

ALTERNATIVAS DE SOLUCIÓN DE CAPACIDAD AEROPORTUARIA DEL 'AEROPUERTO INTERNACIONAL CIUDAD DE MEXICO' MEDIANTE TRENES

Orlando Sánchez López¹

María Eloísa Gurruchaga Rodríguez²

Alfonso Herrera García³

Luis Carlos Flores Ávila⁴

Miren Edurne Gurruchaga Rodríguez⁵

RESUMEN: La gran actividad aeroportuaria en México, particularmente el transporte de pasajeros, ha generado problemas de congestión en algunos aeropuertos, tal es el caso del Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México (AICM). Algunos estudios establecen que este aeropuerto iniciará su saturación en el corto plazo. Por lo tanto, surge la necesidad de desviar el tránsito aéreo de corto itinerario, hasta 500 km de distancia, a otros modos de transporte. El transporte ferroviario mediante trenes de alta (TAV) y media velocidad (TMV) es un elemento clave para el manejo de estos flujos, ya que puede generar beneficios significativos en la reducción de la congestión aeroportuaria. Mediante un estudio de series de tiempo y de modelos de pronósticos del AICM, se obtuvo como resultado que ocho rutas aéreas tienen potencial ferroviario. Este estudio concluye que el impacto originado por el crecimiento natural de la demanda del AICM producirá su saturación a finales del año 2014, y que mediante la implementación de TAV y TMV, el efecto de congestión crítico se podría retrasar en cinco años.

Palabras clave: Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México. Saturación. Tren de alta velocidad. Tren de media velocidad.

1 INTRODUCCIÓN

El sistema aeroportuario en México está conformado por 85 aeropuertos (59 internacionales y 26 nacionales); además, existen 1,344 aeródromos. Del total de aeropuertos, 34 están concesionados al sector privado; 19 están a cargo de Aeropuertos y Servicios

¹ Ingeniero Industrial, Estudiante, Instituto Tecnológico de Orizaba, Orizaba, México. E-mail: orlando_sanchez_lopez@yahoo.com.mx.

² Dra. en Ingeniería, Profesor, Instituto Tecnológico de Orizaba, Orizaba, México. E-mail: megurruchaga@gmail.com.

³ Dr. en Ingeniería, Investigador, Instituto Mexicano del Transporte, Carretera Querétaro-Galindo, Sanfandila 76703 Pedro Escobedo, Qro. México. E-mail: aherrera@imt.mx.

⁴ Dr. en Ingeniería, Profesor, Instituto Tecnológico de Orizaba, Orizaba, México. E-mail: lcfloresa@yahoo.com.

⁵ Dra., Profesor-Investigador, Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, Monterrey, Nuevo León, México. E-mail: egurruchaga@itesm.mx.

Auxiliares (ASA) y cinco en sociedad con gobiernos estatales y el sector privado; el Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México (AICM) opera independientemente; y los restantes 26 están a cargo de gobiernos estatales o municipales, o bien, son militares o privados (SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES – SCT, 2008).

Dentro de la infraestructura aeroportuaria del país destaca el AICM, es una de las principales infraestructuras en el ámbito mundial, dado que se ubicó en la posición número 52, en cuanto al movimiento de pasajeros; en el lugar 29, en relación con el número de operaciones efectuadas; y en el lugar 50, en cuanto al movimiento de carga aérea, durante el periodo diciembre/2010-diciembre/2011 (AIRPORTS COUNCIL INTERNATIONAL, 2011). Además, ocupa el primer lugar en la actividad aérea nacional, atiende al 46.9% de los pasajeros; el 48.9% de las operaciones (despegues y aterrizajes), y da servicio al 58% de la carga aérea, tanto de vuelos nacionales como internacionales (SCT, 2011).

El principal reto del sistema aeroportuario del AICM continúa siendo la enorme demanda 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, 2011)

La desviación del tránsito aéreo de corto itinerario (hasta 500 km de distancia) a otros modos de transporte, liberaría en algún grado la congestión en aeropuertos caracterizados por una alta proporción de tal tránsito.

Cuando el tren de alta velocidad TGV (Train à Grande Vitesse) fue abierto en 1981 entre París y Lyon (Francia), con un tiempo de recorrido competitivo con el modo aéreo, virtualmente todo el tránsito de pasajeros aéreos entre ambas ciudades cambió al sistema de tren (VELDHUIS, 1990).

Si tales enlaces con trenes de alta velocidad se desarrollan para conectar a los principales aeropuertos, éstos pueden servir como un excelente alimentador para los flujos de transporte aéreo nacionales o internacionales.

Los trenes de alta velocidad (TAV) y los de media velocidad (TMV) son una opción viable a considerar en los corredores de tránsito de alta densidad. Estudios del impacto de los TAV y TMV en los aeropuertos europeos indican su alto potencial para remplazar a los vuelos

alimentadores, y la capacidad para reducir el problema de congestión en los aeropuertos (WIDMER; HIDBER, 2000)

El transporte ferroviario de pasajeros en México tuvo una tendencia decreciente durante el periodo de 1997 a 2006, dado que durante el primer año de referencia transportó 5 millones de pasajeros, y en el último este volumen se redujo a sólo 260 mil usuarios. Esta situación se presentó debido a ‘la reestructuración del sistema ferroviario nacional que se orientó a restituir la importancia del ferrocarril como eje central del sistema de transporte terrestre de carga...’. Por lo anterior, se estableció ‘prestar el servicio de transporte de pasajeros en aquellas regiones donde no existían otros medios de transporte e impulsar los servicios de transporte de pasajeros turísticos y/o suburbanos’ (SCT, 2008).

El objetivo 3.2.5, del Programa Sectorial de Comunicaciones y Transportes 2007-2012, establece la necesidad de ‘Promover y apoyar proyectos de transporte ferroviario de pasajeros suburbanos, interurbanos y turísticos para contar con nuevas alternativas de transporte masivo de pasajeros eficiente, seguro y limpio al tiempo que se aprovecha la infraestructura existente y se asegura el servicio de transporte ferroviario de pasajeros a comunidades aisladas’ (SCT, 2008). Los resultados esperados de este objetivo se orientan al resurgimiento del transporte de pasajeros; aprovechar la infraestructura existente y continuar con la prestación regular del servicio ferroviario de pasajeros.

El transporte de superficie de altas velocidades, por ejemplo, TAV o TMV reflejan un modo alternativo para captar la alta densidad de pasajeros aéreos. Por ello, el objetivo es determinar las rutas aéreas con potencial ferroviario para trenes de alta y media velocidad en México con base en los flujos de pasajeros aéreos como alternativas de solución para problemas de capacidad aeroportuaria del AICM.

2 REVISIÓN DE LITERATURA

Numerosos estudiosos exponen los beneficios en desarrollo económico y social mediante la implementación de tecnologías para el transporte masivo de pasajeros como los trenes de alta y media velocidad en diferentes países del mundo. El estudio se enfocó en investigaciones que exploran propuestas de solución para enfrentar el problema del desequilibrio entre la capacidad disponible de los aeropuertos y reducir el cociente demanda/oferta de servicio, se obtienen las siguientes investigaciones:

- Herrera García (2006), estudio que explora algunas propuestas para enfrentar el problema del desequilibrio entre la capacidad disponible de los aeropuertos y la demanda de servicio en México.
- Herrera García (2011), estudio donde se evaluaron alternativas que podrían aliviar los problemas de saturación aeroportuaria en el AICM, por ejemplo, incrementando la capacidad de las pistas, reduciendo la demanda, incorporando nueva infraestructura, o mediante un nuevo procedimiento operacional.
- Hamzawi (1992), investigación que analiza la falta de capacidad de los aeropuertos para satisfacer las demandas de tráfico, el problema resultante de la congestión aeroportuaria y retrasos generados en el sistema de aviación en muchos aeropuertos importantes de todo el mundo.
- Mendoza y Téllez (2006), reporte donde se analiza los beneficios de los trenes de alta velocidad en el mundo y su posible utilización en México.
- Veldhuis (1990), documento informativo donde se identifican los medios para lograr una mayor liberalización en el sector del transporte aéreo a nivel regional, internacional y global, entre ellos la implementación de trenes de alta y media velocidad.
- Widmer y Hidber (2000), investigación donde se analizan los efectos de las estaciones de tren de alta velocidad en los aeropuertos europeos, utilizando un marco costo-beneficio y los efectos sobre la economía nacional, teniendo en cuenta los costos de inversión y los beneficios de descongestión aeroportuaria.
- Widmer y Axhausen (2001), investigación con la colaboración de Cooperación Europea en Ciencia y Tecnología (European Cooperation in Science and Technology, COST), que presenta los resultados de un estudio sobre los efectos de la implementación de trenes de alta y media velocidad en rutas aéreas caracterizadas por un alto flujo de pasajeros aéreos.

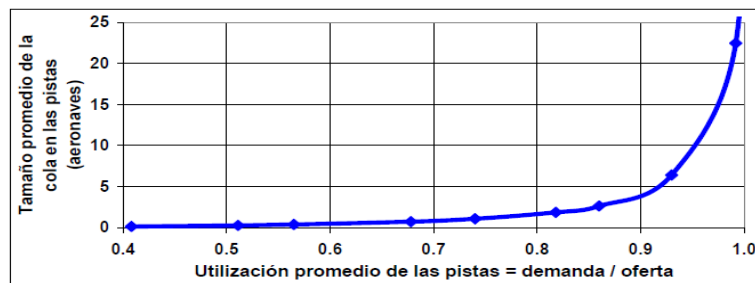
3 RESULTADOS

La experiencia operacional con los sistemas de transporte ha mostrado que las demoras empiezan a ser significativas cuando la demanda alcanza alrededor del 80% de la capacidad disponible del sistema, y que su valor promedio se incrementa exponencialmente conforme la relación demanda/capacidad se aproxima al 100% (HAMZAWI, 1992).

Experimentos con modelos de simulación aplicados a aeropuertos muestran que al igual que las demoras, los tamaños de las colas de aeronaves a la entrada de las pistas (tanto en despegues como en aterrizajes), empiezan a crecer sustancialmente a partir de valores de utilización promedio de las pistas mayores a 80% (HERRERA, 2006).

Estudios realizados en el IMT establecen que el AICM tendrá un deterioro significativo en las operaciones de las pistas (al alcanzar el 80% de su capacidad máxima) en octubre del año 2015. En la Figura 1, se observa cuando la relación demanda/oferta crece de 50% a 60%, el tamaño promedio de la cola en las pistas es de apenas una aeronave; sin embargo, si dicha relación crece de 90% a 99%, el tamaño de la cola respectiva crecerá en promedio 21 aeronaves, pasando de 4 aeronaves inicialmente, a 25 al final (HERRERA, 2011).

Figura 1 – Tamaño promedio de aeronaves de un aeropuerto en función de su utilización promedio

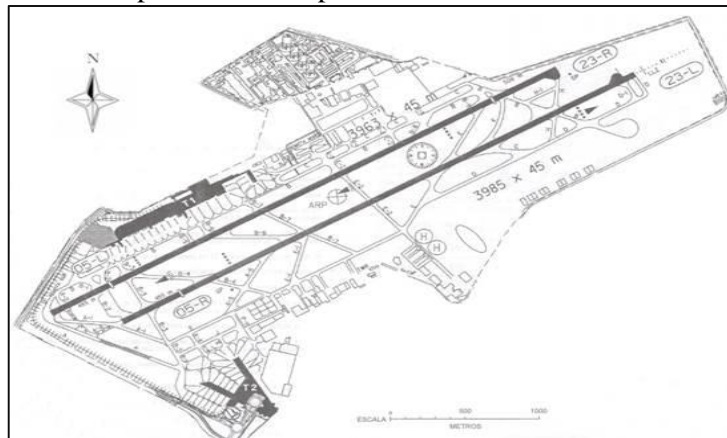


Fuente: Herrera (2011, p. 12)

3.1 Impacto originado por el crecimiento natural de la demanda de servicio del AICM

Las dos pistas del AICM tienen una separación de 310 metros, dicha condición no permite las operaciones simultáneas, sólo secuenciales, por lo que la capacidad de las pistas está limitada a 61 operaciones/hora, (Figura 2) (HERRERA, 2011).

Figura 2 – Vista en planta del Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México



Fuente: SENEAM (2011)

Mediante la metodología descrita por Diebold (1998), se realizó el análisis de series de tiempo de las operaciones anuales del AICM del año 1967 al año 2012 para pronosticar y calcular el año en que se iniciará un deterioro significativo del servicio de las pistas de este aeropuerto, es decir cuando alcanza el 80% de su capacidad máxima.

Con el objeto de estratificar y acotar modelos de pronósticos, se realizó una prueba de hipótesis a los datos de la serie temporal del año 1967 al año 2012. Se utilizó la *Prueba de Pearson* para fundamentar la posible tendencia en las operaciones anuales del AICM.

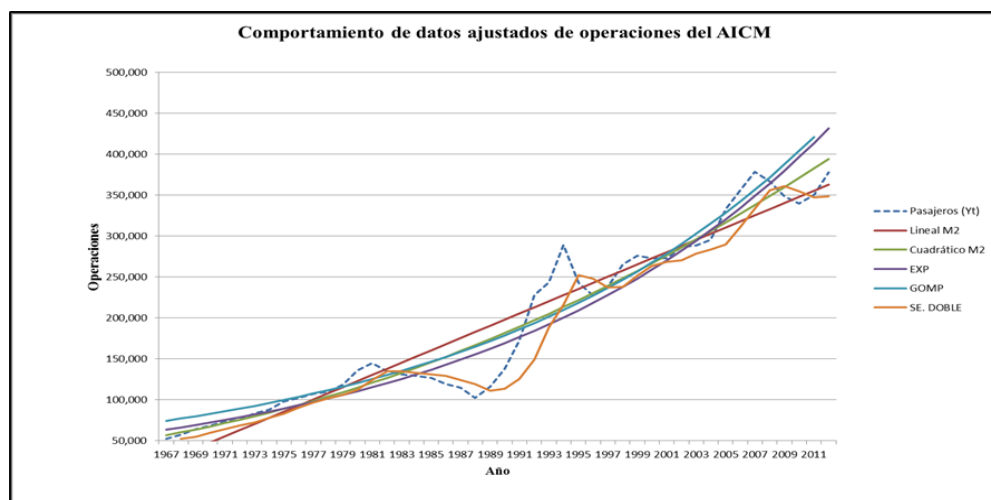
El coeficiente de correlación fue de $r^2=0.92$, por lo que se concluye con 95% de confianza que hay tendencia positiva en el flujo de las operaciones anuales del AICM, por lo que la búsqueda se acotó a modelos de pronósticos no estacionarios.

Los modelos que se utilizaron fueron:

- Modelo lineal de mínimos cuadrados (Lineal M2)
- Modelo cuadrático de mínimos cuadrados (Cuadrático M2)
- Modelo Exponencial (EXP)
- Modelo de ajuste logístico *Gompertz* (GOMP)
- Modelo de Suavización Exponencial Doble (SE.DOUBLE)

En la Figura 3 se observan los resultados del comportamiento de los datos ajustados de los modelos de pronóstico analizados en relación a las operaciones anuales del AICM.

Figura 3 – Datos ajustados de modelos de pronóstico para las operaciones anuales del AICM



Fuente: Elaboración propia con base en Excel

Los residuales obtenidos con base en la información de la Figura 3, fueron analizados a través de pruebas normalidad e independencia, la prueba Anderson Darling y la prueba de Rachas respectivamente, ambas con un alfa de 5%. Las conclusiones estadísticas en ambas

pruebas fueron satisfactorias para todos los modelos, por lo tanto son buenos candidatos para pronosticar la serie temporal, no obstante, se debe elegir el mejor. Para evaluar el modelo que tiene un mejor rendimiento, se usaron las siguientes medidas de desempeño:

- Desviación absoluta media (MAD)
- Porcentaje medio de error absoluto (MAPE)

Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1 – Medidas de desempeño de modelos de pronóstico analizados

Modelo	MAD	MAPE
Modelo lineal de mínimos cuadrados (Lineal M2)	21.752,4	0.164
Modelo cuadrático de mínimos cuadrados (Cuadrático M2)	18.159,7	0.107
Modelo Exponencial (EXP)	21.025,5	0.122
Modelo de ajuste logístico Gompertz (GOMP)	21.356,1	0.123
Suavización Exponencial Doble (SE. DOBLE)	18.519,7	0.108

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con la Tabla 1, el modelo con mejor rendimiento es el Modelo Cuadrático de Mínimos Cuadrados (Cuadrático M2), ya que presenta los valores más bajos en las medidas de desempeño.

Con el análisis de series de tiempo, se calculó la tasa de crecimiento de las operaciones anuales del AICM, se estableció un *crecimiento geométrico* ya que obtuvo el mejor índice de correlación de *Pearson* con un valor de $r^2 = 0.94$, a diferencia de un crecimiento lineal donde se obtuvo un valor de $r^2 = 0.91$ y el de un crecimiento exponencial con una valor de $r^2 = 0.93$. La ecuación generalizadora para un crecimiento geométrico está dada por Roland (1983) (Ecuación 1):

$$P_f = P_i * (1 + r_i)^t \quad (1)$$

Donde la tasa de crecimiento se calcula mediante (Ecuación 2):

$$r = \left[\left(P_f / P_i \right)^{(1/t)} \right] - 1 \quad (2)$$

Donde P_f es la población final del período, P_i es la población al inicio del período, r es la tasa anual de crecimiento y finalmente t representa el intervalo de tiempo en años y fracciones que dura el periodo.

Analizando las operaciones anuales del AICM del año 1967 al año 2012 obtenemos la siguiente tasa de crecimiento:

$$377,743 = 52,209 * (1 + r_i)^{45}$$

$$r = \left[\left(377,743 / 52,209 \right)^{(1/45)} \right] - 1 = 0.0449 = 4.49\%$$

Utilizando el modelo de pronóstico cuadrático de mínimos cuadrados y la tasa de crecimiento geométrico, podemos proyectar el comportamiento de las operaciones anuales del AICM para calcular a partir de qué año iniciaría un deterioro significativo del servicio de las pistas. Cabe señalar que el 80% de su capacidad máxima equivale a 427,488 operaciones.

3.2 Impacto originado por la implementación de TAV y TMV para la descongestión aeroportuaria del AICM

El desvío de los flujos de pasajeros aéreos del AICM hacia otros modos de transporte como los trenes de alta y media velocidad son una opción viable para prolongar las operaciones de este aeropuerto, lo que se resultaría en beneficios económicos y ambientales para el país.

3.3 Identificación de material rodante

Se indagó en las características operativas y generales de los trenes de alta y media velocidad en diferentes países del mundo, para estimar un flujo de pasajeros que permita limitar el número de rutas aéreas con potencial ferroviario para prolongar las operaciones del AICM.

3.3.1 Tren de media velocidad (TMV)

De acuerdo a las características según su velocidad máxima o media de circulación un TMV es aquel que alcanza una velocidad entre los 160 y los 200 km/h (Fernandez, 2006). Dentro de este rango de velocidades, los ferrocarriles interurbanos (*Inter-city*) entran en esta clasificación. De acuerdo con el Servicio de Asesoramiento para Infraestructura Pública y Privada del Banco Mundial, los trenes interurbanos de pasajeros son usualmente impulsados por locomotoras eléctricas, diésel, unidades múltiples eléctricas o unidades múltiples diésel a lo largo del tren. Las velocidades máximas de estos materiales rodantes son de aproximadamente 200 km/h sobre vías férreas específicamente actualizadas para tales efectos (PPIAF, 2011). En muchos países europeos, la palabra "*Intercity*" o "*Inter-City*" es una marca oficial para una red de ferrocarriles de intervalo regular, con servicio de trenes de media y larga distancia que cumplen con ciertos criterios de rapidez y comodidad.

3.3.2 Tren de alta velocidad (TAV)

Un TAV, según la UIC (Unión Internacional de Ferrocarriles), es aquel que alcanza velocidades superiores de 250 km/h sobre líneas específicamente diseñadas para tal efecto. La

alta velocidad es una combinación de todos los elementos que constituyen el ‘sistema’: la infraestructura (nuevas líneas diseñadas para velocidades superiores a 250 km/h), el material rodante y las condiciones de operación. En vista del hecho de que muchos trenes de alta velocidad también son compatibles con la red ferroviaria convencional, el término ‘tráfico de alta velocidad’ se entiende también con frecuencia para indicar el movimiento de este tipo de tren en las líneas convencionales, pero a velocidades más bajas que las permitidas en una nueva infraestructura de alta velocidad (UIC, 2013).

3.3.3 Equilibrio del sistema de transporte ferroviario de pasajeros

De acuerdo con el Instituto para la Planificación de Transporte de Zúrich, el flujo de pasajeros aéreos se concentra en los grandes aeropuertos internacionales. Las congestiones aeroportuarias se presentan cuando existen grandes distancias para llegar a la terminal aeroportuaria, cuando se presentan grandes flujos de pasajeros aéreos y cuando las demoras de abordaje son prolongadas. Por lo tanto, se necesita una reasignación del flujo de pasajeros aéreos, y el acceso ferroviario sin duda, es un elemento clave de la concentración de estos flujos. Algunos estudios señalan que la reducción de la demanda aeroportuaria mediante el cambio del tránsito aéreo de corto itinerario, hacia otros modos de transporte de alta velocidad, como por ejemplo, el TAV o TMV, puede generar beneficios significativos en la reducción de la congestión aeroportuaria. El transporte ferroviario de pasajeros tiene efectos significativos en la reducción de: tiempo de transporte, gastos de funcionamiento, consumo energético, contaminación atmosférica y acústica, en un rango de 500 a 800 kilómetros de distancia (EUROPEAN COMMISSION, 1998).

Las condiciones actuales de alta velocidad ferroviaria exhiben una mejor ventaja relativa en comparación con el servicio de transporte aéreo de corto itinerario. La distancia de viaje para trenes de media velocidad está recomendada para distancias menores a los 400 km de distancia, y para los TAV están recomendados para distancias de viaje de los 500 a los 700 km (WIDMER; AXHAUSEN, 2001). En conclusión se analizaron rutas aéreas entre pares de aeropuertos con origen en el AICM en distancias menores de 500 kilómetros.

Se analizó la base de datos de trenes para el servicio de transporte de pasajeros de la UIC, identificando 88 tipologías de TMV que se encuentran en operación en diferentes países del mundo. Se seleccionó el tren español basculante de la compañía Renfe Serie 594, ya que posee la capacidad de pasajeros mínima en comparación con otros TMV como se observa en la Figura 4 (UIC, 2011).

Figura 4 – Tren Renfe Serie 594



Fuente: (UIC, 2011)

Posteriormente se identificaron 114 tipologías de TAV que se encuentran en operación en diferentes países del mundo. Se seleccionó el tren basculante de la compañía Renfe Serie 490, ya que posee la capacidad de pasajeros mínima en comparación con otros tipos de TAV como se observa en la Figura 5 (UIC, 2011).

Figura 5 – Tren Renfe Serie 490



Fuente: (UIC, 2011)

Al generar alternativas de materiales rodantes, se estimó un flujo de pasajeros ferroviarios anual mínimo para trenes de alta y media velocidad. La estimación de este flujo de pasajeros ferroviarios permitirá analizar las rutas aéreas que representen mayor viabilidad para la descongestión aeroportuaria del AICM.

El TMV Renfe S. 594 con capacidad de 126 pasajeros en clase única, se obtiene un flujo estimado de pasajeros en un viaje redondo de 252 pasajeros por día. El TAV Renfe S. 490 con capacidad de 160 pasajeros en clase única, se obtiene un flujo estimado de pasajeros en un viaje redondo de 320 pasajeros por día.

Tomando en cuenta que el ferrocarril efectuó un viaje redondo al día y, con la capacidad del material rodante, se obtiene el flujo de pasajeros anual que se presenta en el Tabla 2.

Tabla 2 – Flujo de pasajeros ferroviarios anual

Tren	Días	Capacidad de pasajeros	Viaje mínimo	Flujo de pasajeros anual
TMV S. 594	365	126	Redondo	91,980 pasajeros
TAV S. 490	365	160	Redondo	116,800 pasajeros

Fuente: Elaboración propia

3.3.4 Análisis de rutas aéreas derivadas del AICM

La identificación de rutas aéreas con potencial ferroviario, se realizó mediante el análisis de los flujos de pasajeros aéreos anuales de la estadística operacional de la DGAC (Dirección General de Aeronáutica Civil) del año 2012.

Se identificaron 210 rutas tanto nacionales como internacionales con origen en el AICM. Se calcularon sus distancias ortodrómicas para descartar rutas aéreas en distancias mayores a los 500 km de distancia.

Para el cálculo de la distancia ortodrómica se utilizó la Fórmula Vincenty, las ecuaciones son las siguientes (THADDEUS, 1985) (Ecuación 3):

$$d = r\Delta\hat{\sigma}$$

En donde d es la distancia entre cada par de aeropuertos origen y destino; r es el radio de la tierra, igual a 6,372.8 kilómetros; y $\Delta\hat{\sigma}$ es el ángulo central, en radianes, formado por cada par de aeropuertos; además (Ecuación 4):

$$\Delta\hat{\sigma} = \arctang \left(\frac{\sqrt{(\cos\phi_f \text{sen}\Delta\lambda)^2 + (\cos\phi_s \text{sen}\phi_f - \text{sen}\phi_s \cos\phi_f \cos\Delta\lambda)^2}}{\text{sen}\phi_s \text{sen}\phi_f + \cos\phi_s \cos\phi_f \cos\Delta\lambda} \right)$$

En donde $\phi_s, \lambda_s; \phi_f, \lambda_f$; son la latitud y longitud geográfica de cada aeropuerto origen y destino respectivamente; y $\Delta\phi, \Delta\lambda$, son las diferencias de dichos valores. Las coordenadas están establecidas mediante la latitud y la longitud en las que se encuentra el ARP (*Airport Reference Point*) que es el punto de referencia de cada aeropuerto, obtenidas mediante la Publicación de Información Aeronáutica de la DGAC (2010).

Se identificaron 40 rutas aéreas nacionales con origen en el Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México menores o iguales a los 500 kilómetros. Para delimitar las 40 rutas aéreas nacionales, se analizó el total de flujo de pasajeros aéreos del año 2012 mediante la estimación de flujos de pasajeros ferroviarios descritos en el Tabla 3.

El flujo anual estimado para TMV es de 91,980 pasajeros y el flujo anual estimado para TAV tiene un total de 116,800 pasajeros. Por tal motivo se seleccionaron preliminarmente, las rutas aéreas con un flujo mayor a los 91,000 pasajeros en el año 2012.

Los resultados de las rutas aéreas con flujos de pasajeros potenciales fueron los siguientes (Tabla 3).

Tabla 3 – Rutas aéreas con potencial ferroviario

Rutas aéreas		Flujo de pasajeros aéreos 2012	Distancia entre aeropuertos (km)
Origen	Destino		
Guadalajara	México	2,024,787	459.3
México	Veracruz	453,993	304.5
México	Tampico	422,334	341.3
México	Oaxaca	343,586	367.3
Acapulco	México	304,395	306.6
Del Bajío	México	242,221	304.8
México	Zihuatanejo	217,476	324.2
Aguascalientes	México	176,816	421.8
México	San Luis Potosí	148,260	368.2
México	Minatitlán	129,463	496.2

Fuente: Elaboración propia

3.3.5 Pronóstico de flujo de pasajeros de rutas aéreas con potencial ferroviario

Mediante la metodología descrita por Diebold (1998), se analizaron los flujos de pasajeros anuales de las rutas aéreas del Tabla 3, utilizando la base de datos de la estadística operacional origen-destino de la DGAC, del año 2005 al 2012, con el objetivo de pronosticar su comportamiento y elegir las rutas aéreas más significativas.

Se utilizó la prueba de *Pearson* para fundamentar la posible tendencia en el flujo de pasajeros y describir las tendencias ascendentes o descendentes de las rutas aéreas analizadas. Los resultados de las pruebas acotaron la implementación de modelos que contemplan el elemento de tendencia, los llamados modelos de pronósticos no estacionarios:

- Modelo lineal de mínimos cuadrados (Lineal M2)
- Modelo cuadrático de mínimos cuadrados (Cuadrático M2)
- Modelo exponencial (EXP)
- Modelo de ajuste logístico *Gompertz* (GOMP)
- Modelo de suavización exponencial doble (SE. DOBLE)

Y modelos que no contemplan el elemento de tendencia, los denominados modelos de pronósticos estacionarios:

- Promedios móviles de longitud K (PM-2K)
- Promedios móviles ponderados (PMP-2K)
- Suavización exponencial (S. EXP.)

Posteriormente los residuales obtenidos de los modelos de pronósticos fueron analizados a través de pruebas de normalidad e independencia, de esta manera si los residuales se comportan de manera normal e independiente los modelos serán buenos candidatos para

pronosticar la serie temporal. Se aplicó la prueba Anderson-Darling para la normalidad y la prueba de Rachas para independencia ambas con un alfa del 5%. Las conclusiones de las pruebas de normalidad e independencia aplicadas a los modelos de pronóstico resultantes a cada ruta aérea potencial, se evaluaron mediante medidas de desempeño para pronosticar la serie temporal, desviación absoluta media (MAD), y porcentaje medio de error absoluto (MAPE), los resultados se muestran en el Cuadro 1.

Cuadro 1 – Resultados de pronósticos de rutas aéreas con potencial ferroviario

Ruta aérea		Prueba de <i>Pearson</i>			Modelo de pronóstico		Pronóstico 2013 pasajeros aéreos
Origen	Destino	r	r ²	Comportamiento en flujo de pasajeros anual	Tipo	Modelo	
Guadalajara	México	89%	79%	Tendencia positiva	No estacionario	Modelo cuadrático de mínimos cuadrados	2.051,136
México	Veracruz	30%	9%	No hay tendencia	Estacionario	Promedios móviles de longitud 2k	475,485
México	Tampico	94%	88%	Tendencia positiva	No estacionario	Modelo cuadrático de mínimos cuadrados	449,085
México	Oaxaca	30%	9%	No hay tendencia	Estacionario	Suavización exponencial	334,989
Acapulco	México	84%	70%	Tendencia negativa	No estacionario	*	*
Del Bajío	México	10%	1%	No hay tendencia	Estacionario	Suavización exponencial	234,476
México	Zihuatanejo	88%	77%	Tendencia negativa	No estacionario	*	*
Aguascalientes	México	15%	2.2%	No hay tendencia	Estacionario	Suavización exponencial	170,473
México	San Luis Potosí	29%	8.4%	No hay tendencia	Estacionario	Suavización exponencial	137,670
México	Minatitlán	70%	49%	No hay tendencia	Estacionario	Promedios móviles ponderados de longitud 2k	96,271

Fuente: Elaboración propia
*Rutas aéreas no significativas

Las rutas aéreas que resultaron no significativas debido a su tendencia negativa en el flujo de pasajeros anual fueron descartadas del análisis de pronósticos y por lo tanto serán suprimidas para la implementación de trenes de alta y media velocidad para prolongar las operaciones del AICM, las rutas aéreas no consideradas son las siguientes:

- Ruta aérea Acapulco-México
- Ruta aérea México-Zihuatanejo

En el Cuadro 2, se presentan las rutas aéreas concluyentes del estudio de series de tiempo e implementación de modelos de pronóstico para el año 2013.

Cuadro 2 – Rutas aéreas significativas para la implementación de TAV y TMV

Ruta aérea		Pronostico de pasajeros aéreos 2013	Distancia entre par de aeropuertos (Km)	Tren de media velocidad	Tren de alta velocidad
Origen	Destino				
Guadalajara	México	2,051,136	459.3	Aplica	Aplica
México	Veracruz	475,485	304.5	Aplica	Aplica
México	Tampico	449,085	341.3	Aplica	Aplica
México	Oaxaca	344,989	367.3	Aplica	Aplica
Del bajo	México	234,476	304.8	Aplica	Aplica
Aguascalientes	México	170,473	421.8	Aplica	Aplica
México	San Luis Potosí	137,670	368.2	Aplica	Aplica
México	Minatitlán	96,271	496.2	Aplica	No Aplica

Por medio de la estimación del flujo de pasajeros ferroviarios establecidos para trenes de media velocidad (91,980 pasajeros ferroviarios) y trenes de alta velocidad (116,800 pasajeros ferroviarios) del Cuadro 2, se determina en que rutas se debe establecer cada tipo de material rodante.

3.3.6 Pronóstico de rutas aéreas del AICM captadas con la implementación de TMV

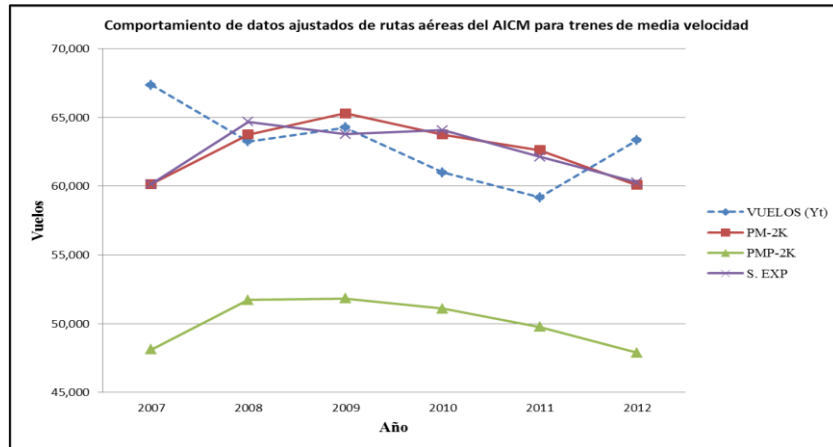
Con la metodología descrita por Diebold (1998) para análisis de series de tiempo, se pronosticaron las operaciones aeroportuarias de la base de datos de la DGAC del año 2005 al año 2012 de las ocho rutas aéreas con origen en el AICM descritas en el Cuadro 2 para TMV.

En la Figura 6, se observa el flujo anual de vuelos y el comportamiento de los datos ajustados de los modelos de pronóstico resultantes de las rutas aéreas del AICM con destinos a las ciudades de Guadalajara, Veracruz, Oaxaca, Tampico, Del Bajío, Aguascalientes, San Luis Potosí y Minatitlán.

Mediante la *Prueba de Pearson* se concluyó con 95% de confianza que no hay tendencia en el flujo de vuelos de las rutas aéreas del AICM que podrán ser captadas con la implementación de TMV, por lo que se utilizó modelos de pronósticos estacionarios. Los modelos que se utilizaron son:

- Promedios móviles de longitud (PM-2K)
- Promedios móviles ponderados (PMP-2K)
- Suavización exponencial (S. EXP.)

Figura 6 – Datos ajustados de rutas aéreas del AICM captadas por TMV



Fuente: Elaboración propia con base en Excel

Con los resultados obtenidos de los datos ajustados de la Figura 6, se calcularon los índices de desempeño MAD y MAPE. El modelo con mejor rendimiento es el de promedios móviles de longitud 2k ya que presenta los valores más bajos en las medidas de desempeño como se observa en el Cuadro 3.

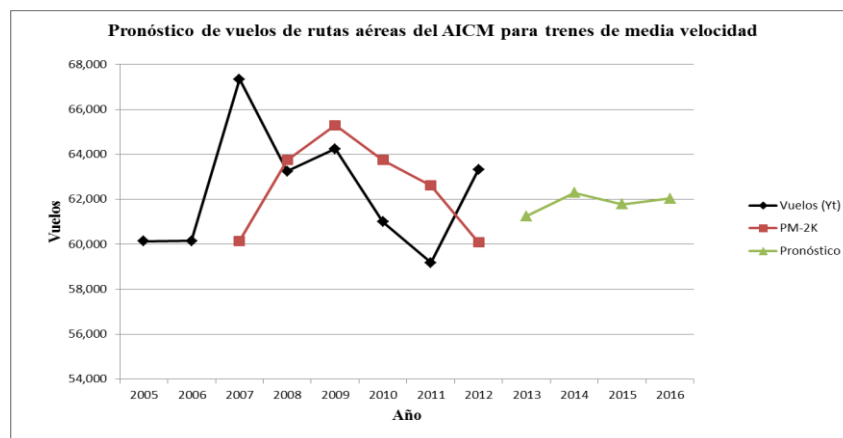
Cuadro 3 – Medidas de desempeño de rutas aéreas del AICM captadas por TMV

Modelo	MAD	MAPE
Promedios móviles de longitud 2k (PM)	303,275	4.753
Promedios móviles ponderados de longitud 2k (PMP)	1.298,795	20.445
Suavización exponencial $\alpha=0.6305$ (S. EXP)	303,466	4.763

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 7, se muestra el modelo estacionario de promedios móviles de longitud 2K para el pronóstico de vuelos de rutas aéreas del AICM que podrán ser captadas con la implementación de trenes de media velocidad.

Figura 7 – Pronóstico de vuelos en rutas aéreas del AICM captadas por TMV



Fuente: Elaboración propia con base en Excel

3.3.7 Pronóstico de rutas aéreas del AICM captadas con la implementación de TAV

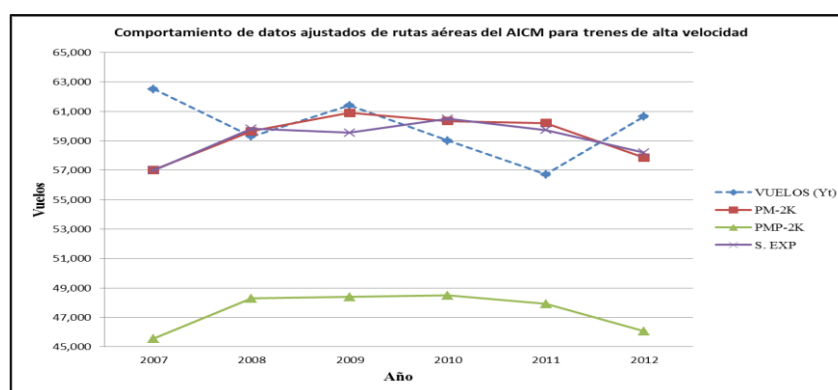
Con la metodología descrita por (X. Diebold, 1998) para análisis de series de tiempo, se pronosticaron las operaciones aeroportuarias de la base de datos de la DGAC del año 2005 al 2012, de las siete rutas aéreas donde interviene el AICM descritas en el Cuadro 2 para los TAV.

En la Figura 8, se observa el flujo anual de vuelos y el comportamiento de los datos ajustados de los modelos de pronóstico resultantes de las rutas aéreas del AICM con destinos a las ciudades de Guadalajara, Veracruz, Oaxaca, Tampico, Del Bajío, Aguascalientes y San Luis Potosí.

Mediante la *Prueba de Pearson* se concluyó con 95% de confianza que no hay tendencia en el flujo de vuelos de las rutas aéreas del AICM que podrán ser captadas con la implementación de TAV, por lo que se utilizó modelos de pronósticos estacionarios. Los modelos que se utilizaron son:

- Promedios móviles de longitud (PM-2K)
- Promedios móviles ponderados (PMP-2K)
- Suavización exponencial (S. EXP.)

Figura 8 – Datos ajustados de rutas aéreas del AICM captadas por TAV



Fuente: Elaboración propia con base en Excel

Con los resultados obtenidos de los datos ajustados de la Figura 8, se calcularon los índices de desempeño MAD y MAPE. El modelo con mejor rendimiento es el de promedios móviles de longitud 2K, ya que presenta los valores más bajos en las medidas de desempeño como se observa en el Cuadro 4.

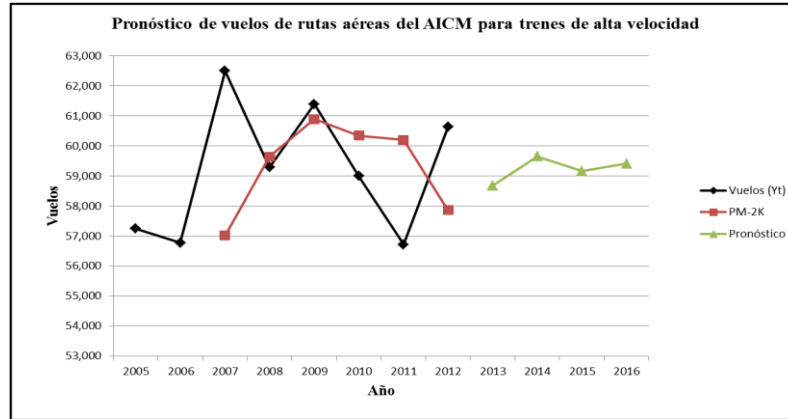
Cuadro 4 – Medidas de desempeño de rutas aéreas del AICM captadas por TAV

Modelo	MAD	MAPE
Promedios móviles de longitud 2k (PM)	232.283,33	3.86
Promedios móviles ponderados de longitud 2k (PMP)	1.247.286,67	20.70
Suavización exponencial $\alpha=0.5098$ (S. EXP)	246.706,87	4.09

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 9, se muestra el pronóstico del modelo estacionario de promedios móviles de longitud 2K para el pronóstico de vuelos de rutas aéreas del AICM que podrán ser captadas con la implementación de trenes de alta velocidad.

Figura 9 – Pronóstico de vuelos en rutas aéreas del AICM captadas por TAV

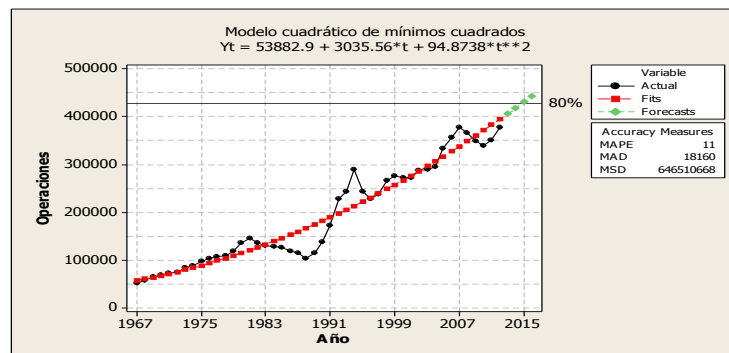


Fuente: Elaboración propia con base en Excel

4 CONCLUSIONES

De acuerdo con el Tabla 1, se concluye que el modelo con mejor rendimiento para el pronóstico de operaciones anuales del AICM, es el modelo cuadrático de mínimos cuadrados (Cuadrático M2), ya que presenta los mejores valores en las medidas de desempeño, obteniendo los siguientes pronósticos como se observa en la Figura 10.

Figura 10 – Pronóstico de operaciones anuales del AICM



Fuente: Elaboración propia con base en Minitab

Con los resultados obtenidos de la Figura 10, se calculó el año en que se iniciará un deterioro significativo del servicio de las pistas del AICM, es decir 427,488 operaciones (80% de su capacidad máxima), bajo esta condición el AICM presentará su saturación en septiembre de 2014.

Analizando las operaciones del AICM del año 1967 al año 2012 se obtuvo la siguiente tasa de crecimiento:

$$r = 0.0449 = 4.49\%$$

Utilizando la tasa de crecimiento podemos proyectar el comportamiento de las operaciones del AICM y calcular a partir de qué año iniciará un deterioro significativo del servicio de las pistas (80% de su capacidad), bajo esta condición el AICM presentaría su saturación en octubre de 2014.

Con el uso de un modelo de pronóstico cuadrático y una tasa de crecimiento geométrico para la proyección de las operaciones anuales del AICM, se obtuvieron resultados similares con diferencia de un mes, septiembre y octubre respectivamente para el año 2014, donde se llegará al 80% de la capacidad máxima del AICM. Cabe señalar que en estudios previos (Herrera, 2011) se había estimado que en octubre de 2015 se alcanzaría la saturación del AICM.

Por lo tanto el desvío de los flujos de pasajeros aéreos hacia otros modos de transporte es imprescindible para prolongar la eficiencia de este aeropuerto, lo que se resultaría en beneficios económicos y ambientales para el país.

Con esta investigación se diseñó un método de cálculo de alternativas a fin de determinar rutas aéreas con potencial ferroviario para el uso de trenes de alta y media velocidad para prolongar las operaciones del AICM y retrasar el deterioro significativo del AICM, cuando este alcance el 80% de su capacidad máxima, la cual se presentará a finales de 2014.

Mediante el análisis de los flujos de pasajeros anuales de las rutas aéreas potenciales del Tabla 3 y con base en la base de datos de estadística operacional del año 2005 al 2012 de la DGAC, se pronosticó su comportamiento para elegir las rutas aéreas más significativas que permitan solucionar la congestión aeroportuaria del AICM. Las rutas aéreas resultantes fueron seleccionadas mediante el pronóstico del flujo de pasajeros del año 2013 con la estimación del flujo de pasajeros ferroviarios establecidos para TMV y TAV del Tabla 2. Las cuales son las siguientes:

- Guadalajara-México
- México-Veracruz
- México-Tampico
- México-Oaxaca
- Del bajío-México
- Aguascalientes-México

- México-San Luis Potosí
- México-Minatitlán

Se pronosticaron las operaciones anuales del AICM y las operaciones de las rutas con potencial ferroviario que podrían ser captadas por trenes de alta y media velocidad para prolongar las operaciones de este aeropuerto, considerando una tendencia cuadrática (Cuadro 5).

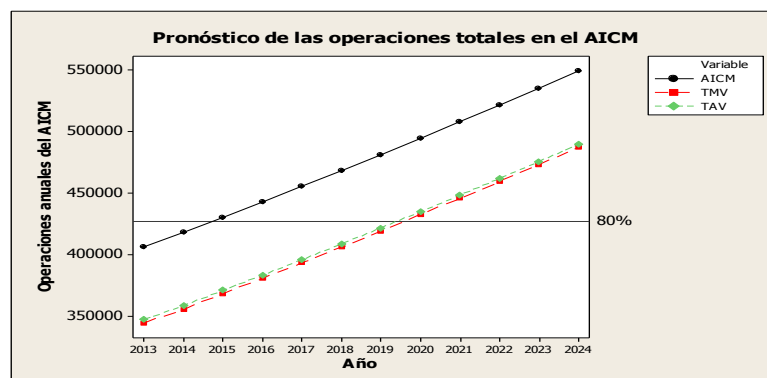
Cuadro 5 – Pronóstico de las operaciones totales del AICM

Pronósticos de operaciones anuales					
Año	Operaciones totales del AICM, sin servicio ferroviario	Operaciones de las rutas con potencial ferroviario		Operaciones totales del AICM, con servicio ferroviario implementado	
		TMV	TAV	TMV	TAV
2012	377,743	63,334	60,634	314,409	317,109
2013	406,130	61,257	58,679	344,873	347,451
2014	418,179	62,296	59,657	355,884	358,523
2015	430,417	61,776	59,168	368,641	371,250
2016	442,845	62,036	59,412	380,810	383,434
2017	455,463	61,906	59,290	393,557	396,174
2018	468,271	61,971	59,351	406,300	408,921
2019	481,268	61,938	59,320	419,330	421,948
2020	494,455	61,954	59,335	432,501	435,120
2021	507,832	61,946	59,328	445,886	448,504
2022	521,398	61,950	59,331	459,448	462,067
2023	535,155	61,948	59,330	473,207	475,825
2024	549,101	61,949	59,330	487,152	489,771

Fuente: Elaboración propia

Con ayuda de la Figura 11 se puede estimar que sin la implementación del servicio de transporte de pasajeros ferroviarios, el AICM iniciará su saturación en septiembre de 2014 (línea negra), pero con el servicio de trenes de media de velocidad la saturación iniciaría en agosto de 2019 (línea roja) y con el de trenes de alta velocidad (línea verde), iniciaría en mayo de 2019.

Figura 11 – Pronóstico de las operaciones de rutas aéreas con potencial ferroviario



Fuente: Elaboración propia

En general, con el servicio de trenes de pasajeros hasta mediados de 2019 se alcanzaría el 80% de la capacidad máxima del AICM. Por lo tanto, se retrasaría el efecto de congestión aeroportuaria crítico cinco años con el servicio de trenes de pasajeros.

ALTERNATIVE SOLUTIONS OF AIRPORT CAPACITY OF THE 'MCIA' BY HIGH AND MIDDLE SPEED TRAINS

ABSTRACT: The huge airport activity in Mexico, particularly the passenger transportation, has caused airport congestion in some airports, such as the Mexico City International Airport (MCIA). Some studies establish that this airport will initiate its saturation in the near term. Therefore, the requirement arises for the deviation of short-route air traffic, up to 500 km, to other modes of transportation. The railroad transportation by high (HST) and middle speed trains (MST) is a key element for the management of these flows, because it could generate significant benefits in reducing airport congestion. By means of a time series study and forecasting models applied to the MCIA, it was obtained as a result that there are eight air routes that have railroad potential. This study concludes that, the impact caused by the natural growth of the service demand in the MCIA will produce its saturation at the end of 2014, but if a HST or MST system is implemented, the critical congestion effect could be deferred five years.

Keywords: Mexico City International Airport. Saturation. High-speed train. Middle-speed train.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AIRPORTS COUNCIL INTERNATIONAL. **Worldwide Airport Traffic Statistics**. Canada, 2011.

DGAC. **Publicación de Información Aeronáutica**. México: Seneam-SCT, 2010.

DIEBOLD, F. **Elementos de pronósticos**. México: Thomson Learning, 1998.

EUROPEAN COMMISSION. **Interactions between high-speed rail and air passenger transport**. (COST 318), 1998.

FERNANDEZ, D.X. **El ferrocarril en Galicia**. Galicia: IR INDO, 2006.

HAMZAWI, S.G. Lack of airport capacity: exploration of alternative solutions. **Transportation Research: An International Journal Part A: Policy and Practice**, v. 26, n. 1, p. 47-58, 1992.

HERRERA GARCIA, A. **Alternativas de solución para problemas de capacidad aeroportuaria**. México, Instituto Mexicano del Transporte, 2006.

HERRERA GARCIA, A. **Modelo de simulación de operaciones aéreas en aeropuertos saturados**: el caso del aeropuerto internacional de la ciudad de México. Sanfandila: Instituto Mexicano del Transporte, 2011.

INTERNATIONAL UNION OF RAILWAYS. UIC. **International Union of Railways**. 2013. Disponible en: <<http://www.uic.org/spip.php?article971>>. Acceso: Febrero/2013.

INTERNATIONAL UNION OF RAILWAYS. UIC. **Material Rodante de alta y media velocidad Mundial**. 2011. Disponible en: <http://www.uic.org/IMG/pdf/20130701_data_of_hs_trains.pdf>. Acceso: Febrero/2013

MENDOZA SÁNCHEZ J.F.; TÉLLEZ GUTIÉRREZ R. Trenes de alta velocidad en el mundo y su posible utilización en México. **XVI. Reunión Nacional de Ingeniería de Vías Terrestres**, México, 2006.

PUBLIC-PRIVATE INFRASTRUCTURE ADVISORY FACILITY. PPIAF. **La reforma de los ferrocarriles: manual para mejorar el rendimiento del sector ferroviario**. Washington DC.: Transport Research Support. 2011. Disponible en: <http://www.ppiaf.org/sites/ppiaf.org/files/documents/toolkits/railways_toolkit/PDFs/Chapter%202/WB_Railways_Toolkit_Chapter2_vSpanish.pdf>. Acceso: Marzo/2013.

ROLAND, P. **El análisis demográfico, (Métodos, resultados, aplicaciones)**. México: Impresora Aztecama 1983.

SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES. SCT. **Base de datos de la Dirección General de Aeronáutica Civil año 2010**. Secretaría de Comunicaciones y Transportes, 2011. Disponible en: <<http://www.sct.gob.mx/transporte-y-medicina-preventiva/aeronautica-civil/estadistica>>. Acceso: Febrero/2013

SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES. SCT. Programa Sectorial de Comunicaciones y Transportes 2007-2012. México: Secretaría de Comunicaciones y Transportes, 2008. Disponible en: <<http://www.sct.gob.mx/informacion-general/mapa-del-sitio/>>. Acceso: Febrero/2013

SERVICIOS A LA NAVEGACIÓN EN EL ESPACIO AÉREO MEXICANO. SENEAM. **Publicación de Información Aeronáutica (PIA)**. México: SENEAM, 2011.

THADDEUS, V. **Las soluciones directas e inversas de Geodesia del elipsoide con aplicación de las ecuaciones anidadadas**. Surrey, Inglaterra, 1985.

VELDHUIS, J. **Impact of liberalization on European airports**. Transportation Research Board meeting. Washington, DC. USA, 1990.

WIDMER, J.P.; AXHAUSEN, K. W. **Do rail stations at airports allow a better distribution of passenger demand among airports?**, 80th Annual Meeting of the Transportation Research Board. Washington, D.C.: Institut für Verkehrsplanung, Transporttechnik, Strassen-und Eisenbahnbau, 2001.

WIDMER, J.P.; HIDBER, C. Effects of rail stations at airports in Europe. **Journal of the Transportation Research Board**, n. 1703, p. 90-97, 2000.

Originais recebidos em: 20/02/2014

Aceito para publicação em: 26/02/2014