

## ESTUDIO DE CAPACIDAD DEL CONCEPTO DE PLATAFORMA ESPIGÓN: DIMENSIÓN OPERACIONAL Y AMBIENTAL

GABRIEL RAMÍREZ DIAZ<sup>b</sup>; JOAQUÍN PIECHOCKI<sup>a</sup>; ALEJANDRO DI BERNARDI<sup>a</sup>; GUSTAVO ALONSO<sup>c</sup>

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

<sup>b</sup>CONICET (Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas)

<sup>c</sup>Departamento de Infraestructura, Sistemas Aeroespaciales y Aeropuertos, Universidad Politécnica de Madrid, Ciudad Universitaria 28040, Madrid, España

Email: ramirezdiaz.gabriel@gmail.com

### RESUMEN:

Entre los principales aspectos sobre los cuales se enfoca la gestión del sistema aeroportuario se encuentran la capacidad operacional y el medio ambiente, los cuales históricamente, a pesar de su estrecha relación, han sido analizados a través de herramientas independientes. La bibliografía reciente reporta distintos casos en los que la capacidad del espacio aéreo es susceptible de ser mejorado a partir de contemplar ambas dimensiones de manera integrada. Sin embargo, esta clase de estudios aún no se ha hecho extensivo a los subsistemas del área de movimientos del aeropuerto.

En este contexto, el presente estudio tiene como objetivo determinar si es posible definir un diseño aeroportuario de plataforma bajo el concepto de espigón (donde las aeronaves se disponen lado a lado de la calle de rodaje de acceso a puesto de estacionamiento, y donde dicha calle cuenta con un único punto de vinculación al resto del área de maniobras) que considere conjuntamente la dimensión operacional y ambiental. Para ello se utiliza la herramienta de análisis "Airport and Airspace Simulation Model" (SIMMOD) en la evaluación del comportamiento operativo de las distintas configuraciones de plataforma, e indicadores de rendimiento medioambientales y operacionales para caracterizar la eficiencia de las infraestructuras analizadas.

### ABSTRACT

Among the main aspects focused on the airport systems management, operational capacity and environment impact, historically, have been analyzed through segregated tools. Recent literature reports several cases in which airspace capacity can be improved by considering both dimensions in an integrated way. However, this type of studies has not been extended to the subsystems of the airport movement area yet.

In this context, this study has the aim to determine if it is possible to define an airport apron design under the concept of finger apron (where aircraft are arranged side by side of the gate access taxiway, and where this taxiway has an unique point of link to the other part of maneuvering area) considering the operational and environmental dimensions together. The analysis tool used to evaluate the operational and environmental performance was "Airport and Airspace Simulation Model" (SIMMOD) and environmental and operational performance indicators.

Palabras claves: Aeropuerto, Capacidad Operacional, Medioambiente, Plataforma, Simulación.

## INTRODUCCIÓN

El estado del arte de las disciplinas de diseño aeroportuario reporta distintos casos en los que la capacidad del espacio aéreo es susceptible de optimización, a partir de contemplar la dimensión ambiental, la mezcla de aeronaves y la capacidad operacional en forma conjunta, como es el caso de estudio sobre el aeropuerto de Bologna [1]. Sin embargo, este tipo de estudios aún no se ha hecho extensivo a las componentes del área de movimientos del aeropuerto, vale decir el lado aeronáutico.

El objetivo general al cual contribuye este estudio es al desarrollo de una herramienta metodológica para la evaluación y análisis del sistema aeroportuario, considerando simultáneamente la dimensión operacional y ambiental. En particular esta última es considerada parcialmente, como punto de partida de análisis posteriores. Dado que los aeropuertos son sistemas complejos en los cuales participan un número de variables significativo, es habitual que los métodos presentes en la literatura se enfoquen sobre un aspecto en particular (operacional, ambiental, económico), y se analicen en forma parcial (por ejemplo, terminal, plataforma, calle de rodaje, pista, espacio aéreo) y desintegrada (estudiando la capacidad operativa o la ambiental). Las herramientas disponibles de simulación permiten analizar los sistemas aeroportuarios, pero de manera focalizada a una dimensión como es el caso de "Simulation Airfield and Airspace Simulation" (SIMMOD) o de "Aviation Environmental Design Tool" (AEDT).

El presente estudio procura contribuir en el sentido propuesto. Se encuentra compuesto por cuatro etapas. La primera etapa corresponde al modelado de configuraciones de plataforma de concepto espigón con distintos niveles de capacidad a través de la herramienta SIMMOD [2]. La construcción del modelo de simulación implica definir la configuración geométrica del aeropuerto, las características operativas de las aeronaves y las reglas de operación y uso de la infraestructura.

La segunda etapa consiste en la simulación de los modelos construidos y en la medición de los tiempos de demora asociados a cada configuración. La tercera etapa consistió en identificar las variables ambientales que permitan comparar las distintas alternativas de configuración de plataforma. En la cuarta etapa se combinaron la variable operacional y ambiental para generar un modelo simplificado de relación entre ellas para el caso de la plataforma, de modo tal que posibiliten la realización de evaluaciones al respecto de plataformas del tipo espigón.

## DESARROLLO

### Herramientas de análisis

En el análisis de la dimensión operacional se utilizó el software SIMMOD, que utiliza un modelo de simulación de eventos discretos el cual permite estudiar la dinámica del campo de vuelo, las rutas del espacio aéreo, las operaciones de taxeo, las secuencias de las colas de partida, entre otros eventos relacionados con la capacidad del sistema y la demora asociada a este.

Este software permite cuantificar la demora en base a las reglas operacionales condicionales incluidas en el modelo, las cuales especifican las acciones a ser tomadas por la simulación en base al estado del sistema. La demora es computada como la diferencia entre el tiempo de entrada y el tiempo de salida de la cola de cada proceso que cada aeronave lleva a cabo.

Por otra parte, a través de los reportes generados por el software es posible computar los tiempos asociados a la operación de la aeronave, estos tiempos se dividen en demora y tiempo de viaje.

La demora se define como la diferencia entre el tiempo de operación de una aeronave restringida en el acceso a uno o más servicios y el tiempo de operación sin restricciones.

El tiempo de viaje se computa como el tiempo de operación de la infraestructura en el caso en que la aeronave no se encuentra restringida

El estudio de la dimensión ambiental conlleva el análisis de diversas etapas del ciclo de vida del producto, considerando en este caso, al aeropuerto como producto es posible identificar las siguientes etapas:



Figura 1. Etapas de vida del

En el presente trabajo se consideraron las dos primeras etapas, las cuales fueron analizadas mediante software, uso de factores de emisión disponibles en la bibliografía y estimaciones empleadas en otros estudios realizados por la UIDET GTA-GIAI.

En el análisis de la dimensión ambiental se empleó el software Airport Construction Emissions Inventory Tool (ACEIT) desarrollado en el marco del Airport Cooperative Research Program por el Transportation Research Board [3], el cual permite cuantificar las emisiones de las fuentes Nonroad, Onroad y Fugitivas generadas durante la etapa de construcción.

Asociada a la construcción se encuentran las emisiones producto de la obtención de las materias primas, en este sentido se consideraron las emisiones generadas durante el proceso de fabricación del hormigón (principal insumo en la construcción de la plataforma). Las estimaciones se efectuaron a partir del factor de emisión publicado por [4, 5] el cual se basa en los lineamientos de inventario de emisiones publicados por [6].

Para la etapa de operación se estimaron las emisiones generadas por la operación de la aeronave y el handling que asiste a la misma, las emisiones generadas por las aeronaves fueron estimadas por medio de los factores de emisión del ciclo LTO [7, 8]. El aporte contaminante de los vehículos de handling se aproximó en función de resultados obtenidos en [9].

### Dimensiones de análisis

En el caso de la dimensión operacional, la principal variable desde el punto de vista de la capacidad es la demora. Esta puede ser medida para cada subsistema y segregada en arribos y partidas. Para la consideración de distintas configuraciones de plataforma (número de puestos) se observó la demora promedio generada durante la franja horaria comprendida entre el primer arribo y la última partida.

En el caso de la dimensión ambiental esta puede ser analizada a partir de diferentes variables, por ejemplo, las emisiones de las aeronaves y/o vehículos de handling durante su operación, el impacto de la construcción de la infraestructura, la generación de efluentes durante las actividades aeroportuarias, entre otros.

En el caso del presente estudio, se propuso a la superficie en plataforma como indicador del impacto ambiental, dado que el aumento de superficie en plataforma conlleva un aumento en:

- el impacto de las actividades de construcción,
- la demanda de materias primas para la ejecución de obras,
- el volumen de actividades de mantenimiento,

- la distancia recorrida por las aeronaves,
- la dispersión y arrastre de efluentes en plataforma,
- la cantidad de vehículos de handling requeridos para las operaciones,
- la distancia recorrida por los vehículos,
- la magnitud de su disposición final.

En consecuencia, la superficie de plataforma es un indicador que admite el análisis comparativo de las distintas configuraciones de plataforma cuantificando, a partir de ella, la dimensión ambiental de modo indirecto.

Por otra parte, se encuentran las emisiones producidas por la operación de la plataforma las cuales pueden ser estimadas a partir de los siguientes indicadores: tiempo promedio de operación sin restricción por aeronave, definido como tiempo de viaje, demora promedio por aeronave, número de operaciones.

Cuantificar las emisiones originadas por la operación de la plataforma requiere caracterizar un perfil de la demanda diaria y anual que permita el cálculo de los tiempos asociados a la demora y operación anual, y a partir de estos indicadores, cuantificar en forma relativa las emisiones producto de la operación durante todo el ciclo de vida de la infraestructura.

Dada la cantidad de casos posibles, en el presente estudio se caracterizó un único perfil de demanda diaria y anual, a fin de realizar una primera aproximación del desarrollo de la herramienta y poder así analizar su potencial.

En la siguiente figura se presentan las principales fases de la secuencia lógica implementada en el desarrollo de la herramienta y la interrelación entre las variables.

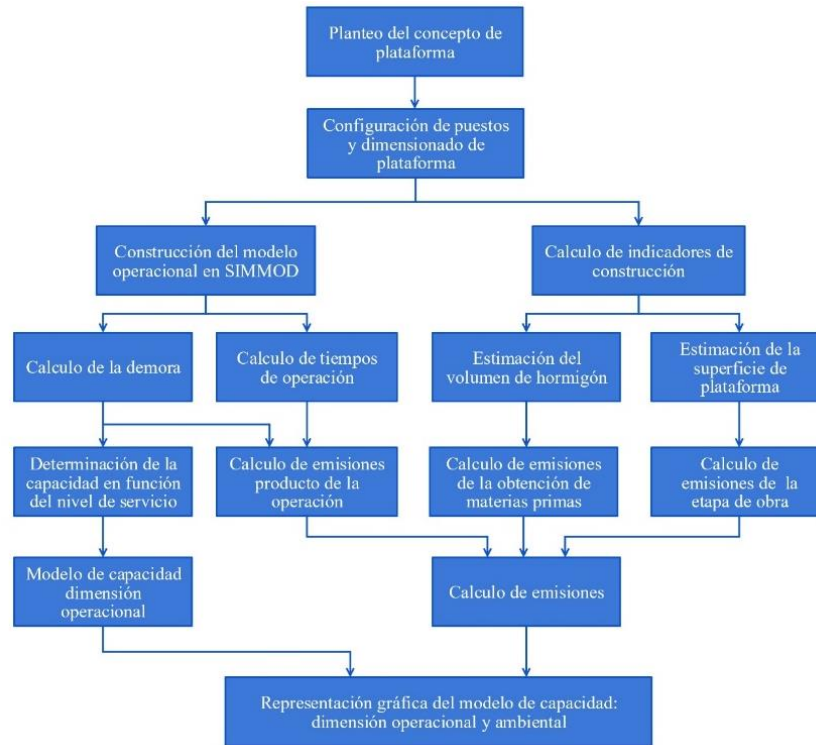


Figura 2. Procedimiento de estimación de la capacidad dimensión operacional y ambiental

### Modelado del problema - dimensión operacional

La dimensión operacional se analizó mediante el uso de la herramienta de simulación SIMMOD, la cual se utilizó para la construcción de modelos con distintas configuraciones de número de puestos de estacionamiento.

La construcción de los modelos requirió las siguientes entradas: configuración esquemática del aeropuerto, tipos de aeronaves (categoría y modelo), programación del día de diseño, reglas operativas asociadas a los procedimientos de despegue-arribo y reglas de operación asignada al uso de la infraestructura. Cada uno de estos conjuntos de información se encuentra conformado por grupos de variables.

La herramienta de simulación implica definir los principales subsistemas del aeropuerto, en este sentido, fue necesario definir más allá de la plataforma, una configuración de rodaje, pista y rutas de arribo y partida.

Se adoptó una configuración de campo de vuelo de pista única con rodaje paralelo. Este rodaje paralelo actúa como rodaje en plataforma, de este modo, el rodaje paralelo se encuentra vinculado con el rodaje de acceso a puesto de estacionamiento Figura 3.

Los puestos de estacionamiento se distribuyen a ambos lados de la calle de acceso a puesto, la cual presenta un único punto de vinculación con el resto de la infraestructura aeroportuaria (rodajes y pista), este único punto de ingreso y salida da lugar a la existencia de potenciales conflictos que repercuten significativamente en los tiempos de operación y demora.

Los puestos de estacionamiento en plataforma se encuentran dispuestos lado a lado, siguiendo los lineamientos de diseño de la FAA [10] y OACI [11] considerando los puestos con solapado del área libre de objetos. Como consecuencia la separación entre los ejes de puesto estacionamiento corresponde a la aeronave crítica considerada, B737-800.

La construcción del modelo considero la caracterización de los siguientes procedimientos operativos:

- a. Ninguna aeronave puede despegar o aterrizar si la pista se encuentra activa (otra aeronave está usando la pista).
- b. El procedimiento de remolque en salida o pushback implica el remolque de la aeronave desde el puesto de estacionamiento hasta la calle de rodaje, donde la aeronave es alineada al eje de la calle de rodaje,
- c. Las operaciones de rodaje, ingreso y salida del puesto de estacionamiento no pueden llevarse a cabo si en el puesto adyacente se está realizando la operación de pushback.
- d. Se establecieron reglas de separación mínima entre aeronaves en tierra y en aire.

Con respecto al punto d, la distancia entre dos aeronaves en tierra se estableció de modo tal que nunca sea inferior a los 100 m, excepto para las aeronaves en los puestos de estacionamiento, donde la separación entre aeronaves en la plataforma esta determinadas por las dimensiones del puesto.

Las reglas de separación en aire se basan en los mínimos aceptables por los procedimientos de seguridad operacional, asociados a la separación por estela turbulenta.

Las velocidades operativas se definieron para las etapas de aproximación, despegue y ascenso en base al tipo de aeronave, en tanto que las velocidades de taxeo se establecieron según el tipo de rodaje, de este modo, se asignaron las siguientes velocidades:

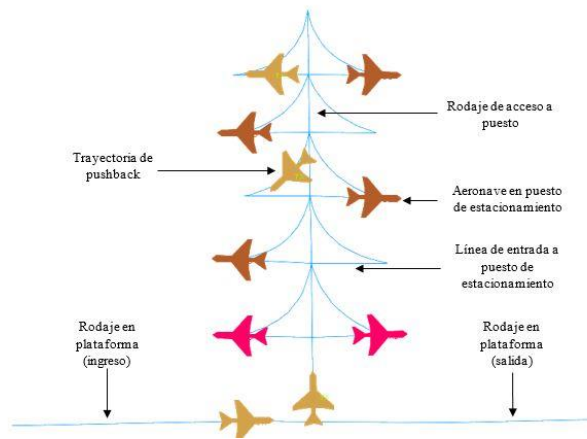


Figura 3. Representación esquemática del modelo de plataforma construidos en SIMMOD

Rodaje	Velocidad (km)
Entre pista y rodaje en plataforma	30
En plataforma	10
Acceso a puesto	5
En línea de entrada a puesto	5
En trayectoria de salida (Pushback)	4.5

Tabla 1. Velocidades asignadas según tipo de rodaje

### **Definición de distribuciones de probabilidad**

Los procesos de los sistemas de transporte aéreo están compuestos por fenómenos constituidos por cierto grado de aleatoriedad. Estos comportamientos se contemplan en el modelo utilizado a través de las distribuciones de probabilidades en tiempos de servicio y aparición de eventos discretos.

En particular, las variables afectadas fueron el tiempo de retraso en arribos, el tiempo de servicio en plataforma, el tiempo del proceso pushback y el tiempo entre la finalización del pushback y el inicio del procedimiento de taxeo de partida por parte de la aeronave.

De las variables afectadas, cabe indicar que la correspondiente al tiempo de retraso en arribos es un parámetro asociado a cada vuelo. Éste desvío se puede interpretar como el conjunto de demoras generadas en procesos no modelados generadores de la dispersión.

La caracterización de las variables constituye un tema de investigación en si mismo, a los fines del desarrollo del presente trabajo, se consideraron los estudios de referencia a [12–14] y ajustados en función de los resultados obtenidos en [15].

### **Programación de vuelos y patrón de demanda**

El desempeño de la infraestructura lado aeronáutico depende de las condiciones a la cual es sometida. Como consecuencia de las operaciones a las que sirve, se generan demoras en su uso, e impacto ambiental (de las operaciones) proporcional a dicha demanda.

Los patrones de demanda se generaron bajo la premisa de una demanda continua durante una franja de 5 horas, en el estudio se consideraron un total de tres patrones de demanda, donde la hora programada entre arribos se encuentra equiespaciada 4, 8 y 10 minutos, lo que se traduce en una demanda entre 6 y 15 operaciones hora.

La demanda se mantuvo fija para todas las configuraciones de número de puestos de estacionamiento analizadas. En relación al tiempo de servicio en plataforma se adoptó la distribución 2 presentada en [15], de este modo, el tiempo de servicio varía entre 60 y 120 minutos.

A fin de establecer una simplificación del modelo se consideró que todas las operaciones corresponden a una aeronave tipo Boeing 737-800 motor CFM56-5B4, representación de una aeronave de categoría Large (Clasificación FAA).

A fin de efectuar una comparación entre la incidencia de las distintas fuentes de emisiones, se analizó el caso donde se supone que la demanda se mantiene constante a lo largo de la vida útil de la infraestructura.

La demanda diaria responde a los tres patrones planteados, de este modo se consideran, 30, 38 y 72 operaciones día, por otra parte, se asume que el aeropuerto se encuentra operativo el 95% de los días del año.

Por último, se considera que la vida útil de la infraestructura es de 20 años.

### **Calculo de tiempos operativos**

Una vez definida la configuración básica del sistema, el cual contempla el esquema de aeropuerto (rutas, pistas, rodajes y puestos de estacionamiento), y las condiciones de contorno dadas por los procedimientos de uso de la infraestructura (desarrollada en base a patrones de operación representativos), las reglas de

separación, las velocidades operativas, la programación de los vuelos y las distribuciones de probabilidad, se simuló el sistema obteniéndose todas las salidas brindadas por el programa SIMMOD.

Las salidas relevadas del programa SIMMOD fueron, en forma particular, las demoras y los tiempos de viaje en tierra tanto en arribos como en partidas. La suma de estos tiempos constituye el tiempo de operación total. A fin de caracterizar la plataforma como un sistema modular, se contempló únicamente los tiempos de operación asociados al subsistema bajo estudio, el cual se presenta en la Figura 3.

### **Modelado del problema - dimensión ambiental**

La dimensión ambiental contemplo las emisiones generadas durante la etapa de construcción (proyecto y obtención del principal insumo empleado en la obra) y la de operación.

El cálculo de emisiones producto de la construcción de la infraestructura se realizó mediante el apoyo del software ACEIT.

El software ACEIT define tres niveles de análisis para el cálculo de las emisiones del proyecto. Los niveles de análisis son clasificados en función de los datos mínimos requeridos para el ejecutar el programa, las características de estos niveles son:

Nivel 1: Información mínima del proyecto (nombre del proyecto, duración de la obra, condiciones climáticas, actividades incluidas en la obra, costo y dimensión de la misma), en el primer nivel, el rendimiento de la mano de obra, equipamiento y materiales, se obtiene a través de factores estándar configurados por default en el programa, en este nivel las emisiones se limitan a las fuentes Onroad y Nonroad.

Nivel 2: En este nivel, es posible modificar los datos de actividad y rendimiento de las actividades y equipamientos, con el objetivo de ajustar el cálculo a las particularidades del proyecto.

Nivel 3: En este nivel se profundiza en el nivel de detalles con el objetivo de obtener una mayor exactitud en el cálculo de las emisiones fugitivas.

Dado que el presente estudio corresponde a un aeropuerto genérico, se realizó un análisis de Nivel 1, el cual requirió definir dos grupos de entradas, por un lado, las que se conservan fijas independientemente de la configuración de plataforma y, por otro lado, aquellas que depende de la configuración de plataforma.



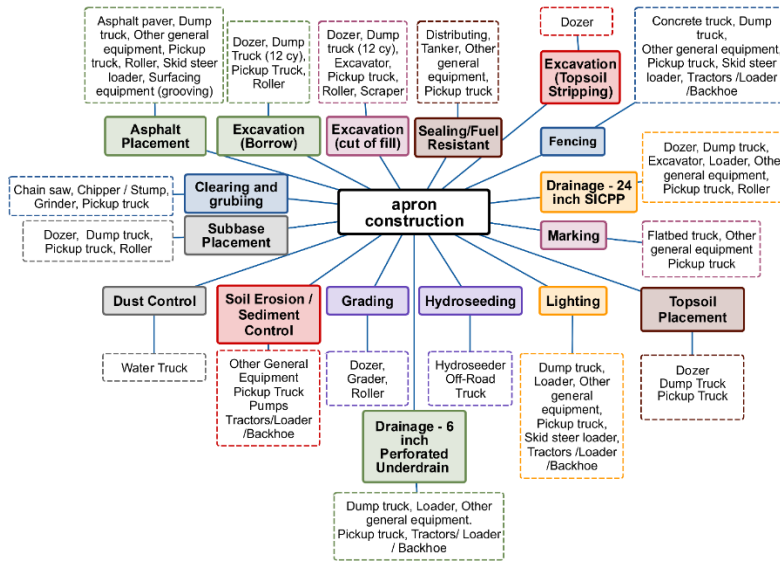


Figura 4. Construcción de plataforma: actividades y equipamiento por actividad, elaboración propia basada en [3]

En [16] se estimó el aporte contaminante producto de esta etapa, para el concepto de plataforma lineal, en dicho documento se detalla las entradas del modelo y el modo de cálculo, estos lineamientos se conservaron en el presente estudio.

Para el cálculo de las emisiones de obtención de las materias primas, se consideraron las emisiones del hormigón, basándose en lineamientos de referencia [6]. Para ello se empleó el factor de emisión publicado [5] correspondiente al hormigón tradicional, el cual equivale a 519 kg CO<sub>2</sub> emitido por m<sup>3</sup> de hormigón. El cálculo del volumen de hormigón se basó en la siguiente expresión en el producto de

la superficie de plataforma en m<sup>2</sup>, y el espesor del hormigón de la plataforma, el cual fue considerado igual a 0,35 m.

Las emisiones generadas por la operación de la infraestructura considero los factores de emisiones del ciclo LTO [8] para la aeronave de diseño B737-800 motor CFM56-5B4.

Etapa del ciclo LTO	T/O	C/O	App	Idle
CO (g/kg)	0,93	2,01	16,15	32,91
Fuel Flow (kg/s)	1,28	1,04	0,35	0,12

Tabla 2. Factores del ciclo LTO para el B737-800 motor CFM56-5B4

El factor de potencia empleado para el análisis del subsistema de plataforma se corresponde con el de taxeo, cuyo reglaje de potencial al 7% se consideró similar al de espera con motores encendidos

Los tiempos operativos empleados en el cálculo corresponde a los obtenidos mediante la herramienta de simulación operacional.

Por otra parte, una estimación del aporte contaminante de los GSE se basó en resultados obtenidos por [9], a partir de los cuales se infiere que considerar un porcentaje cercano al 21% del total de emisiones generadas por la aeronave durante el ciclo LTO, resulta en una aproximación aceptable

### **Emisiones equivalentes globales**

La construcción de una plataforma de estacionamiento de aeronaves supone la incorporación de un sistema de infraestructuras mucho más complejo del modelado, en donde sería menester considerar el ciclo de vida de cada elemento, conjuntamente con las operaciones que posibilita.

El modelo previsto incorpora una evaluación de primer orden asociado a su construcción, que es proporcional al número de puestos, y entonces a los metros cuadrados incorporados.

Por otra parte, el modelo asociado a la operación de la aeronave las emisiones varían en función del número de puestos y el patrón de demanda, por cuanto implican variaciones en los tiempos de viaje en tierra y la demora en la utilización de la infraestructura.

En caso de los vehículos de handling se prevé una variación con la demanda, el desarrollo de la infraestructura (por cuanto aumenta las distancias que deben recorrer los vehículos) y aspectos propios del modo de gestión del sistema.

Más allá de la complejidad del análisis de las variables que convergen en la incidencia del nivel de emisiones de los vehículos de handling. En base a los estudios de referencia, se estima que en una evaluación de primer orden es viable emplear una relación proporcional entre las emisiones de las aeronaves y los vehículos de asistencia.

Por otro lado, las emisiones globales de la construcción de la plataforma deberían prorratearse en la vida útil de la infraestructura, que tendrá un límite temporal y un límite en cantidad de operaciones. Esta medida permitirá establecer el aporte contaminante de cada operación en plataforma.

## **RESULTADOS**

La simulación de los diferentes escenarios permitió medir las demoras y los tiempos de viaje en cada uno de los subsistemas del aeropuerto, para el propósito de este estudio se consideraron y se presentan únicamente los asociados al subsistema de plataforma, el cual incluye el tramo de calla de rodaje definido como calle de rodaje en plataforma (ver Figura 3).

Los índices de interés fueron las demoras en tierra (dimensión operacional) y las emisiones asociadas al desarrollo y operación del sistema plataforma (dimensión ambiental). A continuación, se presentan los distintos índices como función del número de puestos de estacionamiento Figura 5 a Figura 12. La demora corresponde a la diferencia entre el tiempo de operación de una aeronave restringida en el acceso a uno o más servicio y el tiempo de operación sin restricciones. En tanto que el tiempo de viaje se computa como el tiempo de operación de la infraestructura en el caso en que la aeronave no se encuentra restringida

En [17] se presenta un análisis de la relación demora-infraestructura-demanda.

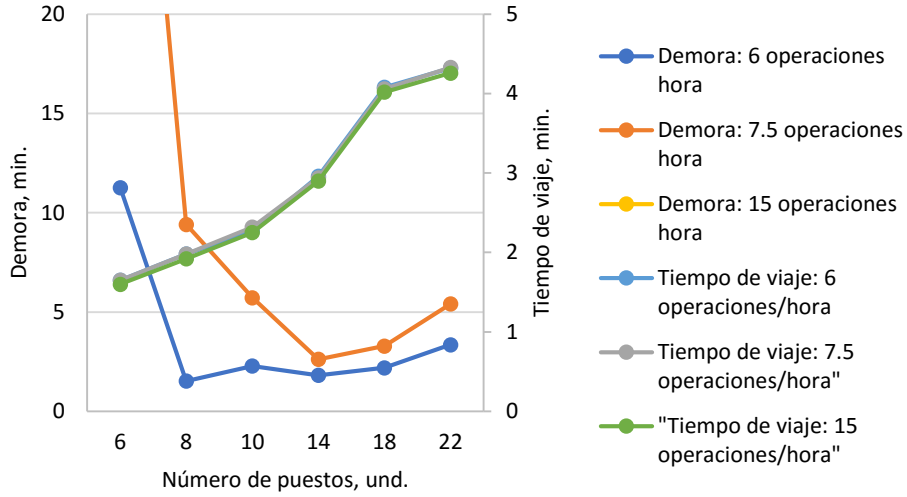


Figura 5. Demora y tiempo de viaje promedio en vuelos de arribo.

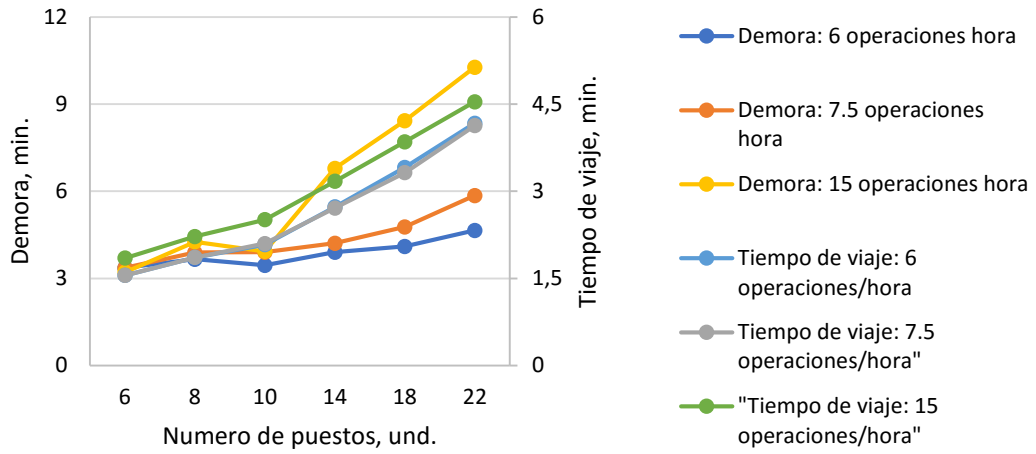


Figura 6. Demora y tiempo de viaje promedio en vuelos de partida.

En el caso de las emisiones de CO asociadas a la operación de una aeronave se observa una combinación de dos efectos, el primero de ellos generado por el tiempo de viaje y el segundo asociado al patrón de demanda y por ende a la demora inducida por este.

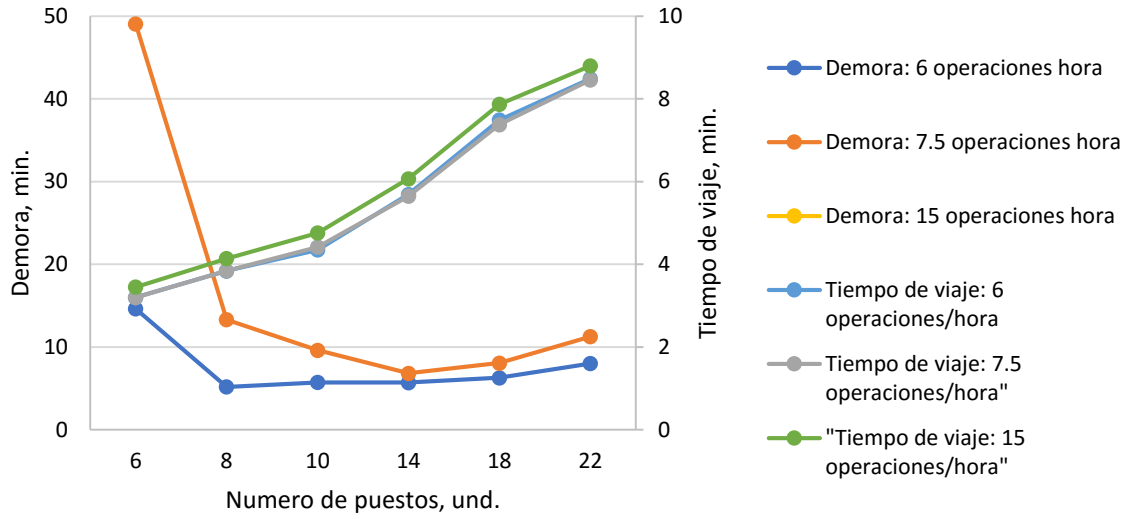


Figura 7. Demora promedio por operación (arribo + partida).

El desarrollo de la infraestructura implica un aumento de los tiempos de viaje, el tiempo de viaje aumenta proporcional al número de puestos de estacionamiento.

Por otra parte, a menor número de puestos aumenta la probabilidad de demoras y por ende, las emisiones asociadas a este aspecto presentan un comportamiento inversamente proporcional al número de puestos.

Por último, el aumento de la demanda implica un aumento significativo en las demoras, en tanto que la incidencia sobre el tiempo de viaje es mínima.

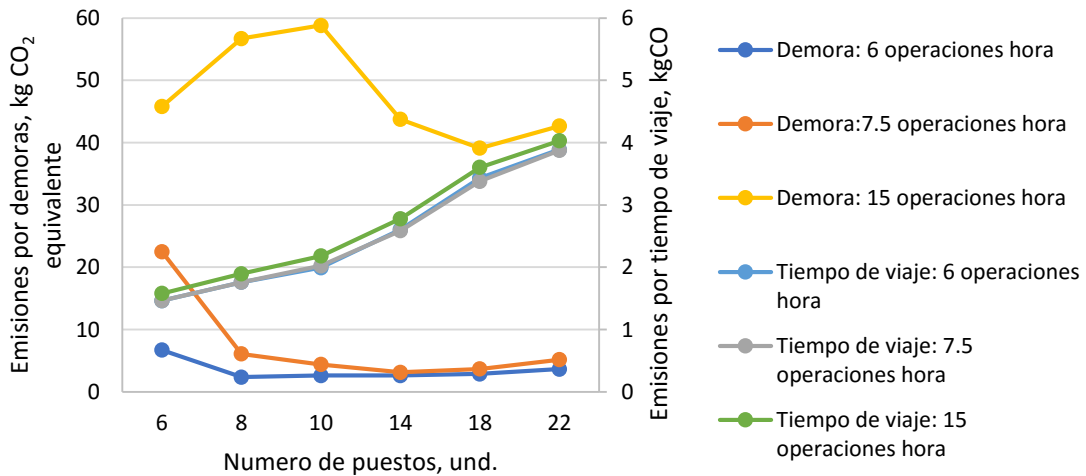


Figura 8. Emisiones promedio por operación.

En relación a las emisiones producto de la construcción (incluida la obtención de la materia prima hormigón) de la plataforma, se observa en la Figura 9 un aumento de las emisiones de dióxido de carbono equivalente proporcional a la superficie de plataforma (número de puestos de estacionamiento).

Por otra parte, se presenta en la Figura 9 las emisiones promedio totales por operación a fin de contrastar las tendencias de ambas fuentes.

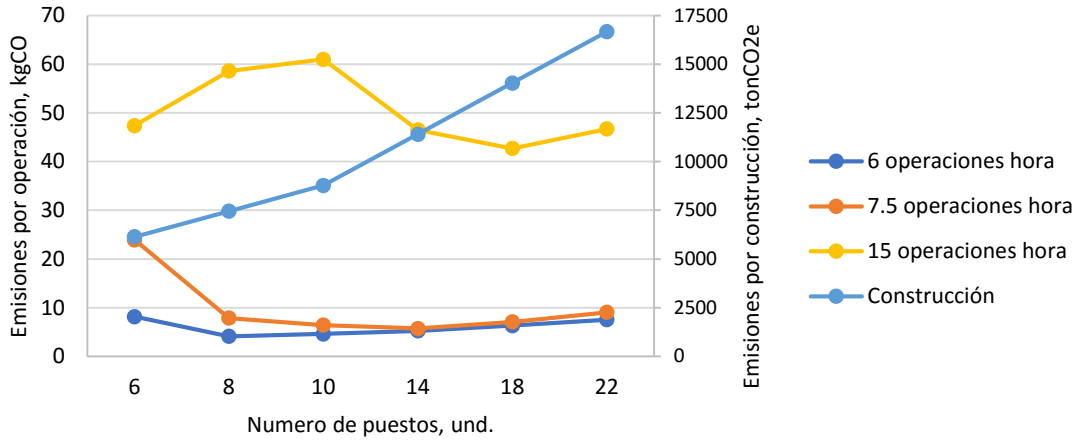


Figura 9. Emisiones promedio totales por operación y emisiones producto de la construcción.

En el caso de las emisiones asociadas al handling, se asume como valor representativo el equivalente al 21% de las emisiones totales generadas por una aeronave en un ciclo LTO, de este modo, el valor asociado a los GSE por operación turnaround, considerando como aeronave al B737-800 W con motor CFM56-5B4 es:

$$\text{Emisiones GSE} = 0.21 \times \text{Emisiones Aeronaves}$$

$$\text{Emisiones GSE} = 0.21 \times 15, 27 \text{ kgCO} = 3,05 \text{ kg CO}$$

A fin de presentar una relación de todas las variables se asumió un escenario de operaciones hipotético para representar la vida útil de la infraestructura, en base a este escenario (años de vida útil-demanda) se prorratea las emisiones originadas por la construcción.

Por otra parte, las emisiones producto de la operación de la infraestructura fueron convertidas a emisiones dióxido de carbono equivalente. En concordancia con [18] se asumió para el monóxido de carbono un factor igual a 3.

En la siguiente figura se presenta la incidencia de cada uno de los aportes para cada uno de los patrones de operación

En la Figura 10 se observa que el aporte contaminante que presenta un mayor grado de sensibilidad ante los cambios en las condiciones de la demanda y/o de la infraestructura, son las emisiones producto de la demora.

La demora aumenta exponencialmente con el aumento de la demanda, en consecuencia; las emisiones producto de la demora aumentan con igual tendencia ante el aumento de la demanda.

En la Figura 11 se presenta un ajuste en la escala de la Figura 10, a fin de evidenciar la relación de los aportes contaminantes en los escenarios operativamente viable, es decir; con niveles demora tolerable.

En la Figura 11 se observa que, dada las hipótesis asociadas al modelo de la etapa de construcción y la demanda planteada, la incidencia del aporte contaminante de la construcción resulta despreciable. Por otra parte, el desarrollo de la infraestructura conlleva un aumento en los tiempos de viaje, y por ende, en las emisiones asociadas a este parámetro.

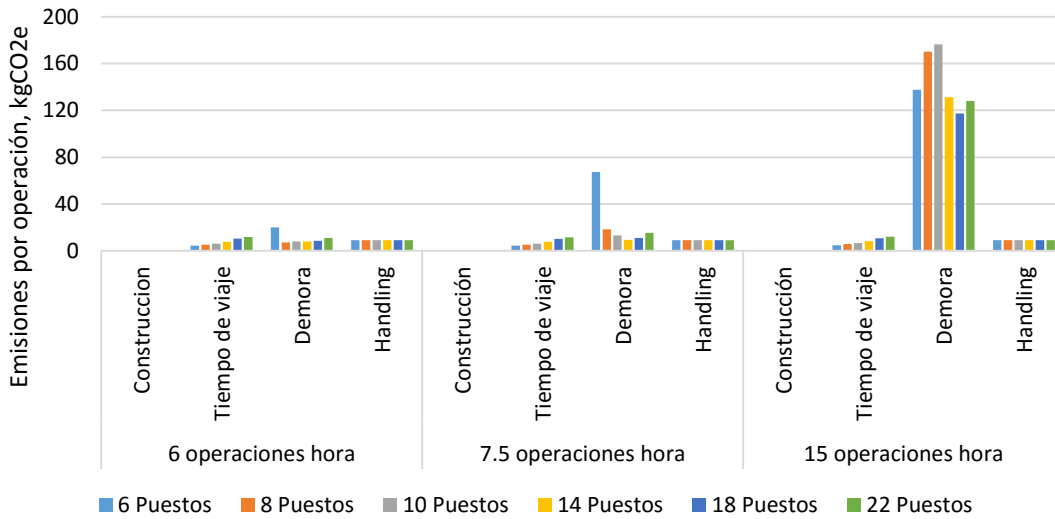


Figura 10. Emisiones promedio por operación.

En el caso del handling, dada la hipótesis realizada, no se presenta variaciones en su contribución, no obstante; se estima que el desarrollo de la infraestructura puede implicar un aumento en la incidencia del aporte contaminante, este tema es motivo de estudios particulares.

La relación observada en las figuras 10 y 11, entre los indicadores de demoras y emisiones, sugiere que para la demanda sobre la zona de plataforma de concepto espigón (una aeronave entrante cada 4 minutos) representa una condición inviable independiente del número de puestos disponibles.

En el caso de otras condiciones de demanda, ejemplo una aeronave entrante cada 8 minutos, se observa que el desarrollo de la infraestructura permite reducir los tiempos de demora significativamente, esta reducción repercute positivamente sobre las emisiones totales del sistema.

La reducción en los tiempos de demora y en consecuencia en las emisiones no se mantiene indefinidamente, el punto "óptimo" para un patrón de demanda de una aeronave entrante cada 8 minutos se encuentra en torno a las 14 posiciones de estacionamiento. A partir del punto "óptimo" se genera un aumento en la demora producto de las interferencias sobre la calle de rodaje de acceso a puesto.

Para la tercera condición de demanda, una aeronave entrante cada 10 minutos, se observa que un aumento de dos posiciones de estacionamiento (aumento de 6 a 8 posiciones) permiten una reducción significativa de

la demora, una vez alcanzado este nivel de desarrollo de la infraestructura, se observa que la mejora en la demora inducida que supone la incorporación de un nuevo puesto de estacionamiento, mejora marginal de la demora, pierde efectividad (en este caso a partir de las 8 posiciones).

En base a los resultados sobre la dimensión operacional y ambiental se considera que a partir del punto definido como “óptimo”, resulta conveniente generar un nuevo desarrollo de módulo de plataforma espigón.

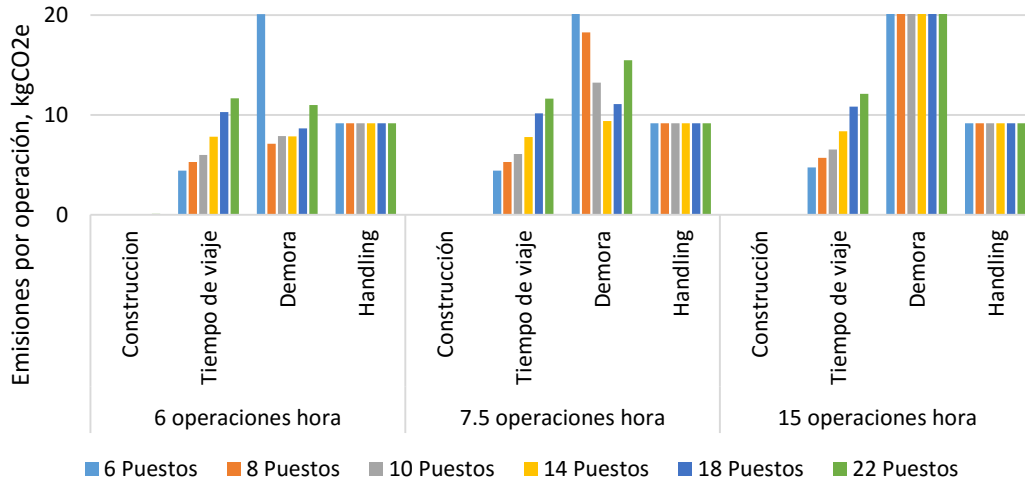


Figura 11. Emisiones promedio por operación (ajuste de escala)

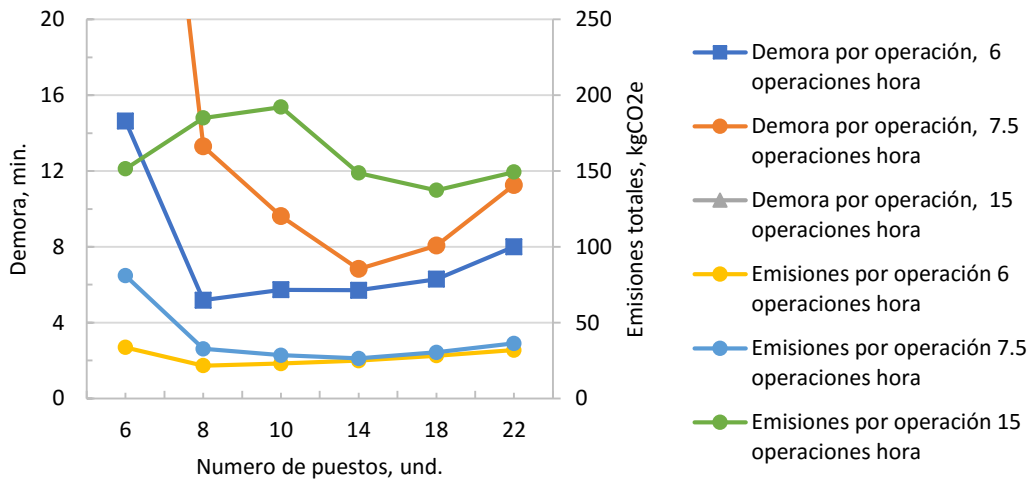


Figura 12. Relación entre cantidad de puestos-demora-demanda y emisiones totales promedio por operación.

## CONCLUSIONES

Se puede decir como conclusión que, para cada patrón de demanda y configuración de plataforma, existe un límite de ampliación de puestos de estacionamiento.

En el concepto de plataforma espigón se observa que es la dimensión operacional (demora) y en consecuencia las emisiones asociadas a ella, inviabiliza incorporar capacidad marginal a la plataforma a partir de un determinado número de posiciones, donde el crecimiento de la infraestructura deviene en un aumento de las demoras. El incremento en las demoras aun cuando se incorporan nuevos puestos es debido al aumento del tiempo de operación sobre la calle de acceso a puesto de estacionamiento. El aumento del tiempo de operación conlleva un acrecentamiento de situaciones de conflicto entre las aeronaves en arribo y partida producto de que existe un único punto de ingreso y salida para la calle de acceso a puesto.

Se observa que un leve aumento de la capacidad antes del punto de diseño sugerido permite una reducción significativa de las demoras.

Sobre el concepto de plataforma espigón pequeños aumentos en la demanda pueden implicar incrementos significativos en la demora y por ende en las emisiones producto de la misma.

Bajo las condiciones de demanda propuestas, el aporte contaminante producto de la construcción de infraestructura prorrateado a lo largo de la vida útil del sistema resulta despreciable. En este sentido, es

el aporte contaminante producto de la operación es el que principalmente penaliza el sistema.

La Figura 12 indica que es posible establecer un límite de un arribo cada diez minutos para este concepto de plataforma, frente a esta condición, el punto de diseño se encuentra entre los 8 y los 10 puestos de estacionamiento. Así mismo, se observa que para una condición de demanda superior a las 6 operaciones hora, resulta conveniente el desarrollo de un segundo módulo de plataforma espigón.

Es necesario explorar un conjunto de condiciones de demanda y operación más amplia para determinar regularidades de los comportamientos aquí observados.

El análisis de los resultados permitió concluir que es posible encontrar un punto de diseño donde la dimensión ambiental y operacional se integren obteniéndose valores equilibrados de desempeño. Este punto de diseño presenta una fuerte dependencia de las características operacionales.

Es posible establecer una metodología general de integración de variables operacionales y ambientales en torno al concepto de capacidad operativa, para evaluar la infraestructura aeroportuaria en general. El presente estudio representa un caso específico de ese cuerpo metodológico.

## AGRADECIMIENTOS

Se agradece el apoyo y el incentivo a la investigación por parte del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET).



## REFERENCIAS

- [1] N. Gualandi, L. Mantecchini, and D. Serrau, "Environmental Capacity and Sustainability of European Regional Airports: A Case Study," *World Acad. Sci. Eng. Technol.*, vol. 2, pp. 783–788, 2008.
- [2] Federal Aviation Administration (FAA), "Simmod Manual: How SIMMOD Works," pp. 1–79.
- [3] T. R. Board, "ACRP REPORT 102 Guidance for Estimating Airport Construction Emissions," 2013.
- [4] Asociación de Fabricantes de Cemento Portland, "Informe de Sostenibilidad 2011," 2011.
- [5] Instituto del Cemento Portland Argentino ICPA, "Hormigón y Pavimentos Sostenibles," 2013.
- [6] EMEP and EEA, "Air pollutant emission inventory guidebook 2016," 2016.
- [7] International Civil Aviation Organization (ICAO), "Manual sobre la calidad del aire en los aeropuertos," 2011.
- [8] International Civil Aviation Organization (ICAO), "edb-emissions-databank v23c." 2017.
- [9] L. Sznajderman, M. Coppa, J. I. D'lorio, and A. Di Bernardi, "Simulación del aporte contaminante gaseoso de CO y NOx por operación de los GSE en el Aeropuerto Internacional de Ezeiza," in *4to Congreso Argentino de Ingeniería Aeronáutica*, 2016, p. 12.
- [10] Federal Aviation Administration (FAA), "Advisory Circular: AC 150/5300-13A: Airport Design," 2014.
- [11] International Civil Aviation Organization (ICAO), Anexo 14. 2009.
- [12] C.-L. Wu and R. E. Caves, "Modelling and optimization of aircraft turnaround time at an airport," *Transp. Plan. Technol.*, vol. 27, pp. 47–66, 2004.
- [13] L. Schaefer and T. Noam, "Aircraft Turnaround Times for Air Traffic Simulation Analyses," *Transp. Res. Board*, p. 9, 2003.
- [14] W. J. Coupe, D. Milutinovi, W. Malik, and Y. Jung, "A Data Driven Approach for Characterization of Ramp Area Push Back and Ramp-Taxi Processes," *AIAA Aviat. Technol. Integr. Oper. Conf.*, no. June, pp. 1–15, 2016.
- [15] G. Ramírez Díaz, J. Piechocki, and A. Di Bernardi, "Capacidad aeroportuaria: Estudio de la influencia de las variables aleatorias sobre el lado aire mediante el uso de simulaciones computacionales," in *4o Jornadas ITE - 2017 - Facultad de Ingeniería - UNLP*, 2017, pp. 127–135.
- [16] G. Ramírez-Díaz, J. Piechocki, and A. Di Bernardi, "Análisis y diseño de una plataforma comercial aeroportuaria: Dimension operacional y ambiental," in *4to Congreso Argentino de Ingeniería Aeronáutica*, 2016, p. 12.
- [17] G. Ramírez-Díaz, J. Piechocki, A. Di Bernardi, and G. Alonso, "Estudio de capacidad mediante simulación: Interacción plataforma-calle de rodaje," in *VI Congreso Internacional de la Red Iberoamericana de Investigación en Transporte Aéreo*, 2017, p. 15.
- [18] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) working group I, *Cambio climático 2013 Bases físicas Resumen para responsables de políticas, resumen técnico y preguntas frecuentes*. 2013.