



Universidad del
Rosario

**Red de tráfico aéreo de pasajeros en Colombia entre 1992 y
2019**

Autor

Juan Felipe Pineda Guarín

Director

Fredy Alejandro Gamboa Estrada, PhD

Trabajo presentado como requisito para optar por el título de Magíster
en Economía

Bogotá, Colombia

2022

**Red de tráfico aéreo de pasajeros en Colombia entre 1992 y
2019**

Universidad del Rosario
Facultad de Economía

Tesis presentada como requisito para optar por el título de Magíster en
Economía

Autor

Juan Felipe Pineda Guarín

Director

Fredy Alejandro Gamboa Estrada

PhD en Economía

Bogotá, Colombia

2022

Red de tráfico aéreo de pasajeros en Colombia entre 1992 y 2019

Juan Felipe Pineda Guarín

Resumen

En este documento se estudian las principales características de estructura y conectividad de la red de tráfico aéreo de pasajeros en Colombia entre 1992 y 2019. Se evidencia que la red presenta una densidad media con una concentración de los flujos en pocos nodos (departamentos) que implica una estructura jerárquica liderada por Bogotá, Antioquia y Atlántico. Se observa un comportamiento negativo en las métricas de centralidad del sistema desde 1999, que se sostuvo hasta finales de 2007. Entre 2008 - 2009 el sistema presentó un punto de inflexión sobre el nivel de integración de los departamentos, generando mayores conexiones y un aumento en el nivel de pasajeros transportados entre los nodos. Se evidencia la importancia de fortalecer la conectividad en los aeropuertos de Antioquia, Valle del Cauca, Meta y Santander, para aumentar la infraestructura de respaldo ante posibles eventos prolongados de fuerza mayor en los aeropuertos de Bogotá. A través del modelo gravitacional se estudian los determinantes del tráfico aéreo de pasajeros a nivel departamental. Se evidencia que el PIB de origen y destino, la distancia entre los departamentos y tener frontera marítima aumentan la cantidad de pasajeros transportados. Por otro lado, nodos más extensos en superficie transportan menos pasajeros.

Clasificación JEL: R1, P25, L9, C5.

Palabras clave: Colombia, transporte aéreo de pasajeros, topología de redes, modelo gravitacional.

1 Introducción

La relevancia del sector aéreo de pasajeros radica en la necesidad de promover una conectividad alta al interior del país, así como de incentivar la integración mundial con el objetivo de facilitar y fomentar la economía nacional. El análisis de la estructura y de la evolución del tráfico aéreo de pasajeros es importante para identificar el potencial de crecimiento del sector en las principales ciudades, así como en las zonas a las que no es posible acceder por otros medios de transporte. El estudio de la estructura se debe complementar con la identificación de los determinantes geoeconómicos que permiten generar niveles de conectividad altos que incentiven la integración y la competitividad de un país.

En Colombia el tráfico aéreo de pasajeros es catalogado como un servicio público esencial donde el gobierno toma decisiones de política sobre el sector para mejorar su competitividad. Por tal razón, es relevante evidenciar el comportamiento y la estructura del sistema aéreo de pasajeros, con el propósito de promover la toma de decisiones de política pública informadas, que salvaguarden el empleo generado por el sector.

Este documento busca dar respuesta a la siguiente pregunta, ¿La red de tráfico aéreo de pasajeros en Colombia presentó cambios estructurales y de conectividad durante el periodo 1992-2019?. En línea con el objetivo, se emplea el análisis topológico de redes, metodología ampliamente utilizada para estudiar el sistema de tráfico aéreo de pasajeros a nivel mundial ¹, y el modelo gravitacional. La topología de redes permite identificar los patrones de conectividad entre los nodos del sistema, ofreciendo una caracterización formal de las conexiones a través de la visualización y estudio de su jerarquía, con grafos y métricas propias de este tipo de análisis. Asimismo, mediante el modelo gravitacional se busca contrastar la hipótesis de Tinbergen (1962) aplicada al tráfico aéreo de pasajeros, la cual expone que el flujo de pasajeros entre dos departamentos debe ser proporcional a la multiplicación de sus tamaños medido en términos del Producto Interno Bruto e inversamente proporcional a la distancia entre ellos. Sin embargo, el efecto de la distancia sobre el flujo de pasajeros puede tener dos efectos que generan una disyuntiva en el

¹Wandelt et al. (2015), Wang et al. (2011), Lin (2012), Lin et al. (2014), Guida et al. (2006), Rocha (2009), entre otros.

análisis. El primero refleja un impacto negativo sobre el flujo de pasajeros debido al aumento de los costos de transporte bilateral, mientras que el segundo denota un aumento de la competitividad en grandes distancias frente al transporte terrestre que genera un efecto positivo sobre el flujo aéreo de pasajeros.

En este documento se evidencia que la topología del sistema muestra una red con densidad media y variaciones significativas en el periodo de tiempo analizado. Los departamentos ubicados en el suroccidente del país se apartan de la periferia² de la red y generan conexiones importantes con el nodo principal (Bogotá). En contraste con lo anterior, Chocó es el único departamento de la red que para el final del periodo de tiempo analizado continúa rezagado y se ubica en la periferia del sistema. En 1999 se excluyen los nodos de Cundinamarca y Boyacá de la red, también inicia un comportamiento negativo en la densidad mensual del sistema, que puede estar explicado por la crisis financiera del año 1999 en Colombia. Esta tendencia se mantuvo hasta inicios de 2008-2009, periodo durante el cual se presentó un punto de inflexión en las principales características de la red y un aumento en los niveles de inversión privada en infraestructura aeroportuaria en Colombia como producto de contratos concesionados. Adicionalmente, en este periodo se observa un crecimiento acelerado de las conexiones del sistema y una mayor cohesión entre los nodos.

Bogotá es el nodo que agrupa las principales conexiones del sistema y ocupa la posición de nodo eje en la red. Se evidencia la importancia de fortalecer la conectividad en los aeropuertos de Antioquia, Valle del Cauca, Meta y Santander, para generar infraestructura de respaldo ante posibles eventos de fuerza mayor en Bogotá que le impidan operar con normalidad en periodos de tiempo prolongados.

El modelo gravitacional expone los determinantes del tráfico aéreo de pasajeros en Colombia y los resultados de estimación cambian según el periodo de tiempo analizado. El modelo muestra un cambio positivo en el sistema durante los años 2008 y 2009, que resulta

²En este documento la periferia es entendida como el conjunto de nodos que están apartados del centro de la red, sin tener en cuenta su ubicación geográfica.

en una disminución de los costos de transporte bilateral. El PIB de origen y destino, la distancia entre los departamentos y tener frontera marítima, aumentan la cantidad de pasajeros transportados. Los nodos más extensos en superficie transportan menos pasajeros y los departamentos fronterizos tienen impactos distintos según el periodo de tiempo analizado.

Es preciso señalar que este documento no estudia la red de tráfico aéreo de pasajeros en Colombia a un nivel de aerolíneas o aeropuertos. Tampoco realiza un análisis dirigido a encontrar los determinantes de los cambios en la conectividad del sistema, ni de las decisiones de inversión de las empresas en el sector. Asimismo, únicamente estudia la red de tráfico aéreo de pasajeros a nivel interno sin incluir las conexiones internacionales. Sin embargo, son temas que pueden abordarse en otras investigaciones y este documento sirve como base para la realización de los mencionados estudios.

Este documento consiste de 7 secciones. La primera es la presente introducción, la segunda muestra la revisión de literatura y expone como el presente estudio aporta a la misma. La tercera describe los hechos estilizados. La cuarta expone los datos, la quinta las metodologías implementadas. La sexta presenta y analiza los resultados del estudio y la última sección concluye y describe las recomendaciones de política.

2 Revisión de literatura

El análisis topológico de redes es ampliamente utilizado para estudiar la estructura del tráfico aéreo de pasajeros al interior de un país y sus conexiones a nivel mundial. Es de resaltar el estudio de la red mundial de tráfico aéreo realizado por Wandelt et al. (2015). Los autores encuentran que la red mundial tiene un coeficiente de densidad de 0.094 en el año 2014, lo que implica que del 100 % de las conexiones posibles entre los países, únicamente se efectúan el 9.4 %. Por otro lado, concluyen que la red mundial es simétrica y altamente transitiva con cinco países que lideran la estructura jerárquica (Estados Unidos, Francia, Gran Bretaña, Australia y Sur África).

Lin et al. (2014) es otro caso de estudio de la red de tráfico aéreo que utiliza el análisis topológico de redes. Los autores analizan la red de tráfico aéreo en Estados Unidos entre 1990 y 2010. Utilizando métricas propias de este tipo de análisis como el grado, la intensidad, la intermediación y el coeficiente de clúster, concluyen que las estadísticas de redes son estables y reflejan que las ciudades que dominan la estructura jerárquica de la red en el periodo de estudio son Chicago, Dallas, Atlanta, Washington y Detroit.

Lin (2012) emplea un análisis topológico de redes para explorar las propiedades estadísticas y espaciales del sistema aéreo en China. De manera puntual y en lo que respecta a las métricas del análisis topológico de redes, encuentran que el sistema presenta un coeficiente de clúster de 0.737 con lo que concluye que el sistema tiene propiedad de mundo pequeño que implica una cohesión elevada entre las conexiones que se generan entre los nodos de la red. Asimismo, encuentran que las ciudades de Beijín, Shanghái y Guizhou tienen una posición jerárquica en el sistema.

Grosche et al. (2007) exponen un modelo gravitacional para predecir el tráfico aéreo de pasajeros en Europa donde restringen los datos a la salida y entrada de pasajeros por ciudad y no por aeropuerto. Utilizando un estimador de mínimos cuadrados ordinarios con variables explicativas geoeconómicas y omitiendo variables de la infraestructura aeroportuaria, encuentran que el Producto Interno Bruto es significativo, al igual que la distancia y el área de cobertura que tiene cada ciudad respecto a las ciudades cercanas.

En Latinoamérica Rocha (2009) analiza la Red Aeroportuaria de Brasil efectuando un análisis topológico de redes. Para el periodo de análisis (1995-2006), el autor encuentra que los nodos más centrales de la red (Sao Pablo, Rio de Janeiro, Brasilia, Manaus, Belem, Salvador, Belo Horizonte) evolucionan de tal manera que su posición jerárquica en la red se fortalece, acompañado de estadísticas de centralidad homogéneas y crecientes, mientras que otros nodos ubicados en la periferia quedan más segregados de la red. El autor concluye que las aerolíneas muestran una tendencia a fortalecer las rutas más

rentables en lugar de nuevas rutas.

En Colombia no existen estudios que analicen el sistema aéreo de pasajeros utilizando el análisis topológico de redes. Sin embargo, el estudio realizado por Fedesarrollo en el 2016 (Competitividad en el transporte aéreo en Colombia) realiza un análisis cualitativo de marco institucional y regulatorio del sector para exponer su situación en términos de aporte a la economía, crecimiento y estructura. Los autores concluyen que las inversiones en el sector han tenido un crecimiento elevado en años pasados, lo que se traduce en un mejor desempeño institucional. Igualmente, exploran la cadena de servicios aeroportuarios y concluyen que todo el país está conectado por vía aérea y resaltan la existencia de municipios a los que solo se puede acceder por este medio. Finalmente, presentan un análisis cuantitativo de la competitividad de los aeropuertos a partir de índices de competitividad compuestos y también de la competitividad en costos, y concluyen que los aeropuertos más competitivos se encuentran en las principales ciudades.

Este documento utiliza el análisis topológico de redes junto al modelo gravitacional para analizar la estructura y conectividad del sistema de transporte aéreo de pasajeros en Colombia. El estudio realiza un análisis de redes de tráfico aéreo de pasajeros al interior del país, ofreciendo una caracterización formal de las conexiones del sistema a través de la visualización y estudio de su estructura y jerarquía, con grafos y estadísticas propias de este tipo de análisis. De manera adicional, a través del modelo gravitacional se exponen los determinantes del tráfico aéreo de pasajeros en Colombia y los cambios presentados en el periodo de tiempo analizado.

3 Hechos estilizados

La importancia del transporte aéreo de pasajeros en Colombia se encuentra en las relaciones funcionales que el sector mantiene con el turismo y los niveles de conmutación laboral³ que le permite a los habitantes de un país moverse a un nivel intranacional e internacional, generando impactos positivos sobre la competitividad económica y la pro-

³Entendida como la situación en donde las personas desempeñan sus actividades laborales en un municipio distinto al que residen.

ductividad del país y de sus departamentos (Fedesarrollo,2016). Igualmente, el sistema aéreo de pasajeros incentiva la conectividad de la regiones y ciudades más apartadas del país que se caracterizan por tener un difícil acceso dada la topografía nacional que impide generar conexiones vía terrestre.

La participación del Transporte Aéreo (incluyendo el transporte de carga y de pasajeros) en el Producto Interno Bruto Nacional fue de 1.6 billones en el trimestre IV de 2019⁴. Esto refleja un aporte significativo a la economía del país, sumado al efecto multiplicativo que genera dentro de los demás sectores de la economía. Según Fedesarrollo (2016), por cada peso generado en el sector del transporte aéreo en Colombia, se produce un efecto multiplicativo de 3,6 pesos más dentro del país. Por otro lado, según el IGAC⁵ Colombia tiene una superficie de 1.141.748 kilómetros cuadrados (área continental), que hace relevante tener un sistema aéreo bien estructurado para atender las necesidades de conectividad de los ciudadanos y la afluente de turistas.

En lo que respecta a la política pública dirigida a fomentar el desarrollo del sector, la inversión ha estado enfocada en la modernización de la infraestructura necesaria para la prestación del servicio, principalmente en ampliación de los aeropuertos; como lo resalta Ramirez et al. (2021) dichas inversiones han tenido un comportamiento procíclico con el aumento de los ingresos del estado, asimismo, los autores resaltan que "las mayores inversiones en los aeropuertos, tanto públicas como privadas, aumentaron considerablemente el número de pasajeros movilizadas por año".

4 Datos

La información sobre el flujo de pasajeros es reportada por la Aeronáutica Civil a través de la base Origen-Destino, con un promedio de 7.500 observaciones mensuales. Si bien los datos consisten en el flujo de pasajeros por aeropuerto, no se ejecuta un análisis específico en esta línea, sino que se genera una agregación por departamento. Esta información

⁴Cuentas nacionales, Departamento Administrativo Nacional de Estadística

⁵Instituto Geográfico Agustín Codazzi, entidad encargada de producir el mapa oficial y la cartografía básica de Colombia, entre otras funciones.

permite obtener los datos por departamento de origen y departamento de destino sin discriminar por aeropuerto. Con esto se tienen 33×33 parejas departamentales (incluyendo Bogotá D.C).

Para el objetivo del presente documento se analizan los vuelos clasificados como regulares⁶. En el proceso de depuración de la base de datos se eliminan aquellas observaciones en las que por un error de medición no es posible identificar el departamento de origen o destino de un vuelo. Después de este proceso se elimina menos del 1 % de las observaciones.

El Producto Interno Bruto a precios constantes es calculado por el Departamento Administrativo Nacional de Estadística - DANE. La distancia geodésica entre las capitales o principales municipios de los departamentos proviene del Instituto Nacional de Vías - INVIAS. A partir de la información generada por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi - IGAC, es posible conocer aquellos departamentos que dentro de sus límites fronterizos tienen a otro país o el océano.

5 Metodología

5.1 Topología de redes

El análisis topológico de redes se puede utilizar para analizar el conglomerado de nodos que se relacionan en el tráfico aéreo de pasajeros. Al caracterizar la red, los departamentos se convierten en nodos (n) y el tráfico de pasajeros en conexiones (m). Los departamentos son representados por nodos de origen (i) o destino (j). Siguiendo la metodología de construcción de redes de Newman (2010), se conforma la matriz de adyacencia (A_{ij}) con dimensiones $n \times n$, que muestra las conexiones de cada uno de los nodos que conforman la red. Los elementos ubicados en la diagonal (donde $i = j$) toman el valor de uno si existe tráfico aéreo de pasajeros entre municipios al interior del mismo departamento.

⁶La Aeronáutica Civil define los vuelos regulares como: Servicios de Transporte Aéreo sujetos a tarifas y horarios fijos que se anuncian al público o con una frecuencia que constituye una serie sistemática e identificable de vuelos. Se excluyen del presente estudio los datos de los vuelos charter y aerotaxis, resaltando que estas observaciones son menores al 0.5 % del total mensual.

Los valores iguales a 1 dentro de la matriz de adyacencia se reemplazan por la cantidad de pasajeros transportados desde i hacia j con el objetivo de conformar la matriz ponderada (P_{ij}) por las conexiones entre los nodos de la red.

El análisis topológico de redes permite calcular métricas descriptivas dirigidas al análisis de la estructura y conectividad de la red y por otro lado, se enfoca en caracterizar la posición de cada nodo, y por tanto su importancia. Se detallan las estadísticas descriptivas (Newman, 2010) que son frecuentemente incorporadas en el análisis de redes de tráfico aéreo de pasajeros para estudiar la conectividad de la red y la jerarquía de los nodos.

$$A_{ij} = \left\{ \begin{array}{l} 1 \text{ si existe una conexión desde } i \text{ hacia } j \\ 0 \text{ en otro caso} \end{array} \right\}$$

1. Estadísticas de conectividad y estructura de la red.

- Densidad (δ): Hace referencia al número de conexiones existentes m en la red como porcentaje del número de conexiones posibles $n \times n$ y refleja que tan bien conectados están los nodos de la red, permitiendo aislar el número de conexiones, independiente del volumen de pasajeros. Esta estadística toma valores entre 0 y 1. Valores cercanos a 1 reflejan un nivel de densidad alto, y por tanto, una red con alta conectividad, y valores cercanos a 0 representan lo contrario.

2. Estadísticas de caracterización de cada nodo.

- Grado de entrada (φ_{in}) y salida (φ_{out}): Esta métrica refleja la importancia de los nodos respecto al número de conexiones existentes en la red. El grado de entrada denota el número de departamentos que tienen vuelos hacia el departamento (i); mientras que el grado de salida se refiere al número de departamentos que tienen vuelos desde el departamento (i). El máximo valor que puede tomar cada nodo es igual al número de nodos existentes (n). Valores altos reflejan una mayor centralidad del nodo de análisis.

- Intensidad de entrada (γ_{in}) y salida (γ_{out}): γ_{in} (γ_{out}) es la suma por columnas (filas) de la matriz ponderada, y es calculada con el objetivo de cuantificar que tan intensas son las conexiones de cada nodo, identificando el aporte porcentual de los nodos al total de pasajeros transportados
- Cercanía: Es una medida de centralidad que calcula la inversa del camino más corto (en términos del número de conexiones) para conectar dos nodos. En una red dirigida, la cercanía se calcula en términos de la dirección que toman las conexiones y con esto se obtiene la cercanía de entrada y la cercanía de salida. Al igual que las medidas de centralidad, los valores altos reflejan una mayor centralidad. Es calculada con el objetivo de identificar los patrones que existen en la red en cuanto a la relación indirecta que puede existir entre los nodos del sistema, asumiendo que hay un nodo intermedio que conecta a otros dos nodos.
- Intermediación (ι): Al igual que la cercanía, es una medida de centralidad, y mide que tanto un nodo se encuentra en medio del camino más corto entre otros dos nodos. Se utiliza para medir con qué frecuencia un nodo se encuentra en la red. Un nodo que actúa como puente tiende a tener un valor elevado. Por tanto, en este contexto se utiliza para medir la influencia de un departamento en el tráfico entre otros departamentos.

5.2 Ecuación gravitacional

El modelo gravitacional, propuesto inicialmente por Jan Tinbergen (1962) y ajustado para el presente estudio, supone que el flujo aéreo de pasajeros entre dos departamentos será directamente proporcional a la multiplicación de sus tamaños e inversamente proporcional a la distancia entre ellos. Sin embargo, el efecto de la distancia sobre el flujo de pasajeros puede tener dos efectos que generan una disyuntiva en el análisis. El primero refleja un impacto negativo sobre el flujo de pasajeros debido al aumento de los costos de transporte bilateral, mientras que el segundo denota un aumento de la competitividad en grandes distancias frente al transporte terrestre que genera un efecto positivo sobre el flujo aéreo de pasajeros.

La ecuación (1) incluye un conjunto de factores que afectan el flujo de pasajeros entre una pareja de departamentos de acuerdo con el modelo gravitacional.

$$X_{ij,t} = \beta_0 PIB_{i,t}^{\beta_1} PIB_{j,t}^{\beta_2} D_{ij}^{\beta_3} \left(\prod_{k=1}^K RM_{h,t}^{\alpha_k} \right) \times \exp \left(\sum_{a=1}^A \theta_a B_h \right) \epsilon_{ij,t} \quad (1)$$

Las variables incluidas en el análisis se refieren a lo que la literatura denomina variables geoeconómicas, $X_{ij,t}$ indica la salida de pasajeros desde un departamento i hasta un departamento j en el tiempo t . $PIB_{i,t}$, $PIB_{j,t}$ denotan el Producto Interno Bruto del departamento i y un departamento j , respectivamente, en el tiempo t , medido en miles de millones de pesos. D_{ij} denota la distancia geodésica que existe entre los departamentos i y j , medida en kilómetros. $RM_{h,t}; h = i, j$ representan los términos de resistencia multilateral y se incluyen en el modelo gravitacional para capturar el hecho de que el flujo de pasajeros entre los departamentos i y j no depende únicamente de las variables que asocian a los departamentos directamente, sino también del vínculo que tenga i ó j con los demás departamentos (I, J) (Anderson y van Wincoop, 2003). Teniendo en cuenta que los términos de resistencia multilateral son clasificados como no observables, la literatura propone variables que sirven como proxy. De Benedictis y Tajoli (2011) utilizan las métricas descriptivas de topología de redes como proxy de los términos de resistencia multilateral debido a que muestran la importancia relativa de los nodos dentro del sistema. La intermediación es la estadística de red utilizada dentro del análisis gravitacional del presente estudio.

$B_h; h = i, j$; representa un conjunto de variables binarias que buscan controlar por características cada departamento, entre ellas FP_i y FP_j , que toman el valor de 1 si los departamentos de referencia (i, j) están en el límite fronterizo con otro país. Finalmente, $\epsilon_{ij,t}$ denota el término de perturbación estocástico y es asumido estadísticamente independiente de los regresores, $E(\epsilon_{ij,t}, \cdot) = 1$.

El modelo multiplicativo (1) puede ser estimado por medio de métodos de estimación no lineales. Por ejemplo, el método Poisson Pseudo Máxima Verosimilitud (PPML, por sus siglas en inglés), propuesto por Santos Silva y Tenreiro (2006), controla la hetero-

cedasticidad al asumir que la varianza condicional es proporcional a la media condicional. Además, sostienen que permite resolver el problema de flujo de pasajeros igual a cero al estimar la ecuación gravitacional en su forma multiplicativa generando los valores ajustados de $X_{ij,t}$. Finalmente, argumentan que aunque exista una proporción grande de ceros en los datos, el estimador PPML no se ve afectado en su desempeño.

Existen casos donde la varianza condicional es diferente a la esperanza condicional. Santos Silva y Tenreyro (2011) sostienen que incluso cuando el supuesto de varianza condicional proporcional a la media condicional no se cumple, el estimador de PPML se comporta de manera correcta (propiedades de muestra no finita) en comparación con otros estimadores. Respecto a las propiedades de muestra finita, la consistencia se fundamenta en la correcta especificación de la esperanza condicional. El uso de los métodos de estimación mencionados anteriormente se puede llevar a cabo en la ecuación (2), la cual es una transformación monótona de la ecuación (1).

$$X_{ij,t} = \exp \left[\alpha_0 + \beta_1 \ln PIB_{i,t} + \beta_2 \ln PIB_{j,t} + \beta_3 \ln D_{ij} + \left(\sum_{k=1}^K \alpha_k \ln RM_{h,t} \right) \right] \times \exp \left(\sum_{a=1}^A \theta_a B_h \right) \epsilon_{ij,t} \quad (2)$$

La especificación Log - Log es la ecuación gravitacional más común para estudiar los efectos de determinadas variables sobre los flujos de transporte de pasajeros, que en este caso es obtenida de log-linealizar la ecuación (1). Como describe Santos Silva y Tenreyro (2006), la literatura tradicional utiliza mínimos cuadrados ordinarios (MCO) para estimar la especificación Log-Log y los resultados de esta estimación tiene varios problemas. Primero, se generan los valores ajustados de $\ln(X_{ij,t})$ y no de $X_{ij,t}$, (desigualdad de Jensen). De esta manera, si existe alguna relación entre la varianza de los errores y los regresores en la ecuación multiplicativa, también existirá una relación entre la esperanza del \ln de los errores y los regresores, lo que genera una violación del supuesto de exogeneidad y de consistencia en los estimadores MCO. Como resultado, la interpretación de las elasticidades no es el adecuado. Segundo, la información contenida en los flujos

de pasajeros igual a cero no se puede tener en cuenta dentro del análisis debido a que son descartados con la transformación Log-Log. Los autores muestran que todo lo anterior deja en duda la eficiencia y consistencia de los estimadores que se derivan de una transformación lineal de la ecuación gravitacional en su forma multiplicativa.

6 Resultados

6.1 Red de tráfico aéreo de pasajeros departamental

Con base en las métricas expuestas anteriormente se estudia la estructura del tráfico aéreo de pasajeros y su evolución en el periodo de análisis.

En primer lugar, se analiza la evolución de la red departamental de tráfico aéreo de pasajeros en Colombia, donde se evidencia el comportamiento de cada uno de los nodos que pertenecen al sistema. La red de tráfico aéreo de pasajeros departamental para el año 1992, 2000, 2010 y 2019 ⁷ se visualiza en la Figura 1. El tamaño de cada nodo corresponde a su contribución porcentual en la salida de pasajeros vía aérea a nivel nacional, la ubicación corresponde a la posición geográfica de los departamentos, y el color está determinado por la región a la cual pertenece. Las conexiones representan el tráfico aéreo de pasajeros, el grosor de cada línea denota un mayor volumen, al igual que la intensidad del color.

Se puede apreciar que grandes volúmenes de pasajeros están concentrados en pocos departamentos: Bogotá, Antioquia, Atlántico, Bolívar y Valle del Cauca (conexiones de color rosado), nodos que a su vez sostienen conexiones más fuertes e intensas entre sí. Bogotá juega el papel más importante dentro de la red al concentrar el mayor envío de pasajeros (tamaño del nodo). En contraste con lo anterior, departamentos como Vaupés, Guaviare, Choco, Arauca, Guainía y Vichada, generan una contribución muy pequeña en el total de envío de pasajeros y sus conexiones son muy débiles. Sin embargo, las diferencias en el número de pasajeros transportados observado en la red es reflejo del

⁷Con el objetivo de no redundar los grafos presentados, únicamente se muestran los gráficos de los años 1992, 2000, 2010 y 2019.

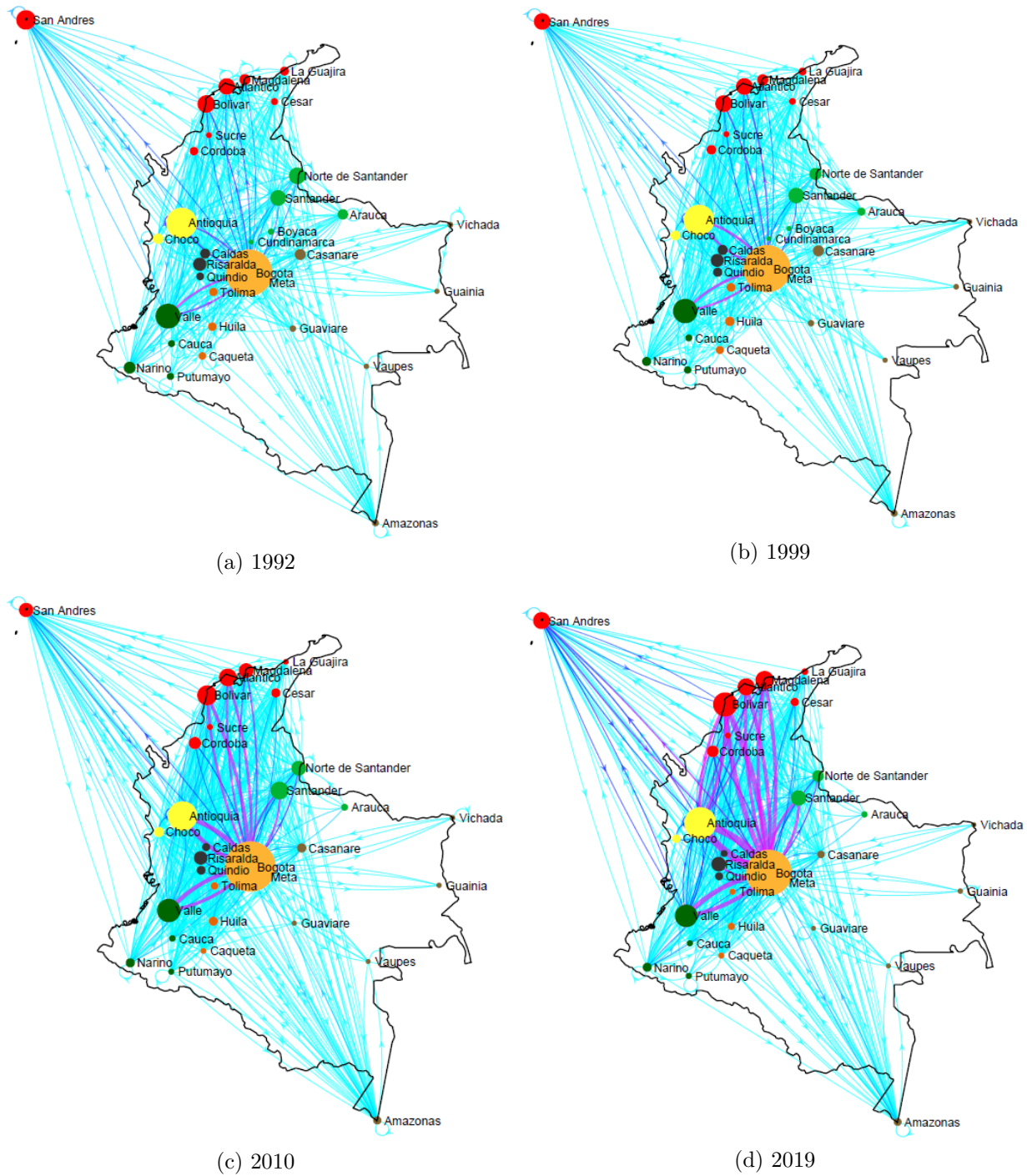


Figura 1: Evolución de la red de tráfico aéreo de pasajeros departamental. El tamaño de cada nodo corresponde a su contribución porcentual en el envío de pasajeros, están ubicados geográficamente y su color está determinado por la región. Las conexiones representan la salida de pasajeros y la flecha indica la dirección del vuelo, el grosor de cada línea denota la cantidad de pasajeros y la flecha indica la dirección del vuelo, el grosor de cada línea denota la cantidad de pasajeros, al igual que la intensidad del color (guiados por la barra lateral). Fuente: cálculos del autor.

número de habitantes de cada departamento. No obstante, existen otros factores que pueden incentivar una movilización hacia y desde un departamento como es el caso de

San Andrés, un nodo con alto atractivo turístico y con un bajo número de habitantes.

La red de tráfico aéreo de pasajeros presenta una estructura de centro - periferia puesto que existe una concentración de los flujos de pasajeros entre un conjunto de departamentos, mientras que nodos con una estructura productiva y turística simple tienden a quedar apartados de la red. Los nodos ubicados en la periferia del sistema están localizados principalmente en las regiones del sur del país (Suroriente y Suroccidente). Por otro lado, la red se puede catalogar como un sistema altamente recíproco⁸ (la cantidad de pasajeros que se dirige desde un nodo i hacia un nodo j es muy cercana a los pasajeros que viajan desde j hasta i .)

De la misma manera, en la Figura 1 se puede apreciar el fortalecimiento de las conexiones y un aumento en la cantidad de pasajeros transportados en cada uno de los años presentados. También se observa la eliminación de los nodos de Cundinamarca y Boyacá del sistema a partir del año 1999. Lo anterior, pudo ser consecuencia de la fuerza gravitacional que ejerce Bogotá sobre los pasajeros que hacen parte de esta zona geográfica, que pudo desincentivar la inversión en Cundinamarca y Boyacá como punto de entrada y/o salida de transporte aéreo.

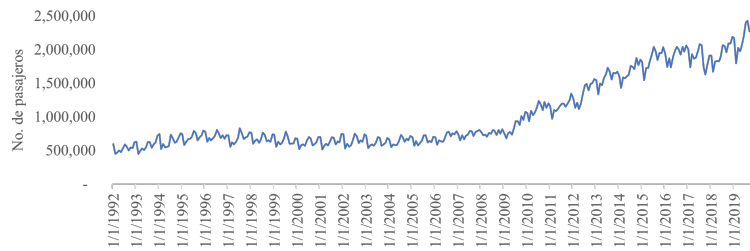
El análisis topológico de redes proporciona herramientas muy útiles para describir el nivel de conectividad de la red y el nivel de integración de los departamentos. Observando la densidad de la red en la Figura 2, para el periodo de análisis esta métrica fluctúa entre un mínimo de 0.34 y un máximo de 0.55, con un promedio de 0.45, lo cual refleja que la red está relativamente bien conectada (teniendo en consideración que los nodos de Cundinamarca y Boyacá dejan de transportar pasajeros en la red).

Comparando el número de pasajeros transportados y la densidad de la red, desde 1992 a 2006 la cantidad de pasajeros permaneció relativamente estable sin cambios significativos. No obstante, la métrica de densidad presenta fluctuaciones importantes que a partir del último trimestre de 1999 (periodo de tiempo que coincide con la crisis financiera del

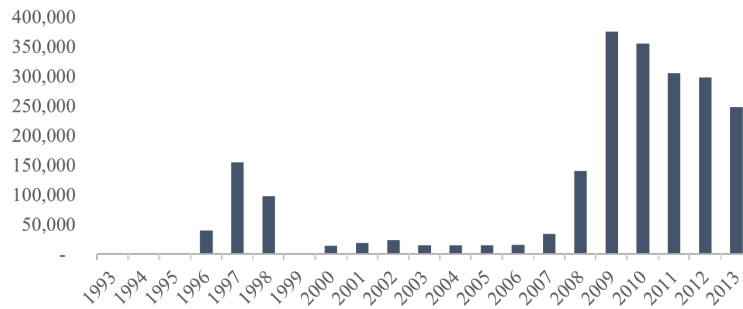
⁸Dada la alta reciprocidad en la red, para efectos del análisis de las estadísticas, gráficamente se muestra únicamente la métrica de entrada para no caer en redundancia sobre los resultados encontrados por entrada y salida de pasajeros.



(a) Densidad



(b) Pasajeros transportados por entrada



(c) Inversión privada en infraestructura aeroportuaria, millones de pesos de 2005

Figura 2: Métrica de densidad, pasajeros transportados por entrada a cada departamento e inversión privada en infraestructura aeroportuaria. Fuente: Aeronáutica Civil y Departamento Nacional de Planeación. Cálculos del autor

periodo 1998 - 1999) con una caída sostenida en el nivel de conectividad de los nodos. Desde 1999 hasta 2006-2007 los departamentos que evidenciaron una reducción en el envío y recepción de pasajeros fueron aquellos ubicados en la región suroccidental del país.

A partir del año 2007 y hasta finales de 2019 se observa (Figura 2) un aumento sostenido y significativo en el número de pasajeros transportados, y de forma paralela, un aumento en la densidad ⁹, que alcanzó un máximo de 0.55 y disminuyó a 0.5 al final del periodo. El aumento en el nivel de conectividad de la red y el mayor volumen de

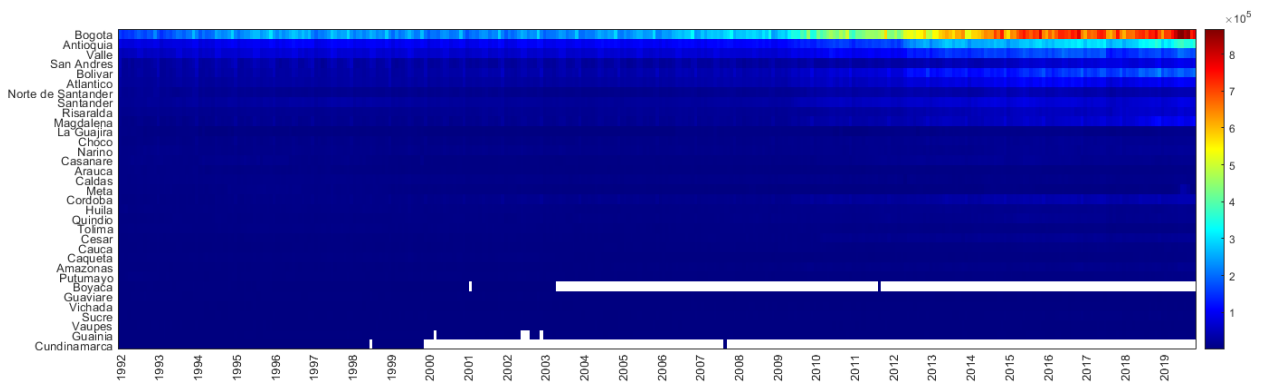
⁹La densidad muestra la conectividad de los nodos, independiente de la intensidad de las conexiones

pasajeros transportados a partir de 2008-2009, pudo estar explicado por el aumento de los niveles de inversión privada en infraestructura aeroportuaria (como es el caso de la inversión en el Aeropuerto Internacional El Dorado en Bogotá, que se entregó en el 2007 al concesionario Opain para su administración, modernización y expansión, operación, explotación comercial y mantenimiento. Ramirez et al. (2021)), coincidiendo con las cifras de inversión privada presentadas en el panel (c) de la Figura 2.

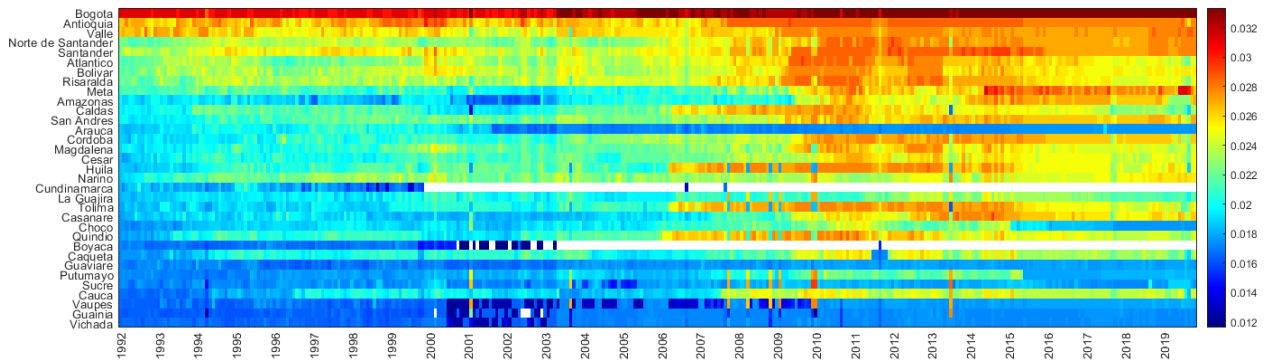
En lo que respecta a las métricas que analizan la centralidad de los nodos, en la Figura 3 se muestra el grado de entrada, la cercanía de entrada, la intermediación e intensidad de entrada para cada departamento y para cada mes durante el periodo de análisis.

En el panel (a) Figura 3, se observan diferencias en la métrica de intensidad entre los nodos durante todo el periodo de tiempo analizado. Sin embargo, este comportamiento es típico de la cantidad de habitantes de cada departamento. Ahora bien, la intensidad de entrada ex-ante al periodo 2008-2009 no presentó cambios significativos en ninguno de los nodos de la red (tonalidades del mapa de calor). Después de este periodo, se intensificó el volumen de pasajeros transportados, principalmente en Bogotá que comparado con los demás nodos tuvo un aumento significativo. Sin embargo, ese aumento no generó una segregación sobre los nodos ubicados en la periferia de la red, dado que el incremento en el número de pasajeros transportados fue proporcional a la población de cada departamento.

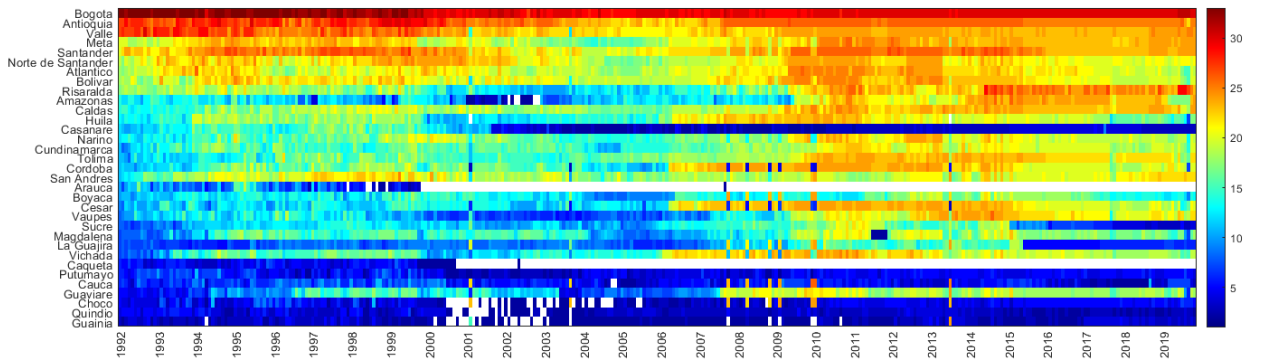
En lo que respecta a la cercanía y al grado de entrada, se observan comportamientos estables en el periodo de tiempo analizado (Figura 3, panel b y c) y desde 1992 hasta 2008-2009, no se observan cambios relevantes en los nodos del sistema. Bogotá, Antioquia, Valle, Norte de Santander, Santander, Atlántico y Bolívar, son los nodos que tienen una mayor centralidad en la red, presentan un número importante de conexiones y tienen una cercanía de redes elevada. En contraste con lo anterior, los nodos del suroccidente del país tienen un menor nivel de conectividad. Ahora bien, durante el periodo 2008-2009 se presentó un punto de inflexión positivo sobre el nivel de integración de los departamentos en la red. En estos años el nivel de conectividad de los nodos aumenta y se equipara (tonalidad roja en el mapa de calor, Figura 3 panel (b) y (c)), las métricas de centralidad dejan de concentrarse en un conjunto de 7 departamentos para pasar a una agrupación de



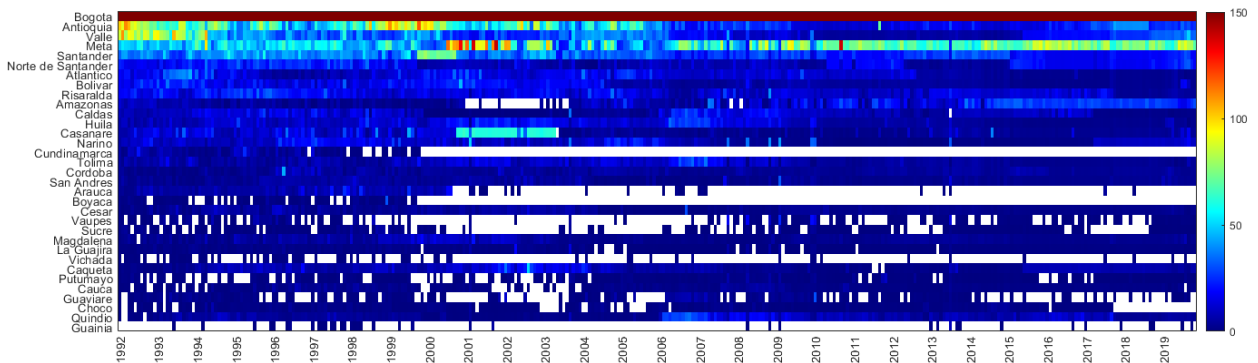
(a) Intensidad de entrada



(b) Cercanía de entrada



(c) Grado de entrada



(d) Intermediación

Figura 3: Métricas de topología de redes. Fuente: cálculos del autor

24 nodos, dejando únicamente 9 departamentos con menores niveles de cercanía y grado de entrada.

Por otro lado, la intermediación es una medida que aproxima la importancia relativa de cada nodo en la red (teniendo en cuenta su relación con los demás departamentos del sistema). En el panel (d) de la Figura 3 se muestra el comportamiento de esta métrica. A partir del año 2008 se reduce la intermediación de Antioquia, Valle del Cauca y Santander. Paralelamente, se evidencia un incremento en la conectividad de los nodos que dependían de Antioquia y del Valle del Cauca para generar conexiones directas con los demás nodos del sistema. Por otro lado, el nodo de Meta presentó un aumento de la intermediación en la red después del año 2008 (en contraste con Antioquia, Valle y Santander), donde empezó a actuar como nodo intermediario entre los nodos del suroccidente y el resto del país. Lo anterior, constituye a Meta como el segundo departamento más central en intermediación, además de Bogotá como nodo eje de la red.

Para analizar el cambio en la estructura de la red se utiliza el Árbol de Cobertura Mínima asociado a la red de transporte aéreo de pasajeros. Este método de representación visual extrae la conexión más fuerte de cada departamento, reduciendo así la dimensionalidad del sistema. En el Árbol los nodos corresponden a los departamentos, su diámetro corresponde a la contribución en el número de pasajeros enviados y su color refleja la región a la cual pertenecen. Las líneas representan la conexión más fuerte de cada nodo.

En la Figura 4 se observa la estructura de red en el año 1992 y 2019. Al inicio del periodo analizado el departamento de Meta ejercía una fuerza gravitacional sobre Vichada, Guainía y Guaviare. Para el año 2019 se observa que estos nodos del suroccidente del país trasladan su conexión principal a Bogotá, lo que muestra un aumento en la conectividad de estos departamentos con el nodo eje de la red (Bogotá). Finalmente, es importante resaltar el rezago del nodo del Chocó que se mantiene como un departamento que no ha logrado desprenderse del eje gravitacional ejercido por Antioquia, impidiéndole conectarse de manera independiente con Bogotá. A través de este método de análisis, no se evidencia un cambio estructural en el sistema y Bogotá se mantiene como el principal nodo de la red.

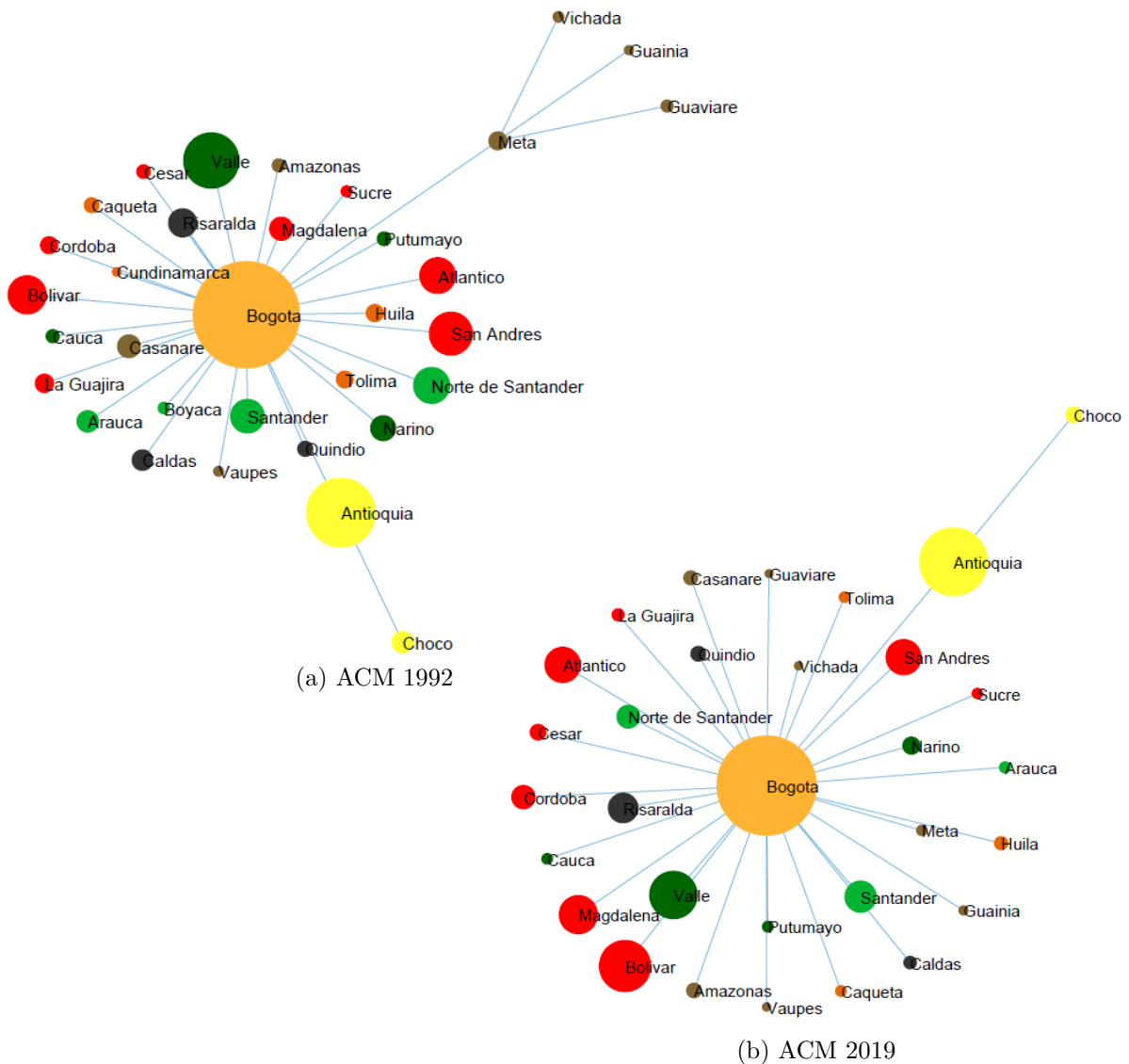
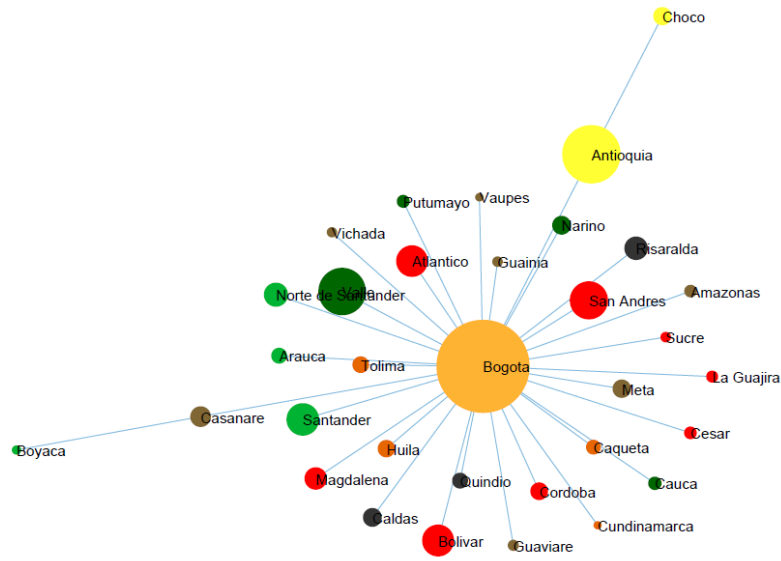
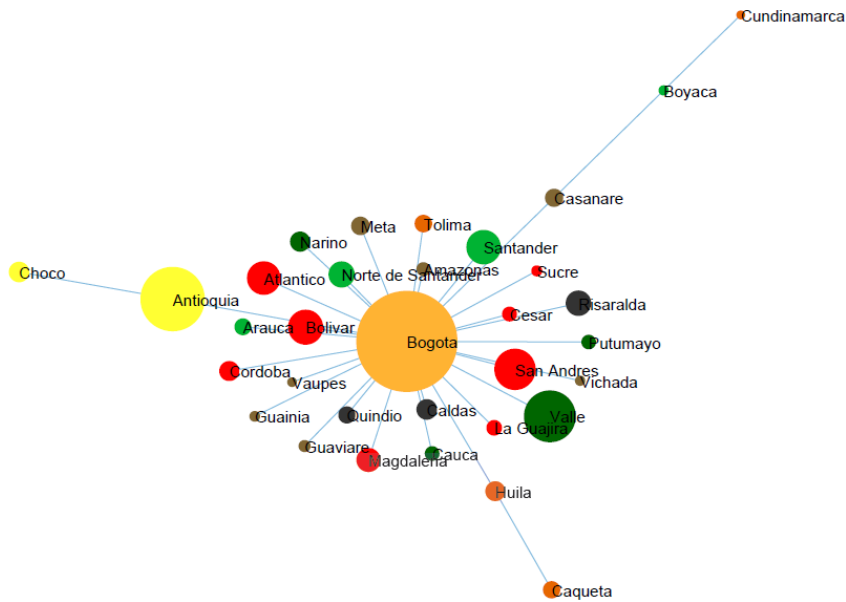


Figura 4: Árbol de Cobertura Mínima (ACM) 1992 y 2019. Los nodos corresponden a los departamentos, el tamaño de cada nodo corresponde a su contribución porcentual en el envío de pasajeros a nivel nacional, su ubicación corresponde a la fuerza gravitacional y su color está determinado por la región a la cual pertenece (Costa Caribe, Centro, Eje Cafetero, Nororiente, Suroriente, Suroccidente Noroccidente y Bogotá D.C). Las conexiones representan la conexión más fuerte resultante de sumar el envío y la recepción de pasajeros transportados por parejas de departamentos. Fuente: cálculos del autor.

Haciendo énfasis en la eliminación de los nodos a partir del años 1999, la Figura 5 muestra el ACM del año 1997 y el ACM del periodo 1998-1999. Cundinamarca desplaza su eje gravitacional desde Bogotá hacia Boyacá y al final del año desaparece de la red. Boyacá establece a Casanare como conexión principal y después desaparece del sistema. Teniendo en cuenta que Boyacá y Cundinamarca no son nodos centrales en el sistema,



(a) ACM 1997



(b) ACM 1998-1999

Figura 5: Árbol de Cobertura Mínima 1997, 1998-1999. Cálculos del autor.

su eliminación no afecta la jerarquía del sistema.

En síntesis, en el periodo de análisis no hubo un cambio estructural de la red, pero se presentó un punto de inflexión con cambios positivos sobre la conectividad del sistema y la centralidad de los nodos (que coincide con un aumento en los niveles de inversión privada en infraestructura aeroportuaria).

A continuación se compara el sistema descrito anteriormente con la hipótesis del

modelo gravitacional, para estudiar los determinantes de la estructura que presenta la red de transporte aéreo de pasajeros, sus componentes jerárquicos y el punto de inflexión positivo identificado durante 2008-2009.

6.2 Estimación del modelo

La ecuación gravitacional en su forma multiplicativa es estimada mediante PPML y sus resultados son reportados en la Tabla 1. Es importante resaltar que la variable dependiente está en niveles, como es sugerido por Santos Silva y Tenreyro (2006) para incluir de manera adecuada la información que el flujo de pasajeros igual cero pueda aportar al modelo. Para desarrollar un análisis más robusto se utiliza el estimador PPML sobre la ecuación gravitacional del periodo de tiempo completo (1992-2019, modelo 1); del inicio del periodo hasta el año ex-post a los aumentos en los niveles de conectividad (1992-2010, modelo 2), y finalmente del periodo de tiempo restante (2010-2019, modelo 3), teniendo en cuenta que el análisis topológico de redes evidenció que durante el 2008-2009 se generó un punto de inflexión positivo en la red.

Los coeficientes estimados del Log PIB son estadísticamente significativos y positivos para cada uno de los modelos, reflejando la importancia del Producto Interno Bruto i como fuerza de generación de salida de pasajeros y del Producto Interno Bruto j como fuerza de atracción. La variable Log distancia geodésica es estadísticamente significativa y positiva. De acuerdo con la literatura este efecto se da por el aumento en la competitividad del transporte aéreo frente al transporte terrestre, con lo cual se concluye que dos departamentos con mayor distancia van a tener un mayor flujo aéreo de pasajeros. Para el periodo 2010-2019 existe un aumento en el coeficiente de la distancia geodésica reflejando una mayor conectividad de los nodos más apartados de la red. Por otro lado, las variables dicótomas de frontera país y mar son positivas, y en el caso de frontera país no son estadísticamente significativas. La intermediación (estadística del análisis topológico de redes) es proxy de los términos de resistencia multilateral. Esta variable es de control y tiene una influencia positiva sobre el flujo aéreo de pasajeros, además es estadísticamente significativa.

Tabla 1. Estimación 1

Variables	(Modelo 1)	(Modelo 2)	(Modelo 3)
	1992-2019	1992-2010	2010-2019
	Xijt	Xijt	Xijt
Log Distancia geodésica	0.391** (0.161)	0.278* (0.159)	0.533*** (0.161)
Log PIB destino	0.699*** (0.0667)	0.628*** (0.0723)	0.742*** (0.0709)
Log PIB origen	0.700*** (0.0666)	0.633*** (0.0724)	0.739*** (0.0702)
Log Área destino	-0.297*** (0.0398)	-0.295*** (0.0461)	-0.287*** (0.0392)
Log Área origen	-0.296*** (0.0399)	-0.297*** (0.0462)	-0.284*** (0.0391)
Frontera país destino	0.0249 (0.202)	0.0685 (0.200)	-0.0234 (0.217)
Frontera país origen	0.0253 (0.202)	0.0725 (0.196)	-0.0250 (0.220)
Mar destino	0.769*** (0.167)	0.710*** (0.181)	0.812*** (0.167)
Mar origen	0.779*** (0.168)	0.721*** (0.181)	0.819*** (0.167)
Log Intermediación destino	0.423*** (0.0468)	0.452*** (0.0486)	0.431*** (0.0552)
Log Intermediación origen	0.419*** (0.0466)	0.444*** (0.0488)	0.430*** (0.0547)
Constante	-4.367*** (1.662)	-1.682 (1.820)	-5.685*** (1.678)
Observaciones	30,492	20,691	10,560
Efectos fijos - Tiempo	Si	Si	Si
Efectos fijos - Departamentos	No	No	No
RESET Test p-valor	0.138	0.073	0.967

Todos los modelos tienen cluster de errores por departamentos

Errores estándar en paréntesis

*** $p < 0.01$, ** $p < 0.05$, * $p < 0.1$

Para evaluar la forma funcional adecuada de la esperanza condicional y por tanto la consistencia de los estimadores, Santos Silva y Tenreiro (2006) proponen el Ramsey RESET test que consiste en estimar una regresión auxiliar en la que se incluyen los valores ajustados elevados al cuadrado de la regresión original y los regresores originales, y luego se realiza una prueba de significancia de esta nueva variable.

Tabla 2. Estimación 2, Anderson y Van Wincoop

	(Modelo 4)	(Modelo 5)	(Modelo 6)
	1992-2019	1992-2010	2010-2019
	Xijt	Xijt	Xijt
Log Distancia geodésica	0.398** (0.166)	0.299* (0.165)	0.516*** (0.164)
Constante	5.79*** (1.14)	5.01*** (0.90)	4.6*** (1.17)
Observaciones	30,492	20,691	10,560
Efectos fijos - Tiempo	Si	Si	Si
Efectos fijos - Departamentos	Si	Si	Si
RESET Test p-valor	0.578	0.878	0.168

Todos los modelos tienen cluster de errores por departamentos

Errores estándar en paréntesis

*** $p < 0.01$, ** $p < 0.05$, * $p < 0.1$

Para los modelos estimados (1), (2) y (3), los resultados de estimación del RESET test arrojan conclusiones importantes. El p-valor del test para cada regresión es reportado en la Tabla 1 y la hipótesis de forma funcional incorrecta es rechazada, lo que asegura que los estimadores son consistentes.

Para dar robustez al modelo, se estimó la especificación propuesta por Anderson y Van Wincoop (2003) (Tabla 2), la cual consiste en un modelo que incluye efectos fijos de tiempo por departamento de origen y destino, de tal manera que se controle por todas las variables observables y no observables que están afectando al flujo de pasajeros entre i y j . Lo anterior incluye un control adecuado sobre los términos de resistencia multilateral.

Los parámetros estimados de esta especificación son reportados en los modelos (4), (5) y (6) de la Tabla 2. Las elasticidades de los modelos (4), (5) y (6) de efectos fijos son cercanas a los modelos (1), (2) y (3), respectivamente. Los coeficientes de la distancia geodésica no varían de manera significativa. El p-valor del RESET test para los modelos (4), (5) y (6) son reportados en la Tabla 2 y la hipótesis de forma funcional incorrecta es rechazada, lo que asegura que los estimadores son consistentes.

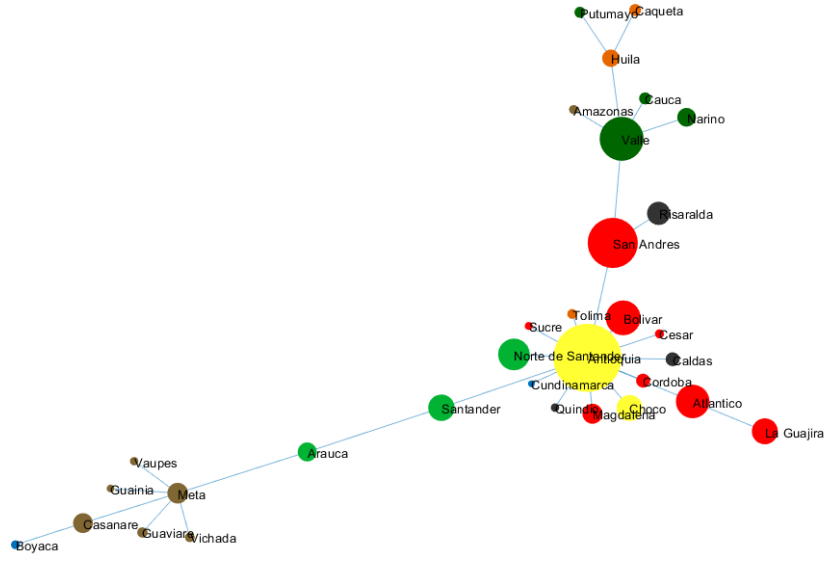
6.3 Estructura y conectividad del sistema sin el nodo de Bogotá

El análisis topológico de redes evidenció la evolución del sistema y los puntos de inflexión en la conectividad de los nodos, así como las diferencias en la intensidad del flujo de pasajeros entre los departamentos. Asimismo se observó que la estructura jerárquica de la red es liderada por Bogotá, nodo central del sistema y sobre el cual se concentra el flujo aéreo de pasajeros en Colombia. En la misma línea, la estimación del modelo gravitacional evidenció una reducción en el coeficiente de la distancia geodésica, que es proxy de los costos de transporte bilateral entre dos nodos. Teniendo en cuenta lo anterior, se realiza un análisis topológico de redes y la estimación del modelo gravitacional sin incluir el nodo de Bogotá. Esto con el objetivo de evidenciar cuál es la estructura y conectividad entre los departamentos en ausencia del nodo eje de la red. Asimismo este análisis permite exponer si la reducción de los costos de transporte bilateral está asociada únicamente a la centralidad y conexiones que genera el nodo de Bogotá en el sistema, o es un resultado generalizado de las conexiones bilaterales que se efectúan entre los departamentos de la red.

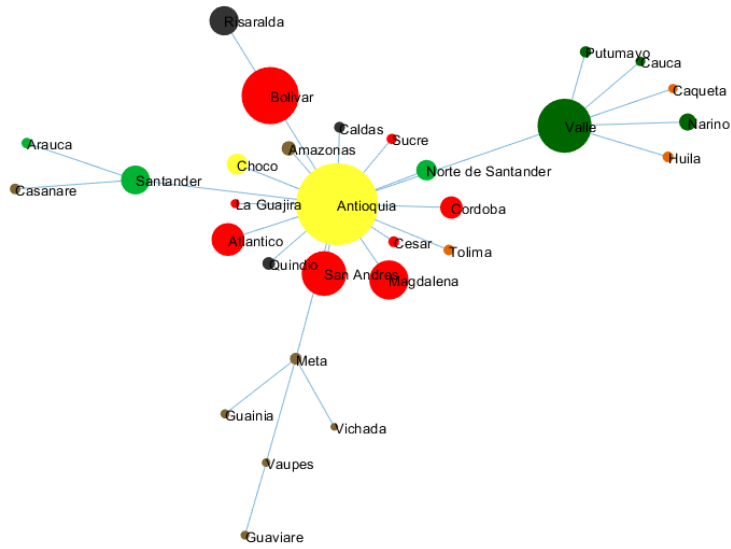
Sobre los resultados, únicamente se muestra el efecto sobre los árboles de cobertura mínima (análisis estructural), teniendo en consideración que el análisis topológico de redes sin el nodo de Bogotá generó una disminución directa en la intensidad de las conexiones del sistema, sin cambios significativos en las medidas de centralidad; impactos previstos en el análisis.

La estructura del sistema aéreo de pasajeros presenta cambios relevantes al remover el nodo de Bogotá del análisis. En la Figura 6 se observa la existencia de agrupaciones entre los nodos pertenecientes a una misma región, como es el caso de los departamentos ubicados al sur oriente (Meta, Guainía, Vaupés, Vichada, y Guaviare) y occidente del país (Valle del Cauca, Nariño y Cauca). Asimismo, Antioquia se presenta como nodo eje de la red y agrupa las principales conexiones con los departamentos del sistema.

En la misma línea, entre el año 1992 y 2019 no se evidencia un cambio estructural en las conexiones del sistema, las agrupaciones entre los departamentos mantienen la misma



(a) ACM 1992 sin Bogotá



(b) ACM 2019 sin Bogotá

Figura 6: Árbol de Cobertura Mínima 1992 - 2019. Cálculos del autor.

jerarquía y los nodos de Antioquia, Valle, Meta y Santander son los nodos que agrupan las conexiones en cada región. Asimismo, se observa una mayor cohesión entre los nodos del sistema, producto del aumento en los niveles de conectividad.

Tabla 3. Estimación 3 sin Bogotá

Variables	(Modelo 7)	(Modelo 8)	(Modelo 9)
	1992-2019	1992-2010	2010-2019
	Xijt	Xijt	Xijt
Log Distancia geodésica	-0.00173 (0.0680)	-0.114* (0.0650)	0.136* (0.0741)
Log PIB destino	0.379*** (0.110)	0.282** (0.119)	0.441*** (0.112)
Log PIB origen	0.379*** (0.112)	0.276** (0.121)	0.445*** (0.114)
Log Área destino	-0.195** (0.0783)	-0.205** (0.0828)	-0.171** (0.0792)
Log Área origen	-0.188** (0.0798)	-0.197** (0.0844)	-0.166** (0.0801)
Frontera país destino	-0.151 (0.283)	-0.00254 (0.296)	-0.310 (0.296)
Frontera país origen	-0.149 (0.285)	0.000849 (0.299)	-0.310 (0.295)
Mar destino	1.549*** (0.178)	1.322*** (0.184)	1.761*** (0.195)
Mar origen	1.568*** (0.177)	1.329*** (0.183)	1.789*** (0.194)
Log Intermediación destino	0.445*** (0.0549)	0.472*** (0.0624)	0.456*** (0.0641)
Log Intermediación origen	0.440*** (0.0546)	0.463*** (0.0628)	0.453*** (0.0635)
Constante	1.893 (1.297)	4.438*** (1.204)	-1.409 (1.350)
Observaciones	28,672	19,456	10,240
Efectos fijos - Tiempo	Si	Si	Si
Efectos fijos - Departamentos	No	No	No
RESET Test p-valor	0.0	0.213	0.014

Todos los modelos tienen cluster de errores por departamentos

Errores estándar en paréntesis

*** $p < 0.01$, ** $p < 0.05$, * $p < 0.1$

Por otro lado, los resultados del modelo gravitacional sin Bogotá son presentados en la Tabla 3, encontrando resultados concluyentes (la estimación de Anderson y Van

Wincoop sin Bogotá es reportada en la Tabla 4 del Apéndice y los resultados respaldan los hallazgos presentados en la Tabla 3). En los modelos 7 y 8 los coeficientes de la distancia geodésica son negativos, evidenciando un impacto negativo sobre el flujo de pasajeros ante incrementos en la distancia, así como un aumento de los costos de transporte bilateral en los periodos 1992-2019 y 1992-2010. Ahora bien, el modelo 9 (2010-2019) evidencia que en este periodo de tiempo existe un efecto positivo en el flujo aéreo de pasajeros ante aumentos en la distancia entre dos nodos.

Con estos resultados se fortalece la evidencia sobre la importancia de Bogotá en la red. El análisis sin este nodo permite evidenciar el comportamiento aproximado del sistema ante una falla en la operación del Aeropuerto el Dorado ante eventos de fuerza mayor prolongados, mostrando la necesidad de nuevas inversiones de respaldo en los aeropuertos de Antioquia, Valle del Cauca, Meta y Santander, nodos que evidenciaron ser los ejes principales o secundarios de la red en ausencia de Bogotá. El modelo gravitacional evidenció un aumento generalizado en la competitividad de la red en el periodo 2010-2019, que reduce los costos de transporte bilateral entre dos nodos y por tanto, mayores distancias reflejan en promedio una mayor cantidad de pasajeros transportados.

7 Conclusiones

La red de tráfico aéreo de pasajeros en Colombia es una red con densidad media. Se evidencia una concentración de los flujos en unos pocos nodos (departamentos), lo cual implica una estructura jerárquica en la red que es el reflejo de la densidad poblacional de cada departamento, la cantidad de habitantes y los atractivos turísticos. Se evidencia que la red presenta niveles promedio de conectividad altos. Sin embargo, existen diferencias en la intensidad del flujo de pasajeros, generando una estructura de centro-periferia dentro de la red. Adicionalmente, la estructura jerárquica de la red muestra departamentos más relevantes como Bogotá, Antioquia, Atlántico, Valle del Cauca, Bolívar y Meta.

Durante el periodo 2008 y 2009 la red presentó un punto de inflexión en el nivel de conectividad e integración de los departamentos, periodo que coincidió con un crecimiento

significativo de la inversión privada en infraestructura aeroportuaria en Colombia. Al final del periodo de análisis, las métricas de centralidad dejan de concentrarse principalmente en un conjunto de 7 departamentos para pasar a una agrupación de 24 nodos, dejando únicamente 9 departamentos con menores niveles de cercanía y grado de entrada.

Bogotá agrupa las principales conexiones del sistema, es el nodo que ocupa la posición central en la red y se evidencia la importancia de fortalecer la conectividad en los aeropuertos de Antioquia, Valle del Cauca, Meta y Santander, ante la posibilidad de eventos de fuerza mayor prolongados en Bogotá que le impidan operar con normalidad.

Adicionalmente, se analizan los determinantes de la estructura de la red por medio del modelo gravitacional de pasajeros donde el Producto Interno Bruto es decisivo como fuerza de generación y atracción de pasajeros, y la distancia entre dos departamentos impulsa el tráfico aéreo debido a la eficacia y competitividad frente al transporte terrestre de pasajeros.

La ecuación gravitacional explica el flujo de pasajeros entre dos nodos y los resultados de estimación cambian según el periodo de tiempo, reflejando el comportamiento positivo en el número de pasajeros transportados y la conectividad de la red durante el periodo 2008-2009. El PIB de origen y destino, la distancia entre los departamentos y tener frontera marítima aumenta la cantidad de pasajeros transportados, nodos más extensos en superficie transportan menos pasajeros y los departamentos fronterizos tienen impactos distintos según el periodo de tiempo analizado.

Finalmente, en lo que respecta a recomendaciones de política, la inversión en infraestructura puede representar una mejora en la conectividad de la red. Los datos muestran que Bogotá como principal nodo de la red tiene estadísticas crecientes lo que denota una asignación de rutas eficientes. Sin embargo, nuevas inversiones en nodos centrales de la red son esenciales y mejorarían la conectividad del sistema. Asimismo, es relevante generar inversiones en Chocó dado que se mantiene como un departamento que no ha logrado desprenderse del eje gravitacional ejercido por Antioquia, impidiéndole conectarse de manera independiente con el principal nodo del país que es Bogotá.

Referencias

Almanza, A. S. (2016). Sistema de ciudades y redes urbanas en los modelos económicos de México. *Problemas del desarrollo*, 47(184), 7-34.

Anderson, J., y E. van Wincoop (2003), "Gravity with Gravititas: A Solution to the Border Puzzle," *American Economic Review* 93

Ávila Aguirre, H. (2017). El modelo de gravedad y los determinantes del comercio entre Colombia y sus principales socios económicos. *Revista Civilizar De Empresa Y Economía*, 7(12), 89-121.

Buongiorno, J. (2016). Gravity models of forest products trade: applications to forecasting and policy analysis. *Forestry*, 89(2), 117-126.

Burger M, Oort Fv, Linders G (2009) "On the specification of the gravity model of trade: Zeros, excess zeros and zero-inflated estimation". Erasmus Research Institute of Management (ERIM)

Castro, E. (2014). Relaciones comerciales de la producción industrial en el mercado interno colombiano. *Ecos de Economía*, 18(39).

Cepeda F, Gamboa F, León C, Rincón H (2019). The evolution of world trade from 1995 to 2014: A network approach. *The Journal of International Trade Economic Development*, Taylor Francis Journals, vol. 28(4), pages 452-485, May.

De Benedictis L, Tajoli L (2011) "The world trade network". *World Econ* 34:1417–1454

Dueñas M, Fagiolo G (2013), "Modeling the International-Trade Network: a gravity approach.", Springer

Kabir, M., Salim, R., Al-Mawali, N. (2017). The gravity model and trade flows: Recent developments in econometric modeling and empirical evidence. *Economic analysis and policy*, 56, 60-71.

Lundmark, R. (2018). Analysis and projection of global iron ore trade: a panel data gravity model approach. *Mineral Economics*, 31(1-2), 191-202.

Narayan, S., Nguyen, T. T. (2016). Does the trade gravity model depend on trading partners? Some evidence from Vietnam and her 54 trading partners. *International Review of Economics Finance*, 41, 220-237.

National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. (2012). *Preserving and Protecting Freight Infrastructure and Routes*. Washington, DC: The National Academies Press.

Martinez-Zarzoso, I. (2013) The log of gravity revisited. *Applied Economics*

Martínez, D. R. A., Díaz, C. E. G. (2014). Evolución de la red de comercio internacional: una aproximación a través de la Teoría de Redes Sociales (1970-2011) (No. 013131). UN-RCE-CID.

Minford, P., Xu, Y. (2017). Classical or Gravity? Which trade model best matches the UK facts?. *Open Economies Review*, 1-33.

Montenegro, C. E., Pereira, M., Soloaga, I. (2011). El efecto de China en el comercio internacional de América Latina. *Estudios de economía*, 38(2), 341-368.

Newman, M.E.J (2010) *Networks: An Introduction*. Oxford University Press, New York.

Ortiz, D. y Villarreal, S. (2016). Transporte y mercado interno en Colombia: una con-

tribución a un debate hasta ahora desconocido, 1928-1950. *tiempo&economía*, 3(1), 83-107

Ramírez, M.; Collazos, M.; García, J.; Hahn, L.; Melo, L.; Montenegro, A.; Montes, E.; Lancheros, P.; Toro, J.; Zárata, H. (2021). La inversión en infraestructura de transporte y la economía colombiana. *Ensayos sobre Política Económica (ESPE)*, núm. 99, mayo, DOI: 10.32468/espe.99

Ranilović, N. (2017). The effects of economic integration on Croatian merchandise trade: a gravity model study. *Comparative Economic Studies*, 59(3), 382-404.

Santos Silva, J.M.C. y Tenreyro, S. (2011), “Further simulation evidence on the performance of the Poisson pseudo-maximum likelihood estimator”, *Economic letters*

Santos Silva, J.M.C. y Tenreyro, S. (2006), “The Log of Gravity”, *Review of Economics and Statistics*

Tinbergen, Jan. (1962). “An Analysis of World Trade Flows,” *Shaping the World Economy*

Macário et al (2010), *El Impacto De La Crisis Económica En El Sector Del Transporte Aéreo De La UE*.

Wang, H. G., Baird-Zars, B. (2012). Competitiveness and Connectivity across the Colombian Urban System. *Colombia Urbanization Review*, 59.

Wei, S.(1996), “Intra-national versus International Trade: How Stubborn Are Nation States in Globalization?” NBER working paper no. 5331.

World Trade Organization (2013), “An Advance Guide to trade Policy Analysis: The Structural Gravity Model ”

Apéndice

Tabla 4. Departamentos

Departamentos	Municipio/Capital ^{b/}
Amazonas	Leticia
Antioquia	Medellín
Arauca	Arauca
Atlántico ^{a/}	Barranquilla
Bogotá D.C	Bogotá D.C
Bolívar ^{a/}	Cartagena
Boyacá	Tunja
Caldas	Manizales
Caquetá	Florencia
Casanare	Yopal
Cauca	Popayán
Cesar	Valledupar
Chocó	Quibdó
Córdoba	Montería
Cundinamarca	Soacha
Guainía	Puerto Inírida
Guaviare	San José del Guaviare
Huila	Neiva
La Guajira ^{a/}	Riohacha
Magdalena ^{a/}	Santa Marta
Meta	Villavicencio
Nariño	Pasto
Norte de Santander	Cúcuta
Putumayo	Mocoa
Quindío	Armenia
Risaralda	Pereira
Santander	Bucaramanga
Sucre ^{a/}	Sincelejo
Tolima	Ibagué
Valle del Cauca ^{a/}	Cali
Vaupés	Mitú
Vichada	Puerto Carreño

a/Departamentos con puerto marítimo

b/Punto de referencia para medir la distancia geodésica

Tabla 5. Estimación 4, Anderson y Van Wincoop sin Bogotá

	(Modelo 10) 1992-2019 Cluster Xijt	(Modelo 11) 1992-2010 Cluster Xijt	(Modelo 12) 2010-2019 Cluster Xijt
Log Distancia geodésica	0.0468 (0.0414)	-0.0693* (0.0381)	0.197*** (0.0391)
Constante	4.574*** (0.635)	6.403*** (0.350)	3.768*** (0.550)
Observaciones	28,672	19,456	9,920
Efectos fijos - Tiempo	Si	Si	Si
Efectos fijos - Departamentos	Si	Si	Si
RESET Test p-valor	0.00	0.168	0.00

Todos los modelos tienen cluster de errores por departamentos

Errores estándar en paréntesis

*** $p < 0.01$, ** $p < 0.05$, * $p < 0.1$