



OACI

ORGANIZACIÓN DE AVIACIÓN CIVIL INTERNACIONAL

INFORME DE FACTIBILIDAD DE UN OBJETIVO
AMBICIOSO A LARGO PLAZO (LTAG)
DE REDUCCIÓN DE LAS EMISIONES DE CO₂
DE LA AVIACIÓN CIVIL INTERNACIONAL



COMITÉ SOBRE LA PROTECCIÓN DEL MEDIOAMBIENTE Y LA AVIACIÓN (CAEP) DE LA OACI
MARZO/2022

**INFORME DE FACTIBILIDAD DE UN OBJETIVO AMBICIOSO
A LARGO PLAZO (LTAG) DE REDUCCIÓN DE LAS
EMISIONES DE CO₂ DE LA AVIACIÓN CIVIL
INTERNACIONAL**

**COMITÉ SOBRE LA PROTECCIÓN DEL MEDIOAMBIENTE
Y LA AVIACIÓN (CAEP) DE LA OACI**

Marzo de 2022

ÍNDICE

	Página
Resumen	iii
1. Antecedentes	1
2. Resumen de resultados y algunas observaciones generales	2
3. Metodología.....	3
4. Resumen de los resultados.....	4
5. Consideraciones sobre las opciones	11
6. Otras consideraciones.....	12
7. Apéndices del informe final	14
 Apéndice R1: Hojas resumen	R1-1
Apéndice R2: Comparación con el análisis de tendencias	R1-2
Apéndice R3: Resultados en contexto	R3-1
 Apéndices metodológicos	
Apéndice M1: Reseña de los criterios de modelización usados para elaborar los resultados	M1-1
Apéndice M2: Pronóstico	M2-1
Apéndice M3: Tecnologías	M3-1
Apéndice M4: Operaciones	M4-1
Apéndice M5: Combustibles	M5-1
 Apéndice S1: Contexto del conocimiento científico sobre el clima	S1-1
Apéndice B1: Antecedentes	B1-1

RESUMEN

Durante el 40º período de sesiones de la Asamblea de la OACI, los Estados miembros pidieron al Consejo que siguiese analizando la factibilidad de un objetivo ambicioso mundial a largo plazo (LTAG) para la aviación civil internacional con estudios detallados para evaluar las posibilidades de alcanzar los objetivos que pudieran proponerse y sus repercusiones, incluyendo su incidencia en el crecimiento y en los costos en todos los países, en particular en los países en desarrollo, a fin de someter la información sobre el avance de la tarea a la consideración del 41º período de sesiones de la Asamblea.

El Grupo Especial para la Ambición a Largo Plazo (LTAG-TG) trabajó en coordinación con otros grupos de trabajo del CAEP –entre ellos, el Grupo de Apoyo sobre Pronósticos y Análisis Económico (FESG) y el Grupo sobre Elaboración de Modelos y Bases de Datos (MDG)– en la obtención de datos de fuentes internas y externas y la elaboración de tres hipótesis sectoriales integradas, cada una de ellas basada a su vez en un subconjunto de hipótesis de tecnologías, combustibles y operaciones, que representan una gama de niveles de madurez y factibilidad. Las hipótesis se analizaron para comprender los impactos en las emisiones de CO₂, los costos y las inversiones, y las posibles implicaciones para el crecimiento de la aviación, el ruido y la calidad del aire. Además, el LTAG-TG documentó los datos subyacentes a fin de analizar el impacto en todos los países, particularmente los países en desarrollo. Para finalizar, las hipótesis se contrastaron en el contexto del conocimiento científico generalmente aceptado actualmente.

Observaciones generales:

Si bien las hipótesis integradas muestran que existe potencial para reducir sustancialmente las emisiones de CO₂, ninguna de ellas alcanza las cero emisiones de CO₂ con medidas sectoriales (tecnologías, operaciones y combustibles). Esto es resultado de considerar las emisiones del ciclo de vida de los combustibles, y se produce pese a la sustitución total del combustible para reactores convencional por combustibles nuevos, por ej., combustible de aviación sostenible (SAF) a partir de biomasa, desechos o CO₂ atmosférico, o hidrógeno. Conviene destacar que, a medida que otros sectores económicos reduzcan sus emisiones, también deberían reducirse las emisiones del ciclo de vida. Dado que el alcance de la tarea encomendada al LTAG-TG se limita a considerar medidas sectoriales únicamente, en el análisis no se consideraron medidas extrasectoriales.

La tasa general de crecimiento del tráfico tiene un importante impacto en las emisiones residuales de CO₂ de aquí a 2050 y posteriormente.

Los combustibles de sustitución directa son los que más inciden en las emisiones residuales de CO₂, impulsando las reducciones globales de aquí a 2050. En cierta medida, esto es independiente de las hipótesis de tecnologías y operaciones. No se espera que el hidrógeno tenga una contribución significativa de aquí a 2050 (tan solo el 1,9 % del total de energía en 2050), pero su participación puede aumentar en las décadas de 2050 y 2060 si resulta técnicamente factible y comercialmente viable.

Las aeronaves de tubo y ala de configuración avanzada tienen un claro potencial para mejorar la eficiencia (energética) de los combustibles del sistema de aviación internacional, con alguna contribución incremental de las aeronaves de configuración no convencional. Las aeronaves propulsadas con hidrógeno tendrían una eficiencia energética menor frente a las aeronaves que funcionan con combustibles líquidos, observándose que las reducciones provendrían de la reducción de emisiones del ciclo de vida del hidrógeno.

El análisis revela que hay posibilidades de que las operaciones reduzcan las emisiones de CO₂ con mejoras del rendimiento de los vuelos en todas las fases, incluyendo medidas no convencionales como el vuelo en formación.

Las inversiones y costos asociados a las hipótesis corresponden principalmente a los combustibles (p. ej., SAF), reconociéndose que los mayores costos de los combustibles (el precio mínimo de venta de los SAF en comparación con el de los combustibles de reactor convencionales) incentivan seguir buscando más eficiencias (energéticas) a través de las tecnologías y las operaciones. Para esto se necesitarán también algunas inversiones de los gobiernos y la industria.

Las decisiones de tecnología y diseño de aeronaves se seguirán tomando para satisfacer las necesidades del mercado mundial y no variarán de una región a otra. Los explotadores de aeronaves de las distintas regiones o Estados elegirán entre las aeronaves disponibles aquellas que mejor respondan a sus necesidades. Se esperan igualmente diferencias regionales en la implementación de medidas operacionales. Las diferencias regionales más marcadas se prevén en la producción y puesta en uso de los combustibles. Esto se debe a una serie de factores, como la disponibilidad regional de desechos y biomasa para usar como materia prima, de CO₂ e hidrógeno criogénico, de energía renovable, la dinámica de los mercados y la infraestructura.

Si bien el LTAG-TG elaboró un número limitado de hipótesis para cristalizar las crecientes ambiciones en los ámbitos de la tecnología, las operaciones y los combustibles, existen múltiples vías que pueden llevar a lograr niveles similares de emisiones de CO₂. Los análisis del LTAG-TG muestran que las hipótesis y análisis de LTAG son sólidos, y se hace notar que, si bien es posible llegar a niveles similares de emisiones de CO₂ por diferentes vías, cada una tiene distintas implicaciones en términos de costos (inversiones), impactos regionales, etc.

Este informe es el resultado de casi dos años de trabajo intensivo del CAEP. Las secciones a continuación presentan los antecedentes, las metodologías, los resultados y las interpretaciones del estudio del LTAG-TG. El informe se acompaña de apéndices que proporcionan criterios de modelización, métodos, modelos y supuestos y presentan los resultados en aras de la transparencia y la exhaustividad.

1. ANTECEDENTES

1.1 Durante el 40º período de sesiones de la Asamblea de la OACI (24 de septiembre a 4 de octubre de 2019), los Estados miembros pidieron al Consejo que siguiese analizando la factibilidad de un objetivo ambicioso mundial a largo plazo (LTAG) para la aviación civil internacional, realizando estudios detallados para evaluar la posibilidad de alcanzar las metas que pudieran proponerse y sus repercusiones, incluida su incidencia en el crecimiento y en los costos en todos los países, en particular en los países en desarrollo, a fin de someter la información sobre el avance de la tarea a la consideración del 41º período de sesiones de la Asamblea (véase la Resolución A40-18 de la OACI, cláusula dispositiva 9).

1.2 En la sesión del 219º período de sesiones celebrada el 13 de marzo de 2020, el Consejo dio su acuerdo a la organización del trabajo para evaluar la factibilidad de un LTAG, como se refleja en las atribuciones del Grupo Especial para la Ambición a Largo Plazo (LTAG-TG) del CAEP.

1.3 Obtenido el visto bueno del Consejo, el LTAG-TG del CAEP procedió a realizar las siguientes tareas: 1) recopilación de datos de fuentes internas y externas de manera transparente e inclusiva, 2) elaboración de hipótesis sectoriales con distintas combinaciones de tecnologías, combustibles y operaciones que representan una gama de niveles de madurez y factibilidad sobre la base de los datos recopilados, y 3) análisis final de las hipótesis para entender sus repercusiones en las emisiones de CO₂, y los costos y los efectos económicos en el crecimiento de la aviación, el ruido y la calidad del aire en todos los países, y especialmente los países en desarrollo. Por último, las hipótesis se colocaron en el contexto del conocimiento científico generalmente aceptado actualmente.

1.4 La labor del LTAG-TG estuvo a cargo de subgrupos especializados en tecnología de aeronaves (TECH-SG), mejoras de los procedimientos operacionales (OPS-SG) y producción de combustibles (FUEL-SG), así como un subgrupo de elaboración de hipótesis (SD-SG) que coordinó la labor de todos los demás subgrupos y grupos no pertenecientes al LTAG-TG, tales como el MDG y el FESG. Se formó también un Grupo ad hoc de Estimación de Costos (CEahg) dependiente del SD-SG para examinar específicamente los aspectos de costos/inversiones del análisis. Este informe final consolida la suma de los esfuerzos de más de 280 especialistas en más de 200 comunicaciones, y brinda una evaluación técnica de la factibilidad de un LTAG que incluye una propuesta de recomendación del CAEP al Consejo con opciones y hojas de ruta para su realización.

2. RESUMEN DE RESULTADOS Y ALGUNAS OBSERVACIONES GENERALES

2.1 De los análisis complejos y exhaustivos del CAEP surgen algunas observaciones generales:

- a) Si bien las hipótesis integradas muestran que existe potencial para una reducción sustancial de emisiones de CO₂, ninguna de ellas alcanza a lograr las cero emisiones de CO₂ con medidas sectoriales (tecnologías, operaciones y combustibles). Esto es resultado de considerar las emisiones del ciclo de vida de los combustibles, y se produce pese a la sustitución total del combustible para reactores convencional por combustibles nuevos, por ej., combustible de aviación sostenible (SAF) producido a partir de biomasa, desechos o CO₂ atmosférico, o hidrógeno. Conviene destacar que, a medida que otros sectores económicos reducen sus emisiones, también deberían reducirse las emisiones del ciclo de vida. Dado que el alcance de la tarea encomendada al LTAG-TG se limita a considerar medidas sectoriales únicamente, en el análisis no se consideraron medidas extrasectoriales.
- b) La tasa general de crecimiento del tráfico tiene un importante impacto en las emisiones residuales de CO₂ de aquí a 2050 y posteriormente.
- c) Los combustibles de sustitución directa son los que más inciden en las emisiones residuales de CO₂, impulsando las reducciones globales de aquí a 2050. En cierta medida, esto es independiente de las hipótesis de tecnologías y operaciones. No se espera que el hidrógeno usado como combustible tenga una contribución significativa de aquí a 2050 (tan solo el 1,9 % del total de energía en 2050), pero su participación puede aumentar en las décadas de 2050 y 2060 si resulta técnicamente factible y comercialmente viable.
- d) Las aeronaves de tubo y ala de configuración avanzada tienen un claro potencial para mejorar la eficiencia (energética) de los combustibles del sistema de aviación internacional, al igual que las aeronaves de configuración no convencional, que contribuirán gradualmente a aumentar la eficiencia. La diferenciación tecnológica seguirá creciendo después de 2050 cuando estos tipos de aeronaves entren en la flota. No obstante, se requiere prudencia al interpretar los niveles de emisiones absolutas de CO₂ a causa de los supuestos de modelización, p. ej., siguen entrando aeronaves en la flota, pero su tecnología se congela al nivel de 2050 (no se presuponen nuevas mejoras tecnológicas después de 2050), lo que arroja emisiones de CO₂ después de 2050 mayores de las que cabría esperar en otras circunstancias. Las aeronaves propulsadas con hidrógeno tendrían una eficiencia energética menor en vuelo con respecto a las aeronaves que funcionan con combustibles de sustitución directa, y aquí se hace notar que la reducción de emisiones de CO₂ depende del ciclo de vida del hidrógeno que se use, y que la producción de combustibles de sustitución directa puede tener una menor eficiencia energética que la producción de hidrógeno líquido en términos de ciclo de vida.
- e) El análisis revela que hay posibilidades de que las mejoras operacionales reduzcan las emisiones de CO₂ al elevar el rendimiento de los vuelos en todas las fases, incluyendo medidas no convencionales como el vuelo en formación.
- f) Las inversiones y costos asociados a las hipótesis corresponden principalmente a los combustibles (p. ej., SAF), reconociéndose que los mayores costos de los combustibles (el precio mínimo de venta de los SAF en comparación con el de los combustibles de reactor convencionales) incentivan seguir buscando más eficiencias (energéticas) a través de las tecnologías y las operaciones. Para esto se necesitarán también algunas inversiones de los gobiernos y la industria.
- g) Si bien el LTAG-TG elaboró un número limitado de hipótesis para cristalizar las crecientes ambiciones en los ámbitos de la tecnología, las operaciones y los combustibles, existen múltiples vías que pueden llevar a lograr niveles similares de emisiones de CO₂. Los análisis del LTAG-TG muestran que las hipótesis y análisis de LTAG son sólidos.

3. METODOLOGÍA

3.1 **Hipótesis integradas:** Se elaboraron tres hipótesis integradas de LTAG para abarcar una gama de “madurez, factibilidad y ambición”.

3.1.1 **Hipótesis integrada 1 (IS1),** que refleja un “alto nivel de madurez/factibilidad y poca ambición”. Esta hipótesis de mínima o nominal representa la expectativa actual (circa 2021) de las tecnologías, eficiencias operacionales, y combustibles que existirán en el futuro. Incluye las políticas habilitantes previstas para posibilitar las mejoras tecnológicas, operacionales y de combustibles con poco cambio sistémico; por ejemplo, sin cambios sustanciales de infraestructura. De las tres hipótesis, es la que demanda el menor esfuerzo para su concreción, aunque puede entrañar esfuerzos individuales considerables.

3.1.2 **Hipótesis integrada 2 (IS2),** que refleja un “nivel medio de madurez/factibilidad y ambición intermedia”. Esta hipótesis un poco más ambiciosa representa un punto aproximadamente intermedio entre las otras dos – un despliegue más veloz de tecnologías futuras, más eficiencias operacionales y más disponibilidad de combustibles. Presupone una existencia de más políticas habilitantes para posibilitar las mejoras tecnológicas, operacionales y de combustibles con algún cambio sistémico; por ejemplo, cambios limitados de infraestructura. De las tres hipótesis, esta exige un esfuerzo mediano para su concreción.

3.1.3 **Hipótesis integrada 3 (IS3),** que refleja un “nivel bajo de madurez/factibilidad y una gran ambición”. Esta hipótesis decidida y altamente ambiciosa representa el máximo esfuerzo posible en términos de despliegue de tecnología en el futuro, eficiencias operacionales y disponibilidad de combustibles. Presupone la existencia de las políticas habilitantes más categóricas para posibilitar las mejoras tecnológicas, operacionales y de combustibles, con un alto grado de cambio sistémico intencionalmente alineado; por ejemplo, cambios amplios y apreciables en infraestructura de energía y de aeropuertos. De las tres hipótesis, es la que exige el mayor esfuerzo para su concreción.

3.1.4 Todas las hipótesis se contextualizan contra una hipótesis integrada 0 (IS0) que representa la reducción de las emisiones mediante evolución de la flota con tecnología de aeronaves congelada al nivel de 2018 y sin mejoras adicionales provenientes de las operaciones o los combustibles. La hipótesis IS0, que es idéntica a la base de referencia del análisis de tendencias de CAEP/12, comprende los beneficios de la renovación de la flota, con importantes inversiones de las líneas aéreas destinadas a adquirir nuevas aeronaves (aun cuando la tecnología se congela en 2018). El CAEP no ha modelizado una hipótesis de “eficiencia energética congelada en 2018” ni en su análisis de tendencias ni en el análisis del LTAG-TG. Tal hipótesis adicional exhibiría tendencias de consumo de combustible y emisiones de CO₂ por encima de la hipótesis IS0 (base de referencia) y reflejaría el aporte incremental proveniente de la renovación de la flota comercial. Esto no habría modificado en forma alguna los resultados del estudio del LTAG-TG.

3.2 **Marco de modelización:** Dado que la tarea del LTAG-TG es evaluar la factibilidad de posibles hipótesis futuras, el grupo se ha valido de las herramientas y metodologías del Grupo de Apoyo sobre Pronosticación y Análisis Económico (FESG) y el Grupo de Elaboración de Modelos y Bases de Datos (MDG) usadas para los análisis de tendencias de CAEP, y también ha aprovechado los análisis de tendencias del ciclo CAEP/12 más recientes. Para el análisis del LTAG se tomó 2018 como año base, extendiendo el horizonte hasta 2070 a fin de poder observar el impacto de las nuevas tecnologías que se incorporan a la flota en 2050. Los pronósticos fueron elaborados por el FESG y representan las expectativas de tráfico internacional bajo, medio y alto pos-COVID en consonancia con el análisis de tendencias CAEP.

3.3 **Estimación de costos (inversión):** Los costos y las inversiones (p.ej., costos no recurrentes, costo de los combustibles, inversiones en bienes de uso) correspondientes a las hipótesis de LTAG se valoraron cuantitativamente para calcular la distribución total y temporal de los costos y las inversiones entre los diferentes grupos de partes interesadas. Los costos/inversiones e impactos económicos que no se han podido cuantificar se describen en términos cualitativos.

4. RESUMEN DE RESULTADOS

4.1 Introducción

4.1.1 El presente resumen de resultados se ha estructurado de forma de responder las siguientes preguntas:

- ¿Cómo pueden contribuir las medidas sectoriales (tecnología, operaciones y combustibles) a reducir las emisiones de CO₂ de la aviación internacional de aquí a 2050 y en adelante? (Sección 4.2);
- Dadas las tendencias de emisiones de CO₂ para cada hipótesis, ¿a cuánto ascenderían las emisiones acumulativas de la aviación internacional? ¿Dónde se ubican estas emisiones acumulativas de la aviación frente al requisito de limitar el aumento de la temperatura mundial a 1,5°C y 2°C? (Sección 4.3);
- ¿Qué inversiones se necesitan para posibilitar la aplicación de las medidas sectoriales contempladas en cada hipótesis? ¿Qué costos tendrían para las partes interesadas de la aviación? (Sección 4.4);
- ¿Qué repercusiones tendrían los diversos niveles de tráfico de aviación futuros? (Sección 4.5); y
- ¿En qué medida los presupuestos de cada hipótesis condicionan o inciden en sus resultados? (Sección 4.6).

4.2 Tendencias de emisiones de CO₂ de la aviación internacional

4.2.1 Con el marco de modelización que se describe en la sección 3.2, el CAEP evaluó las emisiones de CO₂ de la aviación internacional para cada hipótesis: IS1, IS2 e IS3. Salvo indicación en otro sentido, los resultados corresponden al pronóstico de tráfico medio.

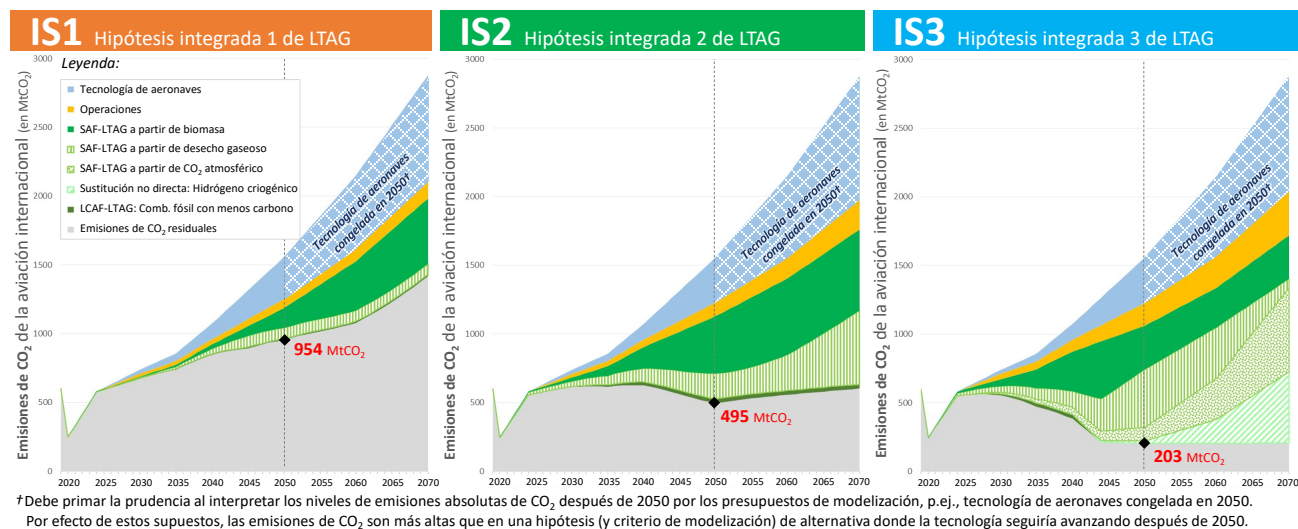


Figura 1. Emisiones de CO₂ de la aviación internacional correspondientes a las hipótesis integradas de LTAG

4.2.2 En la hipótesis IS1, las emisiones de CO₂ después de las reducciones logradas con tecnología de aeronaves, operaciones y combustibles podrían ubicarse en aproximadamente 950 MtCO₂ en 2050 (1,6x el nivel de emisiones de CO₂ de 2019) y 1420 MtCO₂ en 2070 (2,3x). En esta hipótesis de mínima/nominal, para 2050 las emisiones se reducirían un 39 % respecto de la hipótesis de referencia (IS0),

con un 20 % proveniente de tecnologías de aeronaves, 4 % de las operaciones y 15 % de los combustibles. Para 2070, las tecnologías de aeronave, las operaciones y los combustibles podrían aportar reducciones en las emisiones de 26 %, 5 % y 20 %, respectivamente. Las emisiones residuales de CO₂ en esta hipótesis no se estabilizarían, sino que seguirían creciendo por encima de los niveles de emisiones de 2019 (que se toma como sustituto del nivel prepandémico de 2020). De aquí a 2050, la eficiencia energética mundial expresada en combustible/tonelada-kilómetro de pago (RTK) mejoraría a razón de 1,20-1,31 % por año (frente al objetivo ambicioso mundial fijado por la OACI del 2 %).

4.2.3 En la hipótesis IS2, las emisiones de CO₂ alcanzarían ≈500 MtCO₂ en 2050 (0,8x el nivel de emisiones de CO₂ de 2019) y se estabilizarían en un punto cercano al nivel de emisiones de 2019. En 2050, las emisiones se reducirían un 68 % respecto de la hipótesis de referencia (IS0), con un 21 % proveniente de tecnologías de aeronaves, 6 % de las operaciones y 41 % de los combustibles. De aquí a 2050, la eficiencia energética mundial expresada en combustible/tonelada-kilómetro de pago (RTK) mejoraría a razón de 1,35-1,47 % por año (frente al objetivo ambicioso mundial fijado por la OACI del 2 %).

4.2.4 Pasando a la hipótesis IS3, las emisiones de CO₂ alcanzarían ≈200 MtCO₂ en 2050 (un tercio del nivel de emisiones de CO₂ de 2019) y 210 MtCO₂ en 2070. En 2050, las emisiones se reducirían un 87 % respecto de la hipótesis de referencia (IS0), con un 21 % proveniente de tecnologías de aeronaves, 11 % de las operaciones y 55 % de los combustibles. Hasta 2035, la eficiencia energética mundial expresada en combustible/RTK mejoraría a razón de 1,42-1,60 % por año. Con esta hipótesis, que contempla el uso de combustibles que no son de sustitución directa (como el hidrógeno), el objetivo ambicioso de eficiencia energética mundial del 2 % de la OACI se vuelve obsoleto (en términos de volumen de combustible de reactor/RTK) y habría que ajustarlo. De aquí a 2050, la eficiencia energética mundial expresada en MJ/RTK mejoraría a razón de 1,55-1,67 % por año.

4.3 Las emisiones futuras de la aviación internacional en contexto

4.3.1 Partiendo de las tendencias de emisiones de CO₂ que se describen en 4.2, el CAEP calculó las emisiones de CO₂ acumulativas de la aviación internacional hasta 2050 y 2070 (véase la figura 2). Con la hipótesis IS1 se calculan 23 GtCO₂ de emisiones residuales acumulativas de la aviación internacional de 2020 a 2050 y 23 GtCO₂ de 2051 a 2070. Pasando a la hipótesis IS2, se obtienen 17 GtCO₂ de emisiones residuales acumulativas de la aviación internacional de 2020 a 2050 y 11 GtCO₂ de 2051 a 2070. En la hipótesis IS3, el cálculo arroja 12 GtCO₂ de la aviación internacional de 2020 a 2050 y 4 GtCO₂ de 2051 a 2070.

4.3.2 A continuación, el CAEP contextualizó estos resultados comparándolos con los volúmenes mundiales de emisiones de carbono que sería preciso mantener para limitar el calentamiento mundial a 1,5°C y 2°C, usando datos del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC). Los análisis del IPCC y del CAEP aplican metodologías diferentes y contienen sus propias incertidumbres, como se describe en el apéndice R3, pero eso no le quita valor a la comparación.

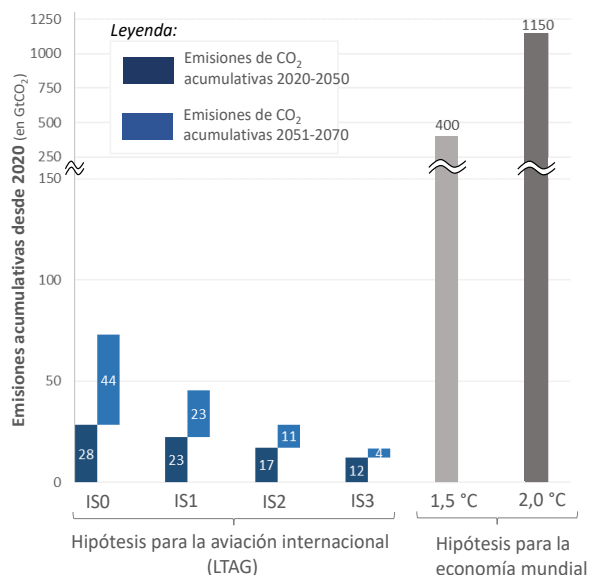


Figura 2. Emisiones acumulativas de CO₂ de la aviación internacional y el límite de 1,5°C y 2°C

4.3.3 En contexto, se estima que para poder limitar el calentamiento planetario a 1,5°C las emisiones residuales acumulativas antropogénicas mundiales de CO₂ desde el inicio de 2020 no deben exceder las 400 GtCO₂ con una probabilidad del 67 %. Según la hipótesis que se maneje, la aviación internacional podría representar aproximadamente el 4,1-11,3 % de ese total. Para limitar el calentamiento a 2°C, se estima que las emisiones de carbono permisibles restantes son 1150 GtCO₂ con una probabilidad del 67 %. Según la hipótesis que se maneje, la aviación internacional podría representar aproximadamente el 1,4-3,9 % de ese total. En el adjunto A del apéndice R3 se presentan comparaciones basadas en un 50 % de probabilidades de cumplir las metas de temperatura.

4.4 Costos e inversiones de las hipótesis integradas

4.4.1 El CAEP ha evaluado los costos e inversiones de las hipótesis de LTAG (véase el resumen en la figura 3 y los detalles y distribuciones temporales, etc. en los apéndices). Es importante tener presente que no es correcto tomar los costos y las inversiones de una hipótesis y sumarlos para calcular el costo acumulativo total. Algunas inversiones que realizan entidades primarias (extracción y producción, o “upstream”) se trasladan a las entidades secundarias (explotación, o “downstream”) en forma de incrementos en el precio de los productos (p.ej., las inversiones de los proveedores de combustibles se trasladan a los explotadores como parte del precio de venta mínimo). Siguiendo este criterio, los costos y las inversiones se presentan para toda una cadena de partes interesadas.

4.4.2 ***Inversiones de los Estados (gobiernos):*** Para facilitar el desarrollo de tecnología de aeronaves, puede ser necesario que los Estados inviertan en investigación y desarrollo. En la hipótesis IS1, las inversiones podrían ir de \$15 000 millones a \$180 000 millones hasta 2050. A fin de posibilitar configuraciones de aeronave y/o sistemas energéticos de avanzada (aeronaves propulsadas por hidrógeno) en las hipótesis IS2 e IS3, esos valores podrían llegar a \$75 000 millones – \$870 000 millones.

4.4.3 ***Inversiones de los fabricantes de aeronaves:*** Para materializar las mejoras tecnológicas contempladas en la hipótesis IS1, los fabricantes de aeronaves tendrían que hacer inversiones del orden de los \$180 000 millones (entre \$150 000 millones y \$380 000 millones) entre 2020 y 2050. Esto representa una inversión de ≈ \$6 000 millones por año. Desarrollar aeronaves con configuraciones no convencionales (hipótesis IS2) y aeronaves propulsadas por hidrógeno (hipótesis IS3) demandaría inversiones sustancialmente más grandes, del orden de los \$350 000 millones (\$260 000 millones – \$1 billón) entre 2020 y 2050.

4.4.4 ***Inversiones de los proveedores de combustibles:*** Para empezar a incrementar la capacidad de producción de combustibles en la hipótesis IS1, los proveedores tendrían que hacer inversiones por ≈ 1,3 billones hasta 2050, que comprenderían \$480 000 millones destinados a combustibles de aviación sostenibles extraídos de biomasa para 2050 (a fin de cubrir el 19 % de la demanda de energía de la aviación internacional en 2050), \$710 000 millones destinados a SAF extraídos de desechos gaseosos (8 %) y \$50 000 millones para combustibles de aviación con menos contenido de carbono (LCAF-LTAG) (7 %). Para aumentar la producción de combustibles en la hipótesis IS2 se requerirían inversiones por \$2,3 billones hasta 2050. Por último, las inversiones en la hipótesis IS3 serían de ≈ 3,2 billones, que comprenderían \$950 000 millones para SAF extraídos de biomasa para 2050 (para cubrir el 42 % de la demanda de energía de la aviación internacional en 2050), \$1,7 billones para SAF extraídos de desechos gaseosos (46 %), \$460 000 millones para SAF extraídos de CO₂ atmosférico (10 %), \$60 000 millones para LCAF-LTAG (0 %) y \$55 000 millones para hidrógeno (2 %). Estas inversiones en bienes de uso corresponden a la construcción de nuevas plantas de producción de combustibles y no se han aplicado reducciones por las inversiones que se efectuarían en el sector de los combustibles convencionales, que serían necesarias en la hipótesis de referencia (IS0). Adicionalmente, las inversiones consideradas en los análisis del CAEP promoverían el desarrollo económico local (p.ej., una refinería que utilice materias primas renovables o desechos para producir SAF impulsaría el desarrollo económico y las oportunidades en comunidades rurales).

4.4.5 **Costos e inversiones para los aeropuertos:** Para llevar a la práctica las medidas operacionales, los aeropuertos tendrían que desembolsar entre \$2 000 millones y \$6 000 millones en concepto de gastos o inversiones en todas las hipótesis de LTAG. Además, en la hipótesis IS3, que contempla el ingreso de aeronaves propulsadas por hidrógeno después de 2035, los aeropuertos podrían tener que hacer inversiones en infraestructura de $\approx$ \$100 000 millones – \$150 000 millones para 2050.

4.4.6 **Costos e inversiones para los proveedores de servicios de navegación aérea (ANSP):** Las medidas operacionales específicas del LTAG entrañarían inversiones y costos para los ANSP entre \$11 000 millones y \$20 000 millones para 2050.

4.4.7 **Costos e inversiones para los explotadores (líneas aéreas):** El ingreso a la flota de aeronaves con mejoras tecnológicas reduciría el consumo de combustible y los costos de explotación vinculados al combustible para las líneas aéreas por un valor de $\approx$ \$710 000 millones – \$740 000 millones hasta 2050. Es posible que las líneas aéreas deban hacer inversiones adicionales para absorber los mayores precios de las aeronaves (después de las mejoras tecnológicas) que tendrían el efecto de reducir las economías netas aportadas por esas mejoras tecnológicas. La aplicación de medidas operacionales podría reducir los costos de combustible de los explotadores en $\approx$ \$210 000 millones – \$490 000 millones hasta 2050, pero demandaría costos e inversiones adicionales por \$40 000 millones – \$155 000 millones. El mayor impacto para los explotadores serían los costos incrementales de los combustibles (precio de venta mínimo) respecto de los combustibles de reactor convencionales en la hipótesis de referencia. En la hipótesis IS1, la compra de combustibles entrañaría costos incrementales para los explotadores en comparación con los combustibles de reactor convencionales del orden de los \$1,1 billones (\$300 000 millones por SAF producidos con biomasa, \$770 000 millones por SAF producidos con desechos y \$50 000 millones por LCAF). Estos costos incrementales serían mayores en la hipótesis IS2, ubicándose en $\approx$ \$2,7 billones. Por último en la hipótesis IS3, que contempla la sustitución total de los combustibles convencionales por SAF a partir de 2040, los costos para las líneas aéreas alcanzarían los \$4 billones hasta 2050 (\$1,6 billones en SAF producidos con biomasa, \$1,8 billones en SAF producidos con desechos, \$600 000 millones en SAF producidos con CO₂ atmosférico, \$60 000 millones en LCAF y \$10 000 millones en hidrógeno).

IS1

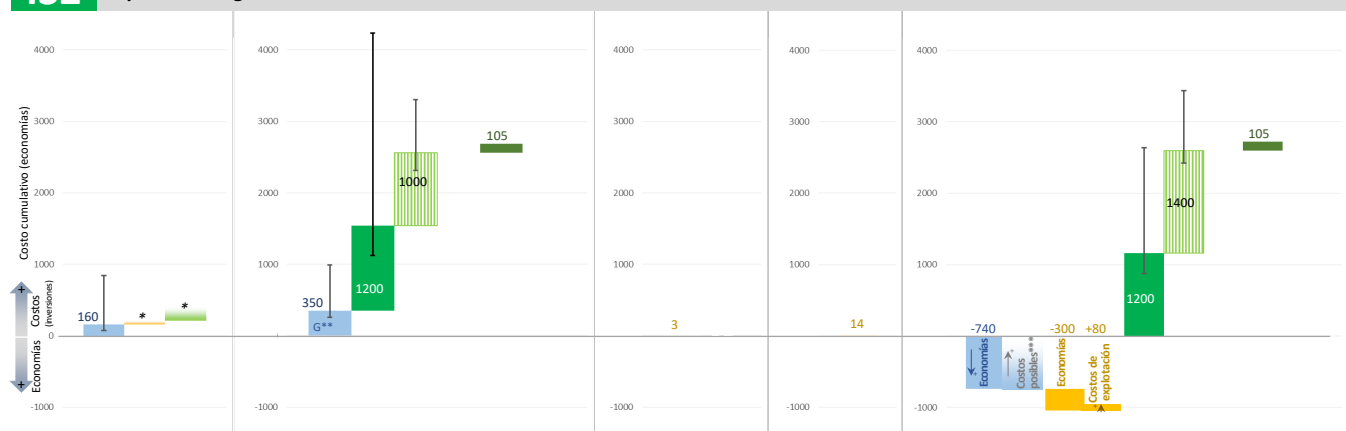
Hipótesis integrada 1 de LTAG

Advertencias: No es correcto sumar los costos y las inversiones de una hipótesis para calcular el costo acumulativo total. Los costos y las inversiones se presentan para toda una cadena de partes interesadas. Algunas inversiones de entidades primarias ("upstream") se trasladan a las secundarias ("downstream") en forma de mayores precios de los productos (p.ej., las inversiones de los proveedores de combustibles se trasladan a los explotadores como parte del precio de venta mínimo).



IS2

Hipótesis integrada 2 de LTAG



IS3

Hipótesis integrada 3 de LTAG

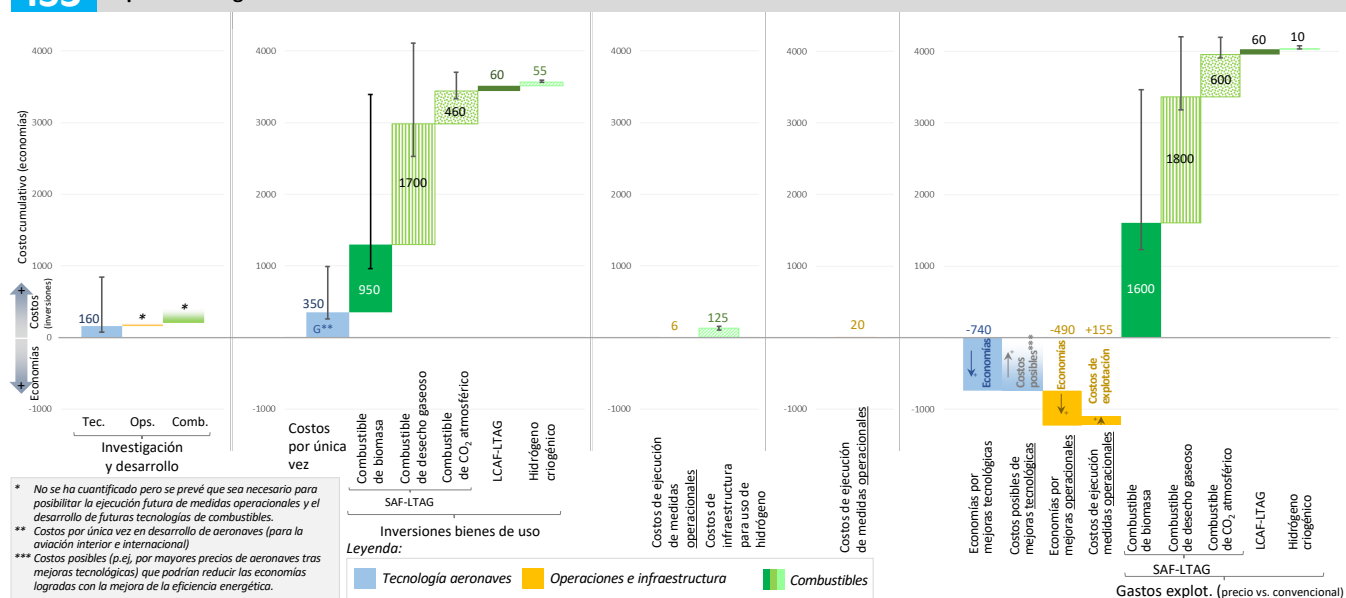
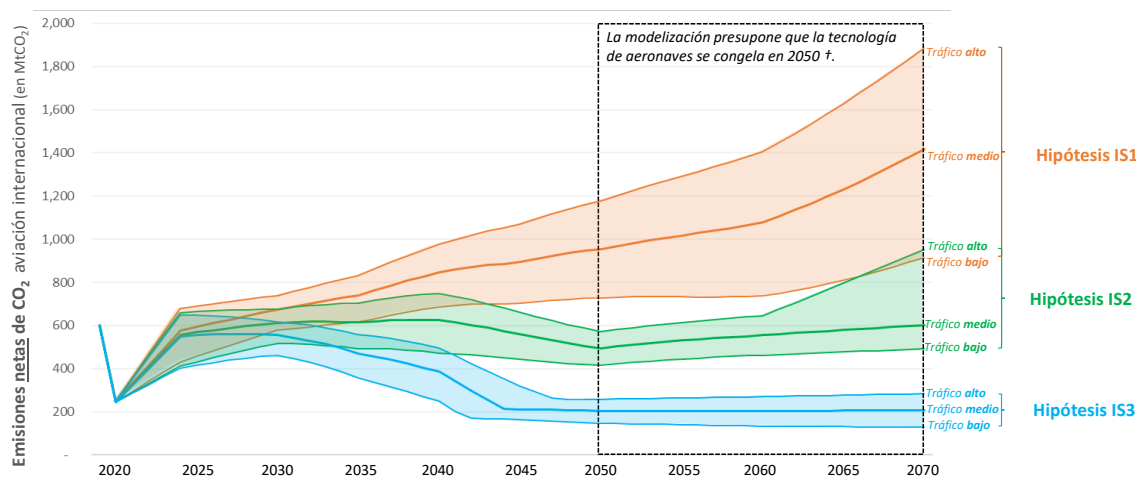


Figura 3. Inversiones y costos integrados de las hipótesis integradas de LTAG

4.5 Efecto del pronóstico de tráfico de la aviación

4.5.1 Las hipótesis descritas más arriba toman como base un pronóstico de tráfico mediano. El CAEP ha evaluado igualmente los posibles efectos de los pronósticos de tráfico más alto y más bajo. La figura 4 grafica las emisiones residuales de CO₂ de la aviación internacional (después de las mejoras tecnológicas y operacionales y de las reducciones de emisiones por efecto de los SAF-LTAG y LCAF-LTAG y, en su caso, de los combustibles de sustitución no directa, es decir, hidrógeno) en todas las hipótesis de LTAG y con diferentes pronósticos de tráfico.

4.5.2 En la hipótesis IS1, las emisiones de CO₂ en 2050 se ubicarían entre 730 y 1160 MtCO₂, o +/- 23 % de la hipótesis de tráfico mediano, y entre 920 y 1880 MtCO₂ (+/- 35 % de la hipótesis de tráfico mediano) en 2070. En la hipótesis IS2, las emisiones de CO₂ en 2050 se ubicarían entre 420 y 590 MtCO₂, (+/- 16 % de la hipótesis de tráfico mediano), y entre 490 y 950 MtCO₂ (+58 % y -18 % de la hipótesis de tráfico mediano) en 2070. Por último, en la hipótesis IS3 los pronósticos de tráfico pueden incidir en los niveles de emisiones residuales de CO₂ en 2050, que se ubicarían entre 150 y 260 MtCO₂, (+/- 27 % de la hipótesis de tráfico mediano), y entre 130 y 280 MtCO₂ (+/- 38 % de la hipótesis de tráfico mediano) en 2070.



† Debe primar la prudencia al interpretar los niveles de emisiones absolutas de CO₂ después de 2050 debido a los presupuestos de modelización, p.ej., tecnología de aeronaves congelada a partir de 2050. Por efecto de estos supuestos, las emisiones de CO₂ son más altas que en una hipótesis (y criterio de modelización) de alternativa en la que la tecnología de aeronaves seguiría avanzando después de 2050.

Figura 4. Efectos de las hipótesis de tráfico en las emisiones residuales de CO₂ en todas las hipótesis integradas de LTAG

4.6 Análisis de sensibilidad de la hipótesis IS3 para examinar la importancia de los combustibles

4.6.1 Como se describe en la sección 3.1 de “hipótesis integradas” y se ilustra en la sección 4.2 de “tendencias de emisiones de CO₂ de la aviación internacional”, el LTAG-TG elaboró una serie de tres hipótesis integradas que analizan las emisiones residuales de CO₂ después de las mejoras tecnológicas, operacionales y de combustibles. En las deliberaciones sobre la elaboración de las hipótesis integradas, el grupo reconoció que las hipótesis de tecnología, operaciones y combustibles podían combinarse de múltiples maneras para generar “hipótesis integradas alternativas” que, a diferencia de las “hipótesis integradas”, no se han examinado exhaustivamente. Por su parte, los subgrupos encargados de tecnologías, operaciones y combustibles calcularon rangos de estimaciones en torno a las hipótesis con medidas específicas. Por ejemplo, el subgrupo de Tecnologías del LTAG-TG calculó estimaciones de progreso bajo, mediano y alto para las mejoras en tecnología de aeronaves (véanse los detalles en el apéndice M5). El subgrupo de Operaciones del LTAG-TG calculó el mismo rango de estimaciones (bajo, mediano, alto) para las mejoras operacionales. Estas distintas combinaciones de hipótesis con medidas específicas y rangos de estimaciones formaron la base para los análisis de sensibilidad de las hipótesis.

4.6.2 La figura 5 ilustra los análisis de sensibilidad de la hipótesis IS3 en combinación con un nivel bajo de mejoras tecnológicas y operacionales. La gráfica ubicada a la derecha es similar a la figura 1. La gráfica ubicada en el medio ilustra un nivel mediano de mejoras tecnológicas y operacionales, con aeronaves de tubo y ala de configuración avanzada y aeronaves no convencionales que usan combustibles de sustitución directa siguiendo la hipótesis 3 de combustibles, que arroja emisiones por 228 MtCO₂ para 2050. De manera similar, en una hipótesis de mejoras tecnológicas y operacionales menores y ajustando la hipótesis 3 de combustible para mantener la coherencia interna de la hipótesis, las emisiones para 2050 pueden alcanzar 244 MtCO₂. Estos resultados reflejan que hay múltiples vías para llegar a niveles similares de emisiones de CO₂. Además, demuestran la solidez de las hipótesis y análisis de LTAG, así como el aporte vital de los combustibles para poder desvincular el crecimiento del tráfico internacional de sus emisiones de CO₂.

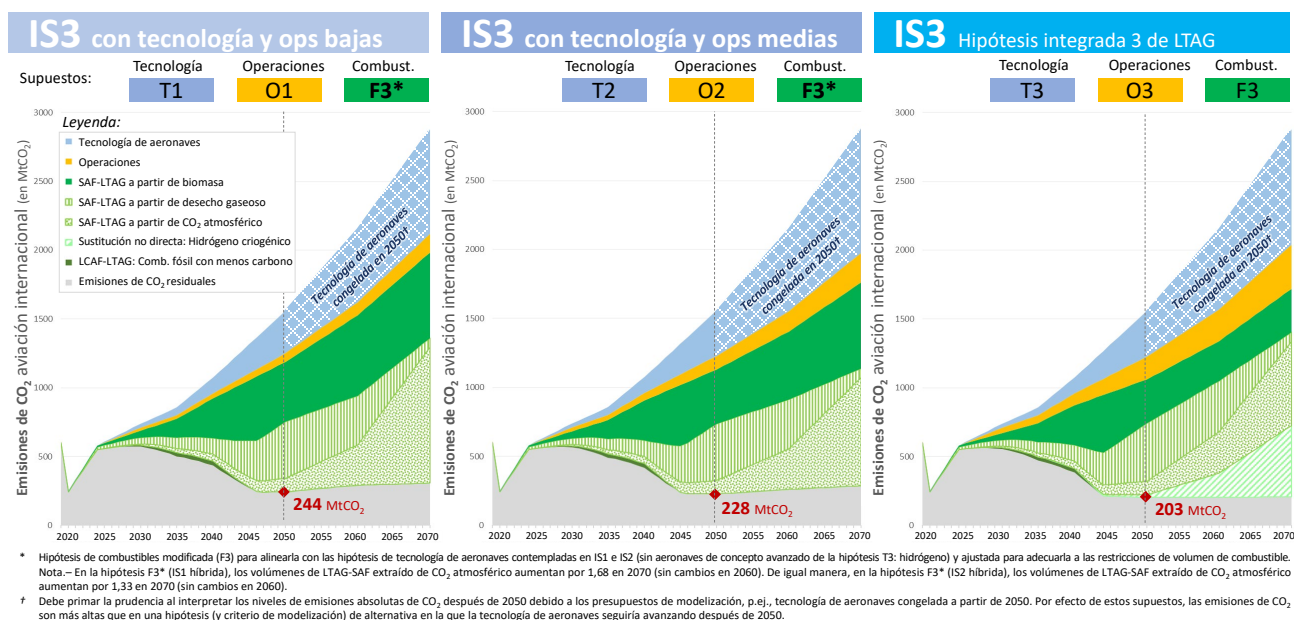


Figura 5. Análisis de sensibilidad de las hipótesis IS3 con bajas mejoras tecnológicas y operacionales

4.6.3 No se presentan análisis de sensibilidad de las tecnologías porque no hay variaciones sustanciales de reducción entre las tres hipótesis de tecnología. Tampoco se presentan análisis de sensibilidad de las mejoras operacionales porque aportan reducciones de emisiones relativamente pequeñas en relación con las contribuciones de las tecnologías y los combustibles.

5. CONSIDERACIONES SOBRE LAS OPCIONES

5.1 A partir de los resultados del estudio de factibilidad del LTAG-TG se definieron opciones de criterios técnicos de medición que podrían ser de utilidad al analizar la factibilidad de un posible objetivo ambicioso a largo plazo. La enumeración que sigue no es exhaustiva, y sin duda podrían considerarse otras formulaciones.

- a) El **nivel anual de emisiones** que podría alcanzarse con las medidas; por ejemplo, 950, 500 o 200 MtCO₂ en 2050 (sobre la base de las hipótesis integradas evaluadas). Tomar un año de referencia anterior a 2050 puede no ofrecer la certeza a largo plazo que se espera como beneficio clave para adoptar un LTAG. Por su parte, fijar un año de referencia posterior a 2070 aumentaría la incertidumbre en razón de las incertidumbres tanto del pronóstico subyacente como de la propagación de las tecnologías avanzadas en toda la flota mundial, y de acuerdo con este análisis, no necesariamente vaya a permitir un objetivo sectorial más ambicioso.
- b) Establecer **puntos de recorrido intermedios** en los años hito podría agregarle una trayectoria al perfil de emisiones a lo largo del tiempo.
- c) El **total acumulativo de emisiones del sector de la aviación internacional durante un determinado período**, por ejemplo, 23, 17 o 12 GtCO₂ de 2020 a 2050 (sobre la base de las hipótesis integradas evaluadas). El total acumulativo de emisiones del sector es el valor que se puede traducir con más precisión en una respuesta de temperatura atmosférica que permitiría monitorizar el progreso sin necesidad de puntos de recorrido intermedios. Fuera de este aspecto, las consideraciones anteriores se aplican también a esta opción.

5.2 Dado que el alcance del LTAG-TG se limita a considerar medidas sectoriales únicamente, en el análisis no se consideraron medidas extrasectoriales.

6. OTRAS CONSIDERACIONES

6.1 **Efectos en el crecimiento de la aviación:** El CAEP consideró los posibles efectos que pueden tener en el crecimiento de la aviación los costos (e inversiones) globales vinculados con las medidas contempladas en las hipótesis de LTAG. Si bien no es fácil valorar cuantitativamente estos efectos en el crecimiento de la aviación proyectándose muy adelante en el futuro, el CAEP observó que algunos de los costos incrementales que puede entrañar un LTAG pueden trasladarse al público usuario. Dada la elasticidad relativamente menor de los precios en la aviación internacional (y las escasas alternativas de transporte para las distancias más largas), es posible que el impacto en el crecimiento de la aviación sea limitado. Se consideró un estudio en el que se detectaron diferencias estadísticamente significativas entre diferentes mercados geográficos de transporte aéreo. Los principales factores señalados que podrían explicar una mayor elasticidad son el bajo nivel de madurez del mercado, la predominancia de rutas de corta distancia, el surgimiento de transportistas de bajo costo y la presencia de líneas aéreas chárter, un creciente poder adquisitivo en la clase media y la desregulación de los precios. Adicionalmente, se espera que la aviación siga aportando beneficios a las economías nacionales, regionales y mundial.

6.2 **Resumen de efectos regionales:** Las decisiones de tecnología y diseño de aeronaves se seguirán tomando para satisfacer las necesidades del mercado mundial y no variarán de una región a otra. Los explotadores de aeronaves de las distintas regiones o Estados elegirán entre las aeronaves disponibles las que mejor respondan a sus necesidades. Se esperan igualmente diferencias regionales en la implementación de medidas operacionales. Las diferencias regionales más marcadas se prevén en la producción y puesta en uso de los combustibles. Esto se debe a una serie de factores, como la disponibilidad regional de desechos y biomasa para usar como materia prima, CO₂ e hidrógeno criogénico, energía renovable, la dinámica de los mercados y la infraestructura.

6.3 **Efectos en el ruido y la calidad del aire:** En las tres hipótesis, el aumento del tráfico provocará un aumento del ruido y las emisiones de NO_x totales. El ruido y la calidad del aire local seguirán teniendo prioridad, sin embargo, en particular en torno a un aeropuerto, cuyo esquema tarifario y reglamentos locales seguirán incidiendo en algunos diseños de aeronave. Los adelantos en tecnología de aeronaves por lo general reducen el ruido y las emisiones junto con las reducciones en el consumo de combustible. Las eficiencias operacionales pueden aportar co-beneficios en cuanto a ruido se refiere, pero no se espera que tengan efecto alguno en la calidad del aire local. Los SAF-LTAG y el hidrógeno criogénico generan emisiones con menos volumen de materia particulada y sin sulfatos, lo que representa un co-beneficio para la calidad del aire y la formación de estela turbulenta, pero no se prevén efectos en el ruido.

6.4 **Comparación con las tendencias de CAEP/12:** Las emisiones de CO₂ en las tres hipótesis del LTAG-TG (IS1, IS2, IS3) se compararon con las calculadas en la hipótesis 4 de combustibles del análisis de tendencias de CAEP/12 hasta 2050. Las hipótesis de referencia (denominada IS0 en el estudio del LTAG-TG) son idénticas entre ambas series de análisis. Las emisiones sectoriales residuales en la hipótesis IS2 del LTAG-TG son muy semejantes a las de la hipótesis 4 de combustibles del análisis de tendencias de CAEP/12. Las hipótesis integradas IS1 e IS3 del LTAG-TG arrojan emisiones de CO₂ respectivamente más altas y más bajas que la hipótesis del análisis de tendencias de CAEP/12 en 2050. En el apéndice R2 se dan detalles al respecto.

6.5 **Hoja de ruta:** Los avances en tecnología de aeronaves, las mejoras operacionales y el desarrollo y puesta en mercado de combustibles exigirán una secuencia de factores habilitantes y condiciones a lo largo del tiempo hasta 2050 y en los años posteriores. Este aspecto se trata en el apéndice R1, con más detalles en el correspondiente apéndice metodológico.

6.6 **Control del avance hacia el objetivo:** Se prevé que exista un proceso de control del avance hacia el objetivo que en definitiva se fije. Sería deseable que no se dupliquen procesos ya existentes y que no se generen expectativas de obtener información proveniente de partes no estatales. Los planes de acción que los Estados presentan voluntariamente en virtud de la cláusula 10 de la Resolución A40-18 pueden ser un mecanismo para que los Estados compartan información sobre los avances hacia el objetivo. Si se fija un objetivo, el CAEP podría colaborar en el futuro en la formulación de recomendaciones sobre criterios de medición, mecanismos de información, etc. aprovechando la experiencia adquirida al elaborar los mecanismos de notificación de emisiones de CO₂ del Anexo 16, Volumen IV.

6.7 **Examen:** Es posible que la OACI deba reexaminar el objetivo que en definitiva se fije para determinar si sigue siendo apropiado a la luz de nueva información sobre los avances hacia la concreción del objetivo, los adelantos tecnológicos, los avances en otros sectores, los costos y otras repercusiones en los Estados y en la industria de la aviación, y los avances científicos. Si se prevé un examen trienal, se podría buscar de alinearlos con los calendarios de reuniones del CAEP y la Asamblea para analizar los avances y recomendar/decidir ajustes, de forma similar al examen periódico del CORSIA.

6.8 **Creación de capacidad:** Para poder hacer realidad las hipótesis, es posible que también se requieran acciones de asistencia y creación de capacidad, p.ej, talleres que ofrezcan soluciones a los Estados para alcanzar los objetivos y que les ayuden a comprender los posibles costos y asistencia en el control y medición de las emisiones de CO₂ de la aviación internacional, como parte de un programa general de instrucción que podría ser similar al exitoso programa ACT-CORSIA.

7. APÉNDICES DEL INFORME FINAL

7.1 Este resumen del estudio realizado por el LTAG-TG es el resultado de dos años de trabajo del CAEP. El informe se acompaña de documentos que proporcionan criterios de modelización, métodos, modelos, supuestos y resultados en aras de la transparencia y la exhaustividad.

7.2 Las hojas resumen (apéndice R1) del informe final aportan información adicional sobre los resultados, su interpretación y hojas de ruta para la implementación de las tecnologías y las medidas operacionales y de combustibles. En el apéndice R2 figura una comparación entre las tendencias (de las emisiones de CO₂) del LTAG-TG y las tendencias (de las emisiones de CO₂) de GEI del CAEP/12. En el apéndice R3 se sitúan los resultados del estudio del LTAG-TG en el contexto de las emisiones acumulativas máximas para poder limitar el aumento de las temperaturas por debajo de 1,5 °C y 2 °C. Por último, el apéndice M1 proporciona detalles de los criterios de elaboración de las hipótesis y de estimación de los costos (inversiones), así como las metodologías aplicadas y los resultados. Los apéndices M2, M3, M4 y M5 contienen detalles sobre las hipótesis relativas a pronóstico, tecnologías, operaciones y combustibles, respectivamente. El apéndice S1 ofrece el contexto del conocimiento científico sobre el clima, que incluye el informe del Grupo sobre Impactos y Aspectos Científicos (ISG) al LTAG-TG, y el apéndice B1 aporta antecedentes y describe las actividades generales y métodos de trabajo del LTAG-TG.

Apéndices:

Apéndice R1: Hojas resumen	https://www.icao.int/environmental-protection/LTAG/Documents/ICAO_LTAG_Report_AppendixR1.pdf
Apéndice R2: Comparación con el análisis de tendencias	https://www.icao.int/environmental-protection/LTAG/Documents/ICAO_LTAG_Report_AppendixR2.pdf
Apéndice R3: Resultados en contexto	https://www.icao.int/environmental-protection/LTAG/Documents/ICAO_LTAG_Report_AppendixR3.pdf

Apéndices metodológicos

Apéndice M1: Reseña de los criterios de modelización usados para elaborar los resultados	https://www.icao.int/environmental-protection/LTAG/Documents/ICAO_LTAG_Report_AppendixM1.pdf
Apéndice M2: Pronóstico	https://www.icao.int/environmental-protection/LTAG/Documents/ICAO_LTAG_Report_AppendixM2.pdf
Apéndice M3: Tecnologías	https://www.icao.int/environmental-protection/LTAG/Documents/ICAO_LTAG_Report_AppendixM3.pdf
Apéndice M4: Operaciones	https://www.icao.int/environmental-protection/LTAG/Documents/ICAO_LTAG_Report_AppendixM4.pdf
Apéndice M5: Combustibles	https://www.icao.int/environmental-protection/LTAG/Documents/ICAO_LTAG_Report_AppendixM5.pdf

Apéndice S1: Contexto del conocimiento científico sobre el clima	https://www.icao.int/environmental-protection/LTAG/Documents/ICAO_LTAG_Report_AppendixS1.pdf
Apéndice B1: Antecedentes	https://www.icao.int/environmental-protection/LTAG/Documents/ICAO_LTAG_Report_AppendixB1.pdf
