada durante los vuelos transatlánticos. En concreto, se demostró que los vuelos con dirección Este se benefician más de la corriente en chorro para ganar velocidad gracias a ese viento de cola generado, y por tanto, la probabilidad de atravesar regiones de CAT será mayor. En cambio, los vuelos hacia el Oeste, que tratan de evitar el viento en contra generado por la corriente en chorro, sufren una fuerza de cizalladura vertical mucho menor, y con ello, existe menos probabilidad de que se encuentren con regiones de turbulencia.

Otro de los aspectos importantes acerca del comportamiento de la corriente en chorro es la perturbación de los anticiclones debido a la liberación del calor latente. Este fenómeno consigue dar respuesta a la intensidad del nivel superior del chorro. En concreto, los ciclones situados en latitudes medias causan entre el 30 y el 50% de la fuerza de cizalladura de la corriente en chorro del sur [37]. Esta convección húmeda que perturba el anticiclón hace que la intensidad de la corriente en chorro sea mayor, por tanto, la turbulencia en aire claro generada será también de mayor intensidad.

## 5. Métodos de detección de CAT

Una vez comprendido cómo se forma la turbulencia en aire claro, la forma de cuantificarla mediante el número de Richardson y su tendencia a seguir aumentando con el cambio climático, en este apartado realizaremos un análisis de la tecnología que se encuentra en desarrollo para detectar turbulencia en aire claro durante el vuelo.

### 5.1. MEDICIONES DE AERONAVES

#### 5.1.1. LIDAR

Se trata de un sistema de teledetección por láser en el espectro ultravioleta instalado en la parte delantera de la aeronave. El principio de funcionamiento de esta tecnología es similar al de un radar convencional, emite un rayo láser que se refleja en los obstáculos y midiendo el tiempo que tarda en llegar de vuelta, se sabe la distancia a la que nos encontramos de dichos obstáculos. La frecuencia de funcionamiento es de unos 60 impulsos emitidos cada segundo, que se difunden por la atmósfera entre las partículas de oxígeno y nitrógeno. De esta forma, se emiten un total de 4 haces de luz que se encargan de medir los vectores velocidad del aire hasta unos 200 metros por delante de la aeronave.

La principal diferencia con la tecnología radar implementada en todas las aeronaves en la actualidad es que esta última tan sólo es capaz de detectar zonas de turbulencia si hay partículas de agua - ya sea en estado sólido o líquido - suspendidas en la atmósfera, por lo tanto, CAT es invisible para estos equipos. En cambio, el sistema LIDAR incorpora una tecnología que permite la detección de turbulencia utilizando otro tipo de partículas que no son hidrometeoros, por eso es capaz de encontrar zonas donde existe CAT.

En un futuro cercano, este sistema será capaz de detectar perturbaciones que indiquen la presencia de turbulencia en aire claro con un alcance mucho mayor, de 10 a 15 km. Es decir, lo suficientemente grande para que los pasajeros y la tripulación a bordo se abrochen los cinturones o incluso para hacer un cambio de rumbo y evitar esa zona de turbulencia. Además, el sistema LIDAR podrá enviar todos los datos recogidos al sistema de control del vuelo para que, de forma automática, accione los mandos necesarios para neutralizar la

turbulencia. Esto tendría unas claras ventajas, además de mejorar la seguridad durante el vuelo, desde el punto de vista estructural, ya que reduciría los esfuerzos de fatiga a los que se ven sometidos el fuselaje y las alas debido a la turbulencia.

Además de la detección de turbulencia en aire claro, existen otras aplicaciones de gran interés. Una de ellas sería su capacidad para detectar la turbulencia causada por la estela de otras aeronaves. Así, se podría calcular la distancia de seguridad adecuada entre aeronaves para despegues y aterrizajes en tiempo real y con una gran precisión, pudiendo aumentar la capacidad de tráfico aéreo en algunos aeropuertos. Otra posible aplicación es la medición de los parámetros básicos del vuelo, como la temperatura, la velocidad o la presión existente. Hoy en día, estas variables se miden a través de sistemas mecánicos, así que la posibilidad de medirlos usando un sistema óptico ofrece una mayor seguridad debido a esa redundancia en las mediciones.

Otra línea de investigación actual consiste en miniaturizar los sensores del LIDAR para que puedan ir integrados en el sistema de control del vuelo de la aeronave.

El principal inconveniente mostrado en [37] y en [48] se encuentra en que actualmente no es económicamente viable para la aviación comercial. Por el momento, no merece la pena invertir en este sistema debido a que su coste de instalación supera el beneficio económico de evitar esas zonas de CAT.

Uno de los proyectos de la Unión Europea llevados a cabo es el proyecto DELICAT, finalizado en el año 2014. Ha diseñado y probado un LIDAR en aeronaves con una capacidad de detección de zonas de turbulencia a distancias de incluso hasta 30 km [49]. Su principal objetivo es desarrollar un sistema que detecte zonas de turbulencia a pequeñas y medias distancias con una gran fiabilidad y su principio de funcionamiento se basa en la tecnología LIDAR, explicada anteriormente.

Este sistema fue ensayado en vuelo y detectó con éxito turbulencia leve. Dado que durante esas pruebas no existieron episodios de turbulencia severa, aún no se tienen evidencias de su respuesta y será necesario seguir haciendo pruebas en vuelo. De ofrecer una buena respuesta, este dispositivo DELICAT sería un elemento fundamental para implementar en aeronaves comerciales, con el fin de detectar turbulencia con el suficiente tiempo para

reducir las lesiones de los pasajeros y de la tripulación a bordo, además de para evitar o reducir los daños estructurales a las aeronaves.

#### 5.1.2. Otros sistemas a bordo

En la actualidad, un alto porcentaje de las aeronaves comerciales cuentan con sistemas instalados de navegación inercial y de grabación digital. Estos sistemas tienen como principal objetivo medir las aceleraciones experimentadas, así como la altitud y la actitud de la aeronave en cada momento, por lo que esta información que ofrecen también es de gran utilidad para estudiar el impacto que tiene la CAT sobre la aeronave y la capacidad de respuesta durante el vuelo. A raíz de estos equipos, se establecen unas métricas de CAT a bordo, basadas en la tasa de disipación de energía cinética turbulenta (TKE), de la que hablaremos más adelante.

Además, algunas aeronaves con fines de investigación atmosféricos cuentan con sistemas más avanzados capaces de cuantificar la velocidad de las ráfagas de turbulencia con altas frecuencias de muestreo y una gran precisión. Generalmente, se trata de sistemas con sensores calibrados de una forma especial y sistemas con una gran capacidad para el registro, el análisis y la posterior interpretación de los datos recabados.

## 5.2. MEDICIONES EN TIERRA

En este segundo grupo, se analizarán las principales formas que existen para detectar zonas de turbulencia desde tierra. A pesar de tener una limitación importante en cuanto al movimiento y de existir un número muy reducido de dichos sistemas, presentan una evidente ventaja frente a los sistemas a bordo en cuanto a potencia, tamaño y capacidad de procesar los datos, lo que se traducirá en alcances de detección mucho mayores.

#### 5.2.1. Radiosondeos

En este grupo se encuentran los globos de sondeo con seguimiento desde tierra, que se encargan de la medición de parámetros como la estabilidad, el vector velocidad del viento o su cizalladura, así como el número de Richardson. Por tanto, conociendo estos parámetros se puede saber dónde habrá una zona de CAT. El principal problema de este tipo de sistemas es que generalmente realizan tan sólo dos observaciones al día, y por este motivo en muchas ocasiones no son capaces de detectar la presencia de capas muy

turbulentas que varían en tiempo y espacio con gran rapidez. Además, debido a su alto coste económico, este sistema tan sólo se ha implementado en algunos aeropuertos.

Tan sólo algunos globos más especializados, por ejemplo, los que están presentes durante el lanzamiento de vehículos espaciales, tienen la capacidad de dar solución a capas de 50 metros o incluso menos. En [50] indica que se puede encontrar una relación directa entre las fluctuaciones en los movimientos verticales que experimenta el globo y la turbulencia asociada.

### 5.2.2. Perfilador de vientos

El perfilador de vientos o sodar es un equipo de gran sensibilidad caracterizado por emplear ondas sónicas para medir la dirección y velocidad del viento. El hecho de estar situado en tierra permite tener equipos más grandes y potentes, aunque también representa una limitación en lo que se refiere a la poca representatividad espacial de las medidas recogidas.

Su objetivo es tomar mediciones con una gran precisión de la dirección del viento y de la magnitud de su vector velocidad a la altitud a la que se encuentre la aeronave. Este sistema también es capaz de encontrar zonas de corte y flujos de la corriente en chorro, dos parámetros fundamentales para detectar zonas de CAT.

Sus ventajas se encuentran en su bajo coste y en la posibilidad de trabajar ante cualquier situación meteorológica. Los perfiladores de viento que trabajan en frecuencias VHF pueden llevar a cabo un sondeo completo cada seis minutos con una resolución espacial de cada muestra de 250 metros hasta alturas de 16 km AGL.

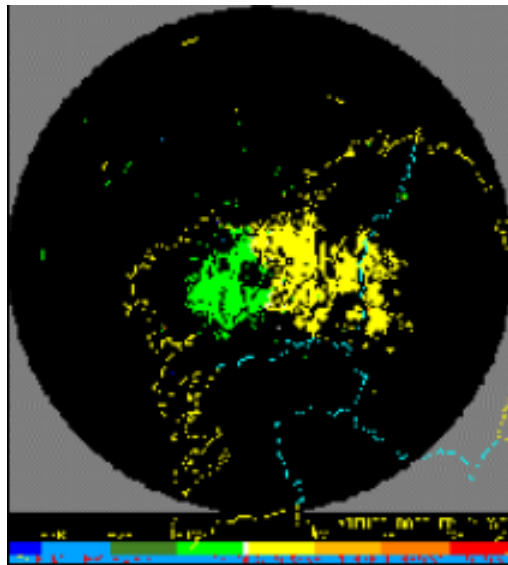


*Figura 5.1: Perfilador de viento de AEMET en el aeropuerto Adolfo Suárez Madrid-Barajas. Fuente: [51]*

### 5.2.3. Radar Doppler

El radar Doppler es un sistema de investigación en tierra que cuenta con una potencia elevada para encontrar ecos en aire claro. Las gotas de agua suspendidas en la atmósfera reflejan la onda electromagnética, creando la imagen de reflectividad. Si además estas partículas están en movimiento, se verá reflejado en una imagen de viento Doppler, pudiendo así detectar la presencia de pequeñas turbulencias alrededor de la capa límite, asociadas a la inestabilidad de Kevin-Helmholtz, y por tanto, a la aparición de CAT.

En la figura 5.2 podemos ver el aspecto de una imagen de viento Doppler durante un día en ausencia de nubes y fenómenos meteorológicos adversos. La imagen convencional de reflectividad radar no captaba ninguna señal. Sin embargo, este sistema calcula la velocidad y dirección de la turbulencia existente, y representa esas zonas tal y como lo vemos en la imagen superior.



*Figura 5.2: Imagen de viento Doppler durante un día despejado. Fuente: [52]*

### 5.2.4. LIDAR de investigación en tierra

Este sistema es similar al que llevan instalado las aeronaves en su parte delantera, con la diferencia de que, en este caso, el equipo se encuentra en tierra. Tiene una gran capacidad de medir la dirección y magnitud de los vectores velocidad del viento y observar el comportamiento de la corriente en chorro. Como principal desventaja, presenta que no siempre va a ser capaz de detectar zonas de turbulencia. Para ello, en estas zonas debe



existir un cierto número de partículas que reflejen el haz generado, y en el camino de vuelta, esta concentración de partículas debe ser menor para que la señal pueda atravesarlas y llegar al LIDAR de nuevo.

### 5.3. MEDICIONES SATELITALES

Otra forma de detectar turbulencia es desde el espacio, mediante mediciones de satélites. Se usan principalmente para la detección de turbulencia convectiva, aunque también se podrían emplear en otros tipos de turbulencia. La continua investigación y desarrollo de nuevos satélites con grandes resoluciones espaciales y temporales hace posible una detección de turbulencia más eficaz y precisa. En concreto, las mediciones tomadas por los satélites geoestacionarios combinadas con datos extraídos de otras fuentes pueden resultar de gran utilidad para detectar y pronosticar zonas de CAT a corto plazo.

En la tabla 5.1 se recogen las principales bandas utilizadas para la detección de distintos fenómenos asociados a CAT.

Zona del espectro	Longitud de onda	Principales aplicaciones
Visible	0,5 – 1 $\mu m$	Nubes a pequeña escala (menor a 1 km) asociado a KHI
MIR (Infrarrojo medio)	10 – 12 $\mu m$	Temperatura de la parte superior de las nubes, bandas de nubes a gran escala
Vapor de agua	6 – 7 $\mu m$	Regiones de ascenso o descenso relacionadas con ondas de montaña, frentes y ciclones

*Tabla 5.1: Bandas espectrales empleadas en la detección de fenómenos relacionados con CAT desde el espacio. Fuente: elaboración propia (adaptado de [53])*

Es importante destacar que las imágenes tomadas en los espectros visible e infrarrojo por satélites con órbitas polares no están disponibles con tanta frecuencia, pues se podrán obtener en intervalos comprendidos entre 2 y 6 horas, en función de la latitud. Generalmente, es preferible la utilización de satélites con órbitas geoestacionarias, y posteriormente se pueden contrastar y complementar ambas mediciones.

Analizando las imágenes tomadas por distintos satélites, se extrae la conclusión de que podemos encontrar zonas de CAT, además de en cielo despejado, en los cirros y en los bordes de sistemas nubosos a una gran escala. En concreto, en las regiones geográficas donde existe CAT asociada a la corriente en chorro subtropical, es común encontrar una serie de cirros situados en una posición transversal al flujo. Este hecho es debido a la inestabilidad inercial y en [53] indica que la existencia de grandes sistemas nubosos orientados de forma transversal al flujo está estrechamente relacionada con la aparición de CAT moderada o severa en estas regiones. Una representación de dicho fenómeno se recoge en la figura 5.3. Se trata de una imagen tomada por el satélite geoestacionario GOES-8 el día 3 de marzo de 2000, donde se pueden apreciar bandas de cirros situadas en sentido transversal a la dirección de la corriente en chorro subtropical, próximo a las Islas de Sotavento. Ese mismo día, un Boeing 767 alertó de la presencia de turbulencia severa en dicho lugar.

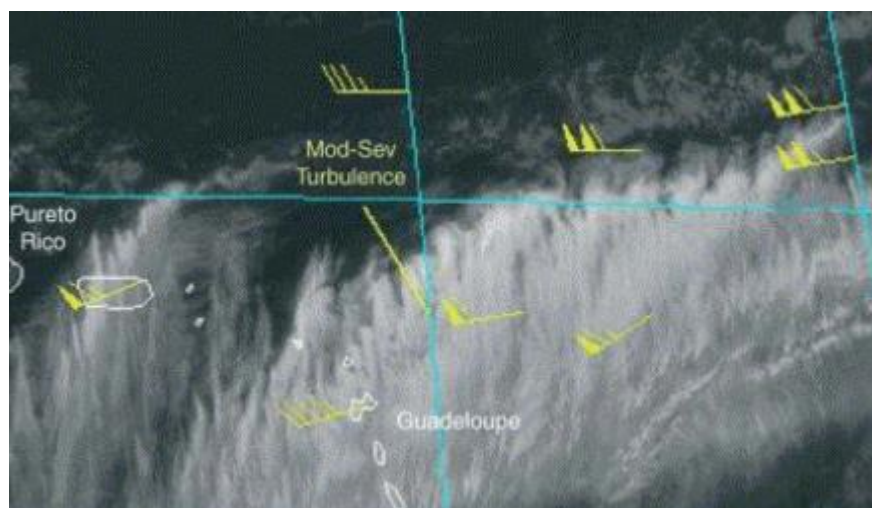


Figura 5.3: Bandas de cirros asociadas a la aparición de CAT. Fuente: [53]

## 6. Modelos de predicción de CAT

En el apartado anterior hemos estudiado las distintas formas que existen para detectar turbulencia en aire claro durante el vuelo. Otra de las opciones para reducir daños personales y materiales, además de los costes económicos asociados, consiste en desarrollar modelos matemáticos que pronostiquen turbulencia.

Los remolinos que originan turbulencia atmosférica se pueden dar en dimensiones muy diversas, desde escalas que comprenden unos pocos milímetros hasta escalas planetarias. En [37] se considera que los remolinos que afectan a la aviación tienen un tamaño del orden de 100 metros, a nivel de mesoescala. El principal inconveniente que existe es que las resoluciones de los modelos numéricos actuales son demasiado pequeñas, y esto hace que no sean capaces de resolverlos de forma explícita.

Estos modelos representan la atmósfera en una especie de retícula, en la que cada elemento aparece separado del siguiente una distancia del orden de 1 km. Como acabamos de indicar, la escala de turbulencia que nos interesa se encuentra alrededor de 100 metros, por lo que estos fenómenos de turbulencia se producen en una escala más pequeña que la cuadrícula utilizada y por tanto, deben ser parametrizados. Otra alternativa consiste en usar diagnósticos de turbulencia basados en modelos NWP, que asumen la cascada descendente de energía y de este modo usan escalas mayores para resolver el problema. Para entender este fenómeno nos apoyaremos en la figura 6.1. La energía se crea en grandes remolinos que van transfiriendo la energía cinética a otros remolinos cada vez más pequeños hasta que la acción de la viscosidad hace que esta energía se disipe en forma de calor.

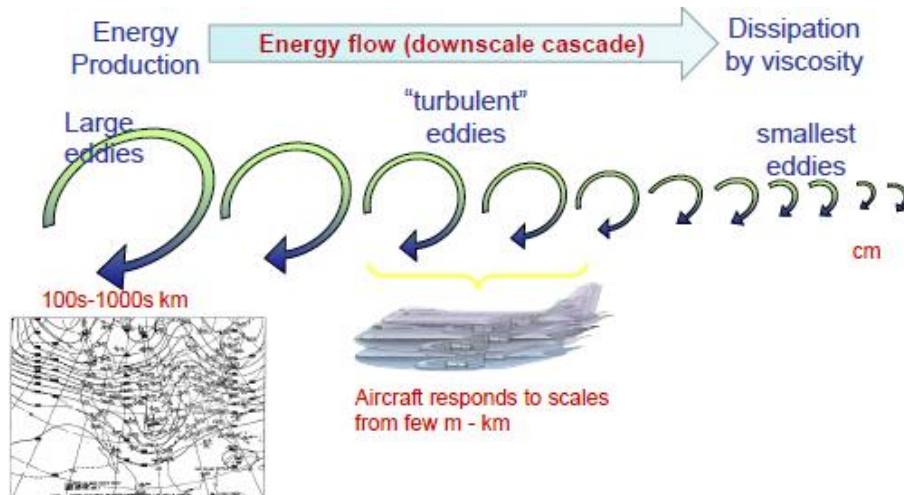


Figura 6.1: Escalas de turbulencia en aviación. Fuente: [53]

Hoy en día, son los Centros Mundiales de Pronósticos de Área de Londres y Washington (WAFC y NOAA respectivamente) los encargados de elaborar los pronósticos de turbulencia para la aviación [37]. En concreto, se elaboran una serie de gráficas cuatro veces al día (a las 00:00 h, 06:00 h, 12:00 h y 18:00 h) que reflejan las zonas de mayor peligro por diversas causas, como la formación de hielo, la existencia de nubes convectivas o de CAT. Nos centraremos en estudiar diversas formas de predecir la aparición de estas últimas mencionadas.

Tras muchos años de estudios sin éxito intentando hallar el vínculo existente entre la turbulencia y la deformación, los estudios de [37] encuentran una relación entre dicha deformación y la aparición de ondas de inercia-gravedad, a través de la teoría de Lighthill-Ford. Esta teoría explica cómo las ondas de gravedad hacen la atmósfera más inestable, reduciendo el número de Richardson a valores inferiores a 0,25 y provocando así la aparición de la inestabilidad de Kevin-Helmholtz. Debido a este fenómeno, las ondas llegan a su rotura, originando turbulencia. A continuación, se explican las métricas más importantes en este campo.

### 6.1. TASA DE DISIPACIÓN DE REMOLINOS (EDR)

La tasa de disipación de remolinos es una métrica comúnmente empleada para la medición de la intensidad de la turbulencia en aviación. Se puede definir según la ecuación 6.1, siendo  $\varepsilon$  la tasa de conversión de energía cinética turbulenta en energía térmica producida a pequeña escala.

$$EDR = \varepsilon^{1/3}$$

*Ecuación 6.1: Expresión de la tasa de disipación de remolinos. Fuente: [54]*

Este parámetro  $\varepsilon$  se puede estimar aplicando una técnica conocida como disipación inercial. Dicha aproximación se presenta en la expresión 6.2 y se realiza considerando la predicción de Kolmogorov para la energía turbulenta. Vemos como a partir de la densidad de energía espectral de potencia (PSD) se puede obtener la tasa de disipación de energía.

$$S_i(k) \equiv PSD_i = C_i \cdot \varepsilon_i^{2/3} \cdot k^{-5/3}$$

*Ecuación 6.2: Tasa de disipación de energía. Fuente: [54]*

Siendo  $k$  el número de onda, el subíndice  $i$  las diferentes componentes del vector velocidad y  $C_i$  las constantes de Kolmogorov:  $C_i = \{0.53, 0.707, 0.707\}$

Entonces, la tasa de disipación de remolinos se puede calcular mediante la siguiente expresión:

$$EDR_i = \varepsilon_i^{1/3} = \left( \frac{S_i(k) \cdot k^{5/3}}{C_i} \right)^{1/2}$$

*Ecuación 6.3: Estimación de EDR. Fuente: [54]*

A continuación, se va a formular una expresión que determina la tasa mínima de disipación de remolinos, es decir, el valor mínimo del parámetro  $\varepsilon$ . Para ello, partimos de dos escalas fundamentales de turbulencia:

En primer lugar, la microescala de Kolmogorov se define como la mínima escala que puede darse en flujo turbulento, donde la energía cinética se disipa en forma de calor debido a la viscosidad. En las expresiones siguientes se definen las tres escalas existentes, donde  $\nu$  es la viscosidad cinemática del fluido expresada en  $m^2/s$  y se define como la relación entre la viscosidad dinámica ( $\mu$ ) y la densidad del aire ( $\rho$ ).

$$\eta = \left( \frac{\nu^3}{\varepsilon} \right)^{1/4}$$

*Ecuación 6.4: Escala de longitud de Kolmogorov. Fuente: [55]*

$$\tau_{\eta} = \left(\frac{\nu}{\varepsilon}\right)^{1/2}$$

*Ecuación 6.5: Escala de tiempo de Kolmogorov. Fuente: [55]*

$$u_{\eta} = (\nu \cdot \varepsilon)^{1/4}$$

*Ecuación 6.6: Escala de velocidad de Kolmogorov. Fuente: [55]*

La escala de Kolmogorov de longitud  $\eta$ , definida en la ecuación 6.4, es proporcional a la viscosidad, por lo que podemos saber que el remolino más pequeño generado será de menor tamaño si la fuerza viscosa es menor.

Por otra parte, definimos el número de Reynolds como las fuerzas de inercia entre las fuerzas viscosas:

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot L}{\mu}$$

*Ecuación 6.7: Definición del número de Reynolds. Fuente: [55]*

Si definimos el número de Reynolds en función de los parámetros usados en la escala de Kolmogorov, éste es igual a la unidad.

$$Re = \frac{u \cdot \eta}{\nu} = 1$$

*Ecuación 6.8: Número de Reynolds. Fuente: [55]*

De esta última expresión se puede deducir que el movimiento a pequeña escala es bastante viscoso y que la disipación de energía debido a la viscosidad depende de la escala de longitud considerada.

Si tenemos un número de Reynolds alto, nos encontramos en un flujo turbulento, lo que significa que las fuerzas debidas a la viscosidad son pequeñas en relación a las fuerzas inerciales. Es en esta condición donde se dan los movimientos a una menor escala. A medida que el término de las fuerzas viscosas aumenta y la energía se disipa en forma de calor, el número de Reynolds se hace más pequeño y esta condición se corresponde con el flujo laminar.

A partir de las expresiones anteriores, llegamos a la conclusión de que la escala de longitud de Kolmogorov es proporcional al número de Reynolds, aumentando con la potencia de  $\frac{3}{4}$  como indica la siguiente expresión.

$$\frac{L}{\eta} \sim Re^{3/4}$$

Esto explica la principal razón por la que las simulaciones computacionales de flujos turbulentos son tan complejas de realizar. A modo de ejemplo, si consideramos un flujo cuyo  $Re = 10^6$ , la relación  $\frac{L}{\eta}$  será proporcional a  $10^{18/4}$ , por lo que necesitaremos una cuadrícula con un número de puntos del orden de  $10^{14}$  para resolver el problema tridimensional [56].

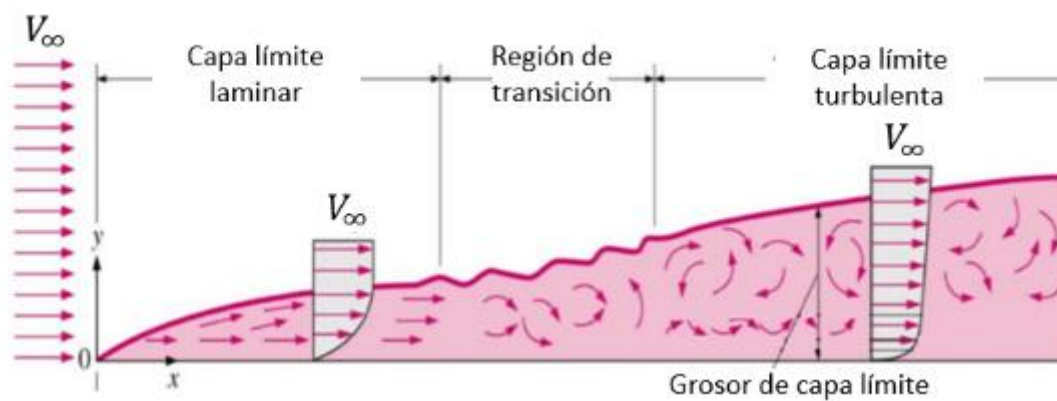


Figura 6.2: Concepto de capa límite laminar y turbulenta. Fuente: [57]

Por otra parte, definimos la escala de Ozmidov como la escala de mayor tamaño

$$L_0 = \left(\frac{\varepsilon}{N^3}\right)^{1/2}$$

Ecuación 6.9: Escala de Ozmidov. Fuente: [58]

Siendo N la frecuencia de Brunt-Väisälä o frecuencia de flotación.

$$N = \sqrt{\frac{g \cdot d\vartheta}{\vartheta \cdot dz}}$$

Ecuación 6.10: Expresión de la frecuencia de flotación. Fuente: [58]

Siendo  $\vartheta$  la temperatura potencial, como ya habíamos definido anteriormente en el número de Richardson.



En [58] se afirma que un flujo de aire puede considerarse turbulento cuando la relación entre la escala de Ozmidov y la de Kolmogorov es mayor que 10, es decir,  $\frac{L_0}{\eta} \geq 10$ . Para una relación igual a 10, obtenemos la tasa de disipación mínima:

$$\varepsilon_{min} = \nu \cdot N^2 \cdot \left(\frac{L_0}{\eta}\right)^{4/3} \approx 21,5 \cdot \nu \cdot N^2$$

*Ecuación 6.11: Tasa mínima de disipación de energía turbulenta. Fuente: [58]*

Mediante esta expresión podemos estimar el menor valor de la tasa de disipación de remolinos en unas condiciones atmosféricas determinadas por  $\nu$  – dependiente de la temperatura - y  $N$ .

La OACI en su Anexo 3 [59] define una clasificación de la turbulencia en base al valor de la raíz cúbica de la tasa de disipación de remolinos, que se expresa en  $m^{2/3}/s$  y que hoy en día constituye la métrica estándar de CAT. Entre las ventajas que nos ofrece la utilización de esta métrica, destaca su relación directa con cargas específicas de las aeronaves, pudiendo calibrarse en función del tipo de aeronave considerada [54]. En la tabla 6.1 se recogen distintos valores de interés.

Intensidad de la turbulencia	Clasificación	$\sqrt[3]{EDR}$	Variaciones en la velocidad	Variaciones en el factor de carga (n)
	Moderada	0,4 – 0,7	15 – 25 kt	0,5 – 1,5 g
	Fuerte	+ 0,7	+ 25 kt	0 – 2 g

*Tabla 6.1: Clasificación de la turbulencia. Fuente: [60]*

En casos de turbulencia moderada, los cambios en la actitud y en la altitud de la aeronave son notables, pero se puede controlar. Sin embargo, cuando se da turbulencia fuerte, la



aeronave experimenta mayores cambios de velocidad y de factor de carga y puede llegar a sufrir daños en su estructura, además de perder el control durante el vuelo.

Hablando en términos de turbulencia, es necesario diferenciar dos conceptos:

- La turbulencia potencial, es la que se cuantifica a partir del índice EDR y está basada en variables físicas, es decir, no depende de la aeronave.
- La turbulencia efectiva, que representa el impacto de la turbulencia potencial de la atmósfera sobre la aeronave. Las principales consecuencias son cambios en la velocidad vertical que conllevan bruscas variaciones del factor de carga, y estos efectos serán de menor o mayor magnitud dependiendo del peso y de las características de cada aeronave.

## 6.2. ÍNDICE DE ELLROD

Este índice se usa para medir CAT y se define de la siguiente forma:

$$IE = VWS \cdot (DEF + CVG)$$

*Ecuación 6.12: Índice de Ellrod. Fuente: [39]*

Siendo:

La deformación por cizalladura (shearing deformation):

$$DSH = \frac{dv}{dx} + \frac{du}{dy}$$

La deformación por estiramiento (stretching deformation):

$$DST = \frac{du}{dx} - \frac{dv}{dy}$$

Con estos parámetros se halla la deformación total:  $DEF = (DSH^2 + DST^2)^{1/2}$

CVG y VWS son la convergencia y la fuerza de cizalladura vertical, respectivamente:

$$CVG = -\left(\frac{du}{dx} + \frac{dv}{dy}\right)$$

$$VWS = \frac{\Delta V}{\Delta z}$$

En función del valor que tome el índice de Ellrod, podemos definir la intensidad de la turbulencia en base al siguiente criterio: si toma valores menores o iguales a 4, nos encontramos en una zona de turbulencia leve. Para valores comprendidos entre 4 y 8, la turbulencia será moderada, y de 8 a 12, existirá turbulencia severa.

### 6.3. ÍNDICE GWD

Es similar al anterior, con la pequeña diferencia de que incluye un término con la influencia de la resistencia aerodinámica que rompe las ondas de gravedad, que se generan mediante procesos convectivos. Matemáticamente, se define mediante la siguiente ecuación, donde el subíndice *gwd* se refiere a este término de resistencia:

$$GWD = \left[ \left( u \cdot \frac{\partial u}{\partial t} \Big|_{gwd} + v \cdot \frac{\partial v}{\partial t} \Big|_{gwd} \right) \hat{T}_{conv} \right]^{1/3}$$

*Ecuación 6.13: Definición matemática del índice GWD. Fuente: [58]*

El parámetro  $C_p$  es el calor específico a presión constante y  $\hat{T}_{conv}$  es el calentamiento convectivo integrado entre dos límites: el límite inferior se corresponde con una presión de 500 hPa y el superior es el límite normalizado por  $\hat{T}_0 = 1W/m^2$ . Con estos límites de integración se consigue que sólo el calentamiento por convección contribuye a la formación de turbulencia.

$$\hat{T}_{conv} = \frac{c_p}{\hat{T}_0} \cdot \int_{P=500 \text{ hPa}}^{cloud \ top} \frac{\partial T}{\partial t} \cdot \frac{dp}{g}$$

*Ecuación 6.14: Definición del calentamiento convectivo. Fuente: [58]*

### 6.4. ÍNDICE DISS

Este índice representa la tasa de disipación turbulenta total, incluyendo la disipación que se produce debido a la mezcla turbulenta, a las ondas de gravedad y a las características orográficas, representando mediante los subíndices *diff* y *conv* en la ecuación 6.15.

$$DISS = \left[ \left( u \cdot \frac{\partial u}{\partial t} \Big|_{diff} + v \cdot \frac{\partial v}{\partial t} \Big|_{diff} \right) \right]^{1/3} + \left[ \left( u \cdot \frac{\partial u}{\partial t} \Big|_{conv} + v \cdot \frac{\partial v}{\partial t} \Big|_{conv} \right) \right]^{1/3}$$

Ecuación 6.15: Definición matemática del índice DISS. Fuente: [58]

En la figura 6.3 se muestran las distribuciones de probabilidad de los logaritmos naturales de los tres índices estudiados y la comparación con el modelo meteorológico.

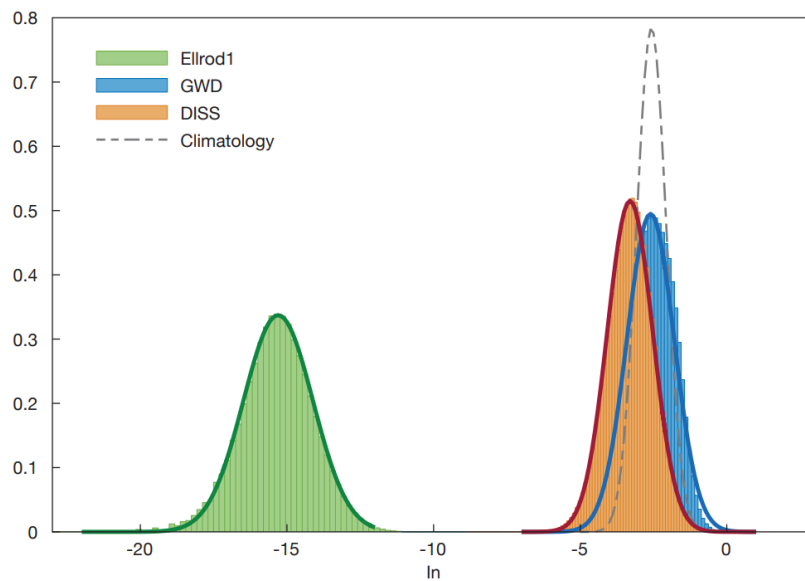


Figura 6.3: Distribuciones logarítmicas de los índices analizados. Fuente: [61]

El principal objetivo de todos estos cálculos es ajustar para cada uno de los índices, de la forma más exacta posible, dichas distribuciones logarítmicas normales, para poder relacionarlos con la EDR que extraemos de los modelos meteorológicos.

Además, en [61], [58] define tres modelos distintos de CAT como funciones de los índices estudiados anteriormente:

$$CAT1 = 0,7 \cdot IE + GWD$$

$$CAT2 = 0,66 \cdot DISS + GWD$$

$$CAT12 = \frac{CAT1 + CAT2}{2}$$

La figura 6.4 representa las distribuciones de probabilidad para un período de 3 meses, de Enero a Marzo de 2019, y se compara con las observaciones realizadas.

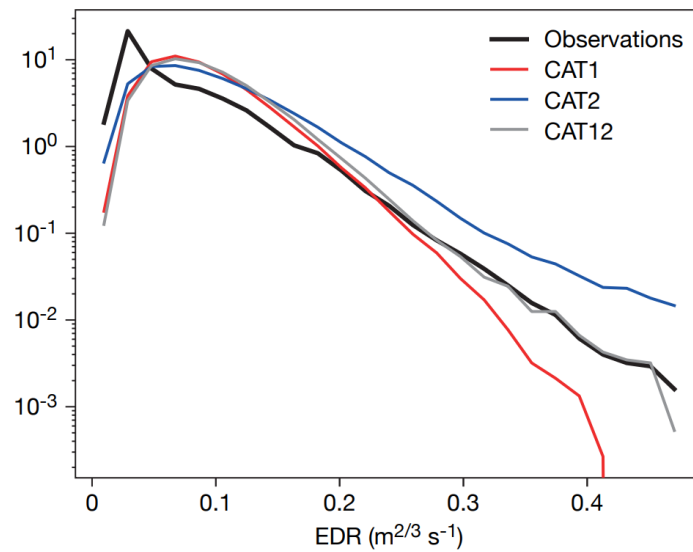


Figura 6.4: Funciones de distribución de probabilidad para los modelos de CAT definidos. Fuente: [61]

Analizando las distintas curvas, nos damos cuenta de que el modelo CAT1 subestima la aparición de turbulencia fuerte y severa, para valores de EDR mayores de  $0,25 m^{2/3}/s$ . Con CAT2 ocurre justo lo contrario, pues sobrestima la existencia de turbulencia fuerte. La curva que mejor se ajusta a las observaciones es la media de ambas funciones, definida como CAT12.

### 6.5. TASA DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA CINÉTICA TURBULENDA (TKE)

El parámetro TKE es una medida de la energía cinética por unidad de masa que está ligada a la creación de remolinos en un flujo turbulento. La ecuación inicial (6.16) es bastante compleja, ya que como se puede apreciar a continuación, tiene una gran cantidad de términos asociados a la fricción, la flotabilidad, a fuerzas externas y a la fuerza de cizalladura del fluido.

$$\underbrace{\frac{\partial k}{\partial t}}_{\text{Derivada Local}} + \underbrace{\bar{u}_j \frac{\partial k}{\partial x_j}}_{\text{Advección}} = \underbrace{-\frac{1}{\rho_0} \cdot \frac{\partial \bar{u}'_i \cdot p'}{\partial x_i}}_{\text{Difusión por presión}} - \underbrace{\frac{1}{2} \cdot \frac{\partial \bar{u}'_i \cdot \bar{u}'_j \cdot \bar{u}'_j}{\partial x_i}}_{\text{Transporte turbulento}} + \underbrace{\nu \cdot \frac{\partial^2 k}{\partial x_j^2}}_{\text{Transporte viscoso molecular}} - \underbrace{\bar{u}'_i \cdot \bar{u}'_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j}}_{\text{Producción}} - \underbrace{\nu \cdot \frac{\partial \bar{u}'_i \cdot \partial \bar{u}'_i}{\partial x_j \partial x_j}}_{\text{Disipación}} - \underbrace{\frac{g}{\rho_0} \cdot \bar{\rho}' u'_i \delta_{i3}}_{\text{Flujo de flotabilidad}}$$

Ecuación 6.16: Ecuación de la energía cinética turbulenta. Fuente: [62]

Partiendo de esta expresión, se pueden hacer diversas simplificaciones y obtenemos una expresión mucho más sencilla, mostrada en la ecuación 6.17. Representa la energía total por unidad de masa, siendo  $u'$ ,  $v'$ ,  $w'$  las perturbaciones en la velocidad. Este índice, además de pronosticar CAT, también es válido para predecir ondas de montaña y turbulencia convectiva y presenta una mayor efectividad cuando los modelos numéricos empleados tienen una resolución muy elevada.

$$TKE = \frac{u'^2 + v'^2 + w'^2}{2}$$

*Ecuación 6.17: Expresión simplificada de TKE. Fuente: [50]*

Estos índices generalmente tienden a sobrestimar las predicciones, anunciando regiones de CAT mayores a la real, lo que en términos de seguridad se considera beneficioso, dentro de unos límites. No obstante, aún existen muchas limitaciones de resolución de estos modelos e incertidumbres asociadas al comportamiento complejo de las velocidades de viento máximas de la corriente en chorro.

## 6.6. ENFOQUES ESTADÍSTICOS

Otra alternativa es recoger todos los índices mencionados en una serie de modelos estadísticos y compararlos con las observaciones efectuadas. El más conocido es el ITFA [50], un algoritmo integrado de pronóstico de turbulencia desarrollado a finales de la década de 1990. Su principio de funcionamiento se basa en asignar una puntuación a cada uno de los índices, basándose en su exactitud respecto a las observaciones reales. Luego, se realiza una media ponderada de todos ellos para establecer un valor de ITFA en cada uno de los puntos de la cuadrícula numérica utilizada y se repite el mismo proceso para cada ciclo de diagnóstico.

Estos modelos estadísticos son muy útiles por el hecho de combinar la información de muchos índices de turbulencia. No obstante, en muchas ocasiones no son capaces de representar adecuadamente las zonas de turbulencia con precisión, debido a diversas limitaciones, una de ellas, los umbrales meteorológicos considerados.

# 7. Limitaciones y desarrollo futuro de nuevas técnicas de pronóstico de CAT

Hemos visto que, en las últimas décadas, son muchos los avances que se han hecho, tanto nuevos equipos y sistemas para detectar zonas de CAT, como el desarrollo de modelos matemáticos para predecir dónde podemos encontrar dicha turbulencia. A pesar de todo el esfuerzo realizado, sigue habiendo bastantes limitaciones en muchos aspectos que comentaremos brevemente a continuación.

## 7.1. PRINCIPALES LIMITACIONES

- Incertidumbres desde el punto de vista teórico: la creación y el comportamiento de la atmósfera turbulenta, a pesar de todos los estudios que se han realizado hasta el momento en el campo de la mecánica de fluidos, nunca se ha llegado a entender del todo bien. Se trata de un fenómeno complejo que involucra muchos parámetros y para muchos científicos aún se trata de un problema no resuelto.
- La escala de turbulencia es pequeña: como se ha explicado anteriormente, los modelos de pronóstico son válidos para escalas mayores a la que ocurre la turbulencia, por lo que es necesario asumir ciertas simplificaciones en los modelos utilizados o recurrir a datos estadísticos.
- Falta de observaciones: se necesita un mayor volumen de observaciones durante los vuelos para extraer conclusiones más precisas y conocer mejor el comportamiento de este fenómeno. Las mediciones también pueden resultar un tanto subjetivas, ya que dependen de las características de la aeronave y hay una gran cantidad de factores que pueden alterarlas, por lo que será necesario contrastarlas con otros datos procedentes de sistemas satelitales o terrestres.
- Escasa aparición de CAT severa: la aparición de CAT es leve en el 96-98% de los casos [53], y rara vez se presencian episodios de turbulencia moderada o severa.
- Errores en los modelos de predicción a gran escala.

## 7.2. NECESIDADES DE DESARROLLO I+D

Se necesitan más observaciones y de mejor calidad en la mesoescala, donde ocurre la turbulencia. A más datos recogidos, se podrán hacer PIREP más fiables.

Para ello, es necesario desarrollar nuevas técnicas de teledetección, ya sea desde el espacio, aéreas o terrestres. Del mismo modo, también se deben diseñar nuevos sistemas de detección durante el vuelo y mejorar los existentes, para los casos donde fallen los pronósticos realizados.

De una forma más general, se debe conocer con más detalle la naturaleza y el comportamiento del flujo turbulento, desde los mecanismos de creación de la turbulencia hasta cómo se propaga por la atmósfera. Para ello, es imprescindible una mayor colaboración a nivel nacional e internacional, así como entre las aerolíneas.

## 8. Discusión y conclusiones

A lo largo de este trabajo, se estudia la reciprocidad de la relación existente entre la aviación y el clima. El sector de la aviación presenta una clara tendencia a seguir creciendo con el paso de los años y los problemas asociados al impacto medioambiental y las consecuencias climáticas que conlleva cada vez son más preocupantes.

En realidad, las emisiones producidas por el sector aéreo son notablemente inferiores a las que producen otros medios de transporte, pero el hecho de emitir los gases contaminantes durante el vuelo de crucero, a unos 10 ó 12 km de altitud, hace que la eficiencia radiativa de algunas sustancias se incremente y agrave el problema. Es por esto que se desarrollaron métricas para cuantificar el impacto real sobre el cambio climático, estableciendo comparaciones de la cantidad de calor que atrapan las sustancias contaminantes en relación al CO<sub>2</sub> y la variación de temperatura asociada. Así mismo, también se ha estudiado el oscurecimiento global, la reducción de luz solar incidente ha enfriado la superficie de nuestro planeta y ha enmascarado en cierto modo el efecto invernadero hasta 1990. A partir de ese año, el fenómeno del oscurecimiento global ha experimentado una tendencia descendente, coincidiendo con la implementación de políticas de reducción de emisiones contaminantes, especialmente de aerosoles.

Entre los gases contaminantes producidos por el sector de la aviación, el que más contribuye al calentamiento de la Tierra es el CO<sub>2</sub>, cuyas emisiones se encuentran actualmente a niveles sin precedentes y con tendencia a seguir aumentando si no se toman medidas eficaces.

Entre las líneas de investigación actuales para la reducción del CO<sub>2</sub>, destaca el uso de biocombustibles o el desarrollo de otros tipos de sistemas propulsivos, como los motores eléctricos. Otras opciones para reducir dichas emisiones y seguir utilizando combustibles fósiles sería hacer una reducción del peso total de la aeronave, de la resistencia aerodinámica experimentada, o implementar nuevas técnicas de enfriamiento y combustión más avanzadas para reducir el consumo de combustible y también las emisiones.



Otra línea de estudio en la actualidad está relacionada con las estelas de condensación originadas por las aeronaves. Aún no se sabe con certeza si estas estelas, originadas al condensarse el vapor de agua en torno a pequeñas partículas de hollín, tienen un efecto contaminante o tan sólo son un indicador de los cambios en la temperatura global que se están produciendo en nuestro planeta.

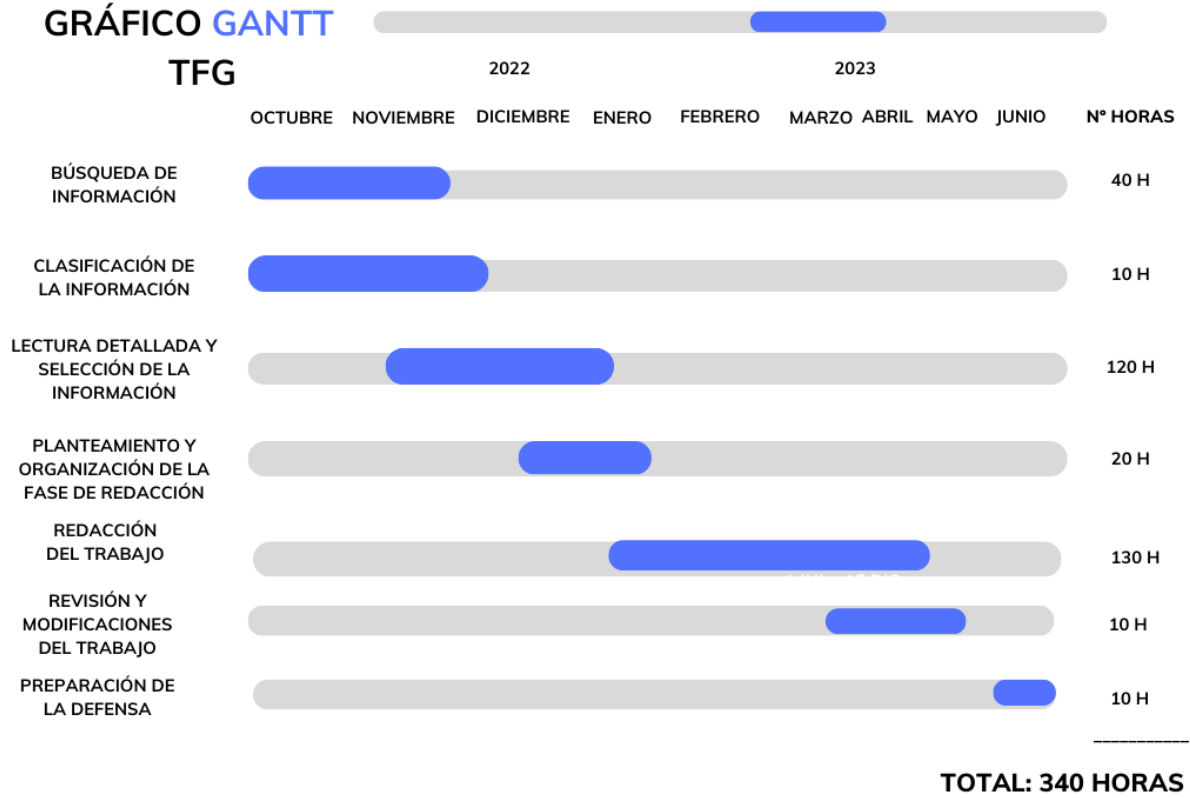
Posteriormente, se analiza esta relación de un modo inverso, es decir, cómo afectan los cambios en el clima al sector de la aviación. Tomando como referencia principal un estudio realizado de la ruta aérea entre Londres y Nueva York, se ha demostrado que duplicando la concentración de CO<sub>2</sub> atmosférico, se modifica de forma significativa el campo de velocidad de viento. Esto causa que los viajes hacia el Este se vean beneficiados por la corriente en chorro y, de media, se reduzcan unos 4 minutos de vuelo; mientras que al volar dirección Oeste, el tiempo de vuelo aumentará unos 5 minutos. Si establecemos una comparación entre estos tiempos y los que datan de la época preindustrial, llegamos a la conclusión de que los tiempos de vuelo promedio han aumentado, lo que conlleva un mayor consumo de combustible, es decir, un coste económico superior además de una mayor emisión de sustancias contaminantes.

Otra conclusión fundamental que se extrae es que la duplicación de CO<sub>2</sub> también motiva la aparición de zonas de turbulencia en aire claro (CAT), haciéndolas más frecuentes e intensas. Este tipo de turbulencia representa un porcentaje muy pequeño del total de accidentes aéreos, pero es una de las principales causas de los siniestros debidos a causas meteorológicas. Dado que los modelos numéricos predicen aumentos de CAT en respuesta al cambio climático, para mantener los niveles de seguridad y que no se produzca un mayor número de lesiones o de daños estructurales sobre las aeronaves, será necesario seguir investigando en dos líneas distintas:

Por una parte, mejorando los modelos numéricos existentes, lograr que cuenten con una mayor resolución espacial para trabajar en la escala a la que tiene lugar la turbulencia y proporcionar resultados fiables. En este trabajo se ha mostrado que determinados índices, como el de Ellrod, el DISS o el GWD nos dan una idea de la intensidad de la turbulencia producida y nos permiten relacionarlos con la tasa de disipación de remolinos, una de las métricas más comunes para cuantificar la intensidad de la turbulencia producida.

Otra alternativa consiste en el desarrollo de sistemas para detectar CAT durante el vuelo. En concreto, la tecnología LIDAR instalada en la aeronave, las mediciones tomadas desde tierra o las satelitales ayudan a detectar zonas de CAT de una forma eficaz y precisa. Sin embargo, en la mayoría de los casos los costes superan a los beneficios económicos derivados de evitar estas turbulencias, así que por el momento, no hay demasiado interés en desarrollar nuevos sistemas dedicados a la detección de este tipo de turbulencias.

# Cronograma del desarrollo del trabajo



# Agradecimientos

A mi familia y amigos más cercanos, por apoyarme siempre.

A Eduardo, mi tutor en este trabajo, por su ayuda y sus consejos para guiarme de la mejor manera posible.

A mis profesores, tanto de la universidad como del colegio. En especial, a aquellos que transmiten esa curiosidad por aprender y me han motivado a volar alto y a soñar en grande.

*Muchas gracias a todos*

# Bibliografía

- [1] “Transporte aéreo, pasajeros transportados,” *Banco Mundial*, 2020. <https://datos.bancomundial.org/indicador/IS.AIR.PSGR> (accessed Mar. 28, 2023).
- [2] “La industria aeronáutica representa ya más del 1,5% del PIB Industrial,” *SAE - Sociedad Aeronáutica Española*, 2019. <https://www.sociedad aeronautica.org/la-industrias-constituyentes-de-la-asociacion-espanola-de-empresas-tecnologicas-de-defensa-seguridad-aeronautica-y-espacio-pasan-a-representar-el-15-del-pib-industrial/> (accessed Mar. 30, 2023).
- [3] ICAO Environmental Report, “On board a sustainable future,” 2016.
- [4] H-O. Pörtner, D. C. Roberts, M. B. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, and M. Craig, “Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability,” 2022.
- [5] R. S. Vose, D. R. Easterling, and et al., “Ch. 6: Temperature Changes in the United States. Climate Science Special Report: Fourth National Climate Assessment, Vol. I, pp. 185-206,” Washington, DC, 2017. doi: 10.7930/J0N29V45.
- [6] W.V. Sweet, R. Horton, R.E. Kopp, A.N. LeGrande, and A. Romanou, “Ch. 12: Sea Level Rise. Climate Science Special Report: Fourth National Climate Assessment, Vol. I, pp. 333-363,” Washington, DC, 2017. doi: 10.7930/J0VM49F2.
- [7] J.P. Kossin, T. Hall, T. Knutson, K.E. Kunkel, and R.J. Trapp, “Ch. 9: Extreme Storms. Climate Science Special Report: Fourth National Climate Assessment, Vol. I, pp. 257-276,” Washington, DC, 2017. doi: 10.7930/J07S7KXX.
- [8] D. Jacob, R. C. Miakelye, and D. Hauglustaine, “Innovation for a Green Transition. ICAO Environmental Report,” 2022. Accessed: Feb. 16, 2023. [Online]. Available: <https://www.icao.int/environmental-protection/Documents/EnvironmentalReports/2022/ICAO%20ENV%20Report%202022%20F4.pdf>
- [9] A. Merino *et al.*, “Aircraft Icing: In-Cloud Measurements and Sensitivity to Physical Parameterizations,” *Geophys Res Lett*, vol. 46, no. 20, pp. 11559–11567, Oct. 2019, doi: 10.1029/2019GL084424.
- [10] Kiehl and Trenberth, “Aemet. Balance de energía,” 1997. [https://meteoglosario.aemet.es/es/termino/436\\_balance-de-energia#:~:text=Balance%20de%20energ%C3%ADa%20Diferencia%20entre%20los%20valores%20totales,y%20si%20es%20negativo%20se%20produce%20un%20enfriamiento.](https://meteoglosario.aemet.es/es/termino/436_balance-de-energia#:~:text=Balance%20de%20energ%C3%ADa%20Diferencia%20entre%20los%20valores%20totales,y%20si%20es%20negativo%20se%20produce%20un%20enfriamiento.) (accessed Feb. 15, 2023).

- [11] G. Stanhill, "Global dimming: A new aspect of climate change," *Weather*, vol. 60, no. 1, pp. 11–14, 2005, doi: 10.1256/wea.210.03.
- [12] S. Cole, "Global 'Sunscreen' Has Likely Thinned, Report NASA Scientists," *Report NASA scientists*, 2007.  
[https://www.nasa.gov/centers/goddard/news/topstory/2007/aerosol\\_dimming.html](https://www.nasa.gov/centers/goddard/news/topstory/2007/aerosol_dimming.html) (accessed Dec. 17, 2022).
- [13] R. Chohan, "Scientists Confirm Earth's Energy Is Out of Balance," *NASA*, 2005.  
[https://www.nasa.gov/centers/goddard/news/topstory/2005/earth\\_energy.html](https://www.nasa.gov/centers/goddard/news/topstory/2005/earth_energy.html) (accessed Mar. 08, 2023).
- [14] M. L. Collin and A. J. Melloul, "Empirical Assessment of Coastal Environmental Vulnerability to Sea Level Rise," *J Environ Prot (Irvine, Calif)*, vol. 5, no. 12, pp. 1197–1219, 2014, doi: 10.4236/jep.2014.512116.
- [15] S. Cohen and G. Stanhill, "Contemporary Climate Change in the Jordan Valley," *American Meteorological Society*, pp. 1051–1058, 1995.
- [16] B. G. Liepert, "Observed reductions of surface solar radiation at sites in the United States and worldwide from 1961 to 1990," *Geophys. Res. Lett.*, vol. 29, no. 10, pp. 61(1)-61(4), May 2002, doi: 10.1029/2002gl014910.
- [17] S. Cohen, B. Liepert, and G. Stanhill, "Global dimming comes of age," *Eos (Washington DC)*, vol. 85, no. 38, pp. 362–363, Sep. 2004, doi: 10.1029/2004EO380004.
- [18] M. L. Roderick, G. D. Farquhar, S. L. Berry, and I. R. Noble, "On the direct effect of clouds and atmospheric particles on the productivity and structure of vegetation," *Oecologia*, vol. 129, no. 1, pp. 21–30, 2001, doi: 10.1007/s004420100760.
- [19] D. J. Travis, A. M. Carleton, and R. G. Lauritsen, "Contrails reduce daily temperature range," *Nature*, vol. 418, p. 601, 2002, Accessed: Jan. 16, 2023. [Online]. Available: <https://www.nature.com/>
- [20] J. Burkert *et al.*, "Trace gas and radical diurnal behavior in the marine boundary layer during INDOEX 1999," *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 108, no. D8, pp. 35(1)-35(18), Apr. 2003, doi: 10.1029/2002jd002790.
- [21] J. M. Salgado, "Cambios en la cantidad de aerosoles emitidos a la atmósfera," *ResearchGate*. [https://www.researchgate.net/figure/Figura-3-Cambios-en-la-cantidad-de-aerosoles-emitidos-a-la-atmosfera-entre-1950-y-1980\\_fig3\\_45236401](https://www.researchgate.net/figure/Figura-3-Cambios-en-la-cantidad-de-aerosoles-emitidos-a-la-atmosfera-entre-1950-y-1980_fig3_45236401) (accessed Dec. 20, 2022).
- [22] M. Wild, A. Ohmura, and K. Makowski, "Impact of global dimming and brightening on global warming," *Geophys. Res. Lett.*, vol. 34, 2007, doi: 10.1029/2006GL028031.

- [23] D. Shindell, F.-m. Bréon, W. Collins, J. Fuglestedt, J. Huang, and D. Koch, *Anthropogenic and Natural Radiative Forcing*. Cambridge University Press, 2013. Accessed: Feb. 13, 2023. [Online]. Available: [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WG1AR5\\_Chapter08\\_FINAL.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WG1AR5_Chapter08_FINAL.pdf)
- [24] O. Dessens, M. O. Köhler, H. L. Rogers, R. L. Jones, and J. A. Pyle, "Aviation and climate change," *Transp Policy (Oxf)*, vol. 34, pp. 14–20, 2014, doi: 10.1016/j.tranpol.2014.02.014.
- [25] A. Crimmins, "Radiative Forcing of Aircraft Emissions," *ResearchGate*, 2005. [https://www.researchgate.net/figure/Radiative-Forcing-of-Aircraft-Emissions-in-1992-and-2000-emissions-from-1940-to-2000\\_fig2\\_264727254](https://www.researchgate.net/figure/Radiative-Forcing-of-Aircraft-Emissions-in-1992-and-2000-emissions-from-1940-to-2000_fig2_264727254) (accessed Jan. 23, 2023).
- [26] G. A. Rodrigo and A. B. Ruiz De Villa, "El impacto ambiental del transporte aéreo y las medidas para mitigarlo," 2012. Accessed: Feb. 16, 2023. [Online]. Available: [https://oa.upm.es/20345/1/INVE\\_MEM\\_2012\\_133532.pdf](https://oa.upm.es/20345/1/INVE_MEM_2012_133532.pdf)
- [27] J. A. Aunión and M. Planelles, "El CO2 en el cambio climático," *El País*, 2018. <https://elpais.com/especiales/2019/el-co2-en-el-cambio-climatico/> (accessed Feb. 11, 2023).
- [28] A. Gillespie, "Global atmospheric carbon dioxide levels continue to rise," *NOAA Research News*, Nov. 14, 2022. <https://research.noaa.gov/article/ArtMID/587/ArticleID/2914/No-sign-of-significant-decrease-in-global-CO2-emissions#:~:text=The%20publication%2C%20produced%20by%20an,percent%20above%20pre%2Dindustrial%20levels.> (accessed Feb. 14, 2023).
- [29] M. Grote, I. Williams, and J. Preston, "Direct carbon dioxide emissions from civil aircraft," *Atmospheric Environment*, vol. 95, Elsevier Ltd, pp. 214–224, 2014. doi: 10.1016/j.atmosenv.2014.06.042.
- [30] D. S. Lee, D. Kenney, and B. Combes, "Aviation and Climate Change. ICAO Environmental Report," 2010. Accessed: Feb. 10, 2023. [Online]. Available: [https://www.icao.int/environmental-protection/documents/publications/env\\_report\\_2010.pdf](https://www.icao.int/environmental-protection/documents/publications/env_report_2010.pdf)
- [31] NASA, "Contrails." [https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/contrails\\_k-12.pdf](https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/contrails_k-12.pdf) (accessed Feb. 10, 2023).
- [32] "Estelas de condensación," *AEMET*. 2022. [Online]. Available: [www.nasa.gov](http://www.nasa.gov)
- [33] M. O. Köhler, G. Rädcl, O. Dessens, and J. A. Pyle, "Impact of perturbations to nitrogen oxide emissions from global aviation," *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, vol. 113, pp. 1–15, 2008, doi: 10.1029/2007JD009140.
- [34] "OACI Anexo 16, Vol. II - Certificación de emisiones," 2011. Accessed: Mar. 23, 2023. [Online]. Available:

<http://www.anac.gov.ar/anac/web/uploads/normativa/anexos-oaci/anexo-16-vol-ii.pdf>

- [35] P. D. Williams, “Transatlantic flight times and climate change,” *Environmental Research Letters*, vol. 11, Feb. 2016, doi: 10.1088/1748-9326/11/2/024008.
- [36] L. N. Storer, P. D. Williams, and M. M. Joshi, “Global Response of Clear-Air Turbulence to Climate Change,” *Geophys Res Lett*, vol. 44, pp. 9976–9984, Oct. 2017, doi: 10.1002/2017GL074618.
- [37] L. N. Storer, P. D. Williams, and P. G. Gill, “Aviation Turbulence: Dynamics, Forecasting, and Response to Climate Change,” *Pure Appl Geophys*, vol. 176, pp. 2081–2095, May 2019, doi: 10.1007/s00024-018-1822-0.
- [38] M. C. Moreno and M. A. Gil, “ANÁLISIS DE LA SINIESTRALIDAD AÉREA POR CAUSA METEOROLÓGICA (1970-1999),” *Investigaciones Geográficas*, vol. 30, pp. 5–6, 2003, Accessed: Feb. 20, 2023. [Online]. Available: <https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/328/3/Moreno-Garcia-Analisis-de-la-siniestralidad.pdf>
- [39] M. Davison, “Turbulencia: Pronóstico y Diagnóstico,” *OACI*. ResearchGate, 2016. Accessed: Feb. 21, 2023. [Online]. Available: [https://www.icao.int/SAM/Documents/2016-SIGMET/8\\_turbulencia\\_aviacion.pdf](https://www.icao.int/SAM/Documents/2016-SIGMET/8_turbulencia_aviacion.pdf)
- [40] J. M. Viñas, “Turbulencias,” *Avion & Piloto*, vol. no. 11, pp. 40–43, 2012, Accessed: Mar. 09, 2023. [Online]. Available: <https://www.divulgameteo.es/uploads/Turbulencias.pdf>
- [41] L. Jianbing, “The impact of wake vortex to a following aircraft,” *ResearchGate*, 2020. [https://www.researchgate.net/figure/The-impact-of-wake-vortex-to-a-following-aircraft-15\\_fig1\\_338664366](https://www.researchgate.net/figure/The-impact-of-wake-vortex-to-a-following-aircraft-15_fig1_338664366) (accessed Feb. 22, 2023).
- [42] M. Graf and J. Reynolds, “The Hidden Dangers of Mountain Wave Turbulence,” *The Front (NOAA’s National Weather Service)*, 2011. Accessed: Feb. 21, 2023. [Online]. Available: <https://www.weather.gov/media/publications/front/11nov-front.pdf>
- [43] M. Davison, E. Giada, and G. Vásquez, “Turbulencia de Montaña,” *NOAA*. <https://www.wpc.ncep.noaa.gov/international/tmontpebody.html> (accessed Mar. 09, 2023).
- [44] B. González López, *Descubrir la meteorología en la aviación*. AENA, 2015.
- [45] J. M. Viñas, “Ondas de montaña,” *Avion & Piloto*, vol. no. 22, pp. 34–37, 2012, Accessed: Mar. 09, 2023. [Online]. Available: <https://www.divulgameteo.es/uploads/Ondas-de-monta%C3%B1a.pdf>



- [46] R. Vilorio Raymundo and V. Tricio, “Análisis de la estabilidad atmosférica mediante distintas formulaciones del número de Richardson,” 2012. [Online]. Available: [www.conama2012.org](http://www.conama2012.org)
- [47] M. Z. Jacobson, *Fundamentals of Atmospheric Modeling*, Second Edition. Cambridge University Press, 2005. Accessed: Feb. 21, 2023. [Online]. Available: [https://uomustansiriyah.edu.iq/media/lectures/6/6\\_2021\\_04\\_17!03\\_59\\_20\\_PM.pdf](https://uomustansiriyah.edu.iq/media/lectures/6/6_2021_04_17!03_59_20_PM.pdf)
- [48] P. D. Williams, “Increased light, moderate, and severe clear-air turbulence in response to climate change,” *Adv Atmos Sci*, vol. 34, pp. 576–586, May 2017, doi: 10.1007/s00376-017-6268-2.
- [49] “Hacia una mejor detección de turbulencias,” *CORDIS: Resultados de investigaciones de la UE*, 2014. <https://cordis.europa.eu/article/id/90493-towards-better-detection-of-turbulence/es> (accessed Feb. 27, 2023).
- [50] G. P. Ellrod, P. F. Lester, and L. J. Ehernberger, “Clear Air Turbulence,” *Encyclopedia of Atmospheric Sciences*, pp. 393–403, 2019, doi: 10.1016/B0-12-227090-8/00104-4.
- [51] “Observaciones de teledetección terrestre,” *AEMET*. <https://www.aemet.es/es/idi/observacion/teledeteccion> (accessed Feb. 23, 2023).
- [52] F. García García, “CLIMATOLOGIA DEL RADAR EN AIRE CLARO,” *AEMET*, 2001, Accessed: Feb. 28, 2023. [Online]. Available: [https://repositorio.aemet.es/bitstream/20.500.11765/4961/1/C26-COR\\_Radar\\_aire\\_claro.pdf](https://repositorio.aemet.es/bitstream/20.500.11765/4961/1/C26-COR_Radar_aire_claro.pdf)
- [53] R. Sharman, “Aviation turbulence forecasting research challenges and needs,” 2014.
- [54] P. Rodriguez Imazio, P. D. Mininni, A. Godoy, N. Rivaben, and A. Dörnbrack, “Not All Clear Air Turbulence Is Kolmogorov—The Fine-Scale Nature of Atmospheric Turbulence,” *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 128, Jan. 2023, doi: 10.1029/2022jd037491.
- [55] H. Tennekes and J. L. Lumley, *A first course in turbulence*. 1972.
- [56] N. Connor, “¿Qué es la microescala de Kolmogorov?,” *Thermal Engineering*, 2019. <https://www.thermal-engineering.org/es/que-es-la-microescala-de-kolmogorov-definicion/> (accessed Mar. 28, 2023).
- [57] M. Fernández, “¿Qué es el número de Reynolds?,” *Aerodinámica F1*, 2020. <https://www.aerodinamicaf1.com/2020/10/que-es-el-numero-de-reynolds/> (accessed Mar. 27, 2023).
- [58] A. Dörnbrack, P. Bechtold, and U. Schumann, “High-Resolution Aircraft Observations of Turbulence and Waves in the Free Atmosphere and

Comparison With Global Model Predictions,” *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, Aug. 2022, doi: 10.1029/2022JD036654.

- [59] “Servicio meteorológico para la navegación aérea internacional,” *ICAO*, vol. Anexo 3, 2016, Accessed: Feb. 28, 2023. [Online]. Available: <https://www.anac.gov.ar/anac/web/uploads/normativa/anexos-oaci/anexo-3.pdf>
- [60] B. González López, “CIZALLADURA Y TURBULENCIA,” *AEMET*, 2014, Accessed: Feb. 28, 2023. [Online]. Available: [https://repositorio.aemet.es/bitstream/20.500.11765/9383/1/cizalladura\\_turbulencia\\_BGonzalez\\_JCOPAC2014.pdf](https://repositorio.aemet.es/bitstream/20.500.11765/9383/1/cizalladura_turbulencia_BGonzalez_JCOPAC2014.pdf)
- [61] P. Bechtold, M. Bramberger, M. Leutbecher, L. Isaksen, and A. Dörnbrack, “Forecasting clear-air turbulence,” *ECMWF Newsletter*, vol. no. 168, pp. 32–37, 2021, doi: 10.21957/p381s6cn9b.
- [62] “A Guide to Understanding Turbulent Kinetic Energy,” *Cadence CFD*. A Guide to Understanding Turbulent Kinetic Energy (accessed Feb. 28, 2023).