



Indicador ambiental: emisiones de CO₂ en los aeropuertos SABE, SACO, SASA, SAZB, SAZS, SAVC, SANC, SAVE de Argentina

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 [1]. 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 [2] y el Volumen III: Emisión de CO₂ de los aviones.

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 respecto a este 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_x), el monóxido de carbono (CO) y los hidrocarburos sin quemar (HC). También se reconoce que las emisiones de contaminantes secundarios (VOC_s) y el material particulado (PM) de las aeronaves pueden tener efectos locales adversos [3].

Se considera que el aire limpio es un requisito básico del bienestar. 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) [4]. 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 [5].

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 CO₂ antropogénicas es del 2%. Teniendo en cuenta la totalidad de los gases emitidos, su interacción con la atmosfera y su respectivo impacto en el cambio climático el valor alcanzado es de un 3,5% en el forzamiento radiativo mundial antropogénico. [6]. De acuerdo con distintas proyecciones de tráfico de la OACI se estima que las emisiones de CO₂ 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). [7]

La cuantificación de emisiones de dióxido de carbono, tanto en niveles crucero como en las operaciones aeroportuarias, posee un método de cálculo demostrado y aceptado [8] [9]. Se han publicado distintos estudios, presentando inventarios específicos a nivel nacional [10], como a nivel internacional en base a estimaciones de tráfico de OACI [11] [12] [13].



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% [14]. 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 [15].

La consecuencia directa del 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 del 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 (CO_2), vapor de agua (H_2O), óxidos de nitrógeno (NO_x), monóxido de carbono (CO), óxidos de azufre (SOX), hidrocarburos no quemados (HC), material particulado (PM), compuestos orgánicos volátiles (VOCs), y otros compuestos [16]. Aproximadamente, un 70% de dichas emisiones son CO_2 y un 30 % de H_2O , donde el resto de los compuestos representan menos del 1%. 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 turborreactión y turbofan con empuje superior a 26,7 kilonewtons (kN), no así a los motores turbohélice, alternativos y grupos auxiliares de energía (APU) [2]. Dicha normativa se basan en la performance de los motores en el ciclo de aterrizaje y despegue (LTO) idealizado como se muestra a continuación [3], Figura 1:

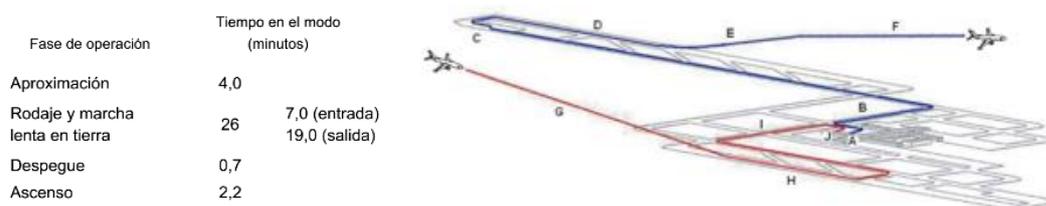


Figura 1 - Tiempos en el Ciclo LTO
Fuente: [3].

Para la determinación del impacto ambiental en el entorno aeroportuario, se define dicho ciclo como aquel que comprende las siguientes fases [3]:

- 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.

Los reglajes de empuje y tiempo en cada etapa dependen, en gran medida, de condiciones específicas como el 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 [17]-[20]. 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 [21].

De acuerdo con [3], 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.

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 [22] [23] [24], 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.

De acuerdo con las distintas metodologías desarrolladas [24] para el análisis de las emisiones producto de los vehículos de acceso a los aeropuertos, 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).

En cuanto al servicio o asistencia en tierra a las aeronaves (denominados Ground Support Equipment- GSE) se engloban 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. Estos 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 [25]. Según el modelo realizado por [26], el cálculo puede ajustarse con la discretización de los tiempos según espera, conexión, servicio y desconexión con sus respectivos factores de carga. Se presenta a continuación una imagen ilustrativa de las fuentes analizadas (Figura 2):



Figura 2 - Izq: Vehículos de apoyo a las aeronaves (GSE). Der: Vehículos de acceso al aeropuerto (GAV).
Fuente: Imágenes obtenidas de la web.

En cuanto a las fuentes estacionarias 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. Sin embargo, el aporte de dichos sistemas poseen su cuota respectiva de emisiones que no pueden ser omitidas en un análisis de mayor profundidad [27].

Metodología

A continuación, se detalla el proceso para el cálculo de las emisiones de CO₂ producto de las operaciones de las aeronaves, de los respectivos GSE, los GAV y la energía eléctrica consumida para ocho aeropuertos nacionales.

- Caracterización del Aeropuerto: mezcla de tráfico, planta poder, distribución de perfiles, diarios, mensuales y anuales de operaciones. Elección del día punta del aeropuerto por el método Average day peak month (ADPM)
- 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, etc.)
- Cuantificación de las emisiones de CO₂ de cada fuente analizada para todos los aeropuertos bajo estudio. Obtención de resultados comparativos y relativos a parámetros de operaciones y pasajeros transportados.



Figura 3 - Proceso lógico de trabajo para determinar la contaminación gaseosa.



Caracterización de los Aeropuertos

A partir de la información obtenida por la UIDET: GTA-GIAI del Departamento de Aeronáutica de la Facultad de Ingeniería de la UNLP, respecto a mezcla de tráfico, consumos, entre otros se procedió a la selección de ocho aeropuertos del Sistema Nacional Aeroportuario (SNA), cabe destacar que como el objetivo del presente es la obtención de índices de CO₂ se buscó un amplio rango los parámetros de Pasajeros y Operaciones por año. Se presenta a continuación los aeropuertos seleccionados (Tabla 1):

Tabla 1- Aeropuertos bajo estudio, pasajeros/año y operaciones/año.
Fuente: desarrollado por el Autor a partir de [28]

| Aeropuerto | Ciudad, Provincia | Código ICAO | Pasajeros/año | Operaciones/año |
|---|--|-------------|---------------|-----------------|
| Aeropuerto Internacional Jorge Newbery | Ciudad de Bs. As., Buenos Aires | SABE | 13.461.580 | 126.612 |
| Aeropuerto Ing. Aeronáutico Ambrosio Taravella | Córdoba, Córdoba | SACO | 3.392.802 | 33.553 |
| Aeropuerto Internacional San Carlos de Bariloche teniente Luis Candelaria | Bariloche, Neuquén | SAZS | 1.578.312 | 14.062 |
| Aeropuerto Internacional Martín Miguel de Güemes | Salta, Salta | SASA | 1.124.812 | 12.100 |
| Aeropuerto Internacional General Enrique Mosconi | Comodoro Rivadavia, Chubut | SAVC | 679.958 | 10.197 |
| Aeropuerto Comandante Espora | Bahía Blanca, Buenos Aires | SAZB | 457.273 | 6.047 |
| Aeropuerto coronel Felipe Varela | San Fernando del Valle de Catamarca, Catamarca | SANC | 66.905 | 2.196 |
| Aeropuerto Brigadier General Antonio Parodi | Esquel, Chubut | SAVE | 51.603 | 997 |

Como se observa en la siguiente figura, existe una variedad en el tráfico de cada uno de ellos lo cual permitirá la obtención de índices de acuerdo a las Operaciones y Pasajeros transportados (Figura 4)

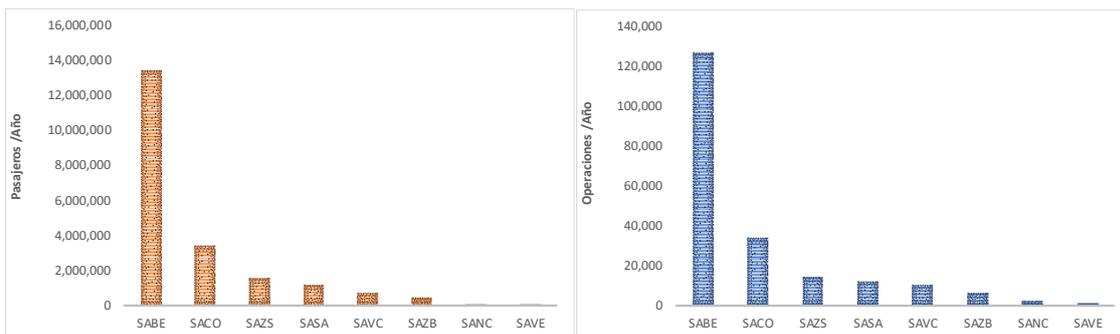


Figura 4 - Aeropuertos bajo estudio. Izq: Pasajeros/año. Der: Operaciones/año.
Fuente: desarrollado por el Autor



Figura 5 - Caracterización de las fuentes. Ejemplo: Aeropuerto Jorge Newbery (SABE).
Fuente: desarrollado por el Autor



Figura 6 - Vista aérea de los Aeropuertos de Izq. Córdoba, Der. Salta.
Fuente: Google Earth.

Emisiones de CO₂ 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 siglas en inglés *Emission index* (kg de CO₂/ kg de combustible), y flujo de combustible del motor principal - FF (kg), por sus siglas en inglés 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) [29] 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 CO₂ el EI es 3,157 [9].

La siguiente fórmula representa la base para el cálculo de las emisiones de CO₂ para una única combinación de aeronave y motor, (Ecuación 1) (2):

$$E_{ij} = \sum (TIM_{jk} * 60) * (FF_{jk}) * (E_{ijk}) * (Ne_j)$$

Dónde:

- E_{ij} = emisiones totales de contaminantes i (CO₂ en este caso), en gramos, producidas por el tipo de aeronave j para un ciclo LTO;
- E_{ijk} = índice de emisión para el contaminante i (CO₂ 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 CO₂ producto de los GSE

Para la cuantificación de las emisiones producto de los GSE, se utiliza la metodología simplificada utilizando el número de llegadas, salidas o ambas de las aeronaves según tipo de fuselaje. Es un enfoque en donde no se realiza un análisis de las operaciones de los vehículos de asistencia y utiliza los factores de emisión proporcionados por el Aeropuerto de Zúrich, Suiza [30], cuyos valores varían según el tipo de fuselaje de cada aeronave (Tabla 2).

Tabla 2 - Ejemplo de los factores de emisión del CO₂ para los GSE en el Aeropuerto de Zúrich.
Fuente: [30]

| Contaminante | Unidad | Tecnología 1990-2005 | | Tecnología 2000-2015 | |
|-----------------|----------|----------------------|----------------|----------------------|----------------|
| | | Fuselaje angosto | Fuselaje ancho | Fuselaje angosto | Fuselaje ancho |
| CO ₂ | Kg/ciclo | 18 | 58 | 20 | 48 |

Las emisiones se calculan entonces multiplicando el número de movimientos según la caracterización de las aeronaves (tipo de fuselaje) con el factor de emisión del CO₂ correspondiente (Ecuación 2):

$$Emisiones (kg) = M * fe$$

Dónde:

- fe : factor de emisión según tipo de fuselaje (kg de CO₂/ciclo)
- M : cantidad de movimientos de las aeronaves



Emisiones de CO₂ producto de los GAVs (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.

Como se mencionó previamente, 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 otorgados por Organismo Regulador del Sistema Nacional de Aeropuertos [31], en el cual se presenta la 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 (Ecuación 3):

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

Dónde:

E_{total} : total de emisiones de CO₂ en cada segmento de ruta de acceso

RL_n : longitud de ruta de acceso n

NV_n : cantidad de vehículos que transitan en la ruta de acceso n

EF_n : factor de emisión del CO₂ considerando tipo de flota vehicular, según base de datos “emission factor for green house inventories” en la ruta de acceso n

Tabla 3 - Porcentaje de modos de acceso a los aeropuertos bajo estudio.

Fuente: [31]

| Aeropuerto | Ciudad, Provincia | Taxi | Automóvil particular | Transfer | Transporte público (bus) |
|---|--|------|----------------------|----------|--------------------------|
| Aeropuerto Internacional Jorge Newbery | Ciudad de Bs. As., Buenos Aires | 61 | 23 | 10 | 6 |
| Aeropuerto Ing. Aeronáutico Ambrosio Taravella | Córdoba, Córdoba | 43 | 53 | 2 | 2 |
| Aeropuerto Internacional San Carlos de Bariloche teniente Luis Candelaria | Bariloche, Neuquén | 38 | 38 | 4 | 20 |
| Aeropuerto Internacional Martín Miguel de Güemes | Salta, Salta | 54 | 39 | 3 | 4 |
| Aeropuerto Internacional General Enrique Mosconi | Comodoro Rivadavia, Chubut | 47 | 47 | 5 | 1 |
| Aeropuerto Comandante Espora | Bahía Blanca, Buenos Aires | 47 | 47 | 5 | 1 |
| Aeropuerto coronel Felipe Varela | San Fernando del Valle de Catamarca, Catamarca | 47 | 47 | 5 | 1 |
| Aeropuerto Brigadier General Antonio Parodi | Esquel, Chubut | 47 | 47 | 5 | 1 |



Emisiones de CO₂ producto del consumo eléctrico (FE)

Siguiendo los lineamientos de la IPCC [32], 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 [33] para el cálculo de las emisiones producto del consumo eléctrico en cada aeropuerto bajo análisis. El método de cálculo aplicado consiste básicamente en (Ecuación 4):

$$\text{Emisiones (kg)} = ef * cc$$

Dónde:

- *ef*: factor de emisión del CO₂ (kg de CO₂/kWh)
- *cc*: Consumo eléctrico anual (kWh)

Al igual que ACI, se adoptó un factor de emisión aceptado y validado en distintos estudios [34], el cual surge de la matriz energética propia de cada país. El valor adoptado para Argentina es de 0.391932833 (kgCO₂/kWh).

Resultados

Se presenta a continuación los resultados obtenidos mediante la aplicación de la metodología mencionada (Tabla 4):

Tabla 4 - Toneladas de CO₂ emitidas en los Aeropuertos bajo análisis, Escenario 2018
Fuente: desarrollado por el Autor

| | SABE | SACO | SAZS | SASA | SAVC | SAZB | SANC | SAVE |
|-------------------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|
| Consumo eléctrico | 10.642 | 3.895 | 937 | 1.126 | 424 | 296 | 196 | 61 |
| GAV | 24.983 | 6.891 | 2.194 | 2.140 | 1.147 | 651 | 190 | 184 |
| Aeronaves | 328.193 | 86.643 | 43.917 | 29.398 | 15.098 | 57.744 | 6.284 | 2.013 |
| GSE | 2.208 | 631 | 276 | 237 | 205 | 473 | 39 | 19 |
| Total | 366.026 | 98.061 | 47.324 | 32.900 | 16.874 | 59.163 | 6.710 | 2.277 |

De manera comparativa se presenta en la siguiente imagen las emisiones de CO₂ de los aeropuertos bajo análisis con mayor y menor operaciones y pasajeros transportados anualmente (Figura 7).

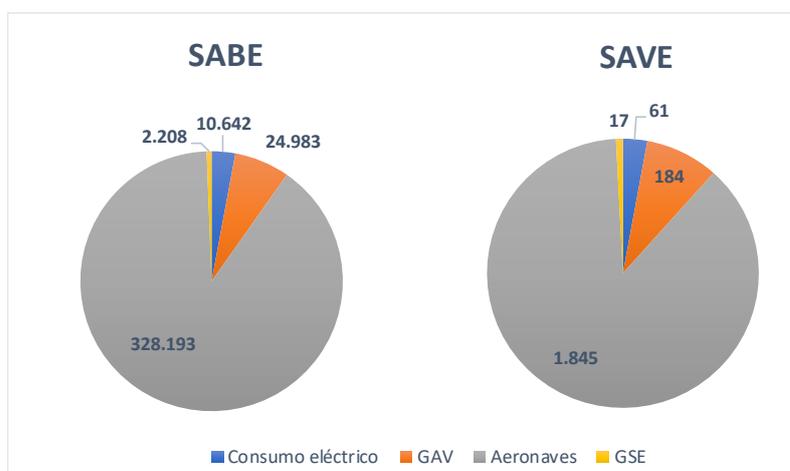


Figura 7 - Toneladas de CO₂ emitidas en Aeroparque (SABE) y el Aeropuerto de Esquel (SAVE). Escenario 2018
Fuente: desarrollado por el Autor



En la siguiente imagen se presenta los valores medios de las emisiones teniendo en cuenta las fuentes bajo análisis (Figura 8).

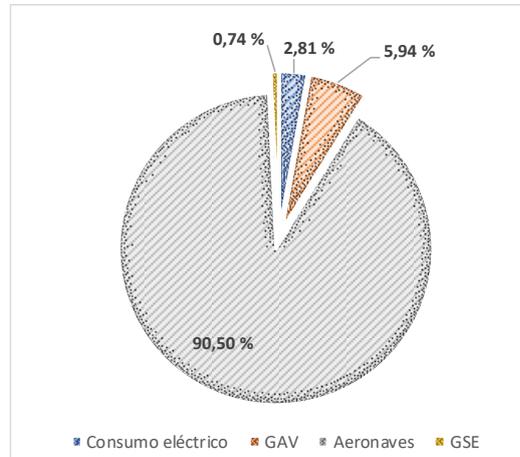


Figura 8 - Valores medios de emisión CO₂. Escenario 2018
Fuente: desarrollado por el Autor

Con el fin de obtener un índice de emisiones de CO₂ respecto a las operaciones y pasajeros transportados por año, se presenta en los siguientes gráficos un análisis comparativo para los distintos aeropuertos (Figura 9 y 10):

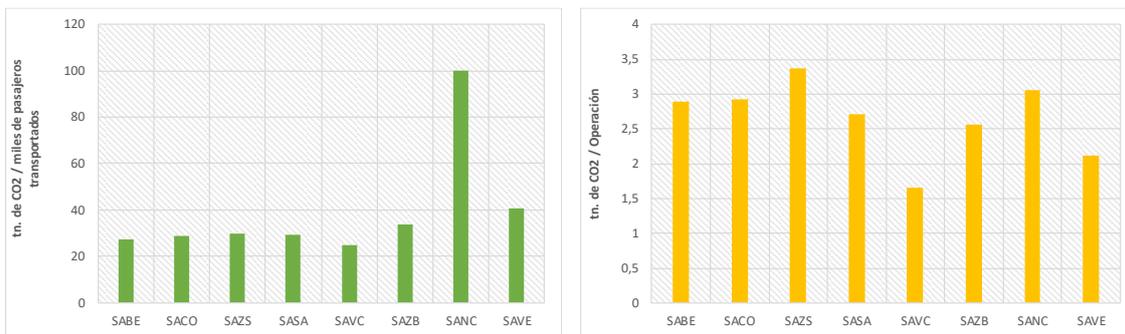


Figura 9 - Índices de emisión CO₂. Izq: según miles de pasajeros transportados. Der: según operación. Escenario 2018
Fuente: desarrollado por el Autor

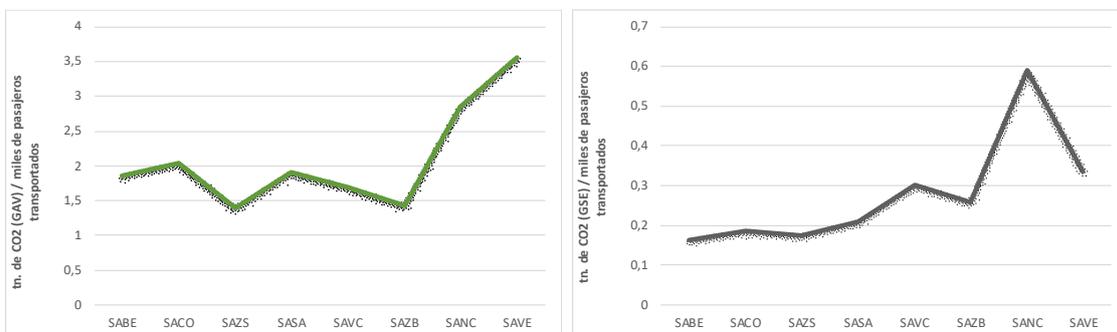


Figura 10 - Índices de emisión CO₂ según fuentes bajo análisis. Izq: GAV. Der: GSE. Escenario 2018
Fuente: desarrollado por el Autor



Conclusiones

A partir de los resultados obtenidos se puede observar como en la totalidad de los aeropuertos analizados, el aporte de dióxido de carbono debido a la operación aeronáutica ronda el 90%. Independientemente de la cantidad de operaciones, los pasajeros transportados y del tipo de aeropuerto, dicha fuente es la causa principal de las emisiones analizadas. Como se presenta en la Figura 10, únicamente en las fuentes caracterizadas como GAV y GSE se presenta un leve aumento en el índice desarrollado. Analizando los resultados obtenidos, se observa como los aeropuertos con menos de 500 mil pasajeros transportados (10 mil operaciones por año), poseen casi el doble de las emisiones en dichas fuentes.

Debido a la cantidad de variables que influyen en las emisiones de cada una de las fuentes, es difícil su completa caracterización con el fin de obtener resultados parciales que permitan obtener conclusiones a priori. Por ejemplo, es posible mejorar los resultados obtenidos analizando horarios de apertura del Aeropuerto, hay casos aquí estudiados en que el aeropuerto sólo abre unas pocas horas con el fin de abastecer una u dos operaciones por día. Si bien el análisis de 8 aeropuertos permite tener un orden de magnitud de las emisiones por fuente, es importante incluir más aeropuertos para mejorar los índices aquí desarrollados.

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. 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.

Agradecimientos

Se agradece a la Comisión de Investigaciones Científicas (CIC) de la Provincia de Buenos Aires por el financiamiento mediante beca de investigación a distintos autores del presente trabajo.

Bibliografía

- [1] International Civil Aviation Organization (ICAO), “2013 Environmental Report : ‘Destination Green,’” 2013.
- [2] International Civil Aviation Organization (ICAO), “Annex 16 Environmental Protection - Volume II: Aircraft Engine Emissions,” 2008.
- [3] International Civil Aviation Organization (ICAO), “Doc 9889: Airport air quality manual,” 2011.
- [4] World Health Organization, “WHO air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide,” *Glob. Updat. 2005 Summ. risk Assess.*, 2005.
- [5] S. R. H. Barrett, R. E. Britter, and I. a. Waitz, “Global mortality attributable to aircraft cruise emissions,” *Environ. Sci. Technol.*, vol. 44, no. 19, pp. 7736-7742, 2010.
- [6] D. S. Lee *et al.*, “Aviation and global climate change in the 21st century,” *Atmos. Environ.*, vol. 43, pp. 3520-3537, 2009.
- [7] A. Macintosh and L. Wallace, “International aviation emissions to 2025: Can emissions be stabilised without restricting demand?,” *Energy Policy*, vol. 37, pp. 264-273, 2009.
- [8] C. Jardine, “Calculating the carbon dioxide emissions of flights,” *Final Rep. by Environ. Chang.* ..., no. February, 2009.
- [9] International Civil Aviation Organization (ICAO), “Carbon Emissions Calculator.” [Online]. Available: <http://www.icao.int/environmental-protection/Pages/Caep.aspx>.



- [10] W. Fan, Y. Sun, T. Zhu, and Y. Wen, "Emissions of HC, CO, NO_x, CO₂, and SO₂ from civil aviation in China in 2010," *Atmos. Environ.*, vol. 56, no. x, pp. 52-57, 2012.
- [11] X. Olsthoorn, "Carbon dioxide emissions from international aviation : 1950 } 2050," vol. 7, pp. 0-6, 2001.
- [12] C. J. Eyers, P. Norman, J. Middel, M. Plohr, S. Michot, and K. Atkinson, "AERO2k Global Aviation Emissions Inventories for 2002 and 2025 Administration page," *Aviation*, 2004.
- [13] A. Vedantham and M. Oppenheimer, "Long-term scenarios for aviation: demand and emissions of CO₂ and NO_x," *Energy Policy*, vol. 26, no. 8, pp. 625-641, 1998.
- [14] Boeing, "Current Market Outlook 2013 -2032," 2013.
- [15] Flightglobal Consultancy, "Flightglobal Fleet Forecast 2015-2031," 2015.
- [16] a. H. Lefebvre, "Fuel Effects on Gas Turbine Combustion," *Int. J. Heat Fluid Flow*, vol. 5, no. 4, 1983.
- [17] D. B. Alejandro, M. Coppa, and N. Tomassini, "Análisis comparativo de operaciones en el ciclo LTO en distintos aeropuertos en la región SAM," *SITRAER 2014 - Air Transp. Symp.*, *Brazilian Air Transp. Res. Soc.*, p. 16, 2014.
- [18] M. Coppa, J. I. D'lorio, A. Di Bernardi, and N. Tomassini, "Análisis operacional y el impacto gaseoso del ciclo LTO en distintos aeropuertos europeos," *V Congr. la Red Iberoam. Investig. en Transp. Aéreo I*, p. 15, 2015.
- [19] A. Di Bernardi, M. Coppa, and J. I. D'lorio, "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, 2014.
- [20] M. Masiol and R. M. Harrison, "Aircraft engine exhaust emissions and other airport-related contributions to ambient air pollution: A review," *Atmos. Environ.*, vol. 95, pp. 409-455, 2014.
- [21] N. W. Simone, M. E. J. Stettler, and S. R. H. Barrett, "Rapid estimation of global civil aviation emissions with uncertainty quantification," *Transp. Res. Part D Transp. Environ.*, vol. 25, pp. 33-41, 2013.
- [22] M. Palocz-Andresen, "Emissions at airports and their impact at the habitat," *Period. Polytech. Mech. Eng.*, vol. 53, no. 1, pp. 13-17, 2009.
- [23] J. Hannah, D. Hettmann, N. Rashid, C. Saleh, and C. Yilmaz, "Design of a carbon neutral airport," *2012 IEEE Syst. Inf. Eng. Des. Symp. SIEDS 2012*, pp. 40-45, 2012.
- [24] C. Trujillo, L. Sznajderman, M. Coppa, J. I. D'lorio, and D. B. Alejandro, "Análisis del aporte contaminante gaseoso de los GAV en el aeropuerto de Ezeiza," *VI Congr. la Red Iberoam. Investig. en Transp. Aéreo*, p. 12, 2017.
- [25] T. Horstmeier and F. De Haan, "Influence of ground handling on turn round time of new large aircraft," *Aircr. Eng. Aerosp. Technol.*, vol. 73, no. 3, pp. 266-271, 2001.
- [26] L. Sznajderman, "Cuantificación del aporte contaminante gaseoso producto de las operaciones de GSE en plataforma: metodología según tiempos operativos," *CAIA V*, pp. 1-11, 2018.
- [27] B. Kilkış, "Energy consumption and CO₂ emission responsibilities of terminal buildings: A case study for the future Istanbul International Airport," *Energy Build.*, vol. 76, pp. 109-118, 2014.
- [28] O. regulador del S. N. de A. ORSNA, "Movimiento operacional de los aeropuertos del Sistema Nacional," vol. 2017, 2017.
- [29] International Civil Aviation Organization (ICAO), "ICAO Aircraft Engine Emissions Databank," 2015.
- [30] Zurich Airport, "Aircraft Ground Handling - Methodology and Emission Factors," *Airport Design and Operation*. p. 20, 2014.
- [31] O. regulador del S. N. de A. ORSNA, "Datos Claves." p. 2014, 2017.
- [32] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), "IPCC 2006 Guidelines for National Greenhouse Gas," 2006.
- [33] International Organization for Standardization, "ISO 14064-1 Greenhouse gases - Specification with guidance at the organizational level for quantification and reporting of greenhouse gas emissions and removals," vol. 2006, p. 32, 2006.
- [34] A. M. Brander *et al.*, "Electricity-specific emission factors for grid electricity," *Ecometrica*, no. August, pp. 1-22, 2011.