

---

# MAPEO DE LA RED COMPLEJA DE LA CICLORRUTA BOGOTANA

*Mapping of the complex network of Bogota's bikeway*

---

Juan David Luján Villar<sup>1</sup>, Roberto Carlos Luján Villar<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Grupo de Investigación Literatura, Educación y Comunicación, lujanvillar@gmail.com

<sup>2</sup> Programa de Doctorado en Salud, Universidad del Valle, Cali, Colombia,  
janlujazz@gmail.com

Fecha de recepción: 1 de enero de 2018.

Fecha de aceptación: 19 de marzo de 2018.

## RESUMEN

**OBJETIVO.** El presente artículo indaga las propiedades de la red compleja de la ciclorruta bogotana elaborada sobre sus datos espaciales. **MÉTODO.** El enfoque metodológico de este abordaje se basa en un análisis reticular a partir de las diferentes medidas espaciales que hacen parte del reciente campo conocido como estudio de redes complejas. **RESULTADOS.** Las propiedades de la red estudiada indican que los bici-usuarios de este sistema podrían acceder a través de una mayor interconexión entre líneas de este sistema, a una mejor movilidad ciclística. **DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES.** Se concluye un alto nivel de desconexión en los nodos que conforman la enorme red estructurada en la simulación. Esto tiene como consecuencia un posible crecimiento desequilibrado, lo cual posibilita considerar factores como la baja densidad (o conectividad entre nodos y sus relaciones reales con las posibles) en la estructura de la ciclorruta e incrementar los conglomerados en la relación de sus nodos.

**Palabras claves:** Análisis de redes, ciclorruta, complejidad, redes complejas.

## ABSTRACT

**OBJECTIVE.** The present article explores the properties of the complex network of the Bogotá's bikeway elaborated on its spatial data. **METHOD.** The methodological approach of this survey is based on a reticular analysis based on the different spatial measures that are part of the recent field known as the study of complex networks. Results The properties of the studied network indicate that the cyclists of this system could access through a greater interconnection between lines of this system, to a better bicycle mobility. **DISCUSSION AND CONCLUSIONS.** It concludes a high level of disconnection in the nodes that make up the huge network structured in the simulation. This has as a consequence a possible unbalanced growth, which makes it possible to consider factors such as the low density (or connectivity between nodes and their real relationships with the possible ones) in the structure of the bikeway and to increase the conglomerates in the relation of their nodes.

**Keywords:** Network analysis, bikeway, complexity, complex networks.

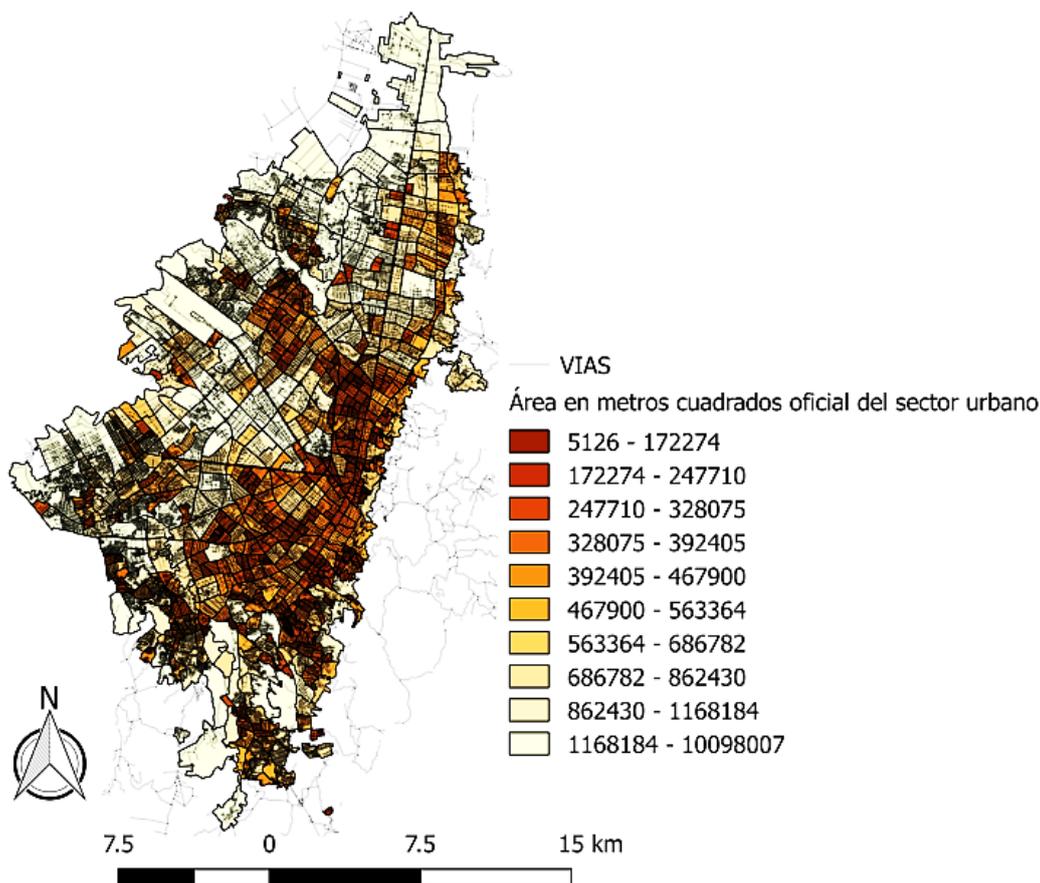
## INTRODUCCIÓN

Las ciclorrutas o espacios viales exclusivos para ciclistas también denominado como red bici-usuarios –en Bogotá– son escenarios propicios para contribuir a la cimentación de una cultura deportiva y al mismo tiempo, amigable con el medio ambiente [1]. Por estas y muchas otras razones fundamentales como los problemas derivados de la movilidad urbana en las principales ciudades del mundo, las ciclorrutas son espacios públicos que ameritan indagaciones exhaustivas además de la formalidad de las consideraciones habituales sobre su desarrollo y expansión. Este trabajo pretende hacer un aporte sucinto desde la modelización de la ciclorruta de la ciudad de Bogotá D.C. capital de Colombia para evidenciar la estructura a partir del modelamiento de grafos.

Algunos investigadores emplearon el recurso espacial a través de grafos aplicado a redes de transporte [2], análisis empíricos de las características de la red ponderada de las paradas de autobuses [3], el análisis y visualización de algunas redes nacionales de carreteras de diferentes países [4] entre otras prestaciones. Nuestro propósito se basa en la idea de considerar las propiedades espaciales de la ciclorruta bogotana a través del modelamiento de su red e identificando algunas características topográficas. Batty [5] considera 'la nueva ciencia de las ciudades', a la visualización de redes urbanas como algo intrínseco al desarrollo de los urbano en toda su extensión. Para él, esta posibilidad demuestra la condición de fractalidad y complejidad que la naturaleza de los fenómenos de las redes complejas exhibe desde una metaperspectiva.

La red compleja que se diseñó presenta los tramos de ciclorruta en el sistema complejo simulado como nodos (*vertices* o *vértices*), y la interacción entre los tramos como un nodo que conecta los dos vínculos (*edges* o *bordes*) del tramo. Por lo tanto, no hay nodos si no una conexión entre ambos. Así, se define que una red compleja está compuesta en su estructura por nodos y vínculos [2,3].

La infraestructura vial para ciclistas es susceptible de ser analizada de este modo, si consideramos la naturaleza urbana y el fluido de su funcionalidad. Esta propuesta presenta una perspectiva innovadora, en la región latinoamericana, desde el punto de vista analítico, ya que en la búsqueda teórica y metodológica no se encuentran este tipo de aproximaciones para tal fin. La figura 1 presenta la distribución del área urbana donde las áreas menos densas se presentan en el centro y sur de la ciudad.



**Figura 1.** Mapa del sector urbano y vías de la ciudad de Bogotá y su distribución oficial del área en metros cuadrados, 2012. Fuente: elaboración propia a partir de datos del DANE

Los algoritmos de las ciencias de la complejidad son la perspectiva metódica abordada en este espacio, desde una distribución normal o gaussiana el total de la ciclorruta a la fecha 392 km construidos –la más extensa de Latinoamérica– se podría dividir por el total de los nodos registrados en la red 121124 y cada nodo tendría un valor de 0,0032363528285063 km aproximadamente, lo cual no es del todo cierto, porque cada tramo de la ciclorruta evidencia una estructura desequilibrada en muchos casos inconexa, lo cual dificulta definir sobre esta premisa valores reales desde la simulación topográfica de la red.

Por estas y otras razones se recurre a los métodos cuantificables de algunas prestaciones informáticas reputadas en este campo como el paquete Pajek [6,7] para las estimaciones estructurales de la red. En este abordaje se incluyen algunos algoritmo básicos como grados (*Degrees*), coeficiente de *clustering* o conglomerado (*Clustering Coefficients*), longitud promedio de camino (*Average Path Length*), diámetro (*Diameter*), centralidad de intermediación (*betweenness centrality*), entre otros procedimientos menos conocidos como se verá más adelante. Para este caso además se recurrirá a los planteamientos específicos del seminal trabajo de Newman

[8], quien propone la explicación de todo edificio conceptual y algorítmico del campo del análisis de redes y diferentes perspectivas complementarias.

El sistema compuesto por la ciclorruta incluye de manera resumida, por una parte, los tramos de camino construido y los puntos en los cuales cada camino empieza y termina. Si observamos la infraestructura de la ciclorruta bogotana se puede observar que esta intenta cruzar a lo largo y ancho de la ciudad de Bogotá, pero evidencia una alta desconexión, por esta razón el grafo resultante es desconectado. Así, la ciclorruta se soporta sobre espacios de camino construidos de modo exclusivo para los ciclistas. Por tanto, aunque algunos tramos son grandes, lo cual posibilita mejores recorridos urbanos y una mejor movilidad, otros tramos son bastante reducidos, lo cual configura una red que, aunque puede ser bastante grande también se encuentra altamente desconectada.

## MÉTODO

### Diseño de Investigación

El encuadre investigativo de esta propuesta se basa en la modelización de la red propuesta. Para este fin se tomaron los datos ofrecidos por el Mapa de Referencia para la ciudad de Bogotá por parte de La Unidad Administrativa Especial de Catastro Distrital (UAECD) y la Gerencia (IDECA), quienes actualizaron los diferentes datos espaciales de esta ciudad en su última versión V.12.17. Los datos son de acceso libre y se pueden consultar en la siguiente dirección: <https://www.ideca.gov.co/es/servicios/mapa-de-referencia>. Luego los datos GIS se convirtieron al formato shapefile y fueron procesados en la planilla de Pajek, para luego ser analizados.

El enfoque es un método mixto, el cual se basa en la indagación mixta, la cual se establece sobre la búsqueda de información de la estructura de la red modelada y su relación con los aspectos cualitativos investigados de la ciclorrutas urbanas latinoamericanas; particularidades, extensión, usuarios, dinámicas de los viajes a través de ellas, entre otras [1]. El diseño propuesto se basa en un modelo experimental propio de las ciencias urbanas complejas [3,4,5] a partir de la identificación de la red de la ciclorruta abordada como una red espacial y los enfoques contemporáneos de la modelización de redes espaciales a partir del uso de sistemas de información geográfica GIS para la estructuración de los datos y su posterior procesamiento.

### Instrumentos y Técnicas de Recolección de Datos

Los diferentes algoritmos exhiben las propiedades intrínsecas de la red modelada. Entre estos se encuentran diferentes medidas que dieron como resultados diferentes estimaciones y consideraciones generales, por ejemplo, los nodos totales en la red, los vínculos totales, el grado promedio, el coeficiente de agrupamiento promedio o el diámetro.

Es importante documentar que una red compleja del tamaño de la modelada en este espacio  $N = 121124$  número de nodos y  $V = 190988$  número de vínculos o aristas, existe una relación de 130426 arcos (*Arcs*, relación dirigida) entre un total de 60562 nodos, resultado del análisis de mapa de segmentos realizado previamente. Su visualización solo fue posible de implementar con el programa Pajek V.5.03 mediante un largo tiempo de simulación (ver figura 3 y 4). Aunque se probaron cerca de diez consolas de trabajo en redes sociales este fue el único paquete capaz de visualizar y computar semejante red. Es preciso manifestar que el aparato estadístico y la descripción de las funciones utilizadas en las mediciones implementadas en este artículo se explican con el nivel de detalle requerido [7].

## RESULTADOS

Los principales resultados obtenidos son presentados en la tabla 1.

**Tabla 1.** Valores de la red

$N$	121124
$V$	190988
Watts-Strogatz $C(p)$	0.00324781
$P(k)$	3.15359466
$D$	834
Distancia	834
Distancia promedio	256 -594804
Centralidad de intermediación	0.0005
centralización de intermediación	0.00047861
Densidad con o sin bucles permitidos	= 0.00001715

El coeficiente de conglomerado  $C(p)$  refleja en la red modelada la rigidez de cada línea con relación a las líneas adyacentes, y también refleja la intensidad de las líneas en toda la red de la ciclorruta. Así el  $C(p)$  o transitividad de una red es la proporción de todos los caminos en la red que están cerrados. Se dice que el  $C(p)$  de un nodo es la proporción de pares entre sus vecinos que están directamente vinculados. Para Watts y Strogatz sí un nodo  $v$  tiene  $k_v$  vecinos; entonces a lo sumo  $k_v(k_v-1)/2$  vínculos pueden existir entre ellos (esto ocurre cuando cada vecino de  $v$  está conectado entre cada vecino de  $v$ ) [9]. Por lo tanto, nuestra red evidencia que la rigidez de cada línea no es mayor en toda la red urbana.

El grado promedio  $P(k)$  encontrado es 3.15359466 lo cual indica que en promedio cada línea puede ser interceptada con más de 3.15 líneas. Esta medida básica en análisis de redes se establece como fundamental ya que el grado  $K_i$  de un nodo  $i$ , es definido como el número de nodos conectados a él. Una posible interpretación indica que una línea en promedio puede a su vez interceptarse con otras 3.15 líneas.

El diámetro  $D$  identificado se establece a partir de la longitud de la ruta más larga en la red entre dos nodos correspondientes, lo cual se basa en la idea de indexar el alcance o la extensión de la red. En nuestro caso el valor hallado es de 834, lo cual indica la alta complejidad de la red y ratifica la falta de cohesión de la red. La distribución de distancias calcula la distribución de las longitudes de las rutas más cortas y la longitud media de la ruta entre todos los pares alcanzables de nodos en la red, y desde todos los nodos: toma todos los nodos como puntos de partida.

La longitud promedio de camino, es el menor número de intersecciones entre dos líneas cualquiera, lo cual es un indicador interesante. En nuestro caso, el número de pares inalcanzables es 14578470568, la distancia promedio entre pares alcanzables es 283.14642, los nodos más distantes son 55915b (111832) y 57781a (115563), y la distancia es 834, igual que el diámetro. En el caso de las redes de mundo pequeño (*Small World*) se dice que presentan esta propiedad cuando la red posee un valor de longitud promedio de camino bajo y presenta una alta agrupación o *clustering* [9]. En nuestra aplicación se encuentra una distancia promedio con el valor menor de 256 y el mayor 594804, lo cual indica que esta característica no se presenta para la red que estudiamos.

Una interpretación de estos datos indica que se deben cruzar 283.14 nodos en promedio para llegar al destino del ciclista, lo cual es bajo si comparamos el total de nodos  $N = 121124$ , una cuantía territorial de 392 km. Aunque estos datos nos indican que la diferencia en esta distribución es un factor necesario de considerar en el abordaje de la ciclorruta a futuro, ya que entre menor sea su distancia más razonable será la experiencia de las conexiones entre tramos de la ciclorruta, y por ende una mejor experiencia ciclista.

La centralidad de intermediación tuvo como valor más alto = 0.0005, se define que es la proporción de todas las geodésicas (o caminos más cortos) entre otros nodos o pares de nodos que incluyen este nodo y conectan a otros pares de nodos. La geodésica o caminos geodésicos es una medida que indica la cercanía o la ruta más corta entre un nodo y otro. Como complemento la centralización de intermediación tuvo un valor de = 0.00047861, lo cual indica que la variación en la centralidad de los nodos es dividida por la máxima variación posible en las puntuaciones de centralidad de intermediación en una red del mismo tamaño.

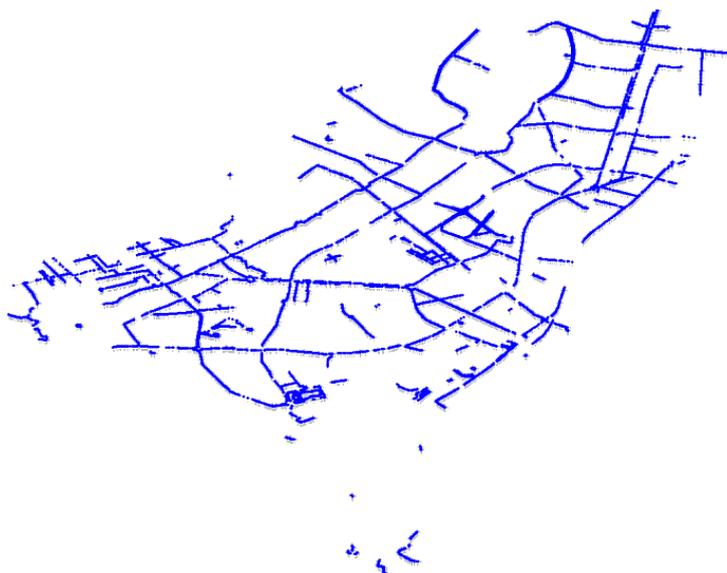
**Tabla 2.** Distribución de frecuencia de grados en la red compleja

Cluster	Freq	Freq%	CumFreq	CumFreq%	Nodo Representativo
1	2	0.0017	2	0.0017	54782a
2	44	0.0363	46	0.0380	638a
3	107664	88.874	107710	88.9254	0a
4	9506	78.482	117216	96.7736	16a
5	2814	23.232	120030	99.0968	109a
6	860	0.7100	120890	99.8068	1823a
7	232	0.1915	121122	99.9983	4960a
8	2	0.0017	121124	100.0000	36945a
Sum	121124	1.000.000			

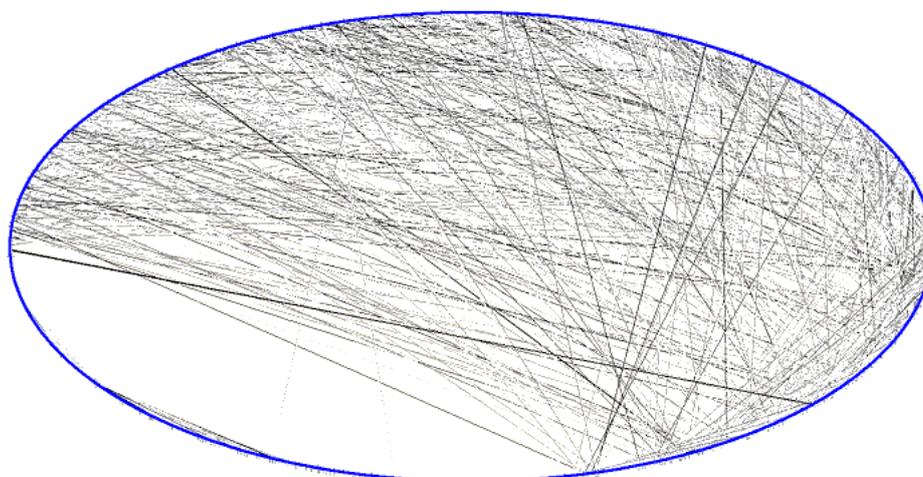
La distribución del grado revela concentraciones locales de lazos alrededor de nodos individuales. En la tabla 2 se presenta esta relación sobre 8 conglomerados o *clusters* en los cuales la lectura de los datos se puede comprender de la siguiente manera: el nodo 54782a se encuentra bastante aislado en la red, pero el *cluster* 36945a está conectado a la mayoría de los nodos de la red. Esta última concentración es significativa con relación al nodo, ya que evidencia la necesidad de aumentar mayores *clusters* en la red vial de bici-usuarios. Se puede interpretar además, que los vínculos son menores con respecto a las desconexiones evidenciadas, ya que como se observa el *cluster* 3 poseedor de una frecuencia alta 88.9254 tiene como característica una valoración de 0 lo cual indica un nodo o tramo de la ciclo ruta aislado o inconexo.



**Figura 2.** Plano general de la ciudad de Bogotá y su ciclorruta en líneas negras



**Figura 3.** Red compleja de las ciclorruta bogotana con las coordenadas originales



**Figura 4.** Red compleja de las ciclorruta bogotana visualizada de manera circular donde los nodos bordean el círculo y sus vínculos se encuentran en el centro

## DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

En esta investigación se simuló la red compleja de la ciclorruta bogotana. Los resultados evidencian una alta desconexión en la red, lo cual evidencia la necesidad de los bici-usuarios de continuar con la creación de nuevas rutas dedicadas exclusivamente a las bicicletas, es decir, la cimentación de calzadas destinadas de manera permanente a la circulación de bicicletas, ubicada en el andén, el separador o segregada de la calzada vehicular o en otros lugares autorizados, debidamente señalizada y delimitada [10].

Aunque la densidad alta se presenta como un problema vial [2], para el caso de la ciclorruta de Bogotá su densidad es bastante baja con relación al espacio urbano de

la ciudad. En este caso un índice de mayor interconexión vial para los bici-usuarios es la incrementación de la densidad en este sistema (ver figura 2). Esta relación con las conexiones de la ciclorruta permite evidenciar además un posible crecimiento desequilibrado a futuro en el cual o bien sea se prioricen zonas de la ciudad o se construyan más tramos de infraestructura vial para ciclistas. El mapeo consistió en evidenciar a partir de un grafo espacial –basado en los datos georreferenciados de la ciclorruta bogotana real–, los valores que su red simulada representa a través del estudio de sus valores característicos.

Este trabajo se centró en analizar las principales propiedades de la red compleja de la ciclorruta de Bogotá de manera estática, no analizó las dinámicas que subyacen a este sistema, tampoco consideró la eficiencia general de la red, la sincronización y los comportamientos dinámicos de la red. Por lo tanto, una labor pendiente y necesaria es realizar más investigaciones y análisis de los problemas anteriores. Debido a que el trabajo fue realizado con autofinanciación esto imposibilitó otras posibilidades metodológicas como el desarrollo de un trabajo de campo acorde al reto planteado.

## **FUENTES DE FINANCIAMIENTO**

Esta investigación no contó con ningún tipo de financiamiento.

## **DECLARACIÓN DE CONFLICTO DE INTERÉS**

Los autores declaran que no existe conflicto de interés en la elaboración de esta investigación.

## **APORTE DEL ARTÍCULO EN LA LÍNEA DE INVESTIGACIÓN**

Este trabajo es un aporte en la línea de investigación de los estudios de las redes complejas especiales a partir del análisis de la ciclorruta de la ciudad de Bogotá. Como contribución original es la primera vez que esta ruta de transporte es analizada desde la metodología empleada.

## **DECLARACIÓN DE CONTRIBUCIÓN DE CADA AUTOR**

Juan David Luján. Idea de investigación, modelación, análisis y redacción de artículo. Roberto Carlos Luján. Idea de investigación, análisis, redacción y corrección de estilo.

## REFERENCIAS

- [1] Ríos Flores, R.A., Taddia, A.P., Pardo, C.F., and Lleras, N. Ciclo-inclusión en América Latina y el Caribe: Guía para impulsar el uso de la bicicleta. Banco Interamericano de Desarrollo, 2015. Disponible en <https://publications.iadb.org/handle/11319/6808?locale-attribute=es>
- [2] Zhu, Z. and D. Yang. 2012. Research on Urban Public Traffic Network of Chongqing based on PAJEK, in Information Engineering and Applications International Conference on Information Engineering and Applications (IEA 2011), Zhu, R. and Ma Y, Eds. Springer-Verlag, London, 2012, pp. 490-485.
- [3] Zhao, M. and D. Yang. 2012. Empirical Analysis of Wuhan Weighted Bus-Stop Network Characteristics, in Information Engineering and Applications International Conference on Information Engineering and Applications (IEA 2011), Zhu, R. and Ma Y, Eds. Springer-Verlag, London, 2012, pp. 498-504.
- [4] Li, J. and J. Ma. Complexity and optimization analysis of spatial network, in International Seminar on Future Information Technology and Management Engineering. Loughborough, 20 November 2008, pp. 206-209.
- [5] Batty, M, Building a science of cities. Cities, vol. 29, pp. S9–S16, 2012.
- [6] Batagelj, V. and Mrvar, A. Pajek - Program for Analysis and Visualization of Large Networks, version 5.03. 1996-2018, 2006. Disponible en <http://vlado.fmf.uni-lj.si/pub/networks/pajek/>.
- [7] de Nooy, W., Mrvar, A. and Batagelj, V. Exploratory Social Network Analysis with Pajek. New York: Cambridge University Press, 2011.
- [8] Newman, M. Networks: An introduction. New York: Oxford University Press, 2010.
- [9] Watts, D.J. and Strogatz, S.H. Collective dynamics of 'small-world' networks. Nature, vol. 393, núm. 6684, pp. 440-442, 1998.
- [10] IDECA. Servicio WMS de los objetos geográficos de Infraestructura Vial. Bogotá, D.C. Año 2016. Bogotá: Alcaldía Mayor de Bogotá, D.C., 2016 Disponible en <http://metadatos.ideca.gov.co/geoportal/catalog/search/resource/details.page?uuid=%7B2F7A8D5E-608E-40BE-96AE-39BE4288FE5F%7D>.

## NOTA BIOGRÁFICA



Juan David Luján Villar. Licenciado en Edu. Artística. Magister en Investigación Social Interdisciplinaria. Miembro del Grupo de Investigación Literatura, Educación y Comunicación (LEC), Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia.



Roberto Carlos Luján Villar. Sociólogo. Estudiante Doctorado en Salud, Universidad Del Valle. Investigador asociado de la Fundación para el Desarrollo de la Salud Pública (FUNDESALUD). Cali, Colombia.



Esta obra está sujeta a la Licencia Reconocimiento-SinObraDerivada 4.0 Internacional de Creative Commons. Para ver una copia de esta licencia, visite <http://creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0/> o envíe una carta Creative Commons, PO Box 1866, Mountain View, CA 94042, USA.