



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ETSI Aeroespacial y Diseño Industrial

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Aeroespacial
y Diseño Industrial

HACIA UNAS RUTAS AÉREAS MÁS SOSTENIBLES:
OPTIMIZACIÓN DE COSTOS Y REDUCCIÓN DE
EMISIONES ENTRE MADRID E HISPANOAMÉRICA

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería Aeroespacial

AUTOR/A: Barberá Navarro, Francisco

Tutor/a: Laguarda Miró, Nicolás

CURSO ACADÉMICO: 2023/2024

Resumen

El presente documento es la memoria resultante de la elaboración de un Trabajo Final de Grado que pretende mejorar las conexiones por vía aérea entre el Reino de España e Hispanoamérica, véase, aquellos territorios ubicados en el continente americano que durante varias centurias formaron parte de la Monarquía Hispánica. En las siguientes páginas se llevará a cabo un estudio de las rutas aéreas entre Madrid (España) y los países hispanoamericanos con el fin de mejorar su sostenibilidad, i.e., reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. Por otro lado, también se busca la optimización de los costes operativos de las aerolíneas encargadas de estas rutas para beneficiar tanto a estas como a los clientes. Se puede decir pues, que los objetivos del proyecto están alineados con los ODS nº 8, 9, 13 y 17.

A lo largo del texto, se expondrá la situación actual y se propondrán diversas soluciones que, aplicadas de forma aislada o conjuntamente, mejorarían la conexión intercontinental, disminuirían la contaminación y aumentarían los beneficios de las aerolíneas.

La estructura será tal que así: primeramente, se presentará la problemática actual alrededor de estos vuelos, enfocándose en la perspectiva del cliente con respecto al aspecto monetario, así como en el impacto ambiental. Posteriormente, se propondrán un conjunto de soluciones para resolver o atenuar dichos problemas. Finalmente, se expondrán las conclusiones obtenidas, así como el presupuesto necesario para la puesta en práctica de este proyecto.

Resum

El present document és la memòria resultant de l'elaboració d'un Treball Final de Grau que pretén millorar les connexions per via aèria entre el Regne d'Espanya i Hispanoamèrica, és a dir, aquells territoris ubicats en el continent americà que durant diverses centúries van a formar part de la Monarquia Hispànica. En les pàgines següents es durà a terme un estudi de les rutes aèries entre Madrid (Espanya) i els països hispanoamericans amb la finalitat de millorar la seua sostenibilitat, és a dir, reduir les emissions de gasos d'efecte hivernacle. D'altra banda, també es busca l'optimització dels costos operatius de les aerolínies encarregades d'aquestes rutes per beneficiar tant aquestes com els clients. Es pot dir doncs, que els objectius del projecte estan alineats amb els ODS n° 8, 9, 13 i 17.

Al llarg del text, s'exposarà la situació actual i es proposaran diverses solucions que, aplicades de forma aïllada o conjuntament, millorarien la connexió intercontinental, disminuirien la contaminació i augmentarien els beneficis de les aerolínies.

L'estructura serà tal que així: primerament, es presentarà la problemàtica actual al voltant d'aquests vols, enfocant-nos en la perspectiva del client respecte a l'aspecte monetari, així com en l'impacte ambiental. Posteriorment, es proposaran un conjunt de solucions per resoldre o atenuar aquests problemes. Finalment, s'exposaran les conclusions obtingudes, així com el pressupost necessari per a la posada en pràctica d'aquest projecte.

Abstract

The present document is the resulting report of the elaboration of a Final Degree Project that aims to improve air connections between the Kingdom of Spain and Hispanic America, namely, those territories located on the American continent that for several centuries formed part of the Spanish Monarchy. In the following pages, a study will be conducted on the air routes between Madrid (Spain) and the Hispanic American countries with the aim of enhancing their sustainability, i.e., reducing greenhouse gas emissions. Additionally, it seeks to optimize the operational costs of the airlines responsible for these routes to benefit both the airlines and the customers. It can be stated, therefore, that the objectives of the project are aligned with SDGs nº 8, 9, 13, and 17.

Throughout the text, the current situation will be presented, and various solutions will be proposed which, whether applied individually or jointly, would improve intercontinental connectivity, reduce pollution, and increase the profits of the airlines.

The structure will be as follows: firstly, the current issues surrounding these flights will be presented, focusing on the customer's perspective concerning the monetary aspect, as well as the environmental impact. Subsequently, a set of solutions will be proposed to resolve or mitigate these problems. Finally, the conclusions obtained will be presented, as well as the budget necessary for the implementation of this project.

Agradecimientos

Tarea en exceso complicada es mentar a todos los seres a los que he de agradecer haber llegado hasta este punto de mi vida tal y cómo lo he hecho. Es por ello que me limitaré a los más importantes sin menoscabo de mi agradecimiento a todas las personas anónimas que han contribuido con su quehacer y pensar al desarrollo de la cultura humana.

En primer lugar, doy gracias a Dios por todo cuanto he tenido, tengo y tendré, y por lo que no he tenido ni tengo ni tendré. Le doy gracias por la vida que me ha permitido llevar, que no creo que pueda haberla mejor. Y también le doy gracias por la inspiración a la hora de escribir este texto.

En segundo lugar, siento un profundo agradecimiento hacia mis padres Antonio y Manuela. Ellos han contribuido en gran medida a la creación de mi ser y me han apoyado en todos estos años que han tenido sus momentos angustiosos tan propios del hombre joven que se haya sin rumbo en la vida.

En tercer lugar, me gustaría agradecer a todos mis amigos su amistad, puesto que es esta la forma más elevada de amor que puede haber entre los hombres. Gracias a ellos he podido disfrutar de mejor manera de mi existencia.

También querría darle las gracias a mi tutor de TFG don Nicolás Laguarda Miró el haberme aceptado como su tutelado con gran entusiasmo desde el primer momento y por haberme ayudado de manera activa con la realización de este. Su labor como docente es sobresaliente y se ve a leguas su pasión por lo que hace.

Finalmente, me gustaría dar un agradecimiento a todas las grandes mentes de la historia que me han acompañado desde pequeño: Heráclito, Aristóteles, Platón, Marco Aurelio, Da Vinci, Cervantes, Lope de Vega, Quevedo, Dostoievski... por mentar solo algunas de ellas. Es a través de la lectura de sus obras que yo he podido llegar a ser lo que soy. Sobre todo, hago hincapié en los autores hispanogrecolatinos, que han conformado la cultura a la que pertenezco. Y es precisamente a propósito de esto, que yo me he decidido a desarrollar este proyecto. Mi amor por la nación española y por nuestros hermanos hispanoamericanos, con los que estamos unidos a través del lenguaje y numerosas tradiciones me ha hecho querer aportar mi grano de arena a la mejora de nuestras relaciones.

Índice

I. OBJETO.....	1
I.I INTRODUCCIÓN	2
I. II OBJETIVOS.....	3
I. III JUSTIFICACIÓN	3
I. IV OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE	3
II. COYUNTURA ACTUAL.....	5
II. I CAMBIO CLIMÁTICO Y TRANSPORTE AÉREO.....	6
<i>II.I.I El cambio climático, el calentamiento global y el CO₂ como actor</i>	6
<i>II.I.II El transporte aéreo y el cambio climático</i>	9
<i>II.I.III Los créditos de carbono.....</i>	11
II.II EL TRÁFICO AÉREO HISPANOAMERICANO	13
II.III PODER ADQUISITIVO DE LOS HISPANOAMERICANOS	14
III. DESARROLLO	16
III.I REDUCCIÓN DE VELOCIDAD EN LA FASE DE CRUCERO	17
III.II ESTUDIO DE LAS FINANZAS DE IBERIA	26
III.III IMPACTO EN EL PRECIO DEL BILLETE	33
III. IV EL CIELO ÚNICO HISPANOAMERICANO.....	34
<i>III.IV.I Combinación del Cielo Único Hispanoamericano y la reducción de la velocidad en fase de crucero</i>	37
IV. PRESUPUESTO	39
IV. I COSTE HUMANO.....	40
IV. II COSTE MATERIAL	41
IV. III COMISIÓN SOBRE BENEFICIOS FUTUROS	42
IV. IV PLAZOS Y PAGOS.....	42
IV. IV PRESUPUESTO FINAL.....	43
V. CONCLUSIONES.....	44
V.I COMENTARIO DE RESULTADOS.....	45
V.II FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	47
REFERENCIAS	49
ANEXOS	52
ANEXO A) CÓDIGOS DE MATLAB Y PYTHON EMPLEADOS.....	52

Índice de Ilustraciones

ILUSTRACIÓN 1: EVOLUCIÓN DE LA TEMPERATURA GLOBAL FRENTE A LA MEDIA 1850-1900	7
ILUSTRACIÓN 2: EVOLUCIÓN DE LOS NIVELES DE DIÓXIDO DE CARBONO EN LA ATMÓSFERA DESDE 1960.....	8
ILUSTRACIÓN 3: EMISIONES DEL TRANSPORTE Y DEL TRANSPORTE AÉREO	10
ILUSTRACIÓN 4: EVOLUCIÓN DEL PRECIO DE LOS DERECHOS DE EMISIÓN DE CO ₂	12
ILUSTRACIÓN 5: PREVISIÓN A MEDIO PLAZO SOBRE LA EVOLUCIÓN DEL TRÁFICO AÉREO EN LAS DIFERENTES REGIONES DEL MUNDO	13
ILUSTRACIÓN 6: PREVISIÓN DE LA EVOLUCIÓN DEL PRECIO DE LOS DERECHOS DE EMISIÓN DE CO ₂	20
ILUSTRACIÓN 7: GRÁFICO QUE MUESTRA LA PREDICCIÓN SOBRE LA EVOLUCIÓN DE LOS INGRESOS TOTALES DE IBERIA A 5 AÑOS VISTA	27
ILUSTRACIÓN 8: GRÁFICO QUE MUESTRA LA PREVISIÓN DE LA EVOLUCIÓN DEL GASTO EN COMBUSTIBLE Y EMISIONES DE IBERIA A 5 AÑOS VISTA	27
ILUSTRACIÓN 9: GRÁFICO QUE MUESTRA LA PREVISIÓN DEL NETO TRAS OPERACIONES DE IBERIA A 5 AÑOS VISTA	27
ILUSTRACIÓN 10: GRÁFICO QUE MUESTRA LOS VALORES DE INGRESOS TOTALES USADOS EN EL ESTUDIO ..	29
ILUSTRACIÓN 11: GRÁFICO QUE MEUSTRA LOS VALROES DEL NETO TRAS OPERACIONES USADOS EN EL ESTUDIO	29
ILUSTRACIÓN 12: GRÁFICO RESUMEN QUE MEUSTRA LA MEJORA INTRODUCIDA A 5 AÑOS VISTA POR LA REDUCCIÓN DE VELOCIDAD EN LOS MÁRGENES DE IBERIA	31
ILUSTRACIÓN 13: GRÁFICO DEL MARGEN OPERACIONAL DE IBERIA APLICANDO O NO LA REDUCCIÓN DE VELOCIDAD EN LSO PRÓXIMOS 5 AÑOS	31
ILUSTRACIÓN 14: SEGREGACIÓN DEL ESPACIO AÉREO	35
ILUSTRACIÓN 15: RUTA MAD-MEX SIN CIELO ÚNICO HISPANOAMERICANO	36
ILUSTRACIÓN 16: RUTA MAD-MEX CON CIELO ÚNICO HISPANOAMERICANO	36

Índice de Tablas

TABLA 1: PRECIO DEL BILLETE DE IDA-VUELTA A MADRID FRENTE A SALARIO MEDIO NETO MENSUAL	14
TABLA 2: RUTAS AÉREAS ESTUDIADAS	17
TABLA 3: TIEMPO DE VUELO, CONSUMO DE COMBUSTIBLE POR TRAYECTO Y TOTAL ANUAL POR CADA RUTA	18
TABLA 4: EMISIONES DE GEIS DE CADA RUTA Y TOTALES.....	19
TABLA 5: VALORES AJUSTADOS DE LA PREVISIÓN DEL PRECIO DE LOS DERECHOS DE EMISIÓN DE CO ₂	20
TABLA 6: PREVISIÓN DE GASTO POR EMISIONES ANUAL A 5 AÑOS VISTA	21
TABLA 7: TIEMPOS DE VUELO TRAS APLICAR LA REDUCCIÓN DE VELOCIDAD	22
TABLA 8: EMISIONES DE GEIS TRAS APLICAR LA REDUCCIÓN DE VELOCIDAD	22
TABLA 9: PREVISIÓN DE GASTO EN EMISIONES TRAS APLICAR LA REDUCCIÓN DE VELOCIDAD	23
TABLA 10: RESUMEN DE RESULTADOS RELATIVOS A LAS EMISIONES	24
TABLA 11: RESUMEN DE RESULTADOS RELATIVOS A LOS GASTOS POR EMISIONES	24
TABLA 12: ESTADOS FINANCIEROS DE IBERIA PERIODO 2016-2023	26
TABLA 13: VALORES AJUSTADOS DE LOS INGRESOS TOTALES PREDICHOS	28
TABLA 14: VALORES AJUSTADOS DE LOS VALORES DE GASTO EN COMBUSTIBLE Y EMISIONES PREDICHOS..	28
TABLA 15: VALORES AJUSTADOS DEL NETO TRAS OPERACIONES PREDICHO	28
TABLA 16: VALORES PREDICHOS DE LAS FINANZAS DE IBERIA A 5 AÑOS VISTA	30
TABLA 17: VALORES PREDICHOS DE LAS FINANZAS DE IBERIA A 5 AÑOS CON LA REDUCCIÓN DE VELOCIDAD	30
TABLA 18: TABLA RESUMEN DE LA GANANCIA EN EL MARGEN OPERACIONAL OBTENIDA GRACIAS A LA REDUCCIÓN DE VELOCIDAD	32

TABLA 19: ANÁLISIS DE LA REDUCCIÓN EN EL COSTE UNITARIO TOTAL / AKO GRACIAS A LA REDUCCIÓN DE VELOCIDAD	33
TABLA 20: REDUCCIÓN EN LAS DISTANCIAS DE VUELO GRACIAS A LA IMPLEMENTACIÓN DE UN CIELO ÚNICO HISPANOAMERICANO	35
TABLA 21: MEJORA EN LA RUTA MAD-MEX GRACIAS AL CIELO ÚNICO HISPANOAMERICANO	37
TABLA 22: MEJORA RESULTANTE DE COMBINAR LA REDUCCIÓN DE VELOCIDAD Y EL CIELO ÚNICO HISPANOAMERICANO	38
TABLA 23: PRESUPUESTO DEL COSTE HUMANO DEL PROYECTO	40
TABLA 24: PRESUPUESTO DEL COSTE MATERIAL DEL PROYECTO	41
TABLA 25: COSTE MATERIAL CON IVA	41
TABLA 26: PRESUPUESTO COMPLETO PARA LA ELABORACIÓN DEL PROYECTO	43
TABLA 27: RESUMEN DE HITOS DEL PROYECTO	46

I. Objeto

I.1 Introducción

El 22 de septiembre del año 1946 un avión DC-4 de la aerolínea Iberia completaba el primer vuelo entre Madrid e Hispanoamérica. Este tenía como destino la ciudad de Buenos Aires y hacía escala en Villa Cisneros (Sahara Occidental), Natal (Brasil) y Montevideo (Uruguay) [1]. Desde entonces, los vuelos entre España e Hispanoamérica han ido en aumento, estrechando los lazos comerciales y sociales entre los hispanos de un lado y otro del Atlántico.

Como ya se ha dicho, este estudio se centra en los países hispanoamericanos, no obstante, cabe destacar que, en aras de simplificar la empresa, no se han incluido todos ellos, sino que se ha procurado incluir los más importantes en términos de tamaño y vuelos con España.

Antes de continuar, es conveniente dejar clara la diferencia entre Latinoamérica e Hispanoamérica. El primer término es de acuñación francesa y se comienza a usar en el siglo XVIII con la pretensión de desligar semánticamente los territorios españoles en América de los territorios españoles en Europa. El término es en sí mismo erróneo puesto que latino es el gentilicio de los habitantes de la región del Lazio en Italia, y es evidente que los latinos nunca tuvieron posesiones territoriales en América. El segundo término, en cambio, lleva en primera instancia al topónimo Hispania, nombre de la provincia romana que abarcaba la península Ibérica, y que a su vez deriva de la voz fenicia “ispnyá” (costa de conejos) que es como los cartagineses (colonia fenicia) designaban a la susodicha península [2]. Así pues, el término correcto para designar a los territorios que formaron parte de la Monarquía Hispánica en América es Hispanoamérica, siendo la Monarquía Hispánica el conjunto de reinos y otras subentidades políticas ubicadas en la península Ibérica durante los siglos XVI y XVII, de ahí que se incluyan los territorios portugueses en el calificativo. Hecha esta aclaración, se prosigue con el contenido del presente trabajo.

La mejora propuesta en este proyecto se materializa en una reducción de los costes operativos de la compañía Iberia, así como en la reducción de la contaminación por dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) y óxido de dinitrógeno (N_2O). La elección de Iberia será explicada más adelante. También se estudia cómo esta mejora repercutirá en el precio del billete puesto que se pretende su abaratamiento en aras de mejorar su accesibilidad a los habitantes de Hispanoamérica.

I. II Objetivos

El principal objetivo de este Trabajo de Fin de Grado es aumentar la sostenibilidad de las rutas aéreas entre España e Hispanoamérica, con el fin de contribuir a la lucha contra el cambio climático y el calentamiento global. Para ello, se busca reducir las emisiones de gases de efecto invernadero causadas por los vuelos de los aviones.

A parte de esto, se busca también optimizar los costes operativos de las compañías aéreas (en este caso se aplica sobre Iberia) encargadas de estas rutas, con el fin último de reducir el precio del billete para hacerlo más asequible a los ciudadanos de Hispanoamérica. En último lugar, este trabajo pretende ser una aplicación práctica de los conocimientos y competencias adquiridos durante estos años en el Grado en Ingeniería Aeroespacial.

I. III Justificación

La justificación de este trabajo se fundamenta en una serie de ideas de diversa índole. La primera de ellas y más importante es el deseo de aportar innovación y medidas factibles para mejorar la comunicación entre España y los países de Hispanoamérica. Hoy en día, debido al aumento de vuelos entre ambos continentes, es imprescindible asegurarse de que los métodos usados son lo más sostenibles posibles puesto que, de lo contrario, su aplicación en el largo plazo es inviable.

Por otro lado, se busca optimizar las finanzas de las aerolíneas operadoras de estos vuelos para que esto repercuta en sus trabajadores y en toda la sociedad de España e Hispanoamérica. Se pretende que esta reducción de costes operativos se vea reflejada en una disminución del precio del billete buscando que cada vez más hispanoamericanos vuelen de un lado a otro del Atlántico.

I. IV Objetivos de Desarrollo Sostenible

Este proyecto se encuentra en el marco de los objetivos de desarrollo sostenible números 8, 9, 13 y 17.

Se enmarca en el ODS nº 8: trabajo decente y crecimiento económico, puesto que pretende mejorar las finanzas de las aerolíneas repercutiendo esto en la calidad de vida de sus trabajadores y en el crecimiento económico de los países implicados.

También se relaciona con el ODS nº 9: industria, innovación e infraestructura, ya que se proponen dos medidas innovadoras en este ámbito para aumentar la sostenibilidad de esta industria concreta.

El proyecto se engloba dentro del ODS nº 13: acción por el clima, puesto que el objetivo principal del proyecto es la reducción de emisiones de efecto invernadero.

Finalmente, se considera que el proyecto persigue el ODS nº 17: alianzas para lograr objetivos, en tanto que sería necesaria la cooperación de los países hispanoamericanos y España para la puesta en marcha del mismo.

II. Coyuntura actual

En este apartado del documento se realizará una contextualización de la problemática que se pretende resolver. A saber, los hechos referentes a la contaminación con CO₂ y otros gases de efecto invernadero causados por la aviación civil, los referentes al estado del tráfico aéreo entre España e Hispanoamérica, y los referentes a la situación del poder adquisitivo de los habitantes de Hispanoamérica.

II. I Cambio climático y transporte aéreo

II.I.I El cambio climático, el calentamiento global y el CO₂ como actor

El cambio climático y el calentamiento global son fenómenos interrelacionados que representan uno de los mayores desafíos ambientales de nuestro tiempo. Ambos conceptos, aunque a menudo utilizados de manera intercambiable, tienen matices diferentes. El cambio climático se refiere a las variaciones a largo plazo en los patrones climáticos globales o regionales, mientras que el calentamiento global específicamente se refiere al aumento de la temperatura media global de la superficie terrestre.

A lo largo de la historia el clima de la Tierra y de sus regiones ha ido cambiando continuamente. Por ejemplo, sabemos a ciencia cierta que las condiciones climáticas en la época del Imperio Romano eran diferentes (más cálidas) que las actuales, así como también sabemos que entre los siglos XIV y XIX se produjo en Europa la llamada “pequeña edad de hielo” dadas las bajas temperaturas. No obstante, en el presente nos enfrentamos a una situación nunca antes vista en la historia, esta es, la influencia directa del Ser Humano en el clima de la Tierra y su ambiente.

Como ya se ha dicho, el calentamiento global y el cambio climático son fenómenos interrelacionados. La principal causa del calentamiento global es el aumento de los gases de efecto invernadero (GEIs) en la atmósfera debido a las actividades humanas, especialmente la quema de combustibles fósiles como el carbón, el petróleo y el gas natural. Estos gases, que incluyen dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) y óxido de dinitrógeno (N₂O), atrapan el calor en la atmósfera, impidiendo que se disipe al espacio y provocando un aumento de las temperaturas globales.

Además de esto, la deforestación y ciertos procesos industriales también contribuyen a la liberación de CO₂ y otros gases de efecto invernadero. La tala de árboles reduce la capacidad de los bosques para absorber CO₂, mientras que muchas actividades industriales emiten grandes cantidades de estos gases [3] [4].

Con respecto a las consecuencias del cambio climático, estas son diversas y afectan tanto al medio ambiente como a la sociedad humana. Entre las principales repercusiones ambientales se encuentran:

1. Aumento del nivel del mar: El derretimiento de los glaciares y las capas de hielo, junto con la expansión térmica del agua, ha llevado a un aumento significativo del nivel del mar, lo cual amenaza a las comunidades costeras y a los ecosistemas marinos [5].
2. Cambios en los patrones climáticos: Las alteraciones en los patrones de lluvia y temperatura pueden afectar la agricultura, la disponibilidad de agua y aumentar la frecuencia de fenómenos meteorológicos extremos como huracanes, sequías e inundaciones [5].
3. Impacto en la biodiversidad: El cambio climático está desplazando los hábitats naturales de muchas especies, lo que podría llevar a extinciones masivas si los organismos no logran adaptarse rápidamente a las nuevas condiciones climáticas [5].

Con respecto al CO₂, este es uno de los principales gases de efecto invernadero, y sus niveles en la atmósfera han aumentado drásticamente desde la Revolución Industrial. Según los datos del *Global Carbon Atlas*, las emisiones globales de CO₂ alcanzaron un nuevo máximo en los últimos años, impulsadas por la continua dependencia de los combustibles fósiles para la energía y el transporte. Este aumento de las emisiones está directamente correlacionado con el aumento de la temperatura media global, lo cual agrava los efectos del cambio climático [6].

Para ilustrar mejor la correlación entre niveles de CO₂ en la atmósfera y el aumento de las temperaturas medias globales se muestran las siguientes dos ilustraciones:

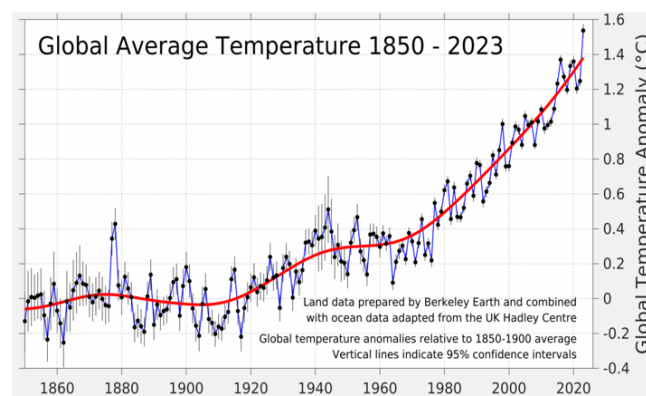


Ilustración 1: Evolución de la temperatura global frente a la media 1850-1900 [7]

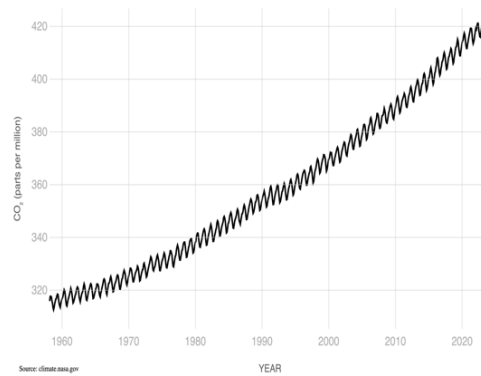


Ilustración 2: Evolución de los niveles de dióxido de carbono en la atmósfera desde 1960 [8]

El primer gráfico muestra la desviación de la temperatura media global desde el año 1860 con respecto a la media del periodo 1850-1900, y el otro el aumento en los niveles de CO₂ desde el año 1960. Es bastante notable la correlación entre ambas variables, por lo que se concluye la influencia del CO₂ en la temperatura.

Así pues, para combatir el cambio climático, es crucial implementar estrategias tanto de mitigación como de adaptación. La mitigación se enfoca en reducir o eliminar las fuentes de gases de efecto invernadero, por ejemplo, mediante la transición a energías renovables, la mejora de la eficiencia energética y la reforestación. Por otra parte, la adaptación, implica modificar nuestras sociedades y economías para minimizar los daños causados por el cambio climático que ya están ocurriendo, como construir infraestructuras resistentes al clima y desarrollar prácticas agrícolas sostenibles [4] [5].

En resumen, el cambio climático y el calentamiento global son problemas urgentes que requieren una acción inmediata y coordinada a nivel global. La ciencia es clara en cuanto a las causas y los efectos de estos fenómenos, y las evidencias muestran que la actividad humana es el principal impulsor del calentamiento global actual. Para asegurar un futuro sostenible, es fundamental que se tomen medidas significativas para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y adaptar nuestras sociedades a los cambios que ya son inevitables [4] [5].

II.I.II El transporte aéreo y el cambio climático

El tráfico aéreo de pasajeros ha experimentado un crecimiento exponencial en las últimas décadas, convirtiéndose en un componente crucial del transporte global. Sin embargo, este aumento tiene un impacto significativo en el cambio climático debido a las emisiones de gases de efecto invernadero. Aquí se expone cómo el tráfico aéreo contribuye a las emisiones de GEIs y al calentamiento global, analizando los mecanismos detrás de estas emisiones, así como también se plantean propuestas para mitigarlas.

La aviación civil es responsable de aproximadamente el 2% de las emisiones globales de dióxido de carbono (CO_2) procedentes de la combustión de combustibles fósiles [9]. Los aviones emiten CO_2 , metano (CH_4), óxido de dinitrógeno (N_2O), vapor de agua y otras partículas que contribuyen al calentamiento global. El CO_2 es el que se emite en mayores cantidades y tiene una larga vida en la atmósfera, contribuyendo directamente al efecto invernadero.

Además del CO_2 , los aviones emiten óxidos de nitrógeno, los cuales tienen efectos complejos sobre el clima. A grandes altitudes, estos pueden formar ozono troposférico, un potente gas de efecto invernadero. No obstante, también destruyen el metano, otro gas de efecto invernadero, lo que introduce una dinámica de compensación en sus efectos.

Por otro lado, el vapor de agua y las partículas emitidas por los aviones contribuyen a la formación de estelas de condensación y cirros artificiales, que también tienen un efecto de calentamiento al atrapar el calor radiado desde la Tierra [5]. Estos cirros pueden aumentar significativamente la cantidad de radiación atrapada en la atmósfera, intensificando el efecto invernadero.

En la siguiente imagen se muestra un gráfico ofrecido por la Agencia Europea de Medio Ambiente en el año 2022 donde se puede observar el porcentaje que representa el transporte aéreo en relación con las emisiones de GEIs dentro de la UE:

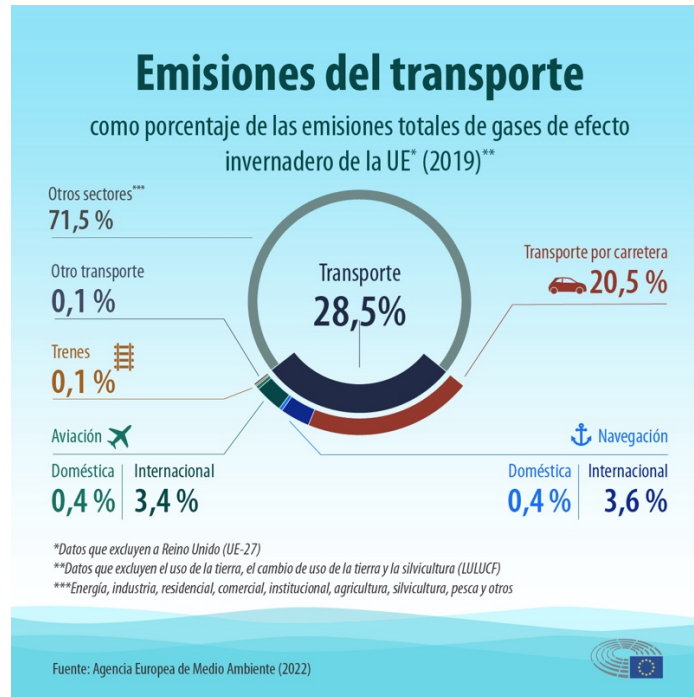


Ilustración 3: Emisiones del transporte y del transporte aéreo [10]

Con relación al transporte aéreo, el número de pasajeros ha crecido de manera constante a lo largo de los últimos 50 años y las proyecciones indican un incremento continuo en las próximas décadas. La Organización de Aviación Civil Internacional (OACI) estima que el tráfico aéreo de pasajeros se duplicará en los próximos 20 años [11]. Este crecimiento plantea un desafío significativo para las metas de reducción de emisiones de GEIs.

Es por todo esto que las organizaciones internacionales han propuesto varias estrategias para mitigar el impacto del tráfico aéreo en el clima:

1. Mejora de la eficiencia de los aviones: desarrollar motores más eficientes y usar materiales más ligeros en la construcción de aviones pueden reducir el consumo de combustible y, por ende, las emisiones.
2. Uso de combustibles alternativos: los biocombustibles y otros combustibles sostenibles pueden reducir significativamente las emisiones de CO₂.
3. Optimización de rutas de vuelo: la implementación de rutas de vuelo más directas y procedimientos de despegue y aterrizaje más eficientes pueden reducir el consumo de combustible.
4. Compensación de carbono: Programas como el Plan de Compensación y Reducción de Carbono para la Aviación Internacional (CORSIA) buscan estabilizar las emisiones de CO₂ del sector mediante la compensación de emisiones a través de proyectos que reducen GEI en otros sectores [12].

En resumen, el tráfico aéreo de pasajeros contribuye significativamente a las emisiones de GEIs y, por ende, al calentamiento global. La complejidad de los mecanismos de emisión y el crecimiento proyectado del sector plantean desafíos importantes para su sostenibilidad. Sin embargo, mediante la adopción de tecnologías más limpias, la optimización de operaciones y la implementación de programas de compensación de carbono, es posible mitigar estos efectos adversos. Para ello son claves la cooperación internacional y la innovación tecnológica, en aras de lograr un equilibrio entre el crecimiento del transporte aéreo y la necesidad urgente de reducir las emisiones globales de GEIs.

II.I.III Los créditos de carbono

Con el objetivo de reducir las emisiones de GEIs a la atmósfera los organismos internacionales han propuesto la creación de lo que se conoce como créditos de carbono o derechos de emisión. Este mecanismo impositivo consiste en que las empresas deben pagar por cada tonelada de CO₂ que emiten a través de sus actividades. El precio de estos créditos de carbono se regula en un mercado basado en un enfoque “cap and trade” y que recibe el nombre de Sistema de Comercio de Emisiones de la UE, establecido en el año 2005 [13]. En el mismo, las empresas compran y venden derechos de emisión atendiendo a sus necesidades y favoreciendo así una distribución más eficiente de la emisión de CO₂. A partir del 2026 se implementará el Mecanismo de Ajuste en Frontera por Carbono que consistirá básicamente en que las empresas deberán pagar también por las emisiones de sus servicios o productos importados de fuera de la UE [14].

Hay que tener en cuenta que hasta ahora a las empresas se les asignaba una cantidad determinada de CO₂ que podían emitir sin coste alguno y solo cuando superaban esa cantidad tenían que comprar más derechos. La asignación a cada empresa dependía de su tamaño, sector y otros factores. Sin embargo, a partir del año 2026 estas asignaciones gratuitas irán disminuyendo hasta desaparecer por completo en el 2034 [16].

En la siguiente imagen se muestra un gráfico donde se ve la evolución del precio del crédito de carbono en los últimos años. Los datos han sido extraídos de *Sendeco2* [17].

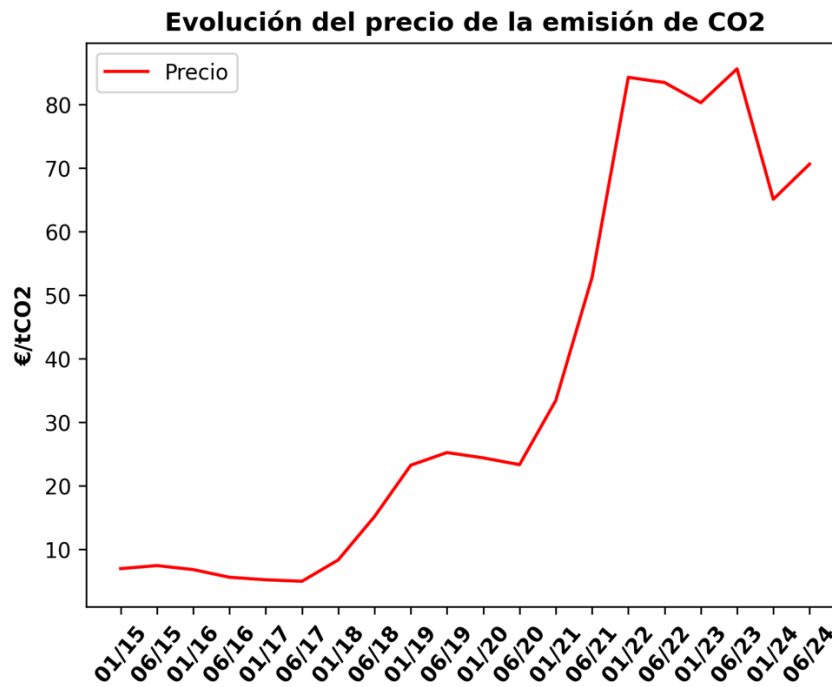


Ilustración 4: Evolución del precio de los derechos de emisión de CO₂

Se puede ver cómo la tendencia alcista en los precios de las emisiones causará que cada vez las empresas tengan que pagar más dinero por las mismas. En epígrafes posteriores se hará una predicción a 5 años vista de la evolución del precio de estos derechos de emisión.

Recapitulando, cada vez las empresas tendrán que destinar más dinero a pagar por la emisión de carbono. La solución que este proyecto plantea pasa por reducir las emisiones de las compañías aéreas para reducir así la cantidad de impuestos pagada y, en consecuencia, aumentar los beneficios empresariales.

II.II El tráfico aéreo hispanoamericano

Con respecto a la situación del tráfico aéreo entre Hispanoamérica y España lo primero que hay que decir es que ya en el año 2023 se recuperaron e incluso superaron por poco los niveles de pasajeros previos a la pandemia (año 2019) [18]. Es destacable que Hispanoamérica haya sido una de las regiones del mundo que ha liderado la recuperación post-pandémica. Las principales rutas entre Hispanoamérica y España han sido las que más incremento de pasajeros han visto, siendo México-España la primera de ellas con un crecimiento del 36%, seguida de Argentina, Colombia y Perú [19].

En la siguiente Ilustración se puede ver un pronóstico del crecimiento en el tráfico aéreo en cada región del mundo. “América-Latina” presenta una de las mejores previsiones.

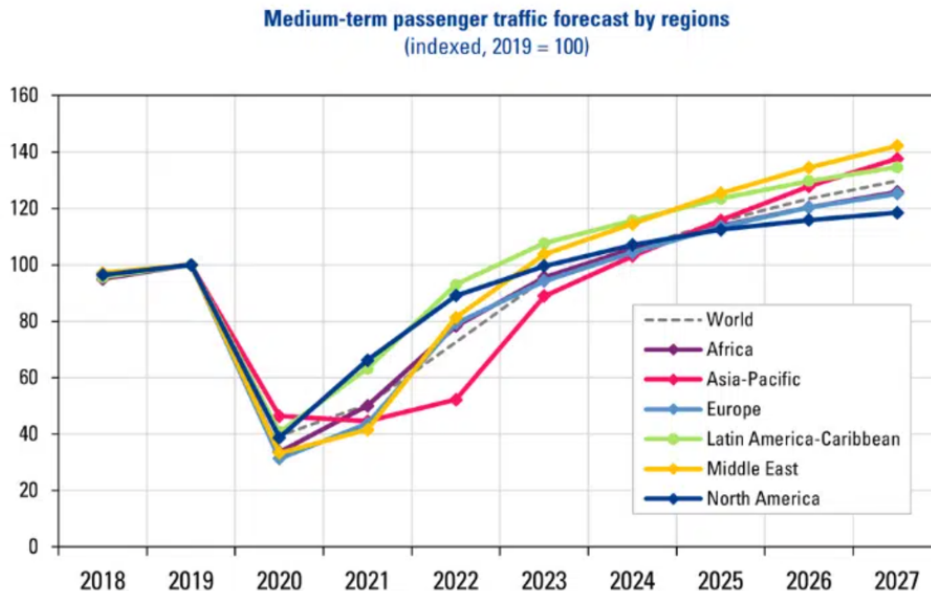


Ilustración 5: Previsión a medio plazo sobre la evolución del tráfico aéreo en las diferentes regiones del mundo [20]

Conociendo estos datos resulta evidente que el tráfico aéreo Hispanoamericano es un mercado tremendamente atractivo para el inversor. El hecho de mejorar las conexiones entre España e Hispanoamérica permitirá convertir a Madrid en una puerta de entrada de todo este flujo en Europa. Sin embargo, la contrapartida de estas rutas es la larga distancia que hay entre uno y otro continente, lo que hace que los vuelos sean más contaminantes que los de corta distancia. En consecuencia, en el siguiente bloque se planteará una solución a esta problemática con la que se reducirán las emisiones por ruta.

II.III Poder adquisitivo de los Hispanoamericanos



Uno de los objetivos del presente proyecto es que la reducción en los costes operativos de las aerolíneas se traduzca en un abaratamiento del precio del billete. Esto se busca debido al hecho de que la mayoría de los habitantes de Hispanoamérica no disponen de un poder adquisitivo suficiente como para poder viajar a España. Aunque no se ha podido disponer de los datos de nacionalidad de los pasajeros que vuelan normalmente entre España e Hispanoamérica, es bastante fácil de deducir que la mayoría de ellos proceden de países con un alto poder adquisitivo (Reino Unido, Alemania, Dinamarca, Francia...) que aprovechan el arbitraje económico para ir de vacaciones a estos países.

Para ilustrar mejor la situación del poder adquisitivo de los hispanoamericanos, aquí se presenta una tabla (ver Tabla 1) que muestra la descompensación entre los salarios medios netos mensuales de los diferentes países estudiados y los precios de los billetes. Todas las cantidades monetarias se han expresado en euros. Los datos de salarios han sido extraídos de *Wikipedia* [21] y son a fecha de 2023. Los datos de precio del billete han sido extraídos de *Skyscanner* en las correspondientes extensiones de los diferentes países. Las rutas estudiadas transcurren entre Madrid y el principal aeropuerto internacional de cada uno de los países.

Tabla 1: Precio del billete de ida-vuelta a Madrid frente a salario medio neto mensual

Precio de un billete ida-vuelta frente a salario neto medio mensual. Hispanoamérica.

RUTA	PRECIO DEL BILLETE (€)	SALARIO MEDIO (€)
México	742	719
Costa Rica	660	809
El Salvador	809	391
Guatemala	807	463
Colombia	643	349
Bolivia	1000	363
Perú	855	377
Chile	796	779
Paraguay	743	303
Uruguay	852	1059
Argentina	886	393
Panamá	654	736
Ecuador	734	484

 El precio del billete está entre el 50% y la totalidad del salario medio
 El precio del billete es mayor que el salario medio

La clasificación por colores, como se indica en la leyenda, viene determinada por el porcentaje que representa el precio del billete de ida-vuelta frente al salario medio neto. Se observa cómo en solo 3 de los 13 países el precio del billete de ida y vuelta es menor que el salario medio. No obstante, siempre supone más de la mitad del salario. En los 10

países restantes, aquellas personas que quieran realizar este viaje deberán emplear más de un salario mensual, con las evidentes consecuencias que tendrá esto en sus finanzas personales.

Ante estos datos, y teniendo en cuenta que muchos trabajadores de estos países no están contabilizados en las estadísticas laborales, resulta claro que las políticas de las empresas y de los países se han de enfocar en hacer más accesibles los vuelos a los habitantes de estos países. Es por todo ello que en este proyecto se buscará abaratar el precio del billete disminuyendo los costes operativos de la compañía.

III. Desarrollo

Ha llegado el momento de presentar las soluciones que se plantean en este documento para solucionar los problemas expuestos o, al menos, mitigarlos. Cabe recordar que los objetivos fijados al comienzo eran tres: reducir la contaminación causada por el tráfico aéreo civil entre Hispanoamérica y España; reducir los costes operativos de las compañías operadoras, para lo cual se usa como ejemplo a Iberia; y, finalmente, reducir el precio del billete para hacerlo así más asequible para los habitantes de Hispanoamérica.

Antes de avanzar, es apropiado explicar aquí el porqué de la elección de Iberia como compañía sobre la que trabajar. Las rutas aéreas que se van a estudiar son navegadas por diversas compañías aéreas, generalmente las estatales de cada uno de los países implicados y, si acaso, alguna operadora extranjera. Es por ello que resulta evidente que, al estar Madrid implicada en todas las rutas analizadas, Iberia participará en todas estas rutas como una de las operadoras. Sin embargo, se ha de mencionar que dos de las rutas analizadas aquí no son operadas por Iberia, pero como se pretendía incluir esos destinos en el estudio, se usaron los datos de AirEuropa. Más adelante se indicarán cuáles son estas rutas.

III.I Reducción de velocidad en la fase de crucero

La primera solución propuesta en este trabajo consiste en una **reducción de la velocidad de vuelo en la fase de crucero**. A continuación, se verán los efectos que esta medida tiene en términos ambientales, humanos y económicos.

En primer lugar, se muestra la siguiente tabla, donde se detallan las rutas que van a ser estudiadas.

Tabla 2: Rutas aéreas estudiadas

RUTA	AVIÓN	DISTANCIA (NM)	OPERACIONES ANUALES
Ciudad de México (MEX)	A359	5254	2187
San José (SJO)	A332	4692	725
San Salvador (SAL)	A332	4899	353
Ciudad de Guatemala (GUA)	A332	5098	354
Bogotá (BOG)	A359	4464	1954
Santa Cruz (VVI)	B789	5061	427
Lima (LIM)	A359	5197	1222
Santiago de Chile (SCL)	A359	6193	870
Buenos Aires (EZE)	A359	5882	1462
Asunción (ASU)	B789	5228	546
Montevideo (MVD)	A332	5690	716
Ciudad de Panamá (PTY)	A332	4471	559
Quito (UIO)	A359	4820	663

Si se observa con detenimiento se verá que en dos de las trece rutas el avión empleado no es un Airbus sino un Boeing. Esto ocurre por lo mencionado anteriormente, se tratan de las dos rutas operadas por AirEuropa. A parte de eso, mencionar que estos datos han sido obtenidos de la página web *FlightRadar24* y abarcan el periodo comprendido entre el 05/04/2023 y el 05/04/2024.

Una vez se dispone de las rutas a analizar, mediante el software Matlab y la librería BADA, proporcionados ambos por la UPV, se crea un script que calcula el combustible empleado en cada ruta, así como el tiempo de vuelo de la fase crucero. Dicho *script* se muestra en el Anexo a). Y estos son los resultados obtenidos:

Tabla 3: Tiempo de vuelo, consumo de combustible por trayecto y total anual por cada ruta

RUTA	TIEMPO DE VUELO	COMBUSTIBLE POR TRAYECTO (kg)	COMBUSTIBLE TOTAL ANUAL (t)
Ciudad de México (MEX)	6 h 43 min	94955,70	207668,12
San José (SJO)	6 h 17 min	81364,40	58989,19
San Salvador (SAL)	6 h 25 min	84888,80	29965,75
Ciudad de Guatemala (GUA)	6 h 27 min	88273,00	31248,64
Bogotá (BOG)	5 h 56 min	80915,40	158108,69
Santa Cruz (VVI)	6 h 35 min	76603,70	32709,78
Lima (LIM)	7 h 2 min	93945,00	114800,79
Santiago de Chile (SCL)	7 h 55 min	111559,00	97056,33
Buenos Aires (EZE)	7 h 27 min	106070,00	155074,34
Asunción (ASU)	6 h 47 min	79085,50	43180,68
Montevideo (MVD)	7 h 20 min	98318,50	70396,05
Ciudad de Panamá (PTY)	6 h 2 min	77596,80	43376,61
Quito (UIO)	6 h 28 min	87251,00	57847,41

Los datos de combustible por trayecto y tiempo de vuelo son los que nos arroja el mencionado *script* de Matlab. Estos datos han sido calculados para una velocidad de crucero *Calibrated Air Speed* (CAS) = 470 [knots]. La columna de combustible total anual es el resultado de multiplicar el combustible requerido por ruta por el número de operaciones anuales mostrado anteriormente.

Ahora se busca averiguar la cantidad de gases de efecto invernadero emitidos por cada ruta a lo largo del año. Para ello, se buscan los factores de emisión de los mismos. El factor de emisión de CO₂ por tonelada de combustible se encuentra en el documento de la IATA *Carbon Offset Program* [22], en el mismo se indica que este factor tiene un valor de 3,16 kg de CO₂ por cada kilogramo de combustible tipo Jet. Por otra parte, los

factores de emisión del CH₄ (Metano) y del N₂O (óxido de dinitrógeno) han sido extraídos de una publicación de la US Environmental Protection Agency [23], donde se indica que son 108,2 gCH₄/t y 21,11 gN₂O/t respectivamente y tras hacer la conversión a las unidades empleadas en este estudio. Aplicando estos valores a la tabla se obtienen los siguientes datos de emisión:

Tabla 4: Emisiones de GEIs de cada ruta y totales

RUTA	CO2 EMITIDO ANUAL (t)	CH4 EMITIDO ANUAL (t)	N2O EMITIDO ANUAL (t)
Ciudad de México (MEX)	656231,25	22,47	4,38
San José (SJO)	186405,84	6,38	1,25
San Salvador (SAL)	94691,76	3,24	0,63
Ciudad de Guatemala (GUA)	98745,71	3,38	0,66
Bogotá (BOG)	499623,47	17,11	3,34
Santa Cruz (VVI)	103362,90	3,54	0,69
Lima (LIM)	362770,50	12,42	2,42
Santiago de Chile (SCL)	306698,00	10,50	2,05
Buenos Aires (EZE)	490034,91	16,78	3,27
Asunción (ASU)	136450,96	4,67	0,91
Montevideo (MVD)	222451,51	7,62	1,49
Ciudad de Panamá (PTY)	137070,09	4,69	0,92
Quito (UIO)	182797,83	6,26	1,22
TOTAL	3477334,72	119,07	23,23

Conviene aclarar aquí que cuando en los encabezados de las columnas se indica CO₂, CH₄ y N₂O lo que se quiere decir es CO₂, CH₄ y N₂O. Las tablas se han realizado en Excel donde no es posible hacer este cambio. Esto se aplica a todas las veces que ocurra este fenómeno.

Volviendo a la cuestión que atañe, como puede verse, las cantidades de metano y óxido de dinitrógeno emitidas son despreciables en comparación con la cantidad de dióxido de carbono. No obstante, se tendrán en cuenta también a la hora de comparar posteriormente.

El siguiente paso consiste en hallar la cantidad de dinero que Iberia habrá de pagar por esta cantidad de CO₂ emitido. Para hallar el valor del crédito de carbono en los siguientes 5 años se ha hecho una predicción por regresión lineal ajustada a valores por debajo de la media para presentar así un escenario menos favorable en aras de que los resultados no sean demasiado optimistas. Dicho de otra forma, teniendo en cuenta el valor del RMSE (*Root Mean Square Error*) se han ajustado los valores levemente a la baja para que las predicciones de ahorro no sean demasiado optimistas, facilitando así que, en caso de darse luego mayores ahorros, la sorpresa sea positiva y no negativa para la compañía.

El Error Cuadrático Medio informa de la precisión de la predicción hecha, indicando los valores bajos mayor precisión de la predicción a los datos conocidos.

En la siguiente gráfica se muestra esa predicción y debajo se muestran los datos usados para realizar los cálculos, así como la RMSE.

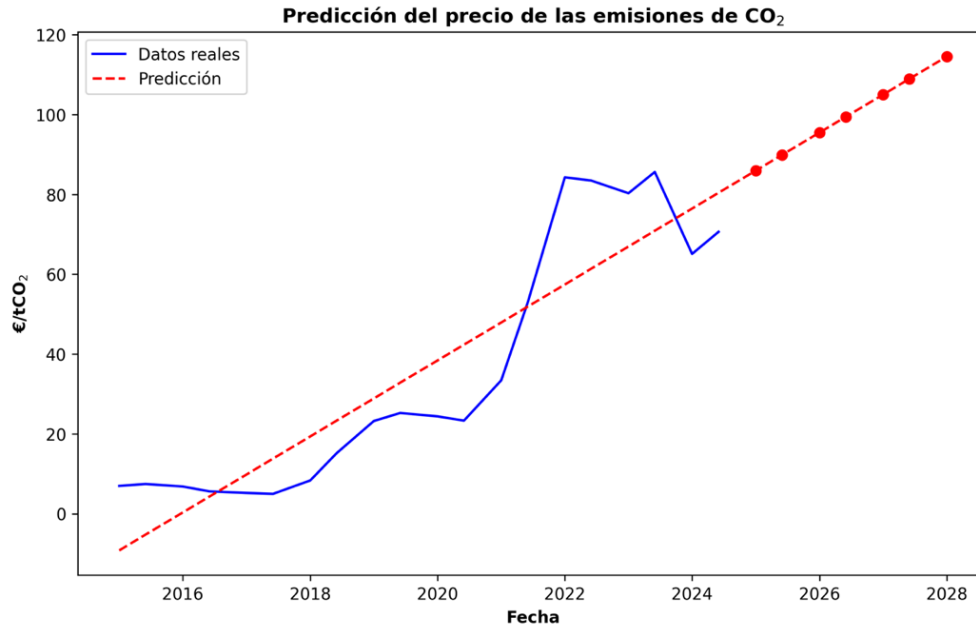


Ilustración 6: Previsión de la evolución del precio de los derechos de emisión de CO₂

Tabla 5: Valores ajustados de la predicción del precio de los derechos de emisión de CO₂

2024	85,96 [€]
2025	89,93 [€]
2026	95,48 [€]
2027	103,23 [€]
2028	108,96 [€]
RMSE	13,11 [-]

Entonces, aplicando estas predicciones se obtienen los siguientes resultados:

Tabla 6: Previsión de gasto por emisiones anual a 5 años vista

RUTA	GASTO ANUAL POR EMISIONES (2024)	GASTO ANUAL POR EMISIONES (2025)	GASTO ANUAL POR EMISIONES (2026)	GASTO ANUAL POR EMISIONES (2027)	GASTO ANUAL POR EMISIONES (2028)
MEX	56.409.637,93 €	59.014.875,97 €	62.656.959,39 €	67.742.751,55 €	71.502.956,59 €
SJO	16.023.446,04 €	16.763.477,23 €	17.798.029,64 €	19.242.674,90 €	20.310.780,37 €
SAL	8.139.703,57 €	8.515.629,85 €	9.041.169,11 €	9.775.030,24 €	10.317.614,02 €
GUA	8.488.181,12 €	8.880.201,59 €	9.428.240,27 €	10.193.519,51 €	10.759.332,42 €
BOG	42.947.633,09 €	44.931.138,25 €	47.704.048,48 €	51.576.130,34 €	54.438.972,80 €
VVI	8.885.075,27 €	9.295.426,00 €	9.869.090,12 €	10.670.152,63 €	11.262.422,07 €
LIM	31.183.751,87 €	32.623.950,74 €	34.637.327,00 €	37.448.798,34 €	39.527.473,29 €
SCL	26.363.760,32 €	27.581.351,39 €	29.283.525,31 €	31.660.434,83 €	33.417.814,39 €
EZE	42.123.401,24 €	44.068.839,85 €	46.788.533,63 €	50.586.304,21 €	53.394.204,27 €
ASU	11.729.324,37 €	12.271.034,68 €	13.028.337,50 €	14.085.832,42 €	14.867.696,41 €
MVD	19.121.931,40 €	20.005.063,88 €	21.239.669,73 €	22.963.668,90 €	24.238.316,02 €
PTY	11.782.545,06 €	12.326.713,32 €	13.087.452,33 €	14.149.745,53 €	14.935.157,16 €
UIO	15.713.301,04 €	16.439.008,41 €	17.453.536,34 €	18.870.219,48 €	19.917.651,02 €
TOTAL	298.911.692,33 €	312.716.711,16 €	332.015.918,84 €	358.965.262,90 €	378.890.390,83 €

Estos datos nos muestran el gasto en emisiones que tendría la compañía durante los próximos 5 años, suponiendo que ha de pagar por cada una de las toneladas que emite.

Ahora ya se tienen todos los datos relativos a las emisiones de gases de efecto invernadero, tiempo de vuelo y previsión de gasto por emisiones para los próximos 5 años, todo ello calculado para una velocidad en fase crucero CAS = 470 [knots].

El siguiente paso es realizar de nuevo los mismos cálculos para una CAS = 430 [knots]. La elección de esta nueva velocidad se ha hecho de manera arbitraria intentando encontrar el justo balance entre ahorro económico y en emisiones, a la vez que se intenta no aumentar en exceso la duración del vuelo. Puesto que mostrar de nuevo todos los pasos sería redundante, a continuación se mostrarán directamente los resultados de tiempo de vuelo, emisiones y gasto por emisiones. Ver Tablas [6], [7] y [8].

Tabla 7: Tiempos de vuelo tras aplicar la reducción de velocidad

RUTA	TIEMPO DE VUELO
Ciudad de México (MEX)	7 h 14 min
San José (SJO)	6 h 46 min
San Salvador (SAL)	6 h 55 min
Ciudad de Guatemala (GUA)	6 h 57 min
Bogotá (BOG)	6 h 24 min
Santa Cruz (VVI)	7 h 5 min
Lima (LIM)	7 h 35 min
Santiago de Chile (SCL)	8 h 31 min
Buenos Aires (EZE)	8 h 1 min
Asunción (ASU)	7 h 18 min
Montevideo (MVD)	7 h 54 min
Ciudad de Panamá (PTY)	6 30 min
Quito (UIO)	6 h 58 min

Tabla 8: Emisiones de GEIs tras aplicar la reducción de velocidad

RUTA	CO2 EMITIDO ANUAL (t)	CH4 EMITIDO ANUAL (t)	N2O EMITIDO ANUAL (t)
Ciudad de México (MEX)	600451,14	20,56	4,01
San José (SJO)	169792,42	5,81	1,13
San Salvador (SAL)	86235,86	2,95	0,58
Ciudad de Guatemala (GUA)	89911,36	3,08	0,60
Bogotá (BOG)	457480,31	15,66	3,06
Santa Cruz (VVI)	95017,90	3,25	0,63
Lima (LIM)	331951,32	11,37	2,22
Santiago de Chile (SCL)	280399,16	9,60	1,87
Buenos Aires (EZE)	448131,78	15,34	2,99
Asunción (ASU)	125416,76	4,29	0,84
Montevideo (MVD)	202441,42	6,93	1,35
Ciudad de Panamá (PTY)	124879,36	4,28	0,83
Quito (UIO)	167324,82	5,73	1,12
TOTAL	3179433,62	108,87	21,24

Tabla 9: Previsión de gasto en emisiones tras aplicar la reducción de velocidad

RUTA	GASTO ANUAL POR EMISIONES (2024)	GASTO ANUAL POR EMISIONES (2025)	GASTO ANUAL POR EMISIONES (2026)	GASTO ANUAL POR EMISIONES (2027)	GASTO ANUAL POR EMISIONES (2028)
MEX	51.614.779,79 €	53.998.570,81 €	57.331.074,62 €	61.984.570,94 €	65.425.155,96 €
SJO	14.595.356,84 €	15.269.432,76 €	16.211.780,72 €	17.527.672,01 €	18.500.582,61 €
SAL	7.412.834,74 €	7.755.191,11 €	8.233.800,15 €	8.902.128,08 €	9.396.259,58 €
GUA	7.728.780,61 €	8.085.728,71 €	8.584.736,77 €	9.281.549,82 €	9.796.741,91 €
BOG	39.325.007,66 €	41.141.204,51 €	43.680.220,24 €	47.225.692,66 €	49.847.054,85 €
VVI	8.167.738,69 €	8.544.959,75 €	9.072.309,09 €	9.808.697,82 €	10.353.150,39 €
LIM	28.534.535,39 €	29.852.382,13 €	31.694.711,95 €	34.267.334,67 €	36.169.415,73 €
SCL	24.103.111,42 €	25.216.296,06 €	26.772.511,38 €	28.945.604,83 €	30.552.291,99 €
EZE	38.521.407,64 €	40.300.490,80 €	42.787.622,16 €	46.260.643,44 €	48.828.438,53 €
ASU	10.780.824,99 €	11.278.729,54 €	11.974.792,58 €	12.946.772,49 €	13.665.410,55 €
MVD	17.401.864,87 €	18.205.557,33 €	19.329.107,23 €	20.898.028,27 €	22.058.017,64 €
PTY	10.734.629,70 €	11.230.400,76 €	11.923.481,20 €	12.891.296,23 €	13.606.854,96 €
UIO	14.383.241,63 €	15.047.521,17 €	15.976.173,93 €	17.272.941,30 €	18.231.712,52 €
TOTAL	273.304.113,96 €	285.926.465,43 €	303.572.322,02 €	328.212.932,58 €	346.431.087,22 €

Con estos resultados obtenidos, se está en disposición de comparar las cifras ambientales, económicas y temporales para las dos velocidades distintas. Se muestran las siguientes tablas resumen (ver Tablas 10 y 11) donde no están todos los valores de cada ruta sino los valores totales. Cabe decir que el tiempo de vuelo antes y después no aparecen representados en las tablas puesto que cada ruta tiene su propio tiempo.

Tabla 10: Resumen de resultados relativos a las emisiones

	SIN REDUCCIÓN DE VELOCIDAD	CON REDUCCIÓN DE VELOCIDAD	VARIACIÓN NOMINAL (t)	VARIACIÓN PORCENTUAL
EMISIONES CO₂ (t)	3477334,72	3179433,62	297901,10	-8,57%
EMISIONES CH₄ (t)	119,07	108,87	10,20	-8,57%
EMISIONES N₂O (t)	23,23	21,24	1,99	-8,57%

Esta primera tabla arroja una disminución del 8,57% en las emisiones de los tres gases de efecto invernadero aquí estudiados. Nominalmente, se ve como la cantidad reducida de CO₂ es significativamente mayor que las otras dos.

Tabla 11: Resumen de resultados relativos a los gastos por emisiones

	SIN REDUCCIÓN DE VELOCIDAD	CON REDUCCIÓN DE VELOCIDAD	VARIACIÓN NOMINAL (€)	VARIACIÓN PORCENTUAL
GASTO ANUAL POR EMISIONES (2024)	298.911.692,33 €	273.304.113,96 €	25.607.578,37 €	-8,57%
GASTO ANUAL POR EMISIONES (2025)	312.716.711,16 €	285.926.465,43 €	26.790.245,72 €	-8,57%
GASTO ANUAL POR EMISIONES (2026)	332.015.918,84 €	303.572.322,02 €	28.443.596,82 €	-8,57%
GASTO ANUAL POR EMISIONES (2027)	358.965.262,90 €	328.212.932,58 €	30.752.330,32 €	-8,57%
GASTO ANUAL POR EMISIONES (2028)	378.890.390,83 €	346.431.087,22 €	32.459.303,61 €	-8,57%

Esta segunda tabla, como era previsible, indica también una reducción del 8,57% en los gastos por emisiones de la aerolínea implicada.

Ante estos resultados se está en condiciones de sacar las primeras conclusiones. Con respecto a las emisiones de GEIs, se puede decir que la disminución en la contaminación es bastante importante y para nada despreciable. Se muestra por lo tanto que disminuir en 40 [knots] la velocidad de crucero supone una disminución anual del 8,55% en las emisiones, con las implicaciones evidentes que esto tiene para la reducción de la huella de carbono de las rutas estudiadas.

Por otro lado, en lo referente a la disminución en el gasto por emisiones, mientras que la reducción porcentual es igual al 8,55% y constante debido a la proporcionalidad de los cálculos, la variación nominal aumenta conforme avanzan los años. Esto se debe a que el precio de los derechos de emisión aumenta cada año. Así, el ahorro mínimo sería de alrededor de 24,34 millones para el año 2024 y el máximo de unos 30,85 millones para el año 2028, incrementándose más aún si se siguiese contabilizando.

En relación con el tiempo de vuelo, analizando las rutas una a una se observa que la disminución media es de 30 minutos. Hay que aclarar aquí que se tienen dudas de la precisión del *script* de Matlab a la hora de calcular esta variable, por lo que los datos serán tomados como orientativos y no se sacarán conclusiones definitivas de los mismos. Pese a ello, aun suponiendo que el incremento en la duración de los vuelos fuese de más de media hora, llegando quizás a la hora completa, se ha de tener en cuenta que estas rutas se tratan de vuelos intercontinentales de larga duración (en torno a las 10 horas de media) y que, además del tiempo de vuelo hay que sumar los tiempos en los aeropuertos (embarque, facturación, aduanas...). Esta característica hace que los usuarios generalmente no realicen viajes de un día o dos entre los ambos continentes, sino que sus estancias son más largas, lo que implica que muy probablemente no le cause excesiva molestia alargar la duración de su vuelo una hora.

En resumen, en este apartado se ha estudiado como **una reducción de 40 [knots] en la velocidad de crucero disminuye las emisiones de gases de efecto invernadero en un 8,57%**. Esto implica también que los gastos por emisiones de las aerolíneas también se verán reducidos en la misma dimensión. Como contrapartida, el tiempo de vuelo será mayor, mas se considera que los beneficios son superiores a los perjuicios si se observa la vista global de la situación.

En el siguiente apartado se estudiará como esta reducción en los gastos de la compañía afectan a las finanzas de la aerolínea, aplicado todo ello a la empresa Iberia.

III.II Estudio de las finanzas de Iberia

Antes que nada, es importante mencionar que Iberia es una operadora aérea incluida dentro del holding IAG (Internation Airlines Group) compuesto por British Airlines, Iberia, Vueling y Aer Lingus. Las finanzas que aquí se muestran son solo las de Iberia puesto que es la operadora que atañe al caso.

Para poder estudiar cómo el ahorro propuesto afectaría a las finanzas de la compañía primero es necesario conocer la evolución de los resultados financieros de la misma durante un cierto periodo de años. En este caso se comienza el estudio en el año 2016. La información ha sido extraída de los informes de resultados de cada año (2016-2023) que se adjuntan en las Referencias [24-32]. El ahorro propuesto se ha de descontar de lo que en la empresa se denomina como “Gasto en Combustible y Emisiones”, el cual está incluido dentro de los gastos operacionales. En la siguiente tabla (ver Tabla 12) se muestran las métricas más importantes en lo tocante al caso.

Tabla 12: Estados financieros de Iberia periodo 2016-2023

Millones	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Ingresos Totales	4.586 €	4.851 €	5.182 €	5.645 €	2.259 €	2.784 €	5.511 €	6.958 €
Gastos Combustible y Emisiones	1.003 €	926 €	1.023 €	1.202 €	716 €	519 €	1.313 €	1.496 €
Neto tras operaciones	271 €	376 €	437 €	497 €	- 1.411 €	- 220 €	382 €	940 €
Margen Operacional	5,91%	7,75%	8,43%	8,80%	-62,46%	-7,90%	6,93%	13,51%

Como se indica, las cifras están en millones de euros. El neto tras operaciones se obtiene de deducir los gastos de combustible y emisiones, los de personal, los de proveedores y los de propiedad de los ingresos totales. El margen operacional es la relación porcentual entre el neto tras operaciones y los ingresos totales. Esta métrica es la más importante de analizar puesto que resume si la compañía obtiene beneficios o no a partir de sus operaciones. Resulta evidente a la vista que los años 2020 y 2021 son años anómalos influenciados directamente por la pandemia de COVID-19. El año 2022 es un año de recuperación parcial y ya en el año 2023 se ve una recuperación completa de todas las métricas. En los informes mencionados se detallan todas estas métricas y su evolución tras la pandemia. Hay que mencionar que los métodos contables de la compañía han variado a lo largo de estos años, lo que dificulta la tarea de comparar bien los datos y de hacer las correspondientes predicciones.

Dicho esto, ahora es momento de calcular las predicciones de estas métricas para los próximos 5 años. Para ello se han usado modelos de regresión lineal y el lenguaje de programación Python. No obstante, para que los años 2020 y 2021, por las circunstancias ya expuestas, no afecten a la tendencia real de los valores, se ha usado el método ampliamente utilizado en el mundo financiero de igualar los valores de 2020 y 2021 a los

de 2019. Gracias a esto obtenemos una tendencia más real. Se muestran a continuación los gráficos obtenidos:

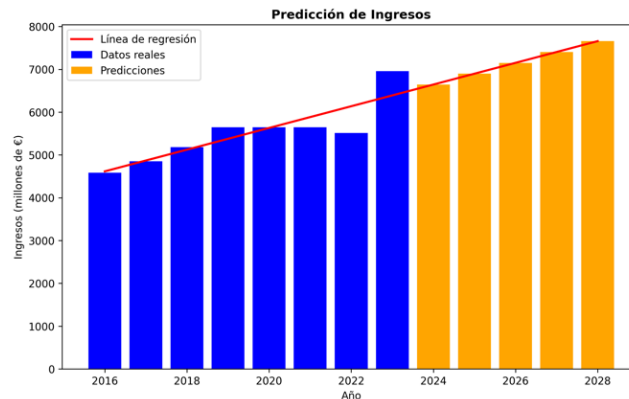


Ilustración 7: Gráfico que muestra la predicción sobre la evolución de los ingresos totales de Iberia a 5 años vista

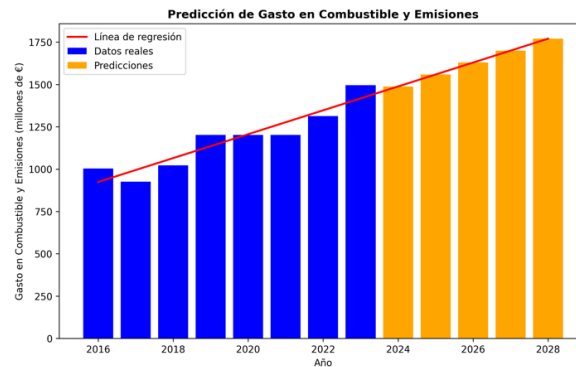


Ilustración 8: Gráfico que muestra la previsión de la evolución del gasto en combustible y emisiones de Iberia a 5 años vista

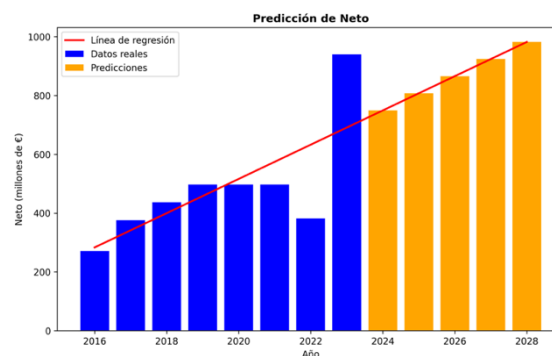


Ilustración 9: Gráfico que muestra la previsión del neto tras operaciones de Iberia a 5 años vista

Se observa que el ajuste lineal es más preciso en los Ingresos Totales y en el Gasto en Combustible y Emisiones mientras que, en lo tocante al neto, debido a la campaña del 2023, las predicciones son más imprecisas. También hay que hacer notar aquí que el gasto en combustible está fuertemente influenciado por el precio del petróleo y es conocida de sobras su alta volatilidad. Es por ello que las predicciones sobre el gasto en combustible siempre han de tomarse muy cautelosamente.

Visto esto, se tiene que admitir que usar estos datos tan lineales no acabaría de representar bien la realidad de las cosas. Así pues, siguiendo un procedimiento similar al seguido antes con la predicción de los precios de las emisiones, usamos la RMSE para ajustar los valores. En este caso los valores han sido aumentados por encima de la tendencia lineal puesto que se ha considerado que la cantidad de pasajeros va a aumentar exponencialmente debido a circunstancias macroeconómicas mundiales, así como a informes que ya hemos mencionado anteriormente en este documento. También hay que decir que, a causa de la impresión de dinero durante la pandemia, las cifras de todas las compañías son más abultadas por la inflación inherente a dicha impresión. Con todo esto en vista, se muestran las siguientes tablas donde se recogen los datos de Ingresos Totales, Gastos de Combustible y Emisiones y Neto tras operaciones predichos para los próximos 5 años.

Tabla 13: Valores ajustados de los ingresos totales predichos

	Predicción Lineal	Valor Ajustado	Desviación
2024	6.644 €	6.644 €	0
2025	6.897 €	6.897 €	0
2026	7.150 €	7.375 €	225
2027	7.404 €	7.698 €	294
2028	7.657 €	7.810 €	153
RMSE	325,54 [-]		

Tabla 14: Valores ajustados de los valores de gasto en combustible y emisiones predichos

	Predicción Lineal	Valor Ajustado	Desviación
2024	1.488 €	1.488 €	0
2025	1.559 €	1.593 €	34
2026	1.629 €	1.674 €	45
2027	1.699 €	1.759 €	60
2028	1.770 €	1.825 €	55
RMSE	61,327 [-]		

Tabla 15: Valores ajustados del neto tras operaciones predicho

	Predicción Lineal	Valor Ajustado	Desviación
2024	749 €	809 €	60
2025	808 €	858 €	50
2026	866 €	944 €	78
2027	924 €	969 €	45
2028	982 €	1.082 €	100
RMSE	130,14 [-]		

En adición a estas tablas, y con el propósito de hacer más ilustrativos los cálculos, se presentan las siguientes dos Ilustraciones donde se puede observar que los valores

ajustados para los Ingresos Totales y para el Neto tras operaciones tienen bastante lógica y verosimilitud.

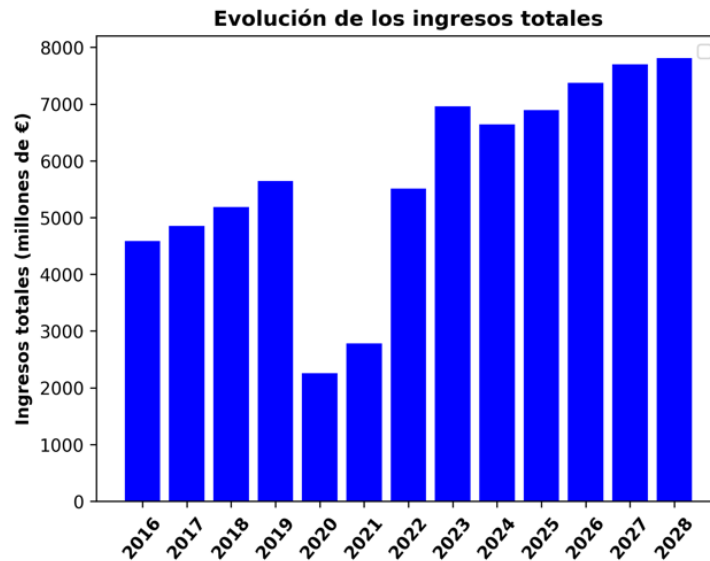


Ilustración 10: Gráfico que muestra los valores de Ingresos totales usados en el estudio

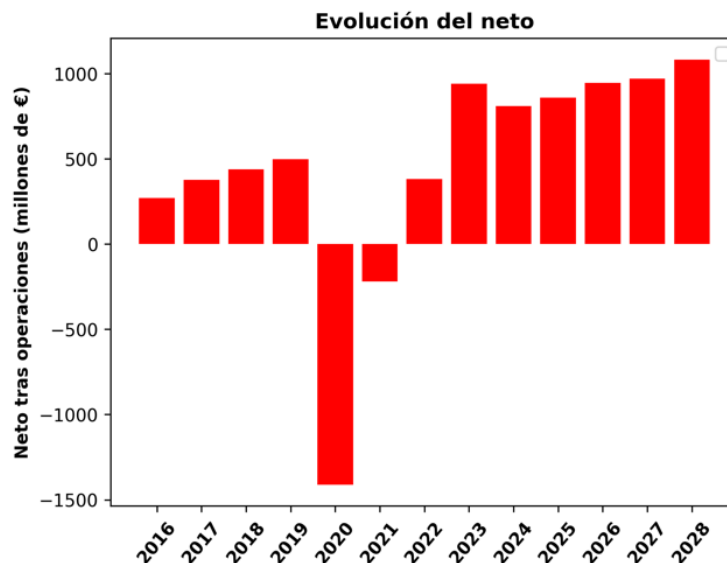


Ilustración 11: Gráfico que muestra los valores del neto tras operaciones usados en el estudio

Tras este importante paso, ha llegado la hora de ver cómo el ahorro causado por la reducción de velocidad en la fase de crucero afectaría a las finanzas de Iberia. Para ello, se han recogido en las dos siguientes tablas los datos necesarios. En la primera de ellas (ver Tabla 16) se muestran los valores que se acaban de predecir y se calcula el margen operacional que, como ya se ha dicho, es la métrica que nos indicará más fielmente la rentabilidad de la compañía. En la segunda tabla (ver Tabla 17) se muestran los Ingresos Totales predichos (iguales a la Tabla 16), el gasto en combustible y emisiones predicho descontando el ahorro obtenido, el propio ahorro, el neto predicho anteriormente, el neto resultante de aplicar el ahorro y, finalmente, el nuevo margen operacional. El motivo por el que se ha descontado el ahorro del neto y no del gasto en combustible se debe a que los

gastos de proveedores, de personal y de propiedades no han sido trabajados y no se conocen sus valores futuros.

Tabla 16: Valores predichos de las finanzas de Iberia a 5 años vista

	2024	2025	2026	2027	2028
Ingresos Totales	6.644 €	6.897 €	7.375 €	7.698 €	7.810 €
Gastos Combustible y Emisiones	1.488 €	1.593 €	1.674 €	1.759 €	1.825 €
Neto tras operaciones	809 €	858 €	944 €	969 €	1.082 €
Margen Operacional	12,18%	12,44%	12,80%	12,59%	13,85%

Tabla 17: Valores predichos de las finanzas de Iberia a 5 años con la reducción de velocidad

	2024	2025	2026	2027	2028
Ingresos totales	6.644 €	6.897 €	7.375 €	7.698 €	7.810 €
Gasto Combustible y emisiones	1.462 €	1.566 €	1.646 €	1.728 €	1.793 €
Ahorro	25,61 €	26,79 €	28,44 €	30,75 €	32,46 €
Neto	809 €	858 €	944 €	969 €	1.082 €
Nuevo Neto	834,61 €	884,79 €	972,44 €	999,75 €	1.114,46 €
Margen Operacional	12,56%	12,83%	13,19%	12,99%	14,27%

Con todo esto, ya se tienen los diferentes márgenes operacionales para los próximos 5 años calculados en ambos casos, i.e., sin reducción de velocidad y con reducción de velocidad. Se puede ver que se produce una mejora considerable al incluir la solución propuesta. Para ilustrar mejor esta mejora se presentan a continuación dos ilustraciones:

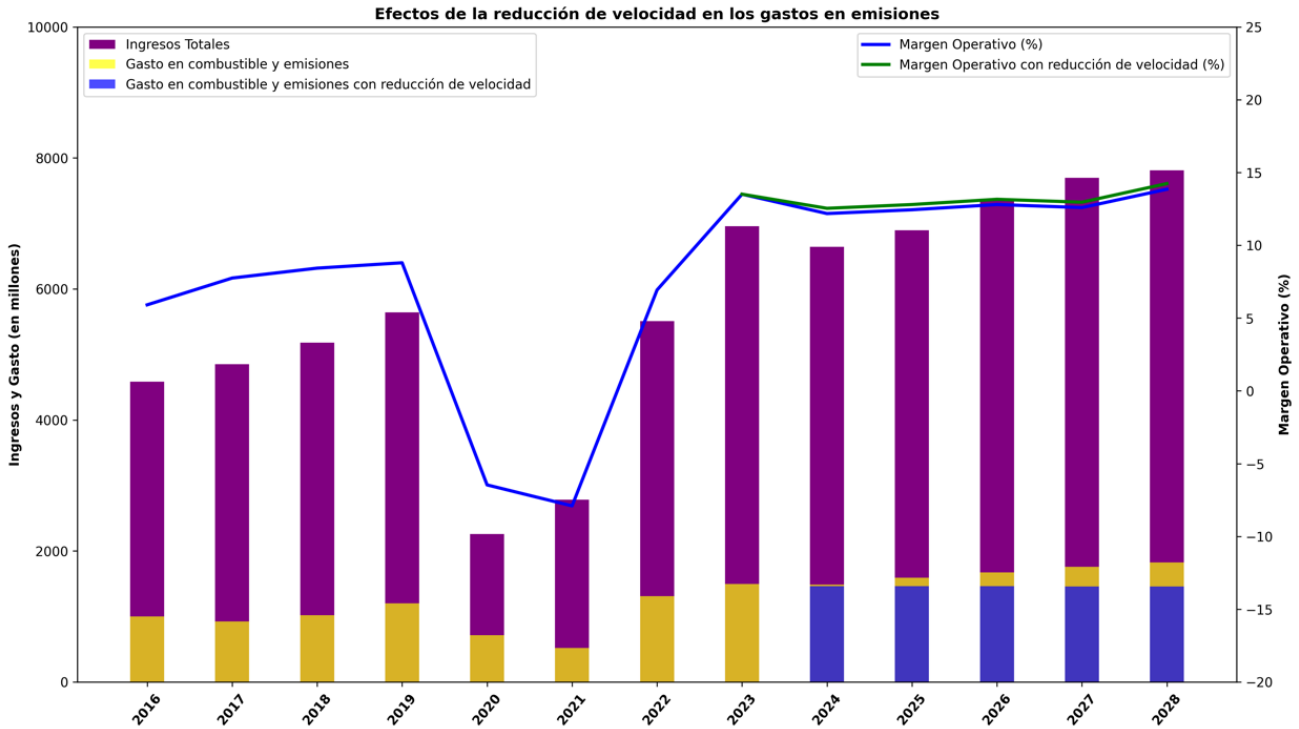


Ilustración 12: Gráfico resumen que muestra la mejora introducida a 5 años vista por la reducción de velocidad en los márgenes de Iberia

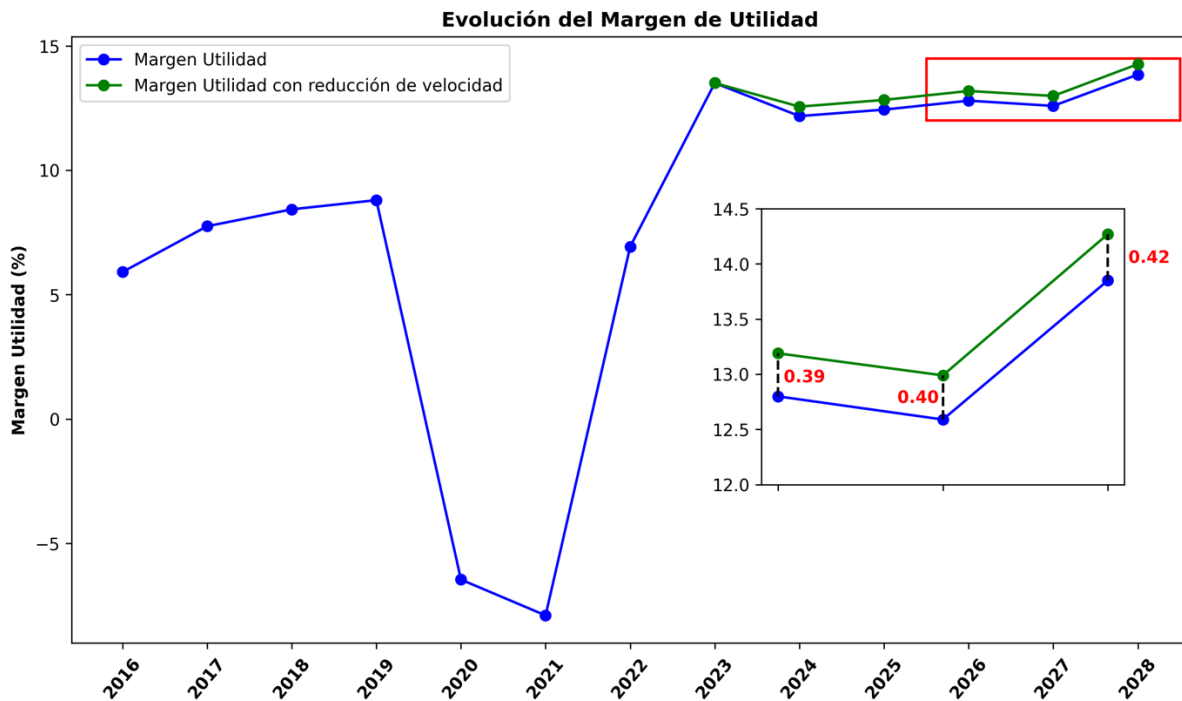


Ilustración 13: Gráfico del margen operacional de Iberia aplicando o no la reducción de velocidad en Iso próximos 5 años

En la Ilustración 12 se muestran las métricas de Ingresos Totales, gasto en combustible y emisiones, y margen operativo. A partir del año 2024 se presentan los datos si se aplicase la reducción de velocidad o no. La barra amarilla que se observa a partir de dicho año muestra el ahorro nominal que supone la medida. Se aprecia que esta

es cada vez mayor como ya se había visto en la Tabla (tabla de antes). Debido a que en esta Ilustración 12 no se puede apreciar con detalle la divergencia en la margen operacional introducida, se ha considerado incluir la Ilustración 13 dedicada únicamente a este propósito. En ella se amplían los tres últimos años del estudio (2026, 2027 y 2028) y se ve como el margen operacional va divergiendo paulatinamente. No es descabellado deducir que esta divergencia irá en aumento con el paso de los años.

En resumen, y como conclusión a este apartado, se presenta la siguiente tabla (ver Tabla 18) donde se muestra la diferencia en el margen operacional tras aplicar la medida de reducción de velocidad en la fase de crucero:

Tabla 18: Tabla resumen de la ganancia en el margen operacional obtenida gracias a la reducción de velocidad

	Margen Operacional (sinrv)	Margen Operacional (conrv)	Diferencia
2024	12,18%	12,56%	0,3854
2025	12,44%	12,83%	0,3884
2026	12,80%	13,19%	0,3857
2027	12,59%	12,99%	0,3995
2028	13,85%	14,27%	0,4156

Se puede ver que **la reducción en el margen operativo para los próximos 5 años es de una media de 0,39 puntos porcentuales**, obteniendo una mejora en este periodo de 0,03 puntos. Estos números, que a priori pueden parecer poco significativos, al tratarse de las finanzas de una compañía aérea, son dignos de tener en cuenta, puesto que estas no operan con grandes márgenes de rentabilidad.

En resumen, ateniéndose a los resultados obtenidos, donde la mejora en el margen operativo de Iberia es considerablemente significativa, se puede concluir que **la reducción en la velocidad cumple con el segundo objetivo del presente proyecto, i.e., la optimización de las finanzas de la compañía aérea, en este caso, Iberia.**

III.III Impacto en el precio del billete

Ha llegado el momento de ver si la medida de reducción de velocidad impacta positivamente en el precio del billete, lo que se corresponde con el tercer objetivo impuesto al comienzo de este proyecto.

Para analizar esto, de nuevo se recurrirá a los estados financieros de Iberia. En este caso, se hará una comparación sobre el coste unitario total por AKO. El motivo de analizar esta métrica responde al hecho de que el ahorro que se implementa se descuenta de la parte de actividades operacionales. El coste unitario total por AKO responde al ratio entre los costes operacionales totales y los asientos por kilómetro ocupados, siendo esta última la métrica disponible más adecuada para analizar el precio del billete. Evidentemente esta métrica no representa el método por el que la compañía establece los precios, pero, puesto que se desconoce cómo la aerolínea fija el precio del billete al no disponer de todos los datos de las que ella sí dispone, se ha creído conveniente expresar cierto paralelismo entre el Coste Unitario Total por AKO y el precio del billete.

El estudio se ha realizado sobre el año 2024 y las métricas de gasto de personal, de proveedores y de propiedad se han supuesto iguales a las del año 2023 en aras de simplificar. En la siguiente tabla podemos ver la comparación entre aplicar o no la reducción de velocidad para la métrica Coste Unitario por AKO.

Tabla 19: Análisis de la reducción en el Coste Unitario Total / AKO gracias a la reducción de velocidad

Para el año 2024	SINRV	CONRV	REDUCCIÓN
AKO	79486,05	79486,05	N/A
Gasto Personal	1.284 €	1.284 €	N/A
Gato Combustible	1.488 €	1.462 €	-1,75%
Gasto Proveedores	2.827 €	2.827 €	N/A
Costes de Propiedad	411 €	411 €	N/A
Gasto Total	6.010 €	5.984 €	N/A
Coste Unitario Total / AKO	7,56	7,53	-0,43%

Para calcular el AKO de 2024 se ha supuesto un incremento del 5% con respecto al valor de 2023. Todos los gastos están en millones de euros excepto el Coste Unitario Total/AKO que está en céntimos de euro por AKO. Como se puede ver, la reducción en esta métrica cuando se incluye la reducción de velocidad es de apenas un 0,43%. Es por ello que no se puede decir que esta medida influya de manera considerable en el abaratamiento del billete.

Solo viendo esta tabla, uno repara en que el gasto en combustible y emisiones no es ni siquiera el que más pondera dentro de los gastos operativos de la compañía. Así pues, es comprensible que una reducción del 1,75% en su valor no sea apenas perceptible ni en los Costes Unitarios de la Compañía ni, en última instancia, en el precio del billete.

Se concluye así que **el último de los objetivos propuestos, la reducción del precio del billete, no ha sido alcanzado**. Para conseguir esto serían necesarias otras medidas que impactasen en mayor grado las finanzas de la aerolínea.

III. IV El Cielo Único Hispanoamericano

El presente epígrafe presenta una segunda solución a la problemática previamente expuesta y, por lo tanto, puede contribuir a la consecución de los objetivos fijados al inicio de este proyecto.

La solución que se plantea aquí es la de **crear un Cielo Único Hispanoamericano que englobe los países hispanoamericanos, Portugal y España**. Ahora se incluyen no solo los países estudiados sino todos, puesto que sus espacios aéreos participan de esta medida.

Primero de todo, hay que dejar claro que esta solución resulta de una adaptación de la medida propuesta por la Unión Europea y que Laura Rodríguez Veiras en su Trabajo Final de Grado del año 2020 [33] estudió en detalle. Esta propuesta era la de crear un Cielo Único Europeo en aras de agilizar el tráfico europeo al reducir la cantidad de millas náuticas recorridas. Aquí se propone una medida similar que englobe a todos los países hispánicos. No obstante, esta tarea es algo más complicada que en el caso de la UE, donde ya existen numerosas políticas comunes y alianzas, así como las distancias son bastante más reducidas. En el caso hispánico, las rutas transcurren por departamentos FIR y UIR de otros países no englobados como puedan ser EE. UU. y, además, son más largas. En la siguiente imagen (ver Ilustración 14) se puede ver la división del espacio aéreo entre la península Ibérica e Hispanoamérica. Se detecta a simple vista la saturación que hay en la zona del Mar Caribe y también la gran cantidad de diferentes FIR de diferentes países que ha de atravesar un avión que vuela de un lado a otro.

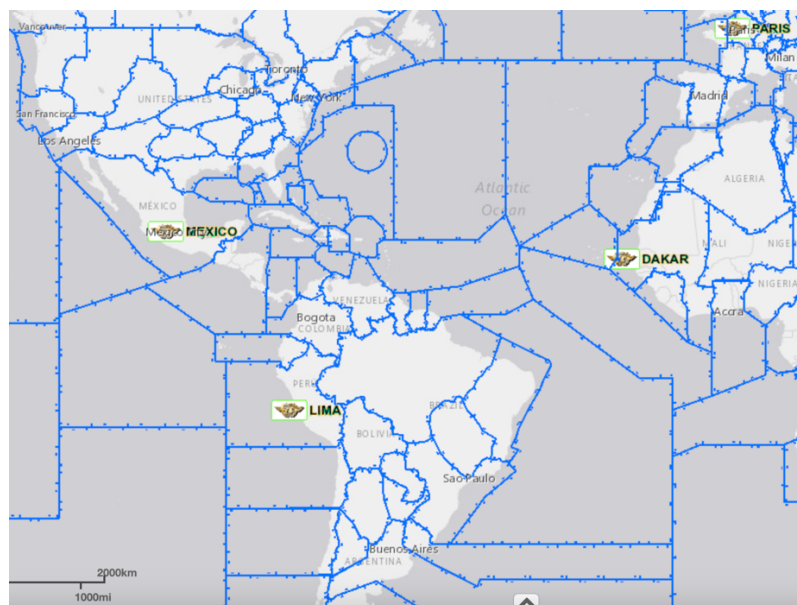


Ilustración 14: Segregación del espacio aéreo

Para ilustrar el beneficio que tendría la creación de este Cielo Único Hispanoamericano en términos de eficiencia se muestra la siguiente tabla en la que se comparan las distancias recorridas con y sin Cielo Único. En amarillo se destacan las rutas que experimentarían una mejora considerable y en gris aquellas que apenas las percibirían. Estos datos han sido extraídos de la web *Simbrief*.

Tabla 20: Reducción en las distancias de vuelo gracias a la implementación de un Cielo Único Hispanoamericano

RUTA	DISTANCIA SIN CIELO ÚNICO (NM)	DISTANCIA CON CIELO ÚNICO (NM)	MEJORA
Ciudad de México (MEX)	5254	4896	-6,81%
San José (SJO)	4692	4590	-2,17%
San Salvador (SAL)	4899	4679	-4,49%
Ciudad de Guatemala (GUA)	5098	4703	-7,75%
Bogotá (BOG)	4464	4337	-2,84%
Santa Cruz (VVI)	5061	4815	-4,86%
Lima (LIM)	5197	5144	-1,02%
Santiago de Chile (SCL)	6193	5788	-6,54%
Buenos Aires (EZE)	5882	5446	-7,41%
Asunción (ASU)	5228	4962	-5,09%
Montevideo (MVD)	5690	5370	-5,62%
Ciudad de Panamá (PTY)	4471	4405	-1,48%
Quito (UIO)	4820	4718	-2,12%
		PROMEDIO	-4,48%

Como puede verse, la mayoría de las rutas se verían significativamente beneficiadas de esta medida con una mejora promedio del 4,48%. La implicación de la reducción de la distancia sería la disminución del gasto en combustible que traería como consecuencia la disminución de las emisiones de GEIs, el principal objetivo de este trabajo. En adición a esto, como ya se ha mostrado anteriormente, esta reducción de

emisiones contribuiría a la optimización de las finanzas de las aerolíneas operadoras de estas rutas.

A modo de ilustrar cuantitativamente la mejora introducida, se ha usado de nuevo el *script* de Matlab para calcular el ahorro de combustible y, por ende, el de emisiones. Sin embargo, en aras de reducir el tamaño de este estudio, se analizará únicamente el caso de la ruta Madrid – Ciudad de Méjico, que es una de las que presenta una mejora significativa. En las siguientes ilustraciones se muestra la alteración en la ruta que supondría un Cielo Único Hispanoamericano. Estas Ilustraciones 15 y 16 han sido obtenidas también de la web *Simbrief*.

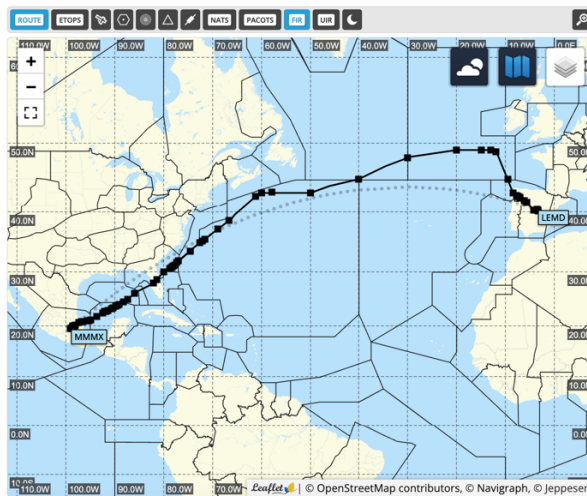


Ilustración 15: Ruta MAD-MEX sin Cielo Único Hispanoamericano

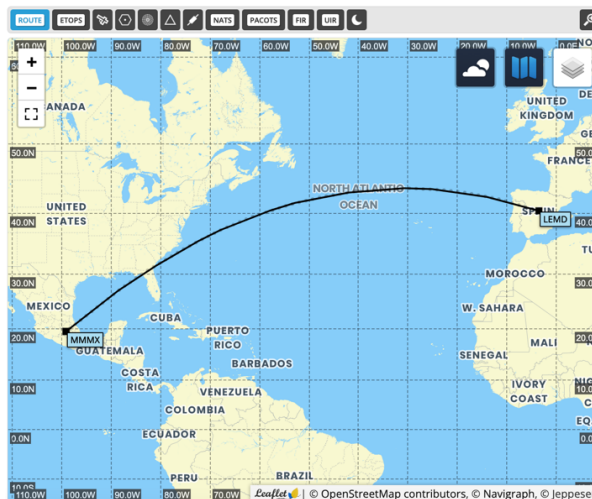


Ilustración 16: Ruta MAD-MEX con Cielo Único Hispanoamericano

Por otra parte, los datos arrojados por el *script* se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 21: Mejora en la ruta MAD-MEX gracias al Cielo Único Hispanoamericano

RUTA	EMISIONES DE CO2 SIN CIELO ÚNICO (t)	EMISIONES DE CO2 CON CIELO ÚNICO (t)	REDUCCIÓN
Ciudad de México (MEX)	656231,25	612319,26	-6,69%

Aquí se puede ver que **para el caso estudiado la reducción en las emisiones de CO₂ sería del 6,69%**. Como ya se ha visto en epígrafes anteriores, esto quiere decir que también la reducción en las emisiones de metano y óxido de dinitrógeno seguirían la misma proporción.

Si se observa la cifra de reducción se verá que es bastante similar a la disminución que sufre la distancia de la ruta. Así pues, puesto que la reducción promedio en las distancias es del 4,5%, **se puede deducir que la reducción en emisiones promedio de todas las rutas al implementar el Cielo Único Hispanoamericano será aproximadamente** igual, es decir, **del entorno del 4,5%**. De nuevo se puede decir que la disminución de la contaminación es significativa y se puede concluir que el objetivo de aumentar la sostenibilidad de las rutas aérea ha sido alcanzado.

III.IV.I Combinación del Cielo Único Hispanoamericano y la reducción de la velocidad en fase de crucero

En este subapartado se pretende mostrar el potencial que tendría la combinación de las dos medidas propuestas a lo largo de este documento, véase, la reducción de velocidad en la fase de crucero y la creación de un Cielo Único Hispanoamericano.

En la línea de lo que propone Laura Rodríguez en su proyecto, esta combinación actuaría de manera simbiótica. El tiempo que se perdería por reducir la velocidad de crucero se compensaría al acortar la ruta gracias al Cielo Único, consiguiendo así que el mayor inconveniente que tenía la reducción de velocidad fuese en buena medida mitigado. En adición a esto, las medidas aumentan la sostenibilidad de las rutas al reducir las emisiones de GEIs.

Para cuantificar la reducción a la que se llegaría a través de la combinación de ambas, se ha trabajado de nuevo sobre la ruta Madrid – Ciudad de Méjico. Se muestran en la siguiente tabla (ver Tabla 22) las emisiones de CO₂ en los siguientes casos: sin Cielo Único y sin reducción de velocidad (sinrv), sin Cielo Único y con reducción de velocidad (conrv), y con Cielo Único y con reducción de velocidad. Como ya se ha visto, las

emisiones de CO₂ varían de la misma manera que las de metano y óxido de dinitrógeno, por lo tanto, el resultado que aquí se presente será aplicable a los tres gases de efecto invernadero.

Tabla 22: Mejora resultante de combinar la reducción de velocidad y el Cielo Único Hispanoamericano

RUTA	EMISIONES SIN CIELO ÚNICO Y SINRV (t)	EMISIONES SIN CIELO ÚNICO Y CONRV (t)	EMISIONES CON CIELO ÚNICO Y CONRV (t)	REDUCCIÓN TOTAL
Ciudad de México (MEX)	656231,25	600451,14	560450,73	-14,60%

Se observa que **la reducción total en las emisiones de GEIs en caso de aplicar conjuntamente la reducción de velocidad y la implantación de un Cielo Único Hispanoamericano sería del 14,6%**. Con ese resultado en la mano, se puede afirmar que el objetivo de reducción de emisiones sería alcanzado aún más satisfactoriamente que en el caso de aplicar las medidas por separado.

Por otra parte, del estudio realizado sobre los gastos por emisiones se deduce que esta misma proporción del -14,6% será la que relacionaría el antes y el después en los gastos por emisiones de cada año. Esto sin duda alguna repercutiría muy notablemente en **los márgenes operacionales de la compañía, suponiendo casi el doble de reducción** en esta métrica. Es decir, si antes se calculaba un ahorro de 25,6 millones para el año 2024, ahora sería de aproximadamente 50 millones de euros.

Este ahorro aumentaría también la disminución en el Coste Unitario Total/AKO, sin embargo, el aumento seguiría siendo bastante marginal y **el precio del billete no se reduciría en más del 1%**.

Pese a esto último, las ventajas que ofrece la combinación de ambas medidas son evidentes y suponen un salto cualitativo hacia la mayor sostenibilidad de las rutas. Además, como ya se ha comentado, los viajeros no sufrirían tantas molestias por el aumento en la duración de los vuelos.

Hay que destacar que la reducción vista en este apartado es solo relativa a la ruta Madrid – Ciudad de Méjico, una de las que más acortamiento de distancia sufría. Evidentemente, en aquellas que la distancia no se ve tan reducida al implementar el Cielo Único, la mejora no será tan grande. Teniendo en cuenta que la mejora media en la distancia de las rutas estudiadas es del 4,5%, **se puede deducir que la reducción media en las emisiones y, por ende, en los gastos por emisiones, al aplicar conjuntamente las dos medidas, sería del 13%**.

IV. Presupuesto

En este apartado se presenta el presupuesto necesario para la elaboración del presente proyecto. Este representa la cantidad monetaria que la empresa contratante habrá de desembolsar en su totalidad.

IV. I Coste humano

En primer lugar, el coste de personal se calculará de la siguiente manera: se supondrá que el autor de este texto es el único personal necesario para la elaboración del proyecto, y el salario neto por hora lo fijará el autor arbitrariamente en la cifra que él considere justa, al ser su idea y su proyecto. El contratado trabajará en calidad de autónomo bajo la normativa española y, por ende, será gravado con el IRPF del 15%. A su salario neto habrá que aplicarle el IVA del 21%. Con respecto a la cantidad de horas trabajadas, se estima que estas son 300 horas:

Tabla 23: Presupuesto del coste humano del proyecto

Descripción	Cantidad	Precio	Importe
Horas de Trabajo	300	120 €	36.000 €
Base Imponible			36.000 €
IVA	21%		7.560 €
Retención IRPF	15%		(5.400 €)
Total a pagar			38.160 €

Por lo tanto, la empresa contratante habrá de abonar la cantidad de 38.160 € al contratado.

La justificación para el valor de la hora de trabajo del contratado, como ya se ha dicho, ha sido fijada arbitrariamente por este, ya que el mismo considera este el valor de su tiempo para la realización de este proyecto.

IV. II Coste material

En segundo lugar, se presenta aquí los materiales y recursos necesarios para la elaboración de este proyecto.

Tabla 24: Presupuesto del coste material del proyecto

Descripción	Costo Total (€)	Vida Útil	Amortización mensual	Costo para el proyecto (3 meses)
Portátil MacBook Pro-14" (2021)	3.500	5 años	58,3 €	175 €
Auriculares Sony	60	3 años	1,66 €	5 €
Software Matlab	500	1 año	41,67 €	125 €
Software Microsoft Office	150	1 año	12,5 €	37,5 €
Material de Papelería	85	-	-	85 €
iPhone 13	1.100	4 años	22,92 €	68,75 €
TOTAL (sin IVA)				496,25 €

Cabe destacar que no se ha tenido en cuenta el consumo de energía debido a su valor despreciable. Tampoco se han aplicado dietas de desplazamiento ni de alimentación.

Ahora se le aplica el IVA del 21% a este valor:

Tabla 25: Coste material con IVA

Concepto	Importe
Total sin IVA	496,25 €
IVA (21%)	104,21 €
Total con IVA	600,46 €

Así pues, el coste total de los materiales necesarios para la elaboración de este proyecto es de 600,46 €, cantidad que deberá ser abonada por la empresa al contratado.

IV. III Comisión sobre beneficios futuros

Además del costo del proyecto, el contratante acuerda pagar al contratado una comisión del 0,5% sobre los beneficios netos generados como resultado directo del proyecto durante los próximos cinco años.

- **Definición de Beneficios Netos:** Se consideran beneficios netos aquellos ingresos adicionales obtenidos por la empresa contratante, menos los costes directamente atribuibles a dichos ingresos, como resultado directo del proyecto.
- **Período de Cálculo:** La comisión se calculará y pagará anualmente, durante los cinco años posteriores a la finalización del proyecto.
- **Informes Financieros:** El contratante proporcionará informes financieros detallados y auditados que muestren los beneficios netos generados durante cada año.
- **Método de Pago:** La comisión se pagará mediante transferencia bancaria a los 30 días de recibir el informe financiero anual.
- **Auditoría Independiente:** Ambas partes acuerdan que una auditoría independiente puede ser solicitada por el contratado para verificar los beneficios netos reportados. Los costos de dicha auditoría serán compartidos equitativamente entre ambas partes.

IV. IV Plazos y pagos

La empresa contratante acuerda abonar la cantidad total de 38,760.46 € al inicio del proyecto. Esta cantidad resulta de la suma de Costes Humanos y Costes Materiales. Este pago deberá ser efectuado en su totalidad antes de la fecha de inicio del proyecto. La duración del proyecto será de 3 meses, contados a partir de la fecha en que se reciba el pago completo. Durante este período, el contratado se compromete a llevar a cabo todas las tareas y entregables acordados conforme al alcance del proyecto descrito en este documento.

En caso de retraso en el pago, la fecha de inicio del proyecto se ajustará en consecuencia, y cualquier retraso en el pago podría afectar la fecha de finalización del proyecto.

Condiciones de Pago:

- Monto Total a Abonar: 38,760.46 €
- Duración del Proyecto: 3 meses desde la recepción del pago completo
- Método de Pago: Transferencia bancaria a la cuenta especificada por el contratado.

IV. IV Presupuesto final

Tras lo establecido en los anteriores puntos, aquí se muestra una tabla resumen:

Tabla 26: Presupuesto completo para la elaboración del proyecto

Descripción	Cantidad	Precio Unitario (€)	Importe (€)
Coste Humano			
Horas de trabajo	300	120	36.000
Subtotal coste humano			36.000
IVA (21%)			7.560
Retención IRPF (15%)			(5.400)
Total Coste Humano			38.160
Coste Material			
Portátil MacBook Pro 14" (2021)			175
Auriculares Sony			5
Software Matlab			125
Software Microsoft Office			37,5
Material de papelería			85
iPhone 13			68,75
Subtotal Coste Material			496,25
IVA (21%)			104,21
Total Coste Material			600,46
Comisión sobre Beneficios Futuros	0,5% sobre los beneficios netos futuros durante los próximos 5 años		-
<u>Total General</u>			38.760,46

V. Conclusiones

V.I Comentario de resultados

A lo largo de este documento se han presentado una serie de problemas relativos al transporte aéreo y a la sostenibilidad y se han propuesto dos soluciones a dicha problemática.

Primeramente, se ha visto como el calentamiento global y el cambio climático son problemas graves que han de ser solucionados a la mayor brevedad posible si se quiere que el Ser Humano continúe su existencia en la Tierra. Se han analizado estos fenómenos de manera superficial, pero dejando ver los conceptos más importantes relativos a sus causas y consecuencias.

Seguidamente, se han mostrado datos sobre la contribución del transporte aéreo al agravamiento de esta situación y se han barajado ciertas soluciones. Este sector crece rápidamente y aumentar su sostenibilidad es una cuestión primordial. Complementariamente, se ha hablado sobre los créditos de carbono, su implantación, evolución y cómo contribuyen a la lucha climática.

A continuación, puesto que este estudio se centra en las rutas aéreas entre España e Hispanoamérica, se ha analizado la situación del poder adquisitivo de los habitantes de estos lugares y lo que supone para ellos la compra de un billete. También se ha dado una perspectiva sobre la situación actual del tráfico aéreo entre Hispanoamérica y España.

Una vez presentada la problemática actual se han propuesto dos soluciones: la reducción de velocidad de vuelo en la fase de crucero y la creación de un Cielo Único Hispanoamericano.

En primer lugar, se ha estudiado **la reducción de velocidad** y se ha visto que **es capaz de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en un 8,57%**, cumpliendo así con el objetivo principal de este proyecto. Además de ello, se ha podido analizar el impacto que tiene esta medida en las finanzas de las aerolíneas, aplicado al caso de Iberia, y se ha comprobado que puede **aumentar el margen operativo de la compañía en hasta 0,4 puntos porcentuales**. Esto satisface el objetivo de optimizar las finanzas de las aerolíneas que se había fijado al inicio del texto. También se ha estudiado si esta mejora de las finanzas de la aerolínea se ve reflejada en el precio del billete concluyendo, no obstante, que no son suficientes.

En segundo lugar, se ha presentado la **creación de un Cielo Único Hispanoamericano** con el fin de acortar las rutas entre España e Hispanoamérica y se ha visto que la mayoría de las rutas estudiadas sufrirían una mejora considerable. Usando como ejemplo la ruta Madrid – Ciudad de Méjico se ha podido ver que las emisiones de GEIs serían reducidas en un orden equivalente a la reducción en las distancias, para el caso, -6,69%. Puesto que la media de reducción de distancias es del 5% para todas las

rutas, se concluye que la creación de un Cielo Único Hispanoamericano reduciría las emisiones de gases de efecto invernadero en un 5%. Se puede decir pues, que esta medida también satisface el objetivo inicial de sostenibilidad. Aplicando lo visto en el caso de la reducción de velocidad, esta disminución en las emisiones acarrearía lo propio en los gastos por emisiones repercutiendo así en la mejora de los márgenes operacionales de las aerolíneas. De nuevo, en el caso del abaratamiento del billete, esta mejora no sería suficiente como para hacerse notar en el precio del mismo.

Finalmente, se ha querido analizar cuantitativamente cuál sería el logro de **combinar las dos medidas mencionadas**. De nuevo estudiando el caso de Madrid – Ciudad de Méjico, **se ha podido observar una reducción en las emisiones del 14,6%**. Este resultado, al igual que el anterior está sujeto a la mejora que sufra la distancia de la ruta gracias al Cielo Único. No obstante, si se tiene en cuenta que la reducción de velocidad reduce las emisiones un 8,6% y la implementación de un Cielo Único lo hace un 4,5% de media, **se llega a la cifra de reducción del 13%**. Esto tendría las evidentes implicaciones ya mencionadas en las finanzas de las aerolíneas. Con respecto al precio del billete, no sería tampoco afectado este en más de un 1%.

Se muestra aquí una tabla resumen con los hitos del estudio:

Tabla 27: Resumen de hitos del proyecto

Medida	Reducción de las emisiones de GEIs
Reducción de la velocidad de vuelo en la fase de crucero	8,6%
Creación de un Cielo Único Hispanoamericano	4,5%
Combinación de las anteriores	13%

Ante estos resultados, se puede decir que los ODS dentro de los que se enmarca este proyecto han sido satisfechos con éxito. Se ha conseguido aumentar la sostenibilidad de las rutas aéreas y mejorar la industria aportando innovación, lo que reporta beneficios sociales. Además, se han propuesto medidas que requieren de la cooperación internacional.

En otro orden de cosas, hay que mencionar que la precisión de los cálculos depende de la precisión del software de Matlab que ha calculado los consumos de combustible. Así pues, se han dado por verdaderos los datos arrojados y se ha trabajado en consecuencia. También de este software se han obtenido los datos de tiempo de vuelo, de los cuales se tiene duda de si son del todo fiables. No obstante, estos últimos se han usado de manera orientativa y para un análisis cualitativo. Los posteriores cálculos basados en predicciones también hay que mirarlos de manera más o menos orientativa, puesto que predecir el futuro no es posible y se pueden dar una infinidad de eventos que lo cambien todo. Además, se ha supuesto que las compañías van a dejar de tener derechos

de emisión adjudicados a partir del año 2026, lo cual no es del todo cierto. La realidad es que estos irán disminuyendo poco a poco sin saberse aún de qué manera. No obstante, esto no quita el hecho de que las medidas aquí propuestas serían beneficiosas para sus finanzas.

Por último, se considera que a lo largo de todo el proyecto se han aplicado los conocimientos adquiridos durante el Grado en Ingeniería Aeroespacial y se han combinado con conocimientos de otras disciplinas exitosamente.

V.II Futuras líneas de investigación

Ante los resultados vistos en este trabajo, se puede decir que existen medidas factibles para aumentar la sostenibilidad de las rutas aéreas entre España e Hispanoamérica, así como de todo el mundo. Bajo un marco de cooperación entre países y empresas privadas es posible hacer frente al reto climático y hacer que en el futuro el estilo de vida del Ser Humano sea más compatible con la naturaleza.

Las dos medidas propuestas en este proyecto han sido estudiadas de manera algo rudimentaria dada la limitación a la que está sujeta el autor de este texto. En caso de que se considerasen de suficiente valor para el progreso humano, habrían de ser tratadas más en profundidad y con datos más precisos, en aras de ver más claramente las mejoras obtenidas. Es por ello que se invita aquí a que quienquiera que esté interesado en hacer este proyecto realidad disponga de él con total libertad.

Referencias

- [1] Iberia. (s.f.). Primer vuelo entre Europa y América Latina. *Iberia*. Recuperado de <https://www.iberia.com/de/noticias-novedades/75-aniversario-latinoamerica/#:~:Fue%20el%2022%20de%20septiembre,entre%20Europa%20y%20Am%C3%A9rica%20Latina>.
- [2] El mensaje oculto que España lleva en su nombre. (s.f.). *El Cronista*. Recuperado de <https://www.cronista.com/espana/actualidad-es/el-mensaje-oculto-que-espana-lleva-en-su-nombre-cual-es-el-origen-de-la-palabra/#:~:Hispania%20que%20proviene%20del%20t%C3%A9rmino,se%20tradujo%20como%20%22conejos%22>.
- [3] NASA. (n.d.). Climate Change: Vital Signs of the Planet. Recuperado de <https://science.nasa.gov/climate-change/>(<https://science.nasa.gov/climate-change/>).
- [4] NASA. (n.d.). Causas del Cambio Climático. Recuperado de <https://science.nasa.gov/climate-change/causes/>
- [5] NASA. (n.d.). ¿Qué es el Cambio Climático? Recuperado de <https://science.nasa.gov/climate-change/what-is-climate-change/>
- [6] Global Carbon Atlas. (n.d.). Emisiones de Carbono. Recuperado de <https://globalcarbonatlas.org/emissions/carbon-emissions/>
- [7] Berkeley Earth. (2023). Global temperature report for 2023. Recuperado de <https://berkeleyearth.org/global-temperature-report-for-2023/>.
- [8] NASA. (s.f.). Carbon Dioxide. *Vital Signs*. Recuperado de <https://climate.nasa.gov/vital-signs/carbon-dioxide/?intent=121>.
- [9] Blogs UOC. (s.f.). Cambio climático y aviación: el reto de los vuelos largos. Recuperado de <https://blogs.uoc.edu/economia-empresa/es/cambio-climatico-y-aviacion-el-reto-de-los-vuelos-largos/>.
- [10] Parlamento Europeo. (n.d.). Emisiones de Aviones y Barcos: Datos y Cifras (Infografía). Recuperado de <https://www.europarl.europa.eu/topics/es/article/20191129STO67756/emisiones-de-aviones-y-barcos-datos-y-cifras-infografia>
- [11] OACI. (n.d.). Futuro de la Aviación. Recuperado de <https://www.icao.int/Meetings/FutureOfAviation/Pages/default.aspx>
- [12] OACI. (n.d.). CORSIA: Plan de Compensación y Reducción de Carbono para la Aviación Internacional. Recuperado de <https://www.icao.int/environmental-protection/CORSIA/Pages/default.aspx>
- [13] Climate Action. (s.f.). EU emissions trading system (EU ETS). Recuperado de https://climate.ec.europa.eu/eu-action/eu-emissions-trading-system-eu-ets/what-eu-ets_en

- [14] Climate Action. (s.f.). Our ambition 2030. Recuperado de https://climate.ec.europa.eu/eu-action/eu-emissions-trading-system-eu-ets/our-ambition-2030_en?prefLang=de
- [15] Carbon Credits. (s.f.). The ultimate guide to understanding carbon credits. Recuperado de <https://carboncredits.com/the-ultimate-guide-to-understanding-carbon-credits/>.
- [16] Parlamento Europeo. (2022). *Revisión del régimen de comercio de derechos de emisión de la UE: aviación*. Servicio de Estudios del Parlamento Europeo. Recuperado de <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=CELEX:32013D0377>.
- [17] Sendeco2. (s.f.). Precio de emisiones CO₂. Recuperado de <https://www.sendeco2.com/es/precios-co2>.
- [18] TeleSUR English. (2023). Air traffic recovery in Latin America and the Caribbean. Recuperado de <https://www.telesurenglish.net/news/Air-traffic-recovery-in-Latin-America-and-the-Caribbean--20230814-0028.html>.
- [19] AirInsight. (s.f.). Latin America recovers 97% of its pre-pandemic traffic levels. Recuperado de <https://airinsight.com/latin-america-recovers-97-of-its-pre-pandemic-traffic-levels/#:~:>.
- [20] ACI World. (2024). The trusted source for air travel demand updates. Recuperado de <https://aci.aero/2024/02/13/the-trusted-source-for-air-travel-demand-updates/>.
- [21] Wikipedia. (n.d.). Anexo: Países según el salario medio. Recuperado de https://es.wikipedia.org/wiki/Anexo%3%ADses_seg%3%BA_n_el_salario_medio.
- [22] IATA. (s.f.). CO₂ emission factor. Recuperado de https://www.iata.org/contentassets/922ebc4cbcd24c4d9fd55933e7070947/icop_faq_general-for-airline-participants.pdf.
- [23] Environmental Protection Agency. (2020). GHG emission factors hub. Recuperado de <https://www.epa.gov/sites/default/files/2020-04/documents/ghg-emission-factors-hub.pdf>.
- [24] International Airlines Group. (2016). *Informe y cuentas anuales 2016*. Recuperado de <https://www.iairgroup.com/es/inversores-y-accionistas/informes-financieros/informes-anuales>.
- [25] International Airlines Group. (2017). *Informe y cuentas anuales 2017*. Recuperado de <https://www.iairgroup.com/es/inversores-y-accionistas/informes-financieros/informes-anuales/>.
- [26] International Airlines Group. (2018). *Informe y cuentas anuales 2018*. Recuperado de <https://www.iairgroup.com/es/inversores-y-accionistas/informes-financieros/informes-anuales/>

[27] International Airlines Group. (2018). *Informe y cuentas anuales 2018 (Interactive)*. Recuperado de <https://www.iairgroup.com/es/inversores-y-accionistas/informes-financieros/informes-anuales/>

[28] International Airlines Group. (2019). *Informe y cuentas anuales 2019*. Recuperado de <https://www.iairgroup.com/es/inversores-y-accionistas/informes-financieros/informes-anuales/>

[29] International Airlines Group. (2020). *Informe y cuentas anuales 2020*. Recuperado de <https://www.iairgroup.com/es/inversores-y-accionistas/informes-financieros/informes-anuales/>

[30] International Airlines Group. (2021). *Informe y cuentas anuales 2021*. Recuperado de <https://www.iairgroup.com/es/inversores-y-accionistas/informes-financieros/informes-anuales/>

[31] International Airlines Group. (2022). *Informe y cuentas anuales 2022*. Recuperado de <https://www.iairgroup.com/es/inversores-y-accionistas/informes-financieros/informes-anuales/>

[32] International Airlines Group. (2023). *Informe y cuentas anuales 2023*. Recuperado de <https://www.iairgroup.com/es/inversores-y-accionistas/informes-financieros/informes-anuales/>

[33] Rodríguez Veiras, L. (2020). *El Cielo Único Europeo como solución de mejora a la huella ecológica del transporte aéreo*. Universitat Politècnica de València. Recuperado de <http://hdl.handle.net/10251/147953>.

Anexos

Anexo a) Códigos de Matlab y Python empleados

1) Código de Matlab para el cálculo de combustible empleado en la ruta:

```
%Cálculo del combustible empleado en la ruta:
clc; clear all;
addpath('..\kgbx-lib/kml','..\kgbx-lib/geo','..\kgbx-lib/bada');

% Load the Constants & global variables
run Constants;
run Globals;

%-- LOAD AIRCRAFT MODEL
aircraft='A359';
%aircraft='A359'; %Elegimos el avión aquí
%aircraft='B789';
color='b';
close all;
[ac] = LoadAircraftBADA(['../BADA_3.14/bada_314_96b6f733f5b65f32a5e7/',aircraft,'__.OPF']);

%-- SET WIND CONDITIONS
% Set Wind in NED
Wind=[0;90;0]*KTS2MPS;

%-- SET INITIAL STATE
% Set initial IAS/CAS

%-- SET INITIAL STATE
% Set initial IAS/CAS
cas_0 = 430*KTS2MPS; %Velocidad de crucero
% Set initial altitude
h_0 = 34000*FT2M;

% Set initial course
psi_0=0;
psi_dot=0;

% Set initial FPA
gamma_0=0.5;

Tr=[];
hdot=0;
Vdot=0;

% Set coordinates of initial point-----
% LEMD
lat_0 = 40.4893*pi/180.0;
lon_0 = -3.6832*pi/180.0;

% Set FINAL CONDITIONS
h_f=34000*FT2M;
%cas_f=470*KTS2MPS;
r_f= 4896*NM2M; %Ajustar la distancia aquí
%-- Set termination event
RangeTarget = r_f;
options = odeset('Events', @RangeEvent);

phase='cruise';

%-- SOLVE DIFFERENTIAL EQUATION
% Find out aircraft initial weight
W_0=ac.mass.m_ref*G_CONST;
V_0=cas2tas(cas_0,h_0);

x_0=[V_0; psi_0*pi/180; gamma_0*pi/180; h_0; 0; lat_0; lon_0; W_0];

% Set BADA function-----
BADAfunction=@BADA_jet;

% Integrate-----
```

```
% Integrate-----
[t,x] = integrate(0,1000000,x_0,options);

flight_time = t(end);
flight_time_hours = floor(flight_time / 3600);
flight_time_minutes = floor((flight_time - flight_time_hours * 3600) / 60);

%- PLOT RESULTS
consumption=x(1,8)-x(end,8);
fprintf('El consumo de un %s (%.1f Kg) \n es: %g [Kg]\n Altitud=%.1f [m] \n TAS=%.1f [m/s] \n
aircraft, x(1,8)/G_CONST, consumption/G_CONST, h_0, V_0, RangeTarget/NM2M);

fprintf('Tiempo total de vuelo: %.2f [h] y %.2f [min]', ...
flight_time_hours, flight_time_minutes);
```

Este código hace uso de la librería BADA para obtener los datos de consumo de cada uno de los modelos de avión empleados. Los parámetros a modificar son la velocidad de vuelo cas_0 y la distancia de vuelo r_f . También se establece la fase de vuelo como 'cruise' y se establecen las coordenadas de origen, en este caso Madrid.

2) Código en Python para la creación de la Ilustración 4:

```
1 import matplotlib.pyplot as plt
2 import numpy as np
3
4 # Datos
5 fecha = ['01/15', '06/15', '01/16', '06/16', '01/17', '06/17', '01/18', '06/18', '01/19',
6         '06/19', '01/20', '06/20', '01/21', '06/21', '01/22', '06/22', '01/23', '06/23', '01/24', '06/24']
7 precio = [6.97, 7.45, 6.82, 5.61, 5.22, 4.98, 8.34, 15.16, 23.24, 25.24, 24.40, 23.33, 33.43,
8         52.78, 84.28, 83.47, 80.29, 85.62, 65.09, 70.63]
9
10
11 # Crear el gráfico de líneas
12 plt.plot(fecha, precio, label='Precio',color='red' )
13
14 # Agregar etiquetas y título
15 plt.xticks(rotation=50, ha='center', fontweight='bold')
16 plt.ylabel('€/tCO2', fontweight='bold')
17 plt.title('Evolución del precio de la emisión de CO2', fontweight='bold')
18
19 # Agregar leyenda
20 plt.legend()
21
22 # Guardar el gráfico
23 plt.savefig('precio_emisiones.png', dpi=300, bbox_inches='tight', pad_inches=0.1)
24
25 # Mostrar el gráfico
26 plt.show()
```


3) Código en Python para la creación de la Tabla 1:

```

1  import matplotlib.pyplot as plt
2
3  # Datos
4  data = [
5      ["RUTA", "PRECIO DEL BILLETE (€)", "SALARIO MEDIO (€)"],
6      ["México", 742, 719],
7      ["Costa Rica", 660, 809],
8      ["El Salvador", 809, 391],
9      ["Guatemala", 807, 463],
10     ["Colombia", 643, 349],
11     ["Bolivia", 1000, 363],
12     ["Perú", 855, 377],
13     ["Chile", 796, 779],
14     ["Paraguay", 743, 303],
15     ["Uruguay", 852, 1059],
16     ["Argentina", 886, 393],
17     ["Panamá", 654, 736],
18     ["Ecuador", 734, 484]
19 ]
20
21 # Crear una figura
22 fig, ax = plt.subplots(figsize=(9,6))
23
24 # Ocultar ejes
25 ax.axis('off')
26
27 # Crear tabla
28 tabla = ax.table(cellText=data, loc='center', cellLoc='center')
29
30 # Estilo
31 tabla.auto_set_font_size(False)
32 tabla.set_fontsize(12)
33 tabla.scale(1.2, 1.2) # Escalar la tabla para ajustar el tamaño del texto
34
35 # Cambiar la fuente de la tabla a Times New Roman
36 for key, cell in tabla.get_celld().items():
37     cell.set_text_props(fontname='Times New Roman')
38
39 tabla[(0, 0)].set_facecolor("#A9A9A9")
40 tabla[(0, 1)].set_facecolor("#A9A9A9")
41 tabla[(0, 2)].set_facecolor("#A9A9A9")
42 # Análisis
43 for i in range(1, 14):
44     if 0.5 * data[i][2] <= data[i][1] < data[i][2]:
45         tabla[(i, 0)].set_facecolor("#FFECB3") # Amarillo claro
46         tabla[(i, 1)].set_facecolor("#FFECB3")
47         tabla[(i, 2)].set_facecolor("#FFECB3")
48     else:
49         tabla[(i, 0)].set_facecolor("#FF9999") # Rojo claro
50         tabla[(i, 1)].set_facecolor("#FF9999")
51         tabla[(i, 2)].set_facecolor("#FF9999")
52
53 # Negritas los encabezados
54 for j in range(3):
55     tabla[(0, j)].get_text().set_fontweight('bold')

```

```

57 # Leyenda
58 ax.text(0.59, 0.06, 'El precio del billete está entre el 50% y la totalidad del salario medio',
59         horizontalalignment='center', verticalalignment='center',
60         transform=ax.transAxes, fontsize=12, fontfamily='Times New Roman')
61 ax.text(0.5, 0.018, 'El precio del billete es mayor que el salario medio',
62         horizontalalignment='center', verticalalignment='center',
63         transform=ax.transAxes, fontsize=12, fontfamily='Times New Roman')
64 ax.axhline(y=0.06, xmin=0.1, xmax=0.2, color='#FFECB3', linewidth=8) # Amarillo claro
65 ax.axhline(y=0.02, xmin=0.1, xmax=0.2, color='#FF9999', linewidth=8) # Rojo claro
66
67 # Título
68 plt.suptitle('Precio de un billete ida-vuelta frente a salario neto medio mensual.\nHispanoamérica.',
69             y=0.85, fontsize= '15', weight= 'bold')
70
71 # Guardar tabla
72 plt.savefig('tabla1.png', dpi=300, bbox_inches='tight', pad_inches=0.1)
73
74 # Mostrar tabla
75 plt.show()

```

4) Código en Python para la creación de la Ilustración 6:

```

1 import numpy as np
2 import pandas as pd
3 import matplotlib.pyplot as plt
4 from sklearn.linear_model import LinearRegression
5 from sklearn.metrics import mean_squared_error
6
7 # Datos
8 fecha = ['01/15', '06/15', '01/16', '06/16', '01/17', '06/17', '01/18', '06/18', '01/19',
9         '06/19', '01/20', '06/20', '01/21', '06/21', '01/22', '06/22', '01/23', '06/23', '01/24', '0
10 precio = [6.97, 7.45, 6.82, 5.61, 5.22, 4.98, 8.34, 15.16, 23.24, 25.24, 24.40, 23.33, 33.43,
11          52.78, 84.28, 83.47, 80.29, 85.62, 65.09, 70.63]
12
13 # Crear DataFrame
14 df = pd.DataFrame({'fecha': fecha, 'precio': precio})
15
16 # Convertir fecha a formato datetime
17 df['fecha'] = pd.to_datetime(df['fecha'], format='%m/%y')
18
19 # Extraer características de fecha
20 df['año'] = df['fecha'].dt.year + df['fecha'].dt.month / 12
21
22 # Crear el modelo de regresión lineal
23 X = df[['año']]
24 y = df['precio']
25 modelo = LinearRegression()
26 modelo.fit(X, y)

```

```

29 fechas_futuras = ['01/25', '06/25', '01/26', '06/26', '01/27', '06/27', '01/28']
30 fechas_futuras_dt = pd.to_datetime(fechas_futuras, format='%m/%y')
31 año_futuro = fechas_futuras_dt.year + fechas_futuras_dt.month / 12
32 año_futuro = pd.DataFrame({'año': año_futuro})
33 predicciones = modelo.predict(año_futuro)
34
35 # Crear DataFrame para las predicciones
36 df_pred = pd.DataFrame({'fecha': fechas_futuras_dt, 'prediccion': predicciones})
37
38 # Calcular predicciones del modelo de regresión lineal para los años históricos
39 predicciones_hist = modelo.predict(X)
40
41 # Calcular RMSE para Regresión Lineal
42 rmse = np.sqrt(mean_squared_error(y, predicciones_hist))
43
44 # Visualización de los datos y la predicción
45 plt.figure(figsize=(10, 6))
46
47 # Datos reales y predicción como línea continua
48 plt.plot(df['fecha'], df['precio'], label='Datos reales', color='blue')
49 plt.plot(pd.concat([df['fecha'], df_pred['fecha']]),
50          modelo.predict(pd.concat([df[['año']], año_futuro]).reset_index(drop=True)),
51          color='red', linestyle='--', label='Predicción')
52
53 # Marcar en rojo los puntos de los precios predichos
54 plt.scatter(df_pred['fecha'], df_pred['prediccion'], color='red')
55 plt.figure(figsize=(10, 6))
56
57 # Datos reales y predicción como línea continua
58 plt.plot(df['fecha'], df['precio'], label='Datos reales', color='blue')
59 plt.plot(pd.concat([df['fecha'], df_pred['fecha']]),
60          modelo.predict(pd.concat([df[['año']], año_futuro]).reset_index(drop=True)),
61          color='red', linestyle='--', label='Predicción')
62
63 # Marcar en rojo los puntos de los precios predichos
64 plt.scatter(df_pred['fecha'], df_pred['prediccion'], color='red')
65
66 # Personalización del gráfico
67 plt.xlabel('Fecha', fontweight='bold')
68 plt.ylabel('€/tCO2', fontweight='bold')
69 plt.title('Predicción del precio de las emisiones de CO2', fontweight='bold')
70 plt.legend()
71 plt.grid(False) # Eliminar cuadrícula
72 plt.savefig('precio_emisiones2.png', dpi=300, bbox_inches='tight', pad_inches=0.1)
73 plt.show()
74
75 # Imprimir predicciones y RMSE
76 print("Valores predichos:")
77 print(df_pred)
78 print(f"RMSE: {rmse:.2f}")

```

5) Código en Python para la creación de las Ilustraciones 7, 8 y 9:

```

1  import numpy as np
2  import pandas as pd
3  from sklearn.linear_model import LinearRegression
4  import matplotlib.pyplot as plt
5  from sklearn.metrics import mean_squared_error
6
7  # Datos ajustados
8  years = np.array([2016, 2017, 2018, 2019, 2020, 2021, 2022, 2023]).reshape(-1, 1)
9  revenues = np.array([4586, 4851, 5182, 5645, 5645, 5645, 5511, 6958])
10
11 # Crear modelo de regresión lineal
12 model = LinearRegression()
13 model.fit(years, revenues)
14
15 # Predicciones para años futuros
16 future_years = np.array([2024, 2025, 2026, 2027, 2028]).reshape(-1, 1)
17 predictions_linear = model.predict(future_years)
18
19 # Imprimir predicciones
20 print("Predicciones para 2024, 2025, 2026, 2027 y 2028:", predictions_linear)
21
22 # Crear los datos completos para la visualización (años históricos + futuros)
23 all_years = np.append(years, future_years).reshape(-1, 1)
24 all_revenues = np.append(revenues, predictions_linear)
25
26 # Visualización
27 plt.figure(figsize=(10, 6))
28
29 # Datos reales como barras
30 plt.bar(years.flatten(), revenues, color='blue', label='Datos reales')
31
32 # Datos predichos como barras
33 plt.bar(future_years.flatten(), predictions_linear, color='orange', label='Predicciones')
34
35 # Línea de regresión
36 plt.plot(all_years.flatten(), model.predict(all_years), color='red', linestyle='--', linewidth=2, label='Regresión Lineal')
37
38 # Calcular predicciones del modelo de regresión lineal para los años históricos
39 predictions_linear_history = model.predict(years)
40
41 # Calcular RMSE para Regresión Lineal
42 rmse_linear = np.sqrt(mean_squared_error(revenues, predictions_linear_history))
43
44 # Agregar texto del RMSE al gráfico
45 #plt.text(2016, 7000, f'RMSE: {rmse_linear:.2f}', fontsize=12, color='black', horizontalalignment='right')
46
47 # Personalización del gráfico
48 plt.xlabel('Año')
49 plt.ylabel('Ingresos (millones de €)')
50 plt.title('Predicción de Ingresos', fontweight='bold')
51 plt.legend()
52 plt.grid(False) # Eliminar cuadrícula
53 plt.savefig('prediccion_ingresos.png', dpi=300, bbox_inches='tight', pad_inches=0.1)
54 plt.show()
55

```

6) Código en Python para la creación de la Ilustraciones 10 y 11:

```

1  import matplotlib.pyplot as plt
2  import numpy as np
3
4  # Datos
5  fecha = ['2016', '2017', '2018', '2019', '2020', '2021', '2022', '2023', '2024', '2025', '2026', '2027', '2028']
6  neto = [271, 376, 437, 497, -1411, -220, 382, 940, 809, 858, 944, 969, 1082]
7  ingresos = [4586, 4851, 5182, 5645, 2259, 2784, 5511, 6958, 6644, 6897, 7375, 7698, 7810]
8
9  # Crear el gráfico 1
10 plt.bar(fecha, neto, color='red' )
11 plt.xticks(rotation=50, ha='center', fontweight='bold')
12 plt.ylabel('Neto tras operaciones (millones de €)', fontweight='bold')
13 plt.title('Evolución del neto', fontweight='bold')
14 plt.legend()
15 plt.savefig('grafico_neto_verdadero.png', dpi=300, bbox_inches='tight', pad_inches=0.1)
16 plt.show()
17
18 # Crear el gráfico 2
19 plt.bar(fecha, ingresos, color='blue' )
20 plt.xticks(rotation=50, ha='center', fontweight='bold')
21 plt.ylabel('Ingresos totales (millones de €)', fontweight='bold')
22 plt.title('Evolución de los ingresos totales', fontweight='bold')
23 plt.legend()
24 plt.savefig('grafico_ingresos_verdadero.png', dpi=300, bbox_inches='tight', pad_inches=0.1)
25 plt.show()

```

7) Código en Python para la creación de la Ilustración 12:

```

1  import matplotlib.pyplot as plt
2  import numpy as np
3
4  # Datos reales
5  fecha = ['2016', '2017', '2018', '2019', '2020', '2021', '2022', '2023', '2024', '2025', '2026', '2027', '2028']
6  margen_utilidad = [5.91, 7.75, 8.43, 8.8, -6.46, -7.9, 6.93, 13.51, 12.18, 12.44, 12.80, 12.59, 13.85]
7  gasto_combustible_emisiones = [1003, 926, 1022, 1202, 716, 519, 1313, 1496, 1488, 1593, 1674, 1759, 1844]
8  ingresos_totales = [4586, 4851, 5182, 5645, 2259, 2784, 5511, 6958, 6644, 6897, 7375, 7698, 7810]
9  gasto_conrv = [1464, 1463, 1461, 1459, 1458]
10 margen_utilidad_conrv = [13.51, 12.54, 12.80, 13.16, 12.96, 14.24]
11
12 # Colores para los ingresos totales y el gasto en combustible
13 color_ingresos = ['purple'] * 8 + ['purple'] * 5
14 color_gasto = ['yellow'] * 13
15
16 # Gráfico 1: Margen operativo y Gasto en Combustible y Emisiones
17 fig, ax1 = plt.subplots(figsize=(14, 8)) # Tamaño más grande
18
19 # Crear el gráfico de barras apiladas
20 width = 0.4 # Ancho de las barras
21 x = np.arange(len(fecha))
22
23 # Barras de ingresos totales
24 bar1 = ax1.bar(x, ingresos_totales, width, label='Ingresos Totales', color=color_ingresos)
25
26 # Barras de gasto en combustible y emisiones superpuestas sobre los ingresos totales
27 bar2 = ax1.bar(x, gasto_combustible_emisiones, width, label='Gasto en combustible y emisiones', color=

```

```

26 # Barras de gasto en combustible y emisiones superpuestas sobre los ingresos totales
27 bar2 = ax1.bar(x, gasto_combustible_emisiones, width, label='Gasto en combustible y emisiones', color=
28
29 # Barras adicionales para los años con reducción de velocidad superpuestas sobre los ingresos totales
30 bar3 = ax1.bar(x[-5:], gasto_conrv, width, label='Gasto en combustible y emisiones con reducción de v
31
32 # Configurar el eje izquierdo
33 ax1.set_ylabel('Ingresos y Gasto (en millones)', fontweight='bold')
34 ax1.set_ylim(0, 10000)
35 ax1.set_xticks(x)
36 ax1.set_xticklabels(fecha, rotation=50, ha='center', fontweight='bold')
37
38 # Crear un segundo eje para el margen operativo (porcentaje)
39 ax2 = ax1.twinx()
40
41 # Línea de margen operativo (porcentaje)
42 l1 = ax2.plot(fecha, margen_utilidad, label='Margen Operativo (%)', linewidth = 2.5,color='blue')
43 l2 = ax2.plot(fecha[-6:], margen_utilidad_conrv, label='Margen Operativo con reducción de velocidad (
44
45 # Configurar el eje derecho (Margen Operativo)
46 ax2.set_ylabel('Margen Operativo (%)', fontweight='bold')
47 ax2.set_ylim(-20, 25)
48
49 # Agregar leyenda
50 ax1.legend(loc='upper left')
51
52
53 # Título y guardado del gráfico 1
54 plt.title('Efectos de la reducción de velocidad en los gastos en emisiones', fontweight='bold')
55 plt.tight_layout()
56 plt.savefig('grafico_final.png', dpi=300, bbox_inches='tight', pad_inches=0.1)
57 plt.show()
58

```

8) Código en Python para la creación de la Ilustración 13:

```

1 import matplotlib.pyplot as plt
2 import numpy as np
3 from mpl_toolkits.axes_grid1.inset_locator import inset_axes
4 from matplotlib.patches import Rectangle
5
6 # Datos
7 fecha = ['2016', '2017', '2018', '2019', '2020', '2021', '2022', '2023', '2024', '2025', '2026', '2027', '2028']
8 margen_utilidad = [5.91, 7.75, 8.43, 8.8, -6.46, -7.9, 6.93, 13.51, 12.18, 12.44, 12.80, 12.59, 13.85]
9 margen_utilidad_conrv = [13.51, 12.56, 12.83, 13.19, 12.99, 14.27]
10
11 # Crear el gráfico de líneas principal
12 fig, ax = plt.subplots(figsize=(10, 6))
13 ax.plot(fecha, margen_utilidad, label='Margen Utilidad', color='blue', marker='o')
14 ax.plot(fecha[-6:], margen_utilidad_conrv, label='Margen Utilidad con reducción de velocidad', color=
15
16 # Configuración del eje principal
17 ax.set_xticks(np.arange(len(fecha)))
18 ax.set_xticklabels(fecha, rotation=50, ha='center', fontweight='bold')
19 ax.set_ylabel('Margen Utilidad (%)', fontweight='bold')
20 ax.set_title('Evolución del Margen de Utilidad', fontweight='bold')
21 ax.legend()
22
23 # Añadir un rectángulo que englobe los años 2026-2028 en el gráfico principal
24 rect = Rectangle((9.5, 12), 3, 2.5, edgecolor='red', facecolor='none', linewidth=1.5)
25 ax.add_patch(rect)

```

```

27 # Crear el gráfico insertado en el lado derecho medio/superior
28 ax_inset = inset_axes(ax, width="65%", height="65%", loc='upper right',
29                       bbox_to_anchor=(0.45, 0.03, 0.5, 0.7), # Aquí se ajusta la posición vertical del gráfico
30                       bbox_transform=ax.transAxes)
31
32 # Ampliar una parte específica del gráfico (2026 hasta el final)
33 x_inset = np.arange(10, 13)
34 y_inset = np.array(margen_utilidad[10:])
35 y_inset_conrv = np.array(margen_utilidad_conrv[-3:])
36 ax_inset.plot(fecha[10:], margen_utilidad[10:], color='blue', marker='o')
37 ax_inset.plot(fecha[10:], margen_utilidad_conrv[-3:], color='green', marker='o')
38
39 # Configuración del eje insertado
40 ax_inset.set_xticks(np.arange(3))
41 ax_inset.set_xticklabels([]) # Quitar etiquetas del eje x en el gráfico pequeño
42 ax_inset.set_ylim(12, 14.5)
43 ax_inset.set_yticks(np.arange(12, 15, 0.5))
44
45 # Añadir barras verticales discontinuas que indiquen la diferencia entre las dos líneas
46 for i in range(len(y_inset)):
47     ax_inset.plot([i, i], [y_inset[i], y_inset_conrv[i]], 'k--', linewidth=1.5)
48     diferencia = y_inset_conrv[i] - y_inset[i]
49     # Ajustar las anotaciones con desplazamientos específicos para evitar superposiciones
50     if i == 0:
51         x_offset, y_offset = 0.16, -0.07 # Desplazamiento en x e y
52     elif i == 1:
53         x_offset, y_offset = -0.15, -0.05 # Desplazamiento en x e y
54     else:
55         x_offset, y_offset = 0.25, -0.05 # Desplazamiento hacia abajo
56
57     ax_inset.text(i + x_offset, (y_inset[i] + y_inset_conrv[i]) / 2 + y_offset, f'{diferencia:.2f}',
58                  ha='center', fontweight='bold', color='red')
59
60 # Guardar y mostrar el gráfico
61 plt.tight_layout()
62 plt.savefig('margen_utilidad_ampliacion.png', dpi=300, bbox_inches='tight', pad_inches=0.1)
63 plt.show()

```