

Propuesta sistémica para mejorar la red mexicana de transporte aéreo de carga

Systemic Proposal for Improving the Mexican Air Cargo Transport Network

José Luis Rodarte-Conde¹, Jorge Rojas-Ramírez², Flavio Arturo Domínguez-Pacheco³,
Rosalba Zepeda-Bautista⁴

Instituto Politécnico Nacional, MÉXICO

¹<https://orcid.org/0000-0003-3017-6675> | josel_rodarte_conde@hotmail.com

²<https://orcid.org/0000-0002-0779-1242> | jrojasr@ipn.mx

³<https://orcid.org/0000-0003-3561-7257> | fdominguezp@ipn.mx

⁴<https://orcid.org/0000-0003-0988-8619> | rzepedab@ipn.mx

Recibido 07-12-2022, aceptado 08-02-2023.

Resumen

El continuo avance tecnológico en las comunicaciones y los transportes demanda la actualización de la infraestructura existente de una red de transporte aéreo de carga, aplicando una toma de decisiones de base formal, con el fin de mostrar un desempeño elevado. Particularmente en México, esta decisión es necesaria dadas las oportunidades de nuevas sedes aeroportuarias y las necesidades de atender mayores volúmenes de carga. En este sentido, después de analizar las características de la red de transporte aéreo actual en este país, se consideran las ventajas del análisis de redes sociales en cuanto a la entrega de parámetros de centralidad, de intermediación, de densidad o de integración, entre otros, lo que le proporciona un sustento sistémico, necesario para alcanzar la mejoría buscada. A partir de simular y evaluar el sistema actual en sus parámetros significativos, de acuerdo con la estadística operacional origen-destino del servicio regular nacional, se muestra una fuerte centralización de la Ciudad de México. Se ilustra la aportación de la metodología de las redes sociales a través de comparar con una red alterna factible, que incorpora a dos aeropuertos más como distribuidores centrales, los de San Luis Potosí y de Querétaro. La simulación del caso propuesto permite la observación para evaluar los nuevos valores de los parámetros de la red y, de este modo, facilita los análisis que se requieran para sustentar las futuras decisiones, como sería la situación de la disponibilidad de una nueva estructura aeroportuaria para carga y sus flujos asociados.

Palabras clave: aeropuertos, enfoque de sistemas, redes de transporte aéreo de carga, redes sociales, simulación.

Abstract

The impressive technological advance in communications and transports demands updating the existing infrastructure of an air cargo transport network, adopting a formal decision-making process, in order to show a high performance, particularly in Mexico. This decision is necessary given the opportunities for new airport sites and the need to serve higher cargo volumes. In this sense, after analyzing the characteristics of the current air transport network in this country, the advantages of social network analysis are considered in terms of the delivery of centrality, intermediation, density or integration parameters, mainly, which provides a systemic support, necessary to achieve the desired improvement. Starting from simulating and evaluating the current system in its significant parameters, according to the operational statistics origin-destination of the national regular service, a strong centralization in Mexico City is shown. The contribution of the social networks methodology is illustrated comparing with a feasible alternative network, which incorporates two more airports as central hubs, those of San Luis Potosí and Querétaro. The simulation of the proposed case allows the visualization to evaluate the new values of the network parameters and, in this way, facilitates the required analysis to support future decisions, such as the situation of the availability of a new cargo airport structure and its associated flows.

Index terms: airports, airfreight transport networks, simulation, social networks, systems approach.

I. INTRODUCCIÓN

El manejo de mercancías entre el punto en que se originan y los puntos de su distribución, que tiene como finalidad llevar los productos a su destino final, es una parte importante de las economías. Conocidos los medios de transporte como el terrestre, el marítimo o el aéreo, se aprecia que se utilizan en proporciones distintas, obedeciendo a una diversidad de factores, entre los que se destacan los de distancia y de costo.

Lo anterior guarda también dependencia de los avances tecnológicos y de la infraestructura instalada en un entorno geográfico determinado. En los países de mayor nivel de desarrollo se recurre al transporte aéreo en mayor medida que en lugares con economías más restringidas.

Considerando el caso de los flujos internos de transporte de carga en México, la preferencia por los transportes carreteros supera en gran medida al del transporte aéreo. Es también muy notoria la centralización de los flujos de carga a través del aeropuerto de la capital y cabe plantearse si existen mejores alternativas.

Para la toma de decisiones que pretende elevar el desempeño del transporte aéreo es necesario aplicar un enfoque sistémico, abarcando los factores diversos, mediante la comparación de alternativas, para optar por aquella que muestre ser la más benéfica. Esta comparación recurre al empleo de modelos del comportamiento de la red de transporte, que incluya a las ciudades más distintivas en la distribución de los flujos. Se elige para ello el análisis de redes sociales que, con bases cuantitativas, representa diferentes estructuras con los actores de la red, conformando las alternativas más viables y permite realizar corridas de los flujos en cada caso, mediante un paquete computacional.

La experimentación con estos modelos conduce a resultados que, por la comparación de un conjunto de parámetros de desempeño, presentan un sustento formal a los tomadores de decisiones sobre las políticas de estructuración de la red de transporte aéreo. Con este objetivo, se realiza en este documento la ejemplificación del caso de decisión sobre la red aeroportuaria de México, considerando una mayor participación relativa de las ciudades cercanas.

II. MARCO CONTEXTUAL

El transporte aéreo es una actividad económica de altos beneficios para todos los participantes. El crecimiento promedio global del tráfico en el periodo de 2016 a 2019, periodo anterior a la pandemia por COVID-19, fue del 6.23% y alcanzó la cifra de 3700 millones de pasajeros transportados. Las aerolíneas a nivel mundial crecieron 8.8% y las dieciocho líneas principales reportaron ganancias por mil millones de dólares. [1], [2], [3], [4]. En lo referente a la carga, en el año 2017 se transportaron alrededor de 63 millones de toneladas, lo que significa menos del uno por ciento del comercio mundial, pero con un valor de más del 35%. Esto es, ingresos por 59 mil millones de dólares.

En cuanto a México, el panorama es muy contrastante. Es desproporcionada la preferencia que, en términos de la asignación presupuestal oficial, se da al autotransporte terrestre, con una aprobación del gasto del 80% en 2013 [5], en tanto que al transporte aéreo se le otorgó el 4.6%. La prioridad se concede a proyectos carreteros en comparación con los otros modos de transporte [6].

En relación a los aeropuertos de la red nacional mexicana, cuatro manejan 85% de la carga y cuentan con infraestructura para atender el volumen potencial correspondiente [7]. En cambio, el resto presenta problemas de infraestructura subutilizada [8]. En las terminales de carga aérea internacional, la autoridad aduanera realiza largos procesos de revisión y autorización, ocasionando que se encarezcan las operaciones. Las quejas son frecuentes porque no existe una conexión directa y eficiente con el modo carretero. Estas deficiencias se ven

traducidas en el desempeño logístico del país, que lo colocan en la posición 54 a nivel mundial [9], con las desventajas que eso conlleva.

La toma de decisiones llevada a cabo en el país en las últimas décadas ha sido centralista, destacando a la capital del país. Incluso el planeado aeropuerto Felipe Ángeles, en el Estado de México, sigue este enfoque. Al ser el aeropuerto Benito Juárez de la Ciudad de México el principal actor de la red, se restringe el desarrollo del resto de los aeropuertos. El aeropuerto capitalino trabaja actualmente como centro de operaciones (en este dominio denominado *hub*), con demoras, congestión y saturación.

∞

En el periodo de 2009 a 2017, el volumen de carga en el aeropuerto capitalino aumentó a una tasa media anual del 6.6%, con tendencia a la saturación. La Fig. 1 muestra los pronósticos de carga con tendencia al alza [10].

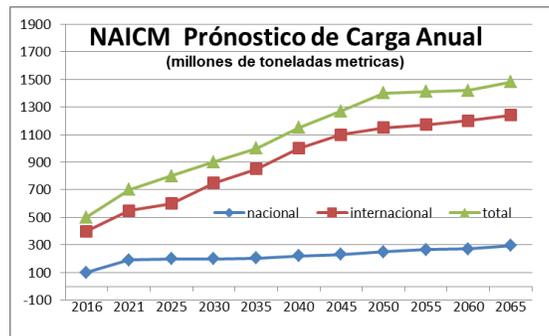


Fig. 1. Pronóstico de carga aérea para el aeropuerto de la Ciudad de México [10].

Ante esta complicada situación, se propone modificar para mejorar la red de carga a través del cambio de rutas, para permitir que la red sea menos dependiente de un aeropuerto y crezca la participación de los demás. Para apoyar esta propuesta se considera el análisis de redes sociales, que evalúa y justifica cuantitativamente. Los indicadores de evaluación que contempla el análisis de redes sociales resultan ser novedosos, al igual que interesantes, pues su perspectiva es de red, especialmente en los sistemas sociales. Es decir, su análisis se enfoca a toda la red, como los indicadores de densidad y centralización. Otros en cambio se hacen a nivel nodos. Además, se comprueba que funciona como conocimiento teórico académico, pero guardando consistencia con la realidad.

Para interconectar los nodos de una red aparecen dos situaciones extremas, que son la conexión directa de cada uno a todos los demás o la asignación de un solo nodo central, a través del cual se interconecta cada par de nodos. Las dos tienen desventajas por el número de enlaces requeridos. El modelo de centro de operaciones, o *hub and spoke*, de asignación múltiple, combina las ventajas de ambos, con una distribución radial, en que los nodos de origen y destino se interconectan en nodos de recepción y redistribución de los flujos originarios de las terminales de la red. Los tres tipos de redes se ilustran en la Fig. 2 [11].

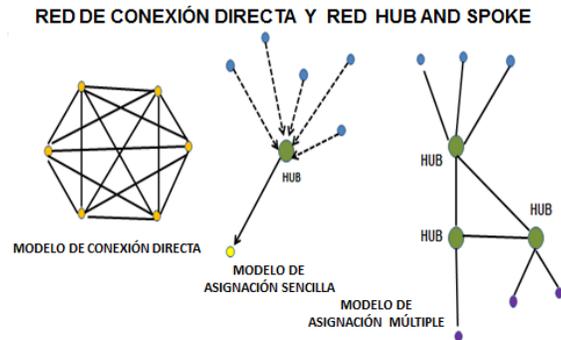


Fig. 2. Tipo de Redes, con conexión directa, asignación sencilla y asignación múltiple *hub and spoke* [11].

Dentro del análisis de redes se encuentran diversos enfoques. En el caso de Magilhetti [12], se observa que las redes de los operadores integradores (caso de empresas como FedEx, UPS o DHL) basan su estructura de red en la modalidad *hub and spoke*. La combinación de flujos de carga a través de los hubs genera economías de escala. Zhou, *et al.* [13] muestran que una red de transporte aéreo debe estudiarse con respecto a la ponderación de la conexión entre dos aeropuertos, es decir, el número de rutas, la frecuencia de los vuelos, el número de asientos de pasajeros, o la carga. Se debe considerar también que, en lugar de enfocarse exclusivamente en las conexiones que posee una red, se evalúe la capacidad total de carga que las conexiones poseen [14].

Otra de las métricas usadas para entender el rendimiento de una red de la carga aérea es la *conectividad*. Los países con alto número de conexiones aéreas aparecen sólidamente asociados con una integración más profunda en la economía de comercio mundial [15]. La conectividad se mide por el número de conexiones directas e indirectas a otros aeropuertos y por la calidad de estas conexiones en términos de tiempo y costo. La conectividad del aeropuerto está más centrada en la capacidad que se puede proporcionar desde un aeropuerto a otros aeropuertos [16].

También es conveniente reconocer la medida de la importancia y la fuerza de cada aeropuerto, es decir, si está conectado a nivel mundial o regional. Del mismo modo, se debe definir el número de nodos secundarios (los nodos vecinos) y la ponderación asociada a la red [17].

Una métrica más es la capacidad del aeropuerto, es decir, la cantidad de aeronaves que puede contener durante la operacional normal. Un aumento en la demanda de viajes provoca mayores retrasos. Por tal motivo, los proveedores de servicios de navegación aérea deben comprender la capacidad operativa y los riesgos asociados [18]. En cuanto a su estructura dinámica, por los tiempos de salida y llegada, se generan cuellos de botella, que varían considerablemente dentro de un día y durante la semana [17].

Para China y Estados Unidos, que mueven una enorme cantidad de productos alrededor del mundo, resulta interesante conocer cómo operan sus redes aéreas, ya que cada país desarrolla un sistema diferente. El caso chino se caracteriza por rutas rápidas, mientras que el de los EE. UU. ha desarrollado un sistema más coordinado [19]. En China la disponibilidad de vuelos comerciales es mucho más restringida que en los EE. UU. La red en China tiene una estructura fija, mientras que en los EE. UU. es más flexible y con una dinámica compleja. El país asiático enfrenta una mayor posibilidad de rutas congestionadas en comparación con su contraparte. La red estadounidense es adaptable dependiendo de factores como el clima, el tráfico, la demanda y la asignación de capacidad. En cambio, en China el espacio aéreo para vuelos comerciales es más restringido, con una estructura de red menos conectada y menos robusta, lo que genera una capacidad operativa menor que la de los EE. UU.

Desde el punto de vista de los proveedores de servicios, la red de EE. UU. es más poderosa puesto que la conectividad es más grande y la falla de la tasa de enlaces es menor porque se tienen más opciones de rutas aéreas al cruzar el espacio aéreo [20].

Una reseña de métodos comparables usualmente utilizados en la resolución de casos como el presente, remite a trabajos en que se aplican técnicas de flujo en redes, de simulación Montecarlo o métodos resilientes. En el primer caso, para el diseño de la red aeroportuaria de Indonesia [21], es considerada la técnica de redes, mediante el árbol de amplitud mínima, que evalúa distancias, costos y frecuencias de los vuelos. Por su parte, tiene aplicación en este medio la teoría de líneas de espera, en su vertiente de simulación Montecarlo de números aleatorios, que es aplicada a casos como el de desempeño sustentable en la operación [22].

Particularmente para los recientes años de afectación a las redes de aeropuertos debida a la pandemia por COVID-19 ha aparecido la necesidad de evaluar el aspecto de su resiliencia, es decir, su capacidad de modificar sus características de operación para mitigar la caída en el número y las restricciones, con propuestas de métodos de análisis para desempeños robustos [23]. Para el mismo escenario de riesgo sanitario, al emplear métricas del desempeño de diferentes topologías de redes de aeropuertos, por sus intercambios modificados de flujos debidos a las restricciones impuestas, se ha analizado el efecto que originan diferentes diseños de las redes [24].

Después de la aportación hecha por el análisis de redes sociales ante la propuesta sugerida, se usa una herramienta cuantitativa que permite medir las alternativas y apreciar su punto de vista a través de sus indicadores respectivos. La simulación de los aeropuertos principales de carga se efectúa a través de modelos matemáticos de líneas de espera. El Instituto Mexicano de Transporte en 2001 [25] considera que al aeropuerto de la Ciudad de México se le puede representar a través de un modelo de una línea de espera abstracta y una pista como servidor. Por lo tanto, se aplica el mismo criterio para simular los principales aeropuertos de carga del país. En lo sucesivo se designará, por brevedad, como aeropuerto de México al aeropuerto de la Ciudad de México.

III. METODOLOGÍA SISTÉMICA CON REDES SOCIALES

Para esta investigación sobre el caso mexicano se considera el análisis de redes sociales. Las redes sociales estudian este tema con una visión novedosa, además de que considera aspectos cuantitativos. Este análisis ayuda a clarificar y profundizar una situación que otros análisis no consideran.

En el proceso de análisis de redes sociales se incluyen seis principales fases: la identificación de datos, la recolección de datos, la limpieza de datos, el análisis de datos, la visualización de resultados y la interpretación de los resultados.

La necesidad de agilizar los cálculos y el diseño de algoritmos que permitan visualizar una red social han motivado investigaciones sobre cómo representar la información mediante el uso de sistemas informáticos. En el caso del análisis de redes sociales existe software como UCINET, NetDraw, Multinet, Cytoscape o Pajek, que permiten experimentar con redes sociales de manera gráfica y realizar cálculos sobre los datos [26]. La selección de UCINET para este trabajo, además de ser compatible con el ambiente Windows, se debió a la facilidad de generar indicadores, identificar actores clave y permitir visualizar las redes sociales estudiadas.

A. Análisis de Datos de Redes Sociales

Los datos utilizados se obtuvieron de la estadística operacional origen destino del servicio regular nacional de 2019, con respecto al rubro de carga [27]. Con estos datos se crea una tabla en Excel considerando el flujo de carga que ocurre entre el aeropuerto origen y el aeropuerto destino, que después se exporta al software UCINET 6 [28]. Los datos de la red son analizados a través de UCINET 6 y el producto obtenido del análisis

de la situación actual de la red mexicana de carga aérea se comenta a través de los indicadores principales de redes sociales [29].

Los principales indicadores que las redes sociales que se estudian son: *centralidad de grado* [30], *grado de intermediación* [31], [32], *densidad* [33], *centralización* [30], *cercanía* [30], *integración* [34] y *radialidad* [33]. La estructura de la red y la identificación de los actores clave son los temas primordiales encontrados en este análisis.

B. Estructura de la Red

La estructura de la red es considerada en los tres aspectos que se enlistan.

1. El territorio nacional cuenta con 11 aeropuertos con la suficiente importancia para participar en actividades de carga aérea. De las 32 entidades federativas en el país, únicamente 34% participa, de donde se entiende que el tamaño de la red es bajo para estos fines. Al ampliar la consideración al caso del comercio exterior, por los acuerdos comerciales internacionales firmados [35], es también importante incluir las oportunidades de conexión eficiente con el resto del mundo.
2. Tomando en consideración el número de enlaces activos entre los enlaces posibles (83 de 110), se obtiene una densidad de la red del 75%. Este porcentaje reporta una cantidad aceptable. Sin embargo, los flujos mayores de carga son generados por dos o tres aeropuertos.
3. En cuanto a la reciprocidad entre el intercambio de mercancías entre aeropuertos, sólo las conexiones San Luis Potosí – México, Querétaro – Guadalajara y San Luis Potosí – Monterrey lo cumplen; los de mayores disparidades se dan entre México – Cancún, Guadalajara – México, México – Monterrey, Tijuana – México y Tijuana – Guadalajara. Lo anterior claramente indica que la red es de poca igualdad y cuya consecuencia resultante es la inestabilidad y el desequilibrio.

C. Identificación de Actores Clave en la Red

Los aeropuertos considerados como los actores clave de la red aérea de carga en el país se identifican de la siguiente manera:

1. El aeropuerto de México, es el que mejor se conecta directamente con el resto de la red y obtiene la mayor ventaja sobre el resto. Guadalajara es el siguiente (Grado de Centralidad).
2. Los aeropuertos puente, o sea los que son los capaces de interrumpir o controlar la operación, son el de México, el de Monterrey y el de Guadalajara (Grado de Intermediación).
3. Los aeropuertos de México, de Monterrey y de Tijuana logran ser los de mayor influencia sobre el resto de los aeropuertos, vía directa o indirectamente (Centralidad Beta)
4. Nuevamente el aeropuerto de México juega el papel principal en la red, ya que es el más conectado y el que ejerce pleno dominio sobre los demás (Centralización).
5. Los aeropuertos de Monterrey, de México y de Guadalajara son los de mayor facilidad de conectarse al resto de los nodos de la red, además de ser menos dependientes (Centralidad de Cercanía).
6. Los aeropuertos de México, de Monterrey, de Guadalajara, junto con el de Tijuana, son los que se pueden conectar directamente al resto de los aeropuertos (Integración). Por otra parte, la Radialidad se relaciona con los aeropuertos que se conectan a través de otros pocos, como ocurre con los aeropuertos de México, Monterrey, Guadalajara y Tijuana.

D. Análisis de la Red de Carga Aérea con Cambios de Rutas

Ante los hallazgos encontrados sobre la red de las principales rutas de carga del país se propone una primera solución que permita alcanzar una mejoría en forma rápida y sin grandes complicaciones. Esta primera idea gira principalmente sobre el aeropuerto de la capital del país, ya que es el principal eje del movimiento de carga, pero que sin embargo es el que no permite el desarrollo al resto de los aeropuertos.

IV. SIMULACIÓN DE LAS ALTERNATIVAS

Para la mejoría de la red aérea se propone modificarla reduciendo la participación del aeropuerto de México. Como opción de experimentación se considera la incorporación de los aeropuertos de Querétaro y San Luis Potosí, como nuevos hubs de la red, dada su ubicación geográfica, para conectar con las terminales cercanas, sin alejarse demasiado de la Ciudad de México. La Tabla I muestra la comparación de las alternativas con el cambio de las rutas asignadas.

TABLA I
COMPARACIÓN DE LAS DOS REDES CON LOS CAMBIOS DE RUTAS DE CARGA

Ruta actual	Ruta propuesta	Vuelos	Toneladas
Guadalajara – México	Guadalajara – Querétaro	7 000	7 000
Mérida – México	Mérida – Querétaro	3 500	1 800
Monterrey – México	Monterrey – Querétaro	600	1 200
San Luis Potosí – México	San Luis Potosí – Querétaro	1 400	1 500
Tijuana – México	Tijuana – Querétaro	3 500	2 800
Total		16 000	14 300

Fuente: elaboración propia adaptada de [27].

La carga total mencionada representa el 46% de la carga total que mueve actualmente el aeropuerto de México y el 23% de sus vuelos. Nuevamente se aplicó el software UCINET 6 para Windows y el producto obtenido para esta nueva asignación se resume en la Tabla II.

La Fig. 3 muestra la red obtenida al llevar UCINET 6 la información al software de visualización de redes NetDraw 2.177. Los flujos de carga aérea que ocurren entre los aeropuertos son representados mediante flechas y el espesor depende de la cantidad enviada.

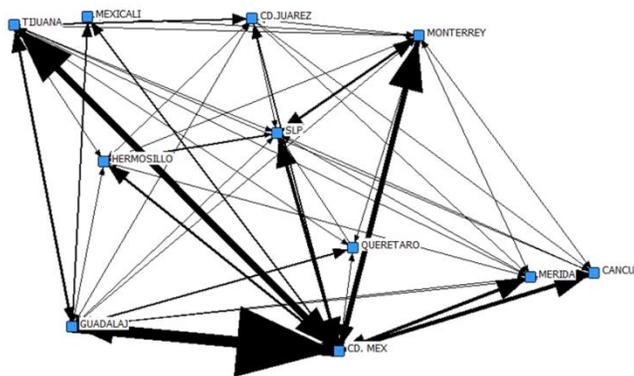


Fig. 3. Red de transporte de carga aérea inicial en 2019.

TABLA II
INDICADORES DEL ANÁLISIS DE REDES SOCIALES APLICADO A LA RED MEXICANA DE CARGA AÉREA ANTE EL CAMBIO

Indicador del análisis de redes sociales	Valor para la red original	Valor para la red con el cambio
Grado de Centralidad	De salida 0.2015 y entrada 0.1792 en la red	De salida 0.3431 y entrada 0.1159 en la red
Grado de Intermediación	Centralización de la red 6.04	Centralización de la red 5.34
Densidad	0.755	0.773
Centralización	De entrada 20.15; de salida 17.92	De entrada 11.59; de salida 34.3
Centralidad de Cercanía	De entrada 39.74; de salida 40.46; Monterrey, México y Guadalajara 100; Tijuana 90; San Luis Potosí 90; Querétaro 62	De entrada 37.86; de salida 37.51; Monterrey, México, Guadalajara 100; Tijuana 90; San Luis Potosí 90; Querétaro 71
Integración	Integración de entrada y salida es el mismo, 13.50 en la red; San Luis Potosí 95; Tijuana 95; Querétaro 70	Integración de entrada y salida de 12.50 de la red; San Luis Potosí 95; Tijuana 95; Querétaro 80
Radialidad	México, Monterrey y Guadalajara, 100; Tijuana 95	Mismos valores
Centralidad Beta	México 2.181; Guadalajara 0.925; Monterrey 1.208; Querétaro 0.093; San Luis Potosí 0.793; Tijuana 1.417	México 1.563; Guadalajara 1.043; Monterrey 1.252; Querétaro 1.208; San Luis Potosí 1.166; Tijuana 1.378

Fuente: elaboración propia con datos de [27].

V. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Por cada uno de los indicadores comprendidos en el análisis de redes sociales, se llevan a cabo las consideraciones siguientes:

1. Grado de Centralidad. Los valores que más crecieron fueron los de salida, por lo que los aeropuertos pasaron de un lugar a otro: Monterrey (0.069 a 0.117), Querétaro (0.009 a 0.154), San Luis Potosí (0.045 a 0.110) y Tijuana (0.074 a 0.126). También Tijuana creció en su valor de entrada (0.06 a 0.104). Esto significa que el número de vínculos de estos aeropuertos a otros aumentó. Por otra parte, el aeropuerto de México representa el mejor conectado de la red de carga.
2. Grado de Intermediación. Monterrey, México, Guadalajara Tijuana y San Luis Potosí fueron los de mayor cambio de valor. Entonces el índice de la red disminuyó, lo que significa que el control o interrupción del flujo de carga ya no estará reducido a unos pocos aeropuertos.
3. Densidad. El valor de la conectividad y el número de vínculos existentes aumentó en la red debido al cambio de rutas.
4. Centralización. El aeropuerto de México sigue siendo el actor dominante de la red. Sin embargo, con la inclusión de San Luis Potosí y Querétaro se le quita participación. Querétaro fue el que más creció en este apartado, al pasar de 62 a 71 en la cercanía de entrada.
5. Centralidad de Cercanía. Los aeropuertos con mayor facilidad de alcanzar al resto de los aeropuertos son nuevamente Monterrey, México y Guadalajara. Querétaro logró incrementar su valor en este rubro.

6. Integración. Los tres principales aeropuertos son los mejor conectados a los diversos aeropuertos de la red. Querétaro aumentó su conectividad pasando de 70 a 80.
7. Radialidad. El cambio prácticamente fue nulo en los aeropuertos de San Luis Potosí, Querétaro y Tijuana.
8. Centralidad Beta. Este indicador muestra que al aeropuerto de México se le resta influencia sobre los demás y, por consecuencia, el resto de aeropuertos ahora poseen mayor influencia en la red.

9

La Fig. 4 muestra la red obtenida al momento en que UCINET 6 lleva la información a NetDraw 2.177 (Network Visualization Software). Los flujos de carga aérea que ocurren entre los aeropuertos son representados mediante flechas y el espesor depende de la cantidad enviada. Se observa que el flujo entre Guadalajara y México disminuye notablemente, Querétaro tiene mayor presencia y San Luis Potosí genera tres rutas destacadas.

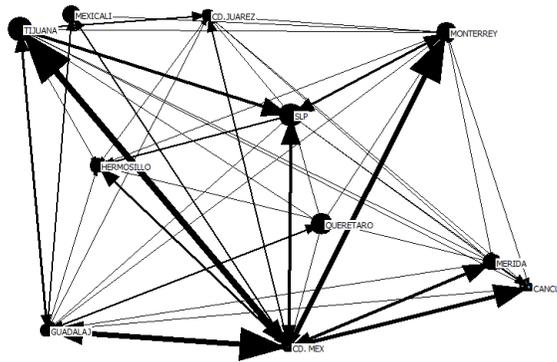


Fig. 4. Red de transporte de carga aérea modificada.

De lo anterior se puede observar que la propuesta formulada conlleva avances interesantes. Esto se refleja en los indicadores de Grado de Centralidad (el número de vínculos crece), el Grado de Intermediación (el control o interrupción del flujo de carga ya no se reduce a un solo aeropuerto), Densidad (con un aumento y la conectividad crece en toda la red), Centralización (al aeropuerto de la capital se resta protagonismo, logro muy importante, con crecimiento significativo para Querétaro) y Centralidad de Cercanía (la facilidad de alcanzar más aeropuertos aumenta especialmente para Querétaro).

E. Simulación matemática en los cambios de rutas

La simulación matemática de líneas de espera compara la red actual de carga aérea contra un cambio de rutas aéreas del aeropuerto de la capital hacia los aeropuertos de México, Querétaro y San Luis Potosí. Los resultados principales se muestran a continuación de manera gráfica, para los aeropuertos de interés, que son México, Querétaro y San Luis Potosí.

Las Fig. 5, 6, 7 y 8 muestran los impactos que se pueden obtener en los aeropuertos de (a) México, (b) Querétaro y (c) San Luis Potosí por la realización de los cambios mencionados. La Fig. 5 muestra el comparativo en cuanto a las diferencias en carga transportada. En tanto, la Fig. 6 lo hace con respecto al porcentaje de participación de cada aeropuerto, la Fig. 7 por el tiempo de espera total en cada uno y la Fig. 8 por el número de aviones que no tienen que esperar en cada caso.

El porcentaje de participación de México disminuye del 52% al 12%, lo que permite descongestionar sus operaciones. Además, reduce los rangos de carga. En cuanto a los tiempos de espera, disminuirían de 3.5 minutos a 30 segundos cuando hay máximas operaciones aéreas. Por último, se aprecia que el número de

aeronaves con tiempos de espera igual a cero crecería, pasando de 10 unidades a 30. Las flechas en las figuras indican los cambios antes mencionados.

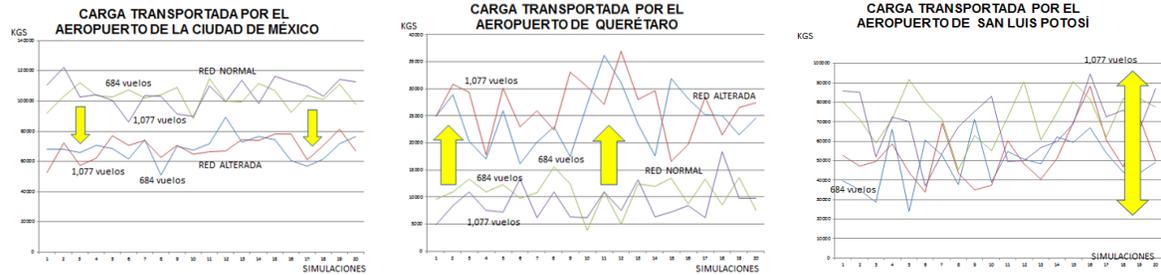


Fig. 5. Carga Transportada por cada aeropuerto: (a) México; (b) Querétaro; (c) San Luis Potosí.

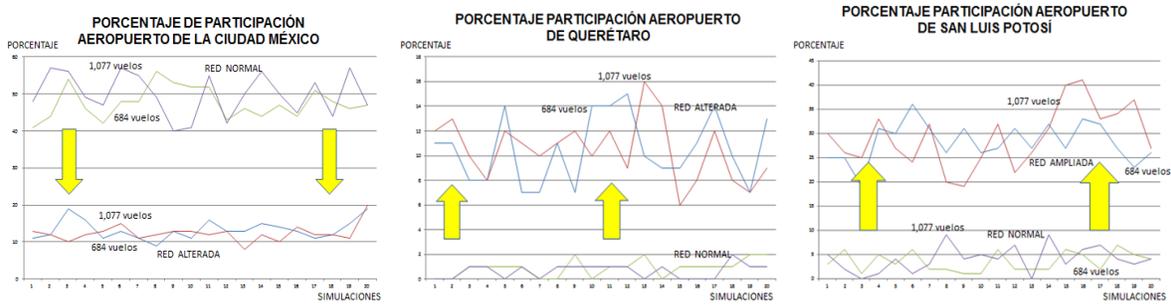


Fig. 6. Porcentaje de participación de cada aeropuerto: (a) México; (b) Querétaro; (c) San Luis Potosí.

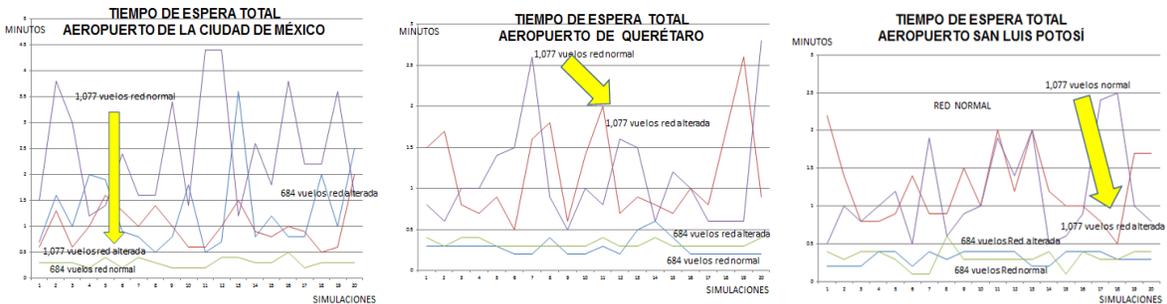


Fig. 7. Tiempo de espera total en cada aeropuerto: (a) México; (b) Querétaro; (c) San Luis Potosí.



Fig. 8. Número de aeronaves con espera cero en cada aeropuerto: (a) México; (b) Querétaro; (c) San Luis Potosí.

Para el aeropuerto de Querétaro, la participación en la red de carga crece del 1 al 12%. La carga transportada pasa de 5 a 30 toneladas. En cuanto a las variables operativas de tiempo de espera y número de aeronaves sin espera, no representan valores indeseables: la primera con 2 minutos y 1077 vuelos por día; la segunda, al pasar de 50 a un valor aceptable de 25.

Por último, para el aeropuerto de San Luis Potosí se observa buena estabilidad, con rangos de 40 a 80 toneladas. El crecimiento pasa del 5% al 30%. Por otro lado, los tiempos de espera son bastante normales, y oscilan entre 30 y 120 segundos, aun cuando el flujo suba a 1077 vuelos por día. Con respecto al número de aeronaves con tiempo de espera igual a cero, disminuye al pasar de 30 a 20.

11

VI. CONCLUSIONES

La toma de decisiones sobre la mejor ubicación de un conjunto de aeropuertos, para ofrecer el mejor desempeño, está sujeta a diversos criterios y constituye una tarea compleja. La resolución mediante opiniones de juicio conduce a resultados sin sustento. El procedimiento factible es el uso de modelos que clarifiquen las alternativas y puedan ser comparadas conforme a medidas objetivas, para garantizar el buen resultado.

Con la visión de ingeniería de sistemas, que permite estudiar múltiples alternativas, se accede a otras soluciones no consideradas habitualmente en este sector. El análisis de redes sociales, que se ha aplicado en una diversidad de disciplinas, que incluyen la ingeniería, muestra en esta problemática una solución novedosa, ya que su bondad está en la precisión que otorga sus principales indicadores.

Luego de elaborar un modelo de red que representa las condiciones iniciales de los principales aeropuertos mexicanos, con sus interconexiones, se evalúan los parámetros de acuerdo con el análisis de redes sociales. Resalta en éste la centralización de los flujos por el aeropuerto de la Ciudad de México, reflejado en saturación, congestión, largas esperas, con la pérdida de oportunidades de desarrollo en sedes del interior del país.

Se destaca entonces la oportunidad de aplicar las herramientas de visualización, análisis y simulación de las redes sociales, para sugerir nuevas distribuciones de los flujos o incorporar nuevas instalaciones aeroportuarias, como en el caso del aeropuerto de Santa Lucía en el Estado de México, para lo cual la simulación de las alternativas permitirá la comparación de sus parámetros, para sustentar la decisión.

En este sentido, se ilustra el resultado de una de las experimentaciones. Se considera el posible cambio en las rutas de carga para otorgar mayor participación a las regiones que cubren los aeropuertos de Querétaro y de San Luis Potosí, reduciendo la contribución del aeropuerto de la capital, a la vez que proporcionan una cercanía mediana a la Ciudad de México.

Para analizar los efectos y dictaminar la mejoría, un indicador importante es la centralidad de cercanía. Con el cambio, el indicador que era de 62 alcanza el valor de 71 para el aeropuerto de Querétaro. El porcentaje de participación de México disminuye del 52% al 12%, lo que permite descongestionar sus operaciones, reduce los tiempos de espera de 3.5 minutos a 30 segundos y las aeronaves con tiempo de espera de cero pasarían de 10 a 30 unidades. Para Querétaro, la participación en la red crecería de 1 a 12% y la carga transportada pasaría de 5 a 30 toneladas. Y para San Luis Potosí, el crecimiento pasaría de 5 a 30%, con aumento en el rango de carga de 40 a 80 toneladas.

La bondad del análisis de redes sociales es la precisión que otorgan varios de sus indicadores sobre otros tipos de redes. Además, aunque la propuesta planteada sobre cómo mejorar la red es muy lógica, este estudio permite sustentarlo con bases profundas y sólidas.

REFERENCIAS

- 12
- [1] Asociación Internacional de Transporte Aéreo: (IATA), “Comunicado 05”, 2019. [Online] Available: <https://www.iata.org/contentassets/12851812b6e6455eb8363726eb326fef/2020-02-06-01-sp.pdf>
 - [2] Organización de Aviación Civil Internacional (OACI), *Informe Anual 2017*. [Online] Available: <https://www.icao.int/annual-report-2017/Pages/ES/the-world-of-air-transport-in-2017.aspx>
 - [3] Organización de Aviación Civil Internacional (OACI), *Informe Anual 2018*. [Online] Available: <https://www.icao.int/Newsroom/Pages/ES/Solid-passenger-traffic-growth-and-moderate-air-cargo-demand-in-2018.aspx#:~:text=Montreal%2C%2031%20de%20diciembre%20de,%2C1%25%20respecto%20de%202017>
 - [4] Mott MacDonald, Annual Analyses of the EU Air Transport Market 2016. European Commission, 2017. www.mottmac.com
 - [5] Cámara de Diputados, “Evolución del Gasto del Ramo 09: Comunicaciones y Transportes 2012-2017”, Centro de Estudios de las Finanzas Públicas CEFP, 2018. [Online] Available: <https://cefp.gob.mx/publicaciones/nota/2018/notacefp0332018.pdf>
 - [6] Instituto Mexicano del Transporte, “Planeación de Infraestructura en México y su Relación con la Logística”. [Online] Available: <https://www.youtube.com/watch?v=VyTAgbUul8c>
 - [7] Secretaría de Comunicaciones y Transportes, “Aviación Mexicana en Cifras 1991-2016”, SCT, Subsecretaría de Transporte, 2016. [Online] Available: <https://library.co/document/y8pov40z-aviacion-mexicana-en-cifras.html>
 - [8] O. Castillo, “Infraestructura y tratados, necesarios para mover carga: Roberto Kobeh”, T21, 2015. [Online] Available: <http://t21.com.mx/aereo/2015/05/18/infraestructura-tratados-necesarios-mover-carga-roberto-kobeh>
 - [9] Inbound Logistics Latam, “Sudamérica ante el Índice de Desempeño Logístico”, 2018. [Online] Available: <http://www.il-latam.com/blog/business-context/sudamerica-ante-el-indice-de-desempeno-logistico>
 - [10] Grupo Aeroportuario de la Ciudad de México, “Actualización del Plan Maestro del NAICM”, 2018. [Online] Available: <https://gacm.gob.mx>
 - [11] D. L. Bryan y M. E. O’Kelly, “Hub-and-spoke networks in air transportation: An analytical review”, *Journal of Regional Science*, vol. 39, pp. 275-295, 1999. [Online] Available: <https://doi.org/10.1111/1467-9787.00134>
 - [12] P. Malighetti, G. Martini, R. Redondi y D. Scotti, “Air transport networks of global integrators in the more liberalized Asian air cargo industry”, *Transport Policy*, vol. 80, pp. 12-23, 2019. [Online] Available: <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2019.04.021>
 - [13] Y. Zhou, J. Wang y G. Huang, “Efficiency and robustness of weighted air transport networks”, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, vol. 122, pp. 14-26, 2019. DOI: 10.1016/j.tre.2018.11.008
 - [14] A. Bombelli, B. F. Santos y L. Tavasszy, “Analysis of the air cargo transport network using a complex network theory perspective”, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, vol. 138, No. 101959, 2020. [Online] Available: <https://doi.org/10.1016/j.tre.2020.101959>
 - [15] B. Shepherd, A. Shingal y A. Raj, “Value of Air Cargo: Air Transport and Global Value Chains 2016”, *IATA Developing trade consultants* (diciembre 6, 2016). [Online] Available: <https://www.iata.org/contentassets/307646ccaf10488f9ee240e87d8f72dd/value-of-air-cargo-2016-report.pdf>
 - [16] J. Wong y T. Wang, “Airport connectivity: Definition, measurement, and application”, *Journal of Eastern Asia Society for Transportation Studies*, vol. 12, pp. 922-938, 2017. [Online] Available: <https://doi.org/10.11175/easts.12.922>
 - [17] L. Rocha, “Dynamics of air transport networks: A review from a complex systems perspective”, *Chinese Journal of Aeronautics*, vol. 30, pp. 469-478, 2017. [Online] Available: <https://doi.org/10.1016/j.cja.2016.12.029>
 - [18] Y. Madhwal y Z. Avdeeva, “Planning in aircraft industry based on prediction of air traffic”, *Procedia Computer Science*, vol. 122, pp. 1047-1054, 2017. DOI:10.1016/j.procs.2017.11.472
 - [19] M. Song y G. Yeo, “Analysis of the air transport network characteristics of major airports”, *The Asian Journal of Shipping and Logistics*, vol. 33, pp. 117-125, 2017. [Online] Available: <https://doi.org/10.1016/j.ajsl.2017.09.002>
 - [20] P. Ren y L. Li, “Characterizing air traffic networks via large-scale aircraft tracking data: A comparison between China and the US networks”, *Journal of Air Transport Management*, vol. 67, pp. 181-196, 2018. [Online] Available: <https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2017.12.005>
 - [21] A. Herrera, *Simulación de operaciones aeroportuarias. El caso de despegues y aterrizajes en el aeropuerto de la Ciudad de México*, Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Instituto Mexicano del Transporte, Publicación Técnica No. 180, 2001. <https://www.imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt180.pdf>
 - [22] Secretaría de Comunicaciones y Transportes, “Estadística operacional origen-destino: El servicio regular nacional, vuelos, pasajeros y carga”, SCT, 2019. www.sct.gob.mx
 - [23] S. P. Borgatti, M. G. Everett y L. C. Freeman. *Ucinet for Windows: Software for Social Network Analysis*, Harvard, MA: Analytic Technologies, 2002.
 - [24] N. Aguilar-Gallegos, E. Martínez y J. Aguilar, *Análisis de Redes Sociales: Conceptos Clave y Cálculo de Indicadores*, Universidad Autónoma de Chapingo, Serie Metodología y Herramientas para la Investigación, 2017. [Online] Available: <https://ciestaam.edu.mx/publicaciones2018/metodologias/analisis-de-redes-sociales.pdf>
 - [25] L. C. Freeman, “Centrality in social networks: Conceptual clarification”, *Social Networks*, vol. 1, pp. 215-239, 1979. [Online] Available: [https://doi.org/10.1016/0378-8733\(78\)90021-7](https://doi.org/10.1016/0378-8733(78)90021-7)
 - [26] W. de Nooy, A. Mrvar y V. Batagelj, *Exploratory Social Network Analysis with Pajek*, New York: Cambridge University Press, 2005.
 - [27] M. O. Jackson, *Social and Economic Networks*, Princeton University Press, 2008.

- [28] S. P. Borgatti, M. G. Everett y J. C. Johnson, "Analyzing Social Networks", *Revista Hispana para el Análisis de Redes Sociales*, vol. 27, pp. 141-145, 2013. [Online] Available: <http://dx.doi.org/10.5565/rev/redes>
- [29] T. W. Valente y R. K. Foreman, "Integration and radiality: Measuring the extent of an individual's connectedness and reachability in a network", *Social Networks*, vol. 20, pp. 89-105, 1998. DOI:10.1016/S0378-8733(97)00007-5
- [30] PromPerú, "México, guía de mercado multisectorial", Departamento de Inteligencia de Mercados, 2021. [Online] Available: <https://recursos.exportemos.pe/boletin/guia-mercado-multisectorial-mexico-2021.pdf>
- [31] Y. Zhou, S. Li, T. Kundu, X. Bai y W. Qin, "The Impact of Network Topology on Air Transportation Robustness to Pandemics", *IEEE Transactions on Network Science and Engineering*, vol. 8, no. 3, pp. 2249-2261, 2021. DOI: 10.1109/TNSE.2021.3085818
- [32] L. Lusiantoro y W. S. Ciptono, "An Alternative to Optimize the Indonesian's Airport Network Design", *Gadjah Mada International Journal of Business*, vol. 14, no. 3, pp. 267-302, 2012. <https://jurnal.ugm.ac.id>
- [33] X. Xu, Z. Zhou, Y. Dou, Y. Tan y T. Liao, "Sustainable Queuing-Network Design for Airport Security Based on the Monte Carlo Method", *Sustainability*, vol. 10, no. 2, art. 1, 2018. <https://doi.org/10.3390/su10020001>
- [34] J. Guo, Z. Yang, Q. Zhong, X. Sun y Y. Wang, "A Novel Resilience Analysis Methodology for Airport Networks System from the Perspective of Different Epidemic Prevention and Control Policy Responses", *PLOS One*, vol. 18, no 2, art. e0281950, 2023. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0281950>
- [35] F. Ramírez Escobedo, "Modelo Sistémico basado en Redes Visuales para Representar la Información sobre Propiedad Intelectual en el IPN", Tesis de Doctorado en Ingeniería de Sistemas, México: IPN, 2016.