



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MÉXICO



FACULTAD DE ECONOMÍA

**“MODELACIÓN ESTADÍSTICA DE LAS SALIDAS Y
LLEGADAS DEL AEROPUERTO INTERNACIONAL DE LA
CIUDAD DE MÉXICO MEDIANTE LA DISTRIBUCIÓN DE
PARETO GENERALIZADA”**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

LICENCIADO EN ACTUARÍA

PRESENTA:

FERNANDO SÁMANO BRITO

ASESOR:

DR. EN C. MIGUEL ÁNGEL DÍAZ CARREÑO

REVISORES:

DR. EN E. PABLO MEJÍA REYES

DRA. EN C.E.A. ROSA AZALEA CANALES GARCÍA

TOLUCA, ESTADO DE MÉXICO

OCTUBRE 2020

Índice

Introducción	3
Capítulo 1: Concepto básicos en el estudio de la actividad aeroportuaria	8
1.1) La industria aérea y aeronáutica en México	8
1.2) El ambiente de las operaciones de un aeropuerto	11
1.3) Inversión en los aeropuertos	12
1.4) Características financieras de los aeropuertos	14
1.5) El modelo de negocio de los aeropuertos	16
1.6) Los ingresos y costos de un aeropuerto	17
Capítulo 2: Antecedentes y Características del Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México (AICM)	21
2.1.) Antecedentes Históricos del Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México (AICM)	21
2.2) Saturación del aeropuerto	27
2.3) Alternativas de solución	31
Capítulo 3: Metodología Estadística	44
3.1) Distribución de Pareto Generalizada	44
3.2) Método de Máxima Verosimilitud	46
3.3) Método de Momentos	48
3.4) Estimación por cuantiles	49
3.5) Aprendizaje automatizado	50
3.6) Árbol de Regresión	54
3.7) Calidad del algoritmo	57
Capítulo 4: Implementación de la Distribución de Pareto Generalizada y de un Árbol de Regresión	60
4.1) Estimación de los parámetros de la distribución de probabilidad de Pareto Generalizada	60
4.2) Comparación de los datos con una muestra aleatoria con los parámetros obtenidos	64
4.3) Implementación de un árbol de regresión con los datos de las operaciones totales del Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México	66
Conclusiones	70
Bibliografía	74

Introducción

La funcionalidad del transporte aéreo depende de una arquitectura de red compleja, donde varias instalaciones, procesos y agentes están interrelacionados e interactúan entre sí (Goedeking, 2010). En este sistema dinámico y a gran escala, los aeropuertos representan los nodos de interconexión que ayudan a la distribución de las aeronaves a través de la red, permiten la conectividad de la tripulación y los pasajeros y facilitan los cambios de transporte modal (Belobaba, Odoni, & Barnhart, 2016).

Los posibles incidentes, fallas y retrasos (debido a interrupciones del servicio, eventos inesperados o limitaciones de capacidad) pueden propagarse a través de los diferentes nodos de la red, haciéndola vulnerable (Beatty, Hsu, Berry, & Rome, 1999). Esta situación ha provocado problemas de congestión en todo el sistema y ha empeorado debido al fuerte crecimiento en el número de operaciones aeroportuarias durante las últimas décadas (Pyrgiotis, Malone, & Odoni, 2013).

De acuerdo con Gopalakrishnan (2017) una parte importante de la generación de retrasos se produce en los aeropuertos, donde la conectividad de las aeronaves actúa como un factor clave para la propagación de retrasos.

Antes de establecer una taxonomía para el nivel de saturación del sistema, un análisis estadístico de los datos nos permite observar algunas tendencias y aprender algunas lecciones sobre el comportamiento de demora y la respuesta del sistema.

Según Wu (2010) las cinco principales medidas de retardo que se consideran en el análisis del rendimiento de eficiencia de tiempo del sistema y el nivel de saturación son las siguientes:

- Retraso de llegada (retraso reaccionario)
- Retraso en el rodaje
- Retraso en la entrega
- Retraso en el rodaje
- Retraso de salida

La demora de salida se valora como la suma de la demora de llegada aguas arriba (reaccionaria) y la demora agregada en la etapa de rotación: demora del sistema (demora primaria), que se compone de demora de rodaje, respuesta y salida. Por lo tanto, se evalúan cuatro etapas mutuamente excluyentes y complementarias para caracterizar la saturación del sistema: llegada, rodaje de entrada, vuelta y salida de rodaje.

En consecuencia, los retrasos en las salidas son el resultado de varias razones, como el retraso "heredado" de la llegada, los procesos terrestres retrasados y / o las operaciones terrestres perturbadas. Existen interdependencias y pueden afectar la cadena de demoras: la demora reaccionaria existente puede resultar en una demora de seguimiento aún mayor debido a la escasez de recursos en el aeropuerto (Wu, 2010).

Cada aeropuerto tiene su manera de trabajar y, por ende, de medir la saturación. Para el caso del Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México (AICM), de acuerdo con las autoridades del mismo aeropuerto y las autoridades mexicanas (Cámara de diputados, 2009), la capacidad máxima de las instalaciones es de 34 millones de pasajeros al año (entre nacionales e internacionales); esto es, un aproximado de 2.83 millones de pasajeros totales cada mes.

La cifra anterior de la capacidad máxima mensual fue la que se utilizó el presente trabajo para medir la saturación de las instalaciones del Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México con base en sus estadísticas mensuales, haciendo la suma de pasajeros nacionales e internacionales (disponibles en: <https://www.aicm.com.mx/estadisticas-del-aicm/17-09-2013>).

La mayor consecuencia que puede tener la saturación del Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México (AICM) es que, si no hay instalaciones suficientes para poder hacer frente al número de pasajeros, habrá aerolíneas que van a optar por no acudir a este aeropuerto. Lo que provocaría una pérdida de empleos tanto directos como indirectos que son generados esta industria.

De acuerdo con la Cámara Nacional de Aerotransportes (CANAERO, por sus siglas) en su último anuario publicado (2016-2017), la aviación en México aportó un 2.9% del PIB de aquel año. Además, este sector generó aproximadamente un millón de empleos, tanto de forma directa como indirecta.

Por su parte, el Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México (AICM) se ubicó por primera vez en 2016 como el aeropuerto con mayor tráfico de pasajeros en América Latina, posición que ocupó durante varios años el Aeropuerto de Guarulhos (GRU), en São Paulo, Brasil. Asimismo, el AICM superó la marca histórica de 40 millones de pasajeros atendidos en 2016, consolidando un lustro de crecimiento por encima del 5.0% (Cámara Nacional de Aerotransportes, 2017).

Por otro lado, la Asociación Internacional de Transporte Aéreo (International Air Transport Association o IATA, por sus siglas en inglés) en el 2019 en su informe sobre el valor de la aviación mexicana, reportó que el sector de transporte aéreo en México contribuyó con 1.4 millones de empleos entre las aerolíneas, los operadores aeroportuarios, fabricantes de las aeronaves, los proveedores de servicios de navegación aérea; los proveedores locales a quienes se les compran bienes y servicios; los empleados del sector aéreo; así como también la economía local que se consume por turistas, entre otros.

De igual modo, se estimó que la industria del transporte aéreo apoyó con 37.4 mil millones de dólares al valor del Producto Interno Bruto (PIB) de México, lo se tradujo en un 3.5% del PIB total del país. Adicionalmente, la misma Asociación Internacional de Transporte Aéreo obtuvo unas previsiones en las que se estima que el mercado del transporte aéreo en México crecerá en un 104% durante los próximos 20 años. Esto significaría un aproximado de 69.7 millones de viajes de pasajeros adicionales para el año 2037. De cumplirse lo anterior, podría significar un aproximado de 76.1 mil millones de dólares para el PIB y 2.3 millones de empleos aproximadamente (International Air Transport Association, 2019).

En este contexto, los principales objetivos de este estudio son: i) Modelar, a través de una distribución de probabilidad de valores extremos, las capacidades del Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México y con ello saber cuándo se llega al punto de saturación, ii) Analizar alternativas de solución para evitar una saturación constante en el aeropuerto, iii)

Revisar las medidas que algunos aeropuertos están empleando para evitar que sus instalaciones se vean saturadas, así como iv) Proponer un árbol de regresión para saber, de acuerdo con las llegadas de pasajeros nacionales e internacionales, si habrá o no saturación en el aeropuerto.

Debido a la naturaleza de los datos, hablando del fenómeno de saturación, una aproximación a una distribución de probabilidad sería la distribución de Pareto Generalizada. Lo anterior se debe a que dicha distribución, al ser de cola pesada, permiten modelar datos de un fenómeno que presente un exceso; particularmente, cuando se excede un límite o una cierta cantidad. En este caso, la saturación al verla como el exceso de las capacidades máximas de un aeropuerto, se puede modelar con la distribución de Pareto Generalizada.

Por su parte, la hipótesis a contrastar en esta investigación considera que las operaciones totales entre llegadas y salidas del AICM pueden ser analizadas estadísticamente a partir de la distribución de probabilidad de Pareto Generalizada y Árboles de Regresión.

De esta forma, el contenido de esta tesis se distribuye de la siguiente manera. En el capítulo uno se describe el ambiente y la naturaleza de las principales operaciones que se realizan dentro de un aeropuerto, así como también de cuáles son sus características financieras y el tipo de inversión que se debe de hacer en instalaciones de este tipo. Además se aborda el tema de los ingresos y costos, de forma general, que tiene un aeropuerto.

En el capítulo dos se presenta el contexto histórico de la industria aeroportuaria en México y del mismo AICM, así como también su evolución (los principales cambios que ha sufrido hasta ser el aeropuerto que es conocido en este Siglo XXI) y la situación de saturación en la que ha incurrido con el paso del tiempo. Por último, se exponen algunas medidas estudiadas para remedir la problemática de saturación a la que se ha enfrentado. La mayoría de ellos basados en simulaciones computacionales.

En seguida en el capítulo tercero se tratan los principales conceptos en torno a la distribución probabilística de Pareto Generalizada, así como la manera en que pueden ser estimados sus parámetros, una vez que esta es ajustada a partir de un conjunto de datos (se consideran diferentes técnicas para dicha estimación paramétrica). Adicionalmente, se describe la

técnica de árboles de regresión para ciertos fenómenos que pueden ser pronosticados y el proceso de aprendizaje automatizado.

En el capítulo cuatro se aplica la Distribución de Pareto Generalizada, así como la técnica del Árbol de Regresión sobre los datos del total de llegadas y salidas de pasajeros tanto nacionales como internacionales del AICM. Lo anterior a partir de considerar una muestra aleatoria de la distribución de Pareto Generalizada y, posteriormente, la estimación de un Árbol de Regresión para el caso de estudio y con ello estimar si, de acuerdo con los pasajeros totales, habrá saturación o no en el aeropuerto.

Finalmente se establecen las conclusiones donde se presentan los principales resultados de la investigación correspondiente a esta tesis.

Capítulo 1: Conceptos básicos en el estudio de la actividad aeroportuaria

1.1) La industria aérea y aeronáutica en México

La industria aérea y aeronáutica es considerada como una de las principales actividades de las economías de los diversos países alrededor del mundo. A su vez, esta industria tiene un gran impacto sobre aquellas con las que se relaciona como lo que pueden ser las aerolíneas, las empresas transportistas, así como el sector del turismo, entre otras; sin embargo, no solo estas se ven beneficiadas sino que, en otras ocasiones, también se puede ver afectada por la operación de estas otras actividades productivas.

A nivel mundial la industria aérea y aeronáutica resulta fundamental en el crecimiento económico de varios países, por ejemplo, dicha industria aporta aproximadamente 2.7 billones de dólares al PIB mundial y genera cerca de 62.7 millones de empleos en todo el mundo. En los siguientes 20 años, se estima que la industria del transporte aéreo generará cerca de 100 millones de empleos y aportará aproximadamente seis billones de dólares al PIB mundial (Air Transport Action Group, 2017).

Los empleos que se generan en la Industria Aérea, en promedio, son alrededor de 3.6 veces más productivos que otros empleos (esto de acuerdo con estudios de Oxford Economics en compañía con el Grupo de Acciones sobre el Transporte Aéreo). En la región de América Latina y el Caribe los mayores beneficios directos en materia de empleo son para las economías locales, especialmente aquellos relacionados con negocios en el aeropuerto.

De acuerdo con la Cámara Nacional de Aerotransportes (CANAERO, por sus siglas) en su último anuario publicado (2016-2017), la aviación en México aportó un promedio de 2.9% del PIB de aquellos años. Además, este sector generó aproximadamente un millón de empleos, tanto de forma directa como indirecta.

Por su parte, el Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México (AICM) se ubicó por primera vez en 2016 como el aeropuerto con mayor tráfico de pasajeros en América Latina, posición que ocupó durante varios años el Aeropuerto de Guarulhos (GRU), en São Paulo, Brasil. Asimismo, el AICM superó la marca histórica de 40 millones de pasajeros atendidos

en 2016, consolidando un lustro de crecimiento por encima del 5.0% (Cámara Nacional de Aerotransportes, 2017).

En 2016, el turismo de internación por vía aérea representó el 80.2% del ingreso total de divisas por parte de visitantes internacionales al alcanzar 15,704 millones de dólares. La tasa de crecimiento promedio del ingreso de divisas de los turistas aéreos ha sido del 10.5% durante los últimos cinco años de acuerdo con Oxford Economics y el Grupo de Acciones sobre el Transporte Aéreo (Air Transport Action Group, 2017).

De igual modo, uno de los principales retos que tienen tanto la industria aérea como los gobiernos de los diferentes países es aquel referente al desarrollo de la infraestructura y las instalaciones aeroportuarias. Lo anterior debido a que esto es uno de los principales factores involucrados en distintos beneficios tanto económicos como sociales para la nación; así como también para todas aquellas partes encargadas en tareas como el diseño, la planeación, aprovechamiento y administración del aeropuerto.

Sin embargo, el inevitable desarrollo conlleva uno de los principales problemas a los cuales tiene que hacerse frente: el incremento de la demanda. En este caso, se habla del incremento en la demanda de transporte aéreo.

Según estudios de la *Airports Council International (AIC)* realizado en el año 2014 el crecimiento de la demanda de tráfico aéreo presenta una tendencia al alza. De hecho, se estima que el tráfico aéreo de pasajeros se ha duplicado durante el período comprendido entre 2005-2020, con una tasa promedio de crecimiento anual del 4.1% en lo que respecta al tráfico de pasajeros (Airports Council International)

Por su parte *Boeing*, realizó un pronóstico en uno de sus estudios sobre el mercado aéreo referente al periodo 2013-2032, reportó un estimado del crecimiento anual del 5.0% en el tráfico de pasajeros y cargo (Boeing, 2003).

Según Neufville y Odoni (2003) el sistema de pistas es uno de los temas primordiales para el diseño y planeación de los aeropuertos modernos, esto debido a que la capacidad máxima de la pista será la que determinará la capacidad final del aeropuerto.

Lo anterior puede ser el caso del Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México (AICM), el cual a lo largo de su historia y sus 60 años de operación ha tenido que sufrir algunas modificaciones en su infraestructura debido al crecimiento constante en sus operaciones.

La Dirección General de Aviación Civil (DGAC), ahora Agencia Federal de Aviación Civil, reportó que durante el segundo trimestre del año 2013 el Aeropuerto Internacional Benito Juárez de la Ciudad de México se encontraba saturado en 8 horarios de operación de despegue y aterrizaje (también denominados, *slots*).

De acuerdo con la legislación mexicana en materia de aviación (Cámara de diputados, 2009), la saturación aeroportuaria sucede cuando se rebasa el número máximo de operaciones o solicitudes que pueden ser atendidas en un aeropuerto, tanto en su campo aéreo (área de operaciones), como en sus edificios terminales.

Por otro lado, de acuerdo con el Reglamento de la Ley de Aeropuertos en su artículo 100, se considerará que un aeropuerto se encuentra saturado cuando sucedan los siguientes supuestos:

I. Cuando en el campo aéreo, en más de 52 ocasiones en el año y en una hora determinada, se rebasa el número máximo de operaciones o solicitudes que pueden ser atendidas; o, se demora el aterrizaje o despegue de aeronaves.

II. Cuando en el edificio terminal, en más de 25 ocasiones en el año durante una hora determinada, se registra una demanda superior al número de pasajeros que se pueden atender o se rechacen solicitudes de aterrizaje o despegue a consecuencia del número de pasajeros que pueden ser atendidos.

Algunos modelos, como el propuesto por Joseph Herbert (1997) se centran en el desarrollo de implementación de un modelo para el proceso de llegada o despegue; modelo que sirvió para estudios posteriores como el de Lian (2019) el cual se centra en la predicción de los denominados “*taxi-out*” (que es el tiempo que transcurre entre que la aeronave abandona la puerta de embarque y el despegue). Ambos se basan en una premisa sobre que la demanda de llegadas es representada por un Proceso de Poisson no homogéneo., mientras que los

tiempos de servicio son modelados mediante una mezcla apropiada de estaciones exponenciales.

1.2) El ambiente de las operaciones de un aeropuerto

La industria aeroportuaria es una actividad económica de suma importancia, esto debido a que sus operaciones son, típicamente, las 24 horas del día, los 365 días del año. De acuerdo con el Consejo Internacional de Aeropuertos (Airports Council International, ACI por sus siglas en inglés) reportó que en el año 2014 aproximadamente 6.7 billones de pasajeros viajaron a través de los diferentes aeropuertos del mundo, mientras que 102 millones de toneladas de cargamento fueron transportadas. En total, fueron 84.4 millones de movimientos en los aeropuertos (Airports Council International, 2015a).

Además, en el 2014 el Grupo de Acciones sobre el Transporte Aéreo (Air Transport Action Group, ATAG por sus siglas en inglés) se estimó que 470 mil personas trabajaban para las operadoras aeroportuarias, mientras que otros 4.6 millones trabajaban en tiendas minoristas, en el alquiler de automóviles, agencias gubernamentales como las aduanas, agentes de carga y trabajos de recolección y almacenamiento dentro de los aeropuertos. Cabe mencionar que estas cifras no incluyen a la cantidad de trabajos de las líneas aéreas y servicios de asistencia en tierra de los aeropuertos.

Los aeropuertos han venido evolucionando a lo largo de los años. Desde su papel original de ser parte de la fuerza de defensa aérea hasta su uso comercial de la actualidad. A pesar de que hoy en día los operadores de los aeropuertos son responsable de un conjunto de actividades (algunas de las cuales se pueden realizar por subcontratación) para satisfacer las diferentes necesidades que presentan tanto las aerolíneas como los pasajeros y las diferentes cargas que transportan; el entorno externo en el que se desarrollan estas actividades tiene un impacto significativo en la naturaleza de las mismas así como en la naturaleza financiera de los mismos aeropuertos (Graham & Morrell, Airport finance and investment in global economy, 2017).

En particular, cualquier situación relacionada con las finanzas de un aeropuerto deben de realizarse dentro de un contexto de procesos de desarrollo claves relacionados con desarrollo político, económico, ambiental y tecnológico. Según el Foro Internacional de Transporte (International Transport Forum, ITF por sus siglas en inglés) en el 2015 resaltó a la desregulación de los servicios aéreos como uno de los procesos más significativos de la industria aeroportuaria (International Transport Forum, 2015).

De acuerdo con Doganis (2010) una de las consecuencias más importantes de la desregulación es el hecho de que las aerolíneas ahora tenían una mayor libertad para elegir desde dónde y hacia dónde volaban. Muchas de ellas ahora establecían sus propias tarifas, frecuencia y capacidad de vuelos; así como también sus rutas de acuerdo con sus consideraciones comerciales. Este mismo autor, considera que este hecho alentó el crecimiento y propicio una competencia de mercado mayor entre las aerolíneas.

Luego de haber identificado algunas de las influencias que resultan clave en el entorno operativo externo de un aeropuerto, ahora el enfoque cambiaba para considerar las tendencias del tráfico de los aeropuertos. De acuerdo con Graham y Morrel (2017) el tráfico de pasajeros ha crecido de manera sustancial en las últimas décadas, reflejando con ello la tendencia dentro de la industria del transporte aéreo en general.

Tradicionalmente, las dos regiones del mundo que han sido más importantes para el tráfico aeroportuario han sido América del Norte y Europa; sin embargo, un crecimiento económico más lento y una demanda más desarrollada por completo es sinónimo de que las economías emergentes han estado tomando una parte cada vez mayor del tráfico aéreo (Airports Council International, 2015a).

1.3) Inversión en los aeropuertos

Como resultado del pronóstico de crecientes niveles de tráfico aéreo, ha habido una presión sobre la industria aeroportuaria en lo que al aumento de su capacidad se refiere. Con ello se ha invertido en infraestructura para la misma. Para enero del 2015, había más de 2,300 proyectos de construcción de aeropuertos, ya sea de expansión o proyectos de nuevo

aeropuertos identificados a lo largo del mundo, lo que representaba más de 500 mil millones de dólares (Centre for Aviation, 2015). Algunos de estos proyectos fueron por períodos muy largos, entre los que destacan México, Roma y Estocolmo.

Según Jorge-Calderon (2014) claramente la elección entre el construir nuevas instalaciones y/o expandir un aeropuerto depende de muchos factores; especialmente de la política gubernamental y de los objetivos a largo plazo que haya en relación con el desarrollo del transporte aéreo. La evaluación económica de la inversión en los aeropuertos debe de tomar en cuenta todos estos factores.

En muchas economías emergentes, de acuerdo con el Consejo Internacional de Aeropuertos (2015b), se pronostica que los niveles de tráfico aéreo serán mayores que el promedio, por lo anterior muchos aeropuertos no pueden hacer frente a los volúmenes de tráfico combinado con el deseo de usar el transporte aéreo para apoyar el desarrollo económico ha fomentado la construcción de nuevos aeropuertos o la remodelación de los ya existentes.

Por el contrario, en las economías que están más desarrolladas o más avanzadas, las dificultades para poder encontrar nuevos sitios adecuados, así como una mayor oposición debido a las preocupaciones tales como los temas ambientales a menudo son sinónimo de que expandir los aeropuertos actuales es la opción más idónea. De hecho, un análisis de grandes proyectos planificados para llevarse a cabo en el período 2014-2020 muestra que para el caso de las economías avanzadas hay 438 aeropuertos existentes y solamente 23 para nuevos aeropuertos; mientras que para las economías emergentes y en desarrollo las cifras son de 570 y 261 proyectos, respectivamente (Airports Council International, 2015b).

Sin embargo, hay quienes argumentan que dichas medidas no serán suficientes para satisfacer la demanda pronosticada. Tal es el caso de Eurocontrol (2013) quién realizó una encuesta en 108 aeropuertos europeos diferentes; estos aeropuertos eran los responsables del 83% de los vuelos europeos y se descubrió que solamente el 17% de ellos estaban planeando un aumento en la capacidad para el año 2035, medida que se consideró inadecuada para hacer frente a la demanda que se pronosticaba.

1.4) Características financieras de los aeropuertos

En primera instancia, los aeropuertos cuentan con una infraestructura fija que implica hacer una inversión a largo plazo, dicha inversión es física y financieramente “irregular” o “singular” esto debido a que dichas instalaciones no suelen tener usos alternativos.

Las instalaciones de los aeropuertos tienen costos fijos altos, esto debido a que son negocios intensivos en capital y muchos de sus costos operativos, particularmente los relacionados con seguridad, son fijos y prácticamente inevitables a corto plazo o varían poco con la magnitud de las operaciones. Por su parte, muchos de los ingresos de los aeropuertos tienden a aumentar con el aumento del volumen del tráfico. Por lo tanto, financieramente, puede ser favorable, e incluso ventajoso, que los aeropuertos manejen más tráfico si estos tienen la capacidad de hacerlo; ya que los beneficios de los ingresos pueden exceder los mayores costos; sin embargo, si el tráfico cae y los ingresos presentan pérdidas, estos pueden traducirse de forma desproporcional en ganancias reducidas (Copenhagen Economics, 2012).

Adicional a lo anterior, se sabe que los aeropuertos generan ingresos a partir de dos fuentes principales que son: la aeronáutica y la no aeronáutica. Siendo el aeropuerto comercial el que ha venido a reemplazar el modelo tradicional de un aeropuerto del sector público, cambiando con esto el equilibrio entre las fuentes de ingreso antes mencionada. Ahora los ingresos no aeronáuticos tienen una importancia mayor.

De acuerdo con Gillen (2011) los aeropuertos en general pueden ser considerados como negocios de dos vertientes, como lo pueden ser las tarjetas de crédito o los periódicos, en donde los negocios proporcionan plataformas aptas para dos conjuntos distintos de clientes, los cuales se ven beneficiados al conectarse a través de dicha red. Los aeropuertos, dice este autor, sirven tanto a pasajeros como a las aerolíneas; esta interdependencia positiva entre estos dos mercados es sinónimo de que los operadores de los aeropuertos serán incentivados para competir por el tráfico tanto de aerolíneas como de pasajeros, ya que estos influirán en sus ingresos tanto aeronáuticos como no aeronáuticos. Es decir, si los pasajeros se mantienen alejados, esto afectará directamente a las aerolíneas y las puede hacer abandonar el aeropuerto. Por otro lado, si las aerolíneas reducen o retiran los servicios que ofrece, esto

hará que el número de pasajeros se reduzca y, en consecuencia, reducirá las ventas no aeronáuticas.

Debido a que hay muchos más aeropuertos pequeños que aeropuertos grandes en el mundo (el Consejo Internacional de Aeropuertos estima que más del 80% de los aeropuertos tiene un tráfico de menos de un millón de pasajeros por año) existe una situación general en la industria donde las ganancias netas de una minoría de los grandes aeropuertos superan las pérdidas netas de la mayoría de los aeropuertos pequeños. De hecho, más del 98% de las pérdidas registradas en el año 2013 fueron para aeropuertos de tráfico con menos de 5 millones de pasajeros, mientras que un 93% fue para los aeropuertos con menos de 1 millón de pasajeros anualmente (Airports Council International, 2015b).

Los costos fijos asociados con el suministro de una gran infraestructura, como lo son pistas y terminales aéreas, son muy difíciles de cubrir hasta que se alcanza una cierta cantidad crítica de pasajeros (generalmente se dice que es de al menos 1 millón de pasajeros). Sin embargo, para algunos mercados como el caso del Reino Unido, existe evidencia contradictoria, la cual sostiene que incluso los aeropuertos pequeños pueden obtener ganancias razonables en ciertas condiciones de mercado (Starkie, 2008).

Las condiciones financieras más desafiantes para los aeropuertos más pequeños, de acuerdo con el Consejo Internacional de Aeropuertos (2015b), son una de las razones por las cuales es bastante común encontrar grupos de aeropuertos, o incluso todos los aeropuertos pequeños en operación, de una determinada región o de un determinado país operando como un solo sistema en conjunto con aeropuertos más grandes y más rentables, esto para que se subsidie de forma cruzada las pérdidas de los aeropuertos más pequeños.

Ejemplos de lo anterior se pueden encontrar en lugares como Escandinavia (quienes forman el subsidio cruzado son Avinor- Noruega, Suecia- Suecia, Finlandia - Finlandia) y en otros países como lo son Argentina, Tailandia y Malasia. En Brasil, el 73% de los aeropuertos son operados por la Organización Aeroportuaria Brasileña (Infraero), la cual informó pérdidas netas, de esas pérdidas la cifra correspondiente a la Dirección de Aeropuertos de la India fue del 74% (Airports Council International, 2015b).

1.5) El modelo de negocio de los aeropuertos

Uno de los resultados más relevantes del proceso y desarrollo de la desregulación y privatización de las aerolíneas ha sido la modificación de la estructura de toda la industria de las aerolíneas, así como la aparición de modelos de negocios de aerolíneas completamente nuevos y bastante modificados, lo que a su vez tuvo un impacto significativo en la estructura de la industria aeroportuaria.

De acuerdo con Graham (2017) la inestabilidad asociada con las aerolíneas ha resultado en una mayor incertidumbre para los aeropuertos, ya que estos han tenido que hacer frente a los diferentes modelos de negocios de las aerolíneas, así como también a la consolidación de distintas líneas aéreas y al surgimiento de nuevas redes y rutas. Para los aeropuertos, esto se ha tenido un impacto en lo que a carga aeronáutica se refiere, como también en sus ingresos y en sus costos no aeronáuticos y en la relación aerolínea-aeropuerto.

Con lo anterior ha surgido la gran red de aerolíneas como lo es British Airways, Air France, Lufthasa, Cathay Pacific y Singapore Airlines, por mencionar algunas; las cuales se concentran en operaciones de larga distancia.

Volviendo con Graham (2017), este autor menciona, acerca de las redes anteriormente mencionadas, que la consolidación de algunas redes ha traído oportunidades y desafíos a los aeropuertos. Siendo posible que se pueda brindar acceso a mercados más grandes y también la oportunidad de servir a destinos que están más alejados. Sin embargo, para poder operar como un centro eficaz para las operaciones a gran escala, los aeropuertos más importantes deben de asegurarse de que se satisfacen plenamente las necesidades de dichas aerolíneas, un ejemplo de ello, es el ser capaces de manejar todos los tipos de aeronaves y gestionar de una forma eficaz el tráfico con la confianza y la infraestructura idónea así como también con tiempos de conexión mínimos competitivos (los llamados Competitive Minimum Connect Times o MTC por sus siglas en inglés).

1.6) Los ingresos y costos de un aeropuerto

Los ingresos de los aeropuertos, como se mencionó anteriormente, se clasifican en dos categorías principales: los ingresos aeronáuticos (también llamados de aviación) y los no aeronáuticos (también llamados comerciales). Los ingresos aeronáuticos son generados directamente de la operación de las diferentes aeronaves, mientras que los ingresos no aeronáuticos son obtenidos de las actividades comerciales que se llevan a cabo dentro y fuera de la terminal. De igual modo, están los elementos no operativos, tales como ingresos por intereses, subsidios, donaciones y la desinversión de los activos que tienen los mismos aeropuertos.

En la medida en que el sector aeroportuario evolucionó de ser una empresa de servicios públicos a ser ahora un negocio comercial, con ello aumentó la participación de los ingresos que eran generados por fuentes no aeronáuticas. Este desarrollo fue más evidente en la década de los ochenta y de los noventa (Freathy & O'Connell, 1998).

Graham (2014) menciona el ejemplo de los aeropuertos europeos, en los cuales los datos de los informes anuales muestran que la proporción de los ingresos no aeronáuticos aumentó del 41% que era en 1984 a un 44% en el año 1989, 46% en 1995 hasta llegar al 50% en 1999.

Sin embargo, desde el año 2000 no parece que haya un aumento significativo en la proporción de los ingresos no aeronáuticos como en años anteriores, esto se debe a que el hecho de aumentar estos ingresos se ha vuelto mucho más difícil.

De acuerdo con el Consejo Internacional de Aeropuertos para el año 2013, la relación promedio de la industria aeroportuaria a nivel global muestra unos porcentajes de ingreso de 60-40 dividido en ingreso aeronáutico y no aeronáutico, respectivamente.

Los ingresos aeronáuticos se clasifican de acuerdo con los diferentes montos o cargos que el operador del aeropuerto debe de pagar (como lo que puede ser alguna clase de impuesto). La mayoría de los ingresos provienen de un cargo por aterrizaje o pista basado en el peso (esto con la intención de cubrir áreas como lo son la pista, calles de rodaje, iluminación y labores de rescate o incidentes por fuego) así como un cargo que depende del número de pasajeros (esto para cubrir las actividades de la terminal). El cargo de aterrizaje puede ser una cantidad

fija por tonelada (o libra, dependiendo del país), independientemente del tamaño de la aeronave, puede haber una situación más compleja en la que la carga del peso unitario aumente o disminuya a medida que aumente el peso total de la aeronave. Sin embargo, si bien un mayor peso de la aeronave tiende a causar un daño mayor en la pista y, por ende, mayores costos de mantenimiento, no todos los costos del aeródromo están ligados con el tamaño y el peso de la aeronave, pero está más que claro que las aerolíneas con aeronaves más grandes (y, por consecuencia, más pasajeros) generalmente van a estar en una mejor posición para pagar los cargos de aterrizaje que resulten más elevados de precio (Graham & Morrell, *Airport finance and investment in global economy*, 2017).

Derivado de lo anterior, ha habido un debate considerable por un período de tiempo largo sobre si las tarifas de aterrizaje de las aeronaves deberían diseñarse más para poder hacer frente a los aeropuertos que se encuentren congestionados en las pistas. Ejemplos de esto lo podemos encontrar en Levine (1969) y en Morrison y Winston (2007).

En lo que respecta a aeropuertos congestionados, una opción es tener una tarifa de aterrizaje que se base únicamente en los movimientos que se realicen, independientemente del tamaño que tenga la aeronave; ya que esto puede ser más apropiado debido a que el costo de ocupar la pista congestionada será el mismo por cada movimiento.

La Organización de Aviación Civil (International Civil Aviation Organization, ICAO por sus siglas en inglés) cuenta con un documento en donde especifica todos los servicios por los que se puede cobrar.

Dado que el servicio aeronáutico es una de las fuentes principales de ingresos aeronáuticos hay un cargo por estacionamiento que generalmente se basa en el peso de la aeronave o, es menos común, pero llega a suceder, en la envergadura de la misma. La mayoría de los aeropuertos tienen un cargo de estacionamiento gratuito, que por lo general varía de una a cuatro horas, esto para permitir que la aerolínea cambie de lugar sin cobrar (aunque esto puede no existir en aeropuertos no congestionados). Luego del período gratuito, los ingresos que se generen por estacionamiento tendrán que basarse en la ocupación por hora o por día. Otra fuente adicional de ingresos aeronáuticos puede provenir de la asistencia en tierra, esto si el operador del aeropuerto elige ofrecer dichos servicios directamente. También puede

haber otro tipo de cargos, como lo puede ser un cargo por infraestructura basada en el movimiento que se presente, el cual está destinado a cubrir el uso de instalaciones de infraestructura como áreas de facturación, clasificación de equipaje, o un cargo por iluminación. Para más detalles consultar International Civil Aviation Organization (2012).

El cargo por pasajero o cargo por servicio al pasajero (Passenger Service Charge, PSC por sus siglas en inglés) generalmente se factura en las aerolíneas, pero es presentado como un costo separado (con impuestos) en el boleto del pasajero.

El elemento relacionado con el cargo a los pasajeros se ha vuelto relativamente más importante. Hasta cierto punto los cargos relacionados con la aeronave se pueden mover como un costo fijo para la aerolínea (suponiendo que la aeronave no cambie), que se paga independientemente del volumen de tráfico, mientras que el cargo por pasajeros se puede considerar como un costo variable. Al trasladar más pero relativo al precio del pasajero, se puede decir que el operador del aeropuerto comparte más riesgos con la aerolínea (Graham, Managing Airports: An international Perspective, 2014).

Volviendo ahora con los artículos de corte no aeronáutico, nuevamente hay varias fuentes de ingreso. Generalmente el elemento más importante está estrechamente asociado con las instalaciones comerciales que se ofrecen dentro de la terminal. Por esto, el operador del aeropuerto subcontratará este tipo de instalaciones a especialistas de la industria (como lo pueden ser comerciantes minoristas, proveedores de alimentos y bebidas y empresas de alquiler de automóviles). Este tipo de ingresos a menudo se denominan como ingresos de concesión, esto debido a que estos concesionarios pagarán una tarifa por la concesión. Si los operadores del aeropuerto toman la decisión de contratar las instalaciones para el estacionamiento de automóviles, los ingresos de este también pueden incluirse en los ingresos de concesión. De lo contrario, será un elemento de ingresos separado que puede ser bastante sustancial, especialmente en aquellos países en donde el automóvil es el método de transporte predominante, como lo sería Estados Unidos y Australia, por mencionar algunos (Graham & Morrell, Airport finance and investment in global economy, 2017).

De acuerdo con Moodie International y The SAP Group (2014) los ingresos por concesiones pueden generarse de maneras distintas. Por lo general el concesionario pagará un porcentaje

de sus ventas al aeropuerto, esto debido a que a menudo se debe de acordar también un monto mínimo anual garantizado o un alquiler. Este porcentaje comúnmente varía según las categorías de los productos individuales. Al igual que con los cargos relacionados con aviones y pasajeros, el mínimo garantizado es una fuente de ingreso relativamente fija, mientras que el porcentaje de ventas es variable, por lo cual es aquí en donde el operador del aeropuerto comparte el riesgo con el concesionario. Si la garantía mínima es demasiado alta, será una carga para el concesionario y esto podría afectar su desempeño. Por lo general, la tarifa de venta para los proveedores de alimentos y bebidas oscila entre el 10 y el 20%; y, por su parte, el Estudio de Ingresos Comerciales del Aeropuerto de 2014, para 120 aeropuertos de todo el mundo mostró que dicho porcentaje resultó ser un promedio del 13% en América del Norte y de entre 19 y 23% en Europa y en Asia. Para mayores detalles, ver Moodie y The Sap Group (2014).

Capítulo 2: Antecedentes y Características del Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México (AICM)

2.1.) Antecedentes Históricos del Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México (AICM)

Resulta muy importante revisar la cronología de los acontecimientos más relevantes al problema de saturación y desarrollo del Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México, así como de su historia en general, ya que esto facilitará la comprensión de la situación actual del mismo y el análisis de las medidas ejercidas para solucionar dicha problemática, a su vez, esto nos ayudará a plantear una o varias soluciones con el objetivo de solucionar la problemática.

De acuerdo con la página del Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México (AICM), éste ha tenido diferentes denominaciones a lo largo de sus años oficiales de operación, identificándosele como Puerto Aéreo Central de la Ciudad de México, Aeropuerto Central de la Ciudad de México, Aeropuerto de México, Aeropuerto Benito Juárez y el actual, Aeropuerto Internacional Benito Juárez Ciudad de México (AIBJCM).

La actividad aérea en la Ciudad de México empezó a realizarse en 1908 en los Llanos de Anzures también conocido como los llanos de La Vaquita en donde Miguel Lebrija Urtutegui tuvo la primera experiencia en un planeador, en el mismo año también, realizó vuelos Miguel Lebrija en la Hacienda de San Juan de Dios. En 1909 los hermanos Aldasoro realizan sus primeros vuelos con planeador tanto en la hoy calle de Querétaro en la colonia Roma Sur, como en el Cerro de la Estrella. No es sino hasta el 8 de enero de 1910 cuando se empiezan a utilizar los despoblados llanos de Balbuena primeramente por Alberto Braniff quien realizó el primer vuelo de avión despegando de los antiguos llanos de éste. También el Presidente Constitucional de los Estados Unidos Mexicanos, Don Francisco I. Madero, voló durante 11 minutos sobre Balbuena en un Deperdussin piloteado por Geo Dyott, de Moisant International. Madero se convirtió en el primer Jefe de Estado del mundo en viajar en avión el 30 de noviembre de 1911 (AICM, 2020).

La primera decisión de crear una instalación aeroportuaria en el país y, particularmente, en el Distrito Federal fue tomada el 5 de febrero de 1915 por Don Venustiano Carranza, al crear la aviación militar ocupando parte de los llanos de Balbuena. Sin embargo, el aeródromo estuvo cerrado varios años a las operaciones civiles, las cuales se trasladaron temporalmente a un improvisado campo en los llanos de la actual colonia Algarín, en donde operadores aéreos como Juan Guillermo Villasana, Francisco Santarini y Felipe H. García tenían una escuela de vuelo.

Siendo hasta 1921 que la Secretaría de Comunicaciones y Obras Públicas (SCOP) otorgaría la primera concesión para el transporte aéreo de pasajeros y correo de la Compañía Mexicana de Transportación Aérea, que posteriormente sería conocida como Mexicana de Aviación. Que de acuerdo con Leyva (2011), desde 1924 se considera la empresa aérea más antigua del país y la cuarta a nivel mundial.

La necesidad de ir normando las actividades de aviación civil ocasionó que en el año de 1920 se creara la sección técnica de navegación aérea, como dependencia de la Secretaría de Comunicaciones y Obras Públicas (SCOP), esta otorgó el 12 de julio de 1921 la primera concesión para el transporte aéreo de pasajeros, correo y express a la Compañía Mexicana de Transportación Aérea (Mexicana) (AICM, 2020).

Si bien la primera reglamentación establecía que sería la entonces SCOP la que proporcionaría los campos de aterrizaje, la falta de recursos del Gobierno Federal lo imposibilitó, por lo que en algunos casos cada empresa aérea se encargó de la preparación de los campos de aterrizaje en las plazas a las que servían y en otras se contó con los apoyos de los gobiernos estatales y municipales para poder realizar las operaciones aéreas. Dicha sección alcanzó el 1 de julio de 1928, por acuerdo presidencial, la denominación de Departamento de Aeronáutica Civil. En ese mismo año, se inició la construcción del Puerto Aéreo Central de la Ciudad de México en las afueras de la ciudad, el cual arrancó operaciones el 5 de noviembre del mismo año con el aterrizaje de un biplano Hanriot pilotado por Felipe H. García. Y tan sólo para el mes de febrero de 1929 la nueva terminal empezó a proporcionar normalmente los servicios, y hasta fines de ese año oficialmente entra en operación. (AICM, 2016).

En 1936, a raíz de las adiciones realizadas a las leyes de Secretarías y Departamentos de Estado y de Vías Generales de Comunicación y Medios de Transporte, se le faculta a la SCOP para concesionar, regularizar e inspeccionar los puertos aéreos y otorgar concesiones para la radiodifusión, manteniendo la vigilancia respectiva (AICM, 2020).

En 1939, la SCOP (con la participación de Mexicana de Aviación) inauguró en los mismos terrenos de los llanos de Balbuena, lo que se conoció como Puerto Aéreo Central de la Ciudad de México, espacio destinado a la aviación civil. No sería hasta 1943 que por acuerdo del entonces presidente Manuel Ávila Camacho, el Puerto Aéreo sería declarado un lugar para la entrada y salida de servicios de transporte aéreo internacional (Leyva, 2011).

El 6 de julio de 1943 se publicó en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el decreto que declara internacional, para efectos de entrada y salida de aviones y pasajeros, al Puerto Aéreo Central de la Ciudad de México. Ese año se realizó el primer vuelo nocturno entre Mérida y la capital del país.

Posteriormente durante la administración de Miguel Alemán (1946-1952), y ante la llegada de los aviones Douglas DC-3, se llevaría a cabo la construcción de la pista 05D-23I, la torre de control y las nuevas instalaciones del edificio terminal esto con la intención de impulsar el desarrollo de la aviación. La pista entró en servicio en 1951 y el 19 de noviembre de 1952 se inauguró el inmueble (actualmente Terminal 1), fecha en que se considera que el Aeropuerto de la Ciudad de México fue inaugurado (AICM, 2020).

El despegue de las actividades de aviación civil en todo el país hace necesario que el Departamento de Aeronáutica Civil se convierta el 6 de agosto de 1952 en la Dirección de Aeronáutica Civil, a fin de dotarlo de mayores responsabilidades. De esta manera, para el 19 de noviembre de 1952 se inauguró el Aeropuerto Central. Entrando en servicio total hasta el 1 de julio de 1954 y fue necesario dotarlo de todos los equipos y sistemas para operarlo.

No obstante, tan sólo 7 años después de la inauguración del aeropuerto, en 1959 se inició la primera ampliación y reacondicionamiento de pistas, plataformas y edificio terminal, para que México estuviera en condiciones de incrustarse en lo que se conoció como la era del jet. De este modo en 1960, despegó del aeropuerto un avión Comet IVC de Mexicana con destino a

Los Ángeles, iniciando así las operaciones de aviones de retro impulso en el país en las nuevas instalaciones (AICM, 2014).

El desarrollo de las aeronaves, de la navegación aérea y de los servicios auxiliares y complementarios había ganado a la infraestructura existente en el país para la aviación, existiendo tanto aeropuertos privados como públicos. Esta situación provocó una crisis en 1964 cuando fue necesario cerrar varios aeropuertos por peligrosos.

Ante esta situación el Gobierno Federal tomó una serie de decisiones para solucionar el problema de fondo y crear los medios necesarios que garantizaran el desarrollo de la actividad y la inversión requerida para consolidarla, por lo que se pusieron en marcha varios programas, entre ellos el Plan Nacional de Aeropuertos que preveía la creación de la Dirección General de Aeropuertos en la SCOP. Sus responsabilidades asignadas fueron planear, construir y equipar todos los aeropuertos de la República Mexicana (AICM, 2016).

Es trascendental recordar en este punto lo señalado por Álvarez (2006), al mencionar que apenas transcurrida una década de la inauguración del Aeropuerto de la Ciudad de México (y después de 4 años de iniciada la era del jet en el país), en 1964 ya se había valorado nuevamente la necesidad de contar con mayor capacidad para prestar los servicios de despegue y aterrizaje de aeronaves; razón por la cual se consideró la construcción de nuevas instalaciones, planteándose la posibilidad de ubicar el nuevo aeropuerto en Zumpango, Estado de México. Incluso ya desde 1979, Texcoco había sido anunciado como la sede para dicha construcción que comenzaría a partir de 1981.

El 28 de diciembre de 1982, como resultado de las modificaciones operadas a la Ley Orgánica de la Administración Pública Federal, se suprime la Secretaría de Asentamientos Humanos y Obras Públicas (SAHOP), y se incorporaron a la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) las áreas de infraestructura que pertenecían a dicha dependencia y, las funciones relativas a la construcción, reconstrucción y conservación de las obras requeridas para el funcionamiento de los medios de transporte terrestre, aéreo y marítimo, convirtiendo a la Secretaría de Comunicaciones y Transportes en la responsable de planear y conducir el desarrollo integral de los servicios de transporte (AICM, 2016).

La misma autora Álvarez (2006) argumenta que 3 años después se elaboraron estudios que arrojaron nuevamente a Zumpango como posible ubicación, además de Cuautla, Morelos; Tizayuca, Hidalgo; y Santa Lucía en el Estado de México. Sin embargo, ninguna de las alternativas para la construcción del nuevo aeropuerto prosperó, de modo que el incremento de la demanda en el tráfico aéreo del Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México continuó su curso.

En 1989 la SCT integra las funciones y personal de la Dirección General de Aeropuertos a la estructura de Aeropuertos y Servicios Auxiliares fusionándose con la existente Subdirección de Construcción y Conservación ampliando con ello sus funciones a las de construcción de conservación de pistas, plataformas, estacionamientos, hangares y edificios terminales en los hasta ese entonces 57 aeropuertos y 2 estaciones de servicios que conformaban su patrimonio. También ASA asume la coordinación de los organismos desconcentrados Servicios a la Navegación en el Espacio Aéreo Mexicano (SENEAM) y Transporte Aéreo Federal (TAF) (AICM, 2016).

Para la década de los 90, el país se encontraba en un importante proceso de apertura comercial con la firma del Tratado de Libre Comercio (TLCAN), así como el impulso de la participación de la iniciativa privada en sectores estratégicos como lo es comunicaciones y transportes. Durante ese periodo, el Plan Nacional de Desarrollo 1989-1994, proyectaría la modernización de los aeropuertos con mayor congestionamiento en sus instalaciones, resaltando la necesidad de tomar las medidas pertinentes para resolver la demanda del tráfico aéreo del aeropuerto Benito Juárez.

Así el 13 de enero de 1994, se publicó en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el cierre temporal del AICM para las operaciones de aeronaves que no fueran de aerolíneas comerciales o militares (Diario Oficial de la Federación, 1994).

De esa manera, se facilitaron las labores de mantenimiento y operación, y el 11 de abril del mismo año el entonces presidente Carlos Salinas de Gortari inauguró las instalaciones de la Terminal Internacional del Aeropuerto de la Ciudad de México, la cual contó con ampliación en los espacios para aduana y otros servicios de carácter internacional, con una capacidad para atender hasta 6 millones de pasajeros anuales (AICM, 2014).

El sexenio inició y finalizó reconociendo la importancia de invertir en infraestructura aeroportuaria a través de la colaboración entre el Gobierno Federal y la iniciativa privada, que gracias a la firma del TLCAN podría beneficiarse de la inversión extranjera; de este modo México podría prepararse para los retos que implicaría el inicio del siglo XXI.

De acuerdo con el Libro Blanco de Aeropuertos y Servicios Auxiliares (ASA), a finales de 1999 el AICM se encontraba cerca de la saturación y los estudios que se realizaron determinaban que la mejor opción era la edificación de un nuevo aeropuerto, ya que el actual edificio estaba limitado para crecer en los alrededores. De modo que en 2000 inició el Proyecto de Ampliación de la Capacidad Aeroportuaria de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México, planteándose dos opciones de ubicación para el nuevo aeropuerto: Tizayuca, Hidalgo; y Texcoco, Estado de México, mismas que 21 años antes ya habían sido consideradas (Aeropuerto y Servicios Auxiliares).

Fue hasta 2001, cuando dos de los organismos mexicanos más importantes en el área, las Direcciones Generales Adjuntas de Nuevos Proyectos y de Asuntos Jurídicos de Aeropuertos y Servicios Auxiliares, concluyeron que era técnicamente procedente construir el nuevo aeropuerto en Texcoco.

Sin embargo, durante ese mismo año, después de que se publicaran 41 decretos en el Diario Oficial de la Federación (DOF) para la expropiación de los terrenos ubicados en los Municipios de Chimalhuacán, Atenco y Texcoco, la inconformidad por parte de los ejidatarios afectados provocó una fuerte tensión política y social alrededor del nuevo aeropuerto. Que finalmente el 5 de agosto de 2002 el Gobierno Federal abrogó los decretos de expropiación y con ello se canceló también el proyecto; pero frente a la urgencia de aumentar la capacidad del AICM, la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) en conjunto con Aeropuertos y Servicios Auxiliares (ASA), iniciaron el análisis de nuevas alternativas.

Una de las propuestas para descongestionar el AICM, que tuvo una proyección significativa durante el periodo 2000-2006, fue la construcción de un nuevo aeropuerto en Texcoco. No obstante, el proyecto no progresó y fue necesario replantear las opciones viables para hacer frente a la problemática que presentaba el aeropuerto en ese momento, dificultades que, como

ya se mencionó, han sido una constante en el desarrollo del aeropuerto más importante de México. Dichos inconvenientes tuvieron que volver a revisarse para el análisis del nuevo proyecto que ampliaría la capacidad del AICM, mismos que están acotados en el Libro Blanco de Aeropuertos y Servicios Auxiliares (ASA):

Congestionamiento de aeronaves en horas pico por insuficiencia del área operacional.

- Concentración de operaciones en el lado norte del sistema de pistas.
- Saturación en la terminal en horas pico, tanto en el área internacional como nacional, principalmente en áreas de migración, aduana, recuperación de equipaje, pre-espera y vestíbulo de bienvenida de pasajeros.

En 2003 se aprobó el Programa de Atención a la Demanda de Servicios Aeroportuarios en el Centro del País, que comprendía dos subprogramas: ampliación del Aeropuerto Benito Juárez y el desarrollo de los aeropuertos de Toluca, Puebla, Querétaro y Cuernavaca, como locaciones que conforman hasta el día de hoy el Sistema Metropolitano de Aeropuertos (ASA).

2.2) Saturación del aeropuerto

Neufville y Odoni hacen una revisión de 4 medidas de relevancia internacional para llevar a cabo la determinación de la capacidad de una pista. Dichas medidas proporcionan la cantidad estimada del número de movimientos (aterrizajes o despegues) que pueden realizarse en el sistema de pistas, durante una unidad de tiempo determinada (Neufville, 2003).

El valor arrojado es una cantidad probabilística, una variable aleatoria que arroja valores diferentes dependiendo de las circunstancias involucradas como el clima, la dirección del viento, la infraestructura aeroportuaria, y las “horas críticas” en un aeropuerto.

A continuación, se describen las referidas medidas por los autores Neufville y Odoni, (2003):

I. Capacidad máxima de rendimiento: arroja el número esperado de movimientos que pueden efectuarse en un sistema de pistas durante una hora, asumiendo una continua demanda de aviones.

II. Capacidad practica por hora: número estimado de movimientos que pueden realizarse en 1 hora sobre el sistema de pistas, con un promedio de retraso de 4 minutos por movimiento (FAA).

III. Capacidad sostenida: es el número de movimientos por hora que se consiguen realizar durante varias horas. El número de movimientos está en determinado por la capacidad máxima de rendimiento del sistema de pistas, asumiendo que trabaje a su límite todo el tiempo. Esta medida se divide en dos tipos de capacidad, una para aterrizajes y otra para despegues.

IV. Capacidad declarada: es el número de movimientos de aeronaves que pueden acomodarse en un aeropuerto por hora, estableciendo un nivel de servicio en función del retraso en las operaciones.

Estas medidas son aplicadas actualmente en la delimitación de la capacidad en un aeropuerto, decretando la saturación del sistema de pistas. La elección entre una y otra medida varía en función de la infraestructura y la gestión con la que cuenta un aeropuerto. Que, en el caso del Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México, la capacidad declarada fue la medida utilizada para establecer la capacidad máxima de operaciones posibles en su campo aéreo.

La falta de capacidad aeroportuaria suficiente para satisfacer la demanda causada por el movimiento de pasajeros y aviones, así como el consiguiente problema que se genera en la saturación de los aeropuertos y el retraso de las operaciones, se han convertido en un desafío común en los principales aeropuertos del país. Provocando un impacto en la movilidad de personas y carga. Los estudios de los sistemas de transporte aéreo muestran que los retrasos y las colas en las pistas comienzan a crecer sustancialmente cuando la demanda supera aproximadamente el 80% de la capacidad disponible del sistema. Por lo tanto, la solución al problema de la congestión del aeropuerto debería centrarse en encontrar formas de reducir la relación demanda / capacidad. Esto se puede lograr aumentando la capacidad, reduciendo la demanda o combinando ambas opciones (Hamzawi, 1992). El aumento de la relación demanda / capacidad cambia el tamaño promedio de las colas formadas por aeronaves que esperan usar las pistas del Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México (AICM). Estas estimaciones se obtuvieron mediante modelos de simulación (Herrera, 2012).

En el caso de México, corresponde a la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) supervisar el funcionamiento de los aeropuertos, los cuales se encuentran concesionados a empresas de participación pública y privada. Actualmente, el grupo Aeroportuario de la Ciudad de México S.A. de C.V. (GACM), es la empresa concesionaria que desde 1998 tiene a su cargo la administración del Aeropuerto Internacional Benito Juárez. Anteriormente había correspondido controlar su operación al organismo descentralizado ASA (AICM, 2014).

Al cierre del 2000, según datos de ASA contenidos en su Libro Blanco, el AICM había mostrado una tasa promedio de crecimiento en los últimos 8 años en el tráfico de pasajeros nacionales e internacionales de 3.41% y 5.51%, respectivamente. Hay que recordar que durante ese periodo se encontraba en ciernes la construcción de un nuevo aeropuerto ubicado en Texcoco, el cual permitiría aminorar los problemas que causaba el incremento de la demanda en el tráfico aéreo. El mismo documento refiere que ese mismo año se atendieron 28.1 millones de pasajeros y se determinó que la capacidad máxima de operaciones sería entre 320 mil y 331 mil, considerándose saturado cuándo llegará a las 350 mil operaciones.

Desde 2010 la Cámara Nacional de Aerotransportes (CANAERO) ha insistido en la urgencia de ampliar la capacidad aérea para la Ciudad de México, debido a que el control de flujo no permite la salida de vuelos originados en otros aeropuertos en función de la saturación del AICM, motivo por el que esas limitaciones detienen el desarrollo de la aviación del país.

En el cielo capitalino cada minuto surca el aire un avión. Una de las dificultades de la ampliación será que tendrían que utilizarse las mismas corrientes aéreas para las rutas de salida y entrada de aeronaves.

La situación del aeropuerto de la Ciudad de México se considera clave para el desarrollo de la región metropolitana en México y también para el desarrollo del país. El desarrollo de un Nuevo Aeropuerto en la Ciudad de México (NAICM) está en progreso. Sin embargo, debido a diferentes causas, el proyecto ha sufrido retrasos y corre el riesgo de no estar operativo a tiempo (Mujica & Scala, 2017). Una vez terminado, el aeropuerto tendrá una capacidad final de 120 millones pasajeros por año según el gobierno. Sin embargo, este aeropuerto no estará operativo hasta 2022 (la primera fase). Como se esperaba, la Ciudad de México como destino

sigue creciendo y el país también ha ganado importancia como destino turístico y de negocios.

Según OCDE, el proceso de asignación de franjas horarias de México es uno de los principales obstáculos para la competencia de las aerolíneas. La afirmación del gobierno es que el aeropuerto se utiliza por completo y, por lo tanto, la competencia de los nuevos entrantes está restringida. En 2013, la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) emitió una nueva Declaración de Saturación para el Aeropuerto (Diario Oficial de la Federación, 2014). Según las autoridades mexicanas, la capacidad máxima se limita a 61 operaciones por hora (con una restricción estricta de 40 aterrizajes por hora) en condiciones óptimas y durante condiciones climáticas adversas, el límite se reducirá a 30 o incluso 20 aterrizajes por hora.

Hay varias consecuencias de la limitación de México:

El tráfico en los aeropuertos regionales con destino al AICM sufre demoras (demoras en tierra) debido a problemas de control de tránsito aéreo (ATC) en México.

Los retrasos aumentan en el sistema de aviación nacional y también la subutilización de las aeronaves por parte de las aerolíneas.

Aparecen diferentes colas en diferentes ubicaciones del aeropuerto, lo que convierte al ATC en un verdadero desafío para los controladores.

El control de tránsito aéreo (ATC) le da prioridad a los vuelos intercontinentales, por lo tanto, los vuelos nacionales sufrirán la falta de ranuras.

Por otro lado, las aerolíneas de bajo costo y las aerolíneas internacionales ejercen presión sobre el aeropuerto para permitirles ingresar a operar en el aeropuerto. En consecuencia, con el acuerdo con los Estados Unidos; recientemente JetBlue, SouthWest comenzó a operar desde los Estados Unidos hasta el aeropuerto de la Ciudad de México, lo que aumenta la competencia con los transportistas de bajo costo que actualmente operan en el aeropuerto, por lo que se mantendrá la expectativa de un crecimiento continuo.

Además de eso, no solo las aeronaves de cuerpo estrecho quieren operar en el aeropuerto, sino también las aeronaves comerciales de cuerpo ancho han reclamado su derecho a operar allí. Hace dos años, AirFrance comenzó la operación desde París a México con un A380 tres veces por semana. Además, Lufthansa y Emirates han declarado que tienen intenciones de comenzar a operar con el A380 desde Frankfurt y Dubai hasta la Ciudad de México, respectivamente (Mujica & Scala, 2017).

Por todas estas razones, y para minimizar el riesgo de que el crecimiento se vea obstaculizado por la falta de instalaciones, es fundamental evaluar las soluciones actuales y alternativas a la saturación del aeropuerto. Las soluciones requeridas deben ser capaces de abordar los diferentes elementos clave que determinan la capacidad, como la configuración de la infraestructura, las calles de rodaje, las pistas, las restricciones, los modelos comerciales de las aerolíneas, el clima y la incertidumbre inherente a esos elementos para comprender la dinámica emergente que aparece una vez que todos Los elementos se unen en su lugar.

2.3) Alternativas de solución

Ante la problemática de la saturación del aeropuerto han sido muchos los autores que han tratado de llegar a una solución. Ejemplos de ellos son Hamzawi (1992), Burnham, Hallock y Greene (2001), Herrera (2012 y 2017); por mencionar algunos. Tanto a nivel internacional como a nivel nacional, es decir, para el caso de México.

Para hablar un poco más a detalle de la situación nacional, vamos a centrarnos en el trabajo de Herrera. Cuyos documentos muestran diferentes alternativas de solución y panoramas que puede tener el Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México.

El principal reto al que se enfrenta del sistema aeroportuario del Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México continúa siendo la enorme demanda que tiene de servicios a atender, lo que ha tenido como respuesta la ampliación y remodelación de la Terminal 1 a su máxima capacidad y la construcción de la nueva Terminal 2 de pasajeros. Sin embargo, debido a la falta de espacio no fue posible aumentar la capacidad de las pistas, las cuales constituyen el elemento crítico que limita su capacidad total. Estudios realizados en el Instituto Mexicano

del Transporte (IMT) establecen que el AICM iniciará su saturación en octubre del año 2015 (Herrera, Modelo de simulación de operaciones aéreas en aeropuertos saturados: el caso del aeropuerto internacional de la Ciudad de México, 2012).

La solución al problema de la congestión del aeropuerto se ha dividido en cuatro opciones:

La opción A va de la mano con la incorporación de nueva infraestructura; esta opción aumenta la capacidad de todo el aeropuerto o la capacidad de algunos de los subsistemas. La opción B establece mecanismos que reducen la demanda de los servicios aeroportuarios. La opción C, aunque no es aquella que disminuye la demanda, lo que hace es redistribuir las operaciones lo que resulta en una mayor eficiencia operativa del aeropuerto. Por último, la opción D, es aquella que busca, a través de innovaciones, operativas o tecnológicas, aumentar la eficiencia del aeropuerto (Hamzawi, 1992).

A continuación, se hablará más a detalle de las alternativas anteriores

Opción A: Invertir en nueva infraestructura

El desarrollo de nuevos aeropuertos o la expansión de las instalaciones existentes hacen que aumente directamente la capacidad del sistema. Sin embargo, tales desarrollos a menudo son difíciles debido a todas las limitaciones de financiamiento, preocupaciones ambientales y oposición de las comunidades locales al desarrollo de nuevos aeropuertos. Además, tales desarrollos no pueden abordar la necesidad de una nueva capacidad a corto plazo. Por ejemplo, la construcción de una nueva terminal generalmente requiere entre cinco y diez años para completarse. Sin embargo, aumentar la capacidad de una instalación existente puede no implicar su ampliación física, ya que la reconfiguración del espacio existente puede ser suficiente. (Herrera, Alternative Solutions to Airport Saturation: Simulation models applied to congested airports, 2017).

Opción B: gestión de la demanda

De acuerdo con Herrera (2017) la reducción de la demanda en un aeropuerto se puede lograr cambiando una parte de la demanda a ubicaciones alternativas u otros modos de transporte, por ejemplo:

- Procesamiento remoto: esta propuesta ayuda a reducir la demanda en las instalaciones del aeropuerto al atender parte de ella en ubicaciones alternativas o complementarias fuera del aeropuerto. En términos de tierra del aeropuerto, esto se aplicaría principalmente al estacionamiento de vehículos, el procesamiento de pasajeros y la asignación de puertas de aeronaves.
- Estacionamiento de vehículos fuera del aeropuerto: cuando la capacidad de las instalaciones de estacionamiento del aeropuerto es insuficiente para satisfacer la demanda y no se puede ampliar de manera eficiente dentro de los límites del aeropuerto, se podrían construir estacionamientos adicionales fuera del aeropuerto y conectarlos a la terminal a través de un sistema de circulación, por ejemplo, utilizando autobuses lanzadera.
- Procesamiento de pasajeros fuera del aeropuerto: Esto implica principalmente la entrega de pases de abordar y actividades relacionadas con la verificación de equipaje en una ubicación remota o en ubicaciones clave dentro de la ciudad, donde se concentran las fuentes y destinos de los pasajeros. También incluye el transporte de pasajeros al aeropuerto para completar las actividades restantes relacionadas con el vuelo.
- Posiciones remotas para aeronaves: La falta de posiciones suficientes para el embarque y/o desembarque de pasajeros puede compensarse mediante el uso de vehículos especializados para transportar a los pasajeros entre el edificio de la terminal y sus aeronaves en una posición remota.

Esta alternativa es de las más desarrolladas por el autor, incluso llega a tener puntos específicos como lo son:

Reubicación de operaciones de tránsito:

A lo que se refiere el punto anterior es principalmente a dos aspectos:

- Operaciones comerciales: esta propuesta se basa en una decisión política de la autoridad de reubicar algunos segmentos de la operación de tráfico comercial (por ejemplo, vuelos internacionales u operaciones chárter), o ciertas aerolíneas a otros aeropuertos vecinos menos utilizados o menos congestionados. Esta política podría establecerse dando incentivos a las aerolíneas o puede ser forzada a través de acciones para reubicar sus operaciones.
- Aviación general: un método para maximizar el uso de la capacidad disponible en un aeropuerto ocupado es restringir su uso a vuelos no comerciales, como las operaciones de aviación general.

Cambiar el tráfico aéreo de corta distancia a otros modos de transporte

El reemplazo de vuelos de corta distancia (hasta 500 km de distancia) con otros modos de transporte puede liberar cierto grado de congestión en los aeropuertos con altas proporciones de dicho tráfico. Un modo alternativo podría ser un enlace de transporte de superficie de alta velocidad; por ejemplo, un tren.

Opción C: Dividir los diferentes picos de demanda

De acuerdo con Herrera (2017), esto se puede conseguir de la siguiente manera: Este concepto implica el acogimiento de ciertas medidas económicas y/o administrativas destinadas a modificar el perfil de la demanda para que se ajuste a los límites de la capacidad disponible. Por lo tanto, este enfoque puede ser adecuado para situaciones donde el aumento adicional de la capacidad del aeropuerto no es factible o muy costoso.

Aunque la expansión de un aeropuerto al final puede ser inevitable, se pueden implementar soluciones de difusión máxima en mucho menos tiempo del necesario para construir una nueva instalación, con la ventaja de retrasar la necesidad de expansión y reducir la gran

inversión de capital asociada. Hay dos propuestas para lograr este enfoque, una basada en el mercado y la otra administrativa.

Medidas basadas en el mercado:

- Precios de temporada alta: este enfoque basado en el mercado utiliza los precios como un instrumento para regular la demanda de tráfico. Comúnmente, toma la forma de recargos (tarifas adicionales) en el uso de las franjas horarias del aeropuerto durante las horas ocupadas del día para alentar a las aerolíneas a cambiar sus vuelos de los períodos más congestionados a otros horarios menos ocupados o incluso a diferentes sitios del aeropuerto.
- Subasta de tragamonedas: en este caso, el derecho a utilizar el aeropuerto (aterriaje o despegue) en un momento determinado durante el día (tragamonedas) se vende al mejor postor. De esta forma, las fuerzas del mercado libre determinan el costo, que es lo que los usuarios están dispuestos a pagar en función de su percepción del valor del acceso al aeropuerto en un momento dado.

Medidas administrativas

Este enfoque tiene como objetivo el de limitar el volumen o tipo de tráfico aéreo que se acomodará en un aeropuerto dentro de los límites de cierta capacidad o nivel de retraso aceptable.

- Cuotas de tráfico y asignación de franjas horarias: según esta propuesta, las cuotas máximas se imponen sobre el número de aterrizajes y despegues de aeronaves y/o los volúmenes de pasajeros permitidos dentro de los límites de cierta capacidad específica del sistema de pista, las puertas de las aeronaves y/o el edificio de la terminal aérea.
- Control de flujo de tráfico: El control de flujo es un procedimiento de administración del tráfico aéreo asistido por computadora, que no restringe explícitamente el acceso

al aeropuerto. Esta técnica se centra en el control dinámico de los volúmenes de tráfico hacia y desde un aeropuerto en respuesta a la demanda general regional o nacional. Esto se logra a través de configuraciones con ajustes continuos computarizados de los tiempos de llegadas y salidas desde los aeropuertos en todo el sistema. Por lo general, el retraso se produce de maneras menos costosas, por ejemplo, en tierra en el aeropuerto de salida o en ruta, en lugar de en un patrón de espera en el aeropuerto de destino.

Opción D: Aplicación de innovaciones operativas y tecnológicas

De acuerdo con Herrera (2017) además de los métodos para reducir la congestión y los retrasos resultantes mencionados anteriormente, otra de las áreas prometedoras de aumentar la capacidad del aeropuerto es a través del desarrollo y la implementación de nuevas tecnologías e innovaciones para maximizar la eficiencia de utilización de las instalaciones existentes.

Prácticas operativas:

Se podrían considerar algunas prácticas operativas innovadoras para mejorar la utilización de la capacidad del aeropuerto, por ejemplo:

- Registrarse en las áreas de espera de la puerta para operaciones de alta densidad o alto transporte donde los pasajeros solo tienen equipaje de mano. Esto permite a los viajeros evitar los mostradores de check-in del vestíbulo público, que de otro modo estarían ocupados.
- Adopción de estrategias operativas de asignación de puertas de uso común para maximizar la utilización de la capacidad de la puerta en lugar del uso exclusivo de las puertas por parte de las aerolíneas.

- El uso de retrocesos de potencia de la aeronave que elimina la necesidad de que la aeronave en la puerta espere un tirón y aguante la operación de acoplamiento y desacoplamiento que lleva mucho tiempo con el tren delantero de la aeronave.
- Aplicar el conocimiento del comportamiento del vórtice de estela para aumentar la capacidad de los aeropuertos con pistas paralelas muy cercanas. En base a esta información, se podrían aplicar nuevos criterios para reducir los límites operativos actuales (Burnham, Hallock, & Greene, 2001).

A pesar de lo anterior expuesto, hay un par de medidas adicionales que también se consideran en estos casos, como lo son

Tecnología de aviones

Esta opción se centra en dos tipos de aeronaves que contribuirían a aliviar la congestión del aeropuerto tanto en el lado aéreo como en el terrestre. El primer tipo de avión, que utiliza tecnología de rotor de inclinación, combina las capacidades de aterrizaje y despegue vertical de los helicópteros con la velocidad, el alcance y la economía de combustible de los aviones de ala fija. Debido a estas características, este tipo de aeronave (convertiplano; es decir aquellos aviones que son un híbrido entre avión y helicóptero) no requeriría el uso de un aeropuerto para su funcionamiento.

Otra opción es fomentar la utilización de tipos de aviones más grandes (por ejemplo, Airbus A380). Aunque esto requiere operaciones más complejas, el uso de aviones más grandes implica el uso de menos movimientos de tránsito aéreo (Air Traffic Movements o ATM, por sus siglas en inglés) para transportar la misma cantidad de viajeros, o podría transportar a más usuarios con la misma cantidad de operaciones (Herrera, *Alternative Solutions to Airport Saturation: Simulation models applied to congested airports*, 2017).

Modelado y simulación por computadora

Como parte de la aplicación de innovaciones tecnológicas, se ha reconocido ampliamente el desarrollo y uso de modelos informáticos para evaluar los niveles de servicio predominantes y para evaluar las posibles opciones para reducir la congestión. Esta herramienta podría

mejorar la eficiencia de las operaciones del aeropuerto y la gestión de la capacidad. Dichos modelos podrían usarse para simular el movimiento de aeronaves en pistas, calles de rodaje y plataformas; la asignación de puertas a aeronaves; los flujos de peatones en el edificio de la terminal; y el movimiento de vehículos a través del sistema de transporte terrestre.

Modelos de simulación

La técnica de simulación es una de las más utilizadas en la investigación de operaciones y la ciencia de gestión para evaluar sistemas. De hecho, Herrera, ha estudiado muy a fondo esta técnica; al grado de que ha aplicado esta técnica para el caso del Aeropuerto Internacional de La Ciudad de México (de esto se hablará a la brevedad) Los modelos de simulación comúnmente toman la forma de un conjunto de supuestos sobre la operación de un sistema. Estos se expresan en forma de relaciones matemáticas y lógicas entre sus componentes. Se pueden utilizar para investigar una amplia variedad de problemas sobre el mundo real. Estos modelos se utilizan como una herramienta de análisis, para predecir los efectos de los cambios en los sistemas existentes, o como una herramienta de diseño para predecir el comportamiento de los nuevos sistemas. Los estudios que utilizan modelos de simulación ofrecen las siguientes ventajas:

- Se podrían explorar nuevas políticas, reglas de decisión, procedimientos organizativos y operativos sin alterar el curso del sistema.
- Un modelo de simulación es bastante realista en el sentido de que reproduce las características del sistema modelado con un alto grado de precisión.
- Es posible aplicar la simulación para investigar el comportamiento de sistemas no existentes, a menudo innovadores.
- La operación equivalente de días, semanas o meses del sistema real podría simularse en una computadora en solo segundos, minutos u horas. Por otro lado, si es necesario,

la representación del tiempo real puede alargarse para observar con más detalle el fenómeno bajo investigación (Herrera, Alternative Solutions to Airport Saturation: Simulation models applied to congested airports, 2017).

Aplicación de modelos de simulación a aeropuertos congestionados, el caso del Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México

El Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México (AICM) se destaca como uno de los aeropuertos más importantes del mundo, ya que aparece regularmente en el top 50 del recuento de ellos a nivel internacional. En 2015, el AICM fue el 45° aeropuerto más grande del mundo en términos de cantidad de pasajeros manejados, y el vigésimo aeropuerto del mundo en términos de número de cajeros automáticos manejados (Air Transport World, 2016).

La metodología utilizada para desarrollar los modelos de simulación presentados a continuación podría ser consultada en un artículo anterior por el autor (Herrera, Modelo de simulación de operaciones aéreas en aeropuertos saturados: el caso del aeropuerto internacional de la Ciudad de México, 2012). Para mostrar la aplicación de modelos de simulación, se presentan los siguientes cuatro ejemplos. En todos los casos, se estimaron los beneficios potenciales de incorporar nuevas tecnologías o procedimientos al AICM.

Diseño de los escenarios de simulación

En este inciso se planearon los escenarios a evaluar con el modelo desarrollado; en particular se definieron las condiciones bajo las cuales se hicieron las simulaciones y se señalaron los detalles relevantes. En general se indicó por qué y cómo se realizó cada escenario.

Mediante estos escenarios se evaluaron cuantitativamente diversas condiciones que afectan negativamente el desempeño del AICM, pero también se estimaron los efectos de cambios operativos que lo mejoran. Dichas estimaciones se establecieron, en términos de tiempos de espera, tamaños de colas y costos. En el caso de las afectaciones, la información obtenida puede servir para establecer medidas preventivas, y en el caso de las mejoras, para justificar

la viabilidad de su implementación (Herrera, Modelo de simulación de operaciones aéreas en aeropuertos saturados: el caso del aeropuerto internacional de la Ciudad de México, 2012).

De las simulaciones realizadas por el modelo, se obtuvieron diferentes escenarios, los cuales fueron los siguientes:

1. Impacto originado por el crecimiento natural de la demanda de servicio.
2. Efectos de las labores de mantenimiento en las pistas.
3. Efectos de la presencia de condiciones ambientales adversas.
4. Efecto de la aplicación de una nueva tecnología para incrementar la capacidad de las pistas.
5. Efecto de la utilización intensiva de aeronaves de mayor capacidad.
6. Efecto de la incorporación de infraestructura nueva.
7. Impacto de una nueva estrategia para atender a las aeronaves durante las fases de despegue y aterrizaje.

Observe que los primeros tres escenarios se relacionan con aspectos operativos del aeropuerto, y los cuatro restantes con su planeación.

Resultados

De los escenarios anteriormente obtenidos por Herrera (2012), se obtuvo un resultado para cada uno de ellos. A continuación, se enuncia brevemente lo hallado por el autor en su trabajo:

Escenario uno, relacionado con el impacto originado por el crecimiento natural de la demanda de servicio

Si se mantienen las tendencias de crecimiento moderado de la demanda del AICM, se espera un deterioro significativo del servicio en las pistas, a partir de octubre de 2015. Aunque ambos intervalos de actividad serán afectados, antes y después de las seis horas, es durante el segundo periodo donde se presentarán cuantitativamente las afectaciones mayores. Se estimó que a finales de 2015 habrá líneas de espera de hasta dieciocho aeronaves y demoras

de veinte minutos; posteriormente a esta fecha el deterioro seguirá creciendo en forma acelerada. Lo anterior implica que la construcción de un nuevo aeropuerto se convierta en una condición importante y urgente.

Escenario dos, relacionado con la estimación de los efectos originados por las labores de mantenimiento en las pistas

No es recomendable realizar las labores de mantenimiento en las pistas del AICM durante el intervalo entre las 06:00 y 24:00 debido a que se generarían demoras y colas inadmisibles para su operación. El mantenimiento debe brindarse sólo entre la 00:00 y 06:00 horas, sin embargo, cuando la demanda alcance alrededor de 265 operaciones se empezarán a presentar demoras significativas, mayores a 15 minutos, y a partir de entonces, el deterioro del servicio se incrementará. Se estima que esta situación se presentará en los primeros meses de 2018.

Escenario tres, relacionado con los efectos de la presencia de condiciones ambientales adversas

Los hidrometeoros que se presentan durante el intervalo entre la 00:00 y 06:00 horas tienen actualmente poco efecto en el deterioro del servicio en las pistas del AICM, las colas y demoras que generan no son significativas. Sin embargo, cuando estos fenómenos se presentan en el periodo de mayor actividad, afectan severamente la calidad del servicio, aún con los niveles de demanda actuales. Con los niveles de demanda que se presentaron a inicios de 2011, por cada hora que se suspende la operación del AICM debido a los hidrometeoros, permanecen en tierra aproximadamente 22 aeronaves sin despegar, por lo que, dependiendo de la duración total de la suspensión de actividad aérea, es inevitable que se generen demoras significativas y cancelación de vuelos. Conforme se incrementa la demanda natural, la calidad del servicio empeorará. La instalación de un sistema de aterrizaje por instrumentos de mayor categoría podría ayudar a reducir este problema.

Escenario cuatro, relacionado con los efectos de la aplicación de una nueva tecnología para incrementar la capacidad de las pistas

La aplicación de una nueva tecnología para incrementar la capacidad de las pistas a 120 operaciones/hora produciría beneficios significativos en la operación del AICM. Por un lado, el inicio de su saturación se extiende 21 años, en comparación con la capacidad actual, y por otro, se reduce el deterioro de servicio, aún con la demanda de servicio actual, principalmente durante el periodo de mayor actividad. Escenario cinco, relacionado con la estimación del efecto de la utilización intensiva de aeronaves de mayor capacidad

La utilización de aeronaves de mayor capacidad que sustituyen a aeronaves más pequeñas, origina beneficios en la operación del aeropuerto al reducir los tamaños de las colas y la magnitud de las demoras. En términos relativos las reducciones en algunos casos pueden ser significativas, en los escenarios considerados de hasta 23% en las colas máximas y 15.48% en las demoras promedio; en términos absolutos los máximos beneficios observados fueron en las colas máximas, con reducciones de hasta dos aeronaves, y en las demoras máximas, con reducciones de hasta 1.68 minutos.

Escenario seis, relacionado con la medición del efecto de incorporar infraestructura nueva

Se observó que en caso de incorporar infraestructura nueva, en particular seis posiciones de ataque adicionales a las seis existentes en la plataforma Remota Oriente de la Terminal 2, se obtendrían beneficios marginales en el caso de las colas y demoras promedio a la entrada de las plataformas; en cambio, para las colas y demoras máximas, en términos relativos habría reducciones de hasta aproximadamente 12%, y en términos absolutos la mayor reducción en las colas sería de 0.4 aeronaves y en el caso de las demoras de 0.64 minutos.

Escenario siete, relacionado con el impacto de una nueva estrategia para atender a las aeronaves durante las fases de despegue y aterrizaje

Se estimó que, si la estrategia propuesta es aplicada, es posible obtener beneficios significativos. Se estimaron beneficios anuales del orden de 20.66 millones de pesos ahorrados en costos de operación de las aeronaves y de 65,476.3 pasajeros-hora en reducción de demoras. Integrando ambos resultados en términos monetarios se obtiene un beneficio anual de aproximadamente 28.6 millones de pesos. Estos beneficios podrían ser alcanzados sin afectar en gran medida la operación aérea, generalmente la modificación de la secuencia de atención sólo cambió el inicio de los servicios en aproximadamente un minuto y en los casos más críticos alrededor de dos minutos (una explicación más detallada aparece en Herrera, 2012).

Capítulo 3: Metodología Estadística

3.1) Distribución de Pareto Generalizada

La distribución de los valores más grandes o más pequeños de ciertos fenómenos naturales (por ejemplo, olas, vientos, temperaturas, terremotos, inundaciones) es de interés en muchas aplicaciones prácticas. Por ejemplo, la distribución de olas altas es importante en el diseño de estructuras marinas, la distribución de grandes inundaciones es importante en el diseño de presas, y así sucesivamente. Este interés ha dado lugar a un rápido desarrollo de la teoría del valor extremo en los últimos años (véase, por ejemplo, Castillo 1988, Galambos 1978, Leadbetter, Lindgren y Rootzen 1983, y Resnick 1987). El enfoque tradicional para el análisis de valores extremos en una población dada se basa en la familia de distribuciones generalizadas de valores extremos.

En la década de 1890, Vilfredo Pareto examinó las distribuciones de ingresos utilizando datos de Inglaterra, ciudades italianas, estados alemanes, París y Perú (Pareto, 1897). Aprovechó los sistemas fiscales recientemente implementados para recopilar datos de las tabulaciones fiscales. Su trabajo empírico pionero ayudó a proporcionar bases estadísticas para los debates apasionados política e intelectualmente sobre la distribución del ingreso.

Se estableció una jerarquía para la familia de distribuciones Pareto comenzando con la distribución clásica de Pareto (también llamada Pareto tipo I) y agregando los parámetros de ubicación, escala, forma y desigualdad, se obtuvieron las distribuciones Pareto tipo II, tipo III y tipo IV. Entre estas distribuciones, la distribución de Pareto tipo II (Pareto II) es de sumo interés ya que es quizás el modelo más utilizado dentro de esta familia (Arnold, 2008).

De acuerdo con Grimshaw (1993), una variable aleatoria X se define como una distribución de Pareto Generalizada (Generalized Pareto Distribution, GPD por sus siglas en inglés), con parámetros k y α tal que $-\infty < k < \infty$, $\alpha > 0$, si la distribución acumulada está dada por:

$$F(x; k, \alpha) = 1 - \left(1 - \frac{kx}{\alpha}\right)^{1/k}, k \neq 0$$

$$F(x; k, \alpha) = 1 - e^{-x/\alpha}, k = 0$$

El rango para x es $x > 0$ para $k \leq 0$ y $0 < x < \frac{\alpha}{k}$ para $k > 0$.

Cuando $k = 0$, la Distribución de Pareto Generalizada se reduce a una distribución exponencial con media α . La estimación de α en este caso es fácil, porque el estimador por máxima verosimilitud resulta ser eficiente. Un caso ciertamente más complicado es cuando $k \neq 0$.

La distribución generalizada de valores extremos es apropiada cuando los datos consisten en un conjunto de máximos. Sin embargo, ha habido algunas críticas a este enfoque, porque usar solo máximos conduce a la pérdida de información contenida en otros valores de muestras grandes en un período dado. Este problema se soluciona considerando varias de las estadísticas de pedidos más grandes en lugar de solo la más grande; es decir, considerando todos los valores mayores que un umbral dado. Las diferencias entre estos valores y un umbral dado se denominan superaciones sobre el umbral (Castillo & Hadi, *Fitting the Generalized Pareto Distribution to Data*, 1997).

El método tradicional para modelar datos de valores extremos se basa en las distribuciones limitantes de valores extremos introducidas originalmente por Fisher y Tippett (1928). Recientemente, se han estudiado enfoques alternativos. Una de esas metodologías es observar las superaciones sobre umbrales altos en lugar de los máximos durante períodos de tiempo fijos. Pickands (1975) demostró que la distribución generalizada de Pareto (GPD) es una distribución estable para los excesos por encima de los umbrales. Usando esos valores que exceden un umbral alto en un registro de inundación anual, el GPD puede usarse para estimar inundaciones extremas. R. L. Smith (1989) aplicó estas ideas al estudio de los niveles de ozono en la atmósfera superior.

Pickands (1975) introdujo la distribución Pareto generalizada como una familia de distribuciones de dos parámetros para las superaciones por encima de un umbral. Los parámetros de la distribución Pareto generalizada son Y , el parámetro de escala, k , el parámetro de forma. Consulte el artículo de Hosking y Wallis (1987) para ver ejemplos de la distribución de Pareto Generalizada para diferentes valores de parámetros.

Han sido muchas las estimaciones que se han hecho para los parámetros de la distribución de Pareto Generalizada, como lo son:

- Método de Máxima Verosimilitud
- Método de momentos
- Estimación por cuantiles
- Intervalos de confianza

3.2) Método de Máxima Verosimilitud

En estadística, la estimación por máxima verosimilitud (conocida también como EMV y, en ocasiones, MLE por sus siglas en inglés) es un método habitual para ajustar un modelo y estimar sus parámetros (Klugman, Panjer, & Willmot, 2008),

En muchos casos, el estimador obtenido por máxima verosimilitud posee un conjunto de propiedades asintóticas atractivas:

- Consistencia
- Normalidad asintótica
- Eficiencia
- Eficiencia de segundo orden tras corregir el sesgo.

Función de verosimilitud

En estadística, la función de verosimilitud (o, simplemente, verosimilitud) es una función de los parámetros de un modelo estadístico que permite realizar inferencias acerca de su valor a partir de un conjunto de observaciones (Klugman, Panjer, & Willmot, 2008).

No debe confundirse con el término probabilidad: ésta permite, a partir de una serie de parámetros conocidos, realizar predicciones acerca de los valores que toma una variable aleatoria.

De acuerdo con Hosking y Wallis (1987) la función de log-verosimilitud de X para una muestra dada por:

$$\mathbf{x} = \{x_1, \dots, x_n\}$$

Se definirá como:

$$\log L(\mathbf{x}; \alpha, k) = -n \log \alpha - (1 - k) \sum_{i=1}^n y_i,$$

Donde

$$y_i = -k^{-1} \log(1 - k^{x_i/\alpha})$$

La función de log-verosimilitud se puede hacer arbitrariamente grande tomando $k > 1$ y tomando α/k arbitrariamente cercano al $\max(x_i)$, entonces el estimador de máxima verosimilitud (Maximum Likelihood Estimator o MLE por sus siglas en inglés) tomará valores de $\hat{\alpha}$ y \hat{k} , los cuáles guardan una relación con el máximo de $\log L$.

Para encontrar el máximo local del logaritmo de la función de verosimilitud se requieren de métodos numéricos; Hosking (1985) usa una estructura para las funciones generalizadas de valores extremos.

Por su parte, Smith (1984) trabaja con la matriz de información y obtiene la varianza asintótica de los estimadores por máxima verosimilitud, lo cual queda de la siguiente manera:

$$n \operatorname{var} \begin{bmatrix} \hat{\alpha} \\ \hat{k} \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} 2\alpha^2(1-k) & \alpha(1-k) \\ \alpha(1-k) & (1-k)^2 \end{bmatrix}$$

Donde $k < \frac{1}{2}$

Cuando se cumple lo anterior para el parámetro k los estimadores tienen las propiedades de consistencia, normalidad asintótica y eficiencia asintótica. Para casos en los que $k > \frac{1}{2}$, esto se desglosa en (Smith R. , 1984).

3.3) Método de Momentos

De acuerdo con Hosking y Wallis (1987) los momentos para la Distribución de Pareto Generalizada se obtienen con:

$$E(1 - kX/\alpha)^r = 1/(1 + rk)$$

Lo anterior pasara siempre que $1 + rk > 0$

El r-ésimo momento de X existe si $k > -1/r$.

El mismo autor explica que, luego de ver que dichos momentos existen; la media, la varianza, el sesgo y la curtosis serán, respectivamente:

$$\mu = \alpha/(1 + k)$$

$$\sigma^2 = \alpha^2/(1 + k)^2(1 + 2k)$$

$$\gamma = 2(1 - k)(1 + 2k)^{1/2}/(1 + 3k)$$

y

$$\kappa = \frac{3(1 + 2k)(3 - k + 2k^2)}{(1 + 3k)(1 + 4k)} - 3$$

Con lo anterior, los estimadores de α y de k serán, por consecuencia:

$$\hat{\alpha} = \frac{1}{2} \tilde{x} (\tilde{x}^2 / s^2 + 1)$$

Mientras que para el otro estimador sería:

$$\hat{k} = \frac{1}{2} (\tilde{x}^2 / s^2 - 1)$$

Donde \tilde{x}^2 y s^2 son la media y la varianza muestral, respectivamente. Dando un valor de $k > -\frac{1}{4}$, se puede demostrar con ayuda de métodos estándar, como los usados por Rao (1973), que $\hat{\alpha}$ y \hat{k} se distribuyen de forma normal asintóticamente con:

$$n \text{ var} \begin{bmatrix} \hat{\alpha} \\ \hat{k} \end{bmatrix} \approx \frac{(1+k)^2}{(1+2k)(1+3k)(1+4k)}$$

$$* \begin{bmatrix} 2\alpha^2(1+6k+12k^2) & \alpha(1+2k)(1+4k+12k^2) \\ \alpha(1+2k)(1+4k+12k^2) & (1+2k)^2(1+k+6k^2) \end{bmatrix}$$

Cuando $k \leq \frac{1}{4}$, la varianza de s^2 es infinita y las varianzas de $\hat{\alpha}$ y \hat{k} no son asintóticas de orden n^{-1} . Cuando $k = 0$, la varianza de los estimadores de máxima verosimilitud son idénticos, lo que hace que los estimadores sean 100% eficientes asintóticamente (Rao, 1973).

3.4) Estimación por cuantiles

De acuerdo con Hosking y Wallis (1987) los cuantiles, o percentiles, de la Distribución de Pareto Generalizada están dados, en términos de los parámetros de la distribución como:

$$\begin{aligned} x(F) &= \alpha\{1 - (1 - F^k)^k\}/k, & k \neq 0 \\ &= -\alpha \log(1 - F), & k = 0 \end{aligned}$$

Un estimador de los cuantiles de $\hat{x}(F)$ se define sustituyendo los estimadores de $\hat{\alpha}$ y \hat{k} para los parámetros en las ecuaciones anteriores. La varianza de $\hat{x}(F)$ se da de forma asintótica por:

$$\text{var } \hat{x}(F) \sim \{s(k)\}^2 \text{ var } \hat{\alpha} + 2\alpha s(k)s'(k) \text{ cov}(\hat{\alpha}, \hat{k}) + \alpha^2 \{s'(k)\}^2 \text{ var } \hat{k}$$

Donde

$$s(k) = \{1 - (1 - F)^k\}/k$$

$$s'(k) = \{-s(k) + (1 - F)^k \log(1 - F)\}/k$$

Se tiene $x(F) = \alpha F \left\{1 + \frac{1}{2}(1 - k)F + O(F^2)\right\}$ cuando $F \rightarrow 0$, entonces la precisión de $\hat{x}(F)$ para una F pequeña, tiene su eficiencia determinada por la precisión de $\hat{\alpha}$.

3.5) Aprendizaje automatizado

De acuerdo con Mueller y Massaron (2016) la Inteligencia Artificial (Artificial Intelligence o AI, por sus siglas en inglés) y el Aprendizaje Automatizado (Machine Learning o ML, por sus siglas en inglés) se usan indistintamente. Sin embargo, la inteligencia artificial incluye al aprendizaje automático, pero el aprendizaje automático no define completamente la inteligencia artificial.

Estos mismos autores sostienen que el principal punto de confusión entre el aprendizaje automático y la inteligencia artificial es el hecho de que las personas suponen que simplemente porque una máquina mejora en su trabajo (aprendizaje) también es consciente (inteligencia). Nada respalda esta visión del aprendizaje automático. El mismo fenómeno ocurre cuando las personas suponen que una computadora les está causando problemas a propósito. La computadora no puede asignar emociones y, por lo tanto, solo actúa sobre la entrada proporcionada y las instrucciones contenidas en una aplicación para procesar esa entrada. Una verdadera inteligencia artificial eventualmente ocurrirá cuando las computadoras finalmente puedan emular la combinación inteligente utilizada por la naturaleza:

- Genética: aprendizaje lento de una generación a la siguiente
- Enseñanza: aprendizaje rápido de fuentes organizadas

- Exploración: aprendizaje espontáneo a través de los medios e interacciones con otros

En la actualidad, la inteligencia artificial se basa en el aprendizaje automático, y el aprendizaje automático es esencialmente diferente de la estadística. Sí, el aprendizaje automático tiene una base estadística, pero hace algunas suposiciones diferentes a las estadísticas porque los objetivos son diferentes.

Los antecedentes del Aprendizaje Automatizado, así como el de la Inteligencia Artificial, son muy estrechos. Estos antecedentes se remontan a la llamada “Prueba de Turing”.

De acuerdo con Russell y Norving (2004):

La Prueba de Turing, propuesta por Alan Turing (1950), se diseñó para proporcionar una definición operacional y satisfactoria de inteligencia. En vez de proporcionar una lista larga y quizá controvertida de cualidades necesarias para obtener inteligencia artificialmente, él sugirió una prueba basada en la incapacidad de diferenciar entre entidades inteligentes indiscutibles y seres humanos. El computador supera la prueba si un evaluador humano no es capaz de distinguir si las respuestas, a una serie de preguntas planteadas, son de una persona o no. Hoy por hoy, podemos decir que programar un computador para que supere la prueba requiere un trabajo considerable. El computador debería poseer las siguientes capacidades:

- Procesamiento de lenguaje natural que le permita comunicarse satisfactoriamente en inglés.
- Representación del conocimiento para almacenar lo que se conoce o siente.
- Razonamiento automático para utilizar la información almacenada para responder a preguntas y extraer nuevas conclusiones.
- Aprendizaje automático para adaptarse a nuevas circunstancias y para detectar y extrapolar patrones.

Esta idea es reforzada con la idea de que el uso de algoritmos para manipular datos es la pieza central del aprendizaje automático. Para tener éxito, una sesión de aprendizaje automático debe usar un algoritmo apropiado para lograr el resultado deseado. Además, los datos deben

prestarse para el análisis utilizando el algoritmo deseado, o requiere una preparación cuidadosa por parte de los científicos (Mueller & Massaron, 2016).

Volviendo con Russell y Norving (2004):

La Prueba de Turing evitó deliberadamente la interacción física directa entre el evaluador y el computador, dado que para medir la inteligencia es innecesario simular físicamente a una persona. Sin embargo, la llamada Prueba Global de Turing incluye una señal de vídeo que permite al evaluador valorar la capacidad de percepción del evaluado, y también le da la oportunidad al evaluador de pasar objetos físicos «a través de una ventanita». Para superar la Prueba Global de Turing el computador debe estar dotado de

- Visión computacional para percibir objetos.
- Robótica para manipular y mover objetos.

Estas seis disciplinas abarcan la mayor parte de la Inteligencia Artificial, y Alan Turing (creador de la Prueba de Turing) merece ser reconocido por diseñar una prueba que se conserva vigente después de 50 años. Los investigadores del campo de la Inteligencia Artificial han dedicado poco esfuerzo a la evaluación de sus sistemas con la Prueba de Turing, por creer que es más importante el estudio de los principios en los que se basa la inteligencia que duplicar un ejemplar. La búsqueda de un ingenio que «volara artificialmente» tuvo éxito cuando los hermanos Wright, entre otros, dejaron de imitar a los pájaros y comprendieron los principios de la aerodinámica. Los textos de ingeniería aerodinámica no definen el objetivo de su campo como la construcción de «máquinas que vuelen como palomas de forma que puedan incluso confundir a otras palomas»

Para finalizar y apoyar lo anterior se debe de mencionar que la Inteligencia Artificial abarca muchas otras disciplinas para simular el proceso de pensamiento con éxito. Además del aprendizaje automático, la Inteligencia Artificial normalmente incluye

- Procesamiento del lenguaje natural: el acto de permitir la entrada del lenguaje y ponerlo en una forma que una computadora pueda usar.

- Comprensión del lenguaje natural: el acto de descifrar el lenguaje para actuar sobre el significado que proporciona.
- Representación del conocimiento: la capacidad de almacenar información en una forma que hace posible el acceso rápido.
- Planificación (en forma de búsqueda de objetivos): la capacidad de utilizar la información almacenada para sacar conclusiones casi en tiempo real (casi en el momento en que sucede, pero con un ligero retraso, a veces tan breve que un humano no se dará cuenta, pero la computadora puede).
- Robótica: la capacidad de actuar sobre las solicitudes de un usuario en alguna forma física (Mueller & Massaron, 2016).

Otro de los conceptos de los que echa mano el aprendizaje automatizado es el “aprendizaje estadístico”.

El aprendizaje estadístico se refiere a un amplio conjunto de herramientas para comprender los datos. Estas herramientas pueden clasificarse como supervisadas o no supervisadas. En términos generales, el aprendizaje estadístico supervisado implica la construcción de un modelo estadístico para predecir o estimar un producto basado en una o más entradas. Problemas de esta naturaleza ocurren en campos tan diversos como negocios, medicina, astrofísica y políticas públicas. Con el aprendizaje estadístico no supervisado, hay entradas, pero no salidas de supervisión; sin embargo, podemos aprender relaciones y estructura de tales datos (James, Witten, Hastie, & Tibshirani, 2013).

Para resumir las ideas anteriores, la forma en que funciona el aprendizaje automático se basa en conocer los detalles sobre las personas no es particularmente útil de todos modos. El aprendizaje automático se trata de determinar patrones: analizar los datos de capacitación de tal manera que el algoritmo capacitado pueda realizar tareas que el desarrollador no programó originalmente para hacer. Los datos personales no tienen cabida en dicho entorno (Mueller & Massaron, 2016).

3.6) Árbol de Regresión

Los árboles de decisión se pueden aplicar a problemas de regresión o clasificación.

Los métodos basados en árboles para regresión y clasificación implican estratificar o segmentar el espacio predictor en una serie de regiones simples. Para hacer una predicción para una observación dada, generalmente utilizamos la media o el modo de las observaciones de entrenamiento en la región a la que pertenece. Dado que el conjunto de reglas de división utilizadas para segmentar el espacio predictivo puede resumirse en un árbol, estos tipos de enfoques se conocen como métodos de árbol de decisión (James, Witten, Hastie, & Tibshirani, 2013).

De acuerdo con Mueller y Massaron (2016) los árboles de decisión tienen una larga historia. El primer algoritmo de este tipo se remonta a la década de 1970, pero si considera los experimentos y la primera investigación original, el uso de los árboles de decisión se remonta incluso antes (son tan antiguos como las percepciones). Como algoritmos centrales de la tribu simbolista, los árboles de decisión han gozado de una gran popularidad debido a su algoritmo intuitivo. Su salida se traduce fácilmente en reglas y, por lo tanto, es bastante comprensible para los humanos. También son extremadamente fáciles de usar. Todas estas características los convierten en una obviedad efectiva y atractiva con respecto a los modelos que requieren transformaciones matemáticas complejas de la matriz de datos de entrada o un ajuste extremadamente preciso de sus hiperparámetros.

Los fundamentos teóricos y las aplicaciones prácticas de los árboles de clasificación y de regresión (Classification And Regression Trees o CART, por sus siglas en inglés) se presentaron por primera vez en Breiman, Friedman, Olshen y Stone (1984). Desde entonces, con el creciente poder de las computadoras, los árboles de clasificación se han convertido rápidamente en un poderoso método exploratorio para el análisis de datos. Aunque muchos estadísticos usan el término “árbol de clasificación y regresión” como si fuera un método estadístico, cuando en realidad este término incluye dos métodos de análisis de árboles de clasificación (CT) y árboles de regresión (RT), dependiendo de la naturaleza de medición de la variable dependiente.

Uno usa árboles de clasificación en medidas dependientes nominales (o categóricas), mientras que uno usa árboles de regresión en medidas dependientes de intervalo (o continuas). La razón por la cual los árboles de regresión se usan a menudo como un término analítico general es probablemente porque los árboles de clasificación y los árboles de regresión comparten principios estadísticos comunes y difieren solo en detalles (Breiman, Friedman, Olshen, & Stone, 2017).

Por su parte Russell y Norving (2004) definen al árbol de decisión (definido como “árbol de búsqueda” en su texto) de la siguiente manera:

La raíz del árbol de búsqueda es el nodo de búsqueda que corresponde al estado inicial, En(Arad). El primer paso es comprobar si éste es un estado objetivo. Claramente es que no, pero es importante comprobarlo de modo que podamos resolver problemas como «comenzar en Arad, consigue Arad». Como no estamos en un estado objetivo, tenemos que considerar otros estados. Esto se hace expandiendo el estado actual; es decir aplicando la función sucesora al estado actual y generar así un nuevo conjunto de estados. En este caso, conseguimos tres nuevos estados: En(Sibiu), En(Timisoara) y En(Zerind). Ahora debemos escoger cuál de estas tres posibilidades podemos considerar.

En general, los árboles de clasificación y regresión es un método de árbol heurístico que desempaqueta las relaciones entre una medida de resultado (una variable dependiente) y un grupo de predictores (variables independientes). Se pueden usar árboles de clasificación y regresión para realizar varias funciones analíticas, incluida la segmentación, estratificación, predicción, identificación de interacción, cribado variable y manipulación variable. Estas funciones se resumen en el siguiente espacio, acompañadas de algunos ejemplos de aplicaciones clásicas como demostraciones (Ma, 2018).

El árbol de decisiones basa su algoritmo en el hecho de usar una muestra de observaciones como punto de partida, el algoritmo vuelve sobre las reglas que generaron las clases de salida (o los valores numéricos cuando se trabaja a través de un problema de regresión) dividiendo la matriz de entrada en particiones cada vez más pequeñas hasta que el proceso active una regla para detenerse. Tal retroceso de reglas particulares hacia reglas generales es típico de

la deducción inversa humana, tal como lo tratan la lógica y la filosofía. En un contexto de aprendizaje automático, dicho razonamiento inverso se logra aplicando una búsqueda entre todas las formas posibles de dividir el entrenamiento en la muestra y decidir, de manera codiciosa, utilizar la división que maximiza las mediciones estadísticas en las particiones resultantes (Mueller & Massaron, 2016).

La segmentación tiene como objetivo identificar casos que probablemente pertenezcan a un determinado grupo. Morwitz y Schmittlein (1992) investigaron el uso de la segmentación como una forma de aumentar la precisión de las previsiones de ventas basadas en la intención de compra declarada de los consumidores. Después de comparar varias técnicas estadísticas con la función analítica de la segmentación, concluyeron que se pueden lograr pronósticos de ventas más precisos aplicando árboles de clasificación y regresión que las técnicas estadísticas tradicionales como el análisis de conglomerados. Para un determinado nivel de intención de compra, los árboles de clasificación y regresión producen segmentos significativos e identificables con tasas de compra posteriores variables. Los resultados de los árboles de clasificación y regresión identifican directamente los segmentos de consumidores que tienen más probabilidades de cumplir sus intenciones de compra.

La estratificación tiene como objetivo asignar casos a varias categorías. Se postularon que las diferencias de género en los perfiles de riesgo (es decir, nitrógeno ureico en sangre, presión arterial sistólica y creatinina sérica) pueden limitar el rendimiento de los algoritmos de estratificación disponibles para la insuficiencia cardíaca en las mujeres. Los árboles de clasificación y regresión se emplean para evaluar la estratificación del riesgo. Aunque las diferencias de género estadísticamente significativas están presentes en las tres variables de riesgo, los árboles de clasificación y regresión estratifica de manera efectiva a ambos sexos en grupos distintos sin diferencias significativas en la mortalidad por género dentro de los grupos estratificados (Diercks, y otros, 2008).

Diercks y otros (2008) concluyeron que, independientemente del género, los árboles de clasificación y regresión son muy eficaces para predecir el riesgo de insuficiencia cardíaca.

La predicción tiene como objetivo crear reglas con el fin de predecir eventos futuros. Un aspecto importante de la administración de grandes infraestructuras de almacenamiento

autogestionadas es determinar qué conjuntos de datos almacenar en qué dispositivos. Wang y otros (2004) exploraron la aplicación del árbol de clasificación y regresión para predecir el rendimiento de un sistema de almacenamiento autogestionado en función de las cargas de trabajo de entrada.

El árbol de clasificación y regresión se utiliza para predecir los tiempos de respuesta de las características de la carga de trabajo y los valores agregados del sistema. Wang y otros. (2004) informaron que el árbol de clasificación y regresión proporciona modelos predictivos razonablemente precisos.

3.7) Calidad del algoritmo

Un solo algoritmo de aprendizaje puede aprender muchas cosas diferentes, pero no todos los algoritmos son adecuados para ciertas tareas. Algunos algoritmos son lo suficientemente generales como para poder jugar al ajedrez o diagnosticar cáncer en pacientes. Un algoritmo reduce las entradas de datos y los resultados esperados de esas entradas a una función en todos los casos, pero la función es específica para el tipo de tarea que desea que realice el algoritmo (Mueller & Massaron, 2016).

De acuerdo con Russell y Norving (2014): “Un algoritmo de aprendizaje es bueno si produce hipótesis que hacen un buen trabajo al predecir clasificaciones de ejemplos que no han sido observados”. Estos mismos autores proponen una metodología para calcular la calidad de una predicción después de que ocurra el hecho que se ha predicho.

Es más que evidente que una predicción es buena si resulta cierta, por lo tanto, se puede calcular la calidad de una hipótesis contrastando sus predicciones con la clasificación correcta, una vez se calcule ésta. Esto se hace con un conjunto de ejemplos denominado conjunto de *test*. Si entrenamos utilizando todos los ejemplos disponibles, después necesitaremos algunos datos más para hacer el test.

En caso de haber agotado el número de observaciones para el conjunto de test, Russell y Norving (2014) proponen la siguiente metodología:

1. Recolectar un conjunto de ejemplos grande.
2. Dividir el conjunto de ejemplos en dos conjuntos disjuntos: el conjunto de entrenamiento y el conjunto de test.
3. Aplicar el algoritmo de aprendizaje al conjunto de entrenamiento, generando la hipótesis h .
4. Medir el porcentaje de ejemplos del conjunto de test que h clasifica correctamente.
5. Repetir los pasos de 1 a 4 para conjuntos de entrenamiento de diferentes tamaños y conjuntos de entrenamiento seleccionados aleatoriamente para cada tamaño.

El resultado de este procedimiento es un conjunto de datos que puede ser procesado para obtener la calidad media de predicción como una función del tamaño del conjunto de entrenamiento. Si dibujamos esta función en una gráfica, obtendremos lo que se denomina curva de aprendizaje del algoritmo para cada dominio concreto.

De acuerdo con Mueller y Massaron (2018) cuando se ve desde esta perspectiva, el entrenamiento puede parecer imposible y aprender algo para el algoritmo aún peor. Sin embargo, para crear esta función generalizada, el algoritmo de aprendizaje se basa en solo tres componentes:

- Representación: el algoritmo de aprendizaje crea un modelo, que es una función que producirá un resultado dado para entradas específicas. La representación es un conjunto de modelos que un algoritmo de aprendizaje puede aprender. En otras palabras, el algoritmo de aprendizaje debe crear un modelo que produzca los resultados deseados a partir de los datos de entrada. Si el algoritmo de aprendizaje no puede realizar esta tarea, no puede aprender de los datos y los datos están fuera del espacio de hipótesis del algoritmo de aprendizaje. Parte de la representación es descubrir qué características (elementos de datos dentro de la fuente de datos) usar para el proceso de aprendizaje.
- Evaluación: el alumno puede crear más de un modelo. Sin embargo, no conoce la diferencia entre modelos buenos y malos. Una función de evaluación determina cuál

de los modelos funciona mejor para crear un resultado deseado a partir de un conjunto de entradas. La función de evaluación califica los modelos porque más de un modelo podría proporcionar los resultados requeridos.

- Optimización: en algún momento, el proceso de capacitación produce un conjunto de modelos que generalmente pueden generar el resultado correcto para un conjunto determinado de entradas. En este punto, el proceso de capacitación busca a través de estos modelos para determinar cuál funciona mejor. El mejor modelo es el resultado del proceso de capacitación.

Capítulo 4: Implementación de la Distribución de Pareto Generalizada y de un Árbol de Regresión

4.1) Estimación de los parámetros de la distribución de probabilidad de Pareto Generalizada

Para los datos obtenidos de la página del Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México (AICM). Lo primero que se hizo fue el aplicar una prueba de bondad de ajuste. Dicha prueba se hizo mediante el software Easy Fit. Así como algunos cálculos posteriores, como el de la muestra aleatoria que se distribuye Pareto, o los correspondientes al árbol de regresión, se realizaron con ayuda del software estadístico R.

Realizando un análisis del total de movimientos del Aeropuerto de la Ciudad de México (esto es considerando el total de salidas y llegadas de la Terminal 1 y la Terminal 2) de forma tanto nacional como internacional.

El análisis de estos datos se llevará a cabo con el software estadístico R. Recordemos que los datos ya han pasado una prueba de bondad de ajuste, la cual mostró que estos siguen una distribución de probabilidad de Pareto Generalizada. Dicha distribución se define de la siguiente forma:

- La **función de probabilidad** vendrá dada por

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{\sigma} \left(1 + k \frac{(x - \mu)}{\sigma}\right)^{-1-\frac{1}{k}} & \text{si } k \neq 0 \\ \frac{1}{\sigma} \exp\left(-\frac{(x - \mu)}{\sigma}\right) & \text{si } k = 0 \end{cases}$$

- La **función de distribución acumulada** vendrá dada por

$$F(x) = \begin{cases} 1 - \left(1 + k \frac{(x - \mu)}{\sigma}\right)^{-\frac{1}{k}} & \text{si } k \neq 0 \\ 1 - \exp\left(-\frac{(x - \mu)}{\sigma}\right) & \text{si } k = 0 \end{cases}$$

donde:

- k es el parámetro continuo de forma
- σ es el parámetro continuo de escala ($\sigma > 0$)
- μ es el parámetro continuo de locación

El dominio de la distribución es:

$$\begin{cases} \mu \leq x < +\infty & \text{si } k \geq 0 \\ \mu \leq x < \mu - \frac{\sigma}{k} & \text{si } k < 0 \end{cases}$$

Recordemos que esta parametrización anterior es la que usa el software Easy Fit, el cual se usó para hacer la prueba de bondad de ajuste a los datos trabajados.

Los parámetros obtenidos para dichos datos fueron los siguientes:

- $k = -0.41695$
- $\sigma = 1.5408 E + 16$
- $\mu = 1.7230 E + 6$

Cabe mencionar que hay diferentes parametrizaciones para la distribución de Pareto Generalizada. Depende del autor que se consulte, una de las más usadas (la cuál es muy parecida a la anterior mostrada) es la siguiente:

- La **función de probabilidad** vendrá dada por

$$f_{\xi}(z) = \begin{cases} \frac{1}{\sigma} (1 + \xi z)^{-1-\frac{1}{\xi}} & \text{si } \xi \neq 0 \quad \text{donde } z = \frac{x - \mu}{\sigma} \\ \frac{1}{\sigma} \exp(-z) & \text{si } \xi = 0 \quad \text{donde } z = \frac{x - \mu}{\sigma} \end{cases}$$

•

- La **función de distribución acumulada** vendrá dada por

$$F_{\xi}(z) = \begin{cases} 1 - (1 + \xi z)^{-\frac{1}{\xi}} & \text{si } \xi \neq 0 \\ 1 - \exp(-z) & \text{si } \xi = 0 \end{cases}$$

donde:

- ξ es el parámetro continuo de forma
- σ es el parámetro continuo de escala ($\sigma > 0$)
- μ es el parámetro continuo de locación

El dominio de la distribución es:

$$\begin{cases} \mu \leq x < +\infty & \text{si } \xi \geq 0 \\ \mu \leq x < \mu - \frac{\sigma}{\xi} & \text{si } \xi < 0 \end{cases}$$

No es difícil ver que la relación que guardan ambas parametrizaciones es $k = \xi$. El hecho de usar $z = \frac{x-\mu}{\sigma}$ es porque en algunos casos la distribución va ser normalizada.

Los valores bajo esta parametrización serían los siguientes:

- $\xi = -0.41695$
- $\sigma = 1.5408 E + 16$
- $\mu = 1.7230 E + 6$

A continuación, se muestra una tabla con las primeas y las últimas entradas de la tabla con los datos usados en el presente trabajo.

Datos del gran total de llegadas y salidas^a

Año	Mes	Llegadas	Salidas	Gran Total
2006	Enero	972923	966951	1939874
2006	Febrero	879169	910832	1790001
2006	Marzo	1050400	1111202	2161602
2006	Abril	1007060	1065199	2072259
2006	Mayo	1018267	1042359	2060626
2006	Junio	1009346	1017498	2026844
2006	Julio	1152516	1207946	2360462
2006	Agosto	1103804	1092239	2196043
2006	Septiembre	905466	928400	1833866
2006	Octubre	1000645	1002621	2003266

^a Fuente: AICM

Por su parte las últimas entradas quedan de la siguiente manera:

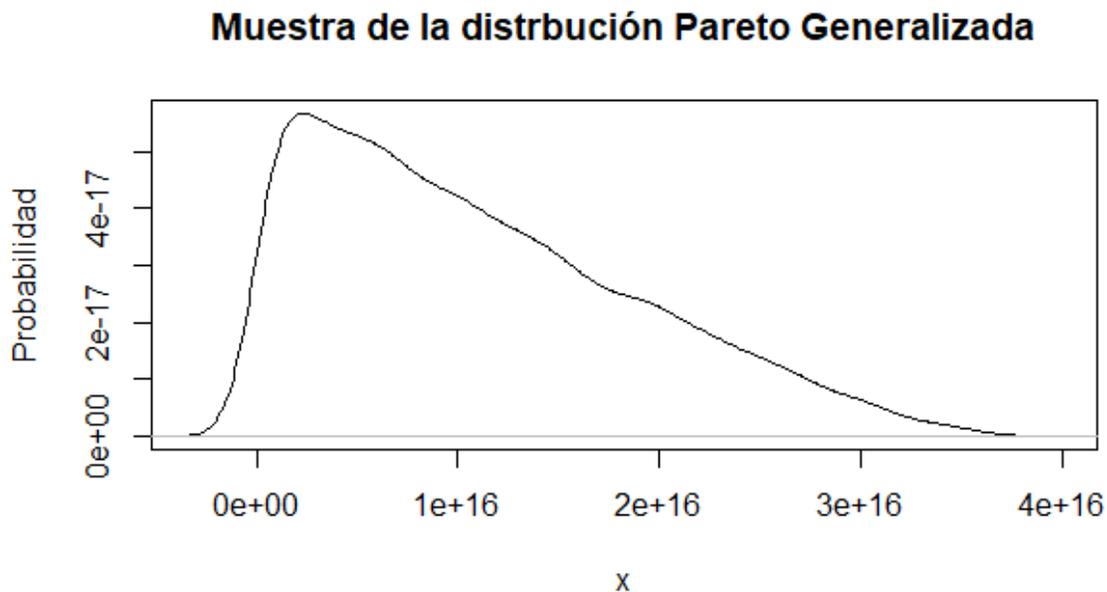
Datos del gran total de llegadas y salidas^a

Año	Mes	Llegadas	Salidas	Gran Total
2019	Mayo	2156740	2190456	4347196
2019	Junio	2139188	2121607	4260795
2019	Julio	2289557	2339595	4629152
2019	Agosto	2224635	2207163	4431798
2019	Septiembre	1952017	1962079	3914096
2019	Octubre	2147373	2102570	4249943
2019	Noviembre	2127759	2124365	4252124
2019	Diciembre	2248542	2254497	4503039
2020	Enero	2124011	2087450	4211461
2020	Febrero	1921547	1902294	3823841

^a Fuente: AICM

4.2) Comparación de los datos con una muestra aleatoria con los parámetros obtenidos

El primer paso consistió en generar una muestra aleatoria que siguieran la distribución de Pareto Generalizada con los parámetros obtenidos luego de ajustar los datos del Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México, esto para poder apreciar la curva de la densidad de dicha distribución. El resultado fue el siguiente:



Posterior a la generación de la muestra aleatoria se optó por agregar una variable más a la tabla de datos con que se está trabajando.

Para poder llevar a cabo la clasificación, vamos a fijar un umbral, a partir del cual se determinará si hay o no saturación. La autoridad mexicana estima que la capacidad máxima del aeropuerto es de 34 millones de pasajeros por año (tanto nacionales como internacionales), dividiendo la cifra para volverlo mensual nos da un aproximado de 2.83 millones de pasajeros por mes.

Veamos los cálculos. Para este caso se creará una nueva variable en el conjunto de datos, la cual tomará el valor de 1 si hay saturación (es decir, si el número de pasajeros sobrepasa los 2.83 millones) y un 0 en caso contrario.

Datos del gran total de llegadas y salidas^a

Año	Mes	Llegadas	Salidas	Gran Total	Saturacion
2006	Enero	972923	966951	1939874	0
2006	Febrero	879169	910832	1790001	0
2006	Marzo	1050400	1111202	2161602	0
2006	Abril	1007060	1065199	2072259	0
2006	Mayo	1018267	1042359	2060626	0
2006	Junio	1009346	1017498	2026844	0
2006	Julio	1152516	1207946	2360462	0
2006	Agosto	1103804	1092239	2196043	0
2006	Septiembre	905466	928400	1833866	0
2006	Octubre	1000645	1002621	2003266	0

^aFuente: AICM

De igual modo, para las últimas entradas de la tabla, tenemos lo siguiente:

Datos del gran total de llegadas y salidas^a

Año	Mes	Llegadas	Salidas	Gran Total	Saturacion
2019	Mayo	2156740	2190456	4347196	1
2019	Junio	2139188	2121607	4260795	1
2019	Julio	2289557	2339595	4629152	1
2019	Agosto	2224635	2207163	4431798	1
2019	Septiembre	1952017	1962079	3914096	1
2019	Octubre	2147373	2102570	4249943	1
2019	Noviembre	2127759	2124365	4252124	1
2019	Diciembre	2248542	2254497	4503039	1
2020	Enero	2124011	2087450	4211461	1
2020	Febrero	1921547	1902294	3823841	1

^aFuente: AICM

Vemos como al inicio de los datos que tenemos, no se ve que haya saturación en el aeropuerto. Sin embargo; la situación cambia drásticamente para las últimas entradas de la tabla, donde se observa como en últimos meses que hay registrados, ya se reportan como saturados.

4.3) Implementación de un árbol de regresión con los datos de las operaciones totales del Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México

Los árboles de regresión/clasificación fueron propuestos por Leo Breiman en el libro (Breiman, Friedman, Olshen, & Stone, 2017) y son árboles de decisión que tienen como objetivo predecir la variable respuesta y en función de co-variables.

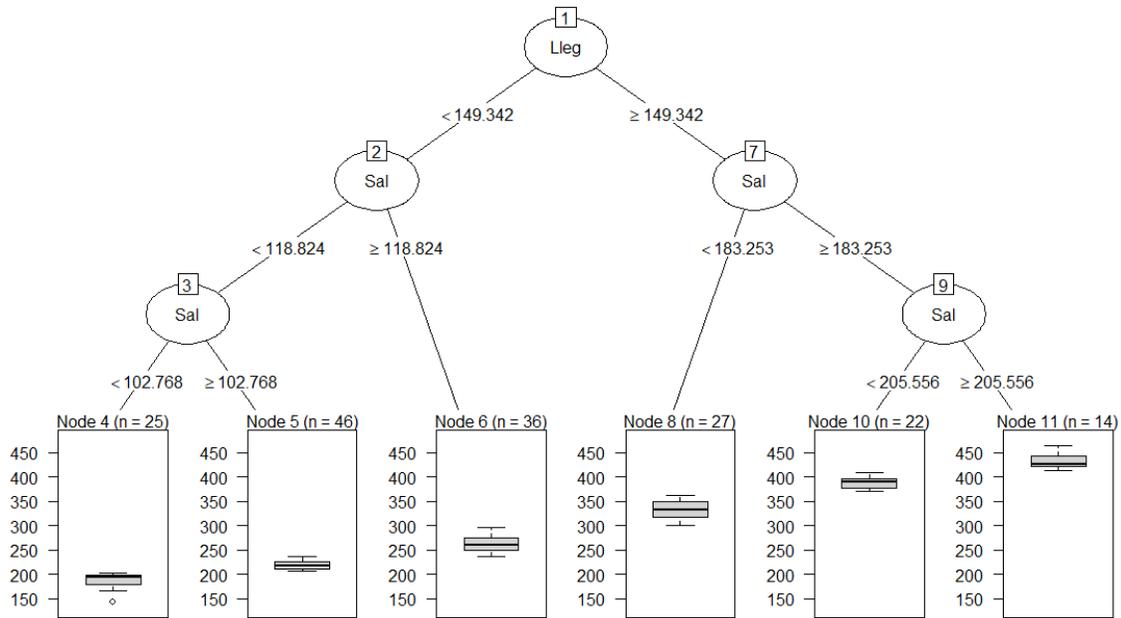
Los árboles se pueden clasificar en dos tipos que son:

Árboles de regresión en los cuales la variable respuesta y es cuantitativa. Árboles de clasificación en los cuales la variable respuesta y es cualitativa.

Se usara el paquete rpart ; esto debido a que es uno de los software que se pueden usar para crear árboles de regresión.

En un primero momento, con la nueva variable que se creó en la tabla, se trató de trazar un árbol de clasificación; sin embargo, esto no fue lo mejor debido a que como solo se tienen 2 resultados (saturado o no saturado), esto solo generaba una rama. Es por eso que se decidió por la opción de trabajar con el Gran Total.

Por la naturaleza de los datos, se dividirán todos ellos entre 10,000; esto con el objetivo de que la lectura del árbol de regresión sea más sencilla de leer. La variable que se busca explicar es la de Gran Total, debido a que esta es aquella que nos dará la pauta para saber.



La interpretación sería la siguiente: comenzando en el nodo inicial (el superior), si se reporta que las llegadas en un determinado mes son menores a 1, 493, 420 (recordemos que hay que multiplicar el valor de cada rama, como el 149.342, por 10,000), se tienen dos escenarios de acuerdo con las salidas; es decir, que las salidas sean menores a 1188240 vamos por la rama de la izquierda, si se cumple que las salidas son mayores o iguales a esa cantidad, vamos a la rama de la derecha.

El árbol cuenta con cuatro niveles de nodos. El primer nivel del árbol de regresión tiene un único nodo en la cima el llamado “nodo raíz”. De aquí es de donde sales las primeras ramificaciones hacia la izquierda o derecha, de acuerdo el valor las llegadas totales de pasajeros.

El segundo nivel cuenta con 2 nodos internos o intermedios. Estos nodos nos ayudan a delimitar aún más la variable que queremos explicar, el Gran Total en este caso, de acuerdo con los valores salidas totales de pasajeros. El tercer nivel es muy parecido al anterior, dado que es un nodo intermedio que usa la misma variable de salidas totales de pasajero para continuar la clasificación.

El cuarto y último nivel cuenta con 6 nodos terminales, aquellos que tienen una forma rectangular. Estas últimas cajas son las que nos van a dar un valor para nuestra variable de estudio; esto es, para el Gran Total. Nos va a arrojar un valor estimado del total de pasajeros (tanto nacionales como internacionales) que van a llegar y salir para un mes en el Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México.

Por último, las gráficas de la parte inferior, nos van a decir (dependiendo a cuál se haya llegado según las ramas del árbol) será el nodo que nos dirá aproximadamente como está la distribución de la variable Gran Total.

Un detalle interesante es el hecho de que los nodos terminales vienen acompañados de un diagrama de caja. Dicho gráfico pertenece a una familia diversa de técnicas estadísticas, pertenecientes al análisis de datos exploratorios o estadística descriptiva, que se utilizan para identificar visualmente patrones que de otro modo podrían estar ocultos en un conjunto de datos.

El cuadro representa el 50% medio de los datos. La línea horizontal dentro del cuadro es el valor medio o mediano de la distribución de riesgos relativos. Los extremos superior e inferior del cuadro son las bisagras (los cuartiles superior e inferior aproximados) de la distribución de riesgos relativos. Las líneas verticales de los extremos de la caja conectan los puntos de datos extremos con sus respectivas bisagras (Williamson, Parker, & Kendrick, 1989).

Si asumimos que los datos provienen de una distribución normal, esperaríamos que el 99,3% de los datos estuvieran dentro de los límites de valores atípicos. Cuando no ocurren valores atípicos, el diagrama de caja generalmente se dibuja sin mostrar los límites de valores atípicos (Hoaglin, Mosteller, & Turkey, 2000).

Esto con el objetivo de tener una idea de que tan separados o cercanos van a estar los valores de las estimaciones del Gran Total. Vemos que un rasgo que comparten las gráficas de los extremos es que su mediana está muy cerca de la parte inferior de la caja, esto significa que la mitad de los datos, en cuanto a magnitud, están lejos del valor estimado de la mediana. Esto no ayuda a hacernos una idea de la forma que podría tener la distribución de la variable en cuestión.

Es decir, si caemos en el nodo 4 (el cual se ve que hay 25 observaciones en ese nodo), la variable de Gran Total puede tener aproximadamente 1,878,679 (es decir, 187.8679 que es la media de la caja presentada en el nodo, por 10,000).

El proceso se repite con cada uno de los nodos. A continuación, una tabla con el nombre del nodo que hay en la figura junto con su media y las observaciones (de los datos originales) que hay en cada uno de ellos.

Nodo	Observaciones	Media (en 10,000)
Nodo 4	25	187.8679
Nodo 5	46	218.922
Nodo 6	36	263.6619
Nodo 8	27	332.0071
Nodo 10	22	388.0057
Nodo 11	14	430.5478

Vemos como entre más a la derecha se dirigen los valores en el árbol de regresión, mayor el valor que puede tomar la variable de Gran Total.

Esta técnica es especialmente útil, debido a que si se hace algún pronóstico para las salidas y llegadas (considerando tanto nacionales como internacionales) del Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México; como, por ejemplo, con un modelo de series de tiempo, con esos datos se hace la predicción del Gran Total. De ahí se puede ver si se espera una saturación o no.

Más aún, si se refina el árbol de regresión anterior, para que trabaje con las llegadas nacionales e internacionales de cada una de las terminales del aeropuerto; se obtendrá un modelo más elaborado, pero que también será capaz de pronosticar el total de las llegadas al aeropuerto.

Se tiene la ventaja de ser un modelo capaz de adaptarse a las necesidades de quien lo necesite emplear.

Conclusiones

El Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México ha venido enfrentando en sus operaciones, desde hace un tiempo considerable, el problema de la saturación en sus instalaciones. Este fenómeno podría desencadenar la cancelación de contratos de algunas aerolíneas por considerar un incremento significativo en sus costos, debidos a los problemas de saturación de las instalaciones, lo cual a su vez ocasionaría la pérdida sustancial de empleos, entre otras dificultades, para el AICM. Este fenómeno se ha estudiado, no solo en México, sino también en otros países a partir de la saturación por una demanda excesiva del funcionamiento de sus instalaciones.

Es importante destacar la importancia de la funcionalidad del AICM, particularmente aquellas operaciones que tiene que ver con las llegadas y salidas de pasajeros. Esto es que evitar la saturación hará que las redes de trabajo dentro de los aeropuertos (como los operadores, las líneas de espera e incluso los vuelos) no se ven afectados con los retrasos que se han vuelto muy frecuentes. Lo anterior debido a que un retraso podría significar en una pérdida económica de gran magnitud para el aeropuerto.

En el caso del AICM se han tratado de tomar diferentes medidas; como los estudios basados en simulación de escenarios que contemplan el hecho de invertir en nueva infraestructura para el aeropuerto (esto puede ser la inversión en nuevo aeropuertos o en la expansión de las instalaciones del existente), la gestión de la demanda (este aspecto contempla diferentes estrategias como lo son: procesamiento remoto de pasajeros, estacionamiento de vehículos fuera del aeropuerto, el procesamiento de pasajeros fuera del aeropuerto y el tener posiciones suficientes para que las aeronaves puedan realizar embarques y desembarques), dividir los diferentes picos de demanda (eso para evitar las aglomeraciones en ciertos momentos del año; se toma medidas como el utilizar los precios de los vuelos como regulador de la demanda de tráfico o vender el derecho a utilizar el aeropuerto en cierto horario a alguna aerolínea).

Continuando con lo anterior, otro escenario estudiado es la aplicación de innovaciones operativas y tecnológicas (esto sobre todo se refiere a evitar aglomeraciones en zonas de

espera para las operaciones de check-in). Finalmente, las simulaciones basadas en computadora se basaron más en los aspectos operativos del Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México (impacto originado por el crecimiento natural de la demanda de servicio, efectos de las labores de mantenimiento en las pistas, efectos de la presencia de condiciones ambientales adversas) y en los aspectos referentes a la planeación del mismo (efecto de la aplicación de una nueva tecnología para incrementar la capacidad de las pistas, efecto de la utilización intensiva de aeronaves de mayor capacidad, efecto de la incorporación de infraestructura nueva, impacto de una nueva estrategia para atender a las aeronaves durante las fases de despegue y aterrizaje).

El enfoque que se manejó en el presente trabajo de investigación, fue el de conocer la forma en que se relaciona el problema de la saturación con las operaciones de llegada y salida de pasajeros de los aeropuertos; dicha relación radica en que la saturación repercutirá a futuro en las operaciones del Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México y de los empleos que puede llegar a generar. Uno de los primeros acercamientos a este fenómeno fue mediante el proceso de Poisson; sin embargo, con el avance de la tecnología y el refinamiento de las técnicas esta situación también avanzó.

Al hablar de este tipo de avances se destacan aquellos métodos en los que se estiman los parámetros para obtener una distribución que trate de replicar de forma razonable el comportamiento de los datos del Gran Total (salidas y llegadas de pasajeros tanto nacional como internacionalmente) y con ello determinar si habrá o no saturación en un futuro. Por otra parte, luego de ver el comportamiento se buscó una técnica que nos pudiera ayudar a ubicar o clasificar los resultados del Gran Total de llegadas.

De este modo, en el trabajo de investigación se realizó una prueba de bondad de ajuste a la distribución de Pareto Generalizada para, posteriormente, generar una muestra aleatoria de dicha distribución con los parámetros obtenidos y dibujar ambas gráficas; esto para apreciar de mejor manera ambas curvas. Para la clasificación, se recurrió al cálculo de un árbol de regresión usando como variables independientes el total de salidas y llegadas (tanto nacionales como internacionales) y con ello explicar el Gran Total de pasajeros a través de los nodos que se dibujaron en dicho árbol.

De acuerdo con los resultados obtenidos en el trabajo, el Gran Total de llegadas se distribuye como una distribución de Pareto Generalizada; pudiendo estimar sus parámetros de una buena manera en concordancia con los métodos expuestos a lo largo del trabajo, utilizando todas las metodologías posibles; esto debido a que dependiendo el conjunto de datos con el que se trabaje es más fácil aplicar un determinado método de estimación, aunado a que las herramientas computacionales y lenguajes de programación estadísticos brindan las herramientas necesarias para poder realizar dicha tarea.

Por otra parte, en lo que se refiere al árbol de regresión nos da un panorama de la distribución de nuestra variable a estudiar en los nodos finales del árbol en forma de un de caja o un diagrama de caja brazos (boxplot). Lo que nos permite saber por que rango de valores se pueden mover las estimaciones de un futuro.

A partir del punto anterior, se puede decir que el uso de estas técnicas estadísticas, permiten obtener una estimación bastante buena para conocer el comportamiento de los datos con los que se trabajan; con lo cual se obtiene un mayor grado de certeza en los resultados, lo que lleva a probar la hipótesis de investigación de que las operaciones de llegada y salida del Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México (AICM) pueden ser analizadas a partir de la distribución de probabilidad de Pareto Generalizada y árboles de regresión.

Debido a que una de las principales limitaciones del presente trabajo fue la obtención de ciertos datos (sobre todo, aquellos que resultaban ser e un aspecto muy específico ya sea del aeropuerto o relacionado con una determinada aerolínea), se consideran como futuras líneas de investigación la elaboración de ajustes a diferentes distribuciones de probabilidad a las operaciones de llegada y salida del aeropuerto por hora del día en las instalaciones, lo que nos ayudará a saber en qué momentos del día hay una mayor probabilidad de saturación; así como de la distribución de los vuelos de cada una de las aerolíneas, esto con el objetivo de optimizar algunas rutas y operaciones de las mismas.

Finalmente, es importante el destacar que pese a la situación de constante saturación en la que se encuentra el Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México y el reto que esto representa para la industria aérea mexicana, esto puede generar un refinamiento en las

técnicas y operaciones de los operadores y las aerolíneas, así como un cambio de cultura en el modelo de negocios de los aeropuertos y su forma de actuar ante situaciones de saturación.

Bibliografía

- Aeropuerto y Servicios Auxiliares. (s.f.). *Libro Blanco, Programa de Atención a la Demanda de Servicios Aeroportuarios en el Centro del País*. ASA: Coordinación de las Unidades de Negocios.
- AICM. (2 de Marzo de 2014). *Breve Historia del Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México*. Obtenido de <http://www.aicm.com.mx/acercadelaicm/Archivos/BREVEHISTORIA2011.pdf>
- AICM. (23 de Abril de 2016). *Breve Historia del AICM. Infraestructura Aeroespacial*. Obtenido de <http://www.aicmaniversario.com/2013/01/breve-historia-del-aicm/>
- AICM. (5 de Mayo de 2020). *Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México*. Obtenido de <https://www.aicm.com.mx/aicm/acerca-del-aicm/breve-historia>
- Air Transport Action Group. (2017). *Aviation Benefits Beyond Borders*. Ginebra, Suiza.
- Air Transport World. (2016). *Air Transport World. July/August 2016*. Penton Media.
- Airports Council International. (2015a). *ACI releases 2014 world airport traffic report*.
- Airports Council International. (2015b). *Airport Economic Survey 2014*. Montreal: ACI.
- Airports Council International. (s.f.). *ACI Worldwide Air Transport Forecast 2005-2020: Passenger, Freight and Aircraft Movement*. Montreal, Canada.
- Alvarez, R. (2006). *Un Aeropuerto para el siglo XXI*. México: Instituto Mexicano del Concreto y el Cemento.
- Arnold, B. C. (2008). Pareto and Generalized Pareto Distributions. En D. Chotikapanich, *Modeling Income Distributions and Lorenz Curves* (págs. 119-145). Nueva York: Springer.
- Beatty, R., Hsu, R., Berry, L., & Rome, J. (1999). Preliminary Evaluation of Flight Delay Propagation through an Airline Schedule. *Air Traffic Control Quarterly*, 259-270.
- Belobaba, P., Odoni, A., & Barnhart, C. (2016). *Global Airline Industry*. Nueva York: Wiley.

- Boeing. (2003). *Current Market Outlook: 2013-2032*.
- Breiman, L., Friedman, J., Olshen, R., & Stone, C. (2017). *Classification and Regression Trees*. Florida: Chapman & Hall/CRC.
- Burnham, D., Hallock, J., & Greene, G. (2001). Increasing Airport Capacity with Modified IFR Approach Procedures for Close-Spaced Parallel Runways. *Air Traffic Control Quarterly*, 45-58.
- Cámara de diputados. (2009). *Reglamento de la Ley de Aeropuertos*. México.
- Cámara Nacional de Aerotransportes. (2017). *Anuario 2016-2017*. México.
- Castillo, E. (1988). *Extreme Value Theory in Engineering*. Nueva York: Academic Press.
- Castillo, E., & Hadi, A. (1997). Fitting the Generalized Pareto Distribution to Data. *Journal of the American Statistical Association*, 1609-1620.
- Centre for Aviation. (15 de Julio de 2015). *Reports: Centre for Aviation*. Obtenido de <https://centreforaviation.com/analysis/reports/theworlds-biggest-airport-construction-projects-2015-total-value-over-usd500-billion-part-1-205200>
- Copenhagen Economics. (2012). *Airport Competition In Europe*. Copenhagen: Copenhagen Economics.
- Diario Oficial de la Federación. (2014). *Declara DGAC saturación del AICM "Benito Juárez"*. México.
- Diario Oficial de la Federación. (1994). *DECRETO que establece el cierre del Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México Benito Juárez a partir del 1o. de junio de 1994, para las operaciones de aeronaves que se indican*. México.
- Diercks, D., Fonarow, G., Kirk, J., Emerman, C., Hollander J. E., & Weber, J. (2008). Risk stratification in women enrolled in the Acute Decompensated Heart Failure National Registry Emergency Module (ADHERE-EM). *Academic Emergency Medicine*, 151-158.

- Doganis, R. (2010). *Flying Off Course: Airline Economics and Marketing* (Cuarta ed.). Londres: Routledge.
- Eurocontrol. (2013). *Challenges of Growth 2013*. Bruselas: Eurocontrol.
- Fisher, R. A., & Tippett, L. (1928). Limiting forms of the frequency distribution of the largest or smallest member of a sample. *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, 180-190.
- Freathy, P., & O'Connell, F. (1998). *European Airport Retailing: growth strategies for the new millennium*. Basingstoke: Macmillan.
- Galambos, J. (1987). *The Asymptotic Theory of Extreme Order Statistics*. Florida: R.E. Krieger.
- Gillen, D. (2011). The evolution of airport ownership and governance. *Journal of Air Transport Management*, 106-11.
- Goedeking, P. (2010). *Networks in Aviation: Strategies and Structures*. Nueva York: Springer.
- Gopalakrishnan, K., & Balakrishnan, H. (2017). A Comparative Analysis of Models for Predicting Delays in Air Traffic Networks. *Air Traffic Management Research and Development Seminar*.
- Graham, A. (2014). *Managing Airports: An international Perspective* (Cuarta ed.). Londres: Routledge.
- Graham, A., & Morrell, P. (2017). *Airport finance and investment in global economy*. Nueva York: Routledge.
- Hamzawi, S. (1992). Lack of airport capacity: Exploration of alternative solutions. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 47-58.
- Herbert, J., & Dietz, D. C. (1997). Modeling and analysis of an airport departure process. *Journal of Aircraft*, 43-47.

- Herrera, A. (2012). *Modelo de simulación de operaciones aéreas en aeropuertos saturados: el caso del aeropuerto internacional de la Ciudad de México*. Sanfandila: Insituto Mexicano del Transporte.
- Herrera, A. (2017). *Alternative Solutions to Airport Saturation: Simulation models applied to congested airports*. París: ITF.
- Hoaglin, D., Mosteller, F., & Turkey, J. (2000). *Understanding Robust and Exploratory Data Analysis*. Nueva York: Wiley.
- Hosking, J. R. (1985). Algorithm AS215: Maximum-Likelihood Estimation of the Parameters of the Generalized Extreme-Value Distribution. *Applied Statistics*, 301-310.
- Hosking, J., & Wallis, J. (1987). Parameter and Quantile Estimation for the Generalized Pareto Distribution. *Technometrics*, 339-349.
- International Air Transport Association. (2019). *El valor de la aviación en México*. IATA Economics.
- International Civil Aviation Organization. (2012). *ICAO's Policies on Charges for Aisports and Air Navigation Services*. Montreal: ICAO.
- International Transport Forum. (2015). *Liberalisation of Air Transport, Summary: Policy Insights and Recommendations*. París: ITF.
- James, G., Witten, D., Hastie, T., & Tibshirani, R. (2013). *An Introduction to Statsitcal Learning with Applications in R*. Nueva York: Springer.
- Jorge-Calderon, D. (2014). *Aviation Investment*. Farnham: Ashgate.
- Klugman, S., Panjer, H., & Willmot, G. (2008). *Loss Models from Dato to Decision* (Tercera ed.). Nueva Jersey: Wiley.
- Leadbetter, M., Lindgren, G., & Rootzén, H. (1983). *Extremes and Related Properties of Random Sequences and Processes*. Nueva York: Spinger.

- Levine, M. (1969). Landing fees and the airport congestion problem. *Journal of Law and Economics*, 79-108.
- Leyva, M. A. (2011). La irresponsabilidad empresarial en Compañía Mexicana de Aviación. *El Cotidiano*, 19-31.
- Lian, G., Zhang, Y., Xing, Z., Luo, Q., & Cheng, S. (2019). A new dynamic pushback control method for reducing fuel-burn costs: Using a predicted taxi-out time. *Chinese Journal of Aeronautics*, 660-673.
- Ma, X. (2018). *Using Classification And Regression Trees: A Practical Primer*. Charlotte: Information Age Publishing.
- Moodie International y The SAP Group. (2014). *The Airport Commercial Revenues Study*. Brentford: Moodie International and The SAP Group.
- Morrison, S., & Winston, C. (2007). Another look at airport congestion pricing. *American Economic Review*, 1970-1977.
- Morwitz, V. G., & Schmittlein, D. (1992). Using segmentation to improve sales forecasts based on purchase intent: Which "intenders" actually buy? *Journal of Marketing Research*, 391-405.
- Mueller, J. P., & Massaron, L. (2016). *Machine Learning for Dummies*. Nueva Jersey: John Wiley & Sons.
- Mujica, M., & Scala, P. (2017). Model-based remote runway solution for a congested airport: Mexico City Airport Case. *European Modelling Simulation Symposium*. Barcelona.
- Neufville, R., & Odonato, A. (2003). *Airport Systems: Planning, Design and Management*. Estados Unidos: McGraw Hill.
- Pareto, V. (1897). The New Theories of Economics. *Journal of Political Economy*, 485-502.

- Pickands, J. (1975). Statistical Inference Using Extreme Order Statistics. *The Annals of Statistics*, 119-131.
- Pyrgiotis, N., Malone, K. M., & Odoni, A. (2013). Modelling delay propagation within an airport network. *Transportation Research Part C-emerging Technologies*, 60-75.
- Rao, C. R. (1973). *Linear Statistical Inference and Its Applications* (Segunda ed.). Nueva York: Wiley.
- Resnick, S. (1987). *Extreme Values, Regular Variation and Point Processes*. Nueva York: Springer-Verlag.
- Russell, S., & Norving, P. (2004). *Inteligencia Artificial: Un enfoque moderno*. Madrid: Pearson Prentice Hall.
- Smith, R. (1984). Treshold Methods for Sample Extremes. En J. Tiago de Oliveira, *Statistical Extremes and Applications* (págs. 621-638). Lisboa: Springer.
- Smith, R. L. (1989). Extreme Value Analysis of Enviromental Time Series: An Application to Trend Detection in Ground-Level Ozone. *Statistical Science*, 3697-393.
- Starkie, D. (2008). *The Airport Industry in Competitive Enviroment: A United Kingdom Perspective*. París: ITF.
- Wang, A., Au, K., Ailamaki, A., Brockwell, a., Faloutsos, C., & Granger, G. (2004). Storage device performance prediction with CART models. *Performance Evaluation Review*, 412-413.
- Williamson, D., Parker, R., & Kendrick, J. (1989). The box plot: A simple visual method to interpret data. *Annals of internal medicine*, 916-921.
- Wu, C.-L. (2010). *Airline Operations and Delay Management: Insights from Airline Economics, Network and Strategic Schedule Planning*. Surrey, Inglaterra: Ashgate Publishing.