

ESTIMACIÓN DE LAS EMISIONES DE GASES CONTAMINANTES GENERADAS POR LA ACTIVIDAD AÉREA EN MÉXICO

Newton Alfredo Vales Cordero^a y Alfonso Herrera García^b

^aFacultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Chihuahua
Circuito No. 1, Campus Universitario 2. Chihuahua, C.P. 31125. Chihuahua, México.

^bCoordinación de Integración del Transporte, Instituto Mexicano del Transporte
Km. 12, Carretera Querétaro-Galindo, Sanfandila, Mpio. Pedro Escobedo, C.P. 76703. Querétaro, México.

Email: aherrera@imt.mx

RESUMEN

En este trabajo se estimaron las emisiones de gases contaminantes generadas por la actividad aérea en México durante 2010. Además, se señalan algunas medidas para atenuar los impactos de éstas. Para los cálculos se propusieron dos metodologías, en la primera se realizó una estimación con base en el consumo de combustible y en la segunda, con base en los vuelos registrados y los tipos de aeronaves utilizados. Adicionalmente, en esta última estimación mediante un sistema de información geográfica, se determinó sobre qué superficie se produjeron las emisiones.

Los resultados indican que en 2010 se generaron 8.2 Mt de CO₂, 4.4 kt de SO_x y 86.7 kt de NO_x. Además, se estimó que la mayor cantidad de emisiones se generó en los vuelos internacionales (65%). En cuanto a las zonas sobre las que se generó el CO₂, la mayor parte correspondió al territorio mexicano (54%), después, le siguieron en importancia las aguas oceánicas (21.7%) y Norteamérica (18.5%). También, se determinó que para neutralizar la huella de carbono, se podría aplicar un impuesto con un monto promedio de 1.14 dólares por pasajero; y que los biocombustibles pueden reducir esta huella hasta en 80%, considerando todo su ciclo de vida.

Palabras clave: actividad aérea, biocombustible, emisión, huella de carbono, sistema de información geográfica.

ABSTRACT

In this research, the air pollution emissions generated by the air transport movements during 2010 were estimated. In addition, some measures to reduce the emission impacts were established. For the calculations two methodologies were proposed, the first one performed the estimations considering the fuel consumption, and the second methodology considering the reported flights and the aircraft types used. Additionally, in the second estimation using a geographic information system, the surface where the emissions were ejected was determined.

According to the results it was estimated that during 2010, 8.2 Mt of CO₂, 4.4 kt of SO_x and 86.7 kt of NO_x were generated. Besides, it was estimated that the greatest amount of emissions was generated by the international flights (65%). In regard to the zones where the CO₂ was ejected, the greatest amount corresponded to Mexican territory (54%), followed in importance by the oceanic waters (21.7%) and North America (18.5%). Also, it was determined that in order to neutralize the carbon footprint it is possible to apply a fee with an average value of 1.14 dollars per passenger; and that the biofuels can reduce this footprint until 80%, considering all their life cycle.

Keywords: air transport movement, biofuel, carbon footprint, emission, geographic information system.

Vales y Herrera – Estimación de las emisiones de gases contaminantes generadas por la actividad aérea en México

INTRODUCCIÓN

En la actualidad el cambio climático se ha convertido en el problema ambiental global más importante debido a sus efectos. Por ello, es una de las principales problemáticas que deben atenderse en el ámbito internacional, regional y local. Se manifiesta con efectos negativos evidentes, los cuales continuarán en aumento mientras no se detenga el incremento de las concentraciones atmosféricas de gases de efecto invernadero (GEI). Enfrentar el cambio climático implica desarrollar de inmediato actividades de mitigación o reducción de emisiones de GEI, y de adaptación o reducción de la vulnerabilidad y de los riesgos para la vida [1].

Por lo tanto, resulta de interés estimar las emisiones contaminantes, con objeto de cuantificar objetivamente la dimensión de las afectaciones ambientales y, también, para identificar mecanismos que podrían utilizarse con objeto de internalizar dichas afectaciones.

México ha asumido el objetivo de disminuir en un 50% sus emisiones de GEI al 2050, respecto con las emitidas en el 2000. En este país el sector transporte generó en 2006 el 20% del total nacional, de emisiones contaminantes, lo cual representó 144.6 Mt de dióxido de carbono equivalente (CO₂e).

Las emisiones de GEI durante 2006 en México, por modo de transporte fueron: autotransporte, 135 MtCO₂e; aéreo, 5.4 MtCO₂e; ferroviario, 1.8 MtCO₂e; y marítimo, 2.4 MtCO₂e [1]. Se debe remarcar la magnitud de las emisiones de GEI del modo aéreo, que es el segundo en importancia después del autotransporte, a pesar de que sólo contribuye con el 0.018% del movimiento de carga doméstica y 0.7% del movimiento doméstico de pasajeros.

El objetivo general de este trabajo es el de realizar una estimación preliminar de las emisiones contaminantes en el aire producidas por la actividad aérea en México, durante 2010; y proponer algún mecanismo para recuperar parte de los costos externos asociados con la contaminación del aire.

El crecimiento de la actividad aérea va acompañado de un incremento en la generación de gases de efecto invernadero. En 2011 la actividad humana mundial generó 34,000 Mt de CO₂, de éstas, 669 Mt fueron originadas por la aviación comercial mundial, lo que representa alrededor del 2% del total mundial [2].

Se supone que el potencial efecto negativo del incremento de las emisiones globales de CO₂ que genera la actividad aérea consolidará la presión pública y política para forzar a este sector a reducir las emisiones de estos gases. Dado que el transporte aéreo es un elemento vital para el desarrollo regional y la economía global, es necesario encontrar medios para transformar este servicio en una actividad sostenible. La sostenibilidad se debe entender como la capacidad de mantener un proceso desde la perspectiva ambiental, social y económica [3].

En el contexto mundial, México contribuye con alrededor del 1.6% a las emisiones de GEI, en 2006 éstas fueron de 715 MtCO₂e. En el rango de países emisores, se ubica en la posición número 13. Las emisiones per cápita de México en 2006, ascendieron a 6.2 tCO₂, este valor se encuentra en un nivel bastante próximo al promedio mundial.

La posición de México como país con desarrollo intermedio debe aprovecharse para adoptar opciones de desarrollo sustentable, con base en tecnologías limpias y bajas en carbono. Esta posición intermedia constituye una gran oportunidad para que México se mantenga indefinidamente en posiciones próximas a la trayectoria promedio global de emisiones per cápita, así como en línea con los requerimientos derivados de una meta global compartida [1].

La Organización de la Aviación Civil Internacional (OACI) desarrolló una calculadora para estimar las emisiones de dióxido de carbono que se generan por la actividad aérea. Su utilización es simple y requiere muy poca información. Aunque la calculadora de la OACI tiene muchas ventajas, se deben

Vales y Herrera – Estimación de las emisiones de gases contaminantes generadas por la actividad aérea en México

señalar algunos inconvenientes, por ejemplo, no estima la contaminación generada para un vuelo completo, sólo en forma individual por pasajero. Además, no considera en sus bases de datos algunos aeropuertos mexicanos. Debido a su estructura, tampoco desglosa, en el caso de los vuelos internacionales, las emisiones que corresponden al trayecto sobre México, sobre otro país o sobre aguas oceánicas [4].

En 2010 operaron veinte aerolíneas nacionales en México y utilizaron 308 aeronaves. De estas aeronaves, aproximadamente el 44.1% correspondió a la operación troncal, el 39.3% a la aviación regional, el 13.9% a las operaciones exclusivas de carga y 2.6% fueron operaciones de fletamento. Se detectaron 25 modelos de aeronaves, ocho de ellas concentraron al 80 % de los equipos que ofrecieron servicio, los cuales fueron los siguientes: Boeing 737, Airbus A320, Embraer 145EP, Airbus A319, Boeing 717, Fokker, CRJ 600-2B19 y ATR-42.

Además de las compañías aéreas mexicanas, durante 2010 operaron en México 62 aerolíneas extranjeras. La mitad de las cuales fueron aerolíneas de Norteamérica, 29% de Europa, 11.3% de Centroamérica y el Caribe, 8% de Sudamérica y 1.6% de Asia. En general se observó que los aviones más utilizados por estas compañías fueron los Airbus A319 y A320; y los Boeing B737 y B777; y en los vuelos con mayor radio de acción los B747 [5].

En México sólo se utilizan dos combustibles de aviación, la turbosina y el gas avión. La turbosina es una mezcla de hidrocarburos parafínicos y aromáticos, que se obtienen del petróleo. Se utiliza como combustible en motores de aviación a turbina. Por su parte, el gas avión es un líquido de alto octanaje obtenido a partir de la desintegración catalítica de los gasóleos pesados, que a su vez son un destilado intermedio del crudo. Se emplea como combustible en aviones de pistón [6].

METODOLOGÍAS PARA ESTIMAR LAS EMISIONES

Se aplicaron dos metodologías para estimar las emisiones contaminantes generadas por la actividad aérea de México. En la primera se realizó la estimación en función del consumo de los combustibles fósiles. Esta primera estimación considera los volúmenes de gases contaminantes generados por unidad de combustible quemada. En la segunda alternativa con base en los vuelos registrados y los tipos de aeronaves utilizados, se estimaron los consumos de combustible y posteriormente las emisiones contaminantes. En este caso se calculó adicionalmente, sobre qué superficie se produjeron las emisiones, es decir, sobre territorio mexicano o continental, o sobre aguas oceánicas.

Primera metodología con base en el consumo de combustible

En esta primera estimación para determinar las emisiones contaminantes de las aeronaves se utilizó la información reportada por Aeropuertos y Servicios Auxiliares (ASA), en relación con el consumo de combustible de aviación durante 2010, tanto de turbosina como de gas avión (Tabla 1). Posteriormente, con información proporcionada por Petróleos Mexicanos, en cuanto a la cantidad estimada de gases de efecto invernadero emitidos por la combustión de un litro de combustible de aviación (Tabla 2), se estimaron las emisiones totales anuales que genera la actividad aérea de México.

Segunda metodología

En esta vertiente propuesta se tomaron en cuenta aspectos no considerados en la anterior, por ejemplo, las distintas etapas de vuelo, el tipo de aeronave y sus motores, o si se trata de vuelos nacionales o internacionales.

Identificación de los aeropuertos de origen y destino

En esta etapa se utilizaron las bases de datos de la Dirección General de Aeronáutica Civil (DGAC), para el año 2010, las cuales contienen la información de todos los vuelos realizados durante dicho año, desde, hacia o entre los aeropuertos mexicanos. Esta información se clasifica en vuelos de la aviación regular nacional e internacional, y de fletamento nacional e internacional.

Vales y Herrera – Estimación de las emisiones de gases contaminantes generadas por la actividad aérea en México

Tabla 1. Consumo anual de combustible que ASA proporcionó a los aeropuertos (2000-2010).

Año	Consumo de combustible (litros)	
	Turbosina	Gas avión
2000	3,270,035,473	24,702,920
2001	3,205,912,132	23,831,943
2002	3,099,860,051	23,726,681
2003	3,148,857,396	24,719,648
2004	3,342,126,082	26,187,412
2005	3,395,615,889	26,683,537
2006	3,542,616,248	27,231,554
2007	3,926,844,596	29,001,825
2008	3,746,383,239	28,249,636
2009	3,186,066,245	27,494,504
2010	3,220,411,702	28,666,116

Fuente: Elaboración propia con base en datos proporcionados por ASA Combustibles y la Unidad de Enlace para la Transparencia de ASA.

Tabla 2. Contaminantes generados por la combustión de un litro de gas avión o de turbosina.

Combustible	Dióxido de carbono (CO ₂) (kg)	Óxido de azufre (SO _x) (kg)	Óxido de nitrógeno (NO _x) (kg)
Gas avión	2.536	0.0014	0.0268
Turbosina	2.036	0.0011	0.0215

Fuente: Subdirección de Disciplina Operativa, Seguridad, Salud y Protección Ambiental de Petróleos Mexicanos.

Delimitación de las coordenadas geográficas

Posteriormente, una vez definidos todos los aeropuertos mexicanos y extranjeros que durante 2010 tuvieron operaciones con México, se obtuvieron las coordenadas geográficas de cada uno de ellos. En particular, se utilizó el punto de referencia de cada aeropuerto (ARP, por sus siglas en inglés, Airport Reference Point). Este punto corresponde al centro geométrico de la pista o pistas en operación de un aeropuerto. En el caso de los aeropuertos mexicanos esta información se obtuvo de [7] y para el caso de los aeropuertos en el extranjero, de sus respectivos sitios en Internet.

Después, con base en las coordenadas de cada aeropuerto se determinaron las distancias ortodrómicas¹ entre cada par de aeropuertos, tanto de servicios nacionales como internacionales, utilizando las ecuaciones 1 y 2, que se muestran a continuación, las cuales toman en cuenta la forma esférica de la tierra [8].

$$d = r \Delta\hat{\sigma} \dots \dots \dots (1)$$

En donde d es la distancia entre cada par de aeropuertos s y f; r es el radio de la tierra, igual a 6,372.8 kilómetros; y $\Delta\hat{\sigma}$ es el ángulo central, en radianes, formado por cada par de aeropuertos; además:

$$\Delta\hat{\sigma} = \arctan \left[\frac{\sqrt{(\cos\theta_s \sin\Delta\lambda)^2 + (\cos\theta_f \sin\theta_f - \sin\theta_s \cos\theta_f \cos\Delta\lambda)^2}}{(\sin\theta_s \sin\theta_f) + (\cos\theta_s \cos\theta_f \cos\Delta\lambda)} \right] \dots \dots \dots (2)$$

¹ La distancia más corta entre dos puntos sobre una superficie esférica, medida sobre la superficie de dicha esfera.

Vales y Herrera – Estimación de las emisiones de gases contaminantes generadas por la actividad aérea en México

En donde $\phi_s, \lambda_s; \phi_f, \lambda_f$ son la latitud y longitud geográfica de cada par de aeropuertos, s y f, respectivamente; y $\Delta\phi, \Delta\lambda$ son las diferencias de dichos valores.

Después de haber estimado las distancias entre todos los pares de aeropuertos, se procedió a determinar para el caso de los servicios internacionales, los tramos y distancias que se sobrevolaron en territorio mexicano, territorio internacional y/o aguas oceánicas. Para estas últimas estimaciones se utilizó un sistema de información geográfica (SIG).

Consumo de combustible unitario

Para estimar la relación combustible consumido/distancia de vuelo, por tipo de aeronave, se utilizó la información de la Guía del Inventario de Emisiones (Emissions Inventory Guidebook, EIG) de CORINAIR [9], la cual es la misma fuente que utiliza la calculadora de la OACI. Para ello, se determinó para cada par origen-destino el tipo de aeronave que operó y en función de éste su código. Posteriormente, se interpoló este código para obtener su grupo genérico, con lo que se obtuvo la relación señalada. Esta estimación se realizó para todos los pares origen-destino. En el caso de los vuelos internacionales, además, se desglosó el consumo de combustible sobre territorio mexicano, otros continentes y/o aguas oceánicas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Combustibles y consumo por pasajero

De acuerdo con el consumo de combustible anual reportado por ASA (Tabla 1), se observa que en general la turbosina representa el combustible con mayor demanda. Mientras que el consumo de turbosina se mide en miles de millones de litros, el de gas avión es apenas de millones de litros. Durante el periodo 2000-2010 en promedio el consumo de gas avión respecto del total de combustible de aviación suministrado, representó menos de un 1%. En otras palabras, por cada 100 litros de combustible suministrado por ASA, menos de un litro corresponde a gas avión.

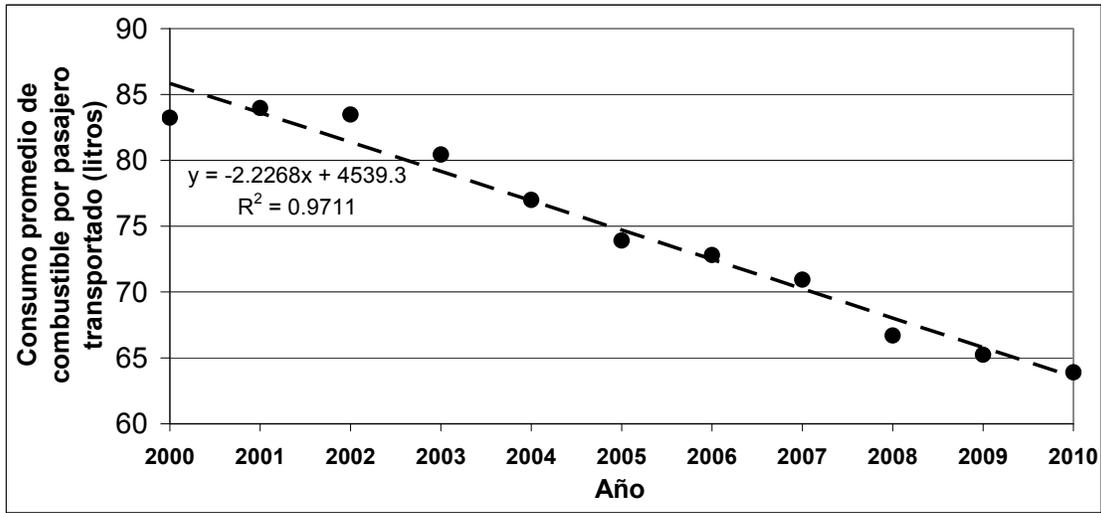
Con base en los consumos de combustible anuales (Tabla 1) y los pasajeros totales transportados durante dichos años, fue posible estimar el consumo promedio de combustible por pasajero durante dicho periodo (Figura 1).

Se observa que a partir de 2001 ha disminuido en forma sostenida el consumo de combustible por pasajero transportado, es decir ha habido un incremento del rendimiento operacional de las aerolíneas, lo cual está asociado con la incorporación de flota aérea más moderna. Sin embargo, se debe señalar que esta mejora refleja el desempeño promedio de las aerolíneas mexicanas y extranjeras que operan en México, en vuelos nacionales e internacionales; y también, que sólo se consideró el consumo de turbosina, el cual representa, como se señaló antes, el combustible más utilizado en México. La Figura 1, también muestra la línea de tendencia de este comportamiento la cual presenta un alto coeficiente de correlación.

Resultados de la primera metodología

Con la información señalada anteriormente se obtuvo una primera estimación de las emisiones contaminantes en el aire originadas por la actividad aérea, para ello, los consumos de combustible tanto de turbosina como de gas avión para el año 2010 (Tabla 1), fueron multiplicados por los factores unitarios de generación de gases contaminantes establecidos en la Tabla 2. Los resultados se presentan en la Tabla 3. En la Figura 2 se muestra la participación de los principales gases contaminantes generados por la actividad aérea durante 2010, se observa que en particular el CO₂ es el principal gas de efecto invernadero generado, casi el 99% de las emisiones corresponden a este gas, los otros dos gases, que son considerados como precursores, tienen una contribución mucho menor.

Vales y Herrera – Estimación de las emisiones de gases contaminantes generadas por la actividad aérea en México



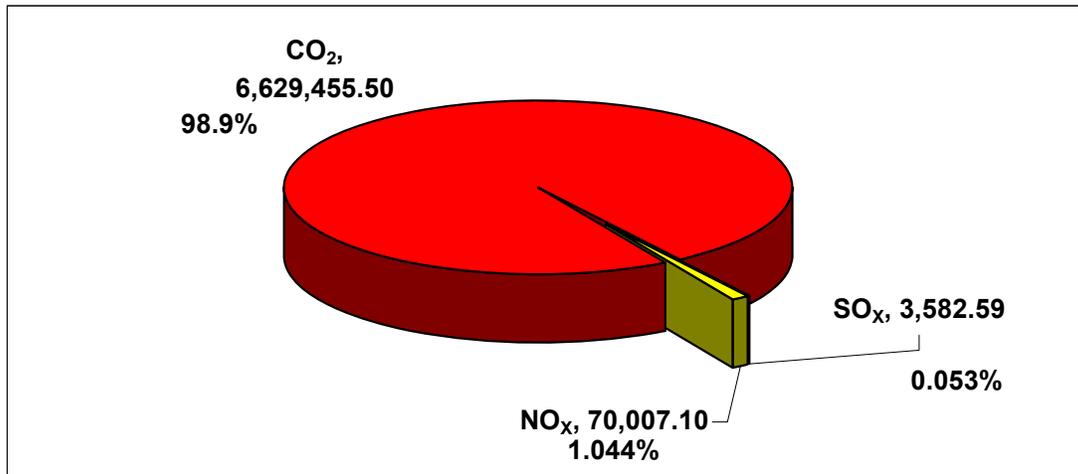
Fuente: El consumo anual de turbosina se obtuvo de la Tabla 2.1. El número de pasajeros anuales transportados se obtuvo de [10].

Figura 1. Consumo promedio de combustible por pasajero.

Tabla 3. Emisiones contaminantes en 2010 por el consumo de combustibles.

Combustible	Cantidad (millones de litros)	Gases contaminantes (toneladas)		
		Dióxido de carbono (CO ₂)	Oxido de azufre (SO _x)	Oxido de nitrógeno (NO _x)
Gasavión	28.67	72,697.27	40.13	768.25
Turbosina	3,220.41	6,556,758.23	3,542.45	69,238.85
Totales	3,249.08	6,629,455.50	3,582.59	70,007.10

Fuente: Elaboración propia.



Fuente: Elaboración propia con base en la Tabla 3.

Figura 2. Gases contaminantes, en toneladas, generados por la actividad aérea durante 2010.

Vales y Herrera – Estimación de las emisiones de gases contaminantes generadas por la actividad aérea en México

Resultados de la segunda metodología

Al procesar las bases de datos se identificaron 66 aeropuertos mexicanos que realizaron operaciones aéreas durante 2010. También, para este año se identificaron 183 aeropuertos fuera de México que interactuaron, como orígenes o destinos, con los aeropuertos mexicanos.

En forma agregada se obtuvieron los siguientes resultados:

- 371,990 vuelos de servicio regular nacional
- 249,369 vuelos de servicio regular internacional
- 11,746 vuelos de servicio de fletamento nacional
- 15,408 vuelos de servicio de fletamento internacional

Estos resultados reflejan que durante 2010 se realizaron en total 648,513 vuelos de los cuales 57.36% correspondieron a la aviación regular nacional, 38.45% a la regular internacional, 1.81% a la de fletamento nacional y 2.38% a la de fletamento internacional.

Además, se observó que los pares origen-destino con las mayores frecuencias operativas dentro de México son: México-Guadalajara, México-Monterrey y México-Cancún, y en los pares internacionales: México-Los Ángeles, Guadalajara-Los Ángeles y México-Houston.

En la Tabla 4 se muestran los resultados obtenidos al aplicar el procedimiento anterior. Observe que la tabla presenta los valores estimados de los gases contaminantes de los vuelos nacionales e internacionales y las aéreas sobrevoladas en las que se descargaron dichas emisiones.

Tabla 4. Emisiones estimadas por tipo de vuelo y áreas de sobrevuelo, para el año 2010.

Tipo de vuelo	Gases contaminantes estimados (toneladas)		
	Dióxido de carbono (CO ₂)	Oxido de azufre (SO _x)	Oxido de nitrógeno (NO _x)
Vuelos nacionales			
México	2,874,636.3	1,553.1	30,355.9
Subtotal	2,874,636.3	1,553.1	30,355.9
Vuelos internacionales			
México	1,564,090.2	845.0	16,516.7
Norteamérica	1,517,421.6	819.8	16,023.9
Europa	67,338.3	36.4	711.1
Caribe	54,137.7	29.2	571.7
Centroamérica	82,354.2	44.5	869.7
Sudamérica	270,951.7	146.4	2,861.2
Asia	778.4	0.4	8.2
África	110.7	0.1	1.2
Aguas oceánicas	1,781,761.8	962.6	18,815.3
Subtotal	5,338,944.6	2,884.5	56,378.8
Gran total	8,213,580.9	4,437.6	86,734.8

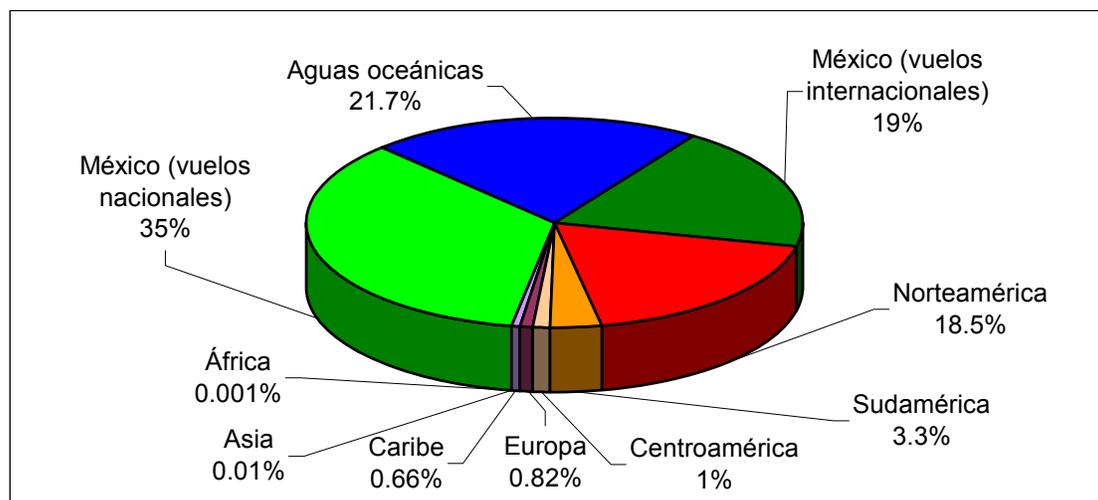
Fuente: Elaboración propia, con base en la metodología establecida.

Se observa que el mayor porcentaje de gases contaminantes corresponde a las emisiones de dióxido de carbono (98.9%), después le sigue el óxido de nitrógeno (1.04%) y finalmente las emisiones de óxido de azufre (0.05%). Estas proporciones porcentuales corresponden a prácticamente los mismos valores que se obtuvieron mediante la primera metodología. Sin embargo, también se observó que en términos absolutos, las estimaciones de la segunda metodología para los tres gases contaminantes considerados, presenta valores más altos (23.8%) que los obtenidos con la primera.

Por otro lado, los resultados de esta segunda estimación señalan que la mayor cantidad de emisiones de CO₂ corresponde a los vuelos internacionales (65%) y el resto a los vuelos nacionales (35%).

Vales y Herrera – Estimación de las emisiones de gases contaminantes generadas por la actividad aérea en México

En cuanto a las zonas sobre las que se generó el dióxido de carbono, la mayor parte corresponde al propio territorio mexicano (54%), de este porcentaje la mayor proporción corresponde a los vuelos nacionales (35%) y el restante (19%) a los internacionales. Después, le sigue en importancia la generación de CO₂ sobre aguas oceánicas (21.7%), Norteamérica (18.5%) y Sudamérica (3.3%). Cabe subrayar que el sobrevuelo de todas estas áreas acumula el 97.5% del total de estas emisiones, por lo que, sobre Centroamérica, Europa, el Caribe, Asia y África sólo se genera una reducida cantidad de este gas contaminante (Figura 3).



Fuente: Elaboración propia con base en la Tabla 4.

Figura 3. Emisiones porcentuales estimadas por tipo de vuelo y áreas de sobrevuelo, para el año 2010.

Medidas para atenuar los impactos de los GEI generados por la actividad aérea

En relación con la disminución de las emisiones de CO₂, en el ámbito mundial se está trabajando en las siguientes áreas: mejora en la eficiencia de los combustibles, incremento del factor de ocupación de las aeronaves, acortamiento de las rutas aéreas, reducción de las demoras y construcción de aeronaves más ligeras. Los objetivos de la International Air Transport Association (IATA) son: incrementar en 25% la eficiencia del combustible de las aeronaves para el año 2020; estabilizar el impacto ambiental y tener un crecimiento nulo de CO₂ a partir del año 2020; y reducir en un 50% las emisiones de CO₂ para el año 2050, en comparación con las generadas en 2005. Para ello, se están explorando diseños aerodinámicos radicales, la utilización de la energía solar en las aeronaves, la tecnología de células de combustible, y los biocombustibles sostenibles, que no compiten con los cultivos que sirven de alimento para el hombre. Los combustibles alternos, en particular, los biocombustibles sostenibles, que han sido identificados por ofrecer soporte al logro de los objetivos establecidos para disminuir las emisiones contaminantes, provienen de cultivos de oleaginosas tales como la jatropha y la camelina, y de las algas, pero también, de la biomasa de la madera y desperdicios. Estas alternativas pueden reducir la huella de carbono hasta en un 80%, considerando todo su ciclo de vida [2].

El principal reto para el desarrollo de los biocombustibles de aviación no es técnico, sino más bien comercial y político. Actualmente, esta alternativa es más costosa que los combustibles fósiles. Por ello, es necesario ofrecer incentivos a los inversionistas para desarrollar estas tecnologías [11].

La cantidad de hectáreas de terreno forestal necesaria para absorber las emisiones anualizadas de CO₂, se obtiene mediante la siguiente ecuación [12]:

$$\text{Huella de carbono (ha)} = \text{CO}_2\text{-eq (t)} / \text{Factor de absorción (tCO}_2\text{/ha)} \dots \dots \dots (3)$$

En donde:

Vales y Herrera – Estimación de las emisiones de gases contaminantes generadas por la actividad aérea en México

Huella de carbono: Es la cantidad de terreno forestal necesaria (en hectáreas) para absorber las emisiones anualizadas de CO₂.

CO₂-eq: Es el total anual de CO₂ equivalente (en toneladas) considerado en el análisis.

Factor de absorción: Es la cantidad que representa las toneladas de CO₂ que puede absorber anualmente una hectárea de determinado tipo de ecosistema de vegetación. Por ejemplo, un bosque de encino-pino con individuos de 5 a 10 años, en la región del estado de Querétaro, México, tiene un factor de absorción igual a 40 tCO₂/ha [13].

Sin embargo, se debe tener presente que existen otros ecosistemas que pueden ser considerados para la captura y almacenamiento del carbono, por ejemplo, se ha demostrado que los agroecosistemas cafetaleros, con sombra diversificada, son sistemas potenciales en la captura de carbono [14]. Estos sistemas representan una opción para los productores de café, no solamente para proporcionar un valor ecológico agregado, al propiciar la captación de carbono sino también para contar con una fuente económica adicional. La opción económica adicional a la producción de café que ofrecen dichos ecosistemas es a través del pago de bonos por captura de carbono o por medio de la producción de madera y leña [15]. El pago de servicios ambientales por fijación y almacenamiento de carbono representa una opción para dar valor agregado a la producción, que podría tener un gran potencial e importancia para los productores [16,17]) y, en consecuencia, representa una estrategia que debe ser considerada, diseñada e implementada a corto plazo [18].

De acuerdo con los resultados obtenidos en la segunda metodología, durante 2010 la actividad aérea desde, hacia y dentro de México generó 8,213,580.9 toneladas de CO₂. Por otra parte, si consideramos un factor de absorción de 40 tCO₂/ha, que corresponde a un bosque de encino-pino con individuos de 5 a 10 años y aplicando la ecuación 3.1 se tiene:

$$\text{Huella de carbono} = 8,213,580.9 \text{ tCO}_2 / 40 \text{ tCO}_2/\text{ha} = 205,339.5 \text{ ha}$$

Esta superficie es equivalente a 2,053.3 km², lo que representa aproximadamente el 0.1% del total del territorio mexicano.

El Fondo BioCarbon del Banco Mundial [19] ha invertido 90 millones de dólares en proyectos de 16 países del mundo (en África, Asia, Europa y Latinoamérica), que han servido para restaurar 150,000 hectáreas de tierras degradadas y para reducir la deforestación de más de 350,000 hectáreas. Estos proyectos han capturado 15 millones de toneladas de CO₂ [20].

Con estos valores se puede estimar un costo promedio de 6 dólares por tonelada de CO₂ capturada. Por otro lado, otros autores [1] estiman que este valor es de alrededor de 8 dólares por tonelada de CO₂ capturada. Considerando un valor promedio de estas estimaciones se obtiene un costo de 7 dólares por tonelada de CO₂ capturada.

De esta forma para neutralizar la huella ambiental derivada de la actividad aérea, se requeriría una inversión de aproximadamente:

$$8,213,580.9 \text{ tCO}_2 \times 7 \text{ dólares/tCO}_2 = 57,495,066.3 \text{ dólares}$$

Si este monto se distribuyera uniformemente entre cada uno de los 50,396,816 pasajeros transportados desde, hacia o dentro de México durante 2010, tendrían que haber pagado adicionalmente 1.14 dólares (aproximadamente 14 pesos mexicanos) por realizar su viaje, lo cual no representa un incremento significativo del monto que pagan por su boleto de avión y los impuestos respectivos.

Un esquema impositivo de mayor cobertura, además, debería considerar un impuesto asociado con la carga transportada, de esta forma se disminuiría el impuesto ambiental de los pasajeros. Sin embargo,

Vales y Herrera – Estimación de las emisiones de gases contaminantes generadas por la actividad aérea en México

un esquema ideal debería establecer este impuesto ambiental en función de las emisiones generadas en cada ruta, por lo cual cada par origen-destino tendría un monto impositivo específico.

CONCLUSIONES

En los últimos años las emisiones mundiales de GEI se han incrementado significativamente, lo cual ha generado diversos efectos negativos, entre ellos el cambio climático. Desafortunadamente, se estima que el cambio climático intensificará los fenómenos hidrometeorológicos extremos y, en consecuencia, se incrementarán los costos de sus impactos, por lo que es necesario iniciar cuanto antes un proceso apropiado de adaptación.

El transporte genera una parte importante de los GEI, por ejemplo, en el caso de México contribuye con el 20% del total de estas emisiones. Las tendencias mundiales señalan que las emisiones de GEI crecerán en función del crecimiento económico.

En México, el autotransporte representa el primer generador de estos gases contaminantes, sin embargo, le sigue en importancia el modo aéreo, a pesar de que su contribución en el transporte de pasajeros y el movimiento de carga es muy reducida.

Dado que el transporte aéreo es un elemento vital para el desarrollo regional y la economía global, es necesario encontrar medios para transformar este servicio en una actividad sostenible en su sentido más amplio, considerando tres perspectivas, la ambiental, la social y la económica.

El principal gas contaminante que se genera por la combustión de cada litro de combustible de aviación, es el dióxido de carbono. En particular, el gas avión es más contaminante que la turbosina, ya que por cada litro quemado, genera 24.5% más emisiones (en peso) de dióxido de carbono que la turbosina. Afortunadamente, el suministro en México para la actividad aérea corresponde en su mayor parte a la turbosina, por cada 100 litros de combustible de aviación suministrados, poco más de 99 corresponden a la turbosina.

Durante el periodo 2001-2010 se observó una disminución en forma sostenida del consumo de combustible por pasajero transportado, lo cual implica un incremento del rendimiento operacional de las aerolíneas, tanto mexicanas como extranjeras.

Debido a que la primera metodología se basa en el consumo total de combustible, sin considerar los diferentes tipos de aeronaves, ni las distancias de vuelo, es menos precisa que la segunda. De los resultados se infiere que la primera alternativa aparentemente subestima la cantidad de emisiones de CO₂ generadas. Por su parte, la segunda metodología, que considera varios factores adicionales en las estimaciones, ofrece teóricamente mayor precisión. Sin embargo, su aplicación es mucho más laboriosa. Por lo anterior, se propone para una línea de investigación futura, desarrollar una calculadora de emisiones de gases contaminantes aplicando la segunda metodología, para sistematizar las estimaciones y obtener los resultados en una forma más ágil, considerando la generación de emisiones totales, pero también su detalle por tipo de servicio y por región.

Una estimación para el año 2010 de la huella de carbono, de la actividad aérea relacionada con México en unidades de terreno forestal, señala que ésta tiene un valor de 205,339.5 hectáreas. Otra de las estimaciones señala que si se aplicara un impuesto para neutralizar la huella de carbono, en promedio cada pasajero tendría que pagar un impuesto de aproximadamente 1.14 dólares, lo cual no representa un incremento importante del monto que pagan normalmente los usuarios del transporte aéreo.

Aunque existen enormes retos para reducir las emisiones de CO₂ y atenuar los efectos del cambio climático, las organizaciones internacionales vinculadas con la actividad aérea comercial, como la OACI y la IATA, han estado avanzando con medidas concretas para reducir la huella ecológica de la

Vales y Herrera – Estimación de las emisiones de gases contaminantes generadas por la actividad aérea en México

aviación. Por lo anterior, es importante continuar con un seguimiento periódico que evalúe las emisiones contaminantes de la actividad aérea y los resultados de las medidas tomadas para reducirlas.

REFERENCIAS

- [1] Poder Ejecutivo Federal (PEF). 2009. Comisión Intersecretarial de Cambio Climático. 2009. Programa Especial de Cambio Climático 2009-2012. Publicado en el Diario Oficial de la Federación el 28 de agosto de 2009. México.
- [2] <http://www.iata.org/policy/environment/climate/>
- [3] Sgouridis Sgouris, Bonnefoy Philippe A, and Hansman R. John. 2011. Air transportation in a carbon constrained world: Long-term dynamics of policies and strategies for mitigating the carbon footprint of commercial aviation. Transportation Research Part A. Elsevier. UK.
- [4] <http://www2.icao.int/en/carbonoffset/Pages/default.aspx>
- [5] <http://www.sct.gob.mx/>
- [6] <http://www.asa.gob.mx/es/ASA/Productos>
- [7] Servicios a la Navegación en el Espacio Aéreo Mexicano (SENEAM). 2012. Publicación de Información Aeronáutica (PIA). Enmienda 02/12 (393). México.
- [8] http://en.wikipedia.org/wiki/Great-circle_distance
- [9] <http://reports.eea.europa.eu/EMEP-CORINAIR4/en/page002.html>
- [10] Dirección General de Aeronáutica Civil (DGAC). 2011. La Aviación Mexicana en Cifras 1989-2010. Capítulo 1. México.
- [11] http://www.iata.org/pressroom/facts_figures/
- [12] Hernández Zea Ana Laura. 2012. Huella de carbono en el transporte para una empresa de distribución de productos químicos (tesis). Universidad Autónoma de Querétaro. Facultad de Química. México.
- [13] Manzano Camarillo Mario y Hernández Ramírez Juan Carlos. 2008. Estimación de la captura y almacenamiento de carbono en ecosistemas de la reserva de la Biosfera Sierra Gorda. Disponible en: http://www.katoombagroup.org/~katoomba/documents/events/event19/Captura_y_almacen_de_carbono_MManzano.pdf
- [14] Dávalos Sotelo Raymundo, Rodrigues Morato María I. y Martínez Pinillos-Cueto Enrique. 2008. Agroecosistemas cafetaleros de Veracruz. Biodiversidad, manejo y conservación. Capítulo 16 Almacenamiento de carbono. Instituto de Ecología A.C. (INECOL) e Instituto Nacional de Ecología INE-SEMARNAT. México.
- [15] Peeters Liza Y.K., Soto-Pinto Lorena, Perales Hugo, Montoya Guillermo and Ishiki Mario. 2003. Coffee production, timber and firewood in traditional and Inga-shade plantations in Southern Mexico. Agriculture Ecosystems and Environment. Elsevier. Volume 95, Issues 2-3, May 2003, Pages 481-493.

Vales y Herrera – Estimación de las emisiones de gases contaminantes generadas por la actividad aérea en México

- [16] Ávila Gabriela, Jiménez Francisco, Beer John, Gómez Manuel e Ibrahim Muhammad. 2001. Almacenamiento, fijación de carbono y valoración de servicios ambientales en sistemas agroforestales en Costa Rica. *Revista Agroforestería en las Américas*. Vol. 8. No. 30. P. 32-35. Disponible en: <ftp://ftp.fao.org/docrep/nonfao/lead/x6349s/x6349s00.pdf>
- [17] Chomitz Kenneth M., Buys Piet, De Luca Giacomo, Thomas Timothy S. and Wertz-Kanounnikoff Sheila. 2007. *At loggerheads?: Agricultural expansion, poverty reduction, and environment in the tropical forests*. World Bank policy research report. The World Bank Publications. USA.
- [18] Pineda-López Ma. del Rosario, Ortiz-Ceballos Gustavo, Sánchez-Velázquez Lázaro R. 2005. Los cafetales y su papel en la captura de carbono: un servicio ambiental aún no valorado en Veracruz. *Madera y Bosques* 11(2):3-14. Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=61711201#>
- [19] www.biocarbonfund.org
- [20] <https://wbcarbonfinance.org/docs/BioCarbon-Fund-Brochure-WebReady.pdf>