

## **Análisis de emisiones gaseosas y estudio comparativo de CO<sub>2</sub> en aeropuertos aerocomerciales argentinos.**

**Matias J. Coppa<sup>1</sup>, Juan Ignacio D'Iorio<sup>1</sup>, Nahuel Tomassini<sup>3</sup>, Lucas Sznajderman<sup>1,2</sup>,  
Alejandro Di Bernardi<sup>1</sup>.**

<sup>1</sup>*Grupo Transporte Aéreo – UIDET GTA-GIAI, Departamento de Aeronáutica, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata. Calle 116 s/n e/ 47 y 48, 1900 La Plata, Pcia. Buenos Aires, Argentina.*

<sup>2</sup>*CIC (Comisión de Investigaciones Científicas), Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación.*

<sup>3</sup>*ANAC (Administración Nacional de Aviación Civil).*

### Resumen

Un inventario de emisiones gaseosas (HC, CO, NO<sub>x</sub>, y CO<sub>2</sub>, entre otros contaminantes) proporciona valores totales de los gases liberados al medio ambiente y constituye la base para la notificación y la planificación de la mitigación de los impactos que pudieran llegar a tener lugar. Dado que la OACI reconoce que las fuentes de emisiones relacionadas con los aeropuertos tienen la capacidad de generar emisiones que pueden contribuir al deterioro de la calidad del aire en las comunidades circundantes, el presente estudio realiza una caracterización general de dichos gases, y la posible interacción con el entorno inmediato.

Por otro lado, entendiéndose que el transporte aéreo contribuye (mediante su cuota parte) al cambio climático, el objetivo del presente consiste en cuantificar y comparar el aporte contaminante de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) producido por las principales fuentes en los aeropuertos: edificio terminal y consumo eléctrico asociado, vehículos de acceso en tierra (GAV), operaciones de aeronaves civiles y comerciales, y vehículos de asistencia a la aeronave en plataforma (GSE). Mediante el desarrollo de distintos indicadores, se analizan las emisiones de CO<sub>2</sub> relativas a los pasajeros transportados y operaciones de aeronaves civiles y comerciales.

Se realiza entonces un inventario de las emisiones de CO<sub>2</sub> de las principales fuentes de los siguientes aeropuertos: Aeroparque Metropolitano Jorge Newbery (SABE), Aeropuerto Internacional de Córdoba (SACO), y el Aeropuerto Internacional de Salta (SASA).

El estudio efectuado se encuentra encolumnado con los objetivos del comité de protección ambiental aeronáutica (CAEP), particularmente con los del Grupo de Trabajo: WG2, WG3, ACCS, GMTF, entre otros.

### Introducción

Las infraestructuras aeroportuarias, a la vez de ser centros fundamentales de actividad, impulsores de la economía, del desarrollo social y cultural, así como vertebradores e integradores de regiones y estados, son también elementos que interaccionan con el medio ambiente sobre el que se asientan. La necesidad de hacer compatible el desarrollo del transporte aéreo con la conservación de los valores naturales y de la calidad de vida en el entorno aeroportuario precisa un modelo de actuación basado en el equilibrio entre los factores económicos, sociales y ambientales, que permita el acercamiento a un modelo sostenible de desarrollo.

La OACI reconoce la contaminación acústica como uno de los principales aspectos ambientales generados a causa de la actividad aérea y específicamente la aeroportuaria (International Civil

Aviation Organization (ICAO), 2013). De ahí que la reducción al mínimo de los niveles acústicos y la protección de la calidad de vida de las poblaciones del entorno aeroportuario se haya convertido en una de las prioridades para dicha organización. Respecto a las emisiones gaseosas contaminantes, el foco está puesto en la reducción en la fuente de generación, es decir, los motores que equipan a las aeronaves. Los mismos deben cumplir con los estándares establecidos en el *Anexo 16 - Protección del medio ambiente, Volumen II: Emisiones de los motores de las aeronaves para su certificación* (International Civil Aviation Organization (ICAO), 2008a) y el *Volumen III: Emisión de CO<sub>2</sub> de los aviones* (International Civil Aviation Organization (ICAO), 2017).

Uno de los objetivos de la OACI respecto al medio ambiente es el de limitar o reducir las repercusiones de las emisiones de la aviación en la calidad del aire local, los contaminantes de las aeronaves que causan preocupación a este respecto son las emisiones gaseosas que actualmente se controlan para la certificación de motores de aeronave en el marco del Anexo 16, Volumen II, incluidos los óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), el monóxido de carbono (CO) y los hidrocarburos sin quemar (HC). También se reconoce que las emisiones de contaminantes secundarios (VOC<sub>s</sub>) y la materia en partículas (PM) de las aeronaves pueden tener efectos locales adversos (International Civil Aviation Organization (ICAO), 2011).

La magnitud de la contaminación aérea y su impacto en la calidad del aire puede variar de un aeropuerto a otro según el emplazamiento y la índole de las instalaciones y servicios de transporte público que presten servicio al mismo. La necesidad de reducir la contaminación aérea que producen los vehículos motorizados del aeropuerto, el tráfico de acceso y otros, ha atraído la atención de la mayoría de los gobiernos y de algunas organizaciones intergubernamentales.

Se considera que el aire limpio es un requisito básico de la salud y el bienestar humanos. Sin embargo, su contaminación sigue representando una amenaza importante para la salud en todo el mundo. Según una evaluación de la OMS de la carga de enfermedad debida a la contaminación del aire, son más de dos millones las muertes prematuras que se pueden atribuir cada año a los efectos de la contaminación del aire en espacios abiertos urbanos y en espacios cerrados (producida por la quema de combustibles sólidos) (World Health Organization, 2005). De acuerdo a distintos estudios, las emisiones gaseosas producto del transporte aéreo (año 2006), produjeron 9.970 muertes prematuras en todo el mundo de las cuales el 20% de ellas son atribuidas a la actividad aeroportuaria (Barrett, Britter, & Waitz, 2010).

La cuantificación de los gases regulados por OACI en el Anexo 16 constituye el paso previo para la determinación de las concentraciones atmosféricas previstas, siendo esta la base de los estudios de dispersión y consecuencias sobre la calidad del aire local (LAQ) utilizados para demostrar el cumplimiento de los reglamentos o normas requeridos. La masa total emitida no tiene en cuenta la mezcla en la atmósfera que determina las concentraciones locales, ni tampoco cuánta masa se mezcla en el aire en un tiempo determinado, de allí la necesidad de realizar un estudio de dispersión gaseosa y mediciones in-situ para cuantificar la población afectada (International Civil Aviation Organization (ICAO), 2007).

## Marco Teórico

El volumen del tráfico aéreo mundial se ha ido duplicando una vez cada 15 años desde 1977, y se espera que este crecimiento continúe a pesar de ciclos de recesión cada vez mayores. Se pronostica que el tráfico regular de pasajeros, medido en términos de Revenue Passenger Kilometres (RPK), crezca de cinco mil millones a más de 13 mil millones en el período: 2010-2030, con un promedio anual de tasa de crecimiento de 4,9% (Boeing, 2013). Respecto al tráfico internacional de pasajeros, se estima un aumento del 5,1% anual, mientras que el tráfico doméstico crecería a un ritmo más lento del 4,4% (período 2010-2030). Cabe mencionar, que en este último sector se espera un crecimiento con un promedio anual de 5.2% de 2010 a 2030, incrementado de 200 billones de Revenue Passenger Kilometres (RTK) en 2010, a 562 billones en 2030 (Flightglobal Consultancy, 2015).

La consecuencia directa de un crecimiento del tráfico aéreo es un mayor consumo de combustible y una mayor contaminación gaseosa que afecta la calidad del aire, de vida, la fauna y zonas protegidas en las áreas vecinas a un aeropuerto. Considerando además que la tendencia temporal de crecimiento urbano lleva a la ciudad hacia las inmediaciones del predio aeroportuario, la anticipada identificación de áreas sensibles permite una menor afectación tanto en el desarrollo urbano como aeroportuario bajo la premisa de competitividad territorial.

Específicamente, las emisiones de los motores de los aviones incluyen el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), vapor de agua ( $\text{H}_2\text{O}$ ), óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ), monóxido de carbono ( $\text{CO}$ ), óxidos de azufre ( $\text{SO}_x$ ), hidrocarburos no quemados ( $\text{HC}$ ), material particulado ( $\text{PM}$ ), compuestos orgánicos volátiles ( $\text{VOCs}$ ), y otros compuestos (Lefebvre, 1983). Aproximadamente, un 70% de dichas emisiones son  $\text{CO}_2$  y un 30 % de  $\text{H}_2\text{O}$ , donde el resto de los compuestos representan menos del 1%. La siguiente figura proporciona una simple ilustración de los efectos del quemado de un combustible aeronáutico convencional (Wuebbles, Gupta, & Ko, 2007):

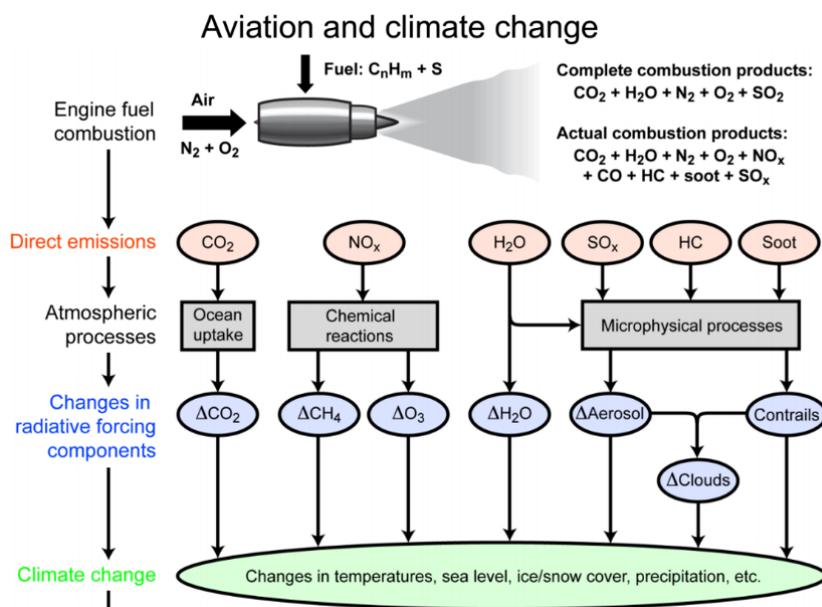
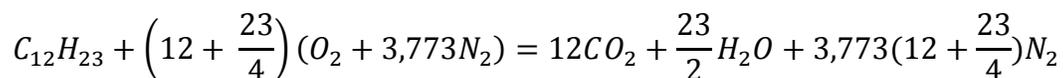


Figura 1 -Esquema de las emisiones y el impacto ambiental producto de la actividad aérea (Wuebbles et al., 2007)

La ecuación que representa una combustión completa de un hidrocarburo de composición molecular promedio  $C_{12}H_{23}$  como el caso del combustible aeronáutico Jet A1, es (Heywood, 1998):



***Ecuación 1. Combustión estequiométrica del combustible aeronáutico convencional Jet A1***

Las cantidades totales de gases emanados dependerán de ciertos factores tales como el tipo de combustible utilizado, la riqueza de la mezcla, el mantenimiento de la cámara de combustión o del motor en general, las condiciones atmosféricas de operación, la etapa de vuelo analizada, entre otros.

Las normas OACI sobre emisiones de los motores, se aplican mediante procesos de certificación nacionales y multinacionales de los motores de turborreactor y turbofan con empuje superior a 26,7 kilonewtons (kN), no así a los motores turbohélice, alternativos y grupos auxiliares de energía (APU) (International Civil Aviation Organization (ICAO), 2008a). Dicha normativa se basan en la performance de los motores en el ciclo de aterrizaje y despegue (LTO) idealizado como se muestra a continuación (International Civil Aviation Organization (ICAO), 2011):

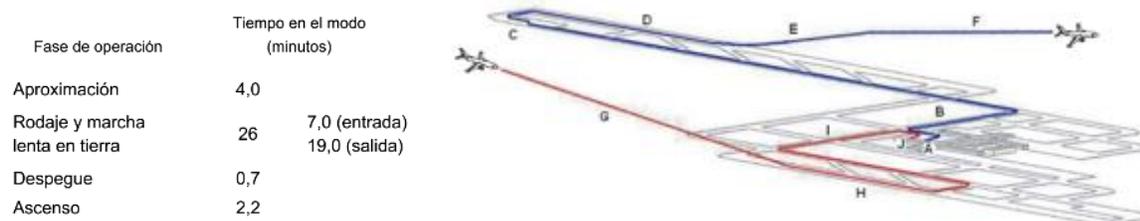


Figura 2 -Tiempos en el Ciclo LTO (International Civil Aviation Organization (ICAO), 2011).

Para la determinación del impacto ambiental en el entorno aeroportuario, se define dicho ciclo como aquel que comprende las siguientes fases (International Civil Aviation Organization (ICAO), 2011) :

- Landing - (Aproximación): son todas aquellas operaciones que se realizan desde los 1.000 metros de altura sobre la cota del aeropuerto hasta que alcanza la superficie de la pista.
- Taxi - (Rodaje): son las maniobras que realiza el avión hasta llegar a su puesto de estacionamiento en plataforma en condición de Block-On (calzos colocados) y las maniobras que realiza el avión desde el Block-Off (calzos afuera) hasta llegar a la cabecera de pista.
- Take off - (Despegue): son las operaciones que realiza el avión en la pista para lograr el despegue.
- Climb out - (Ascenso): son las operaciones que realiza el avión hasta alcanzar los 1.000 metros de altura sobre la cota del aeropuerto.

Históricamente, la OACI ha elaborado normas de certificación para las emisiones de los motores de aeronaves basadas en un ciclo normalizado, con hipótesis implícitas para el tiempo que una aeronave operará en el ciclo LTO.

Los reglajes de empuje y el tiempo en cada etapa dependen, en gran medida, de condiciones específicas como peso de la aeronave, temperatura exterior, viento, altitud del aeropuerto, condiciones de las pistas y procedimientos de la línea aérea, en distintos estudios se ha demostrado la notable diferencia en la concentración adoptando un ciclo con valores estándares y reales en un aeropuerto (Alejandro, Coppa, & Tomassini, 2014; Coppa, D'Iorio, Di Bernardi, & Tomassini, 2015; Di Bernardi, Coppa, & D'Iorio, 2014; Masiol & Harrison, 2014). Mas allá de dicha situación, a nivel global podemos afirmar que aproximadamente el 10% de las emisiones gaseosas totales de la actividad aeronáutica se emiten en dicho ciclo y el restante 90%, se emite a altitudes por encima de los 1000 m (Simone, Stettler, & Barrett, 2013).

De acuerdo con el Documento 9889 “Airport Air Quality Manual” (International Civil Aviation Organization (ICAO), 2011), los aeropuertos deben mantener un inventario de emisiones gaseosas con el objetivo de:

- Colectar información y monitorear las tendencias para evaluar escenarios futuros;
- Evaluar comparativamente en acuerdo a requerimientos legales;
- Crear datos de entrada para modelos de dispersión en un esfuerzo para determinar la concentración de contaminantes; y
- Establecer bases para programas de mitigación.

En los aeropuertos, además de registrarse las emisiones por la operación de las aeronaves, se determinan como principales fuentes de emisión las procedentes de los vehículos de transporte en accesos y estacionamientos del aeropuerto (GAV – Ground Access Vehicles), las de fuentes estacionarias (calderas y depósitos de combustible, edificio terminal), las que se generan en las prácticas contra incendios, y aquellas procedentes de vehículos de apoyo en tierra (GSE - Ground Support Equipment). Se presenta a continuación una imagen representativa las principales fuentes de emisiones en un aeropuerto:



Figura 3 -Principales fuentes de emisiones gaseosas contaminantes en un aeropuerto.

Si bien las emisiones producto de los movimientos de aeronaves representan el mayor porcentaje del total, en la actualidad, debido a la complejidad y profundidad del tema no se han publicado estudios específicos que caractericen, cuantifiquen y discreticen el porcentaje de los distintos gases contaminantes respecto a la totalidad de las posibles fuentes en un aeropuerto. A partir del análisis de distintos estudios (Palocz-Andresen, 2009) (Hannah, Hettmann, Rashid, Saleh, & Yilmaz, 2012) (Trujillo, Sznajderman, Coppa, D'Iorio, & Di Bernardi, 2017), se observa la variación de los porcentajes relativos de las emisiones en cada una de las fuentes y por ende la necesidad de realizar un inventario y análisis integral que contemple la totalidad de las mismas.

La contaminación gaseosa producto del uso de vehículos impulsados por motores de combustión interna es un tema de preocupación mundial en la actualidad. En las instalaciones aeroportuarias se produce una gran actividad diariamente, tanto por aquellas destinadas a dar asistencia a pasajeros, mercancías y aeronaves en tierra (vehículos handling) como aquellos vehículos de acceso al mismo.

El handling engloba entre sus operaciones el transporte de pasajeros desde las terminales a las aeronaves y viceversa, los procesos de carga y descarga de mercancías y equipajes, el suministro de energía y combustible a la aeronave, transporte de tripulaciones, así como todas las maniobras que deben realizarse para situar al avión en posición para efectuar el despegue o el inicio del rodaje según el caso. Los vehículos de asistencia incluyen todos los equipos de servicio en tierra y los vehículos asociados con los movimientos de la aeronave en la plataforma. Cada uno de estos vehículos poseen distintos tiempos de operación que, debido a su función, no todos los procesos pueden realizarse simultáneamente (Horstmeier & Haan, 2001).

El tipo de GSE varía según la aplicación en función de su operación. Por ejemplo, algunos son requeridos para brindar servicio a la aeronave luego del aterrizaje, otros para el despegue, otros para brindar servicio a los pasajeros y otros para las operaciones de carga y descarga.



Figura 4 -Imágenes representativas de: Izq. Vehículos de apoyo a las aeronaves (GSE). Der. Vehículos de acceso al aeropuerto (GAV)

Por otro lado, como fuentes estáticas en un aeropuerto podemos encontrar aquellos generadores, motores, cocinas, calderas, y todo elemento que consuma, energía eléctrica, gas y/o combustible. Los valores de consumos de cada una de dichas fuentes energéticas suelen ser por lo general valores reservados entre los operadores aeroportuarios y muchas veces, sin una previa caracterización energética de todas las instalaciones e infraestructura aeroportuaria, se dificulta la incorporación en un inventario de emisiones. Pero el aporte de dichos sistemas poseen su cuota

respectiva de emisiones que no pueden ser omitidas en un análisis de mayor profundidad (Kilkiş, 2014).

Por otro lado, una sustancia liberada de una fuente a la atmósfera libre será transportada por el campo medio del viento y dispersada por la turbulencia atmosférica. Este procedimiento se conoce como dispersión atmosférica. La misma puede definirse más estrictamente como “diseminación de los valores en una distribución de frecuencias con respecto a un valor medio”. Se deduce entonces que la modelización de la dispersión atmosférica es la simulación matemática del proceso de diseminación o mezcla en la atmósfera ambiental. Las sustancias traza que se evalúan con mayor frecuencia son los contaminantes atmosféricos reglamentados (International Civil Aviation Organization (ICAO), 2011) para las fuentes aeroportuarias.

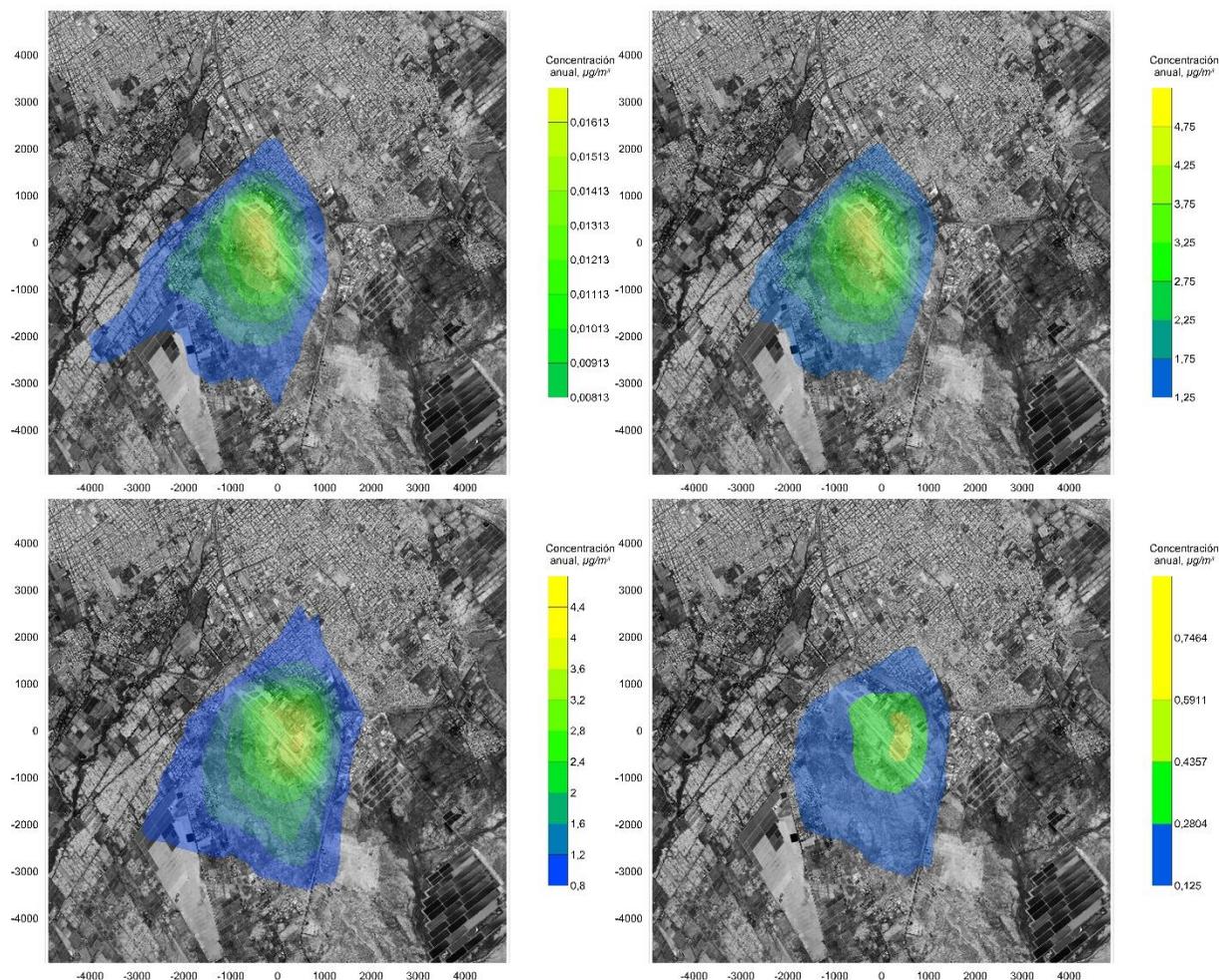


Figura 5 - Curvas de isoconcentración de: Izquierda superior: ( $PM_{10}$ ). Derecha Superior:  $NO_x$ . Izquierda Inferior: CO. Derecha Inferior: HC

De acuerdo con el primer informe técnico de la IPCC destinado específicamente al sector del transporte aéreo la cuota parte de las emisiones totales de  $CO_2$  antropogénicas es del 2%. Teniendo en cuenta la totalidad de los gases emitidos, su interacción con la atmósfera y su respectivo impacto en el cambio climático el valor alcanzado es de un 3,5% en el forzamiento radiativo mundial antropogénico. (Lee et al., 2009). De acuerdo con distintas proyecciones de tráfico de la OACI se estima que las emisiones de  $CO_2$  producto del transporte aéreo internacional aumentarán entre 111

y 144 por ciento entre 2005 y 2025 (es decir, de 416 Mt a entre 876 y 1013 Mt). (Macintosh & Wallace, 2009)

La cuantificación de emisiones de dióxido de carbono, tanto en niveles crucero como en las operaciones aeroportuarias, posee un método de cálculo demostrado y aceptados (Jardine, 2009) (International Civil Aviation Organization (ICAO), n.d.). Se han publicado distintos estudios, presentando inventarios específicos a nivel nacional (Fan, Sun, Zhu, & Wen, 2012), como a nivel internacional en base a estimaciones de tráfico de OACI (Olsthoorn, 2001) (Eyers et al., 2004) (Vedantham & Oppenheimer, 1998).

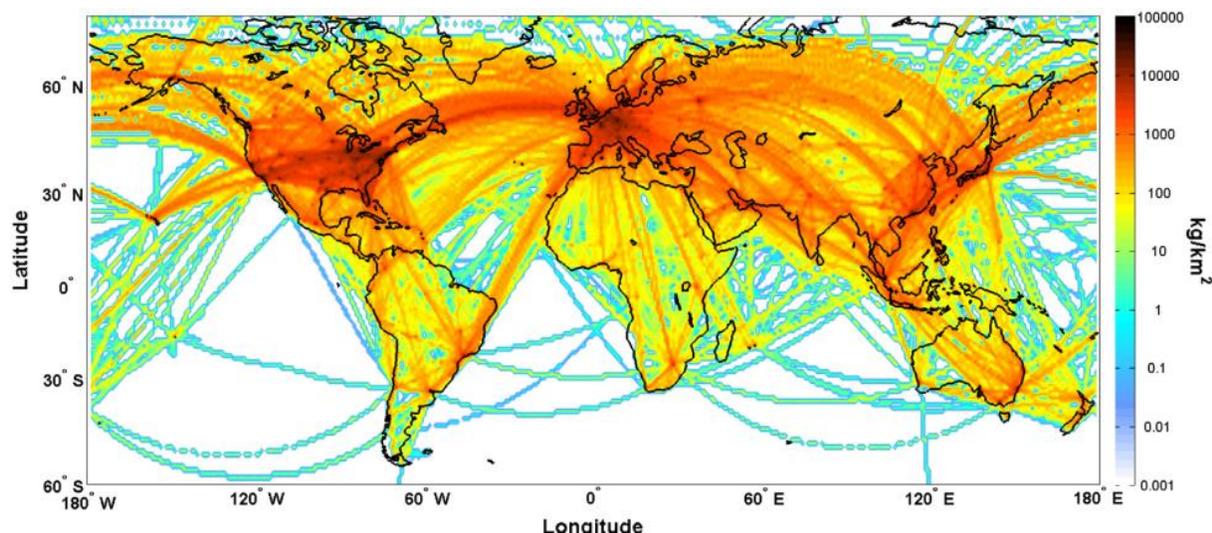


Figura 6 -Distribución espacial de consumo de combustible aeronáutico (Simone et al., 2013).

Por otro lado, estudios sobre el impacto ambiental debido a la actividad comercial de  $\text{CO}_2$  en las distintas latitudes y longitudes muestra como el 92% del combustible consumido ocurre en el hemisferio norte y el 67% entre los paralelos 30 y 60 N. (Simone et al., 2013). A su vez, los patrones de viento típicos en las latitudes medias superiores tienden a concentrar estas emisiones sobre el Ártico y desplazar las emisiones de latitudes medias hacia la misma región siendo ésta una de las más afectadas debido al transporte aéreo (Wilkerson et al., 2010) (Brasseur et al., 1998).

Los principales consumidores de energía en los aeropuertos se pueden dividir entre el lado aire y el lado tierra. Los consumidores de energía del lado del aire son fundamentalmente los sistemas de iluminación, sistema de balizamiento y los sistemas de navegación. Por el lado tierra se encuentra principalmente la terminal, debido a su función como un nodo para procesar pasajeros y carga y la necesidad de las de instalaciones requeridas para su operación. La principal fuente energética en este caso es la energía eléctrica (Alba & Manana, 2016).

### Metodología

A continuación, se detalla el proceso para el cálculo de las emisiones de  $\text{CO}_2$  derivadas de las operaciones de las aeronaves, de los respectivos GSE, de los GAV y producto de energía eléctrica consumida para los aeropuertos: Aeroparque Metropolitano Jorge Newbery (SABE), Aeropuerto Internacional de Córdoba (SACO), y el Aeropuerto Internacional de Salta (SASA).

- Caracterización de los Aeropuertos: mezcla de tráfico, planta poder, distribución de perfiles, diarios, mensuales y anuales de operaciones.

- Análisis de herramientas de cálculo a utilizar: determinación de cada método a aplicar en cada fuente según información disponible.
- Determinación de flota operativa, planta poder y tiempos en el ciclo LTO.
- Determinación de perfiles de servicio típico según aeronave. Análisis de todos los vehículos handling soporte de cada avión (tiempos de servicio, potencia de motores, factores de carga, entre otros factores considerados).
- Cuantificación de las emisiones de CO<sub>2</sub> de cada fuente analizada para todos los aeropuertos bajo estudio. Obtención de resultados comparativos y relativos a parámetros de operaciones y pasajeros transportados.



Figura 7 -Proceso lógico de trabajo para determinar la contaminación gaseosa

### Aeropuertos analizados

Se presenta a continuación los tres aeropuertos analizados: Aeroparque Metropolitano Jorge Newbery (SABE), Aeropuerto Internacional de Córdoba (SACO), y el Aeropuerto Internacional de Salta (SASA).



Figura 8 -Izq. Vista aérea del Aeroparque Jorge Newbery y su plataforma aerocomercial de pasajeros. Der. Principales fuentes de emisiones en dicho Aeropuerto.



Figura 9 -Vista aérea de los aeropuertos: Izq. Aeropuerto Internacional de Córdoba. Der. Aeropuerto Internacional de Salta.

Como se aprecia en la siguiente figura, los tres aeropuertos poseen una notable diferencia en la cantidad de operaciones civiles y comerciales y pasajeros transportados.

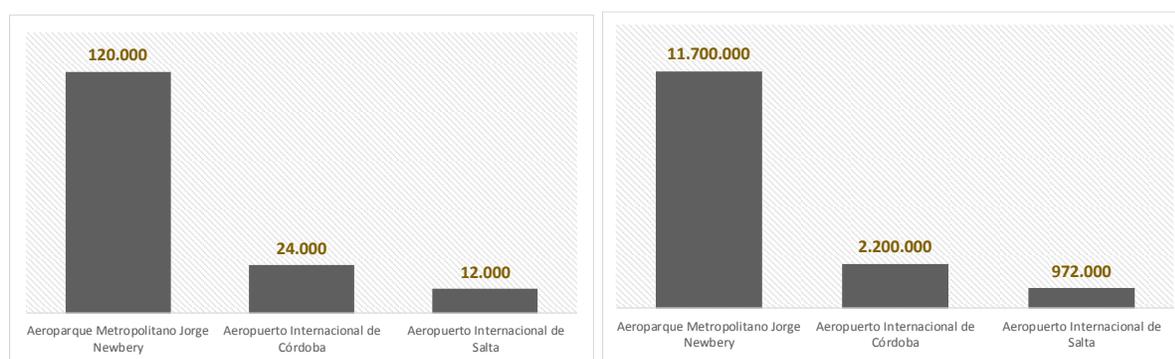


Figura 10 -Izq. Operaciones/año. Der. Pasajeros transportados (ORSNA, 2017).

En la siguiente figura se presenta los porcentajes de pasajeros transportados según su clasificación.

	Domésticos	Internacionales	Tránsito
<b>Aeroparque Metropolitano Jorge Newbery</b>	75%	19%	6%
<b>Aeropuerto Internacional de Córdoba</b>	66%	30%	4%
<b>Aeropuerto Internacional de Salta</b>	92%	5%	3%

Tabla 1 - Distribución de pasajeros en los aeropuertos bajo estudio.

### **Emissiones de CO<sub>2</sub> producto de la operación de aeronaves**

Las emisiones de dióxido de carbono producto de las operaciones de aterrizaje y despegue dependen principalmente de Time in Mode - TIM (segundos), los Índices de emisión del motor principal – EI, por sus singlas en inglés *Emission index* (kg de CO<sub>2</sub>/ kg de combustible), y flujo de combustible del motor principal - FF (kg), por sus siglas en ingles Fuel Flow.

- **Time in Mode (TIM):** es el periodo de tiempo real donde los motores de las aeronaves operan a un reglaje de potencia identificado, normalmente correspondiente a uno de los modos de operación del LTO del ciclo de vuelo operacional.
- **Índice de emisión (EI) y flujo de combustible:** El índice de emisión se define como la masa de contaminante emitida por unidad de masa de combustible consumido para un determinado motor. El Banco de datos sobre emisiones de motores (EEDB) (International Civil Aviation Organization (ICAO), 2015) de OACI proporciona el EI para más de 500 motores certificados, así como el flujo de combustible específico del modo en unidades de kilogramo por segundo (kg/s), para los cuatro reglajes de potencia del plan de certificación de emisiones de motores. Para el caso específico del CO<sub>2</sub> el EI es 3,157 (International Civil Aviation Organization (ICAO), 2008b).

La siguiente formula representa la base para el cálculo de las emisiones de CO<sub>2</sub> para una única combinación de aeronave y motor, (International Civil Aviation Organization (ICAO), 2011):

$$Ei_j = \sum (TIM_{jk} * 60) * (FF_{jk}) * (Ei_{ijk}) * (Ne_j)$$

***Ecuación 2. Método de calculo***

Dónde:

- $Ei_j$  = emisiones totales de contaminantes i (CO<sub>2</sub> en este caso), en gramos, producidas por el tipo de aeronave j para un ciclo LTO;
- $Ei_{ijk}$  = índice de emisión para el contaminante i (CO<sub>2</sub> en este caso), en gramos por contaminante por kilogramo de combustible (g/kg de combustible), en el modo k (p. ej., despegue, ascenso, marcha lenta y aproximación) para cada motor empleado en el tipo de aeronave j;
- $FF_{jk}$  = flujo de combustible para el modo k (p. ej., despegue, ascenso, marcha lenta y aproximación), en kilogramos por segundo (kg/s), para cada motor empleado en el tipo de aeronave j;
- $TIM_{jk}$  = tiempo en el modo para el modo k (p. ej., marcha lenta, aproximación, ascenso y despegue), en minutos, para el tipo de aeronave j;
- $Ne_j$  = número de motores empleados en el tipo de aeronave j.

En el método de cálculo, los tiempos de cada una de las etapas del ciclo tiene asociado un valor en el consumo de combustible y por consecuencia un impacto en la concentración de los gases contaminantes. Como se mencionó anteriormente, debido a la diferencia existente entre los tiempos del ciclo LTO de referencia y el real en un aeropuerto bajo estudio, en el presente informe, analizando las velocidades de carreteo, aproximación, distancias y tiempos de taxeo, se adaptaron las condiciones operativas de cada aeropuerto a fin de cuantificar con mayor precisión las emisiones.

### **Emisiones de CO<sub>2</sub> producto de los GAV (Ground Access Vehicles)**

Para el análisis del aporte contaminante producido por la operación de los vehículos de acceso terrestre denominados en su conjunto como GAV (*Ground Access Vehicles*), es necesario establecer distintos parámetros que definirán los casos de estudio. El proceso de cálculo requiere de:

- Determinación de distancias de los segmentos de rutas de acceso.
- Determinación de porcentajes de circulación vehicular por mezcla de flota y por tipo de combustible.
- Determinación de la cantidad de kilómetros transitados de la mezcla de flota vehicular.
- Factores de emisión de cada contaminante en unidades de masa por kilómetro transitado.

Se discrimina la flota vehicular en 3 tipos: vehículo de pasajeros, vehículos de transporte livianos (taxis, remises, VANS, entre otros) y vehículos de transporte pesados (buses, trenes, subterráneos, transfer, entre otros). Este a su vez se subdivide según tres tipos de combustible gasolina, diésel y gas natural comprimido (GNC).

La cantidad de kilómetros transitados por la mezcla vehicular (VKT: *Vehicles Kilometers Traveled*) es estimada a partir de datos del año 2017 de cada uno de los Aeropuertos bajo análisis por el Organismo Regulador del Sistema Nacional de Aeropuertos (ORSNA, 2017), en el cual se presenta cantidad de pasajeros anual y porcentajes de modos de acceso. Se presenta a continuación los cálculos a realizar a de acuerdo a la metodología planteada:

$$E_{total} = (RL_1 \times NV_1 \times EF_1) + (RL_2 \times NV_2 \times EF_2) + \dots (RL_n \times NV_n \times EF_n) \quad (1)$$

#### ***Ecuación 3. Método de calculo***

Dónde:

$E_{total}$ : total de emisiones de CO<sub>2</sub> en cada segmento de ruta de acceso

$RL_n$ : longitud de ruta de acceso  $n$

$NV_n$ : cantidad de kilómetros transitadas por mezcla de flota vehicular en la ruta de acceso  $n$

$EF_n$ : factor de emisión del CO<sub>2</sub> considerando tipo de flota vehicular en la ruta de acceso  $n$

	Taxi	Automóvil particular	Transfer	Transporte público (bus)
Aeroparque Metropolitano Jorge Newbery	61%	23%	10%	6%
Aeropuerto Internacional de Córdoba	42%	54%	2%	2%
Aeropuerto Internacional de Salta	50%	43%	4%	3%

Tabla 2 - Distribución de modos de acceso a los aeropuertos bajo estudio.

### Emisiones de CO<sub>2</sub> producto de los GSE

Existen diversos métodos para calcular las emisiones de gaseosas de los GSE (International Civil Aviation Organization (ICAO), 2011) (Kenney et al., 2014). La metodología aplicada es la desarrollada por el Aeropuerto de Zurich (Zurich Airport, 2014), donde, dependiendo del tipo de fuselaje de las aeronaves y la cantidad de ciclos LTO, es posible estimar las emisiones de CO<sub>2</sub>. El método de cálculo aplicado es el siguiente:

$$\text{Emisiones (kg)} = M * fe$$

#### **Ecuación 4. Método de calculo**

Dónde:

- *fe*: factor de emisión según tipo de fuselaje (kg de CO<sub>2</sub>/ciclo)
- *M*: cantidad de movimientos de las aeronaves

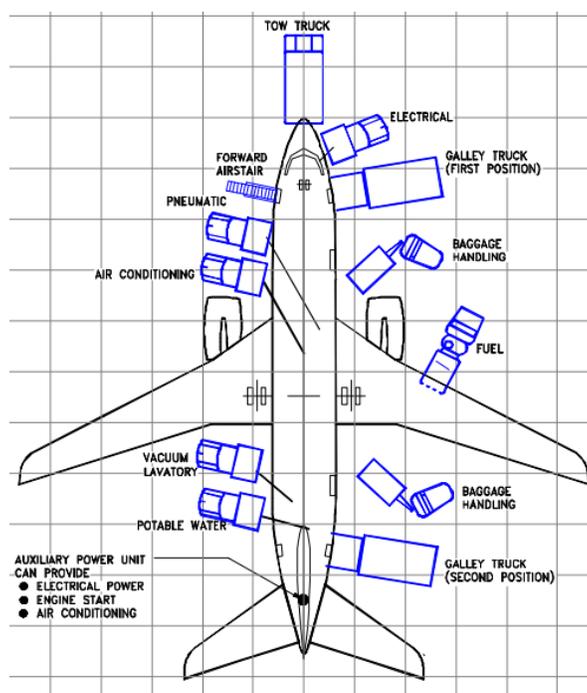


Figura 11 - Posicionamiento típico de los vehículos GSE de un Boeing 737. (Boeing, 2005)

Donde los factores de emisión adoptados fueron los que se presentan en la siguiente tabla:

	CO <sub>2</sub> (Kg/ciclo)
<b>Aeronave de fuselaje angosto</b>	18
<b>Aeronave de fuselaje ancho</b>	58

Tabla 4 Factores de emisión por defecto representativos del aeropuerto de Zurich para servicios a las aeronaves

### Emisiones de CO<sub>2</sub> producto del consumo eléctrico

Siguiente los lineamientos de la IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2006), los utilizados por distintas organizaciones validadas a nivel internacional como ACI (Airport Council International) en su programa ACA (Airport Carbon Accreditation) se utiliza como base la normativa internacional (International Organization for Standardization, 2006) para el cálculo de las emisiones producto del consumo eléctrico en cada aeropuerto bajo análisis. El método de cálculo aplicado consiste básicamente en:

$$Emisiones (kg) = ef * cc$$

Dónde:

- *ef*: factor de emisión del CO<sub>2</sub> (kg de CO<sub>2</sub>/kWh)
- *cc*: Consumo eléctrico anual (kWh)

Al igual que ACI, se adoptó un factor de emisión aceptado y validado en distintos estudios (Brander et al., 2011), el cual surge de la matriz energética propia de cada país. El valor adoptado para Argentina es de 0.391932833 (kgCO<sub>2</sub>/kWh).

### Resultados

De acuerdo con cada método de cálculo presentado y teniendo en cuentas las hipótesis adoptadas, se presenta a continuación los resultados obtenidos:

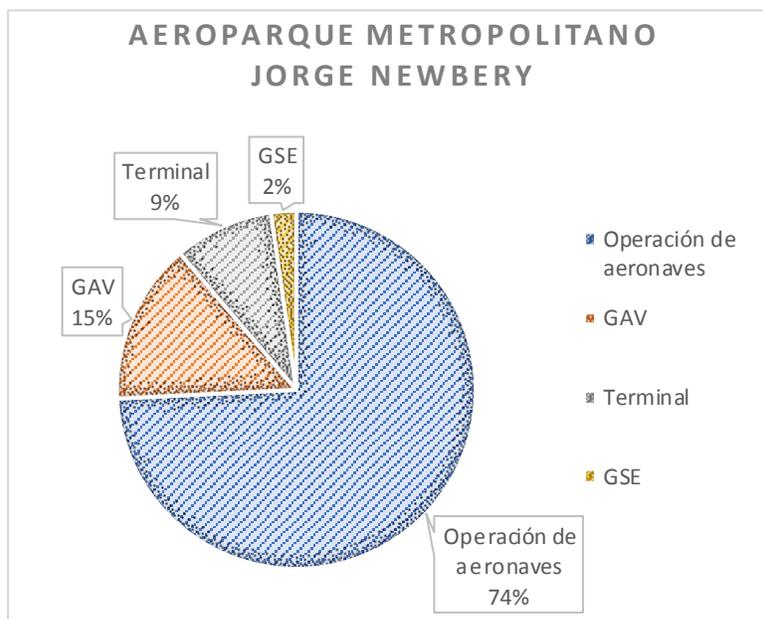


Figura 12 - Distribución de emisiones de CO<sub>2</sub> en el Aeropuerto Metropolitano Jorge Newbery.

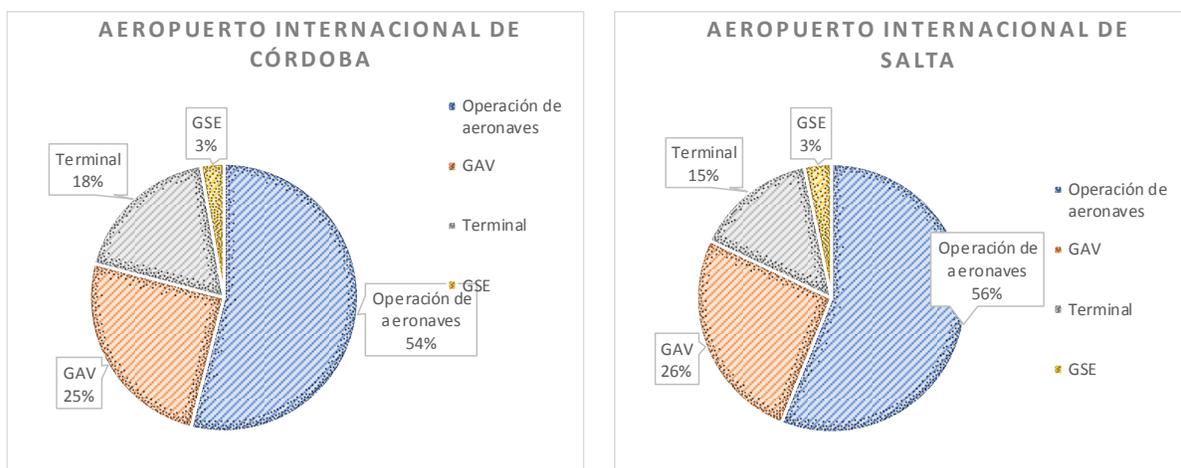


Figura 13 - Distribución de emisiones de CO<sub>2</sub> en el: Izq. Aeropuerto Int. de Córdoba. Der. Aeropuerto Int. de Salta.

Para obtener índices correspondientes a la actividad propia aeroportuaria, se presentan dos resultados: las emisiones de CO<sub>2</sub>, analizando como fuente la Terminal y los GAV relativo a los pasajeros transportados, y las emisiones de CO<sub>2</sub> analizando como fuente las operaciones en el ciclo LTO y GSE asociados relativo a la cantidad de operaciones civiles y comerciales.

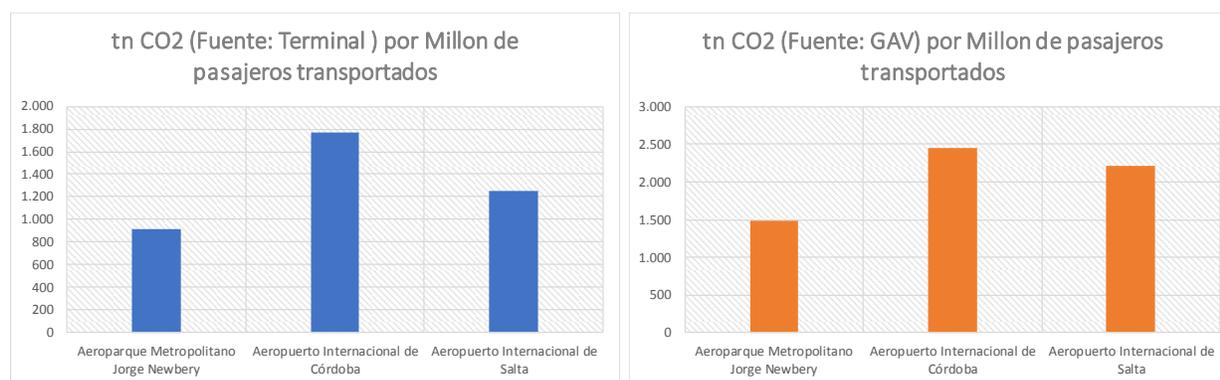


Figura 14 - Toneladas emitidas CO<sub>2</sub> en los aeropuertos bajo estudio, analizando como fuente: Izq. la terminal. Der. GAV.

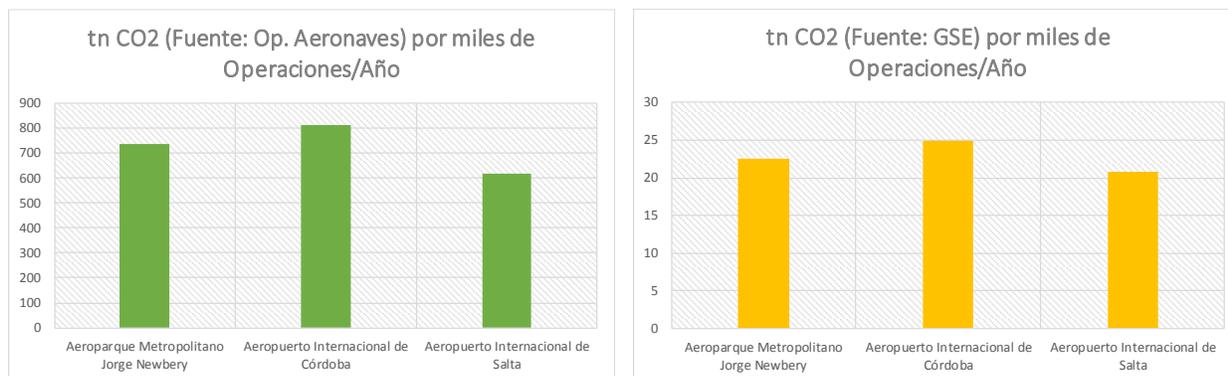


Figura 15 - Toneladas emitidas CO<sub>2</sub> en los aeropuertos bajo estudio, analizando como fuente: Izc. Operación de aeronaves. Der. GSE.

## Conclusiones

Para completar el inventario de emisiones gaseosas producto de la actividad aeroportuaria es necesario el análisis de aporte contaminante de otras fuentes presentes en el aeropuerto ya sean: estacionarias, móviles, discretas o continuas, según tipo y características de operación (según modelos de gestión) en el contexto de las configuraciones de las infraestructuras e instalaciones de la parte aeronáutica, en la parte pública, y en los elementos de apoyo al aeródromo. En el presente informe no se han analizado las fuentes de emisiones que consumen energías alternativas como puede ser: gas natural, biomasa, entre otros. Si bien a priori es posible inferir que las emisiones tendrán un valor relativamente bajo con las aquí estudiadas, para el desarrollo de un inventario completo es estrictamente necesario la inclusión de estas.

Si bien el transporte terrestre de pasajeros no es directamente controlado por el operador aeroportuario, de acuerdo con OACI, es necesario contar con un inventario completo de emisiones gaseosas y el aporte de los GAV deben estar por cuanto incluido. Un aeropuerto en si es un intercambiador modal de transporte y por lo tanto debe contemplar la totalidad de transportes que éste incluye. De acuerdo con las hipótesis y metodologías propuestas se observa, como la preponderancia de modos de acceso vehiculares del tipo Taxi, autos particulares y autos alquilados, influye de forma directa en una mayor concentración de emisiones. En aeropuertos donde el porcentaje de modos de acceso de vehículos de mayor porte (Transfer, buses, entre otros) las emisiones atribuidas a los GAV disminuyen notablemente.

El valor representado por las emisiones de los vehículos de asistencia es coherente con los estudios realizados previamente, sin embargo, podrían ser más precisos si se contara con un inventario de la flota para cada aeropuerto, el consumo de combustible total por los GSE, el número de horas de funcionamiento para cada tipo de servicio y de uso histórico, el tiempo de funcionamiento de cada unidad, entre otros. De acuerdo a los resultados obtenidos, se observa una clara diferencia en aquellos aeropuertos donde la cantidad de operaciones de aeronaves de fuselaje ancho es mayor, esto se debe específicamente a que dichas aeronaves necesitan una mayor cantidad de vehículos y mayor tiempo asociado de los servicios.

La planificación y gestión del uso del suelo es un medio eficaz para garantizar que las actividades del aeropuerto y el entorno inmediato sean compatibles. El crecimiento de la actividad aeronáutica, asociado a la tendencia mundial del incremento de la densidad de población en grandes ciudades, se verá reflejado en la aparición de nuevos en situaciones complejas de competitividad territorial.

El desarrollo de la actividad humana y el crecimiento de las urbanizaciones hacia los aeropuertos no es un tema menor, debe ser difundido para su conocimiento y consideración en los desarrollos de planes

estratégicos, códigos urbanos, planes maestros, entre otros. La falta de planificación lleva a una restricción operacional en el aeropuerto con considerables pérdidas económicas, y una afectación ambiental directa a la población que reside en el entorno aeroportuario.

Para analizar de forma integral la relación existente entre el aeropuerto y su entorno, es necesario caracterizar la población afectada por las emisiones gaseosas y acústicas producidas por las plantas de poder de las aeronaves que operan en el aeropuerto, estudiar la relación con las servidumbres aeronáuticas, específicamente las superficies limitadoras de obstáculos (SLOs); y la posibilidad de accidentes en el entorno inmediato.

## Referencias

- Alba, S. O., & Manana, M. (2016). Energy research in airports: A review. *Energies*, 9(5), 1–19. <http://doi.org/10.3390/en9050349>
- Alejandro, D. B., Coppa, M., & Tomassini, N. (2014). Análisis comparativo de operaciones en el ciclo LTO en distintos aeropuertos en la región SAM. *SITRAER 2014 – Air Transportation Symposium*, Brazilian Air Transportation Research Society (SBTA), 16.
- Barrett, S. R. H., Britter, R. E., & Waitz, I. a. (2010). Global mortality attributable to aircraft cruise emissions. *Environmental Science and Technology*, 44(19), 7736–7742. <http://doi.org/10.1021/es101325r>
- Boeing. (2005). Airport Planning - Boeing 737.
- Boeing. (2013). *Current Market Outlook 2013 –2032*.
- Brander, A. M., Sood, A., Wylie, C., Haughton, A., Lovell, J., Reviewers, I., & Davis, G. (2011). Electricity-specific emission factors for grid electricity. *Ecometrica*, (August), 1–22. <http://doi.org/10.13044/j.sdewes.2014.02.0030>
- Brasseur, G. P., Cox, R. a., Hauglustaine, D., Isaksen, I., Lelieveld, J., Lister, D. H., ... Wiesen, P. (1998). European scientific assessment of the atmospheric effects of aircraft emissions. *Atmospheric Environment*, 32(13), 2329–2418. [http://doi.org/10.1016/S1352-2310\(97\)00486-X](http://doi.org/10.1016/S1352-2310(97)00486-X)
- Coppa, M., D’Iorio, J. I., Di Bernardi, A., & Tomassini, N. (2015). Análisis operacional y el impacto gaseoso del ciclo LTO en distintos aeropuertos europeos. *V Congreso de La Red Iberoamericana de Investigación En Transporte Aéreo* /, 15.
- Di Bernardi, A., Coppa, M., & D’Iorio, J. I. (2014). Contaminación acústica y gaseosa en el Aeropuerto Internacional de Guarulhos y su impacto en la planificación de usos del suelo. In *SITRAER– Air Transportation Symposium*. São Paulo, Brazil.
- Eyers, C. J., Norman, P., Middel, J., Plohr, M., Michot, S., & Atkinson, K. (2004). AERO2k Global Aviation Emissions Inventories for 2002 and 2025 Administration page. *Aviation*.
- Fan, W., Sun, Y., Zhu, T., & Wen, Y. (2012). Emissions of HC, CO, NO<sub>x</sub>, CO<sub>2</sub>, and SO<sub>2</sub> from civil aviation in China in 2010. *Atmospheric Environment*, 56(x), 52–57. <http://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.03.052>
- Flightglobal Consultancy. (2015). *Flightglobal Fleet Forecast 2015-2031*.
- Hannah, J., Hettmann, D., Rashid, N., Saleh, C., & Yilmaz, C. (2012). Design of a carbon neutral airport. *2012 IEEE Systems and Information Engineering Design Symposium, SIEDS 2012*, 40–45. <http://doi.org/10.1109/SIEDS.2012.6215125>
- Heywood, J. B. (1998). *Internal Combustion Engine Fundamentals*. McGraw-Hill.
- Horstmeier, T., & Haan, F. De. (2001). Influence of ground handling on turn round time of new large aircraft. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, 73(3), 266–271.

- <http://doi.org/10.1108/00022660110390677>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2006). *IPCC 2006 Guidelines for National Greenhouse Gas*.
- International Civil Aviation Organization (ICAO). (n.d.). Carbon Emissions Calculator. Retrieved from <http://www.icao.int/environmental-protection/Pages/Caep.aspx>
- International Civil Aviation Organization (ICAO). (2007). *Doc. 9884 Orientación sobre derechos por emisiones de las aeronaves relacionados con la calidad del aire local*.
- International Civil Aviation Organization (ICAO). (2008a). *Annex 16 Environmental Protection - Volume II: Aircraft Engine Emissions* (Vol. II). Retrieved from <http://www.icao.int/environmental-protection/Pages/Caep.aspx>
- International Civil Aviation Organization (ICAO). (2008b). *Carbon Emissions Calculator*. Retrieved from <http://www.icao.int/environmental-protection/Pages/Caep.aspx>
- International Civil Aviation Organization (ICAO). (2011). *Doc 9889: Airport air quality manual* (Vol. 1). Retrieved from <http://www.icao.int/environmental-protection/Pages/Caep.aspx>
- International Civil Aviation Organization (ICAO). (2013). *2013 Environmental Report : "Destination Green."* Retrieved from <http://www.icao.int/environmental-protection/Pages/Caep.aspx>
- International Civil Aviation Organization (ICAO). (2015). ICAO Aircraft Engine Emissions Databank. Retrieved from <http://www.icao.int/environmental-protection/Pages/Caep.aspx>
- International Civil Aviation Organization (ICAO). (2017). *Annex 16 - Vol III - Aeroplane CO2 Emissions* (Vol. III).
- International Organization for Standardization. (2006). ISO 14064-1 Greenhouse gases - Specification with guidance at the organizational level for quantification and reporting of greenhouse gas emissions and removals, 2006, 32. <http://doi.org/10.5194/acpd-14-11895-2014>
- Jardine, C. (2009). Calculating the carbon dioxide emissions of flights. *Final Report by the Environmental Change ...*, (February). Retrieved from [http://airport-attorneys.com/files/jardine09\\_carboninflights.pdf](http://airport-attorneys.com/files/jardine09_carboninflights.pdf)
- Kenney, K. B. E. M., Fowler, C., Ratte, M., Sanford, P., Pringle, P., Sequeira, F. A. A. C., & Didyk, N. (2014). *Aviation Emissions and Air Quality Handbook Version 3*.
- Kilkiş, B. (2014). Energy consumption and CO2 emission responsibilities of terminal buildings: A case study for the future Istanbul International Airport. *Energy and Buildings*, 76, 109–118. <http://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.02.049>
- Lee, D. S., Fahey, D. W., Forster, P. M., Newton, P. J., Wit, R. C. N., Lim, L. L., ... Sausen, R. (2009). Aviation and global climate change in the 21st century. *Atmospheric Environment*, 43, 3520–3537. <http://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.04.024>
- Lefebvre, a. H. (1983). Fuel Effects on Gas Turbine Combustion. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 5(4). [http://doi.org/10.1016/0142-727X\(84\)90057-2](http://doi.org/10.1016/0142-727X(84)90057-2)
- Macintosh, A., & Wallace, L. (2009). International aviation emissions to 2025: Can emissions be stabilised without restricting demand? *Energy Policy*, 37, 264–273. <http://doi.org/10.1016/j.enpol.2008.08.029>
- Masiol, M., & Harrison, R. M. (2014). Aircraft engine exhaust emissions and other airport-related contributions to ambient air pollution: A review. *Atmospheric Environment*, 95, 409–455. <http://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.05.070>
- Olsthoorn, X. (2001). Carbon dioxide emissions from international aviation : 1950 } 2050, 7, 0–6.

- ORSNA, O. regulador del S. N. de A. (2017). Datos Claves.
- Palocz-Andresen, M. (2009). Emissions at airports and their impact at the habitat. *Periodica Polytechnica, Mechanical Engineering*, 53(1), 13–17. <http://doi.org/10.3311/pp.me.2009-1.02>
- Simone, N. W., Stettler, M. E. J., & Barrett, S. R. H. (2013). Rapid estimation of global civil aviation emissions with uncertainty quantification. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 25, 33–41. <http://doi.org/10.1016/j.trd.2013.07.001>
- Trujillo, C., Sznajderman, L., Coppa, M., D'Iorio, J. I., & Alejandro, D. B. (2017). Análisis del aporte contaminante gaseoso de los GAV en el aeropuerto de Ezeiza. *VI Congreso de La Red Iberoamericana de Investigación En Transporte Aéreo (RIDITA)*, 12.
- Vedantham, A., & Oppenheimer, M. (1998). Long-term scenarios for aviation: demand and emissions of CO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub>. *Energy Policy*, 26(8), 625–641. [http://doi.org/10.1016/S0301-4215\(98\)00021-4](http://doi.org/10.1016/S0301-4215(98)00021-4)
- Wilkerson, J. T., Jacobson, M. Z., Malwitz, a., Balasubramanian, S., Wayson, R., Fleming, G., ... Lele, S. K. (2010). Analysis of emission data from global commercial aviation: 2004 and 2006. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10, 6391–6408. <http://doi.org/10.5194/acp-10-6391-2010>
- World Health Organization. (2005). WHO air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide. *Global Update 2005 Summary of Risk Assessment*.
- Wuebbles, D., Gupta, M., & Ko, M. (2007). Evaluating the Impacts of Aviation on Climate Change. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 88(14), 157. <http://doi.org/10.1029/2007EO140001>
- Zurich Airport. (2014). Aircraft Ground Handling - Methodology and Emission Factors. *Airport Design and Operation*.