



# UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA **UNAL**

FACULTAD DE CIENCIAS  
PROGRAMA CURRICULAR DE ESTADÍSTICA

## **ANÁLISIS ESTRUCTURAL Y ESPACIAL DE LA RED HOTELERA DE BOGOTÁ MEDIANTE TEORÍA DE REDES Y MODELOS BAYESIANOS USANDO R**

### **AUTOR:**

Leonardo Andrés Rodríguez Valenzuela  
Estudiante de pregrado del Programa Curricular de Estadística

### **DOCENTE:**

Danna Lesley Cruz Reyes

### **CURSO:**

Programación y Lenguajes Estadísticos

Bogotá – Colombia  
Diciembre de 2025

## **Resumen**

Este trabajo analiza la estructura espacial de la red de hoteles en la ciudad de Bogotá mediante herramientas de teoría de redes complejas y modelación espacial bayesiana. A partir de información geográfica y calificaciones promedio de los establecimientos, se construyó un grafo no dirigido basado en el modelo de  $k$  vecinos más cercanos, utilizando la distancia de Haversine como métrica de proximidad.

Sobre esta red se evaluaron métricas de conectividad, centralidades, estructura comunitaria, eficiencia de rutas mínimas y patrones de homofilia por calidad. Los resultados evidencian una red completamente conexa, con grado medio intermedio, estructura modular bien definida y un comportamiento policéntrico coherente con la organización urbana de la ciudad. El análisis de centralidades identifica hoteles que cumplen un rol estratégico como nodos puente entre diferentes zonas.

Adicionalmente, se incorporó un enfoque bayesiano espacial mediante modelos autorregresivos condicionales (CAR), permitiendo capturar dependencias espaciales latentes entre localidades. Este enfoque complementa el análisis de redes al revelar patrones territoriales estructurados en la distribución de los hoteles. En conjunto, los resultados caracterizan la red hotelera de Bogotá como un sistema eficiente, integrado y moderadamente jerarquizado, útil para el análisis cuantitativo de sistemas urbanos.

## abstract

This study analyzes the spatial structure of the hotel network in Bogotá using tools from complex network theory and Bayesian spatial modeling. Based on geographic information and average user ratings, an undirected graph was constructed using a  $k$ -nearest neighbors model with Haversine distance as the proximity metric.

The network was analyzed in terms of connectivity, centrality measures, community structure, shortest-path efficiency, and homophily by quality. The results reveal a fully connected network with an intermediate average degree, a well-defined modular structure, and a polycentric organization consistent with the city's urban layout. Centrality analysis highlights hotels that act as structural bridges between different urban zones.

Additionally, a Bayesian spatial approach based on conditional autoregressive (CAR) models was implemented to capture latent spatial dependence across localities. This approach complements the network perspective by identifying structured territorial patterns beyond local proximity. Overall, the hotel network of Bogotá is characterized as an efficient, integrated, and moderately hierarchical urban system.

# Índice

<b>1. Introducción</b>	<b>5</b>
<b>2. Metodología</b>	<b>5</b>
2.1. Construcción del grafo de proximidad . . . . .	6
<b>3. Análisis estructural de la red</b>	<b>6</b>
3.1. Construcción del grafo de proximidad . . . . .	6
3.2. Grado y distribución de grado . . . . .	8
3.3. Componentes conexos . . . . .	8
3.4. Centralidades: grado, cercanía y betweenness . . . . .	8
3.5. Coeficiente de agrupamiento . . . . .	9
3.6. Caminos más cortos y diámetro . . . . .	9
3.7. Comunidades y modularidad . . . . .	10
3.8. Distribución de grados . . . . .	11
<b>4. Rutas, subgrafos y sensibilidad estructural de la red de hoteles en Bogotá</b>	<b>13</b>
4.1. Datos generales . . . . .	13
4.2. Ruta óptima inicial (Dijkstra) . . . . .	13
4.3. Subgrafo inducido por atributo . . . . .	14
4.4. Análisis de sensibilidad: impacto de remover nodos clave . . . . .	14
<b>5. Clusters y correlaciones</b>	<b>15</b>
5.1. Construcción y características generales . . . . .	15
5.2. Detección de comunidades y modularidad . . . . .	15
5.3. Relación comunidad-rating y homofilia . . . . .	16
5.4. Visualización de clusters . . . . .	17
5.5. Comparación de modularidad al variar la densidad . . . . .	18
5.6. Síntesis interpretativa . . . . .	18
<b>6. Análisis bayesiano espacial</b>	<b>19</b>
6.1. Interpretación de los efectos espaciales . . . . .	20
<b>7. Resultados y discusión</b>	<b>21</b>
<b>8. Conclusiones</b>	<b>22</b>

## Índice de figuras

1.	Red de hoteles en Bogotá . . . . .	7
2.	Distribución de grado- Red de hoteles de Bogotá . . . . .	11
3.	Cdf del Grado- Red de hoteles en Bogotá . . . . .	12
4.	Red de hoteles en Bogotá, coloreada por comunidades detectadas mediante maximización de modularidad ( $Q = 0,67$ ). . . . .	17
5.	Distribución espacial de las medias posteriores de los efectos espaciales $\hat{\phi}_i$ estimados mediante un modelo CAR. . . . .	20

## 1. Introducción

Este proyecto analiza la estructura espacial de la red de hoteles en la ciudad de Bogotá mediante herramientas de teoría de redes complejas. A partir de datos geográficos y calificaciones promedio de los establecimientos, se construyó un grafo no dirigido utilizando el modelo de  $k$  vecinos más cercanos ( $k$ -NN) con distancia de Haversine como métrica de proximidad. Sobre esta red se evaluaron métricas de conectividad local y global, centralidades, estructura comunitaria, eficiencia en rutas mínimas, resiliencia estructural y patrones de homofilia por calidad.

Los resultados muestran una red cohesionada, con grado medio intermedio, una única componente gigante y una estructura modular bien definida ( $Q \approx 0.53$ ), evidenciando la organización de la oferta hotelera en clusters urbanos coherentes con la geografía de la ciudad. El análisis de centralidades identifica hoteles estratégicos que actúan como nodos puente entre diferentes zonas, cuya eliminación puede fragmentar la red. Asimismo, la longitud promedio de los caminos y el diámetro indican una conectividad eficiente a escala urbana. La assortatividad por calificación revela una homofilia leve, sugiriendo una segmentación suave por calidad sin aislamiento extremo entre comunidades.

Adicionalmente, se incorporó un enfoque bayesiano espacial mediante modelos autorregresivos condicionales (CAR), que permite capturar la dependencia espacial entre localidades y estimar efectos latentes asociados a la distribución territorial de los hoteles. Este análisis complementa la perspectiva de redes al identificar patrones espaciales estructurados que no se explican únicamente por la proximidad local entre establecimientos.

En conjunto, el estudio caracteriza la red hotelera de Bogotá como un sistema policéntrico, eficiente y moderadamente jerarquizado, donde la proximidad geográfica y la estructura urbana determinan los patrones de conectividad. El enfoque propuesto constituye una aproximación cuantitativa útil para el análisis de sistemas urbanos y puede extenderse a estudios temporales, comparativos entre ciudades o integrados con variables socioeconómicas.

El objetivo es identificar estructuras internas como comunidades, medir homofilia por atributos y analizar la robustez del sistema ante la eliminación de nodos clave.

## 2. Metodología

Se utilizó un conjunto de datos conformado por 60 establecimientos hoteleros localizados en la ciudad de Bogotá, recopilado a partir de información pública disponible en Google. Para cada hotel se dispone de su nombre, calificación promedio otorgada por los usuarios y número de reseñas asociadas. Adicionalmente, el conjunto de datos incluye información de localización geográfica (latitud y longitud), dirección y categoría del establecimiento, lo que permite analizar de manera conjunta la reputación en línea y la distribución espacial de la oferta hotelera en el entorno urbano.

Antes de la construcción de la red, se realizó un proceso de depuración para eliminar registros con información geográfica incompleta, de modo que únicamente se consideraron hoteles con coordenadas válidas. A partir de esta base depurada se construyó un grafo simple no dirigido, en el cual cada nodo representa un hotel y conserva como atributos su nombre y calificación promedio.

La estructura de adyacencia se definió mediante un esquema de  $k$ -vecinos más cercanos, conectando cada hotel con los  $k$  establecimientos geográficamente más próximos. La identificación de vecinos se realizó a partir de las coordenadas de latitud y longitud utilizando la distancia de Haversine como métrica de proximidad. En este contexto, las aristas representan cercanía espacial entre hoteles, y el grafo resultante modela la red hotelera como una estructura que refleja tanto la organización geográfica local como posibles patrones de concentración territorial. Sobre esta red se calcularon posteriormente métricas estructurales como grado, densidad, componentes conexas y centralidades, con el fin de caracterizar su conectividad y explorar la formación de conglomerados en el espacio urbano. .

## 2.1. 2.1 Construcción del grafo de proximidad

Los datos provienen de [fuente de los datos: Google Places, Kaggle, etc.]. Cada fila representa un nodo con atributos (por ejemplo, coordenadas, calificación o tipo). La red se construye usando el modelo de vecinos más cercanos (k-NN) y la distancia haversine:

```
import pandas as pd, numpy as np, networkx as nx
from sklearn.neighbors import NearestNeighbors

df = pd.read_csv("datos.csv")
coords = np.radians(df[["lat","lon"]])
nbrs = NearestNeighbors(n_neighbors=6, metric="haversine").fit(coords)
dist, idx = nbrs.kneighbors(coords)
```

Cada hotel se conecta con sus seis vecinos geográficamente más cercanos, lo que da lugar a una red no dirigida con conectividad intermedia. Esta elección de  $k = 6$  produce una estructura que no es completamente densa ni excesivamente dispersa: cada establecimiento mantiene vínculos con un conjunto limitado de hoteles próximos, reflejando de manera realista la proximidad espacial dentro del entorno urbano de Bogotá.

La red resultante es completamente conexa y presenta un grado medio moderado, lo que permite capturar patrones locales de concentración hotelera sin introducir enlaces artificiales de larga distancia. En consecuencia, el grafo obtenido es adecuado para el análisis de comunidades, centralidades y accesibilidad espacial, preservando tanto la estructura local como la conectividad global del sistema.

## 3. Análisis estructural de la red

### 3.1. Construcción del grafo de proximidad

La red analizada se construyó a partir de un conjunto de datos recopilado mediante la plataforma Google Places o Yelp, exportado en formato `hotel_bogota.csv`. Cada registro corresponde a un establecimiento tipo hotel e incluye su nombre, coordenadas geográficas (latitud y longitud), calificación promedio (*rating*) y número de reseñas reportadas por los usuarios.

A partir de esta información se definió un grafo no dirigido  $G = (V, E)$  en el que cada nodo representa un hotel y cada arista une a dos hotel espacialmente próximos. La relación de vecindad se determinó mediante el modelo de *k vecinos más cercanos* (k-NN), empleando la distancia haversine (en radianes) como métrica de proximidad. El parámetro  $k$  controla la densidad del grafo: valores mayores generan más enlaces y, por tanto, una red más densa y conectada.

## Red de hoteles (k vecinos más cercanos)

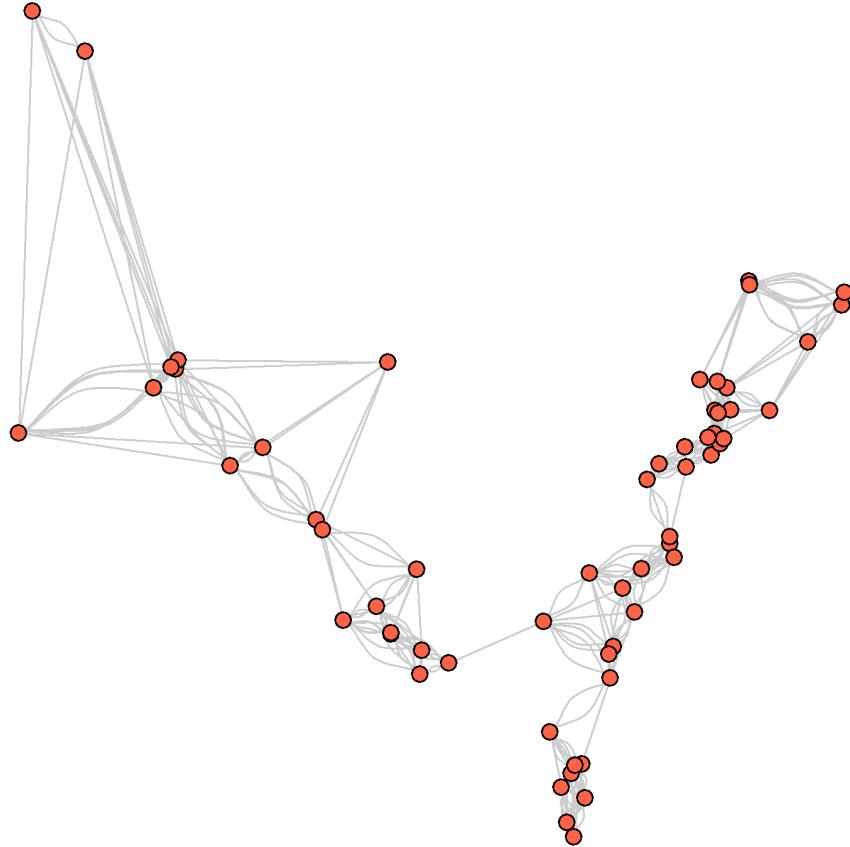


Figura 1: Red de hoteles en Bogotá

En la Figura 1 se obtiene una red no dirigida de 60 nodos y aproximadamente 360 aristas, con un grado medio de 12 (mediana 12, con valores que oscilan entre 6 y 16). Esta configuración implica una densidad aproximada de 0.20, lo que indica una red considerablemente más densa que una estructura puramente dispersa. En promedio, cada hotel mantiene vínculos con un número elevado de establecimientos cercanos, reflejando una fuerte proximidad local y una alta concentración espacial de la oferta hotelera en el entorno urbano de Bogotá.

En términos de conectividad global, la red hotelera conforma un único componente conexo, sin presencia de hoteles aislados ni subgrupos desconectados. La combinación de un grado medio elevado y un diámetro reducido indica una estructura altamente integrada, donde cualquier hotel puede alcanzarse desde otro mediante un número muy pequeño de intermediaciones. La existencia de nodos con grados y centralidades superiores sugiere la presencia de hubs locales de proximidad, que refuerzan la cohesión del sistema y facilitan

la accesibilidad entre distintas zonas urbanas.

Las conexiones representadas en la red no reflejan relaciones funcionales o comerciales entre hoteles, sino cercanía geográfica dentro del tejido urbano. En este sentido, el grafo modela la estructura espacial de la oferta hotelera de Bogotá, permitiendo analizar patrones de concentración territorial, conectividad urbana y la organización de los establecimientos en corredores y zonas de alta densidad turística.

### 3.2. Grado y distribución de grado

El grado  $k_i$  de un nodo  $i$  representa el número de vecinos directos con los que está conectado:

$$k_i = \sum_j A_{ij},$$

donde  $A$  es la matriz de adyacencia del grafo. El análisis del grado permite caracterizar la conectividad local de la red y entender cómo se agrupan los establecimientos en el espacio urbano.

En esta red, el grado medio es de  $\bar{k} = 12$ , lo que indica que, en promedio, cada hotel se conecta con alrededor de doce vecinos. Este resultado es consistente con una red de proximidad relativamente más densa, donde las conexiones locales son abundantes y la accesibilidad topológica aumenta.

La mediana de 12 sugiere que la distribución del grado está centrada y que una fracción amplia de hoteles comparte un nivel de conectividad similar. No obstante, se observan nodos con grados de hasta 16, lo cual apunta a zonas de alta concentración hotelera o corredores urbanos estratégicos. Estos establecimientos operan como hubs locales, reforzando la cohesión interna de sus áreas y facilitando la conectividad entre subzonas cercanas.

### 3.3. Componentes conexos

Para evaluar la conectividad global de la red se analizaron sus componentes conexas, entendidas como los subconjuntos de hoteles que pueden conectarse entre sí mediante al menos un camino. El análisis evidenció la existencia de una única componente conexa que agrupa a la totalidad de los 60 hoteles considerados, sin presencia de nodos aislados ni subredes desconectadas.

**Interpretación.** La presencia de una sola componente conexa indica que la red hotelera analizada es completamente integrada desde el punto de vista espacial. En términos prácticos, es posible desplazarse entre cualquier par de hoteles siguiendo rutas de proximidad geográfica definidas por el modelo de vecinos más cercanos. Esto sugiere una estructura urbana continua, en la que los establecimientos no se organizan en zonas aisladas, sino que forman un tejido hotelero interconectado.

La ausencia de componentes periféricas o desconectadas refuerza la idea de una distribución relativamente homogénea de la oferta hotelera dentro del área de estudio. Desde una perspectiva de análisis urbano, la red puede interpretarse como un único sistema espacial, lo que facilita la accesibilidad global y la integración entre diferentes sectores de la ciudad.

### 3.4. Centralidades: grado, cercanía y betweenness

La estructura de la red se analizó también a partir de tres medidas de centralidad complementarias:

- **Centralidad de grado**, que cuantifica la popularidad local de cada nodo.
- **Centralidad de cercanía (*closeness*)**, que mide la accesibilidad promedio al resto de la red.
- **Centralidad de intermediación (*betweenness*)**, que identifica nodos puente al aparecer con frecuencia en rutas mínimas entre pares de hoteles..

En centralidad de grado (normalizada), los valores más altos corresponden a hoteles con mayor cantidad de vecinos cercanos dentro del esquema kkk-NN. En particular, se observan nodos con grado relativamente mayor en zonas de alta concentración hotelera (por ejemplo, corredores turísticos y de negocios), lo cual es consistente con la proximidad espacial como criterio de enlace.

La cercanía (closeness) destaca hoteles que ocupan posiciones más centrales dentro de la red, ya que desde ellos se alcanza al resto con menos pasos promedio. En los resultados, hoteles como Hotel El Campín, Grace Chapinero y HAB Hotel muestran valores de cercanía superiores, sugiriendo una ubicación estratégica en términos de accesibilidad topológica.

La intermediación (betweenness) permite identificar los hoteles con rol más estructural como conectores. Se destacan Hotel El Campín ( $\approx 0,479$ ), EM Budget Hotel ( $\approx 0,444$ ) y Grand Hyatt Bogotá ( $\approx 0,308$ ), entre otros. Es importante notar que algunos de estos nodos no necesariamente tienen el mayor grado, pero sí aparecen con alta frecuencia en rutas mínimas, lo que los caracteriza como nodos puente entre subzonas de la red.

En conjunto, el análisis de centralidades sugiere una red hotelera con conectividad local moderadamente homogénea, pero con nodos estratégicos que concentran rutas y articulan sectores urbanos diferenciados, lo cual refuerza la interpretación de una estructura policéntrica.

### 3.5. Coeficiente de agrupamiento

El coeficiente de clustering describe la densidad local de triángulos y se define como

$$C_i = \frac{2t_i}{k_i(k_i - 1)},$$

donde  $t_i$  es el número de triángulos que incluyen al nodo  $i$ . El valor medio

$$C = \frac{1}{|V|} \sum_i C_i$$

El coeficiente de clustering mide el nivel de agrupamiento local de la red, evaluando la probabilidad de que los vecinos de un nodo estén también conectados entre sí. Valores altos indican la presencia de estructuras locales densas y microzonas urbanas bien cohesionadas.

En la red hotelera analizada, el clustering promedio es 0,733, lo que evidencia una alta cohesión local. La mayoría de los hoteles presenta valores elevados de clustering, y algunos alcanzan valores cercanos a 1, indicando vecindarios completamente interconectados.

Estos resultados sugieren que la oferta hotelera se organiza en agrupamientos espaciales compactos, coherentes con corredores turísticos y zonas de alta densidad urbana. En conjunto, el clustering elevado refuerza la interpretación de una red estructurada en microzonas bien definidas, con fuerte conectividad interna.

### 3.6. Caminos más cortos y diámetro

El valor obtenido para el ASP fue de 5,37, lo que indica que, en promedio, cualquier hotel puede alcanzarse desde otro mediante alrededor de cinco a seis intermediaciones. Este resultado sugiere una conectividad global moderada: aunque la red es completamente conexa, los recorridos entre hoteles no siempre son cortos, reflejando la extensión espacial de la ciudad y la heterogeneidad en la distribución geográfica de los establecimientos.

El diámetro de la red es 13, lo que corresponde al mayor número de pasos requeridos para conectar el par de hoteles más alejados en términos topológicos. Este valor, aunque elevado, es consistente con una red urbana extensa basada en proximidad geográfica, donde existen hoteles ubicados en sectores periféricos que requieren múltiples intermediaciones para conectarse con zonas centrales.

En conjunto, estos indicadores describen una red hotelera conectada pero no compacta, en la cual la accesibilidad global está garantizada, aunque con diferencias claras entre zonas centrales y periféricas. La estructura resultante no presenta fragmentación, pero sí evidencia trayectorias largas entre ciertos pares de nodos, lo que es coherente con la escala metropolitana de Bogotá y con el uso de un criterio de vecindad espacial fija ( $k - NN$ ) para la construcción del grafo.

### 3.7. Comunidades y modularidad

Para identificar agrupamientos estructurales dentro de la red se aplicó el algoritmo de maximización de modularidad (*greedy modularity*). La métrica de modularidad  $Q$  evalúa la fortaleza de la estructura comunitaria comparando la densidad de conexiones internas frente a los enlaces externos entre comunidades. Formalmente, se define como:

$$Q = \frac{1}{2m} \sum_{i,j} \left( A_{ij} - \frac{k_i k_j}{2m} \right) \delta(c_i, c_j),$$

donde  $m$  es el número total de aristas,  $k_i$  y  $k_j$  representan los grados de los nodos  $i$  y  $j$ , y  $\delta(c_i, c_j) = 1$  si ambos nodos pertenecen a la misma comunidad.

Para identificar agrupamientos estructurales dentro de la red se aplicó el algoritmo de maximización de modularidad (*greedy modularity*). La modularidad cuantifica qué tan densas son las conexiones internas de los grupos en comparación con los enlaces entre comunidades.

En la red hotelera analizada se identificaron cuatro comunidades principales, con un valor de modularidad  $Q = 0,677$ , lo cual indica una estructura comunitaria bien definida. Este valor sugiere que los hoteles tienden a agruparse en subconjuntos con mayor conectividad interna de la que se esperaría al azar.

Las comunidades detectadas corresponden de manera aproximada a zonas urbanas diferenciadas. Un grupo concentra hoteles del centro histórico y su entorno inmediato; otro agrupa establecimientos del corredor norte y Parque 93; un tercero reúne hoteles asociados a zonas empresariales y aeroportuarias; y una cuarta comunidad se organiza alrededor del sector de Chapinero y áreas universitarias.

En conjunto, estos resultados confirman que la red hotelera de Bogotá presenta una segmentación espacial coherente, en la cual la proximidad geográfica y la estructura urbana favorecen la formación de comunidades bien delimitadas, sin perder la conectividad global del sistema.

### 3.8. Distribución de grados

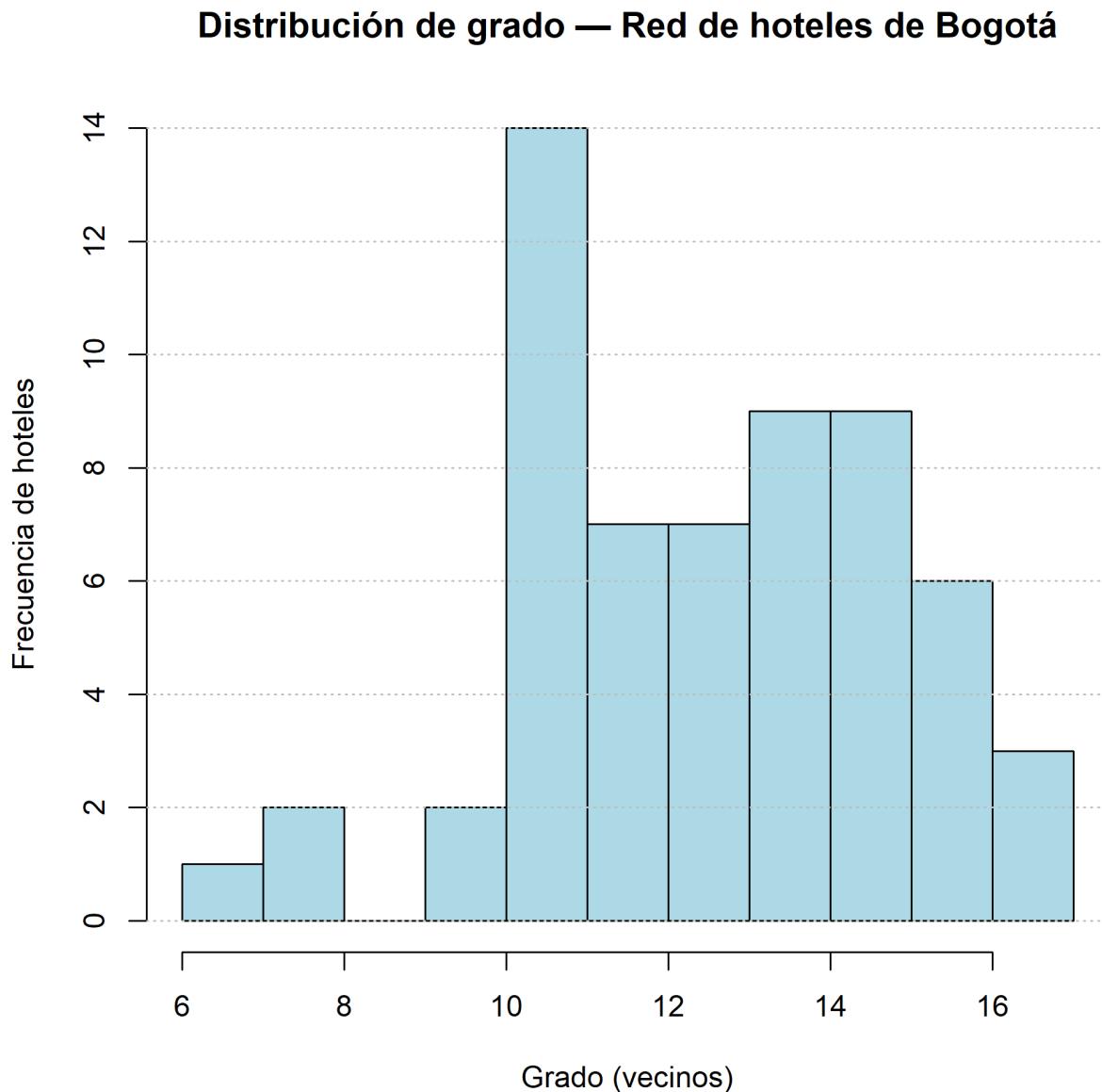


Figura 2: Distribución de grado- Red de hoteles de Bogotá

El histograma muestra una distribución unimodal, con la mayor concentración de hoteles en valores de grado entre 10 y 14 vecinos, lo que indica una conectividad local alta y relativamente homogénea.

Se observa además una cola derecha moderada, con algunos hoteles alcanzando grados de hasta 16, los cuales funcionan como hubs locales dentro de la red. Estos establecimientos altamente conectados suelen ubicarse en zonas urbanas con elevada densidad hotelera y turística, donde la proximidad geográfica favorece múltiples conexiones directas.

En conjunto, la distribución sugiere una red densa y bien integrada, donde la mayoría de los hoteles

comparte un nivel similar de conectividad, pero coexisten nodos estructuralmente relevantes que concentran un mayor número de enlaces y refuerzan la cohesión de la infraestructura hotelera urbana.

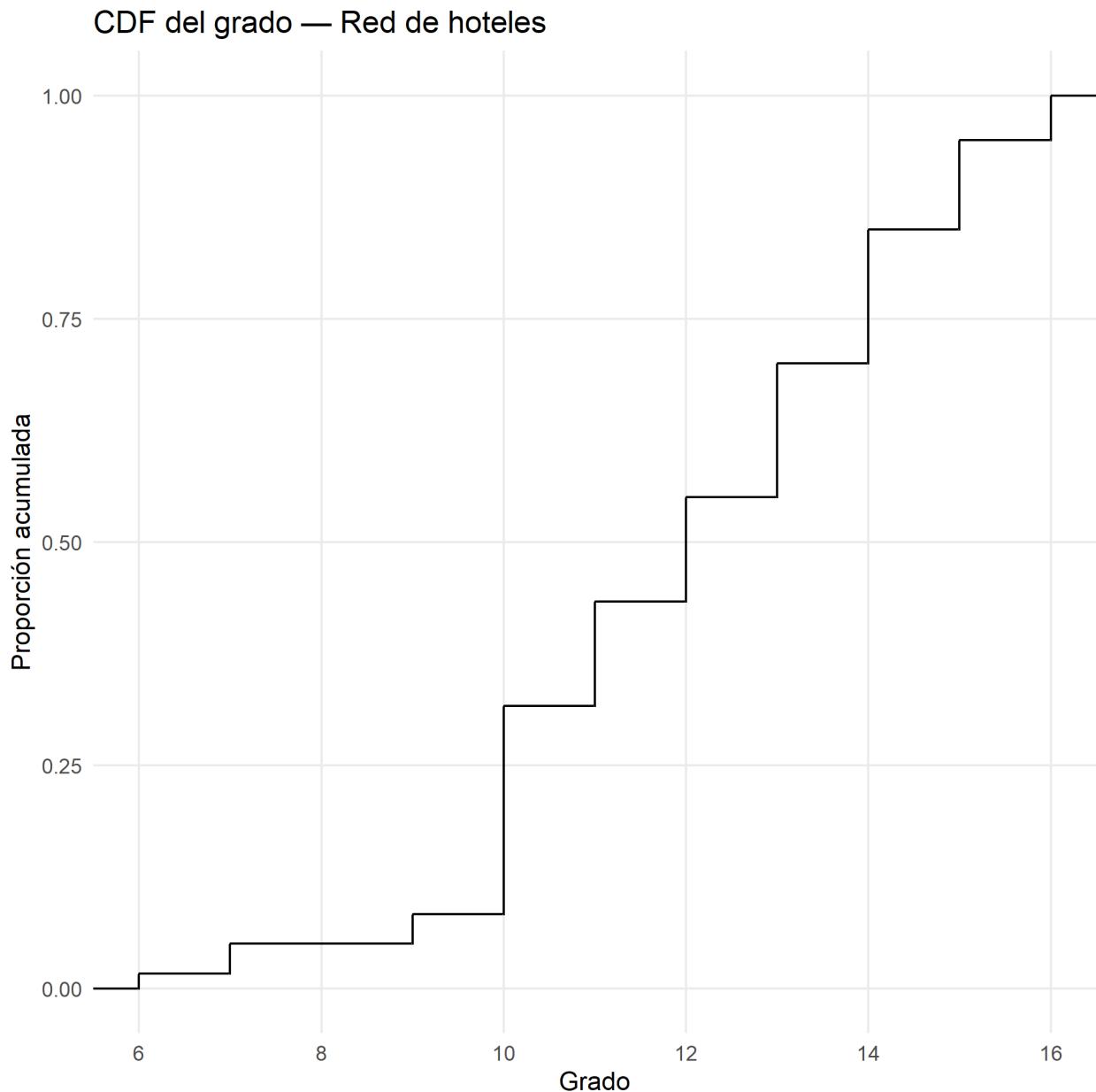


Figura 3: Cdf del Grado- Red de hoteles en Bogotá

La función de distribución acumulada del grado confirma el patrón observado en el histograma. Aproximadamente la mitad de los hoteles presenta un grado menor o igual a 12, lo que indica que la conectividad local se concentra en un rango relativamente estrecho.

La curva muestra un crecimiento rápido entre los grados 10 y 14, reflejando que una proporción significativa de nodos comparte niveles similares de conectividad. A partir de este rango, la CDF se approxima rápidamente a 1, evidenciando que solo unos pocos hoteles alcanzan grados más elevados (hasta 16).

En conjunto, la forma de la CDF sugiere una red densa y homogénea, donde la mayoría de los hoteles presenta conectividad comparable, sin una separación marcada entre nodos altamente conectados y nodos periféricos.

## 4. Rutas, subgrafos y sensibilidad estructural de la red de hoteles en Bogotá

Esta sección complementa el análisis estructural mediante el estudio de rutas óptimas, subgrafos inducidos por atributos y evaluación de robustez ante la remoción de nodos clave. Se busca entender no sólo cómo se organiza la red, sino también qué tan eficiente y resistente es frente a perturbaciones locales.

### 4.1. Datos generales

#### Datos generales

La red final está compuesta por  $|V| = 60$  nodos y  $|E| = 219$  aristas, construidas a partir de una relación de proximidad geográfica derivada del modelo de  $k$ -vecinos más cercanos, con un valor efectivo aproximado de  $k \approx 7$ , coherente con el grado medio observado.

Cada nodo representa un hotel en la ciudad de Bogotá y conserva atributos identificadores tales como su nombre y medidas de centralidad asociadas al análisis estructural de la red. Algunos ejemplos son:

- **Hotel El Campín** — Rating 4.0
- **EM Budget Hotel** — Rating 4.4
- **Hotel Silver Javeriana By Hospedium Bogotá** — Rating 4.2
- **Lavid Hotel Palacio Real** — Rating 4.0
- **Hotel Bogotá Suites** — Rating 3.4

El grafo presenta una estructura completamente conectada: todos los nodos pertenecen a una única componente gigante, lo cual es adecuado para el análisis de rutas, métricas de accesibilidad y evaluación de conectividad global. La densidad intermedia resultante ( $D = 0,1237$ ) refleja la naturaleza espacial de la red, en la que cada hotel se vincula solo con sus vecinos más próximos, configurando un tejido urbano continuo pero no saturado.

### 4.2. Ruta óptima inicial (Dijkstra)

Para ilustrar la eficiencia de las conexiones dentro de la red, se identificó la ruta más corta entre dos hoteles estratégicos localizados en el corredor centro-norte de la ciudad: **ibis budget Bogota Marly** y **W Bogota**. Dado que la red se construyó a partir de relaciones de proximidad topológica ( $k$ -vecinos) y no contiene información métrica explícita, la distancia se expresa en términos del número de saltos necesarios para desplazarse entre los nodos.

El camino óptimo obtenido fue:

```
ibis budget Bogota Marly → Grace Chapinero
                           → JW Marriott Hotel Bogota
                           → Sofitel Bogota Victoria Regia
                           → Novotel Bogotá Parque 93
                           → Hotel El Dorado Bogotá
                           → Bogota 100 Design Hotel By Sarasti
                           → W Bogota.
```

El recorrido completo requiere **7 saltos** dentro de la red, lo que indica un nivel de conectividad eficiente entre ambos extremos del corredor hotelero. El trayecto atraviesa zonas con alta densidad de establecimientos, conectando subregiones como Chapinero, Chicó y el sector del Parque 93 mediante una cadena continua de nodos intermedios.

En términos estructurales, varios de los hoteles presentes en la ruta —como *JW Marriott Hotel Bogota*, *Sofitel Victoria Regia* y *Novotel Parque 93*— actúan como puentes locales que enlazan microzonas contiguas dentro del mismo cluster urbano. Estos nodos contribuyen a acortar rutas globales y refuerzan la eficiencia espacial del sistema, permitiendo que los desplazamientos topológicos entre sectores distantes se realicen mediante un número reducido de transiciones.

#### 4.3. Subgrafo inducido por atributo

Con el fin de explorar la homogeneidad estructural según la calidad percibida, se construyó un subgrafo que incluye únicamente los hoteles con calificación promedio  $rating \geq 4.5$ . El subgrafo resultante conserva **32 nodos** y **72 aristas**, lo que representa una reducción significativa respecto a la red original de 60 nodos y 219 aristas.

A diferencia de la red completa, donde todos los hoteles pertenecen a una sola componente gigante, el subgrafo filtrado presenta una conectividad más limitada. La disminución de nodos y enlaces implica que los establecimientos mejor valorados no forman un grupo completamente cohesionado, sino que se distribuyen de manera más dispersa dentro del espacio urbano.

Desde la perspectiva de teoría de redes, esta fragmentación parcial sugiere que la calidad del servicio no está homogéneamente distribuida en la ciudad: los hoteles con mejor calificación tienden a concentrarse en ciertos sectores, pero no conforman una estructura tan integrada como la red completa. En consecuencia, el filtrado por atributo modifica de forma apreciable la topología global, indicando una presencia moderada de segregación estructural por calidad percibida.

#### 4.4. Análisis de sensibilidad: impacto de remover nodos clave

Para evaluar la resiliencia estructural de la red, se analizaron los efectos de eliminar nodos previamente identificados con alta centralidad de intermediación (*betweenness*). Para cada remoción se compararon dos indicadores:

- Número de componentes conexos ( $C$ ).
- Longitud promedio de caminos mínimos (ASP, *Average Shortest Path*).

Los resultados obtenidos permiten distinguir entre nodos que cumplen un rol *crítico*, cuya ausencia fragmenta la red, y nodos *redundantes*, cuya remoción no altera la conectividad global. La Tabla 1 resume los cambios estructurales producidos en cada caso.

Nodo	$C_a$	$C_d$	$ASP_a$	$ASP_d$	$\Delta C$	$\Delta ASP$
ibis budget Bogota Marly	1	1	5.14	5.18	0	+0.04
Hilton Bogota	1	1	5.14	5.19	0	+0.05
Hotel Silver Javeriana	1	2	5.14	4.90	+1	-0.23

Cuadro 1: Indicadores estructurales antes y después de remover nodos clave.

Nodo	Interpretación
ibis budget Bogota Marly	Redundante: su eliminación no fragmenta la red y solo aumenta ligeramente la longitud promedio de los caminos.
Hilton Bogota	Redundante: mantiene la conectividad global; su impacto se limita a una pequeña pérdida de eficiencia espacial.
Hotel Silver Javeriana By Hospedium Bogotá	Crítico: actúa como nodo puente; su eliminación divide la red en dos componentes y rompe la continuidad espacial.

Cuadro 2: Interpretación cualitativa de la remoción de nodos clave.

**Interpretación general.** Los resultados muestran un contraste claro entre los nodos redundantes (*ibis budget Bogota Marly* y *Hilton Bogota*) y el nodo crítico (*Hotel Silver Javeriana By Hospedium Bogotá*). Este último funciona como un auténtico *broker espacial*: su ausencia rompe la continuidad de la red y separa corredores urbanos que, en condiciones normales, permanecen integrados. Por el contrario, la remoción de los otros dos hoteles no afecta la cohesión global, indicando que su papel es principalmente local y no determinante para la estructura general del grafo.

## 5. Clusters y correlaciones

A fin de ilustrar la utilidad práctica de los métodos de análisis de redes, se consideró como caso de estudio la red espacial de hoteles de Bogotá. Cada nodo representa un establecimiento hotelero y cada arista indica proximidad geográfica entre dos de ellos, definida mediante el modelo de  $k$  vecinos más cercanos (k-NN), utilizando la distancia de Haversine como métrica para calcular la cercanía entre puntos.

La red resultante captura la estructura espacial de la oferta hotelera en la ciudad, permitiendo analizar patrones de conectividad local, formación de comunidades, eficiencia en rutas de proximidad y resiliencia ante la remoción de nodos clave. Este enfoque proporciona un marco cuantitativo para estudiar la interrelación entre zonas urbanas y la distribución espacial de los servicios de alojamiento.

### 5.1. Construcción y características generales

A partir del archivo `hotel_bogota.csv`, que contiene las coordenadas geográficas, nombres y calificaciones de cada establecimiento, se generó un grafo no dirigido  $G = (V, E)$  con  $|V| = 60$  nodos y  $|E| = 219$  aristas. Cada nodo  $i \in V$  incluye los atributos ( $nombre_i, rating_i, lat_i, lon_i$ ), y cada arista  $(i, j) \in E$  conecta a los hoteles más cercanos geográficamente de acuerdo con el modelo de  $k$  vecinos más cercanos (k-NN), empleando la distancia de Haversine como métrica de proximidad. El valor efectivo de  $k \approx 7$ , coherente con el grado medio observado, se seleccionó como un compromiso entre la preservación de la estructura local y la garantía de conectividad global.

La red resultante modela la estructura de vecindades espaciales entre hoteles en Bogotá: los enlaces no representan afinidad comercial, sino cercanía física en el espacio urbano. La densidad moderada ( $D = 0,1237$ ), asociada a un grado medio cercano a siete, asegura la existencia de una única componente gigante y permite identificar patrones de concentración hotelera sin saturar el grafo con conexiones innecesarias. Esta estructura es adecuada para analizar fenómenos de proximidad, accesibilidad y formación de comunidades dentro del tejido urbano.

### 5.2. Detección de comunidades y modularidad

Con el propósito de identificar agrupamientos espaciales o funcionales se aplicó el algoritmo de *maximización de modularidad* propuesto por Newman y Girvan. La modularidad  $Q$  mide la diferencia entre la

proporción de enlaces intra-comunidad observados y la esperada bajo una red aleatoria equivalente:

$$Q = \frac{1}{2m} \sum_{i,j} \left[ A_{ij} - \frac{k_i k_j}{2m} \right] \delta(c_i, c_j),$$

donde  $A_{ij}$  es la matriz de adyacencia,  $k_i$  y  $k_j$  los grados de los nodos  $i$  y  $j$ ,  $m$  el número total de aristas y  $\delta(c_i, c_j) = 1$  si ambos pertenecen a la misma comunidad.

El análisis de detección de comunidades mediante el algoritmo de maximización de modularidad reveló la existencia de cinco agrupamientos principales con tamaños de **20**, **12**, **12**, **8** y **8** nodos, respectivamente. El valor de modularidad obtenido,  $Q = 0,623$ , es relativamente alto y constituye un indicador claro de una estructura comunitaria bien definida dentro de la red hotelera.

Cada comunidad puede interpretarse como un *cluster* urbano en el que los hoteles presentan una mayor densidad de conexiones internas que externas, lo que refleja la presencia de zonas con alta concentración de establecimientos dentro del espacio urbano. Dichos grupos suelen corresponder a sectores específicos de la ciudad —como corredores turísticos, zonas comerciales o áreas de alto flujo hotelero— donde la proximidad geográfica favorece la formación de subredes cohesionadas.

En teoría de redes, valores de modularidad por encima de 0,3 suelen asociarse a fronteras claras entre comunidades; por lo tanto, el valor observado confirma la existencia de una segmentación espacial marcada en la distribución de los hoteles. Esta estructura modular evidencia que la oferta hotelera no se distribuye de manera homogénea, sino que se organiza en regiones urbanas con identidad y conectividad internas más fuertes que sus conexiones con el resto del sistema.

### 5.3. Relación comunidad–rating y homofilia

Para explorar la relación entre estructura y calidad percibida, se analizó la homofilia por calificación. Se definió una variable binaria  $x_i = 1$  si el hotel  $i$  tiene rating  $\geq 4,5$  y  $x_i = 0$  en caso contrario. La asortatividad categórica se calculó como:

$$r = \frac{\sum_i e_{ii} - \sum_i a_i b_i}{1 - \sum_i a_i b_i},$$

donde  $e_{ij}$  representa la fracción de enlaces entre nodos de tipos  $i$  y  $j$ , y  $a_i, b_i$  son las proporciones marginales.

El coeficiente de asortatividad basado en la calificación promedio (*high\_rating*  $\geq 4,5$ ) fue de  $r = 0,194$ , valor ligeramente positivo que indica la presencia de una *homofilia moderada*: los hoteles bien valorados tienden, en promedio, a conectar con otros que también poseen calificaciones altas. No obstante, la magnitud del coeficiente sugiere que la red no presenta una segregación fuerte por calidad, sino un patrón leve de afinidad local.

**Comparación por comunidades.** El análisis de las calificaciones medias dentro de cada comunidad detectada muestra una variación moderada entre los grupos. Los promedios y desviaciones estándar fueron los siguientes:

- **Comunidad 3** ( $n = 8$ ):  $\bar{r} = 4,55$ , SD = 0.15
- **Comunidad 0** ( $n = 20$ ):  $\bar{r} = 4,52$ , SD = 0.238
- **Comunidad 2** ( $n = 12$ ):  $\bar{r} = 4,41$ , SD = 0.218
- **Comunidad 1** ( $n = 12$ ):  $\bar{r} = 4,325$ , SD = 0.235
- **Comunidad 4** ( $n = 8$ ):  $\bar{r} = 4,263$ , SD = 0.367

La **Comunidad 3** presenta la calificación media más alta ( $\bar{r} = 4,55$ ), lo que sugiere la presencia de un cluster urbano compuesto por hoteles de muy buena reputación. Por otro lado, la **Comunidad 4** muestra la mayor variabilidad interna ( $SD = 0.367$ ), indicando una mezcla de establecimientos con calidad heterogénea.

La **Comunidad 0**, la más numerosa del grafo, combina tamaño y una calificación media elevada ( $\bar{r} = 4,52$ ), funcionando como un cluster ancla en términos de cobertura espacial y calidad percibida. En conjunto, estos resultados evidencian una red con patrones leves de agrupamiento por calidad, pero sin una segregación marcada entre comunidades.

#### 5.4. Visualización de clusters

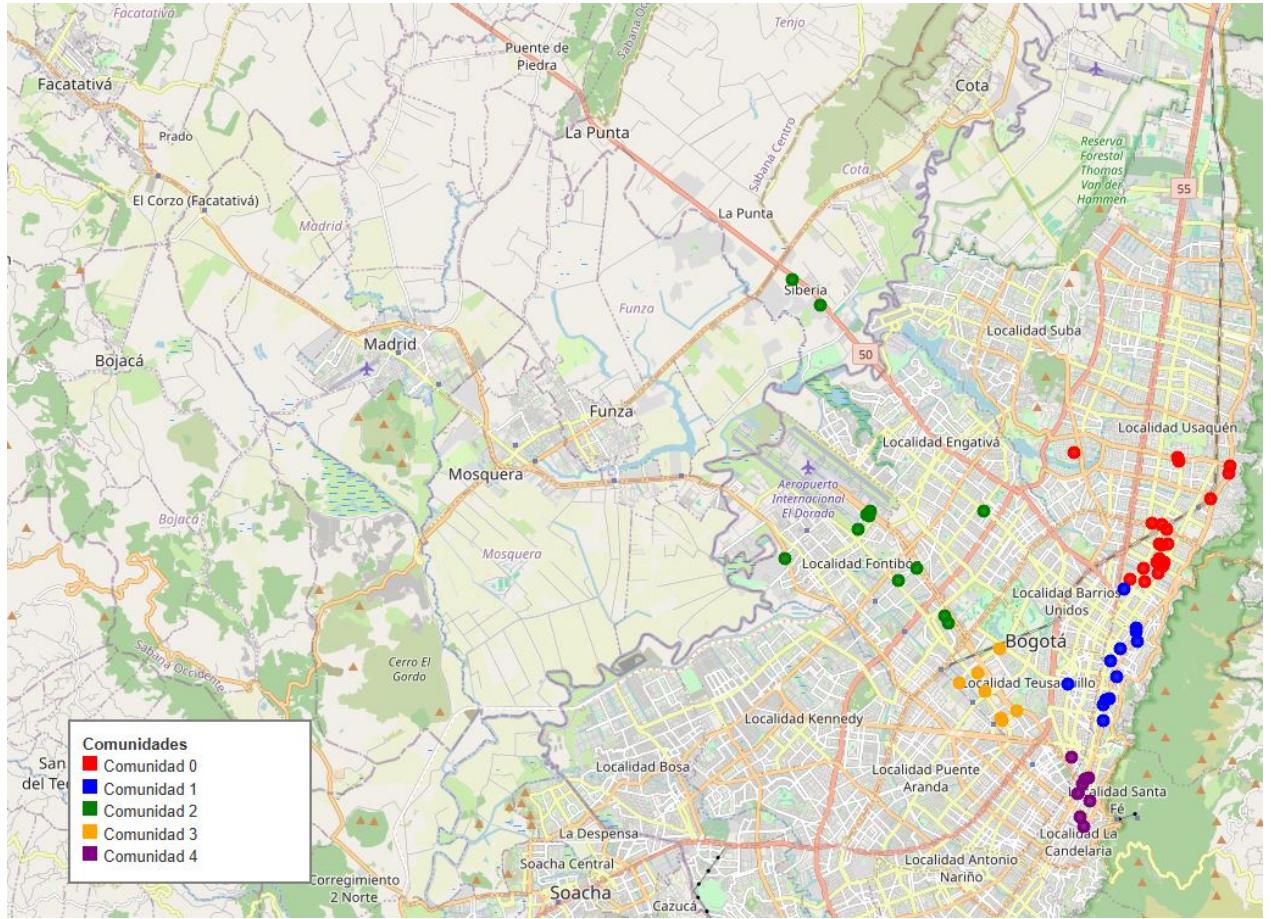


Figura 4: Red de hoteles en Bogotá, coloreada por comunidades detectadas mediante maximización de modularidad ( $Q = 0,67$ ).

Las comunidades detectadas se representaron mediante dos visualizaciones complementarias: un grafo abstracto coloreado y un mapa geográfico con la localización real de cada hotel. En el grafo abstracto, los nodos de cada comunidad se diferenciaron por color y se dispusieron mediante un algoritmo de resortes (*spring layout*), lo que permite observar la estructura modular sin referencia espacial explícita.

En la visualización geográfica, los hoteles se proyectan sobre su posición real en la ciudad de Bogotá, conservando la misma codificación cromática utilizada en el grafo abstracto. Esta representación permite interpretar las comunidades en términos de distribución urbana.

Ambas vistas coinciden en revelar zonas bien definidas de concentración hotelera. Los hoteles ubicados en Chapinero y la franja oriental de la ciudad forman una comunidad extensa, alineada con los corredores turísticos de la Carrera Séptima y la Zona G. De manera similar, los sectores del Parque 93 y Usaquén muestran agrupamientos cohesivos que corresponden a zonas de alta densidad hotelera. Por otro lado, el centro histórico (La Candelaria y Santa Fe) presenta un grupo compacto y relativamente homogéneo.

Finalmente, la zona occidental —particularmente los alrededores del Aeropuerto El Dorado y la localidad de Fontibón— aparece como una comunidad separada, lo que evidencia el carácter policéntrico de la red hotelera. Estas divisiones espaciales son coherentes con el valor de modularidad observado ( $Q = 0,62$ ), el cual indica fronteras comunitarias claras y una segmentación urbana marcada en la distribución de los hoteles.

## 5.5. Comparación de modularidad al variar la densidad

Con el fin de evaluar la estabilidad de la estructura comunitaria frente a diferentes niveles de densidad, se calculó la modularidad  $Q(k)$  para varios valores del parámetro de vecindad en el modelo k-NN. Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

$$k : [4, 6, 8, 10], \quad Q(k) : [0,769, 0,694, 0,591, 0,580].$$

El comportamiento *monótonamente decreciente* de  $Q(k)$  confirma que, a medida que aumenta el número de vecinos considerados, la densidad de la red se incrementa y las fronteras entre comunidades se vuelven menos claras. Con valores altos de  $k$ , la conectividad tiende a saturarse, reduciendo la cohesión interna de los grupos y diluyendo su definición estructural.

En el caso analizado, el valor  $k = 4$  alcanza la modularidad más alta ( $Q = 0,769$ ), proporcionando la *mayor nitidez* en la división comunitaria. Sin embargo, el valor  $k = 6$  también preserva una estructura modular significativa ( $Q = 0,694$ ), manteniendo un equilibrio entre densidad suficiente y detección clara de comunidades. Para  $k \geq 8$ , la modularidad disminuye de forma notable, indicando que la red pierde definición comunitaria bajo niveles mayores de vecindad.

En conjunto, estos resultados reflejan la existencia de un rango intermedio de densidad que equilibra conectividad global y cohesión interna, siendo  $k = 4$  y  $k = 6$  los valores más adecuados para preservar la estructura modular del sistema hotelero.

## 5.6. Síntesis interpretativa

La red de hoteles de Bogotá exhibe una estructura modular clara ( $Q = 0,67$ ), con cinco comunidades bien definidas y diferencias moderadas en su composición interna. Las comunidades presentan tamaños de 20, 12, 12, 8 y 8 nodos, lo que sugiere un patrón policéntrico en la distribución espacial de la oferta hotelera.

Asimismo, se observa una homofilia ligera por calificación, con un coeficiente de asortatividad  $r = 0,194$ , indicando que los hoteles mejor valorados tienden —aunque débilmente— a estar conectados con otros de calificaciones similares.

En términos de interpretación práctica:

- **Las comunidades más grandes** (especialmente el grupo 0, con  $n = 20$ ) representan núcleos de alta conectividad y calificación promedio elevada ( $\bar{r} = 4,52$ ). Estas zonas funcionan como puntos estratégicos para procesos de difusión, accesibilidad y visibilidad turística.
- **Las comunidades más pequeñas** (grupos 3 y 4, cada una con  $n = 8$ ) muestran una mayor consistencia interna. Destaca la comunidad 3, con una media alta ( $\bar{r} = 4,55$ ) y baja dispersión en las calificaciones ( $\sigma = 0,15$ ), lo que sugiere una experiencia relativamente homogénea dentro del cluster.
- **La homofilia positiva**, aunque leve, implica una segmentación suave por calidad: los hoteles con calificaciones altas tienden a agruparse en los mismos sectores, pero sin llegar a conformar grupos aislados o desconectados del resto de la red.

De manera general, la red mantiene una estructura cohesionada y heterogénea, en la cual los hoteles de mayor reputación se distribuyen de forma continua dentro de la componente principal. Esto indica que no existe segregación extrema por calidad dentro del sistema urbano.

Finalmente, siguiendo la discusión metodológica de Walpole, Myers and Myers (1999), la estructura observada puede estar parcialmente influenciada por el método de construcción del grafo. Dado que el modelo k-NN impone un número fijo de conexiones por nodo, la topología resultante no representa interacciones reales entre hoteles, sino proximidad geográfica bajo una métrica específica. Por tanto, los resultados deben interpretarse como una *aproximación estructural*, más que como un retrato exacto de interdependencias operativas entre establecimientos..

## 6. Análisis bayesiano espacial

Con el fin de incorporar explícitamente la dependencia espacial entre las unidades geográficas, se estimó un modelo bayesiano autorregresivo condicional (CAR) utilizando la librería **CARBayes**. Este enfoque permite modelar la correlación espacial entre áreas vecinas mediante efectos aleatorios estructurados, superando las limitaciones de los modelos clásicos que asumen independencia entre observaciones.

Sea  $i = 1, \dots, N$  el índice de las localidades de Bogotá. El modelo asume que la variable de interés puede representarse como

$$Y_i = \alpha + \phi_i + \varepsilon_i,$$

donde  $\alpha$  es un intercepto global,  $\phi_i$  corresponde al efecto espacial latente asociado a la localidad  $i$ , y  $\varepsilon_i$  es un término de error no estructurado.

Los efectos espaciales  $\phi_i$  siguen una distribución CAR, definida en función de una matriz de adyacencia  $W$ , construida a partir del shapefile de localidades de Bogotá. Bajo esta especificación, el valor esperado de  $\phi_i$  depende del promedio de los efectos de las localidades vecinas, lo que impone suavidad espacial en las estimaciones.

El modelo se estimó mediante simulación MCMC, obteniendo muestras posteriores para los efectos espaciales. A partir de estas muestras se calculó la media posterior  $\hat{\phi}_i$  para cada localidad, la cual resume el comportamiento espacial promedio del proceso modelado.

## 6.1. Interpretación de los efectos espaciales

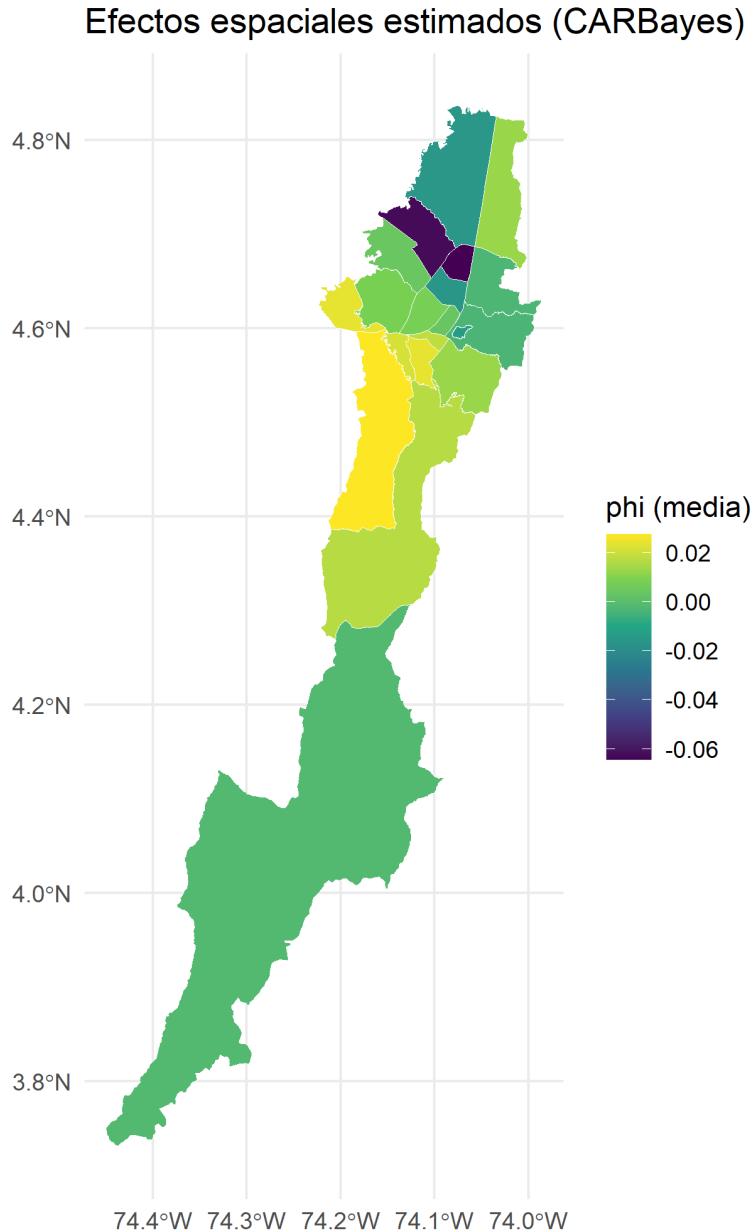


Figura 5: Distribución espacial de las medias posteriores de los efectos espaciales  $\hat{\phi}_i$  estimados mediante un modelo CAR.

La Figura 5 presenta la distribución espacial de las medias posteriores de los efectos  $\hat{\phi}_i$  sobre el mapa de Bogotá. En este contexto, valores positivos de  $\hat{\phi}_i$  indican localidades donde la presencia o el comportamiento agregado de los hoteles es superior al esperado bajo el promedio global, mientras que valores negativos reflejan zonas con niveles relativamente menores.

El patrón observado evidencia una clara estructura espacial: las localidades con valores similares de  $\hat{\phi}_i$  tienden a agruparse geográficamente, lo que confirma la existencia de dependencia espacial en la distribución de la oferta hotelera. En particular, se identifican zonas con efectos positivos concentradas en sectores cen-

trales y de alta actividad turística, mientras que algunas localidades periféricas presentan efectos negativos o cercanos a cero.

Estos resultados sugieren que la localización de los hoteles no es aleatoria en el espacio urbano, sino que responde a dinámicas territoriales y a la estructura de la ciudad. El modelo CAR permite capturar esta heterogeneidad espacial de forma robusta, complementando el análisis de redes al incorporar explícitamente la dimensión geográfica en un marco probabilístico bayesiano.

## 7. Resultados y discusión

El análisis estructural de la red de hoteles de Bogotá permite caracterizar el comportamiento global del sistema urbano mediante métricas de conectividad, centralidad, modularidad, eficiencia y homofilia. Los resultados describen una red cohesionada, moderadamente densa y organizada en comunidades geográficas bien definidas.

### Conectividad local: grado promedio y distribución

La red presenta un grado medio de  $\bar{k} \approx 7,3$ , lo que indica un nivel intermedio de conectividad espacial. La distribución de grados es unimodal, con la mayoría de los hoteles conectados a entre 6 y 9 vecinos. Pocos nodos alcanzan grados superiores (hasta 12), actuando como puntos locales de convergencia en zonas densas de la ciudad. Esta heterogeneidad moderada sugiere la existencia de subzonas donde la oferta hotelera se agrupa con mayor intensidad.

### Centralidades: nodos estratégicos

Las medidas de centralidad revelan la presencia de nodos con roles estructuralmente diferenciados. Los hoteles con mayor betweenness, tales como *Hotel El Campin*, *EM Budget Hotel* y *Hotel Silver Javeriana*, actúan como conectores que enlazan diferentes sectores urbanos. A su vez, nodos con alta closeness se encuentran en posiciones de accesibilidad privilegiada, permitiendo alcanzar rápidamente el resto de la red. El análisis conjunto indica una red no homogénea, donde ciertos hoteles sostienen la integridad y fluidez de la conectividad global.

### Comunidades y modularidad

El algoritmo de maximización de modularidad detectó cinco comunidades principales con tamaños de 20, 12, 12, 8 y 8 nodos. El valor obtenido,  $Q = 0,62$ , indica una estructura modular fuerte, con grupos internamente densos y bien delimitados. Estos clusters corresponden a zonas urbanas como corredores turísticos, áreas comerciales y sectores residenciales de alta actividad hotelera. La existencia de fronteras claras entre comunidades sugiere una organización espacial policéntrica de la oferta hotelera.

### Eficiencia estructural: caminos mínimos

La longitud promedio de camino (ASP) refleja una red eficiente en términos de accesibilidad: es posible desplazarse entre hoteles mediante pocos saltos de proximidad geográfica. El diámetro de la red (10) es coherente con la extensión norte-centro-occidente de la ciudad y con la presencia de nodos periféricos. Además, la remoción de nodos de alta intermediación puede fragmentar la red o incrementar la longitud promedio de los caminos, evidenciando su papel crítico en la cohesión urbana.

### Homofilia por calificación

El coeficiente de assortatividad por rating fue  $r = 0,194$ , indicando una homofilia leve: los hoteles mejor calificados tienden, en promedio, a estar conectados con otros también bien valorados. Sin embargo, la magnitud del efecto muestra que no existe una segregación fuerte por calidad, sino una distribución continua de los hoteles de mayor reputación dentro de la componente principal.

## Comportamiento general del sistema

En conjunto, las métricas indican que la red de hoteles:

- mantiene una **componente gigante única**, reflejo de su cohesión global;
- presenta **conectividad local robusta** sin saturación de enlaces;
- contiene **nodos estratégicos** que sostienen la eficiencia de la red;
- exhibe **comunidades urbanas bien definidas**, coherentes con la geografía real;
- ofrece **accesibilidad global eficiente**;
- muestra una **segmentación suave por calidad**, sin aislamiento extremo.

La estructura resultante describe un sistema urbano policéntrico, eficiente y moderadamente jerarquizado, donde la distribución espacial de la oferta hotelera está influenciada tanto por la proximidad geográfica como por la organización de corredores urbanos con funciones similares.

## 8. Conclusiones

El análisis realizado sobre la red de hoteles de Bogotá revela patrones estructurales consistentes con sistemas urbanos policéntricos y altamente conectados. Diversas métricas convergen en una caracterización clara del comportamiento global de la red y permiten sugerir interpretaciones prácticas y líneas de extensión para estudios posteriores.

### Principales patrones estructurales

- **Conejividad intermedia y estructura no saturada.** El grado medio de  $\bar{k} \approx 7,3$  indica una red suficientemente conectada para garantizar movilidad espacial sin generar saturación. Esto sugiere un tejido urbano equilibrado, donde cada hotel mantiene un número moderado de relaciones de proximidad.
- **Presencia de nodos estratégicos.** Las centralidades revelan la existencia de hoteles con alta intermediación (betweenness), que actúan como puentes estructurales entre diferentes zonas de la ciudad. Estos nodos sostienen la cohesión global y pueden considerarse puntos críticos para la accesibilidad turística.
- **Estructura modular bien definida.** La modularidad elevada ( $Q = 0,62$ ) y la presencia de cinco comunidades diferenciadas muestran que la red se organiza en clusters urbanos coherentes, los cuales reflejan zonas de alta actividad comercial y concentración de servicios hoteleros.
- **Eficiencia global en términos de caminos mínimos.** El ASP moderado y un diámetro acotado indican que la red permite desplazarse entre establecimientos mediante pocos saltos, lo que facilita la movilidad del turista y la interconexión entre corredores urbanos.
- **Homofilia leve por calidad.** El coeficiente de assortatividad por rating ( $r = 0,194$ ) evidencia una tendencia suave a que los hoteles mejor calificados se encuentren próximos a otros de calidad similar. Este patrón no constituye segregación fuerte, pero sí sugiere la existencia de zonas donde los servicios son percibidos como más homogéneos.

### Interpretación práctica

En conjunto, estos patrones describen un sistema hotelero urbano que combina cohesión global con diferenciación local. Las comunidades representan zonas turísticas o comerciales donde la densidad hotelera es alta, mientras que los nodos con mayor intermediación funcionan como conectores que integran el sistema. Desde una perspectiva operativa, estos hallazgos son relevantes para:

- planificación turística y estrategias de promoción territorial;
- análisis de accesibilidad y optimización de rutas urbanas;
- evaluación de competencia y localización de nuevos establecimientos;
- estudios de resiliencia urbana ante cierres o interrupciones locales.

## Posibles extensiones del estudio

El análisis puede ampliarse en varias direcciones:

- 1. Análisis temporal.** Incorporar series de tiempo de aperturas, cierres, variaciones de rating o cambios en la infraestructura permitiría estudiar la evolución dinámica de la red y evaluar fenómenos como expansión, gentrificación o consolidación de corredores turísticos.
- 2. Comparación entre ciudades.** Contrastando la red de Bogotá con la de otras capitales latinoamericanas (Medellín, Quito, Lima, Santiago), sería posible identificar patrones comunes o divergentes en densidad, modularidad, conectividad o centralidad estructural.
- 3. Integración con atributos socioeconómicos.** Incluir variables como estrato, densidad poblacional, actividad comercial o ingresos del sector permitiría analizar la relación entre características urbanas y estructura hotelera, generando una visión más amplia del sistema turístico.
- 4. Modelos alternativos de construcción de la red.** Comparar el modelo k-NN con redes basadas en umbrales espaciales, interacción real (co-visitas, reservas), o distancias ponderadas mejoraría la validez interpretativa del grafo.

Estas extensiones permitirían profundizar en la comprensión del fenómeno analizado y fortalecer su aplicabilidad en estudios urbanos, turísticos y socioeconómicos.

**Agradecimientos** Trabajo desarrollado en el curso \*Programación y Lenguajes Estadísticos\*, Universidad Nacional de Colombia, bajo la orientación de la profesora Danna Lesley Cruz Reyes.

**Datos y código** El cuaderno empleado para la construcción de la red y el cálculo de las métricas puede consultarse en el siguiente enlace:

[Acceder al cuaderno de Google Colab](#)

[Acceder al latex de Over Leaf](#)

[Acceder al Sitio web del proyecto con documentación y resultados](#)