



Certificación ISO 9001:2000 ‡

ANÁLISIS GRAVITACIONAL DE LA MOVILIDAD DE PASAJEROS EN LA RED DE TRANSPORTE AÉREO DOMÉSTICO EN MÉXICO

Óscar Armando Rico Galeana

**Publicación Técnica 320
Sanfandila, Querétaro, 2008**

SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES

INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE

**Análisis gravitacional de la movilidad de pasajeros
en la red de transporte aéreo doméstico en México**

**Publicación Técnica 320
Sanfandila, Querétaro, 2008**

Este trabajo fue realizado por el Mtro. Óscar Armando Rico Galeana, investigador titular de la Coordinación de Economía de los Transportes y Desarrollo Regional, del Instituto Mexicano del Transporte (IMT), y profesor de tiempo parcial en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro.

El autor agradece al Dr. Guillermo Torres Vargas, Jefe de la División de Estudios Económicos y Sociales del Transporte, del IMT, el apoyo brindado y la cuidadosa revisión del documento.

Índice

Resumen	iii
Abstract	v
Resumen ejecutivo	vii
1 Introducción.....	1
1.1 Antecedentes y justificación	1
1.2 Planteamiento del problema de investigación	4
1.3 Objetivos de la investigación	5
1.3.1 Objetivo general	5
1.3.2 Objetivos particulares.....	5
1.4 Metodología e hipótesis	5
2 Marco teórico	7
2.1 Antecedentes sobre el modelo gravitacional	7
2.2 Modelo utilizado en el estudio	8
2.3 Pruebas de hipótesis para la evaluación de los parámetros de la regresión...	10
3 Definición del objeto de estudio	13
3.1 La aviación comercial en México.....	13
3.2 Determinación del subsistema de transporte por analizar.....	15
3.3 Cálculo de las distancias empleadas en el modelo	17
4 Modelación matemática de la distribución espacial de los pasajeros en la red de transporte aéreo	19
4.1 Resultados del análisis de regresión múltiple	20
4.2 Evaluación de los parámetros mediante pruebas de hipótesis	21

4.3	Discusión de los resultados del análisis de regresión, y de la evaluación de los parámetros	22
5	Conclusiones.....	25
6	Bibliografía	29
Anexo 1		
	Datos para el análisis de regresión	33
Anexo 2		
	Análisis estadístico de la longitud de los arcos y de la longitud de viaje en la red	39
Anexo 3		
	Comentarios finales acerca de la longitud de viaje en el transporte aéreo de pasajeros en México y sus implicaciones en la modelación gravitacional de la movilidad.....	43

Resumen

Se presentan los resultados de una investigación cuyo objetivo general ha sido realizar un análisis gravitacional de la movilidad de los pasajeros que utilizan los servicios regulares de transporte aéreo en el espacio geográfico mexicano.

Se ha empleado un modelo de regresión lineal múltiple con estructura gravitacional, pero adaptado para ser calibrado a partir de datos empíricos, mediante la técnica de los mínimos cuadrados. La calidad estadística de los parámetros de la función de regresión se ha verificado mediante las pruebas de hipótesis convencionales.

Los indicadores de desempeño del modelo de regresión múltiple y los resultados de la evaluación paramétrica, permiten concluir que los viajes generados en los orígenes, y los viajes atraídos por los destinos, son variables con un alto potencial para explicar la intensidad de flujo de pasajeros en los corredores de transporte; no así la distancia euclidiana que los separa.

Los resultados de la investigación respecto al comportamiento estadístico de la variable distancia, coinciden plenamente con los obtenidos en estudios previos sobre transporte aéreo de carga y permiten concluir que la independencia entre la intensidad de flujo de transporte y la distancia física que separa a los orígenes y destinos de los movimientos, es una característica propia de este modo de transporte, al menos en México.

Abstract

This document presents the results of a research which main objective was to perform a gravitational analysis of the mobility associated with the passengers that uses the regular services of air transportation in Mexico.

A multiple regression model with gravity structure was used, but with a mathematical form that has permitted its calibration from empirical data, by the least squares technique. The statistical quality of the regression parameters was verified by means of the conventional hypothesis tests.

From the indicators of the regression model performance and the parametric evaluation results it can be concluded that the trips generated at the origins, and the trips attracted by the destinations, are variables with a high potential to explain the passengers flow intensity between nodes, being not the case for the third variable included, which is the Euclidian distance that separates them.

The research findings about the statistical behaviour of the variable distance are coincident with those obtained in previous researches on air freight transportation and let us conclude that the independence between the transportation flow intensity and the physical distance that separates the origins and destinations is a peculiar characteristic of this transportation mode, at least in Mexico.

Resumen ejecutivo

En el Instituto Mexicano del Transporte (IMT) se desarrollan varias líneas de investigación relacionadas con el transporte aéreo en México, que incluyen la modelación matemática de algunos aspectos del fenómeno. En particular, se ha estudiado la distribución espacial de los viajes que se realizan en territorio mexicano para transportar carga; en estos trabajos se han utilizado modelos gravitacionales debido a la aceptación generalizada de su marco teórico para explicar analíticamente la interacción espacial en las sociedades humanas.

Los resultados de las modelaciones de la interacción espacial han sido parcialmente satisfactorios, considerando que las pruebas estadísticas señalan que la cantidad de carga generada y atraída por los nodos, constituye una buena variable de explicación de la intensidad del flujo de mercancías que se intercambian entre ellos. De hecho, los coeficientes de correlación múltiple y de determinación han resultado con valores aceptablemente altos, lo cual permite recomendar la aplicación de estos modelos en la planeación del transporte aéreo.

Sin embargo, es importante señalar que en la mayoría de los modelos estudiados, la distancia no ha logrado superar las pruebas estadísticas individuales para la evaluación de su comportamiento como variable explicativa dentro de la función de regresión múltiple; de tal manera que no puede afirmarse estadísticamente que su coeficiente (o exponente en la función original), realmente tiene un valor distinto a cero.

Un problema adicional deriva de que en algunos modelos, el signo del coeficiente de la distancia ha resultado positivo; lo cual implica que ese factor no actúa como elemento disuasivo en el modelo; sino al contrario, como factor promotor de la realización de transporte; esto es, que a mayor distancia se esperan mayores volúmenes de intercambio.

Bajo la premisa gravitatoria, la distancia que separa los puntos de origen y destino, actúa como un factor disuasivo para la realización de viajes, o el envío de mercancías; en otras palabras, mientras mayor es la distancia, “normalmente” la intensidad de flujo tiende a disminuir, de acuerdo con una función inversa típica.

La independencia de la intensidad del flujo respecto a la distancia contradice no sólo el principio gravitatorio, sino incluso el paradigma de comportamiento de la demanda de transporte en el espacio geográfico, puesto que normalmente se considera que la distancia es un factor que reduce la accesibilidad; entendiendo por accesibilidad la capacidad de un lugar (o localidad) para ser alcanzado desde otros lugares, o para llegar a otros lugares.

El comportamiento gravitatorio teórico, también responde a una lógica económica, ya que es razonable suponer que la distancia refleja el esfuerzo requerido para superar el

espacio que separa a origen y destino; y que, en consecuencia, se encuentra correlacionada positivamente con el costo generalizado de transporte (la distancia económica), que en última instancia determina la conveniencia o inconveniencia del intercambio comercial, de acuerdo con el principio de transferibilidad de Ullman.

En todos los estudios previos, se ha modelado la distribución espacial de los movimientos de carga; de tal manera, que los resultados obtenidos, hipotéticamente, podrían reflejar una peculiaridad del sistema que atiende ese mercado específico y no estar presentes en el transporte aéreo de pasajeros.

Con base en los antecedentes señalados, resulta pertinente continuar la línea de investigación para verificar si el comportamiento anómalo de la intensidad de flujo, respecto a la posición relativa en el espacio de los orígenes y destinos, encontrado en el transporte aéreo de carga, se encuentra presente también en el transporte aéreo de pasajeros. Esta es una de las intenciones fundamentales de esta investigación.

Para sostener la hipótesis de investigación, se puede señalar que hay diferencias entre los dos sistemas (objetos de estudio) indicados, que pueden ser suficientes para generar comportamientos distintos en sus patrones de distribución espacial; y en consecuencia, características divergentes respecto a las premisas gravitacionales. Por ejemplo, en primer término los movimientos de pasajeros son mucho más numerosos en el tiempo y en el espacio; en segundo lugar, la red en que opera el sistema de transporte de pasajeros es mayor, tanto en nodos como en arcos; en consecuencia, se tiene una mayor cantidad de datos asociados con las variables aleatorias implicadas, lo cual podría resultar en una mayor estabilidad estadística en el comportamiento de los parámetros.

El objetivo general de la investigación fue realizar un análisis gravitatorio de la movilidad de los usuarios (pasajeros) del sistema de transporte aéreo en el espacio geográfico mexicano. Adicionalmente, se ha logrado alcanzar algunos objetivos particulares, como obtener los patrones más recientes de la movilidad asociada con el sistema de transporte aéreo de pasajeros en México, y determinar la presencia del fenómeno de independencia causal entre la distancia euclidiana y la intensidad de flujo, que fue detectado previamente como una característica de la red doméstica de transporte aéreo de carga.

El método empleado en la investigación es fundamentalmente inductivo, considerando que se pretende obtener conclusiones de posible alcance general a partir del análisis de un caso particular. En la investigación se parte de una hipótesis que fue contrastada a partir del análisis de datos empíricos obtenidos de la observación directa de un fenómeno social.

La hipótesis de investigación plantea que la distribución de los viajes de personas que son transportadas por el modo aéreo en México responde adecuadamente a las premisas del modelo gravitacional, mismas que se encuentran definidas dentro del

marco teórico actual de la geografía y la economía del transporte. Los datos empíricos consisten en los movimientos de pasajeros registrados por la Dirección General de Aeronáutica Civil de la SCT, en el año 2007.

Los elementos teóricos de la investigación, así como las técnicas para el tratamiento de los datos, provienen fundamentalmente de la economía, la geografía, la modelación del transporte, y la estadística matemática.

El objeto de estudio específico de la investigación es la movilidad de los pasajeros que utilizan el sistema de transporte aéreo doméstico mexicano, a través de los servicios denominados regulares.

En el estudio se ha utilizado un modelo de regresión múltiple con estructura gravitacional, pero adaptado para ser calibrado mediante la técnica de los mínimos cuadrados, a partir de un conjunto de datos empíricos. La estimación de los parámetros por mínimos cuadrados ofrece una sólida batería de pruebas estadísticas que permiten evaluar su calidad, así como la bondad de ajuste de la regresión respecto a la dispersión de los datos.

En este sentido se han empleado las dos pruebas de hipótesis típicas para verificar la significancia de los parámetros: la prueba t (individual) y la prueba F (grupala), que se aplica mediante un análisis de varianza.

Con base en los indicadores globales del desempeño estadístico de la ecuación de regresión múltiple, y del resultado de la evaluación paramétrica, especialmente la prueba F, se puede considerar que los resultados de la modelación realizada en el estudio son satisfactorios.

El coeficiente de determinación indica que el modelo explica adecuadamente el comportamiento de poco más del 67% de los datos. Por su parte, el valor elevado del coeficiente de correlación de Pearson indica que el conjunto de las variables independientes tiene un adecuado comportamiento lineal respecto a las variaciones de la variable dependiente.

El coeficiente de correlación múltiple obtenido es sensiblemente mejor que los coeficientes de correlación individuales de las variables independientes respecto a la variable dependiente. Este resultado sugiere que las variables independientes tienen un mejor desempeño en conjunto, para explicar el comportamiento de la variable dependiente, que en forma aislada.

Las pruebas de hipótesis para la evaluación de los parámetros de la regresión múltiple ofrecen resultados que resultan complementarios para la obtención de conclusiones.

Por una parte, la prueba F indica un buen comportamiento de la ecuación de regresión múltiple en general, y sugiere un adecuado potencial de las variables independientes

para explicar el comportamiento de la variable dependiente, sin distinguir entre ellas, dado su carácter de prueba de comportamiento en grupo.

Por otra parte, la prueba t, en su carácter de prueba individual, confirma los resultados de la prueba F en lo que respecta al buen comportamiento de los pasajeros generados y atraídos en los nodos, pero al mismo tiempo ofrece evidencia estadística de que el desempeño de la variable distancia es muy pobre; de tal manera, que la probabilidad de que su coeficiente sea igual a cero en la ecuación de regresión es muy alta.

La conclusión en este sentido es que los viajes generados en los orígenes, y los viajes atraídos por los destinos, son variables con un alto potencial para explicar la intensidad de flujo de pasajeros en los corredores que los unen. No así la distancia euclidiana que los separa. De hecho, los resultados sugieren que la omisión de la variable distancia en el modelo, no tendría un efecto importante en su eficiencia para reproducir el comportamiento del fenómeno estudiado.

Por lo anterior, se debe señalar que los resultados de la presente investigación coinciden plenamente con los obtenidos previamente en los estudios de la movilidad de la carga: en el transporte aéreo que se realiza en el territorio mexicano, la intensidad de flujo de pasajeros y carga en los enlaces origen – destino, es estadísticamente independiente de la distancia euclidiana que los separa.

Se considera que la investigación que se reporta en este documento aporta una serie de resultados que son de utilidad al sector, puesto que el desarrollo y actualización del conocimiento sobre el transporte y su modelación, es un elemento imprescindible para la planeación, tarea fundamental de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes.

Finalmente, pero no menos importante, se debe señalar que este tipo de trabajos de investigación aportan beneficios en el ámbito académico, al contribuir en el desarrollo del conocimiento científico del fenómeno y sus interrelaciones; en este sentido, conviene destacar que la investigación se ha realizado en estricto apego a la metodología y los principios teóricos de las ciencias, tanto sociales, como físico – matemáticas, de las cuales forma parte.

1 Introducción

1.1 Antecedentes y justificación

Desde hace varios años, en el Instituto Mexicano del Transporte se han mantenido vigentes varias líneas de investigación relacionadas con el transporte aéreo en México; algunas de las investigaciones realizadas han incluido modelos matemáticos para estudiar el comportamiento del fenómeno.

Por ejemplo, en 2001 se publicó una investigación (Rico, 2001) que incluye un análisis gravitacional de la distribución de carga en la red doméstica, con datos de 1998. En 2004 se realizó un estudio (Herrera, et. al.; 2005) contratado por Aeropuertos y Servicios Auxiliares (ASA) en el que se volvieron a utilizar los modelos desarrollados en el estudio previo, pero con datos de 2003; y finalmente, en 2005 se llevo al cabo una investigación mucho más detallada (Gradilla, Rico, 2005), sobre la distribución espacial de la carga en los ámbitos doméstico e internacional.

En dichos estudios se ha elegido un modelo gravitacional, debido a la aceptación generalizada (académica y profesional) de su marco teórico para explicar analíticamente la interacción espacial en las sociedades humanas (Taaffe, et. al, 1996; Black, 2003).

Los resultados de la modelación han sido parcialmente satisfactorios, considerando que las pruebas estadísticas señalan que la cantidad de carga generada y atraída por los nodos, constituye una buena variable de explicación de la intensidad del flujo de mercancías que se intercambia entre ellos (Rico, 2001; Gradilla y Rico, 2005; Herrera, et. al., 2005). De hecho, los coeficientes de correlación múltiple y de determinación han resultado con valores aceptables, lo cual permite el uso de los modelos en actividades para la planeación del transporte aéreo.

Sin embargo, en la mayoría de los modelos estudiados la distancia no ha logrado superar las pruebas estadísticas individuales para la evaluación de su comportamiento como variable explicativa dentro de la función (Rico, 2007).

Concretamente, en todos los casos la prueba F para el modelo completo (esto es para los tres parámetros en grupo¹), ha permitido rechazar la hipótesis nula [$H_0: (\alpha, \beta, \delta) = (0, 0, 0)$] de que alguno de los coeficientes es igual a cero; esto es, que no aporta explicación al comportamiento de la variable dependiente (Infante y Zarate, 1990); este resultado es congruente con los valores altos calculados para los coeficientes de determinación y de correlación múltiple, ya señalado.

¹ La ordenada al origen y los dos coeficientes de las variables explicativas.

Sin embargo, en la prueba t, que es la prueba individual para cada uno de los coeficientes (Infante y Zarate, 1990), el exponente de la variable “distancia” (δ) en la función, ha resultado con probabilidades de rechazo mayores al mínimo aceptable, que usualmente se toma en el 5% (95% de nivel de confianza). Este resultado sugiere que en la función de regresión, la contribución de la variable distancia a la explicación del comportamiento de la variable dependiente no es relevante, al menos en comparación con la otra variable explicativa (Rico, 2007).

La tabla 1.1 presenta un resumen de los resultados obtenidos en las pruebas de hipótesis individuales (prueba t) para el coeficiente δ , en varios de los estudios realizados en el IMT sobre la movilidad de carga en la red doméstica de transporte aéreo (Rico, 2007).

Tabla 1.1 Resumen de resultados de las estadísticas de regresión para el coeficiente δ en diversos estudios realizados en el IMT

Año de los datos	Movimientos incluidos (domésticos)	Signo y valor de δ	Probabilidad de no rechazo para $H_0: \delta = 0$
1999	80% del total	+ 0,1919	0,1162
2003	95% del total	- 0,1359	0,1456
2003	95% regular	+ 0,0831	0,3035
2003	95% fletamento	- 0,5604	0,0492

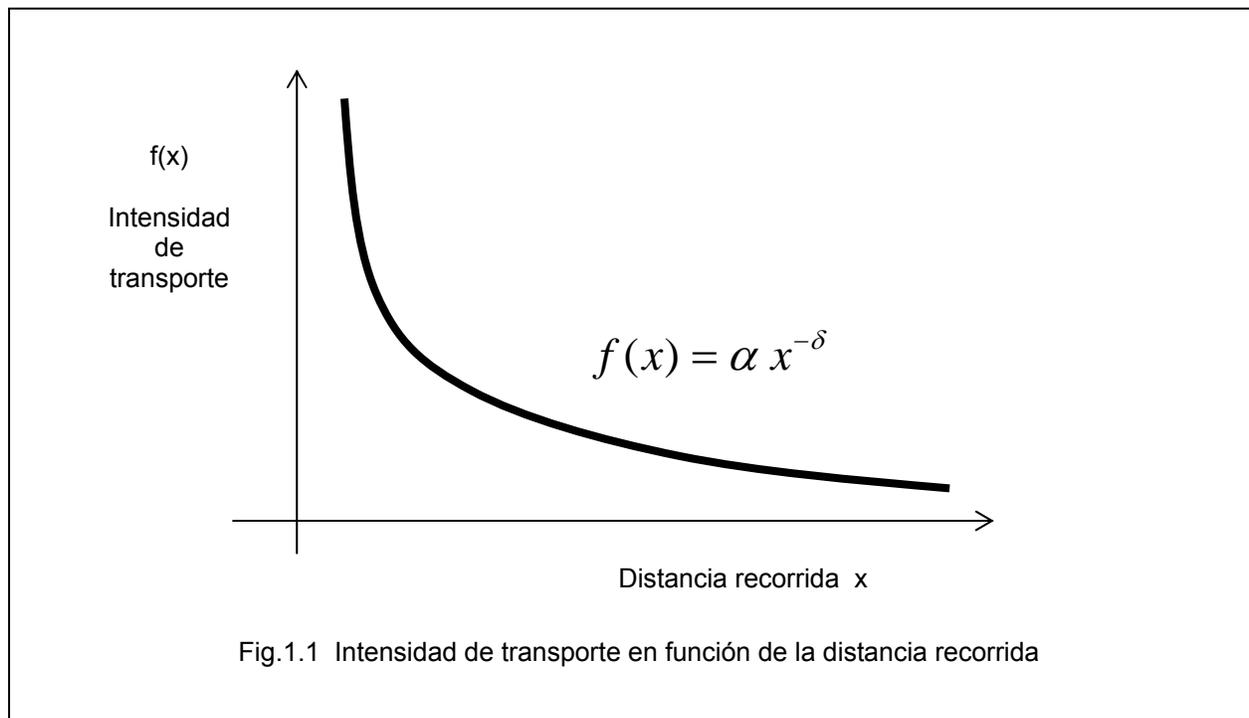
Fuente: (Rico, 2007)

En la tabla 1.1 se puede observar que el único caso que se encuentra ligeramente fuera de la zona de no rechazo para la hipótesis nula (aceptación del parámetro), es el de los movimientos de fletamento en el año 2003. En los otros tres casos no se puede sostener, con un 95% de confianza, que el verdadero valor del coeficiente sea diferente de cero; adicionalmente, otro resultado no menos importante tiene que ver con el signo del coeficiente, que de acuerdo con el marco teórico se espera sea negativo, lo cual no se cumple en dos de los casos.

Bajo la premisa gravitatoria, la distancia que separa los puntos de origen y destino, actúa como un factor disuasivo para la realización de viajes, o el envío de mercancía (Hall, et. al.; 2003); en otras palabras, mientras mayor es la distancia, “normalmente” la intensidad de flujo tiende a disminuir, de acuerdo con una función inversa típica; es decir, en el modelo multiplicativo el exponente δ debe tener signo negativo (fig. 1.1).

El hecho de que no pueda afirmarse que el coeficiente (o exponente en la función original) δ tiene un valor distinto a cero, implica que la intensidad del flujo de mercancías entre dos puntos cualesquiera de la red es independiente de su posición relativa dentro del espacio geográfico.

Por otra parte, el hecho de que el signo del exponente sea positivo, implica que el factor distancia no actúa como elemento disuasivo, sino al contrario, como factor promotor de



la realización de transporte; esto es, que a mayor distancia se registran mayores volúmenes de intercambio.

La independencia de la intensidad del flujo respecto a la distancia, contradice no sólo el principio gravitatorio, sino incluso el paradigma de comportamiento de la demanda de transporte en el espacio geográfico, puesto que normalmente se considera que la distancia es un factor disuasivo de la movilidad; o dicho de otra forma, es un factor que reduce la accesibilidad, entendiéndose por accesibilidad “la capacidad de un lugar (o localidad) para ser alcanzado desde otros lugares, o para alcanzar otros lugares” (Rodríguez, Comtois, Slack; 2006).

El comportamiento gravitacional también responde a una lógica económica, ya que es razonable suponer que la distancia refleja el esfuerzo requerido para superar el espacio que separa a origen y destino; y que, en consecuencia, se correlaciona positivamente con el costo generalizado de transporte (la distancia económica), que en última instancia determina la conveniencia o inconveniencia del intercambio comercial, de acuerdo con el principio de transferibilidad de Ullman (Black, 2003).

Evidentemente, la distancia euclidiana no es la única variable que puede emplearse para modelar el efecto de disuasión en los modelos gravitacionales (aunque típicamente es la más fácil de calcular); también se puede usar el tiempo de viaje, el consumo de combustible (o de alguna forma de energía), o incluso algunas otras medidas más sofisticadas de “distancia social” (Potrykowski and Taylor, 1984).

La independencia de la demanda respecto a la distancia euclidiana (al menos en un intervalo específico) puede ser consecuencia de la naturaleza del transporte aéreo, caracterizado por su capacidad para superar grandes distancias en lapsos relativamente cortos; pero también puede ser consecuencia de la naturaleza del transporte de carga; por ejemplo, en la red analizada se tiene una fuerte asimetría direccional en los arcos (no hay carga de regreso) que posiblemente afecta la relación de la intensidad de flujo con la distancia, puesto que para un mismo conjunto de distancias se tienen intensidades de flujo muy diferentes.

1.2 Planteamiento del problema de investigación

Con base en los antecedentes expuestos, se plantea la necesidad de investigar si tal comportamiento anómalo de la intensidad de flujo, respecto a la posición relativa en el espacio de los orígenes y destinos, encontrado en el transporte aéreo de carga, existe también en el traslado aéreo de pasajeros.

Hay algunas diferencias entre los dos sistemas (objetos de estudio) señalados, que pueden ser suficientes para generar comportamientos distintos en sus patrones de distribución espacial y en consecuencia, características divergentes respecto a las premisas gravitacionales.

Se puede señalar en primer término, que los movimientos de pasajeros son mucho más numerosos en el tiempo y en el espacio; en segundo lugar, la red en que opera el sistema de transporte es mayor, tanto en nodos, como en arcos; en consecuencia se tiene mayor cantidad de datos asociados con las variables aleatorias implicadas, lo cual podría resultar en una mayor estabilidad estadística en el comportamiento de los parámetros.

Otro aspecto importante deriva del hecho de que los movimientos de carga dependen en cierta medida de la movilidad de los pasajeros, debido a que cerca de la mitad de las operaciones de carga se realizan en vuelos de pasajeros. Este fenómeno puede alterar los patrones de distribución espacial del fenómeno.

La investigación que aquí se reporta aporta una serie de resultados de utilidad al sector y a la academia. Se ofrece información detallada y actualizada sobre los patrones de movilidad de los usuarios del sistema de transporte aéreo en el país; y en el aspecto académico, la verificación del comportamiento anómalo o típico, del patrón de distribución respecto a las premisas gravitacionales es importante para el avance del conocimiento en los marcos teóricos de la geografía y la economía del transporte.

1.3 Objetivos de la investigación

1.3.1 Objetivo general

- 1) Realizar un análisis gravitatorio de la movilidad de los usuarios (pasajeros) del sistema de transporte aéreo en el espacio geográfico mexicano.

1.3.2 Objetivos particulares

- 2) Obtener las bases de datos más recientes, en formato electrónico, de la Dirección General de Aeronáutica Civil (DGAC) sobre las operaciones aeronáuticas realizadas en México.
- 3) Procesar la base de datos de la DGAC para obtener la matriz origen – destino de los desplazamientos de pasajeros en el territorio nacional, desagregando el análisis en las categorías doméstica e internacional, regular y de fletamento.
- 4) Obtener los patrones más recientes de la movilidad asociada con el sistema de transporte aéreo de pasajeros en México, por medio de la identificación de los principales orígenes y destinos, así como de los corredores de transporte y las características cuantitativas asociadas.
- 5) Ajustar un modelo gravitacional a la distribución de viajes en la red doméstica de transporte aéreo de pasajeros, utilizando los datos más recientes de la DGAC y la técnica estadística de los mínimos cuadrados.
- 6) Validar estadísticamente el modelo gravitacional por medio de pruebas en conjunto e individuales del desempeño de los parámetros, y su aportación a la explicación de la variable dependiente.
- 7) Determinar la presencia o ausencia en la red doméstica de transporte aéreo de pasajeros, del fenómeno de independencia causal entre la distancia euclidiana y la intensidad de flujo, característica de la red doméstica de transporte aéreo de carga.

1.4 Metodología e hipótesis

El método que se utiliza en la investigación es fundamentalmente inductivo, considerando que se pretende obtener conclusiones de posible alcance general, sobre los patrones de distribución de viajes de pasajeros en el modo de transporte aéreo, a partir del análisis de un caso particular, consistente en la movilidad observada en el espacio geográfico mexicano en el año 2007.

En esta investigación se parte de una hipótesis que será comprobada o refutada con base en el análisis de datos empíricos obtenidos de la observación directa del fenómeno.

La hipótesis de investigación plantea que la distribución de los viajes de personas transportadas por el modo aéreo en México responde adecuadamente a las premisas del modelo gravitacional; mismas que se encuentran definidas en el marco teórico actual de la geografía y la economía del transporte. Los datos empíricos consisten en los movimientos de pasajeros registrados por la Dirección General de Aeronáutica Civil de la SCT, en el año 2007.

Los datos empíricos serán analizados mediante técnicas estadísticas, con las que se verificará la presencia o ausencia de relaciones matemáticas, que finalmente serán utilizadas para probar la hipótesis de investigación.

De acuerdo con lo anterior, en la investigación se seguirá la secuencia del método experimental, que parte de una hipótesis, prosigue con la recopilación de información, para su posterior análisis, y finaliza con el establecimiento de relaciones de validez general.

Los elementos teóricos de la investigación, así como las técnicas para el tratamiento de los datos, provienen fundamentalmente de la economía, la geografía, la modelación del transporte, y la estadística matemática.

2 Marco teórico

2.1 Antecedentes sobre el modelo gravitacional

La ley de la gravitación universal fue publicada por Isaac Newton en 1687 en su obra *Principios matemáticos de filosofía natural* y se expresa con la siguiente afirmación: “toda partícula del universo atrae a toda otra partícula con una fuerza que es directamente proporcional al producto de sus masas, e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre ellas” (Serway, Jewett, 2006).

Si las partículas tienen masas m_1 y m_2 , y están separadas por una distancia r , la magnitud de la fuerza gravitacional es²:

$$F_g = G \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2} \quad (1)$$

El descubrimiento del principio de la gravitación universal significó un avance trascendente en el conocimiento de las ciencias físicas al definir las relaciones de los objetos en el espacio, que determinan su posicionamiento relativo.

A mediados del siglo XIX se comenzó a explorar la posibilidad de aplicar algunos principios de las ciencias físico – matemáticas en las ciencias sociales; en particular, resultó especialmente atractivo utilizar el principio de la gravitación universal en la explicación de algunos fenómenos de interacción espacial – regional. Destacan los trabajos de J. H. von Thunen y Alfred Weber, quienes fundaron las bases de la teoría de la localización con un enfoque económico – espacial, y ya en el siglo XX, las aportaciones de August Lösch, Walter Christaller, George K. Zipf y John Q. Stewart (Krueckberg y Silvers, 1978; Potrykowski y Taylor, 1984).

En los años cincuenta, se comenzó a desarrollar el análisis del transporte como un fenómeno económico – espacial, mediante técnicas cuantitativas. En especial fue relevante el trabajo del geógrafo Edward L. Ullman, investigador de la Universidad de Chicago, quien propuso el uso del modelo gravitacional en la geografía del transporte (Black, 2003). De hecho, Ullman desarrolló su conocida triada conceptual para explicar las interrelaciones regionales (complementariedad, transferibilidad, y oportunidad de intervención) con base en el principio gravitacional (Potrykowski y Taylor, 1984).

Por esa misma época, investigadores como F. C. Iklé, J. D. Carrol y H. B. Bevis (Potrykowski y Taylor; 1984) y H. J. Carey (Ortúzar y Willumsen; 1994) comenzaron a utilizar variantes del modelo gravitacional para construir modelos de distribución de

² En la ecuación (1) G es la constante de la gravitación universal. $G = 6.673 \times 10^{-11} \text{ N m}^2 / \text{kg}^2$

viajes en redes de transporte; una de las primeras innovaciones importantes de esos modelos fue la sustitución de la población (medida en cantidad de habitantes) por la cantidad de viajes generados y atraídos por los nodos (Ortúzar y Willumsen; 1994), lo cual permite aminorar los problemas que se presentan cuando existe baja correlación entre el tamaño de la población y la movilidad.

Una segunda adaptación importante, más reciente, consistió en hacer flexible el grado de la potencia de la variable “distancia”; es decir, se definió el exponente de esta variable como un parámetro de calibración (no restringido a valores enteros). Adicionalmente, el llamado factor de impedancia, o variable disuasiva, se amplió desde el concepto tradicional de la “distancia”, hacia la utilización del tiempo (de viaje, de espera, de entrega, etcétera), o de una función de costo generalizado (usualmente de potencia decreciente, como en el caso exponencial).

Finalmente, en el análisis teórico de los modelos gravitacionales, merecen una mención especial los trabajos del matemático británico Alan G. Wilson, quien en las décadas de los años sesenta y setenta del siglo XX, desarrolló una sólida estructura matemática para sustentar la generalización de varios modelos espaciales, a partir del concepto físico de entropía (Wilson, 1970).

2.2 Modelo utilizado en el estudio

El modelo aplicado en los estudios referidos en el numeral 1.1 (Rico, 2001; Gradilla y Rico, 2005; Herrera, et. al., 2005) es del tipo no restringido (Ortúzar y Willumsen, 1994) y fue propuesto por Rico (2001) con base en un modelo previo propuesto por Taaffe, Gauthier y O’Kelly (1996), con la siguiente estructura matemática:

$$V_{ij} = \alpha \cdot [VG_i \cdot VA_j]^\beta \cdot D_{ij}^\delta \quad (2)$$

Donde

- V_{ij} flujo de carga entre el nodo i-ésimo y el nodo j-ésimo
- α parámetro empírico a obtener por calibración
- $[VG_i \cdot VA_j]$ producto de la carga generada en el nodo i-ésimo por la carga atraída en el nodo j-ésimo
- β parámetro empírico, a obtener por calibración
- D_{ij} distancia euclidiana entre el nodo i-ésimo y el nodo j-ésimo
- δ parámetro empírico, a obtener por calibración

Este modelo pretende conservar la estructura gravitatoria clásica mediante el empleo del producto de los factores potenciales como variable explicativa, además del factor de impedancia, que corresponde a la distancia euclidiana.

Para la investigación que se reporta en este documento, se ha realizado una ligera modificación del modelo anterior, quedando con la siguiente estructura matemática:

$$V_{ij} = \alpha \cdot (VG_i)^\beta \cdot (VA_j)^\varphi \cdot D_{ij}^\delta \quad (3)$$

Donde

- V_{ij} flujo de pasajeros entre el nodo i-ésimo y el nodo j-ésimo
- α parámetro empírico, a obtener por calibración
- VG_i pasajeros “generados” por el nodo i-ésimo
- β parámetro empírico, a obtener por calibración
- VA_j pasajeros “atraídos” por el nodo j-ésimo
- φ parámetro empírico, a obtener por calibración
- D_{ij} distancia euclidiana entre el nodo i-ésimo y el nodo j-ésimo
- δ parámetro empírico, a obtener por calibración

En nuestra opinión, la función propuesta (3) presenta algunas ventajas respecto al modelo previo (2). Una de ellas es que “aisla” el efecto de cada una de las variables explicativas, lo cual permite un análisis más preciso de su comportamiento individual. Una segunda ventaja radica en que la forma log-lineal de la función se apega con mayor bondad al modelo clásico de regresión lineal múltiple, que ha sido utilizado para el cálculo de los parámetros.

Finalmente, otra ventaja adicional, que puede ofrecer oportunidades de investigación en paralelo, es que la ecuación (3) tiene la forma de una función de demanda de transporte tipo Kraft (Khisty, 1990; Sinha y Labi, 2007), en la que la elasticidad de la intensidad de flujo de transporte, respecto a cada una de las variables explicativas, es igual al valor de los exponentes respectivos³. La elasticidad de la demanda permite conocer su sensibilidad (variación porcentual) ante variaciones en la dimensión de las variables explicativas.

Al obtener el logaritmo natural en ambos lados de la ecuación (3), se obtiene la ecuación (4):

³ En la función tipo Kraft $V(X) = k \prod_{i=1}^n X_i^{c_i}$ se puede demostrar que la elasticidad de $V(X)$ respecto a cada una de las variables X_i es igual a $\varepsilon_X(V) = \frac{X}{V} \frac{\partial V(X)}{\partial X} = c_i$

$$\ln V_{ij} = \ln \alpha + \beta \ln (VG_i) + \varphi \ln (VA_j) + \delta \ln D_{ij} \quad (4)$$

La ecuación (4) tiene la forma de una ecuación de regresión lineal múltiple (Infante y Zárate, 1990):

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 \quad (5)$$

Los mejores estimadores de los parámetros (ordenada al origen y coeficientes) de la ecuación de regresión lineal múltiple, se obtienen a partir de un conjunto de datos empíricos, por medio del método de los mínimos cuadrados (Infante y Zárate, 1990), con lo cual se llega a la ecuación:

$$\hat{Y} = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 X_1 + \hat{\beta}_2 X_2 + \hat{\beta}_3 X_3 \quad (6)$$

2.3 Pruebas de hipótesis para la evaluación de los parámetros de la regresión

La estimación de los parámetros por mínimos cuadrados ofrece una sólida batería de pruebas estadísticas que permiten evaluar su calidad, así como la bondad de ajuste de la regresión respecto a la dispersión de los datos.

En particular, en el estudio se utilizan las dos pruebas de hipótesis típicas para verificar la significancia de los parámetros (Infante y Zárate, 1990): la prueba t (individual) y la prueba F (grupala), que se aplica mediante un análisis de varianza.

Con base en el teorema central del límite, se puede demostrar (Infante y Zárate, 1990) que los estimadores mínimos cuadráticos de los parámetros de regresión tienen distribución de probabilidades Normal; de tal manera que, mediante la distribución t de student, se puede contrastar hipótesis nulas y alternas del tipo:

$H_o : \beta_i = \beta_i^*$ en oposición a $H_a : \beta_i \neq \beta_i^*$ ($i = 0,1,2,3$), utilizando el estadístico de prueba:

$$t_0 = \frac{\hat{\beta}_i - \beta_i^*}{S_{\hat{\beta}_i}} \quad (i = 0,1,2,3), \text{ de acuerdo con la regla de decisión:}$$

Rechazar H_o si $t_0 \geq t_{\alpha/2}(n-2)$ o si $t_0 \leq -t_{\alpha/2}(n-2)$

La prueba de hipótesis que se acostumbra realizar verifica que:

$H_o : \beta_i = 0$ en oposición a $H_a : \beta_i \neq 0$ ($i = 0,1,2,3$), puesto que en el caso de que no se pueda rechazar la hipótesis nula, el resultado puede interpretarse en el sentido de que

la variable explicativa, cuyo coeficiente es cero no es significativa en la explicación de la variable dependiente.

Por otra parte, partiendo del diagrama de dispersión de los datos se puede mostrar (Infante y Zárate, 1990) que:

$$\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2 = \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y})^2 + \sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - \bar{Y})^2 \quad (7)$$

O, en palabras: S. C. TOTAL = S. C. ERROR + S. C. REGRESIÓN⁴

Adicionalmente, sabiendo que los estimadores mínimos cuadráticos de los parámetros de regresión tienen distribución de probabilidades Normal:

$$\hat{\beta}_i \sim N \left(\beta_i, \frac{\sigma^2}{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \right) \quad (i = 1, 2, 3)$$

Entonces:

$$\frac{(\hat{\beta}_i - \beta_i) \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}}{\sigma} \sim N(0, 1)$$

Por lo que:

$$\frac{(\hat{\beta}_i - \beta_i)^2 \cdot \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{\sigma^2} \sim \chi^2_{(1)}$$

De aquí que, bajo $H_0: \beta_i = 0$ (substituyendo), tengamos que:

$$\frac{(\hat{\beta}_i)^2 \cdot \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{\sigma^2} = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - \bar{Y})^2}{\sigma^2} = \frac{\text{S. C. REGRESIÓN}}{\sigma^2} \sim \chi^2_{(1)}$$

Igualmente, puede probarse (Infante y Zárate, 1990) que:

⁴ S. C. significa "suma de cuadrados".

$$\frac{\text{S. C. TOTAL}}{\sigma^2} \sim \chi^2_{(n-1)}$$

Y que:

$$\frac{\text{S. C. ERROR}}{\sigma^2} \sim \chi^2_{(n-2)}$$

De modo que, para probar $H_0: \beta_i = 0$ en oposición a $H_a: \beta_i \neq 0$ el estadístico:

$$F_0 = \frac{\frac{\text{S. C. REGRESIÓN}}{\sigma^2(1)}}{\frac{\text{S. C. ERROR}}{\sigma^2(n-2)}}$$

tiene distribución F con 1 y n-2 grados de libertad.

Una prueba de nivel de significancia α para $H_0: \beta_i = 0$ en oposición a $H_a: \beta_i \neq 0$ se obtiene mediante la regla de decisión (Infante y Zárate, 1990):

$$\text{Rechazar } H_0 \text{ si: } F_0 \geq F_{n-2, \alpha}^1$$

Estos resultados se acostumbra presentarlos mediante una tabla de análisis de varianza.

3 Definición del objeto de estudio

3.1 La aviación comercial en México

La principal fuente de datos empíricos cuantitativos sobre la aviación comercial en México es la Dirección General de Aeronáutica Civil (DGAC) de la SCT, misma que mantiene y publica anualmente una base de datos con el número de operaciones, los pasajeros y la carga que es transportada en cada par origen destino de la red aeroportuaria federal (comercial) (DGAC, 2007).

La información se ofrece desagregada en las categorías internacional⁵ y doméstica⁶; y en las subcategorías de servicio regular⁷, y de fletamento⁸; por ello, se encuentra disponible en cuatro grandes subconjuntos. Los datos utilizados en este estudio corresponden al año 2007. La tabla 3.1 muestra un resumen de la información recopilada por la DGAC para ese año, y que se considera el universo general de estudio de la presente investigación.

Tabla 3.1. Total de operaciones, pasajeros y carga, transportados en México por la aviación comercial en 2007.

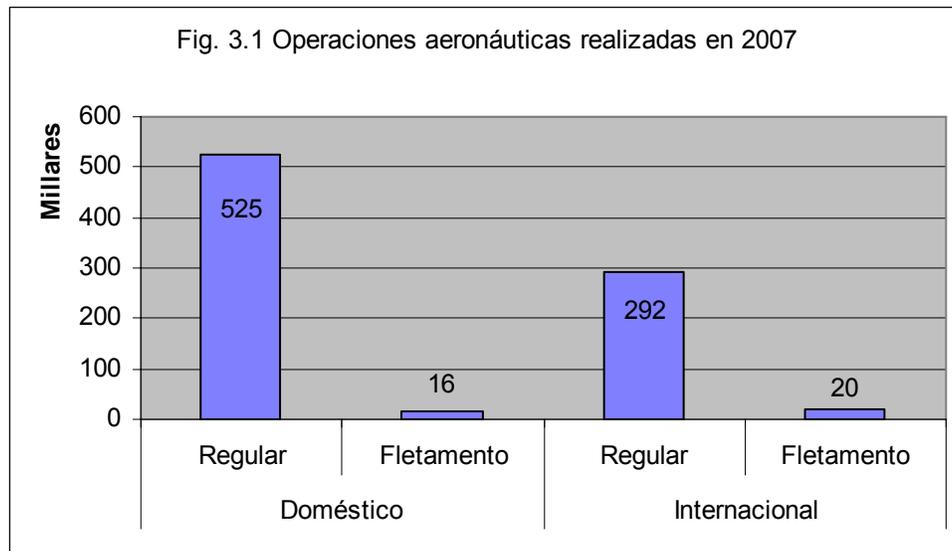
Ámbito	Servicio	Operaciones	Pasajeros	Carga (toneladas)
Doméstico	Regular	524,722	27,400,965	112,077
	Fletamento	16,463	708,665	9,814
	Subtotal	541,185	28,109,630	121,892
Internacional	Regular	291,633	24,819,867	460,322
	Fletamento	19,639	2,432,010	53,564
	Subtotal	311,272	27,251,877	513,885
Total		852,457	55,361,507	635,777

⁵ Servicio internacional. Comprende todas las operaciones realizadas entre un punto del territorio mexicano y uno del extranjero (DGAC, 2007b).

⁶ Servicio doméstico. Comprende todas las operaciones realizadas entre puntos del territorio mexicano (DGAC, 2007b).

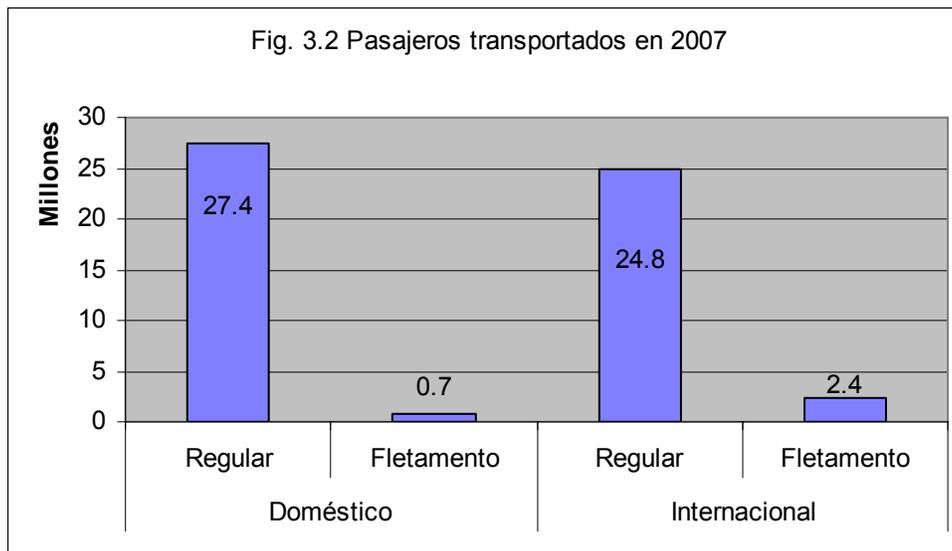
⁷ Servicio regular. Es el servicio aéreo que está sujeto a itinerarios, frecuencias de vuelos, y horarios (DGAC, 2007b).

⁸ Servicio de fletamento. Es el servicio aéreo no sujeto a itinerarios, frecuencias de vuelos, ni horarios (DGAC, 2007b).

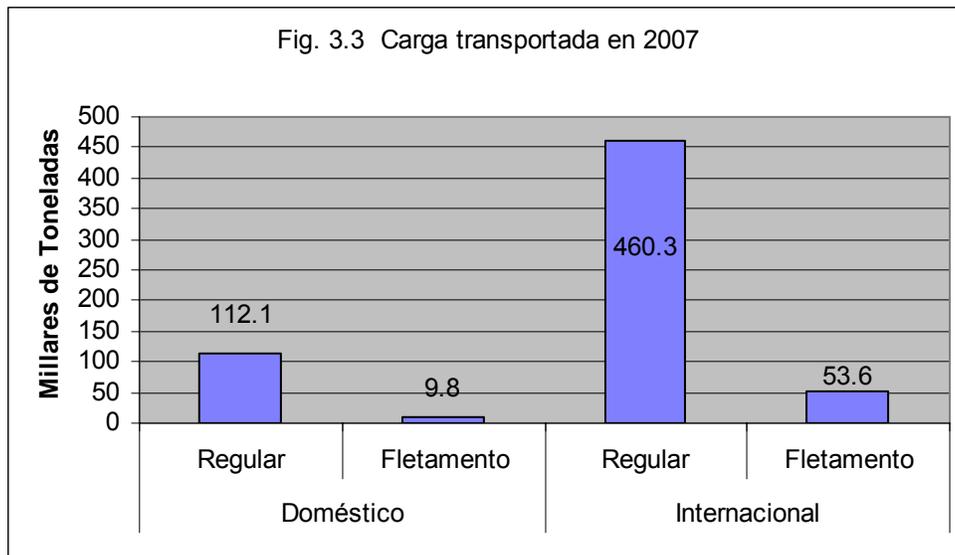


Fuente: Elaboración propia con información de la DGAC (DGAC, 2007)

La información de la tabla 3.1 permite formar un panorama general de algunas de las características actuales de la aviación comercial en México. Se puede notar, por ejemplo, que tanto en el número de operaciones como en los pasajeros transportados, el mercado doméstico tiene mayor relevancia numérica que el internacional; situación que no comparte el transporte de carga, puesto que en este segmento el transporte internacional es mucho más cuantioso (figuras 3.1, 3.2, y 3.3).



De las proporciones observadas en los ámbitos doméstico e internacional para las operaciones, los pasajeros y la carga, se puede inferir que las operaciones internacionales se realizan con equipo de vuelo de mayor capacidad, puesto que con



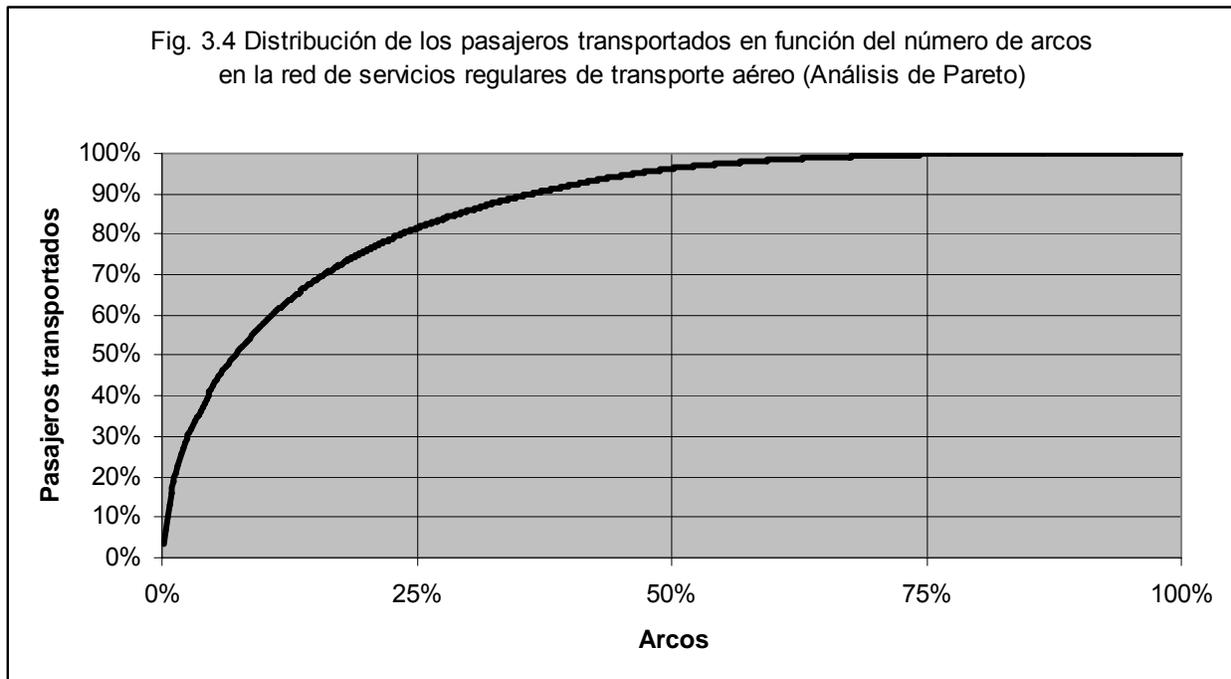
menos operaciones se transporta más carga y un número similar de pasajeros, que en el ámbito doméstico; lo cual, además de ser probablemente una necesidad ante las mayores distancias recorridas, también puede ser indicador de una mayor eficiencia económica en la producción de estos servicios.

A su vez, se puede notar que los servicios regulares son altamente predominantes en los dos ámbitos geográficos en que se desarrolla la aviación comercial mexicana, siendo más notable la situación en el ámbito doméstico, puesto que en este segmento les corresponde a los servicios de fletamento, sólo el 3% de las operaciones y el 2.5% de los pasajeros transportados.

3.2 Determinación del subsistema de transporte por analizar

De acuerdo con los objetivos perseguidos en el presente estudio y señalados en el numeral 1.3, el objeto de estudio primario de la investigación es la distribución espacial de los pasajeros transportados en el mercado doméstico mexicano. Por esta razón, la totalidad de los movimientos internacionales quedan excluidos del análisis.

Dentro de los movimientos domésticos, se ha tenido la posibilidad de estudiar el comportamiento de dos mercados distintos: los servicios regulares y los de fletamento. Como ya se señaló en el numeral previo (3.1), los servicios de fletamento son poco frecuentes y representan sólo el 2.5% del total de los pasajeros transportados en el territorio nacional. Adicionalmente, existe la posibilidad de que estos servicios muestren una cierta "irregularidad espacial", en el sentido de que las necesidades de transporte que los originan responden más a situaciones de coyuntura que a decisiones planeadas con anticipación, en las que usualmente se pondera con mayor consideración aspectos como la distancia y el costo de viaje; que resultan cruciales para la modelación



gravitacional de la movilidad. Por estas razones, el estudio se ha concentrado en los servicios regulares.

Excluidas las operaciones realizadas mediante servicios de fletamento, el siguiente paso consistió en analizar con mayor detalle el conjunto de los servicios regulares. Nuestros análisis de la base de datos de la DGAC, han permitido determinar que en 2007 los servicios regulares de transporte doméstico de pasajeros se realizaron en una red formada por 61 aeropuertos (nodos), y 533 enlaces origen-destino (arcos) diferentes⁹.

En esos 533 enlaces origen-destino existe una notable heterogeneidad en cuanto a la cantidad de usuarios transportados, de tal manera que la mayoría presentan una intensidad de flujo muy pequeña, mientras que algunos cuantos son los que concentran la mayoría de los desplazamientos¹⁰. Esta distribución de la intensidad de flujo en los

⁹ Cada par de aeropuertos tiene dos enlaces posibles entre sí, puesto que se distingue el sentido del desplazamiento (cada nodo es origen en un movimiento y destino en el otro). De esta manera, el número total de enlaces que se pueden formar con 61 nodos es 61 por 60, que es igual a 3660; lo cual produce un índice de conectividad de 0.145 para los 533 enlaces existentes. Este índice señala que en 2007 sólo se estableció el 14.5% del total de interrelaciones posibles en la red de transporte aéreo regular.

¹⁰ Dicha característica no es exclusiva de este segmento, sino que se encuentra presente en todo el sistema de transporte aéreo, incluyendo los movimientos de carga (Rico, 2001).

arcos de la red sigue fielmente la curva de distribución de Pareto¹¹ (Rico, 2001), como se puede verificar en la fig. 3.4.

Ballou (2004) propone una clasificación en tres categorías (A, B, C) definidas por las dos fronteras (80/20) y (95,50) en el diagrama de Pareto; de acuerdo con este criterio de clasificación, los productos o servicios incluidos en las dos primeras se consideran los más relevantes (o en nuestro caso, representativos) en el sistema. Adicionalmente, se considera que entre los productos o servicios que forman parte de cada una de las tres categorías, existe una mayor homogeneidad en sus características; lo cual justifica un trato diferenciado para cada uno de ellos.

En nuestro caso de estudio, hemos considerado conveniente no incluir en el análisis gravitacional los movimientos que se encuentran en la categoría más baja; mismos que aportan sólo el 5% del flujo total, debido a que son operaciones poco frecuentes que pueden tener una lógica económica diferente a la de los movimientos más estables dentro del sistema; especialmente en lo que respecta al comportamiento relacionado con los costos de transporte.

Por lo anterior, el objeto de estudio de la investigación ha quedado definido por el 95% de los movimientos regulares de transporte de pasajeros, mismos que se realizan en los 244 arcos con mayor intensidad de flujo dentro del sistema, y que interconectan a las 53 principales terminales aéreas en el país¹².

3.3 Cálculo de las distancias empleadas en el modelo

Las distancias empleadas para la modelación de la distribución espacial de los pasajeros en la red de transporte aéreo se calcularon mediante un sistema de información geográfica (SIG).

Mediante el procesamiento de la base de datos de la DGAC, que contiene la información de los pasajeros transportados en 2007, se identificaron los 244 arcos principales, y las 53 terminales aeroportuarias que acumulan el 95% de la movilidad en el sistema, como se explica en el numeral 3.2 del presente documento.

A continuación, se procedió a ligar la base de datos resultante del paso anterior, con las coordenadas de localización geográfica de las terminales. La mayoría de los datos sobre la localización de los aeropuertos proviene de la Dirección General de Planeación de la SCT; sin embargo, durante el análisis se detectaron errores en las coordenadas

¹¹ Los puntos críticos sobre la curva teórica de Pareto son los que definen las relaciones 80/20 y 95/50; en la curva de la fig. 3.4; tales puntos corresponden a las parejas (80.1 / 23.6) y (95 / 46.5).

¹² El listado de los aeropuertos y enlaces que los interconectan, que fueron objeto de estudio de la presente investigación, se muestran en el Anexo 1.

de algunos aeropuertos, mismos que fueron subsanados con información proveniente de la base de datos de localidades del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), y de la base de datos en línea del SIG Google Earth.

El tercer paso consistió en transformar la base de datos, con las coordenadas de localización geográfica y los datos de movimientos de pasajeros, en archivos compatibles con el programa Arc View, del fabricante de software Environmental Systems Research Institute (ESRI). Arc View es un sistema de visualización y mapeo computarizado de datos geográficos, que permite el manejo de la información y su análisis numérico desde una perspectiva espacial.

Mediante el software Arc View, la distancia entre aeropuertos se calculó en línea recta sobre la proyección cartográfica cónica conforme de Lambert (Robinson, Sale, et. al.; 1984), de la República Mexicana.

Con objeto de verificar la exactitud de las distancias calculadas con dicho procedimiento, los resultados para algunos pares de ciudades se compararon con las distancias publicadas en el libro de itinerarios de la empresa Aeroméxico, sin encontrar diferencias significativas¹³.

Las distancias calculadas entre los 244 pares origen – destino, por el procedimiento descrito previamente, se presentan en el cuadro A1.1 del Anexo 1 de este reporte.

¹³ Lo cual indica que las distancias señaladas en los itinerarios de Aeroméxico, también están calculadas sobre el segmento de recta que une origen y destino.

4 Modelación matemática de la distribución espacial de los pasajeros en la red de transporte aéreo

En el presente estudio se ha utilizado la siguiente ecuación para modelar la distribución espacial de los pasajeros que se transportan por vía aérea en el territorio nacional mexicano:

$$V_{ij} = \alpha \cdot (VG_i)^\beta \cdot (VA_j)^\varphi \cdot D_{ij}^\delta \quad (3)$$

Donde

- V_{ij} flujo de pasajeros entre el nodo i-ésimo y el nodo j-ésimo
- α parámetro empírico, a obtener por calibración
- VG_i pasajeros “generados” por el nodo i-ésimo
- β parámetro empírico, a obtener por calibración
- VA_j pasajeros “atraídos” por el nodo j-ésimo
- φ parámetro empírico, a obtener por calibración
- D_{ij} distancia euclidiana entre el nodo i-ésimo y el j-ésimo
- δ parámetro empírico, a obtener por calibración

La ecuación (3) conserva las relaciones estructurales del modelo gravitacional clásico, que se utiliza en las aplicaciones del análisis de sistemas de transporte (Ortúzar y Willumsen, 1994), con la cualidad calibrarse mediante la minimización del cuadrado de los errores, a partir de un conjunto de datos empíricos (Rico, 2001).

Al obtener el logaritmo natural en ambos lados de la ecuación (3), se llega a la ecuación (4), que es la forma log – lineal de la ecuación (3):

$$\ln V_{ij} = \ln \alpha + \beta \ln (VG_i) + \varphi \ln (VA_j) + \delta \ln D_{ij} \quad (4)$$

La ecuación (4) tiene la forma de una función de regresión lineal múltiple (Infante y Zárate, 1990):

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 \quad (5)$$

Los mejores estimadores de los parámetros (ordenada al origen y coeficientes) de la ecuación de regresión lineal múltiple, se obtienen a partir de un conjunto de datos empíricos por medio del método de los mínimos cuadrados (Infante y Zárate, 1990).

4.1 Resultados del análisis de regresión múltiple

Los datos empíricos empleados en el análisis de regresión múltiple se presentan en el Anexo 1 del documento, y se obtuvieron mediante el procesamiento de la base de datos de la Dirección General de Aeronáutica Civil de la SCT, con información que corresponde al año 2007 (ver capítulo 3).

La tabla 4.1 muestra los valores obtenidos para la ordenada al origen, y los tres coeficientes de la ecuación (4), mismos que corresponden a los exponentes de la ecuación (3).

Tabla 4.1 Valores de los parámetros de calibración de la ecuación de regresión múltiple.

Parámetro	Valor
$\ln \alpha$	-5.93669
β	0.62747
φ	0.62696
δ	-0.02027

Fuente: elaboración propia

Sustituyendo los valores de los parámetros que se muestran en la tabla 4.1, en la ecuación (4), se obtiene la ecuación (8), que es la expresión calibrada del modelo en su forma log – lineal.

$$\ln V_{ij} = -5.94 + 0.627 \cdot \ln(VG_i) + 0.627 \cdot \ln(VA_j) - 0.02 \cdot \ln D_{ij} \quad (8)$$

Calculando el valor de α , y sustituyendo los valores de los exponentes en la ecuación (3), se obtiene la ecuación (9), que es la expresión calibrada del modelo en su forma original.

$$V_{ij} = 0.00264 \cdot (VG_i)^{0.627} \cdot (VA_j)^{0.627} \cdot D_{ij}^{-0.02} \quad (9)$$

En la tabla 4.2 se presentan los indicadores estadísticos globales de la regresión múltiple [ecuación (4)].

Tabla 4.2 Indicadores estadísticos globales de la regresión múltiple.

Coefficiente de correlación múltiple	0.82132
Coefficiente de determinación R^2	0.67456
R^2 ajustado	0.67049
Error típico	0.50060
Observaciones	244

Fuente: elaboración propia

4.2 Evaluación de los parámetros mediante pruebas de hipótesis

En este estudio se emplearon dos pruebas para la evaluación de los parámetros de la ecuación de regresión múltiple (ver capítulo 2): la prueba t (individual) y la prueba F (grupal), que se aplica mediante un análisis de varianza.

Con base en el teorema central del límite, se puede demostrar (Infante y Zárate, 1990) que los estimadores mínimo cuadráticos de los parámetros de regresión tienen distribución de probabilidades Normal, de tal manera que, mediante la distribución t de student, se pueden contrastar hipótesis nulas y alternas del tipo:

$H_o : \beta_i = \beta_i^*$ en oposición a $H_a : \beta_i \neq \beta_i^*$ ($i = 0,1,2,3$), utilizando el estadístico de prueba:

$$t_0 = \frac{\hat{\beta}_i - \beta_i^*}{S_{\hat{\beta}_i}} \quad (i = 0,1,2,3)$$

La prueba de hipótesis que se acostumbra realizar verifica:

$$H_o : \beta_i = 0 \text{ en oposición a } H_a : \beta_i \neq 0 \quad (i = 0,1,2,3)$$

La tabla 4.3 presenta los resultados obtenidos al aplicar la prueba t a los parámetros de la ecuación de regresión múltiple.

Tabla 4.3 Resultados de la evaluación paramétrica mediante la prueba t.

Parámetro	Valor puntual	Estadístico t	Probabilidad de aceptación de Ho	Intervalo de confianza al 95%	
				Valor inferior	Valor superior
ln α	-5.93669	-7.203	$7.53 * 10^{-12}$	-7.560	-4.313
β	0.62747	20.818	$1.09 * 10^{-55}$	0.5680	0.6868
φ	0.62696	20.864	$7.76 * 10^{-56}$	0.5677	0.6861
δ	-0.02027	-0.384	0.7010	-0.1241	0.0836

Fuente: elaboración propia

Por otra parte, partiendo del diagrama de dispersión de los datos se puede mostrar (Infante y Zárate, 1990), que para probar $H_o: \beta_i = 0$ en oposición a $H_a: \beta_i \neq 0$ se puede utilizar el estadístico:

$$F_0 = \frac{\frac{\text{S. C. REGRESIÓN}}{\sigma^2(1)}}{\frac{\text{S. C. ERROR}}{\sigma^2(n-2)}}$$

Mediante una prueba de nivel de significancia α con la regla de decisión: rechazar H_0 si:

$$F_o \geq F_{n-2,\alpha}^1$$

La tabla 4.4 presenta los resultados obtenidos al aplicar la prueba F a los parámetros de la ecuación de regresión múltiple.

Tabla 4.4 Resultados de la evaluación paramétrica mediante la prueba F.

Fuente	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	3	124.66	41.55	165.82	$3.20 * 10^{-58}$
Residuos	240	60.14	0.2506		
Total	243	184.81			

Fuente: elaboración propia

4.3 Discusión de los resultados del análisis de regresión, y de la evaluación de los parámetros

Con base en los indicadores globales del desempeño estadístico de la ecuación de regresión múltiple y del resultado de la evaluación paramétrica, especialmente la prueba F, se puede considerar que en términos generales los resultados de la modelación son satisfactorios. Sin embargo, en este estudio también se ha presentado el problema con la variable distancia, que fue detectado previamente en la modelación de la distribución de los movimientos de carga (ver el capítulo 1).

El coeficiente de determinación indica que el modelo utilizado explica satisfactoriamente el comportamiento aleatorio de poco más del 67% de los datos.

En la fig 4.1 se muestra una gráfica en que se comparan los valores de la variable dependiente que se calcularon con el modelo, y los correspondientes valores observados. En dicha gráfica se puede observar que las mayores diferencias se encuentran entre los valores localizados en los extremos superior e inferior del rango de los datos; es decir, entre aquellos que se alejan más del valor esperado por el sustento lógico del modelo, o sea el principio gravitacional.

Por su parte, el valor elevado (0.82) del coeficiente de correlación de Pearson señala que el conjunto de variables independientes tiene un adecuado comportamiento lineal respecto a las variaciones de la variable dependiente.

De hecho, es conveniente señalar que el coeficiente de correlación múltiple obtenido es sensiblemente mejor que las correlaciones individuales de las variables independientes respecto a la variable dependiente; lo cual se puede confirmar con los datos presentados en la tabla 4.5. Este resultado sugiere que las variables independientes tienen un mejor desempeño en conjunto, para explicar el comportamiento de la variable dependiente, que en forma aislada.

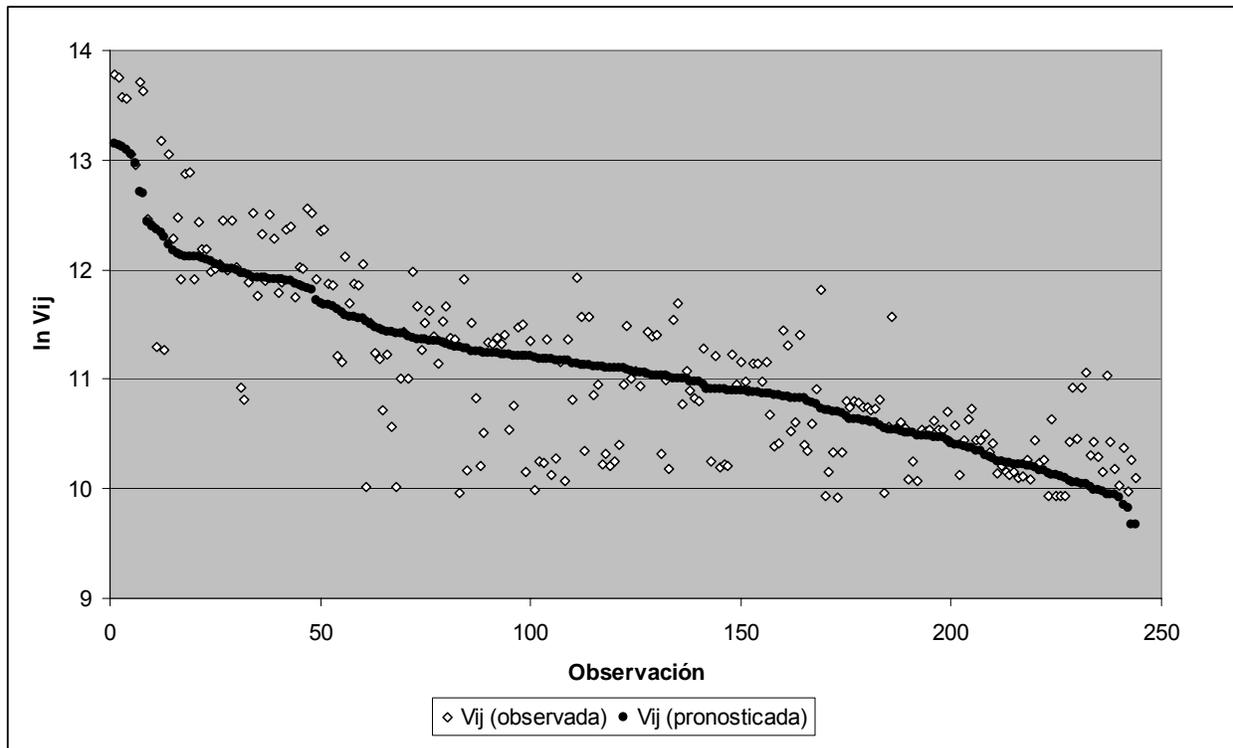


Fig 4.1 Valores pronosticados y observados de la variable dependiente

La matriz de correlaciones, también es útil para confirmar que no existe correlación alta entre las variables independientes, lo cual permite reducir problemas de autocorrelación en la ecuación de regresión múltiple.

En la tabla 4.5 se observa que el signo de la correlación entre los pasajeros generados y atraídos en los nodos de la red, es negativo. Este caso se presenta cuando a valores altos de una variable le corresponden valores bajos de la otra, y viceversa. Este resultado puede indicar que los nodos presentan un comportamiento polarizado; es decir, que unos funcionan como polos generadores de viajes, y los otros como polos atractores, lo cual puede causar efectos negativos en el equilibrio de los flujos por sentido.

Tabla 4.5 Matriz de correlaciones de Pearson para las variables de la regresión

	ln pasajeros (flujo)	ln pasajeros generados	ln pasajeros atraídos	ln distancia
ln pasajeros (flujo)	1			
ln pasajeros generados	0.28689	1		
ln pasajeros atraídos	0.29195	-0.75156	1	
ln distancia	0.05030	0.02097	0.03429	1

Fuente: elaboración propia

También es interesante destacar la baja correlación que existe entre la intensidad de flujo de pasajeros en los arcos y su longitud, lo cual sugiere un resultado que se confirma mediante las pruebas de hipótesis para la evaluación de los parámetros: la cantidad de viajes que se realizan entre dos nodos es independiente de la distancia euclidiana que los separa.

Las pruebas de hipótesis para evaluar los parámetros de la regresión múltiple ofrecen resultados que resultan complementarios para la obtención de conclusiones.

Por una parte la prueba F indica un comportamiento satisfactorio de la ecuación de regresión múltiple en general, y sugiere un buen potencial de las variables independientes para explicar el comportamiento de la variable dependiente, sin distinguir entre ellas, dado su carácter de prueba de comportamiento en grupo.

Por otra parte, la prueba t, en su carácter de prueba individual, confirma los resultados de la prueba F en lo que respecta al buen comportamiento de los pasajeros generados y atraídos en los nodos, como variables explicativas de la variable dependiente, y al mismo tiempo ofrece evidencia estadística de que el desempeño de la variable distancia es muy pobre; de tal manera, que la probabilidad de que su coeficiente sea igual a cero en la ecuación de regresión es muy alta (0.70), lo cual se puede verificar en la tabla 4.3.

La conclusión en este sentido, es que los viajes generados en los orígenes, y los viajes atraídos por los destinos, son variables con un alto potencial para explicar la intensidad de flujo de pasajeros en los corredores que los unen. No así la distancia euclidiana que los separa. De hecho, los resultados sugieren que la omisión de la variable distancia en el modelo, no tendría un efecto importante en su eficiencia para reproducir el comportamiento del fenómeno estudiado.

5 Conclusiones

Desde hace varios años, en el Instituto Mexicano del Transporte se han mantenido vigentes varias líneas de investigación relacionadas con el transporte aéreo en México; el presente trabajo es parte de la línea de investigación relacionada con la modelación matemática del fenómeno.

El objeto de estudio de la presente investigación es la movilidad de los pasajeros que utilizan el sistema de transporte aéreo doméstico mexicano, específicamente a través de los servicios denominados regulares, mismos que constituyen la gruesa mayoría, respecto al total.

El objetivo de la investigación ha sido verificar la hipótesis del comportamiento gravitacional en la movilidad de los pasajeros que recurrieron al transporte aéreo en 2007; en particular, con cierto énfasis en la observación del comportamiento de la distancia euclidiana, que separa a los orígenes y destinos, como variable explicativa de la intensidad de flujo de transporte de pasajeros.

El interés sobre este objeto de estudio específico deriva del hecho de que las investigaciones que anteceden al trabajo han estudiado exclusivamente el movimiento de carga, surgiendo entonces la pertinencia del análisis del movimiento de pasajeros, con la intención de verificar la consistencia de las conclusiones obtenidas previamente.

En general, los resultados de la modelación de la distribución espacial de la movilidad han sido satisfactorios; sin embargo, se han encontrado problemas para utilizar eficientemente la distancia de viaje como una de las variables explicativas en el modelo gravitacional.

El principal problema deriva del hallazgo sistemático de que la intensidad de flujo en los arcos de la red es estadísticamente independiente de su longitud, o sea de la distancia euclidiana entre los orígenes y destinos de los viajes.

La independencia entre la cantidad de transporte realizado y la longitud del desplazamiento contradice varias de las premisas fundamentales del marco teórico de la geografía y la economía del transporte, al sugerir que la distancia física no está correlacionada adecuadamente con el costo generalizado de transporte, o sea la distancia económica, que enfrentan los usuarios en el momento de contratar un servicio de transporte aéreo.

La principal explicación para esta contradicción, surge del análisis detallado de la distribución de frecuencias de la intensidad de transporte, en función de la distancia de viaje (ver los Anexos 2 y 3). El histograma de frecuencias muestra que el comportamiento esperado (convencional) de la variable se presenta después del máximo de la distribución, alrededor de los 750 km, y que el comportamiento anómalo

se presenta únicamente en la región anterior a dicho punto máximo, que corresponde a los valores pequeños de la distancia. La razón estriba en que en las distancias cortas el transporte aéreo enfrenta una intensa competencia por parte del autotransporte, y por ello no hay demanda en ese segmento de mercado. En este sentido, se puede afirmar que las dos modalidades de transporte funcionan como servicios complementarios, y que su análisis gravitacional requiere un enfoque sistémico, inalcanzable mediante el análisis individual del comportamiento de cada modo.

Adicionalmente, la presente investigación ha permitido obtener los patrones más recientes de la movilidad de los usuarios del sistema de transporte aéreo en México, a través de la identificación de los principales orígenes y destinos, así como de los principales corredores de transporte y las características cuantitativas asociadas.

En el estudio se utilizó un modelo con estructura gravitacional, pero adaptado para calibrarse mediante la técnica de los mínimos cuadrados, a partir de un conjunto de datos empíricos. La fuente de la información de campo es la Dirección General de Aeronáutica Civil de la SCT, que anualmente publica una base de datos con la totalidad de los movimientos origen - destino realizados por la aviación comercial en México.

La estimación de los parámetros por mínimos cuadrados ofrece una sólida batería de pruebas estadísticas que permiten evaluar su calidad, así como la bondad de ajuste de la regresión respecto a la dispersión de los datos.

En el análisis respectivo se han empleado las dos pruebas de hipótesis típicas para verificar la significancia de los parámetros: la prueba t (individual) y la prueba F (grupala), que se aplica mediante un análisis de varianza.

Con base en los indicadores globales del desempeño estadístico de la ecuación de regresión múltiple, y del resultado de la evaluación paramétrica, especialmente la prueba F, se puede considerar que los resultados de la modelación realizada en el estudio son satisfactorios.

El coeficiente de determinación indica que el modelo explica adecuadamente el comportamiento de poco más del 67% de los datos. Por su parte, el valor elevado del coeficiente de correlación de Pearson señala que el conjunto de las variables independientes tiene un adecuado comportamiento lineal respecto a los cambios de la variable dependiente.

De hecho, es conveniente señalar que el coeficiente de correlación múltiple obtenido es sensiblemente mejor que los coeficientes de correlación individuales de las variables independientes respecto a la variable dependiente. Dicho resultado sugiere que las variables independientes tienen un mejor desempeño en conjunto, para explicar el comportamiento de la variable dependiente, que en forma aislada.

Las pruebas de hipótesis para la evaluación de los parámetros de la regresión múltiple ofrecen resultados que resultan complementarios para el logro de conclusiones.

Por una parte, la prueba F indica un buen comportamiento de la ecuación de regresión múltiple en general, y sugiere un adecuado potencial de las variables independientes para explicar el comportamiento de la variable dependiente, sin distinguir entre ellas, dado su carácter de prueba de comportamiento grupal.

Por otra parte, la prueba t, en su carácter de análisis individual, confirma los resultados de la prueba F, en lo que respecta al buen comportamiento de los pasajeros generados y atraídos en los nodos; pero, al mismo tiempo ofrece evidencia estadística de que el desempeño de la variable distancia es muy pobre; de tal manera, que la probabilidad de que su coeficiente sea igual a cero en la ecuación de regresión, es muy alta.

La conclusión en este sentido, es que los viajes generados en los orígenes, y los viajes atraídos por los destinos, son variables con un alto potencial para explicar la intensidad de flujo de pasajeros en los corredores que los unen. No así, la distancia euclidiana que los separa. De hecho, los resultados sugieren que la omisión de la variable distancia en el modelo, no tendría un efecto importante en su eficiencia para reproducir el comportamiento del fenómeno estudiado.

Los resultados de la presente investigación coinciden plenamente con los obtenidos previamente en los estudios de movilidad de la carga: en el transporte aéreo que se realiza en el territorio mexicano, la intensidad de flujo de pasajeros y carga en los enlaces origen – destino, es estadísticamente independiente de la distancia euclidiana que los separa.

La investigación que se reporta en este documento aporta una serie de resultados que se consideran de utilidad al sector, puesto que el desarrollo y actualización del conocimiento sobre el transporte y su modelación, son elementos imprescindibles para la planeación sectorial, tarea fundamental de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, de la cual el IMT forma parte. En este sentido, la contribución al desarrollo económico y social del país, resulta evidente.

Finalmente, pero no menos importante, se debe señalar que este tipo de trabajos de investigación aporta beneficios en el ámbito académico, al contribuir en el desarrollo del conocimiento científico del fenómeno y sus interrelaciones; en tal sentido, conviene destacar que la investigación se ha realizado en estricto apego a la metodología y los principios teóricos de las ciencias, tanto sociales, como físico – matemáticas, de las cuales forma parte.

6 Bibliografía

BLACK, William. *Transportation: A Geographical Analysis*. Guilford Publications, New York, 2003.

BALLOU, Ronald H. *Logística. Administración de la cadena de suministro*. 5ª ed. Pearson Educación, México, 2004.

Dirección General de Aeronáutica Civil (DGAC, 2007). Web page [en línea]. Disponible en: <URL:<http://dgac.sct.gob.mx/>>

Dirección General de Aeronáutica Civil. *La aviación mexicana en cifras*. (DGAC, 2007b). [en línea]. Disponible en: <URL:<http://dgac.sct.gob.mx/>>

GRADILLA HERNÁNDEZ, Luz Angélica; RICO GALEANA, Óscar Armando. *Análisis espacial de la distribución de la carga transportada por aire en México*. Publicación Técnica No. 269. Sanfandila, Querétaro: Instituto Mexicano del Transporte, 2005. pp. 139. ISSN 0188-7297.

HALL, Randolph W. (editor). *Handbook of Transportation Science*. 2nd. Ed. Kluwer Academic Publishers, Norwell, Massachusetts, 2003.

HERRERA GARCÍA, Alfonso; BUSTOS ROSALES, Agustín; et. al. *Diagnóstico del transporte de carga aérea en México*. Publicación Técnica No. 273. Sanfandila, Querétaro: Instituto Mexicano del Transporte, 2005. pp. 194. ISSN 0188-7297.

INFANTE GIL, Said; ZÁRATE DE LARA, Guillermo P. *Métodos estadísticos. Un enfoque interdisciplinario*. 2ª ed. Editorial Trillas, México, 1990.

KHISTY, C. Jotin. *Transportation Engineering: An Introduction*. Prentice-Hall Inc. Englewood, Cliffs, New Jersey. 1990.

KRUECKEBERG, Donald; SILVERS, Arthur. *Análisis de Planificación Urbana, Métodos y Modelos*. Limusa, 1978.

MANHEIM, Marvin L. *Fundamentals of Transportation Systems Analysis*. Vol I. The Massachusetts Institute of Technology. MIT Press, Cambridge, Mass, 1979.

Manual Estadístico del Sector Transporte 2006. Instituto Mexicano del Transporte. Sanfandila, Querétaro: Instituto Mexicano del Transporte, 2006. ISSN 0188-7246.

NELSON, David. *Dictionary of Statistics*. England, UK: Penguin Books, 2004.

ORTÚZAR, Juan de Dios. *Modelos de demanda de transporte*. 1ª ed. Ediciones Universidad Católica de Chile, Santiago, 1994.

ORTÚZAR, Juan de Dios; WILLUMSEN, Luis. *Modelling Transport*. 2ª ed. John Wiley & Sons, 1994.

PEÑA SÁNCHEZ DE RIVERA, Daniel. *Fundamentos de estadística*. Madrid: Alianza Editorial, S.A., 2001.

POTRYKOWSKI, Marek; TAYLOR, Zbigniew. *Geografía del transporte*. Editorial Ariel S.A., Barcelona, 1984.

RICO GALEANA, Óscar Armando. Problemas en la modelación del transporte de carga: Un caso gravitacional. NOTAS No. 92, Artículo 1, Instituto Mexicano del Transporte, febrero de 2005.

RICO GALEANA, Oscar Armando. On the Relationship between Distance and Cargo Flow Volume in Mexican Domestic Air Transportation Network. Air Transport Research Society (ATRS). 11th ATRS World Conference 2007, University of California, Berkeley, 2007.

RICO GALEANA, Óscar Armando. Análisis espacial del transporte aéreo de carga en México. Publicación Técnica No. 264. Sanfandila, Querétaro: Instituto Mexicano del Transporte, 2005. pp. 106. ISSN 0188-7297.

RICO GALEANA, Óscar Armando. El transporte aéreo de carga doméstica en México. Publicación Técnica No. 168. Sanfandila, Querétaro: Instituto Mexicano del Transporte, 2001. pp. 157. ISSN 0188-7297.

RICO GALEANA, Óscar Armando. Estrategias de actuación comercial para las terminales con baja utilización en la nueva estructura aeroportuaria mexicana. Publicación Técnica No. 212. Sanfandila, Querétaro: Instituto Mexicano del Transporte, 2002. pp. 90. ISSN 0188-7297.

RICO GALEANA, Óscar Armando. La “Ley de Zipf” y la jerarquización de nodos en una red de transporte. Instituto Mexicano del Transporte. NOTAS, N° 69, marzo de 2003.

RICO GALEANA, Óscar Armando. La red de transporte aéreo de carga en México. Instituto Mexicano del Transporte. NOTAS, N° 58, mayo de 2001.

RICO GALEANA, Óscar Armando. Modelación matemática de fenómenos de transporte: Un ejemplo en el transporte aéreo de carga en México. Genio e Ingenio, revista trimestral de la Escuela Nacional de Estudios Profesionales Acatlán, Universidad Nacional Autónoma de México. Año 2, Número doble 6 – 7, México, enero de 2002. pp. 32 – 38.

ROBINSON, Arthur; SALE, Randall; et. al. *Elements of Cartography*. John Wiley and Sons, New York, 1984.

RODRIGUE, Jean-Paul; COMTOIS, Claude; SLACK, Brian. The Geography of Transport Systems. Routledge, 2006.

SINHA, Kumares C.; LABI, Samuel. Transportation Decision Making : Principles of Project Evaluation and Programming. John Wiley and Sons, 2007.

SERWAY, Raymond A.; JEWETT, John W. Física para ciencias e ingenierías. Vol I. 6a ed. Cengage Learning Editores, México, 2006.

TAAFFE, Edward; GAUTHIER, Howard; O'KELLY, Morton. Geography of Transportation. Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 1996.

TEODOROVIC, Dusan. Airline Operations Research. Gordon and Breach Science Publishers. Transportation Studies, vol. 10. Amsterdam, 1988.

UPTON, Graham; COOK, Ian. A Dictionary of Statistics. Oxford, UK: Oxford University Press, 2002.

WILSON, A. G. Entropy in urban and regional modelling. Pion Limited, London, 1970.

Anexo 1 Datos para el análisis de regresión

Tabla A1.1 Principales corredores en la red de transporte aéreo doméstico de pasajeros en México para el año 2007.

No.	Arco		Pasajeros en el arco	Pasajeros generados (origen)	Pasajeros atraídos (destino)	Distancia en km
	Origen	Destino				
1	México	Monterrey	965,434	7,748,676	2,621,672	706.96
2	Monterrey	México	938,566	2,582,510	7,679,090	706.96
3	Cancún	México	899,786	1,350,487	7,679,090	1,282.52
4	México	Cancún	827,706	7,748,676	1,286,023	1,282.52
5	Guadalajara	México	780,551	2,485,294	7,679,090	457.00
6	México	Guadalajara	769,589	7,748,676	2,359,513	457.00
7	Guadalajara	Tijuana	529,183	2,485,294	2,325,480	1,898.31
8	México	Tijuana	468,997	7,748,676	2,325,480	2,296.03
9	Tijuana	Guadalajara	468,838	2,063,753	2,359,513	1,898.31
10	Tijuana	México	421,687	2,063,753	7,679,090	2,296.03
11	Mérida	México	393,134	519,267	7,679,090	994.25
12	México	Mérida	390,736	7,748,676	513,619	994.25
13	México	Tuxtla Gutiérrez	284,866	7,748,676	322,334	692.38
14	Villahermosa	México	274,153	379,377	7,679,090	678.19
15	Tuxtla Gutiérrez	México	272,645	312,322	7,679,090	692.38
16	México	Villahermosa	268,081	7,748,676	366,065	678.19
17	Toluca	Monterrey	261,777	1,559,003	2,621,672	712.35
18	Guadalajara	Monterrey	258,075	2,485,294	2,621,672	664.69
19	México	Veracruz	254,296	7,748,676	414,438	305.43
20	Veracruz	México	253,288	415,843	7,679,090	305.43
21	Monterrey	Toluca	251,093	2,582,510	1,504,111	712.35
22	Monterrey	Guadalajara	243,056	2,582,510	2,359,513	664.69
23	Acapulco	México	240,184	348,826	7,679,090	304.41
24	Toluca	Cancún	235,734	1,559,003	1,286,023	1,334.31
25	México	Acapulco	234,010	7,748,676	349,426	304.41
26	Cancún	Toluca	231,166	1,350,487	1,504,111	1,334.31
27	Puerto Vallarta	México	224,434	373,168	7,679,090	657.53
28	México	Hermosillo	217,415	7,748,676	570,986	1,610.32
29	México	Puerto Vallarta	216,791	7,748,676	365,189	657.53
30	Guadalajara	Toluca	196,767	2,485,294	1,504,111	412.09
31	Toluca	Guadalajara	195,420	1,559,003	2,359,513	412.09
32	Oaxaca	México	182,221	213,363	7,679,090	366.59
33	México	Oaxaca	171,076	7,748,676	201,662	366.59
34	Cancún	Monterrey	170,083	1,350,487	2,621,672	1,442.20
35	Monterrey	Cancún	167,061	2,582,510	1,286,023	1,442.20
36	México	San José del Cabo	167,012	7,748,676	336,341	1,172.59

No.	Arco		Pasajeros en el arco	Pasajeros generados (origen)	Pasajeros atraídos (destino)	Distancia en km
	Origen	Destino				
37	Toluca	Tijuana	164,519	1,559,003	2,325,480	2,266.59
38	San José del Cabo	México	163,984	338,091	7,679,090	1,172.59
39	México	Ciudad Juárez	162,815	7,748,676	433,701	1,537.82
40	Hermosillo	México	160,694	492,707	7,679,090	1,610.32
41	Culiacán	Tijuana	160,527	524,443	2,325,480	1,266.31
42	Del Bajío	Tijuana	150,241	365,969	2,325,480	1,995.86
43	Tijuana	Culiacán	149,959	2,063,753	511,992	1,266.31
44	Culiacán	México	149,477	524,443	7,679,090	1,042.61
45	México	Mexicali	148,813	7,748,676	277,253	2,170.34
46	México	Culiacán	148,318	7,748,676	511,992	1,042.61
47	México	Chihuahua	147,800	7,748,676	375,007	1,236.44
48	Tijuana	Toluca	145,572	2,063,753	1,504,111	2,266.59
49	Chihuahua	México	144,538	371,309	7,679,090	1,236.44
50	México	Tampico	143,930	7,748,676	243,881	340.88
51	México	Torreón	143,078	7,748,676	211,025	808.96
52	Torreón	México	141,865	210,768	7,679,090	808.96
53	Tampico	México	141,692	241,987	7,679,090	340.88
54	Morelia	Tijuana	134,965	190,372	2,325,480	2,117.31
55	Ciudad Juárez	México	132,351	379,089	7,679,090	1,537.82
56	Del Bajío	México	128,116	365,969	7,679,090	303.24
57	México	Del Bajío	125,936	7,748,676	331,909	303.24
58	Tijuana	Del Bajío	120,314	2,063,753	331,909	1,995.86
59	Mexicali	México	119,906	222,526	7,679,090	2,170.34
60	Zihuatanejo	México	116,282	150,620	7,679,090	322.02
61	Monterrey	Ciudad Juárez	116,229	2,582,510	433,701	897.75
62	México	Zihuatanejo	111,028	7,748,676	145,074	322.02
63	Tapachula	México	105,732	105,732	7,679,090	880.52
64	Bahías de Huatulco	México	105,455	105,455	7,679,090	505.81
65	Tijuana	Morelia	105,331	2,063,753	158,373	2,117.31
66	Guadalajara	Mexicali	102,914	2,485,294	277,253	1,785.88
67	México	Aguascalientes	101,765	7,748,676	142,706	419.19
68	Monterrey	Heramosillo	100,604	2,582,510	570,986	1,138.57
69	Aguascalientes	México	100,510	149,954	7,679,090	419.19
70	Ciudad Juárez	Monterrey	99,660	379,089	2,621,672	897.75
71	Mazatlán	México	98,068	121,582	7,679,090	847.75
72	México	Bahías de Huatulco	97,248	7,748,676	97,248	505.81
73	México	Mazatlán	96,236	7,748,676	120,275	847.75
74	Toluca	San José del Cabo	93,202	1,559,003	336,341	1,130.43
75	Heramosillo	Monterrey	92,679	492,707	2,621,672	1,138.57
76	México	Tapachula	92,586	7,748,676	92,586	880.52
77	Minatitlán	México	89,669	89,669	7,679,090	495.94
78	San José del Cabo	Toluca	89,372	338,091	1,504,111	1,130.43
79	Ciudad del Carmen	México	89,059	123,550	7,679,090	769.53

Arco			Pasajeros en el arco	Pasajeros generados (origen)	Pasajeros atraídos (destino)	Distancia en km
No.	Origen	Destino				
80	México	Minatitlán	88,941	7,748,676	88,941	495.94
81	Hermosillo	Tijuana	88,892	492,707	2,325,480	686.79
82	Del Bajío	Monterrey	87,612	365,969	2,621,672	545.35
83	Veracruz	Monterrey	86,731	415,843	2,621,672	833.91
84	Monterrey	Veracruz	86,182	2,582,510	414,438	833.91
85	México	Ciudad del Carmen	85,847	7,748,676	113,767	769.53
86	Monterrey	Del Bajío	85,659	2,582,510	331,909	545.35
87	Puerto Vallarta	Guadalajara	84,707	373,168	2,359,513	202.28
88	Chihuahua	Monterrey	83,774	371,309	2,621,672	662.28
89	Guadalajara	Puerto Vallarta	82,485	2,485,294	365,189	202.28
90	Monterrey	Chihuahua	82,402	2,582,510	375,007	662.28
91	Mexicali	Guadalajara	81,370	222,526	2,359,513	1,785.88
92	Monterrey	Tijuana	80,250	2,582,510	2,325,480	1,802.86
93	México	Reynosa	79,122	7,748,676	79,122	729.89
94	Tijuana	Monterrey	77,722	2,063,753	2,621,672	1,802.86
95	Tijuana	Hermosillo	77,641	2,063,753	570,986	686.79
96	Guadalajara	Hermosillo	76,528	2,485,294	570,986	1,224.31
97	Guadalajara	La Paz	75,163	2,485,294	226,800	821.79
98	Monterrey	Culiacán	75,104	2,582,510	511,992	746.80
99	La Paz	Guadalajara	74,236	243,805	2,359,513	821.79
100	La Paz	México	73,864	243,805	7,679,090	1,268.15
101	Culiacán	Monterrey	72,190	524,443	2,621,672	746.80
102	Toluca	Hermosillo	70,381	1,559,003	570,986	1,581.92
103	Reynosa	México	70,284	70,284	7,679,090	729.89
104	México	La Paz	70,145	7,748,676	226,800	1,268.15
105	La Paz	Tijuana	69,933	243,805	2,325,480	1,140.26
106	San Luis Potosí	México	69,336	69,336	7,679,090	364.94
107	México	San Luis Potosí	69,040	7,748,676	69,040	364.94
108	Hermosillo	Guadalajara	68,952	492,707	2,359,513	1,224.31
109	México	Durango	64,865	7,748,676	93,687	762.44
110	Toluca	Ciudad Juárez	64,248	1,559,003	433,701	1,525.34
111	Uruapan	Tijuana	64,017	64,017	2,325,480	2,077.17
112	Durango	México	63,519	94,300	7,679,090	762.44
113	Tijuana	Uruapan	62,120	2,063,753	62,120	2,077.17
114	Guadalajara	Culiacán	60,363	2,485,294	511,992	632.27
115	Culiacán	Guadalajara	60,291	524,443	2,359,513	632.27
116	Zacatecas	México	60,071	96,051	7,679,090	533.30
117	México	Zacatecas	59,021	7,748,676	87,877	533.30
118	Acapulco	Toluca	58,460	348,826	1,504,111	285.69
119	Ciudad Juárez	Toluca	58,276	379,089	1,504,111	1,525.34
120	Toluca	Mérida	56,811	1,559,003	513,619	1,046.07
121	Toluca	Acapulco	56,677	1,559,003	349,426	285.69
122	Mérida	Toluca	56,660	519,267	1,504,111	1,046.07

Arco			Pasajeros en el arco	Pasajeros generados (origen)	Pasajeros atraídos (destino)	Distancia en km
No.	Origen	Destino				
123	Hermosillo	Toluca	56,523	492,707	1,504,111	1,581.92
124	Toluca	Chihuahua	55,729	1,559,003	375,007	1,219.11
125	Querétaro	Monterrey	55,541	55,541	2,621,672	567.75
126	Guadalajara	Cancún	55,522	2,485,294	1,286,023	1,703.92
127	Monterrey	Querétaro	55,173	2,582,510	55,173	567.75
128	Tijuana	La Paz	54,953	2,063,753	226,800	1,140.26
129	Tampico	Monterrey	53,840	241,987	2,621,672	446.01
130	Chihuahua	Toluca	53,575	371,309	1,504,111	1,219.11
131	San José del Cabo	Guadalajara	51,855	338,091	2,359,513	720.42
132	Monterrey	Tampico	50,687	2,582,510	243,881	446.01
133	Villahermosa	Monterrey	50,531	379,377	2,621,672	1,138.84
134	Guadalajara	San José del Cabo	49,891	2,485,294	336,341	720.42
135	Cancún	Guadalajara	49,452	1,350,487	2,359,513	1,703.92
136	Aguascalientes	Tijuana	49,444	149,954	2,325,480	1,879.00
137	Toluca	Tampico	49,264	1,559,003	243,881	372.33
138	Chetumal	México	49,130	49,130	7,679,090	1,135.90
139	Veracruz	Toluca	48,726	415,843	1,504,111	355.17
140	México	Chetumal	48,189	7,748,676	48,189	1,135.90
141	Toluca	Veracruz	47,890	1,559,003	414,438	355.17
142	Monterrey	Villahermosa	47,016	2,582,510	366,065	1,138.84
143	Manzanillo	México	46,496	46,496	7,679,090	551.44
144	Tampico	Toluca	46,455	241,987	1,504,111	372.33
145	México	Saltillo	46,334	7,748,676	46,334	700.16
146	Saltillo	México	45,498	45,498	7,679,090	700.16
147	Tijuana	Puebla	45,438	2,063,753	121,780	2,371.39
148	Mérida	Monterrey	45,220	519,267	2,621,672	1,187.96
149	México	Manzanillo	44,830	7,748,676	44,830	551.44
150	Puebla	Tijuana	44,647	121,585	2,325,480	2,371.39
151	Guadalajara	Torreón	43,470	2,485,294	211,025	557.74
152	Los Mochis	Tijuana	41,613	107,060	2,325,480	1,081.20
153	Chihuahua	Ciudad Juárez	41,337	371,309	433,701	332.11
154	Tijuana	Aguascalientes	40,941	2,063,753	142,706	1,879.00
155	Torreón	Guadalajara	40,216	210,768	2,359,513	557.74
156	México	Nuevo Laredo	40,185	7,748,676	40,185	884.25
157	Tuxtla Gutiérrez	Toluca	39,677	312,322	1,504,111	734.74
158	Guadalajara	Los Mochis	39,159	2,485,294	102,634	817.92
159	Puebla	Monterrey	39,025	121,585	2,621,672	750.80
160	Monterrey	Mérida	38,948	2,582,510	513,619	1,187.96
161	Monterrey	Puebla	38,321	2,582,510	121,780	750.80
162	Guadalajara	Puebla	38,021	2,485,294	121,780	536.92
163	Puebla	Guadalajara	37,913	121,585	2,359,513	536.92
164	México	Ciudad Obregón	37,789	7,748,676	37,789	1,400.76
165	Monterrey	Puerto Vallarta	37,746	2,582,510	365,189	767.92

Arco			Pasajeros en el arco	Pasajeros generados (origen)	Pasajeros atraídos (destino)	Distancia en km
No.	Origen	Destino				
166	Ciudad Obregón	México	37,602	37,602	7,679,090	1,400.76
167	Campeche	México	37,524	37,524	7,679,090	896.65
168	Toluca	Tuxtla Gutiérrez	37,468	1,559,003	322,334	734.74
169	México	Campeche	37,282	7,748,676	37,282	896.65
170	Puerto Vallarta	Monterrey	36,888	373,168	2,621,672	767.92
171	Zacatecas	Tijuana	35,980	96,051	2,325,480	1,764.26
172	Ciudad Juárez	Chihuahua	34,560	379,089	375,007	332.11
173	Ciudad del Carmen	Toluca	34,491	123,550	1,504,111	819.19
174	Zihuatanejo	Toluca	34,338	150,620	1,504,111	276.49
175	Los Mochis	Guadalajara	34,292	107,060	2,359,513	817.92
176	Toluca	Zihuatanejo	34,046	1,559,003	145,074	276.49
177	Colima	Tijuana	33,783	66,947	2,325,480	1,983.40
178	Nuevo Laredo	México	33,775	33,775	7,679,090	884.25
179	Tijuana	Colima	33,760	2,063,753	66,390	1,983.40
180	Tepic	Tijuana	33,687	54,311	2,325,480	1,718.45
181	Tijuana	Los Mochis	33,278	2,063,753	102,634	1,081.20
182	Colima	México	33,164	66,947	7,679,090	471.16
183	Morelia	Monterrey	33,090	190,372	2,621,672	659.89
184	San José del Cabo	Tijuana	32,880	338,091	2,325,480	1,260.30
185	México	Colima	32,630	7,748,676	66,390	471.16
186	Tijuana	Tepic	31,979	2,063,753	52,411	1,718.45
187	Los Mochis	México	31,155	107,060	7,679,090	1,232.81
188	Oaxaca	Tijuana	31,142	213,363	2,325,480	2,661.81
189	Durango	Tijuana	30,781	94,300	2,325,480	1,533.82
190	Monterrey	Morelia	30,720	2,582,510	158,373	659.89
191	Tijuana	Oaxaca	30,586	2,063,753	201,662	2,661.81
192	Tijuana	Acapulco	30,325	2,063,753	349,426	2,458.27
193	México	Los Mochis	30,197	7,748,676	102,634	1,232.81
194	Cuernavaca	Monterrey	29,921	52,481	2,621,672	770.29
195	Monterrey	Cuernavaca	29,279	2,582,510	50,866	770.29
196	Ciudad Juárez	Tijuana	29,136	379,089	2,325,480	1,006.26
197	Tijuana	Zacatecas	28,856	2,063,753	87,877	1,764.26
198	Tijuana	Durango	28,822	2,063,753	93,687	1,533.82
199	Torreón	Chihuahua	28,687	210,768	375,007	427.62
200	Culiacán	Hermosillo	28,417	524,443	570,986	594.59
201	Monterrey	Acapulco	28,414	2,582,510	349,426	995.88
202	Acapulco	Tijuana	28,303	348,826	2,325,480	2,458.27
203	Toluca	Puerto Vallarta	28,167	1,559,003	365,189	611.17
204	Toluca	Ciudad del Carmen	27,920	1,559,003	113,767	819.19
205	Tijuana	Ciudad Juárez	27,808	2,063,753	433,701	1,006.26
206	Villahermosa	Toluca	27,569	379,377	1,504,111	725.66
207	Toluca	Culiacán	27,509	1,559,003	511,992	1,008.79
208	Puerto Vallarta	Toluca	27,139	373,168	1,504,111	611.17

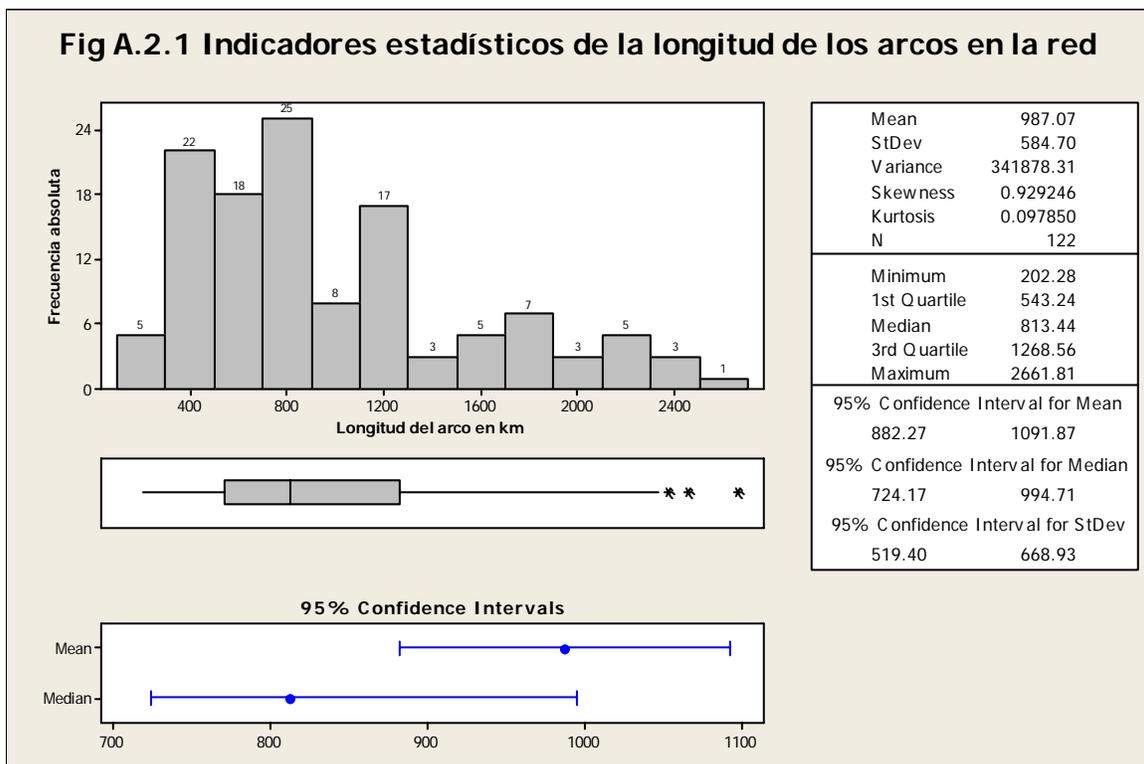
Arco			Pasajeros en el arco	Pasajeros generados (origen)	Pasajeros atraídos (destino)	Distancia en km
No.	Origen	Destino				
209	Villahermosa	Mérida	27,124	379,377	513,619	462.55
210	Veracruz	Guadalajara	27,098	415,843	2,359,513	759.24
211	Culiacán	Toluca	27,002	524,443	1,504,111	1,008.79
212	Toluca	Villahermosa	26,715	1,559,003	366,065	725.66
213	Culiacán	La Paz	26,539	524,443	226,800	301.12
214	Tijuana	San José del Cabo	26,236	2,063,753	336,341	1,260.30
215	Guadalajara	Veracruz	26,070	2,485,294	414,438	759.24
216	Guadalajara	Chihuahua	25,829	2,485,294	375,007	940.90
217	La Paz	Culiacán	25,772	243,805	511,992	301.12
218	Cozumel	México	25,665	25,665	7,679,090	1,272.40
219	México	Cozumel	25,528	7,748,676	25,528	1,272.40
220	Toluca	Mexicali	25,526	1,559,003	277,253	2,143.01
221	México	Ciudad Victoria	25,200	7,748,676	25,200	471.14
222	Ciudad Juárez	Guadalajara	25,106	379,089	2,359,513	1,269.78
223	Puerto Escondido	México	24,989	24,989	7,679,090	446.83
224	Hermosillo	Culiacán	24,967	492,707	511,992	594.59
225	Ciudad Victoria	México	24,787	24,787	7,679,090	471.14
226	Chihuahua	Torreón	24,477	371,309	211,025	427.62
227	Mérida	Villahermosa	24,253	519,267	366,065	462.55
228	México	Matamoros	24,084	7,748,676	24,084	716.12
229	Guadalajara	Mazatlán	24,039	2,485,294	120,275	420.52
230	Chihuahua	Guadalajara	23,608	371,309	2,359,513	940.90
231	Mazatlán	Guadalajara	23,514	121,582	2,359,513	420.52
232	Cuernavaca	Tijuana	22,560	52,481	2,325,480	2,327.91
233	México	Morelia	22,322	7,748,676	158,373	208.19
234	Morelia	México	22,317	190,372	7,679,090	208.19
235	Acapulco	Monterrey	21,879	348,826	2,621,672	995.88
236	Tijuana	Cuernavaca	21,587	2,063,753	50,866	2,327.91
237	Guadalajara	Ciudad Juárez	21,264	2,485,294	433,701	1,269.78
238	Mexicali	Toluca	21,250	222,526	1,504,111	2,143.01
239	Poza Rica	México	20,656	20,656	7,679,090	212.84
240	Tepic	México	20,624	54,311	7,679,090	637.55
241	México	Poza Rica	20,613	7,748,676	20,613	212.84
242	Matamoros	México	20,587	20,587	7,679,090	716.12
243	México	Puerto Escondido	20,518	7,748,676	20,518	446.83
244	México	Tepic	20,432	7,748,676	52,411	637.55

Fuente: Elaboración propia con información de la DGAC (2008)

Anexo 2 Análisis estadístico de la longitud de los arcos y de la longitud de viaje en la red

Algunas características de la red de servicios regulares de transporte aéreo de pasajeros en México que pueden resultar de interés, se obtienen del análisis estadístico de la longitud de los arcos que la integran, y que a la vez funcionan como elemento de interconexión de los nodos.

La longitud de los arcos está directamente relacionada con la localización geográfica de las ciudades mexicanas, con la geografía económica del país, y con las características (atributos de calidad) del sistema de transporte aéreo.



La fig A.2.1 muestra un resumen de los principales indicadores estadísticos de la longitud de los arcos de la red de servicios regulares de transporte aéreo de pasajeros en México, para el año 2007.

El histograma de frecuencias absolutas permite observar que la mayoría de los arcos tiene una longitud menor a 1,200 km, pero mayor a 300 km, lo cual se puede corroborar con los cuartiles de la distribución de frecuencias.

El hecho de que los arcos menores a 300 km sean la excepción (sólo cinco casos¹⁴) se explica por los atributos tecnológicos y económicos del modo de transporte aéreo, más apto para viajes en distancias largas, y los de su competidor más cercano: el autotransporte, que tiene claras ventajas comparativas en distancias cortas.

La media de la longitud de los arcos de la red es de 987.07 km, y la desviación estándar respecto a este valor es 585.7 km, misma que sugiere una dispersión considerable. Dichos indicadores están más relacionados con características morfológicas de la red de transporte, que con sus características operativas o económicas.

Un segundo indicador, que reviste un claro interés operativo, es la longitud promedio de los viajes (movimientos) que se realizan en la red. Este indicador no sólo depende de la longitud de los arcos, sino también de la cantidad de viajes que se realizan en ellos.

Este valor se puede calcular mediante el promedio de la longitud de los arcos, pero ponderado en función de la intensidad de uso, usando la siguiente expresión:

$$\bar{d}_p = \sum_{i=1}^n f_i \cdot d_i$$

Con:

$$f_i = \frac{I_i}{\sum_{i=1}^n I_i}$$

Donde:

\bar{d}_p = promedio de la longitud de los arcos en la red, ponderado en función de la intensidad de flujo de carga (distancia de viaje promedio).

f_i = frecuencia relativa de la intensidad de flujo de carga en el arco i ésimo.

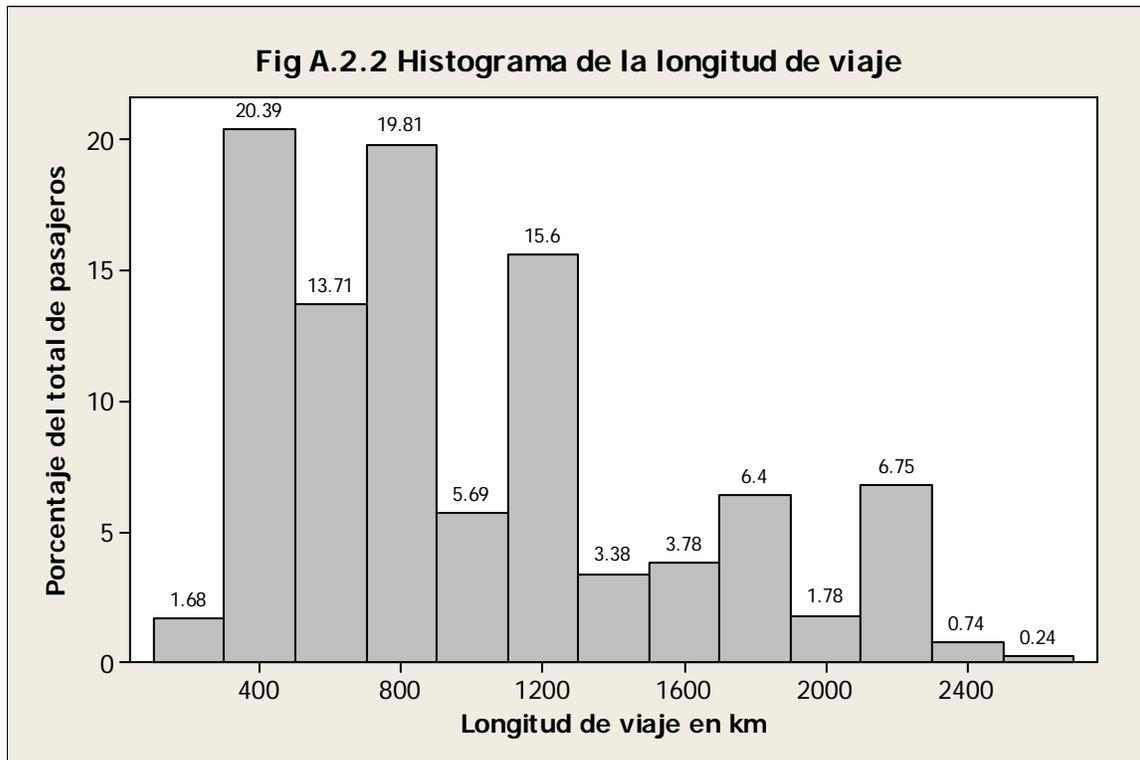
d_i = longitud del arco i ésimo

I_i = intensidad de flujo de carga en el arco i ésimo

¹⁴ Estos cinco casos son: Guadalajara – Puerto Vallarta (202 km); México – Morelia (208 km); México – Poza Rica (212 km); Toluca – Zihuatanejo (276 km); y Toluca – Acapulco (285 km) (ver Anexo 1). Un caso especial es el arco La Paz – Culiacán, de 301 km, que se ubica sobre el golfo de Cortés.

$n =$ número de datos

La diferencia fundamental entre el promedio simple y el ponderado, es que el primero sólo considera el valor de cada uno de los datos *diferentes* que aparecen en una población o muestra; en cambio, el promedio ponderado toma en cuenta el *número de veces* que se presenta cada uno de los diferentes datos; de tal manera que los que se repiten con mayor frecuencia, tienen una participación mayor en la formación del promedio, mismo que va en función de esa frecuencia de aparición.



En nuestro caso, que es el de los servicios de transporte aéreo de pasajeros que se realizaron en México en 2007, la longitud promedio de los viajes fue de 1,008.04 km; que como se puede notar, es un poco mayor que el promedio aritmético simple. La razón de la diferencia estriba en que algunos arcos grandes son utilizados con una frecuencia importante, lo cual se puede apreciar en la fig A.2.2.

La figura A.2.2 muestra la distribución de frecuencias de la longitud de viaje en función de los pasajeros transportados. En el histograma, se mantuvo el mismo rango de los intervalos en 200 km, para permitir la comparación con el caso anterior; y se puede notar que los intervalos que corresponden a las longitudes de 1,200; 1,800; y 2,200 km, tienen frecuencias relativamente altas.

Cada una de las columnas destacadas en el histograma, incluye uno o más de los arcos más importantes en el sistema; así, el intervalo de los 400 km (que comprende de

300 a 500 km), tiene los arcos México – Guadalajara; México – Veracruz; y México – Acapulco; la columna de los 800 km incluye los enlaces México – Monterrey (el más importante en el sistema), y Toluca – Monterrey; la columna de los 1,200 km incluye el arco México – Cancún; la columna de los 1,800 km el arco Guadalajara – Tijuana; y finalmente, la columna de los 2,200 km el enlace México – Tijuana.

Anexo 3 Comentarios finales acerca de la longitud de viaje en el transporte aéreo de pasajeros en México y sus implicaciones en la modelación gravitacional de la movilidad¹⁵

La longitud de los viajes efectuados por los usuarios de un modo de transporte depende de la localización relativa de los orígenes y destinos; pero también de otros factores que pueden ser importantes, como el costo, tiempo de recorrido, capacidad, accesibilidad, y en gran medida de la disponibilidad de otros modos opcionales de transporte.

En este Anexo se ofrecen algunos comentarios sobre la relación que existe entre la longitud de viaje y la competitividad económico – espacial del transporte aéreo frente al autotransporte, y sobre los efectos del comportamiento característico de la demanda de servicios de transporte aéreo en la modelación espacial de la movilidad de los pasajeros.

Competitividad del transporte aéreo en función de la longitud del viaje

En los datos analizados y que fueron presentados en la publicación, no se tiene registros de servicios de transporte aéreo de pasajeros que se hayan ofrecido para longitudes de viaje inferiores a 200 km; de hecho, la gran mayoría de los movimientos (90%) corresponden a distancias mayores a 350 km. Lo anterior no significa que no haya usuarios que contraten servicios de transporte aéreo para distancias de viaje cortas, sino que el número de éstos resulta insignificante en comparación con los volúmenes de demanda de los servicios regulares, que son los analizados en el estudio.

La escasez de demanda de servicios de transporte aéreo para cubrir distancias menores a 200 km, evidencia la disponibilidad en este mercado de un modo de transporte alternativo, el autotransporte, que tiene cualidades económicas y operativas que resultan insuperables para el transporte aéreo en este rango de distancias.

¹⁵ Este anexo está basado en un breve artículo que fue escrito poco tiempo después de la conclusión de la publicación técnica; se incluye debido a que, en opinión del autor, su lectura aporta elementos útiles para la discusión del contenido de la misma.

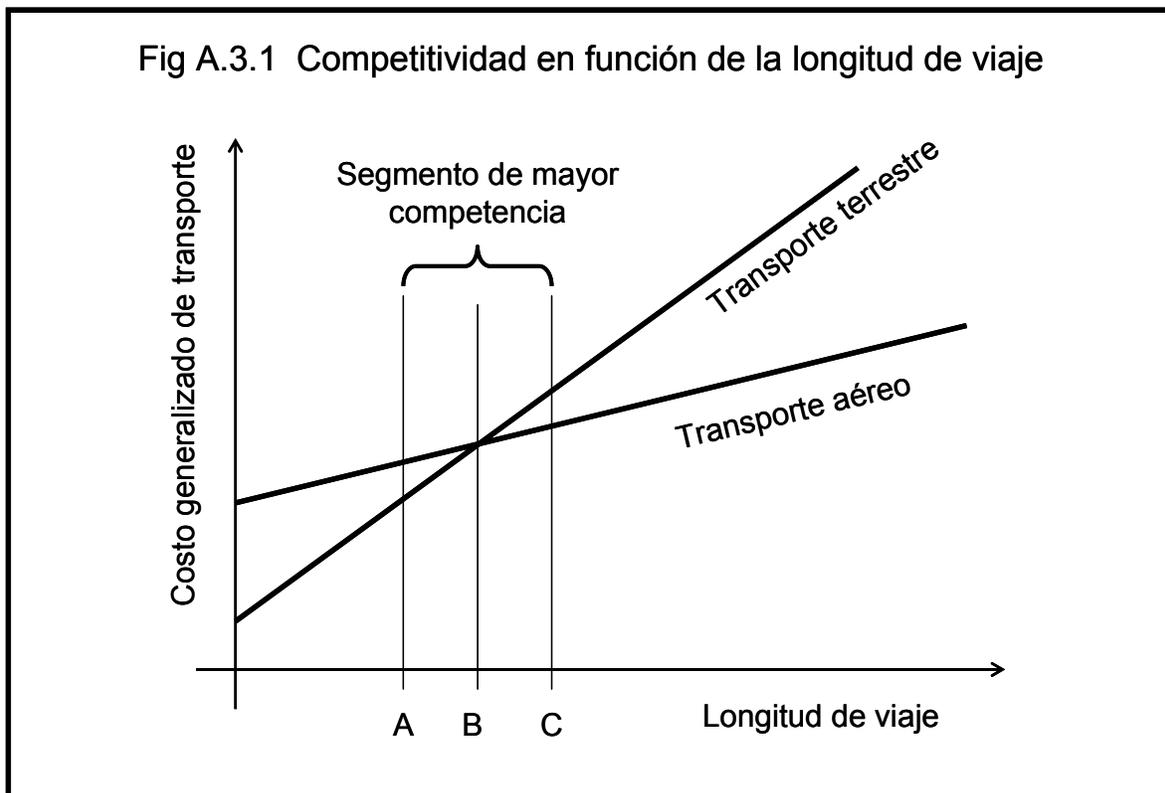
La competencia entre los dos modos de transporte se presenta esencialmente en términos de tiempos y costos, aunque también aspectos como la seguridad y la confiabilidad tienen cierto peso en la decisión de los usuarios.

Los tiempos y costos asociados con cada uno de estos modos de transporte varían de manera diferente en función de la longitud del recorrido, lo cual provoca que en los valores extremos de esta variable, cada uno tenga claras ventajas competitivas sobre el otro, y resulten, en consecuencia, complementarios

En las distancias cortas el autotransporte tiene ventajas sobre el transporte aéreo por sus bajas tarifas, consecuencia de la inexistencia de costos de capital significativos, y de que no requiere de actividades complementarias que consuman mucho tiempo a los usuarios. En cambio, para recorridos largos estas ventajas disminuyen debido a que los costos y riesgos se incrementan, y sobretodo porque su velocidad de operación exige tiempos de recorrido muy grandes, en comparación con los ofrecidos por las aeronaves.

Por su parte el transporte aéreo tiene costos de capital y de operación significativos que encarecen los costos, lo cual, sumado a los tiempos adicionales requeridos para documentar y complementar los viajes, provoca que su utilidad comience a manifestarse, sólo después de un cierto umbral de equilibrio con el autotransporte.

La Fig A.3.1 presenta dos curvas de costo que muestran esquemáticamente el comportamiento de esta variable para el transporte aéreo y el autotransporte, en



función de la longitud de viaje. En cada una de las líneas la ordenada al origen representa los costos fijos, es decir los costos que son independientes de la distancia recorrida, y la pendiente refleja la tasa de crecimiento del costo en función de la distancia recorrida.

En la citada Fig A.3.1 se puede apreciar que, debido a las características económicas y operativas de estos modos de transporte, para longitudes de viaje inferiores a un cierto punto de equilibrio, señalado con la letra B, el autotransporte resulta más conveniente (menos costoso) para los usuarios; en cambio, para longitudes de viaje mayores a esa distancia, el aerotransporte les ofrece mayores utilidades. El ahorro para el usuario, en cada longitud de viaje, se puede estimar mediante la diferencia de las ordenadas sobre las curvas de costo.

Evidentemente, en el segmento de distancias de viaje aledañas al punto de equilibrio se presenta la zona de mayor competencia entre los dos modos, es decir la zona donde sus competitividades son similares; sin embargo, es importante señalar que en los segmentos anterior y posterior a la zona de competencia, estos modos se vuelven complementarios, dado que permiten la satisfacción de las necesidades de movilidad bajo las condiciones más favorables de tiempo y costo.

Implicaciones para la modelación gravitacional de la movilidad

En el estudio de la movilidad de personas y carga es común la utilización del paradigma gravitacional para modelar las interrelaciones presentes entre los orígenes y destinos de los viajes y estimar la intensidad del transporte que tiene lugar entre dos puntos del espacio geográfico.

Los modelos gravitacionales se fundamentan en la idea de que la intensidad de flujo entre dos localidades es una variable directamente proporcional a la importancia relativa de las localidades, e inversamente proporcional al esfuerzo necesario para desplazarse entre ellas. Esto significa que entre más importantes sean las localidades conectadas, mayor será la intensidad de transporte entre ellas; y que entre mayor sea la dificultad para trasladarse entre ellas, menor será la intensidad de transporte.

El esfuerzo requerido para superar el espacio geográfico se ha estimado tradicionalmente mediante la distancia física que las separa (longitud del viaje), suponiendo implícitamente que hay una relación directamente proporcional entre esfuerzo y distancia, y que el espacio geográfico es homogéneo en términos de accesibilidad, misma que es definida en gran medida por los sistemas de transporte.

Otras variables utilizadas frecuentemente para estimar el esfuerzo son el costo de transporte, el tiempo de viaje, el consumo de combustible, etcétera; también es común agrupar combinaciones de variables como éstas en lo que se denomina la función de

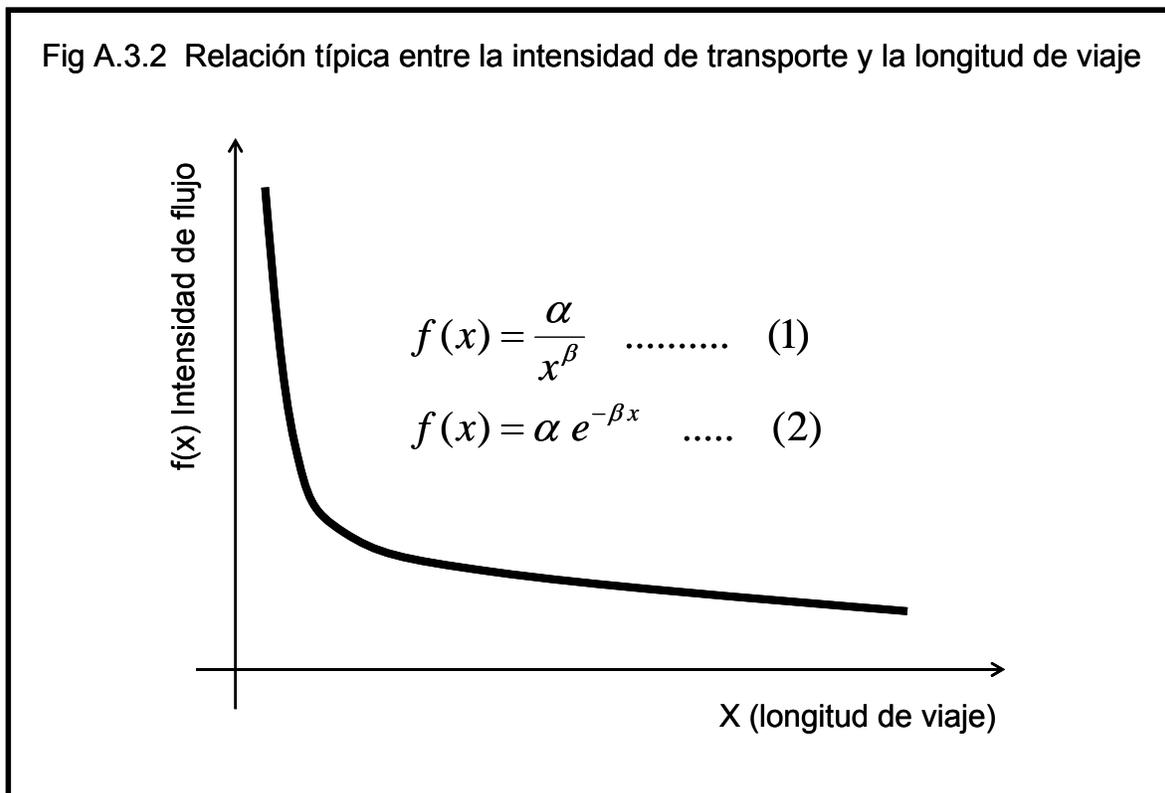
costo generalizado de transporte, que es una función de utilidad negativa que en cierta forma se puede interpretar como la distancia económica entre dos localidades.

La relación entre movilidad y la variable que mide la disuasión ejercida por la separación física, se suele llamar “función de impedancia” y puede tomar diversas formas algebraicas, como la del recíproco de la potencia cuadrática, en el caso clásico newtoniano, o exponencial negativa.

La Fig A.3.2 muestra la relación entre intensidad de transporte y longitud de viaje, o distancia recorrida, que se considera típica, o paradigmática, en los modelos de interacción espacial. El principio económico detrás de la relación es que la distancia recorrida implica consumo de recursos, y que a mayores recursos requeridos la demanda de transporte es menor, considerando el principio de escasez.

En la Fig A.3.2 es conveniente observar que los mayores valores de la intensidad de flujo de transporte corresponden a los menores valores de la longitud del viaje y viceversa. Por esta razón, cuando la función de impedancia es linearizada, por medio de una transformación logarítmica, la correlación de ambas variables suele ser alta, aunque con signo negativo.

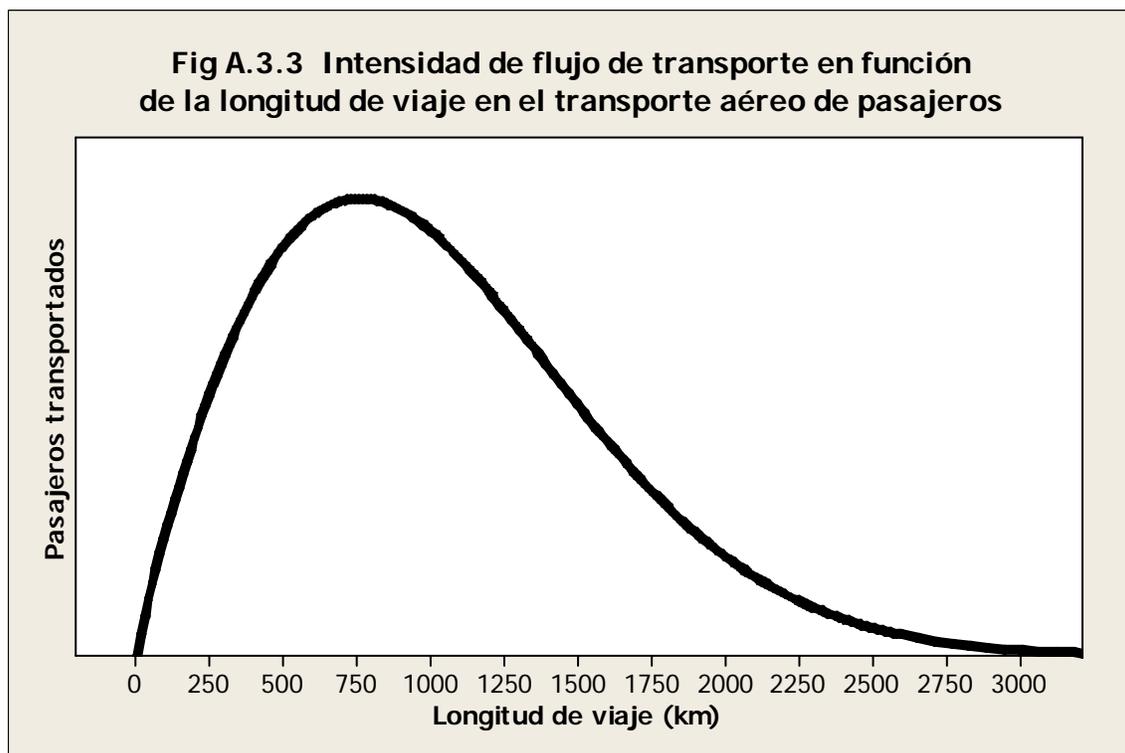
La relación señalada en la Fig A.3.2 es válida para la mayoría de los modos de transporte, especialmente para aquellos que operan en el medio terrestre; sin embargo, como se señaló en la sección anterior, está relación no es válida para el transporte



aéreo, especialmente en la parte que corresponde a los menores valores de la longitud de viaje, donde los valores de la intensidad de flujo también son pequeños, como se puede ver esquemáticamente en la Fig A.3.3. La gráfica mostrada en esta figura fue calculada a partir de un histograma de frecuencias similar al presentado en el anexo 2.

En la Fig A.3.3 se puede observar que a valores pequeños de la longitud de viaje le corresponden valores también pequeños de la intensidad de flujo de transporte y que esta situación es similar también para los valores más grandes de la variable independiente. Este comportamiento provoca que la transformación logarítmica de la función tenga una correlación lineal muy baja entre las dos variables, dado que la dispersión de los datos no tiene una tendencia lineal. Una consecuencia importante de tal comportamiento es que cuando la variable distancia es utilizada como variable independiente en un modelo de regresión lineal, su aportación para explicar el comportamiento de la variable dependiente es casi nula (puesto que hay valores contradictorios) y su coeficiente toma un valor muy cercano a cero.

Esta situación se ha encontrado en varias investigaciones realizadas en el IMT sobre el transporte aéreo de carga y pasajeros (Rico, 2001, 2008; Gradilla y Rico, 2005), en las que han sido calibrados modelos gravitacionales mediante funciones de regresión lineal múltiple y en las que repetidamente se ha encontrado que la distancia de viaje resulta con un coeficiente cuyo valor es muy cercano a cero, no así las variables que miden la importancia relativa de los orígenes y destinos, cuyo comportamiento se ha encontrado bastante satisfactorio.



Con base en estos hallazgos parece lógico descartar el uso de la longitud de viaje como una variable útil para modelar el efecto de la impedancia en los modelos de transporte; sin embargo, una hipótesis de trabajo surge de la posibilidad de dividir la modelación en dos partes, divididas por el punto donde la frecuencia de viajes es máxima, lo cual se presenta alrededor de los 750 km (ver Fig A.3.3). De esta manera, para distancias mayores a este valor la distancia tiene un claro efecto de disuasión de los viajes y un comportamiento “convencional”, mientras que para los valores menores a este valor la distancia tiene un efecto promotor de los viajes con una correlación lineal positiva con la intensidad de flujo de transporte.

Conclusiones

La longitud de los viajes efectuados por los usuarios de un modo de transporte depende de la localización relativa de los orígenes y destinos; pero también de otros factores que pueden ser importantes, como el costo, tiempo de recorrido, capacidad, accesibilidad, y en gran medida de la disponibilidad de otros modos opcionales de transporte. En este sentido, el análisis de la longitud de los movimientos en un sistema de transporte puede aportar conocimiento útil para el estudio económico y geográfico de una región o país, así como de las actividades de transporte asociadas.

Los servicios regulares de transporte aéreo de pasajeros en México se ofrecen en un rango de longitudes de viaje que van desde 200 km, para los casos más pequeños, hasta valores cercanos a los 3,000 km en el extremo superior, la distancia promedio de viaje tiene un valor muy cercano a los 1,000 km.

En México, el 90 % de los servicios de transporte aéreo de pasajeros tienen longitudes de viaje mayores a 350 km. Esta situación evidencia que el autotransporte tiene cualidades económicas y operativas que resultan insuperables para el transporte aéreo, en distancias menores a 200 km. La competencia entre estos dos modos de transporte se presenta esencialmente en términos de tiempos y costos, aunque también aspectos como la seguridad y la confiabilidad tienen cierto peso en la decisión de los usuarios.

En las distancias cortas, el autotransporte tiene ventajas sobre el transporte aéreo por sus bajas tarifas y porque no requiere de actividades complementarias que consuman mucho tiempo a los usuarios. En cambio, para recorridos largos estas ventajas disminuyen, debido a que los costos y riesgos se incrementan, y sobretodo porque su velocidad de operación exige tiempos de recorrido muy grandes, en comparación con los ofrecidos por las aeronaves. En conclusión, se puede afirmar que en los valores extremos de la longitud de viaje estos dos modos resultan más complementarios que sustitutos y que la zona de competencia económica se presenta cerca del punto de equilibrio.

En el caso del transporte aéreo, el comportamiento de la intensidad de flujo de transporte en función de la longitud de viaje no muestra un comportamiento convencional, de tal manera que se presentan valores pequeños de intensidad de flujo

tanto para valores pequeños, como para valores grandes de la longitud de viaje. Dicha peculiaridad imposibilita el uso de la longitud de viaje como una variable explicativa en modelos de regresión lineal múltiple, incluidos los modelos gravitacionales, puesto que las variables muestran una correlación lineal muy baja.

No obstante lo anterior, en vez de descartarse el uso de la distancia de viaje en la modelación matemática del transporte aéreo, una hipótesis de trabajo sugiere la posibilidad de dividir la modelación en dos partes, divididas por el punto donde la frecuencia de viajes es máxima, dado que para distancias mayores a este valor la distancia tiene un claro comportamiento “convencional”, mientras que para los valores menores la distancia tiene un comportamiento invertido, con una correlación lineal positiva respecto a la intensidad de flujo de transporte.



CIUDAD DE MÉXICO

Av. Nuevo León 210
Col. Hipódromo Condesa
CP 06100, México, D F
Tel +52 (55) 52 653600
Fax +52 (55) 52 653600

SANFANDILA

Carretera Querétaro-Galindo km 12+000
CP 76700, Sanfandila
Pedro Escobedo, Querétaro, México
Tel +52 (442) 216 9777
Fax +52 (442) 216 9671

www.imt.mx
publicaciones@imt.mx