

Morfología urbana y patrones de movilidad: Un análisis topológico y espacial de redes

Juan Fernando Riascos Goyes
jfriascosg@eafit.edu.co

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero físico

Asesor
Juan Pablo Ospina Zapata
Co-asesor
Nicolás Guarín-Zapata

Ingeniería Física
Escuela de Ciencias Aplicadas e Ingeniería
Universidad EAFIT
Medellín, Colombia
2025

Contenido

LISTA DE FIGURAS	3
LISTA DE TABLAS	5
RESUMEN	8
1. INTRODUCCIÓN	9
2. PROBLEMA	11
2.1. Justificación	11
2.2. Planteamiento del problema	12
2.3. Objetivos	13
2.3.1. Objetivo General	13
2.3.2. Objetivos Específicos	13
3. MARCO DE REFERENCIA	14
3.1. Tipologías de patrones urbanos	14
3.1.1. Reticular (gridiron)	15
3.1.2. Jerárquica o dendrítica (suburbana/cul-de-sac)	16
3.1.3. Orgánica o irregular	17
3.1.4. Híbrida y superpuesta	17
3.2. Métricas espaciales	19
3.2.1. Circularidad	19
3.2.2. Longitud promedio de calle	20
3.2.3. Densidad de aristas	20
3.2.4. Densidad de calles	21
3.2.5. Densidad de nodos	21

3.2.6. Densidad de segmentos	21
3.2.7. Ángulo medio en intersecciones	22
3.2.8. Coeficiente de variación angular	22
3.2.9. Proporción ortogonal	22
3.3. Métricas topológicas	23
3.3.1. Calles por nodo promedio	23
3.3.2. Entropía	24
3.3.3. Intersecciones topológicas por polígono	25
3.3.4. Proporción de calles terminales (Dead End Ratio)	26
3.4. Centralidades	27
3.4.1. Centralidad de grado	28
3.4.2. Centralidad de Cercanía	29
3.4.3. Centralidad de Intermediación	30
3.4.4. PageRank	32
3.5. Índices Globales de Centralización	33
3.5.1. Entropía de la Distribución de Centralidades	34
3.5.2. Índice de Centralización de Freeman	34
4. DISEÑO METODOLÓGICO	36
4.1. Metodología para la clasificación teórica y el agrupamiento de patrones urbanos	36
4.1.1. Asignación de patrón y reconocimiento de formas híbridas	42
4.1.2. Clasificación por clustering de patrones y subpatrones .	44
5. CASO DE ESTUDIO	45
5.1. Clasificación y tratamiento de la movilidad urbana	45
5.2. Selección de Casos de Estudio	46
5.2.1. Patrones Reticulares (Grid): Filadelfia y Salt Lake City	46
5.2.2. Patrón Orgánico e Híbrido Temprano: Boston y Santa Fe	47
5.2.3. Patrón Jerárquico (Cul-de-Sac): Peachtree City, Cary Town y Chandler	47
5.2.4. Ciudades con Patrones Híbridos y Superpuestos: Charleston y Fort Collins	48
6. RESULTADOS	49

6.1.	Caracterización de patrones morfológicos en ciudades seleccionadas	49
6.2.	Relación entre estructura urbana y patrones de movilidad	56
6.2.1.	Efectos marginales de la morfología urbana sobre la movilidad modal	57
6.2.2.	Ánálisis <i>post hoc</i>	58
6.2.3.	Insumos para política pública	61
6.3.	Ánálisis complementario de la centralidad de la red urbana	62
6.4.	Discusión	66
7.	CONCLUSIONES	68
7.1.	Limitaciones y Trabajo Futuro	69
7.1.1.	Productos derivados del trabajo	70

Lista de Figuras

1.	Tipología B — Patrón reticular. Alta regularidad y ortogonalidad, con intersecciones predominantemente rectas y elevada densidad de conectividad.	15
2.	Tipología D — Patrón cul-de-sac. Estructura jerárquica con baja conectividad transversal, alta proporción de calles terminales y concentración de flujos en arterias principales.	16
3.	Tipología A — Patrón orgánico. Red irregular con baja ortogonalidad y conectividad variable, dominada por calles curvas y trazados adaptativos.	17
4.	Tipología C — Patrón híbrido. Combina rasgos de la retícula con trazados curvilíneos, mostrando variaciones de conectividad entre sectores.	18
5.	Modelo de red con nodos con diferente centralidad de grado C^D	28
6.	Modelo de red con nodos con diferente centralidad de cercanía C^C	30
7.	Modelo de red con nodos con diferente centralidad Intermediación C^B	31
8.	Modelo de red con nodos con diferente centralidad de índice PageRank C^{PR}	33
1.	Proceso de calibración del análisis de componentes principales para la ciudad de Boston MA.	50
2.	Visualización de los clústeres morfológicos mediante t-SNE para las unidades censales de Boston MA. Cada color representa un clúster identificado.	51

3. Clasificación morfológica de las redes viales. Fila superior (a1–c1): tipologías principales. Fila inferior (a2–c2): subpatrones identificados dentro de cada categoría mediante aprendizaje no supervisado.	55
4. Distribución de cuotas modales (activo, público y privado) según tipologías morfológicas urbanas.	56
5. Mapa de calor de efectos marginales de los modos de movilidad según patrones morfológicos.	57
6. Mapa de centralidad de intermediación de aristas para la red vial de Salt Lake City. La intensidad de los valores refleja los corredores con mayor flujo potencial de tránsito.	62
7. Mapa de centralidad de intermediación de nodos para la red vial de Salt Lake City. Los valores más altos indican intersecciones que concentran mayor tránsito dentro de la estructura urbana.	63
8. Mapa de centralidad de cercanía para la red vial de Salt Lake City. Los valores más altos representan intersecciones con acceso más eficiente al resto de la red, reflejando el núcleo de mayor accesibilidad.	64
9. Mapa de centralidad de grado para la red vial de Salt Lake City. Este indicador identifica los nodos con mayor número de conexiones directas dentro de la estructura urbana.	65
10. Mapa de centralidad de PageRank para la red vial de Salt Lake City. Esta métrica pondera la importancia jerárquica de los nodos en función de las conexiones recibidas y su relación con otros nodos relevantes dentro del sistema.	66

Lista de Tablas

3.1. Métricas de redes viales urbanas agrupadas por categoría.	27
4.1. Equivalencia de intervalos a grupos de punaje por tipología . .	39
4.2. Umbrales de clasificación para patrones de tipo Grid	40
4.3. Umbrales de clasificación para patrones de tipo Orgánico . . .	41
4.4. Umbrales de clasificación para patrones de tipo Cul-de-sac .	42
4.5. Características diagnósticas de patrones híbridos	43
6.1. Síntesis de subgrupos morfológicos identificados mediante agrupamiento.	52
6.2. Comparación entre patrones morfológicos teóricos y subpatrones obtenidos por agrupamiento.	53
6.3. Resultados del análisis <i>post hoc</i> para patrones de movilidad según tipologías morfológicas.	59

RESUMEN

La morfología urbana ha sido reconocida desde hace tiempo como un factor que moldea la movilidad humana, pero las clasificaciones comparativas y formales de la forma urbana entre áreas metropolitanas siguen siendo limitadas. Basándonos en principios teóricos de la estructura urbana y en avances del aprendizaje no supervisado, clasificamos sistemáticamente el entorno construido de nueve áreas metropolitanas de Estados Unidos utilizando indicadores estructurales como densidad, conectividad y configuración espacial. Los tipos morfológicos resultantes se vincularon con patrones de movilidad mediante estadística descriptiva, estimación de efectos marginales y pruebas estadísticas post hoc. Enseñando como distintas que formas urbanas se asocian sistemáticamente con comportamientos de movilidad diferentes, como que las morfologías reticulares están vinculadas con un uso significativamente mayor del transporte público y una menor dependencia del automóvil, mientras que las formas orgánicas se asocian con un mayor uso del automóvil y descensos sustanciales en el transporte público y en la movilidad activa. Estos efectos son estadísticamente robustos, lo que subraya que la configuración espacial de las áreas urbanas desempeña un papel fundamental en la conformación de las opciones de transporte. Nuestros hallazgos amplían trabajos previos al ofrecer un marco reproducible para clasificar la forma urbana y demuestran el valor añadido del análisis morfológico en la investigación urbana comparada. Estos resultados sugieren que la forma urbana debe tratarse como una variable clave en la planificación de la movilidad y proporcionan respaldo empírico para incorporar tipologías espaciales en el diseño de políticas urbanas sostenibles.

Palabras clave: Morfología urbana, Aprendizaje no supervisado, PCA, Clustering, Participación modal.

ABSTRACT

Urban morphology has long been recognized as a factor shaping human mobility, yet comparative and formal classifications of urban form across metropolitan areas remain limited. Building on theoretical principles of urban structure and advances in unsupervised learning, we systematically classified the built environment of nine U.S. metropolitan areas using structural indicators such as density, connectivity, and spatial configuration. The resulting morphological types were linked to mobility patterns through descriptive statistics, marginal effects estimation, and post hoc statistical testing. Here we show that distinct urban forms are systematically associated with different mobility behaviors, such as reticular morphologies being linked to significantly higher public transport use and reduced car dependence, while organic forms are associated with increased car usage, and substantial declines in public transport and active mobility. These effects are statistically robust, highlighting that the spatial configuration of urban areas plays a fundamental role in shaping transportation choices. Our findings extend previous work by offering a reproducible framework for classifying urban form and demonstrate the added value of morphological analysis in comparative urban research. These results suggest that urban form should be treated as a key variable in mobility planning and provide empirical support for incorporating spatial typologies into sustainable urban policy design.

Keywords: Urban morphology, Unsupervised learning, PCA, Clustering, Modal share.

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

Las ciudades están en constante transformación, y la organización de su estructura física incide directamente en la movilidad de sus habitantes. Estudios previos han mostrado que ciertas configuraciones urbanas favorecen la movilidad activa, como caminar, usar bicicleta y transporte público, mientras que otras refuerzan la dependencia del automóvil (Ewing and Cervero, 2010). Conceptos como configuración de la red vial, accesibilidad topológica, centralidad de calles y entropía de orientación han sido utilizados para cuantificar la estructura urbana y su relación con la movilidad (Marshall, 2004; Cardillo et al., 2006). Sin embargo, aún existe un vacío en la comprensión integral de cómo estas métricas pueden aplicarse a diferentes contextos urbanos y modos de transporte.

Este trabajo tiene como objetivo analizar la relación entre la morfología urbana y la movilidad mediante un estudio topológico que integre métricas de conectividad, centralidad y agrupamiento en redes viales. Se propone cuantificar la estructura de las calles en diferentes ciudades, correlacionar estas métricas con la distribución modal del transporte a partir de datos de movilidad y comparar distintos entornos urbanos para identificar patrones comunes y divergencias en la relación entre forma urbana y desplazamientos. El análisis comparativo entre múltiples ciudades proporciona una base metodológica para identificar tendencias y diferencias estructurales en la relación entre morfología urbana y movilidad. Comparar redes viales con distintos patrones de desarrollo facilita la extracción de principios generales sobre la influencia del diseño urbano en el comportamiento del transporte. Además, la elección

modal de transporte está condicionada por múltiples factores, incluyendo la infraestructura disponible, las características socioeconómicas de la población y la organización espacial de la ciudad. Comprender la estructura de las redes urbanas a través del análisis topológico permite fundamentar estrategias de planificación y movilidad sostenible, optimizando la infraestructura de transporte y promoviendo modelos urbanos más eficientes.

A pesar del creciente interés en la relación entre morfología urbana y movilidad, la mayoría de los estudios empíricos se han concentrado en contextos del Norte Global. En este trabajo, se analizan diversas ciudades de Estados Unidos como laboratorio para examinar cómo las configuraciones morfológicas de las redes viales se asocian con los patrones modales de viaje. Este contexto ofrece condiciones de datos, comparabilidad y disponibilidad de información que permiten explorar con rigor la relación entre forma urbana y movilidad, aportando un marco analítico replicable en futuros estudios sobre ciudades latinoamericanas. De este modo, el trabajo busca generar un conocimiento transferible que sirva de base para investigaciones posteriores en contextos del Sur Global, donde las diferencias en estructura urbana, planificación y desigualdad espacial plantean retos aún más complejos para la movilidad sostenible.

Capítulo 2

PROBLEMA

2.1. Justificación

La forma física de las ciudades incide de manera directa en los patrones de movilidad urbana, afectando cómo las personas se desplazan, acceden a servicios y participan en la vida urbana. A pesar de esto, los estudios comparativos que permitan clasificar la morfología urbana a gran escala son aún escasos (Quesada-Thompson, 2023). Limitaciones como estas dificultan incorporar el análisis espacial como una variable clave en la planificación del transporte y el diseño urbano sostenible o, en su defecto, tener un indicador apropiado.

El presente proyecto se justifica en la necesidad de brindar un enfoque cuantitativo, reproducible y comparativo que permita identificar cómo las configuraciones espaciales del entorno construido influyen en las decisiones de transporte. Al utilizar herramientas algorítmicas y modelos de aprendizaje no supervisado para clasificar formas urbanas en distintas ciudades, el estudio aportará una base empírica sólida que puede fortalecer el diseño de políticas públicas orientadas a una movilidad más equitativa, eficiente y ambientalmente sostenible. Enfocándonos en el análisis de una muestra de ciudades seleccionadas por sus características morfológicas y la disponibilidad de datos de movilidad derivados de datos censales o reportes de las encuestas de movilidad. La unidad de estudio corresponde a divisiones administrativas intraurbanas, lo que permite examinar patrones internos con mayor precisión.

A partir de fuentes abiertas y herramientas computacionales reproducibles, se construyen indicadores relacionados con la red vial, el parcelamiento y la conectividad urbana. Estos insumos permiten caracterizar tipologías morfológicas y vincularlas con patrones de movilidad mediante técnicas estadísticas multivariadas y análisis de redes.

2.2. Planteamiento del problema

Comprender la relación entre morfología urbana y movilidad permite enfrentar desafíos contemporáneos como la congestión vehicular, la inequidad en el acceso a oportunidades y la fragmentación del territorio urbano ([Geurs and Van Wee, 2004](#)). Donde la morfología urbana, entendida como la configuración espacial de las calles, edificaciones y espacios abiertos, determina no solo la accesibilidad y conectividad de un territorio, sino también los patrones de desplazamiento de sus ciudadanos. A pesar de su relevancia, muchas políticas urbanas y de transporte han abordado la movilidad desde una perspectiva funcionalista, sin considerar cómo la estructura urbana puede potenciar o limitar el acceso equitativo a distintos modos de transporte y, en consecuencia, a las oportunidades de empleo, educación, comercio y desarrollo social que ofrece un territorio ([Quesada-Thompson, 2023](#)).

Este estudio parte de la premisa de que ciertas configuraciones morfológicas pueden inducir patrones de movilidad más sostenibles y equitativos. A partir de un enfoque comparativo aplicado a una muestra de ciudades, se analizarán atributos estructurales de las redes viales mediante indicadores topológicos y espaciales [Bamakan et al. \(2019\)](#); [Cardillo et al. \(2006\)](#), con el fin de identificar asociaciones entre la morfología urbana y la distribución modal. La estructura vial se cuantifica a través de un conjunto diverso de métricas que permiten caracterizar su forma, conectividad y organización interna. Al identificar tendencias comunes y divergencias, el estudio busca comprender en qué medida determinadas configuraciones morfológicas urbanas se asocian con patrones específicos de uso del transporte y cómo estas pueden favorecer o desincentivar ciertos modos de desplazamiento.

En este marco, la investigación analiza cómo la estructura de las redes viales condiciona los patrones de movilidad y la elección modal, considerando las variaciones internas que distinguen distintos modos de desplazamiento dentro de una misma forma urbana.

2.3. Objetivos

2.3.1. Objetivo General.

Evaluar la relación entre la morfología de las redes viales y los patrones de reparto modal a nivel urbano mediante un estudio que integre análisis topológico y espacial con métricas derivadas de la teoría de grafos, aplicadas a distintas configuraciones urbanas.

2.3.2. Objetivos Específicos.

- Cuantificar la estructura de la red vial en diferentes ciudades mediante métricas topológicas como espaciales y agrupamiento de patrones viales.
- Analizar las correlaciones entre la organización de la red vial y la distribución modal del transporte a partir de datos de movilidad.
- Comparar ciudades con distintas morfologías urbanas para identificar tendencias comunes y divergencias en la relación entre estructura vial y movilidad.

Capítulo 3

MARCO DE REFERENCIA

Este capítulo establece el fundamento teórico para el análisis de la morfología urbana. Se inicia con una revisión de las principales tipologías de patrones urbanos, incluyendo la reticular, la jerárquica, la orgánica y las formas híbridas. A continuación, se detalla un conjunto de métricas espaciales y topológicas utilizadas para cuantificar y caracterizar estas tramas, tales como la circularidad, la densidad de calles y nodos, la entropía y la proporción de calles sin salida. Finalmente, se exploran diversos enfoques de centralidad, como el grado, la cercanía, la intermediación y PageRank, para analizar la importancia relativa de los elementos dentro de la red vial urbana.

3.1. Tipologías de patrones urbanos

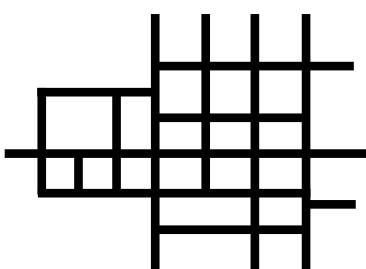
El reconocimiento de tipologías en los trazados urbanos constituye un pilar del análisis morfológico. Más allá de su utilidad descriptiva, las tipologías permiten vincular configuraciones espaciales con desempeños funcionales, y en este marco aspectos como la permeabilidad, la legibilidad, la distribución del tráfico y la accesibilidad peatonal articulan de manera concreta esa relación. La literatura ha documentado la evolución de los patrones viales desde tramas ortogonales clásicas hasta configuraciones jerárquicas contemporáneas, señalando los condicionamientos técnicos, normativos y culturales que han orientado dichas transformaciones ([Southworth and Ben-Joseph, 1995](#)). En la tradición de estudios morfológicos, y en particular en la sistematización propuesta por Marshall ([Marshall, 2004](#)) ampliada por trabajos enfocados en

morfología urbana (Asami et al., 2001), pueden distinguirse familias de trazados que, aunque admiten variaciones locales y grados de mezcla, comparten rasgos estructurales identificables.

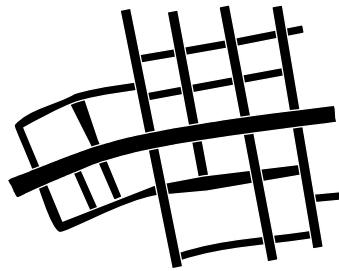
3.1.1. Reticular (gridiron)

La trama reticular se caracteriza por la prevalencia de intersecciones próximas a la ortogonalidad, bloques de forma y tamaño relativamente uniformes y continuidad regular de ejes. Históricamente asociada a procesos de colonización y a operaciones de expansión planificada, promueve una elevada conectividad y una distribución más homogénea de itinerarios. En términos de medición, suele presentar alta proporción de intersecciones en cruz (X-junction), baja variabilidad angular, proporciones ortogonales elevadas y entropías de orientación reducidas. La circularidad media tiende a valores cercanos a la unidad debido a la abundancia de rutas alternativas casi directas, mientras que la densidad de intersecciones por superficie es elevada, especialmente en mallas de alta resolución.

Las figuras 1a y 1b ilustran la estructura ortogonal característica del tipo reticular. La primera evidencia la disposición geométrica del trazado, y la segunda la composición que expresa su elevada conectividad y accesibilidad.



(a) Configuración estructural.



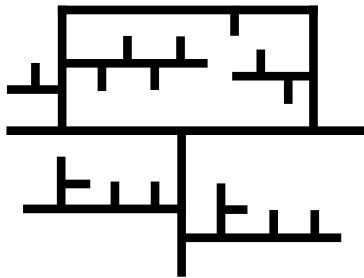
(b) Composición métrica.

Figura 1: Tipología B — Patrón reticular. Alta regularidad y ortogonalidad, con intersecciones predominantemente rectas y elevada densidad de conectividad.

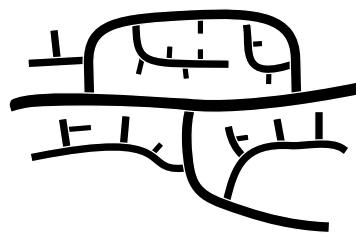
3.1.2. Jerárquica o dendrítica (suburbana/cul-de-sac)

El patrón jerárquico organiza la red vial en una estructura de tipo árbol, calles locales que desembocan en colectoras y estas, a su vez, en arterias. La continuidad transversal es limitada y la permeabilidad depende de unos pocos ejes superiores. Morfológicamente, se distingue por la presencia significativa de extremos de red (cul-de-sac), proporciones altas de intersecciones en T, y una distribución de grados nodales que enfatiza extremos y codos frente a intersecciones en cruz. La circuidad media suele ser alta debido a desvíos y barreras locales; la densidad de intersecciones por superficie es comparativamente menor y la entropía de orientaciones, aunque puede ser moderada, no compensa la falta de redundancia topológica. La literatura normativa del siglo XX recoge la difusión de este patrón por razones de seguridad y segregación de flujos, pero también señala sus costos en movilidad activa y conectividad fina ([Southworth and Ben-Joseph, 1995](#)).

Las figuras [2a](#) y [2b](#) ilustran la morfología característica del patrón cul-de-sac, donde la jerarquización vial limita la conectividad lateral y concentra los flujos en pocos ejes principales. La primera representa la disposición dendrítica del trazado y la segunda sintetiza, la elevada proporción de calles terminales y la dependencia funcional de las arterias colectoras.



(a) Configuración estructural.



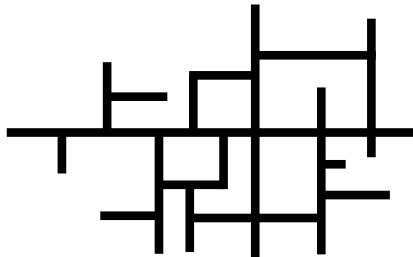
(b) Composición métrica.

Figura 2: Tipología D — Patrón cul-de-sac. Estructura jerárquica con baja conectividad transversal, alta proporción de calles terminales y concentración de flujos en arterias principales.

3.1.3. Orgánica o irregular

Bajo la denominación orgánica agrupamos tramas cuyo desarrollo ha estado fuertemente condicionado por la topografía, por procesos históricos de adición incremental o por lógicas de parcelación previas al viario moderno unificado. Se observa una mayor diversidad de ángulos en intersecciones, bloques de geometría variable y ejes cuya continuidad se interrumpe o quiebra con frecuencia. En métricas, esto se traduce en entropías de orientación relativamente altas, coeficientes de variación angular significativos y densidades de intersección que pueden fluctuar según el grano del tejido. La conectividad a través no es necesariamente baja, pero la legibilidad direccional es menor que en una retícula, y la circuidad depende fuertemente del relieve y de las tramas históricas superpuestas.

Las figuras 3a y 3b muestran la forma irregular y adaptativa del trazado orgánico. La primera destaca su ajuste al relieve y a la evolución histórica del tejido, mientras que la segunda resume su variabilidad y menor uniformidad direccional.



(a) Configuración estructural.



(b) Composición métrica.

Figura 3: Tipología A — Patrón orgánico. Red irregular con baja ortogonalidad y conectividad variable, dominada por calles curvas y trazados adaptativos.

3.1.4. Híbrida y superpuesta

La ciudad contemporánea rara vez responde a una tipología pura. Es frecuente encontrar superposiciones de fases de planificación y extensiones orgánicas de tramas planificadas, generando ámbitos híbridos. En estos casos coexisten

retículas locales con sistemas jerárquicos de escala mayor, o corredores direccionales que cortan tejidos irregulares. Identificar y acotar estos ámbitos permite interpretar correctamente promedios y dispersión de indicadores y evita inferencias erróneas sobre el desempeño global de la red.

Las figuras 4a y 4b corresponden al tipo híbrido, que combina características de tramas reticulares y orgánicas. La primera representa su configuración espacial, donde coexisten sectores planificados y áreas de crecimiento más libre, mientras que la segunda refleja la coexistencia de jerarquías locales y niveles intermedios de conectividad.

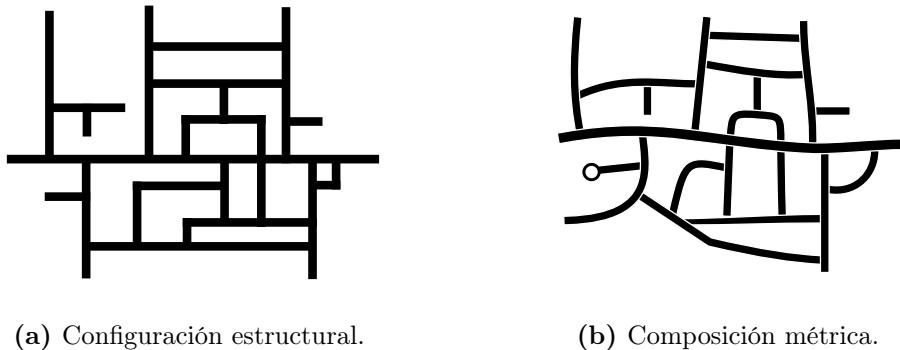


Figura 4: Tipología C — Patrón híbrido. Combina rasgos de la retícula con trazados curvilíneos, mostrando variaciones de conectividad entre sectores.

Concluida la caracterización tipológica del trazado urbano, avanzamos hacia su descripción cuantitativa. Partimos de la premisa de que las redes de calles, caminos y demás vías de tránsito organizan la dinámica cotidiana de la ciudad y condicionan sus patrones de accesibilidad y uso del suelo (Quesada-Thompson, 2023). Para operacionalizar esta idea representamos el sistema vial como un grafo urbano $G = (V, E)$ embebido en el plano: las intersecciones y extremos de vía constituyen los vértices V , mientras que los ejes de calle entre intersecciones se modelan como aristas E . Dependiendo del objetivo, el grafo puede ser no dirigido o dirigido para incorporar sentidos de circulación. Dado que la red se analiza en un soporte bidimensional, adoptamos una representación depurada y consistente entre áreas de estudio mediante la simplificación geométrica y, cuando corresponde, la planarización de cruces multinivel (Masucci et al., 2013).

Sobre esta base metodológica, organizamos el marco de medición en dos familias complementarias. En primer lugar, presentamos las métricas espaciales, que describen la dimensión geométrica y territorial del viario independiente-mente de la estructura de conexiones. En segundo lugar, introduciremos las métricas topológicas, centradas en la configuración de enlaces y grados de los nodos y en la conectividad a través de la malla. Esta secuencia permite, primero, cuantificar el soporte físico de la red y, después, analizar su entramado estructural. Las métricas empleadas se adaptan del trabajo en análisis de redes provisto por las librerías OSMnx ([Boeing, 2017, 2018](#)) y NetworkX ([NetworkX Developers, 2023](#)), complementadas con formulaciones geométricas y estadísticas desarrolladas en este estudio. Las referencias específicas a las fuentes de cada indicador se resumen en la Tabla 3.1.

3.2. Métricas espaciales

Las métricas espaciales se calculan sobre G en su geometría embebida: cada arista $e \in E$ posee una longitud $\ell(e)$ y una orientación angular definida en el dominio axial $[0^\circ, 180^\circ]$; el análisis se restringe a un polígono de referencia con área A en un sistema de coordenadas métrico. Todas las estimaciones se realizan sobre la red previamente depurada para asegurar comparabilidad. A continuación se presenta cada métrica con su formulación y lectura interpretativa.

3.2.1. Circularidad

La circularidad de rutas es una métrica que evalúa la eficiencia de una red vial al cuantificar el grado de desviación entre la distancia geodésica y la distancia recorrida sobre la red teniendo en cuenta los factores de dirección ([Boeing, 2019a](#)). Matemáticamente, se expresa como:

$$\psi = \frac{d_{\text{red}}}{d_{\text{geo}}} \quad (3.1)$$

donde d_{red} es la distancia real a través de la red y d_{geo} es la distancia en línea recta entre los nodos de inicio y destino. Clasificando redes urbanas en términos de eficiencia, siendo $\psi = 1$ el ideal (ruta directa) y valores $\psi > 1$ indicativos de ineficiencia, la circularidad proporciona una herramienta cuantitativa para analizar cómo la estructura física de las ciudades afecta la

movilidad de diferentes modos de transporte. Por ejemplo, redes con valores bajos de circularidad tienden a favorecer patrones caminables, mientras que aquellas con alta circularidad pueden incentivar el uso del automóvil debido a rutas indirectas. Al comparar las redes caminables y manejables mediante el índice de relación modal:

$$\phi = \frac{\mu_d}{\mu_w} \quad (3.2)$$

donde μ_d y μ_w son las medias de circularidad para modos vehiculares y peatonales, respectivamente, es posible identificar desequilibrios en accesibilidad entre distintos modos de transporte.

3.2.2. Longitud promedio de calle

Caracteriza la escala lineal de los elementos viales y su fragmentación. Se define E como el conjunto de aristas que componen la red, cuya cardinalidad $|E|$ corresponde al número total de segmentos considerados, y $\ell(e)$ como la longitud del segmento $e \in E$ tras la limpieza geométrica (disolución de nodos artefactuales y eliminación de micro-segmentos). La longitud promedio se define como

$$\bar{L} = \frac{1}{|E|} \sum_{e \in E} \ell(e). \quad (3.3)$$

Valores bajos de \bar{L} reflejarían así mallas finas y frecuentes interrupciones, mientras que valores altos apuntan a corredores continuos y jerarquizados. Para evitar sesgos por segmentación administrativa, conviene definir una calle como entidad geométrica continua (unión de aristas con misma orientación/nombre) y reportar en paralelo la longitud promedio por segmento y por calle consolidada.

3.2.3. Densidad de aristas

Mide la intensidad lineal de la infraestructura por área, integrando tanto cantidad como longitud de segmentos:

$$\rho_E = \frac{\sum_{e \in E} \ell(e)}{A}, \quad (3.4)$$

con A el área del polígono de referencia, ρ_E aumenta con redes compactas y jerarquías bien conectadas; disminuye cuando hay vacíos urbanos o grandes

superficies no viarias. Para comparaciones válidas, el mismo criterio de recorte espacial y misma generalización geométrica deben aplicarse en todas las ciudades. Es útil desagregar ρ_E por tipología (primarias/secundarias/locales) para distinguir densificación estructural de microtrama local.

3.2.4. Densidad de calles

Cuantifica cuántas calles únicas existen por unidad de superficie, enfatizando la fragmentación nominal más que la longitud acumulada. Si S denota el conjunto de calles consolidadas, entonces:

$$\rho_S = \frac{|S|}{A}. \quad (3.5)$$

Valores altos indican gran cantidad de ejes distintos, pero no garantizan continuidad si predominan calles muy cortas. Por ello, ρ_S debe leerse junto con \bar{L} : un ρ_S alto con \bar{L} baja sugiere trama hiperfragmentada, mientras que ρ_S moderado con \bar{L} alta suele corresponder a corredores bien definidos.

3.2.5. Densidad de nodos

Refleja la concentración de intersecciones y extremos por superficie:

$$\rho_V = \frac{|V|}{A}. \quad (3.6)$$

Un valor elevado de ρ_V tiende a asociarse con manzanas pequeñas, alta permeabilidad local y mayor redundancia de conexiones. Sin embargo, un ρ_V elevado por proliferación de nodos puede sobreestimar la conectividad efectiva; de ahí la importancia de pre-procesar la red (simplificación) antes del cómputo.

3.2.6. Densidad de segmentos

Cuenta tramos viales por superficie, capturando la granularidad de la partición:

$$\rho_{\text{seg}} = \frac{|E|}{A}. \quad (3.7)$$

A igualdad de ρ_E , un ρ_{seg} más alto implica segmentos más cortos (mayor granularidad de control/giros), mientras que valores bajos implican partición

gruesa. La métrica es sensible a la política de segmentación, por lo que es necesario documentar la cadena de procesamiento empleada en la simplificación.

3.2.7. Ángulo medio en intersecciones

Resume la organización local del trazado en los puntos de cruce. Sea θ_m el ángulo interior dominante en la m -ésima intersección, medido en el dominio axial $[0^\circ, 180^\circ)$ para evitar doble contabilidad de direcciones opuestas, con $m = 1, \dots, M$. El ángulo medio es

$$\bar{\theta} = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \theta_m. \quad (3.8)$$

Valores próximos a 90° son característicos de retículas ortogonales; desviaciones sistemáticas hacia ángulos agudos u obtusos denotan sesgos direccionales (tramas diagonales o radiales). En redes dirigidas, la medición axial sigue siendo apropiada si la métrica busca orden geométrico más que sentido de flujo; de lo contrario, se puede extender al dominio $[0^\circ, 360^\circ)$ con el consiguiente cambio interpretativo.

3.2.8. Coeficiente de variación angular

Evalúa la heterogeneidad angular relativa, normalizando la dispersión por la media:

$$CV_\theta = \frac{\sigma_\theta}{\bar{\theta}}, \quad (3.9)$$

donde σ_θ es la desviación estándar de $\{\theta_m\}$. Un CV_θ alto revela disposiciones irregulares con abanico amplio de ángulos; valores bajos reflejan homogeneidad (p. ej., cuadrículas). Dado que la estadística sobre ángulos lineales puede ser sensible a discontinuidades en los extremos del dominio, conviene validar con medidas de estadística circular como análisis de robustez.

3.2.9. Proporción ortogonal

Estima la prevalencia de intersecciones cercanas a la ortogonalidad, rasgo típico de tramas reticulares. Con tolerancia $\delta > 0$, se define

$$P_\perp(\delta) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \mathbf{1}\{|\theta_m - 90^\circ| \leq \delta\}. \quad (3.10)$$

Valores elevados indican predominio de cruces quasi-rectos, asociados a mallas regulares y previsibles; valores reducidos sugieren morfologías orgánicas u oblicuas. La elección de δ (p. ej., 10°) debe declararse para asegurar comparabilidad y puede complementarse con sensibilidad en $\delta \in [5^\circ, 15^\circ]$.

3.3. Métricas topológicas

Una vez caracterizado el soporte geométrico del viario mediante las métricas espaciales, abordamos las métricas topológicas, centradas en la estructura de conexiones del grafo independientemente de su embebimiento en el plano. En este enfoque, manteniendo la definición del grafo $G = (V, E)$ cuya información esencial es la conectividad entre vértices, modelada por la matriz de adyacencia $A = (a_{ij})$. La métrica básica es el grado $\deg(v)$, que contabiliza el número de aristas incidentes en cada nodo y permite distinguir la distribución de grados, la proporción de calles terminales y la densidad efectiva de intersecciones por configuración, todos ellos indicadores de permeabilidad y redundancia estructural de la malla. Cuando la red incorpora sentidos de circulación, trabajamos con su versión dirigida G^\rightarrow y la conectividad se evalúa en términos de componentes fuertemente y débilmente conexas, distinguiendo grados de entrada y salida.

3.3.1. Calles por nodo promedio

Como métrica de conectividad local, cuenta cuántas calles confluyen en cada nodo de un grafo primal no dirigido y simplificado. Sea $G = (V, E)$ dicho grafo y, para cada $v \in V$, sea $s(v)$ el número de calles incidentes en v . La medida es

$$\bar{s} = \frac{1}{|V|} \sum_{v \in V} s(v). \quad (3.11)$$

También puede expresarse a partir de los conteos por número de calles. Si n_d es el número de nodos con $s(v) = d$ y $M = \sum_d n_d = |V|$, entonces

$$\bar{s} = \sum_d d \frac{n_d}{M} = \sum_d d p_d, \quad (3.12)$$

donde $p_d = n_d/M$ es la proporción de nodos con d calles, valores altos de \bar{s} indican intersecciones más conectadas (por ejemplo, retículas con abundantes

4-vías), valores bajos reflejan predominio de extremos y intersecciones en T, típico de tramas con cul-de-sac.

3.3.2. Entropía

El grado de entropía en una ciudad puede determinar el orden y desorden de las calles. Por lo que es posible medir la entropía considerando la longitud del segmento de la calle, el grado de nodo promedio y la proporción de intersecciones de cuatro vías y callejones sin salida. Además, es posible generar un nuevo indicador de orden de orientación para cuantificar la lógica de ordenamiento geométrico de una cuadrícula. Con lo anterior, se establecen relaciones de entropía de orientación de una ciudad que incluyen medidas de conectividad en un circuito urbano. A través de la cuantificación de la entropía de la red vial, se evalúa el orden y la complejidad de la estructura urbana ([Boeing, 2019b](#)).

Matemáticamente, la entropía de Shannon se utiliza para medir la dispersión de las orientaciones de las calles dentro de una ciudad. Si se define el conjunto de orientaciones como o_i , la entropía H_o de las orientaciones se calcula como:

$$H_o = - \sum_{i=1}^n P(o_i) \log_e P(o_i) \quad (3.13)$$

donde $P(o_i)$ es la proporción de orientaciones que caen en el i -ésimo bin, y n es el número total de bins (entiéndase como bins los intervalos de un rango definido (en este caso, de 0° a 360°) en los cuales se agrupan las orientaciones de las calles). Para obtener una medida más precisa, se ponderan las orientaciones por la longitud de las calles en la red no simplificada, obteniendo así la entropía ponderada H_w :

$$H_w = - \sum_{i=1}^n P(w_i) \log_e P(w_i) \quad (3.14)$$

donde $P(w_i)$ es la proporción de orientaciones ponderadas. Estas medidas permiten calcular el orden de las orientaciones urbanas, donde una distribución más uniforme de las orientaciones indica un mayor desorden (mayor entropía) y una disposición más estructurada indica un menor desorden (menor entropía). La medida normalizada de orden φ se define como:

$$\varphi = 1 - \left(\frac{H_o - H_{\min}}{H_{\max} - H_{\min}} \right)^2 \quad (3.15)$$

donde H_{\max} y H_{\min} son los valores máximos y mínimos teóricos de la entropía. Un valor de φ cercano a 1 indica una red vial altamente ordenada, mientras que un valor cercano a 0 indica una red vial desordenada. Este enfoque permite correlacionar la estructura de la red vial con patrones de movilidad y eficiencia en el tráfico, siendo útil para la planificación de infraestructuras urbanas.

3.3.3. Intersecciones topológicas por polígono

Para cada polígono de análisis P consideramos la subred $G[P] = (V[P], E[P])$ inducida por los nodos y aristas contenidos en P , tras la simplificación previa de la red. La configuración de una intersección se caracteriza por su grado: un nodo con $\deg(v) = k$ define una k -junction. Sea

$$V_k(P) = \{ v \in V[P] : \deg(v) = k \}, \quad k \in \mathbb{N}, \quad (3.16)$$

y en particular $V_2(P)$ corresponde a codos o continuidad geométrica (no intersección funcional), mientras que $V_3(P)$ y $V_4(P)$ representan las intersecciones en T y en X. Los indicadores topológicos se reportan como conteos y proporciones, invariantes a rotaciones o reescalados. El conteo por tipo es

$$N_k(P) = |V_k(P)|, \quad (3.17)$$

y la proporción por tipo, normalizada por el tamaño de la subred, es

$$\pi_k(P) = \frac{|V_k(P)|}{|V[P]|}, \quad \sum_{k \geq 1} \pi_k(P) = 1. \quad (3.18)$$

La fracción de intersecciones funcionales resulta de

$$\pi_{\geq 3}(P) = \sum_{k \geq 3} \pi_k(P), \quad (3.19)$$

y la desagregación usual es

$$\pi_T(P) = \pi_3(P), \quad \pi_X(P) = \pi_4(P), \quad \pi_{>4}(P) = \sum_{k \geq 5} \pi_k(P). \quad (3.20)$$

Para caracterizar la complejidad de la malla se reporta además el grado medio

$$\bar{k}(P) = \frac{1}{|V[P]|} \sum_{v \in V[P]} \deg(v), \quad (3.21)$$

y, cuando se requiera, las versiones dirigidas mediante grados de entrada y salida. La comparabilidad exige aplicar el mismo protocolo de simplificación y el mismo criterio de recorte para todas las subredes $G[P]$.

3.3.4. Proporción de calles terminales (Dead End Ratio)

Tratamos la presencia de calles terminales como un rasgo puramente estructural del grafo vial. Sea $G = (V, E)$ la red simplificada y no dirigida para el cómputo de grados, con $\deg(v)$ el grado del nodo $v \in V$. Denominamos *hoja* a todo nodo con grado uno y definimos el conjunto $L = \{ v \in V : \deg(v) = 1 \}$. La proporción topológica basada en nodos se expresa como

$$\text{DER}_V = \frac{|L|}{|V|} \in [0, 1], \quad (3.22)$$

mientras que la variante basada en aristas contabiliza el peso relativo de las conexiones incidentes a hojas,

$$\text{DER}_E = \frac{|\{ e = \{u, v\} \in E : u \in L \text{ o } v \in L \}|}{|E|} \in [0, 1]. \quad (3.23)$$

Ambos cocientes son invariantes a rotaciones, escalas y recortes geométricos: dependen únicamente de la conectividad combinatoria. Valores elevados de (3.22) o (3.23) indican predominio de extremos $\deg = 1$ y, por tanto, menor conectividad de paso y menor redundancia de rutas; valores bajos reflejan una malla más permeable.

Con las métricas topológicas y espaciales definidas, se las organiza en un conjunto acotado de dimensiones con afinidad conceptual que condensan los aspectos nucleares de la morfología urbana. El esquema de dimensiones propuesto no es rígido, sino adaptable a variaciones de escala y heterogeneidad, manteniendo coherencia con las definiciones originales y preservando el marco interpretativo. En este sentido, la Tabla 3.1 ofrece la síntesis operativa de las métricas conforme a dichas dimensiones, priorizando robustez analítica y capacidad explicativa para distinguir diferencias estructurales entre contextos urbanos.

Tabla 3.1: Métricas de redes viales urbanas agrupadas por categoría.

Métrica	Símbolo
<i>Conectividad</i>	
Proporción de calles sin salida (DER)	$DER_{E,V}$
Intersecciones en L^\dagger	π_2
Intersecciones en T^\dagger	π_3
Intersecciones en X^\dagger	π_X
Calles por nodo promedio [‡]	\bar{s}
Grado promedio [†]	\bar{k}
<i>Geometría</i>	
Circularidad promedio	ψ
Longitud promedio de calles [†]	\bar{l}_s
<i>Densidad</i>	
Densidad de aristas [†]	ρ_e
Densidad de calles [†]	ρ_s
Densidad de nodos [†]	ρ_n
Densidad de intersecciones [†]	ρ_{int}
Densidad de segmentos	ρ_{seg}
<i>Propiedades Angulares</i>	
Ángulo promedio	$\bar{\theta}$
Coeficiente de variación angular	CV_θ
Proporción ortogonal	$P_\perp(\delta)$
Entropía de orientación [†]	H_o

[†]Métricas implementadas con herramientas de `OSMnx` y `NetworkX` ([Boeing, 2017](#); [NetworkX Developers, 2023](#)).

3.4. Centralidades

Las métricas espaciales (Sección 3.2) y topológicas (Sección 3.3) hacen énfasis en la forma que tiene la red vial y cómo esta se conecta. Las centralidades añaden una capa sobre qué posiciones concentran mayor potencial de movi-

miento y jerarquía funcional (Bamakan et al., 2019).

3.4.1. Centralidad de grado

Tras caracterizar la geometría y la conectividad de la red, el primer indicador posicional es la centralidad de grado, que resume la permeabilidad local de cada nodo a partir del número de conexiones directas con sus vecinos inmediatos (one-hop). En grafos dirigidos se distinguen el grado de entrada k^{in} y el grado de salida k^{out} . Para grafos no dirigidos, la versión normalizada se define como (Freeman, 1978);

$$\text{DC}(v_i) = \frac{1}{N-1} \sum_{j=1}^N a_{ij}, \quad (3.24)$$

donde N es el número de nodos y a_{ij} el elemento de la matriz de adyacencia A (1 si hay conexión ij , 0 en caso contrario). Valores altos indican nodos con alta capacidad de conexión inmediata.

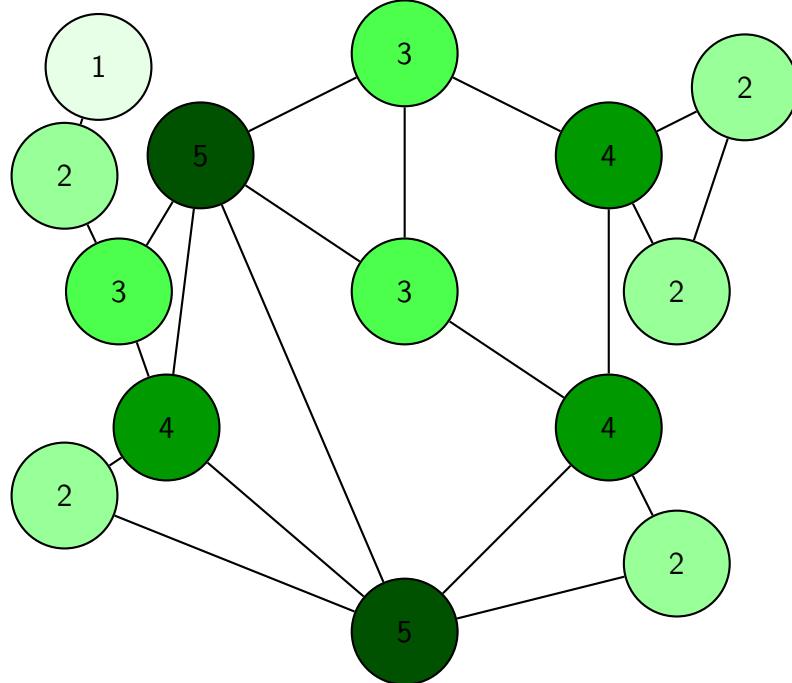


Figura 5: Modelo de red con nodos con diferente centralidad de grado C^D .

3.4.2. Centralidad de Cercanía

Se asigna un peso a cada nodo en función de su cercanía a los demás nodos de la red, calculando los caminos más cortos entre ellos y definiendo dichos pesos como la suma de estas distancias. Esto permite identificar a los individuos mejor posicionados para influir rápidamente en toda la red, destacando aquellos que actúan como los mejores emisores. Sin embargo, en redes altamente conectadas, este indicador tiende a perder utilidad, ya que, a gran escala, los pesos de los nodos serán demasiado similares, dificultando la diferenciación entre emisores efectivos y nodos con conexiones medianas o deficientes (Chen et al., 2012). En tales casos, se recomienda utilizar este indicador en clústeres específicos o emplear su forma armónica.

$$CC(v_i) = \frac{N - 1}{\sum_{j=1}^N C(v_i, v_j)} \quad (3.25)$$

Donde N denota el número total de nodos de la red, mientras que $C(v_i, v_j)$ corresponde a la distancia geodésica mínima entre los nodos v_i y v_j ($i \neq j$), de este modo, $CC(v_i)$ representa la centralidad de cercanía del nodo v_i , la cual cuantifica su proximidad relativa respecto al resto de los nodos en la red. Un nodo con un CC alto tiene distancias más cortas (según $C(v_i, v_j)$) hacia otros nodos, lo que indica que está estratégicamente ubicado para acceder rápidamente a toda la red.

Como se mencionó previamente, este indicador puede ser muy sensible en ciertas condiciones, como en nodos separados por largas distancias o en redes con conexiones faltantes. Para contrarrestar estas limitaciones, la literatura propone una versión armónica del indicador (Dekker, 2005), que suaviza los efectos de estas situaciones extremas. La forma armónica de la ecuación 3.25 se expresa de la siguiente manera, nótese que si se desea normalizar esta expresión se puede dividir por $N - 1$:

$$HC(v_i) = \sum_{j \neq i} \frac{1}{C(v_j, v_i)} \quad (3.26)$$

El gráfico 6 muestra los valores de centralidad de cercanía para todos los nodos. Los nodos con mayores valores de $CC(v_i)$ son los más centrales, pues alcanzan al resto mediante trayectorias más cortas en promedio.

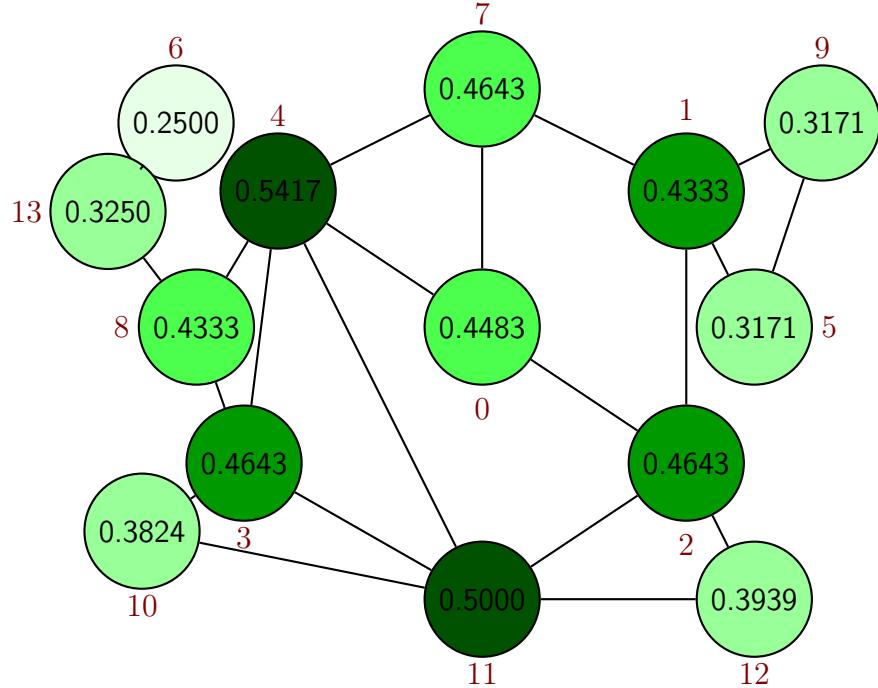


Figura 6: Modelo de red con nodos con diferente centralidad de cercanía C^C .

3.4.3. Centralidad de Intermediación

Tras caracterizar la centralidad de cercanía, que evalúa la proximidad global de cada nodo respecto al resto de la red, resulta pertinente considerar una medida complementaria que atiende al papel de los nodos en la articulación de las trayectorias, definiendo el grado en que un nodo se localiza en los caminos geodésicos que conectan pares de nodos distintos, lo que permite identificar aquellos que actúan como puentes o puntos de paso obligados en el flujo de información, complementando la conectividad global y el control del flujo (Freeman, 1978). Matemáticamente se define como

$$BC(v_k) = \frac{\sum_{i \neq k \neq j} \sigma_{ij}(v_k)}{\sum_{j=1}^N \sigma_{ij}} \quad (3.27)$$

donde σ_{ij} representa el número total de geodésicas entre los nodos v_i y v_j , y $\sigma_{ij}(v_k)$ corresponde a aquellos que atraviesan el nodo v_k . La condición

$i \neq k \neq j$ asegura que el nodo considerado no coincide con los extremos del camino. En grafos dirigidos, el valor puede normalizarse mediante $(N - 1)(N - 2)$ y para los no dirigidos $(N - 1)(N - 2)/2$, facilitando la comparación entre redes de distinto tamaño. Valores elevados de $BC(v_k)$ indican que el nodo tiene una función articuladora, al concentrar una proporción significativa de las rutas críticas de la red. En términos prácticos, estos nodos tienden a ser esenciales para la cohesión estructural: su eliminación incrementa las distancias promedio y puede fragmentar la red en componentes menos integrados. No obstante, debe tenerse en cuenta que un exceso de intermediación también puede reflejar la existencia de cuellos de botella o flujos desiguales entre comunidades.

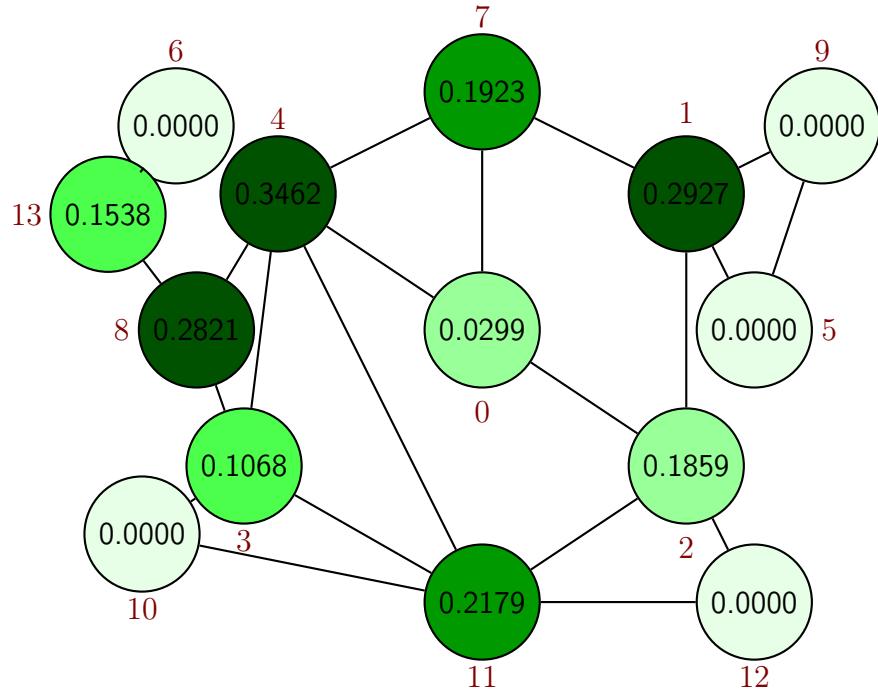


Figura 7: Modelo de red con nodos con diferente centralidad Intermediación C^B .

Es importante recalcar que la noción de intermediación no se restringe únicamente a los nodos. Una extensión directa consiste en evaluar el papel de las aristas en los caminos geodésicos de la red. Esta medida, conocida como centralidad de intermediación de aristas (edge betweenness), cuantifica cuán

críticos son los enlaces para el flujo potencial entre pares de nodos (Brandes, 2001, 2008; NetworkX Community, 2023). Formalmente, se define como:

$$C_B(e) = \sum_{s \neq t} \frac{\sigma_{st}(e)}{\sigma_{st}}, \quad (3.28)$$

donde $\sigma_{st}(e)$ es el número de geodésicas entre s y t que incluyen al arco e . Desde el punto de vista aplicado, esta métrica permite estratificar la jerarquía vial, donde valores bajos suelen asociarse a calles locales, valores intermedios a vías colectoras y valores altos a corredores principales.

3.4.4. PageRank

En el camino de medir la influencia de un nodo no solo en función de su número de conexiones directas, sino también incorporando la calidad y dirección de dichas conexiones, surge el algoritmo de PageRank como una extensión de la centralidad eigenvectorial. A diferencia de métricas más locales o menos robustas, esta variante introduce un modelo de caminata aleatoria con un parámetro de amortiguamiento que permite capturar influencias unidireccionales en redes dirigidas y, al mismo tiempo, evita que el cálculo quede atrapado en ciclos o regiones aisladas de la red (Page, 1998).

Formalmente, sea P la matriz de transición definida a partir de la matriz de adyacencia A , donde cada entrada $P_{ji} = 1/k_j^{\text{out}}$ si existe un arco $j \rightarrow i$ y k_j^{out} representa el número de conexiones salientes del nodo j . El vector de PageRank \mathbf{p} satisface entonces la relación

$$\mathbf{p} = (1 - \alpha) \mathbf{v} + \alpha P^\top \mathbf{p}, \quad (3.29)$$

donde $\alpha \in (0, 1)$ es el parámetro de amortiguamiento y \mathbf{v} corresponde al vector de teletransporte, usualmente uniforme cuando no existe una preferencia específica. De manera equivalente, en forma escalar el valor de PageRank de un nodo i se expresa como

$$\text{PR}(i) = (1 - \alpha) v_i + \alpha \sum_{j \in \text{In}(i)} \frac{\text{PR}(j)}{k_j^{\text{out}}}, \quad (3.30)$$

donde $\text{In}(i)$ denota el conjunto de nodos que apuntan hacia i .

Esta formulación combina la estructura interna del grafo con una componente exógena de redistribución, lo que permite interpretar los valores de PageRank como una medida estable de la importancia relativa de cada nodo dentro de la red. Los nodos con mayor PageRank son aquellos que concentran no solo un gran número de enlaces de entrada, sino enlaces provenientes de otros nodos altamente influyentes, consolidando así su papel central en la difusión y acumulación de información.

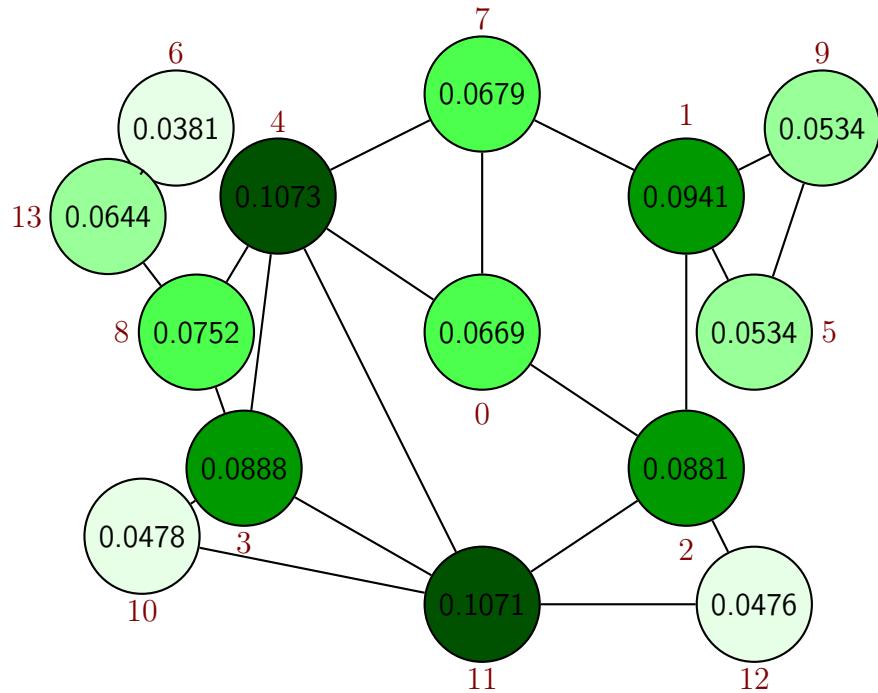


Figura 8: Modelo de red con nodos con diferente centralidad de indice PageRank C^{PR} .

3.5. Índices Globales de Centralización

Tras examinar diversas centralidades diseñadas para cuantificar la importancia de nodos y/o aristas individuales, resulta natural extender el análisis hacia una perspectiva macroscópica que caracterice la estructura de la red en su conjunto. Si bien las centralidades previas caracterizan localmente cada vértice o arista, con frecuencia es necesario resumir esa distribución en

un coeficiente único que exprese el comportamiento estructural general de la red. Un índice global permite resumir el grado de centralización de la red, es decir, hasta qué punto la conectividad y la influencia se concentran en un pequeño subconjunto de nodos o si, por el contrario, se distribuyen de manera más homogénea. A continuación, se presentan dos enfoques complementarios para abordar esta cuestión.

3.5.1. Entropía de la Distribución de Centralidades

Un método para evaluar la heterogeneidad en la importancia de los nodos es a través de la entropía de Shannon, un concepto fundamental de la teoría de la información que mide la incertidumbre o dispersión de una distribución de probabilidad ([Shannon, 1948](#)). Para aplicar este concepto al análisis de redes, primero se normaliza el vector de una centralidad dada, C_i , para obtener una distribución de probabilidad. Si $p_i = C_i / \sum_j C_j$ es la fracción de la centralidad total que posee el nodo i , la entropía de esta distribución se define como:

$$H = - \sum_{i=1}^n p_i \ln(p_i). \quad (3.31)$$

Cuando H adopta valores elevados, las centralidades tienden a ser homogéneas, lo que denota una red estructuralmente descentralizada con una distribución equilibrada de la importancia nodal. Por el contrario, un valor bajo de H sugiere que la centralidad está concentrada en unos pocos nodos, revelando una estructura jerárquica con centros bien definidos y una mayoría de nodos periféricos [Dehmer and Mowshowitz \(2011\)](#).

3.5.2. Índice de Centralización de Freeman

De manera complementaria, el índice de centralización propuesto por Freeman ofrece una medida normalizada de cuán centralizada está una red en torno a su nodo más influyente [Freeman \(1978\)](#). En lugar de medir la uniformidad de la distribución, este índice cuantifica la magnitud de la desigualdad. Para una red de n nodos y una medida de centralidad específica C_X , el índice se construye a partir de la suma de las diferencias entre la centralidad del nodo más importante $C_X(p^*)$ y la de todos los demás nodos. Esta suma se normaliza dividiéndola por el valor máximo que esta misma suma podría alcanzar teóricamente en una red del mismo tamaño. Formalmente, la

centralización global C_X se define por la siguiente expresión:

$$C_X = \frac{\sum_{i=1}^n [C_X(p^*) - C_X(p_i)]}{\max \sum_{i=1}^n [C_X(p^*) - C_X(p_i)]}, \quad (3.32)$$

donde $C_X(p_i)$ es la centralidad del nodo i , y $C_X(p^*) = \max_i \{C_X(p_i)\}$ es la centralidad máxima observada en la red. El denominador representa la máxima suma de diferencias posible, que típicamente se alcanza en una topología de estrella, donde un único nodo central está conectado a todos los demás, los cuales no tienen conexiones entre sí.

El valor de C_X se encuentra en el intervalo $[0, 1]$. Un valor cercano a 0 indica que la red es descentralizada, ya que las centralidades de todos los nodos son muy parecidas y, por tanto, las diferencias respecto al máximo son pequeñas. En cambio, un valor cercano a 1 revela una estructura altamente centralizada y jerárquica, donde un nodo domina de forma prominente la red. De este modo, mientras las métricas nodales describen la posición de cada elemento, el índice de Freeman caracteriza la topología global del grafo en función de su dependencia de un núcleo central.

Capítulo 4

DISEÑO METODOLÓGICO

En este capítulo se presenta la metodología empleada para la clasificación y el agrupamiento de los patrones urbanos. Se describe el procedimiento para la asignación de una tipología teórica a las tramas urbanas, incluyendo un método para el reconocimiento de formas híbridas. Además, se explica el enfoque de clasificación basado en técnicas de clustering para identificar patrones y subpatrones morfológicos de manera sistemática a partir de los datos analizados.

4.1. Metodología para la clasificación teórica y el agrupamiento de patrones urbanos

Para el análisis morfológico de las redes viales en las ciudades seleccionadas, el territorio urbano se segmentó en unidades administrativas definidas por la Oficina del Censo (*census tracts*). Esta partición ofrece una base precisa y consistente para relacionar la morfología con información complementaria, como los indicadores de movilidad disponibles a nivel de tract. El enfoque favorece comparaciones sistemáticas entre áreas urbanas, preservando, al mismo tiempo, la granularidad necesaria para captar heterogeneidad interna.

La morfología se evalúa a partir de las variables definidas en las secciones [3.2](#) y [3.3](#), que agrupan las métricas espaciales y topológicas pertinentes para describir redes viales. Sobre esta base, se aplica un método sistemático y replicable para cuantificar la correspondencia entre cada unidad urbana y perfiles teó-

ricos de patrones morfológicos establecidos en la literatura (Sección 3.1). El procedimiento se enmarca en un esquema de decisión multicriterio (MADM) (Triantaphyllou, 2000), que asigna puntajes ponderados y penalizaciones según la cercanía de los atributos observados a los valores característicos de cada patrón.

Dentro de este esquema se identifican tres tipos de intervalos por dimensión, iniciando por un intervalo óptimo con valores altamente representativos del patrón, un intervalo moderado con valores compatibles pero menos distintivos o potencialmente superpuestos con otras tipologías, y un intervalo crítico o penalizable con valores que contradicen rasgos definitorios. Formalmente, sea d_i el valor observado de la dimensión i y w_i su peso de relevancia para el patrón, el puntaje parcial s_i se define como:

$$s_i = \begin{cases} +S_o w_i, & \text{si } d_i \in \text{intervalo óptimo,} \\ +S_m w_i, & \text{si } d_i \in \text{intervalo moderado,} \\ -P_c w_i, & \text{si } d_i \in \text{intervalo crítico,} \end{cases}$$

donde S_o , S_m y P_c son coeficientes positivos con $S_o > S_m \geq 0$. El puntaje total para una unidad urbana respecto de un patrón se obtiene sumando sus contribuciones:

$$S_{\text{total}} = \sum_i s_i. \quad (4.1)$$

Este enfoque permite una evaluación cuantitativa y reproducible de la similitud morfológica entre áreas observadas y patrones teóricos, facilitando una clasificación sistemática basada en propiedades seleccionadas. La definición de valores de referencia y sus rangos no es arbitraria, sino que se fundamenta en una revisión detallada de estudios previos sobre redes viales desde perspectivas analíticas diversas. En el campo de la conectividad, se han introducido métricas destinadas a medir la integración estructural de las redes. Trabajos como Wu et al. (2024); Barrington-Leigh and Millard-Ball (2019) introducen indicadores como el *Street-Network Disconnectedness Index* (SN-Di), que cuantifica la desconexión estructural en conjuntos globales con más de 46 millones de kilómetros de calles, incorporando la proporción de *cul-de-sac*, la continuidad de enlaces según jerarquía y la presencia de conexiones redundantes. Complementariamente, Jiang (2007) analizó redes de 40 ciudades dentro y fuera de Estados Unidos mostrando que las configuraciones

urbanas suelen exhibir propiedades de *pequeño mundo* y *ley de potencia* tanto en longitudes de calle como en distribución de grados, aportando base empírica para establecer intervalos de referencia de variables topológicas. En la misma línea, [Lowry and Lowry \(2014\)](#) contrastaron 18 métricas morfológicas en más de 500 vecindarios del condado de Salt Lake, identificando las más discriminantes entre tipos históricos de desarrollo urbano y evidenciando la persistencia de patrones de expansión dispersa.

Por su parte, la densidad se ha examinado en [Cardillo et al. \(2006\)](#) y [Jiang \(2007\)](#) mediante representaciones de grafos espaciales ponderados, comparando redes reales con estructuras ideales empleando *Minimum Spanning Trees* (MST) y *Greedy Triangulations* (GT) metodologías que probaron ser eficaces para capturar la complejidad estructural de contextos urbanos reales. Para describir rasgos geométricos y angulares, trabajos como [Xie and Levinson \(2005\)](#) y [Boeing \(2019b\)](#) analizan indicadores de orientaciones, patrones de conexión (p. ej., *ringness*, *treeness*, *beltness*) y continuidad direccional, aplicados a configuraciones idealizadas (retículas a 90°, 45° y 30°) y a datos empíricos de 100 ciudades en distintos continentes. A partir de esta evidencia, se adaptaron los rangos y umbrales empleados en el presente estudio, integrándolos al marco de clasificación propuesto para asegurar coherencia conceptual y viabilidad empírica.

En continuidad con la sección previa, los intervalos y puntajes que se aplican aquí no son arbitrarios, derivan de la síntesis de evidencia empírica y marcos analíticos reseñados previamente, a partir de la cual se fijaron rangos operativos para cada métrica y tipología. La Tabla 4.1 explicita esta traducción del esquema MADM a la práctica, estableciendo para cada dimensión la correspondencia entre los intervalos (óptimo, intermedio y subóptimo) y los valores de suma que alimentan S_{total} . Esta normalización consolida en una regla común los valores de referencia extraídos de la literatura, asegura consistencia entre dimensiones heterogéneas y hace explícitas las penalizaciones cuando los atributos se apartan de los rasgos definitorios del patrón. La notación y los símbolos de las métricas siguen las secciones 3.2 y 3.3, y los perfiles teóricos corresponden a 3.1.

Tabla 4.1: Equivalencia de intervalos a grupos de puntaje por tipología

Métrica	Óptimo	Intermedio	Subóptimo
<i>CUL-DE-SAC</i>			
DER = π_1	5	4–3 [†]	2–1
treeScore	5	4–3	2–1
\bar{s} , \bar{d}_{CDS}	4–3	4–3 / 2–1	2–1
branch, ρ_{int}	4–3	2–1	2–1
loop, CV dist. CDS	4–3	2–1	2–1
<i>GRID</i>			
π_X	4–3	2–1	2–1
ψ , H_o , $P_{\perp}(\delta)$, σ_{θ} , \bar{s}	2–1	2–1	2–1
<i>ORGÁNICO</i>			
ψ , π_T/π_X , H_o	4–3	2–1	2–1
CV_{θ} , σ_{θ} , $P_{\perp}(\delta)$	2–1	2–1	2–1

† En el tramo alto del intervalo Intermedio de DER la suma es 4; en el resto, 3.

Con estas convenciones, la Tabla 4.2 establece los umbrales operativos para el patrón de tipo Grid. Se organizan por bloques de conectividad/topología, geometría y propiedades angulares, de modo que los tramos óptimos capturan retículas con mayor proporción de intersecciones en X, número promedio de calles por nodo más alto y marcada ortogonalidad con baja dispersión angular. La asignación de puntajes sigue la Tabla 4.1, por lo que cada intervalo contribuye de manera ponderada a S_{total} según la cercanía de los valores observados a la morfología reticular ideal.

Tabla 4.2: Umbrales de clasificación para patrones de tipo Grid

Métrica	Óptimo	Intermedio	Subóptimo
<i>Conejividad / Topología</i>			
π_X (prop. intersecciones en X)	[0.30, 1]	[0.25, 0.30)	[0.20, 0.25)
\bar{s} (calles por nodo promedio)	[3.00, ∞)	[2.70, 3.00)	[0, 2.70)
<i>Geometría</i>			
ψ (circularidad)	(0, 1.02)	[1.02, 1.04)	[1.04, ∞)
<i>Propiedades Angulares / Orientación</i>			
$P_{\perp}(\delta)$ (prop. ortogonal)	(0.70, 1]	[0.50, 0.70]	[0, 0.50)
σ_{θ} (desv. estándar ángulos, $^{\circ}$)	[0, 15)	[15, 30)	[30, ∞)
H_o (entropía de orientación)	[0, 0.50)	[0.50, 0.65)	[0.65, 1]

La Tabla 4.3 consigna los umbrales para el patrón Orgánico, caracterizado por mayor predominio de intersecciones en T frente a X, irregularidad geométrica y desorden direccional más altos. En consecuencia, los intervalos óptimos se sitúan en tramos elevados de la razón π_T/π_X , circularidad mayor y entropía/dispersión angular incrementada, mientras que la ortogonalidad pierde prominencia. Como antes, la lectura de puntajes se rige por la Tabla 4.1, asegurando comparabilidad con otras tipologías dentro del marco MADM.

Tabla 4.3: Umbrales de clasificación para patrones de tipo Orgánico

Métrica	Óptimo	Intermedio	Subóptimo
<i>Conectividad / Topología</i>			
π_T/π_X (razón T/X)	(1.7, ∞)	(1.2, 1.7]	(0.8, 1.2]
<i>Geometría</i>			
ψ (circularidad)	(1.20, ∞)	(1.12, 1.20]	(1.07, 1.12]
<i>Propiedades Angulares / Orientación</i>			
H_o (entropía de orientación)	(0.75, 1]	(0.65, 0.75]	(0.60, 0.65]
CV_θ (C.V angular)	(0.65, ∞)	(0.45, 0.65]	[0, 0.45]
σ_θ (S.D de ángulos, °)	(35, ∞)	(25, 35]	[0, 25]
$P_\perp(\delta)$ (prop. ortogonal)	[0, 0.30)	[0.30, 0.40)	[0.40, 1]

Por su parte, la Tabla 4.4 presenta los umbrales del patrón Cul-de-sac, donde sobresalen la abundancia de nodos de grado 1, la estructura arbórea y mayores profundidades de terminación. Se reflejan densidades de intersecciones más bajas y patrones angulares con menor ortogonalidad. La regla de puntuación para DER y el resto de métricas se aplica conforme a la Tabla 4.1, de modo que los intervalos óptimos refuerzen configuraciones ramificadas y las desviaciones hacia conectividades redundantes u ortogonalidades marcadas resulten penalizadas en S_{total} .

Tabla 4.4: Umbrales de clasificación para patrones de tipo Cul-de-sac

Métrica	Óptimo	Intermedio	Subóptimo
<i>Conectividad / Topología</i>			
DER = π_1 (prop. nodos grado 1) \bar{s} (calles por nodo promedio)	(0.23, 1] (0, 2.20)	(0.12, 0.23] [2.20, 2.50)	[0.06, 0.12] [2.50, 2.70)
<i>Geometría</i>			
\bar{d}_{CDS} (profundidad media) treeScore (estructura arbórea)	(2.5, ∞) (0.60, 1]	(2.0, 2.5] (0.40, 0.60]	(1.5, 2.0] (0.30, 0.40)
<i>Densidad</i>			
ρ_{int} (por km^2)	[0, 25)	[25, 40)	[40, 70)
<i>Propiedades Angulares / Orientación</i>			
loop (proporción de bucles) branch (ramificación CDS) CV dist. CDS (coef. variación)	(0, 0.15) (0.50, 1] (0.80, 1]	[0.15, 0.25) (0.40, 0.50] (0.60, 0.80]	[0.25, 0.35) (0.30, 0.40] (0.40, 0.60]

4.1.1. Asignación de patrón y reconocimiento de formas híbridas

La asignación de una unidad urbana a una tipología se determina por el patrón cuyo puntaje agregado S_{total} resulta máximo, siempre que supere un umbral mínimo que asegure correspondencia sustantiva. Se reconoce entonces un polígono de estudio como híbrido cuando dos o más tipologías alcanzan puntajes altos y comparables, indicando coexistencia significativa de rasgos. Esto ocurre, por ejemplo, en ámbitos con rasgos reticulares prominentes combinados con componentes típicos de crecimiento orgánico, frecuentemente asociados a condicionantes topográficos o a estratos históricos superpuestos. También se reconoce una forma híbrida cuando ningún puntaje domina de manera clara, pero la distribución de valores en las dimensiones morfológicas evidencia una configuración mixta discernible (p. ej., trazado predominantemente ortogonal con presencia apreciable de *cul-de-sac* propia de desarrollos recientes). De este modo, la clasificación trasciende categorías mutuamente excluyentes y refleja con mayor fidelidad la complejidad del tejido urbano.

En coherencia con los criterios de asignación mencionados en la sección 4.1 y el tratamiento de formas híbridas, se propone una guía operativa que convierte estas reglas en condiciones verificables. La Tabla 4.5 introduce, de manera sintética, conjuntos de rasgos que permiten sustentar la etiqueta híbrida cuando coexisten evidencias concurrentes en más de una tipología. Sus umbrales y combinaciones se anclan en los rangos establecidos para cada patrón (Tablas 4.2, 4.3 y 4.4) y en la regla de puntaje común (Tabla 4.1), de modo que la lectura sea consistente con el esquema MADM y la comparación entre áreas no dependa de juicios ad hoc.

Tabla 4.5: Características diagnósticas de patrones híbridos

Condición	Descripción
GRID-ORGÁNICO (RETÍCULA IRREGULAR)	
Base reticular deformada	$\pi_X > 0.15$ y $P_\perp(\delta) > 0.4$
Sinuosidad e irregularidad	$\psi > 1.08$ y $H_o > 0.6$
Alta conectividad irregular	$\bar{s} > 2.7$ con $\sigma_\theta > 25^\circ$
GRID-CUL-DE-SAC (SUBURBANIZACIÓN)	
Estructura reticular base	$\pi_X > 0.20$ o $P_\perp(\delta) > 0.5$
Calles sin salida moderadas	$0.12 < \text{DER} < 0.25$
Densidad intermedia	$50 < \rho_{\text{int}} < 90 \text{ km}^{-2}$
Estructura parcialmente arbórea	$0.25 < \text{treeScore} < 0.45$
ORGÁNICO-CUL-DE-SAC (ORGÁNICO CERRADO)	
Estructura sinuosa	$\psi > 1.10$ y $H_o > 0.65$
Presencia de calles sin salida	$\text{DER} > 0.10$
Baja conectividad irregular	$\bar{s} < 2.5$ y $\pi_T/\pi_X > 1.3$
Profundidad significativa	$\bar{d}_{\text{CDS}} > 1.5$
TRANSICIÓN (INDEFINIDO)	
Sin patrón dominante	Puntaje máximo < 5
Similitud entre patrones	Diferencia entre top 3 patrones < 2 puntos

Nota: Los patrones híbridos se identifican cuando múltiples características de distintas tipologías coexisten en proporciones significativas.

4.1.2. Clasificación por clustering de patrones y subpatrones

Con las métricas topológicas y espaciales definidas y estandarizadas, se aplica análisis de componentes principales (Jolliffe, 2002) para condensar la variabilidad en un subespacio de menor dimensión. El número de componentes se fija mediante criterios internos que combinan la varianza explicada acumulada con un umbral de 95 % y el comportamiento del error de reconstrucción en un margen óptimo, de modo que se preserve la interpretabilidad de las dimensiones morfológicas y se reduzcan colinealidades entre indicadores sin añadir dimensiones de aporte marginal.

Sobre el sub-espacio resultante se implementa un procedimiento de clustering para identificar patrones y sub-patrones morfológicos. El algoritmo se ejecuta con hiperparámetros estables que permiten la replicabilidad y la elección del número de grupos se decide por consenso de índices internos como la silueta promedio, Calinski–Harabasz y K-means junto con un criterio de estabilidad ante perturbaciones ligeras de la muestra y de la inicialización. La decisión final busca un equilibrio entre compacidad y separación y mantiene coherencia con el marco conceptual evitando particiones sobre ajustadas.

En conjunto, la secuencia MADM seguida de PCA y clustering ancla la clasificación en fundamentos teóricos y la contrasta con estructuras latentes emergentes, lo que facilita detectar subpatrones y matizar la adscripción tipológica sin imponer segmentaciones rígidas. Los diagnósticos cuantitativos asociados a estos criterios forman parte del protocolo metodológico y se aplican de manera uniforme a cualquier conjunto de estudio, garantizando trazabilidad y reproducibilidad del proceso.

Capítulo 5

CASO DE ESTUDIO

Este capítulo presenta los casos de estudio que constituyen la base empírica de la presente investigación. Se inicia con una descripción de los datos censales y de movilidad urbana, definiendo las variables clave para el análisis. Posteriormente, el capítulo se centra en detallar y justificar la selección de las nueve ciudades que conforman la muestra. La elección de estos casos se fundamenta en su capacidad para representar de manera paradigmática las distintas tipologías de patrones urbanos mencionados en la sección 3.1, lo que permitirá un análisis comparativo sobre la relación entre la morfología urbana y los fenómenos estudiados.

5.1. Clasificación y tratamiento de la movilidad urbana

Con el fin de analizar la relación entre morfología urbana y patrones de movilidad, se recurre a información oficial sobre el uso del espacio vial y los modos de viaje provista por [U.S. Census Bureau \(2020\)](#). La clasificación de los modos sigue el marco del ABC de la Movilidad ([Prieto-Curiel and Ospina, 2024](#)), que agrupa los desplazamientos en tres familias funcionales: la movilidad activa (A), que comprende formas no motorizadas como caminar y pedalear; la movilidad pública (B), basada en sistemas de transporte compartidos o colectivos; y la movilidad privada (C), asociada al uso de vehículos motorizados individuales. Esta taxonomía permite estructurar una lectura

clara y comparable de la distribución modal entre unidades urbanas.

A partir de esta base, el análisis adopta un enfoque dual. Por un lado, la desagregación modal permite evaluar la contribución específica de cada modo y su posible correlación con atributos morfológicos particulares (p.ej., densidad de intersecciones o proporción de *cul-de-sac*). Por otro, la perspectiva agregada describe la composición modal global de cada unidad urbana y habilita comparaciones sistemáticas entre contextos espaciales heterogéneos. En conjunto, esta estrategia posibilita caracterizar la distribución de modos y explorar asociaciones entre forma urbana y prácticas cotidianas de movilidad, manteniendo consistencia con el marco de métricas espaciales y topológicas definido en la Sección 3.1.

5.2. Selección de Casos de Estudio

La selección de las ciudades para este estudio se basó en el criterio fundamental de que cada una representara de manera clara y perceptible una de las principales tipologías de patrones urbanos: reticular (grid), orgánico, jerárquico (*cul-de-sac*) e híbrido. Esta elección deliberada no solo facilita la aplicación y validación de las métricas espaciales y topológicas definidas en el marco de referencia, sino que también se apoya en una extensa literatura histórica y urbanística que reconoce a estas ciudades como exponentes clave de sus respectivas formas. A continuación, se detalla la justificación para la inclusión de cada ciudad.

5.2.1. Patrones Reticulares (Grid): Filadelfia y Salt Lake City

En Filadelfia (Pensilvania), el plan diseñado por William Penn y Thomas Holme en 1682 constituye uno de los ejemplos más tempranos e influyentes de planificación urbana en Norteamérica ([Southworth and Ben-Joseph, 2003](#)). Su trazado en cuadricula fue una decisión deliberada para promover una ciudad verde y campestre, evitando la congestión y los riesgos de incendio observados por Penn en Londres ([Reps, 1965](#)). El diseño original dispuso una retícula rectangular de calles anchas y uniformes con cinco plazas públicas, sentando un precedente para numerosas ciudades estadounidenses ([Jackson, 1985](#)). Por su parte, Salt Lake City (Utah) ofrece un caso singular de retícu-

la con profundas raíces ideológicas, el esquema deriva del “Plat of Zion” de Joseph Smith e implementado por Brigham Young desde 1847 ([Greenspan, 2016](#)), organizando la ciudad en una cuadrícula orientada a los puntos cardinales con el Templo como origen. Un rasgo distintivo es el ancho inusitado de sus calles (40 metros), concebido según la tradición para permitir que una carreta de bueyes girara sin dificultad, de modo que la retícula no solo domina visualmente el tejido, sino que también refleja la visión de una comunidad ordenada y expansiva.

5.2.2. Patrón Orgánico e Híbrido Temprano: Boston y Santa Fe

En Boston, Massachusetts, el trazado urbano es el resultado de un crecimiento orgánico más que de una planificación previa ([Warner Jr., 1978](#)). Sus calles, que en los inicios siguieron senderos existentes y la topografía de la península de Shawmut ([Southworth and Owens, 1993](#)), evolucionaron de manera irregular, de modo que el centro carece de una retícula unificada y presenta una red compleja que refleja siglos de desarrollo y adaptación. Aunque hubo esfuerzos posteriores por regularizar y expandir la red vial, en particular con el relleno de Back Bay ([Whitehill and Kennedy, 2000](#)), el núcleo histórico se mantiene como exponente claro de un patrón orgánico. En Santa Fe, Nuevo México, la estructura urbana se fundó bajo las Leyes de Indias, con una plaza central de la que irradian las calles principales ([Crouch et al., 1982](#)), pero su crecimiento posterior se ajustó a la topografía y a caminos preexistentes, combinando elementos planificados con desarrollo orgánico.

5.2.3. Patrón Jerárquico (Cul-de-Sac): Peachtree City, Cary Town y Chandler

Dentro de esta tipología se encuentran ciudades cuyo diseño suburbano está dominado por la lógica de la calle sin salida. Peachtree City, Georgia, es un arquetipo de comunidad planificada de mediados del siglo XX en Estados Unidos ([Garvin, 2002](#)). Fundada en 1959, se diseñó con una estructura jerárquica organizada en aldeas autocontenidoas. Su rasgo más distintivo es la extensa red de calles en cul-de-sac y bucles, interconectadas por más de 160 kilómetros de caminos para vehículos ligeros ([O'Toole, 2009](#)). De manera similar, Cary Town (Carolina del Norte) es un claro exponente del desarrollo

suburbano que adoptó el uso extensivo de cul-de-sacs a través de unidades de desarrollo planificado (PUD), aunque en décadas recientes ha buscado promover una mayor conectividad en nuevos proyectos, como consigna su plan comunitario ([Town of Cary, 2020](#)). Por su parte, Chandler (Arizona) ilustra este patrón en el contexto de una rápida expansión en la era del automóvil, si bien su origen es una retícula agraria, su crecimiento masivo rellenó esta macroestructura con subdivisiones residenciales de patrón predominantemente dendrítico y cul-de-sac ([Southworth and Ben-Joseph, 2003](#)).

5.2.4. Ciudades con Patrones Híbridos y Superpuestos: Charleston y Fort Collins

Este grupo incluye ciudades cuyo tejido urbano es el resultado de la coexistencia o superposición de diferentes lógicas de trazado. Charleston (Carolina del Sur) partió del Grand Model de 1672, que estableció una retícula en la península, pero su crecimiento histórico posterior se adaptó a la topografía costera, generando un paisaje urbano complejo donde la retícula colonial convive con ámbitos de desarrollo más orgánico ([Reps, 1965](#)). Finalmente, Fort Collins (Colorado) presenta una superposición nítida de patrones: su centro histórico se desarrolló sobre una retícula compacta, característica de las ciudades del oeste estadounidense, mientras que la expansión de la posguerra la rodeó con vecindarios de calles curvilíneas y cul-de-sacs, representativos del modelo suburbano jerárquico ([Handy et al., 2003](#)).

En conjunto, esta selección de ciudades constituye una base empírica amplia y representativa para examinar cómo las distintas tipologías de patrones urbanos, desde sus expresiones más definidas hasta sus formas híbridas, se relacionan con las métricas espaciales y topológicas y, en última instancia, con los fenómenos urbanos abordados en esta tesis.

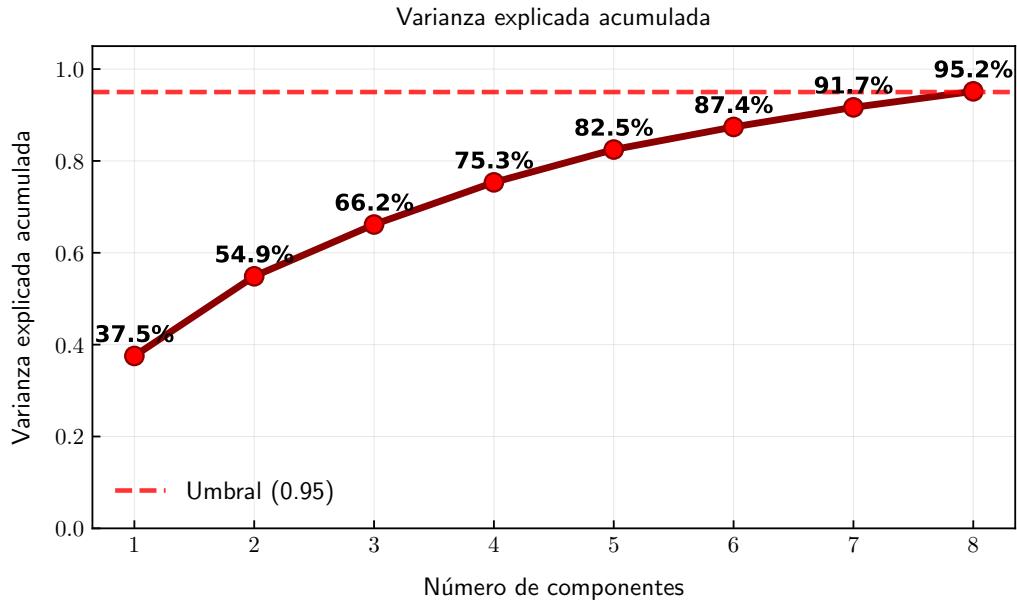
Capítulo 6

RESULTADOS

Este capítulo presenta los hallazgos de la investigación. En primer lugar, se realiza una caracterización de los patrones morfológicos identificados en las ciudades seleccionadas. A continuación, se examina la relación entre la estructura urbana y los patrones de movilidad, analizando los efectos marginales que la morfología ejerce sobre la elección modal. Se incluye un análisis post hoc para profundizar en estos resultados y se proponen insumos para la formulación de políticas públicas. El capítulo se complementa con un análisis de la centralidad de la red urbana y cierra con una discusión de las implicaciones de los hallazgos.

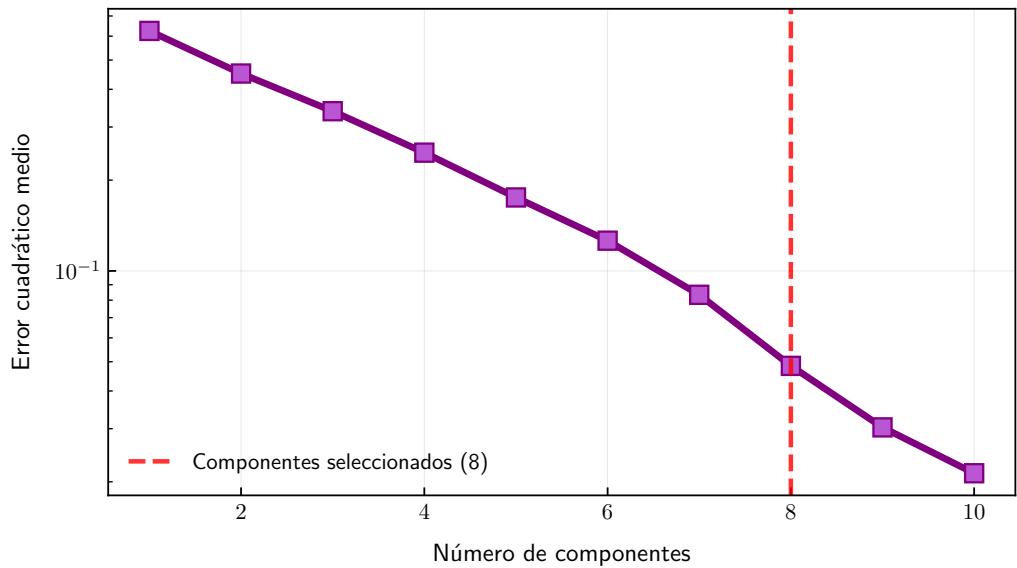
6.1. Caracterización de patrones morfológicos en ciudades seleccionadas

En la identificación de patrones y subpatrones morfológicos se aplicó un proceso de clasificación no supervisada, iniciado con un análisis de componentes principales (PCA) sobre las métricas topológicas y espaciales estandarizadas para reducir la dimensionalidad del conjunto de datos. El número óptimo de componentes se determinó según la varianza explicada acumulada (umbral del 95 %), complementada con el análisis del error de reconstrucción para minimizar la pérdida de información. La Figura 1 ilustra este proceso de calibración para la ciudad de Boston MA.



(a) Varianza explicada acumulada.

Error de reconstrucción vs. número de componentes



(b) Error de reconstrucción.

Figura 1: Proceso de calibración del análisis de componentes principales para la ciudad de Boston MA.

Una vez definido el subespacio de menor dimensión, se aplicó un algoritmo de clustering para identificar los agrupamientos naturales de las unidades censales. La determinación del número óptimo de clústeres se basó en un consenso de índices de validación interna, como la silueta promedio, el índice de Calinski-Harabasz y el algoritmo K-means, que evalúan la compacidad y separación de los grupos. Para visualizar la estructura de los clústeres resultantes en un espacio de baja dimensionalidad, se utilizó la técnica no lineal t-SNE (t-distributed Stochastic Neighbor Embedding). La Figura 2 ilustra la distribución de las unidades censales de Boston MA, donde cada punto representa una unidad censal coloreada según el clúster al que fue asignada.

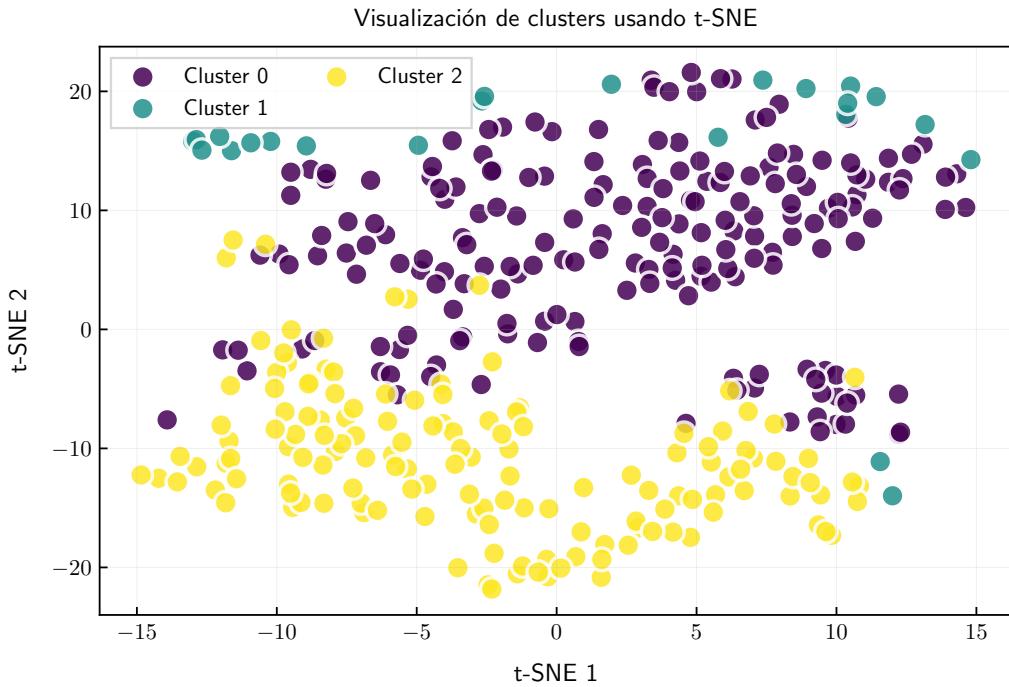


Figura 2: Visualización de los clústeres morfológicos mediante t-SNE para las unidades censales de Boston MA. Cada color representa un clúster identificado.

En cada ciudad de la muestra elegida, las unidades censales se clasificaron según su patrón morfológico teórico y, posteriormente, se analizaron mediante técnicas de agrupamiento no supervisado (clustering). Con el objetivo fue

contrastar la correspondencia entre las tipologías teóricas y las configuraciones efectivamente observadas en cada ciudad. Los resultados no solo replican los patrones teóricos en múltiples escenarios, sino que además revelan la existencia de subpatrones al interior de cada tipología. Para facilitar su lectura, cada subgrupo se etiqueta con un signo positivo (+) o negativo (-), indicando una desviación al alza o a la baja, respectivamente, respecto de las propiedades dominantes de su categoría.

La clasificación de estos subpatrones permite una interpretación más precisa de las diferencias intra-tipológicas observadas entre ciudades. La Tabla 6.1 sintetiza las subcategorías identificadas y las propiedades generales asociadas a cada una, en total alineación con las dimensiones morfológicas previamente definidas.

Tabla 6.1: Síntesis de subgrupos morfológicos identificados mediante agrupamiento.

Subgrupo	Descripción general
Density [±]	Variaciones en atributos asociados a la densidad urbana
Intersection [±]	Cambios en rasgos vinculados a intersecciones
Mean [±]	Modificaciones en métricas promedio de red (p. ej., densidad de segmentos o circuidad)
Street [±]	Alteraciones en características ligadas a ejes principales y su conectividad
Std [±]	Diferencias en la dispersión geométrica o variabilidad de los ángulos de red

El análisis de conglomerados muestra subpatrones en cada categoría morfológica general, con una variabilidad interna apreciable que refleja la diversidad de las ciudades analizadas. Aun así, emerge una consistencia notable; la mayoría de los subgrupos identificados se alinean estrechamente con las categorías morfológicas principales. Para ilustrarlo, la Tabla 6.2 presenta las nueve ciudades incluidas, indicando su clasificación morfológica teórica junto con los resultados del agrupamiento y los subpatrones detectados.

Tabla 6.2: Comparación entre patrones morfológicos teóricos y subpatrones obtenidos por agrupamiento.

Ciudad	Patrón principal		Subpatrón por agrupamiento	
Boston	Gridiron	44 %	Gridiron	12.1 %
	Orgánico	18 %	Street ⁻	35.4 %
	Híbrido	14 %	Street ⁺	0.3 %
	Cul-de-sac	24 %	Orgánico	29.2 %
			Street ⁺	7.9 %
			Cul-de-sac	15.2 %
Cary Town	Gridiron	1 %	Gridiron	1.3 %
	Orgánico	28 %	Cul-de-sac	27.6 %
	Híbrido	17 %	Std ⁺	68.4 %
	Cul-de-sac	54 %	Std ⁻	2.6 %
Chandler	Gridiron	2 %	Orgánico	60.8 %
	Orgánico	47 %	Cul-de-sac	37.4 %
	Híbrido	10 %	Street ⁺	1.9 %
	Cul-de-sac	41 %		
Charleston	Gridiron	23 %	Gridiron	11.5 %
	Orgánico	39 %	Density ⁻	9.8 %
	Híbrido	8 %	Density ⁺	4.9 %
	Cul-de-sac	30 %	Density ⁻	11.5 %
			Orgánico	29.5 %
			Density ⁻	24.6 %
			Cul-de-sac	8.2 %
Fort Collins	Gridiron	12 %	Gridiron	7.7 %
	Orgánico	31 %	Orgánico	21.2 %
	Híbrido	13 %	Street ⁺	5.8 %
	Cul-de-sac	44 %	Cul-de-sac	13.5 %
			Street ⁺	26.9 %
			Street ⁻	25.0 %

Continúa en la página siguiente

Tabla 6.2: Comparación entre patrones morfológicos teóricos y subpatrones obtenidos por agrupamiento. (Continuación)

Ciudad	Patrón principal		Subpatrón por agrupamiento	
Peachtree	Orgánico	13 %	Orgánico	12.5 %
	Híbrido	6 %	Cul-de-sac	18.8 %
	Cul-de-sac	81 %	Mean ⁺	43.8 %
			Mean ⁻	25.0 %
Philadelphia	Gridiron	59 %	Gridiron	14.2 %
	Orgánico	16 %	Mean ⁻	41.3 %
	Híbrido	11 %	Orgánico	44.5 %
	Cul-de-sac	14 %		
Salt Lake	Gridiron	54 %	Gridiron	43.1 %
	Orgánico	17 %	Intersection ⁻	25.0 %
	Híbrido	8 %	Cul-de-sac	31.9 %
	Cul-de-sac	21 %		
Santa Fe	Gridiron	5 %	Orgánico	26.2 %
	Orgánico	43 %	Density ⁻	19.1 %
	Híbrido	12 %	Density ⁺	2.4 %
	Cul-de-sac	40 %	Cul-de-sac	19.1 %
			Density ⁺	16.7 %
			Density ⁻	16.7 %

La Figura 3 muestra ejemplos representativos de categorías morfológicas y subpatrones en ciudades como Salt Lake City, Boston y Chandler, todas con una variación interna sustantiva. Estos casos ilustran cómo distintos contextos urbanos contribuyen a la diversidad morfológica capturada por el agrupamiento, sin entrar en especificidades históricas o sociales.

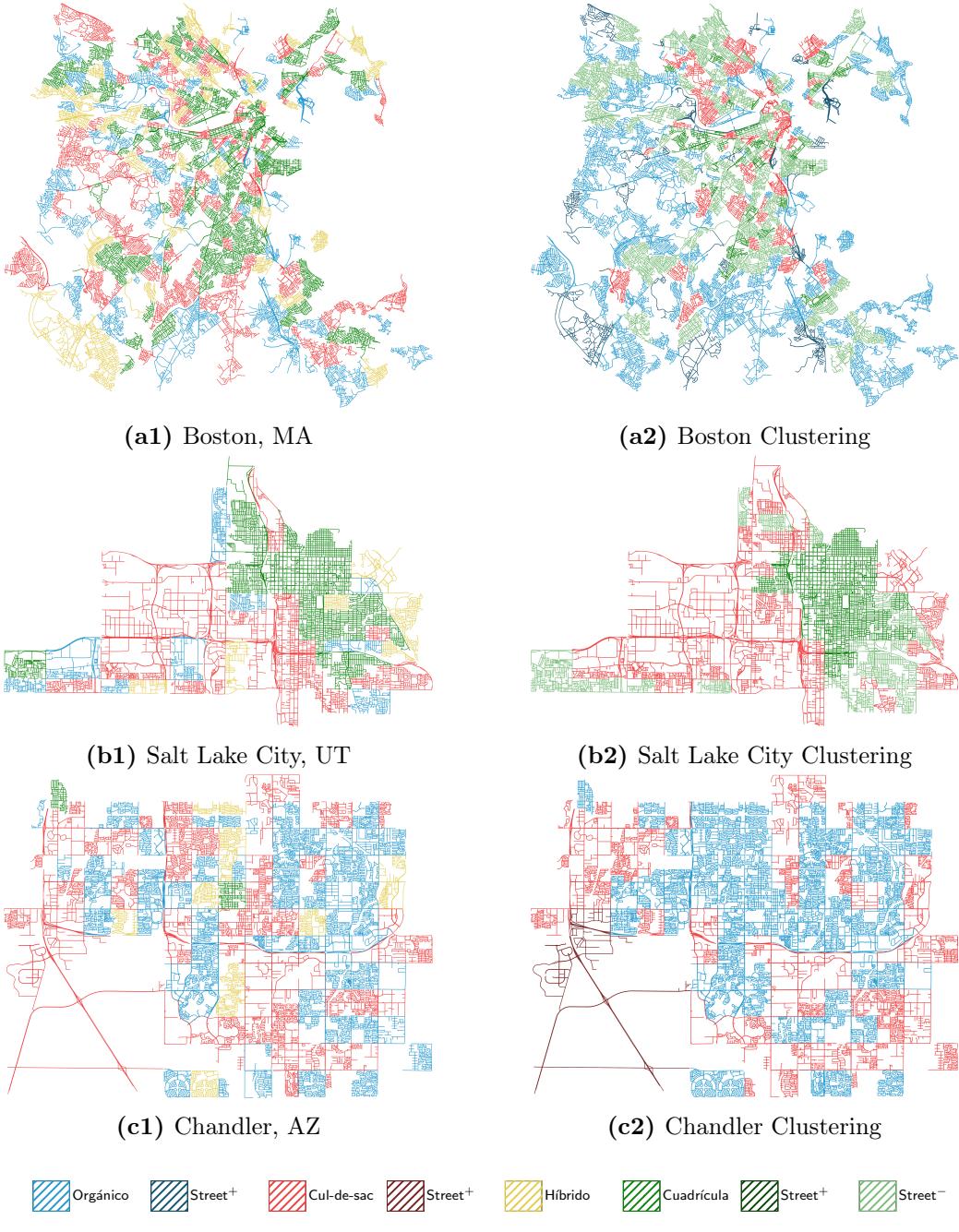


Figura 3: Clasificación morfológica de las redes viales. Fila superior (a1–c1): tipologías principales. Fila inferior (a2–c2): subpatrones identificados dentro de cada categoría mediante aprendizaje no supervisado.

6.2. Relación entre estructura urbana y patrones de movilidad

Con base en datos censales sobre la participación relativa de modos activo, público y privado en cada unidad urbana, se agruparon las observaciones de acuerdo con su patrón morfológico predominante. Este enfoque permitió identificar tendencias generales de movilidad asociadas a distintas configuraciones espaciales. La Figura 4 presenta densidades estimadas que muestran cómo varían las distribuciones modales entre tipologías.

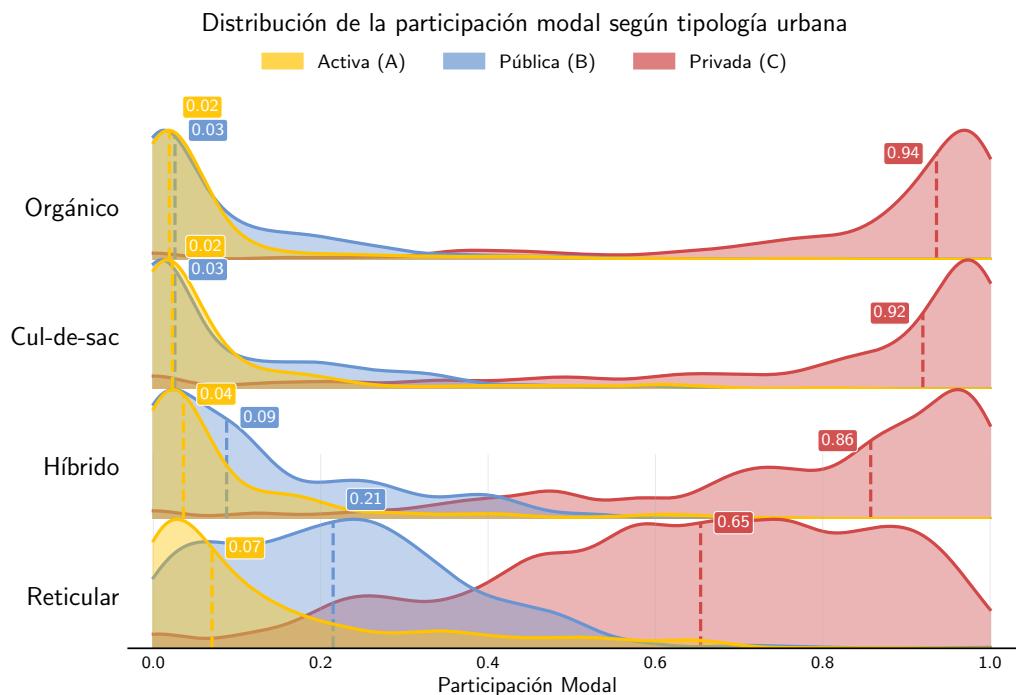


Figura 4: Distribución de cuotas modales (activo, público y privado) según tipologías morfológicas urbanas.

El análisis de medianas y dispersión por modo revela cambios sistemáticos que configuran perfiles de movilidad diferenciados según la morfología urbana. En particular, las tramas reticulares muestran mayores participaciones de movilidad activa y de transporte público. En contraste, los patrones orgánico y cul-de-sac exhiben una dependencia más alta del automóvil, lo que

se refleja en medianas consistentemente inferiores para los modos activo y público en dichas configuraciones.

6.2.1. Efectos marginales de la morfología urbana sobre la movilidad modal

Para complementar el análisis estadístico de cómo diferentes configuraciones espaciales se asocian a variaciones en el uso de modos específicos, se estimaron efectos marginales de la morfología sobre el uso modal. La Figura 5 presenta un mapa de calor con coeficientes normalizados por tipología, que facilita interpretar asociaciones positivas o negativas respecto al promedio global.

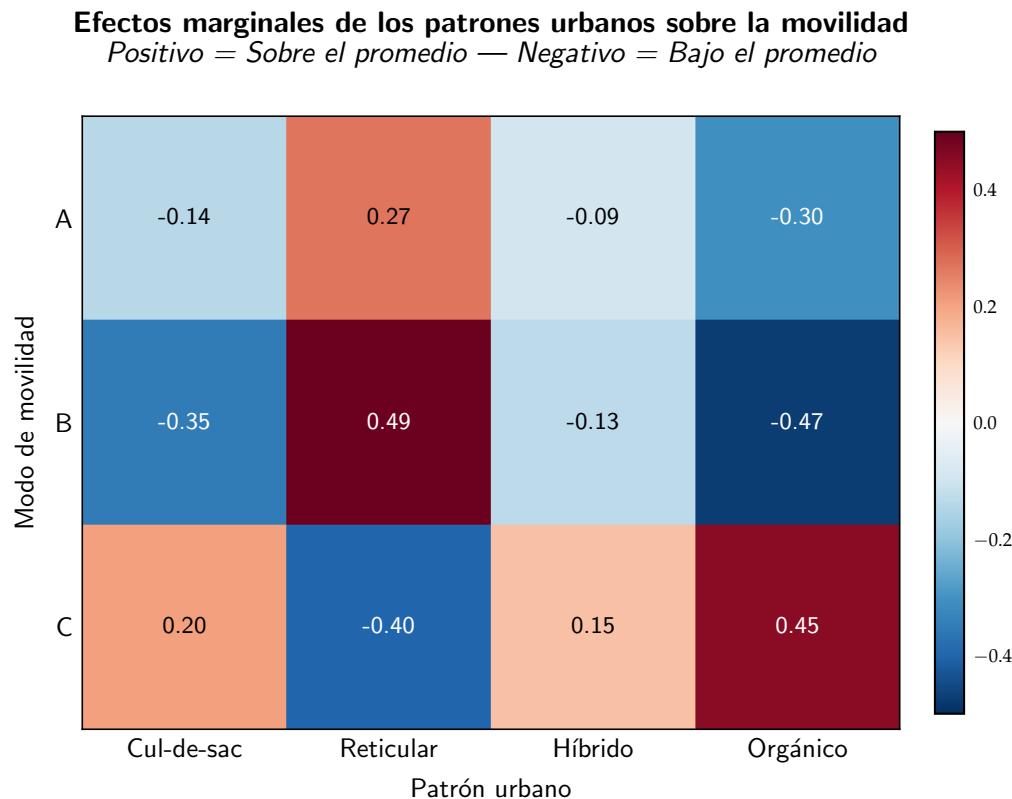


Figura 5: Mapa de calor de efectos marginales de los modos de movilidad según patrones morfológicos.

Los efectos marginales estimados muestran contrastes significativos entre con-

figuraciones. La morfología reticular, por ejemplo, se asocia a mayor propensión al transporte público (0.49) y menor tendencia al automóvil (-0.41), sugiriendo un entorno favorable a dinámicas de movilidad sostenible. En sentido opuesto, el patrón orgánico presenta un efecto positivo sobre el uso del automóvil (0.44) y efectos negativos sobre el transporte público (-0.47) y la movilidad activa (-0.30), lo que indica menor afinidad por modos alternativos en este tipo de tejido.

6.2.2. Análisis *post hoc*

Para precisar las diferencias entre configuraciones viales en relación con los modos de movilidad, se aplicó un análisis *post hoc* basado en comparaciones pareadas entre patrones. Se utilizó la prueba de Kruskal-Wallis ([Kruskal and Wallis, 1952](#)) como contraste global y, posteriormente, pruebas de Mann-Whitney ([Mann and Whitney, 1947](#)) para identificar contrastes específicos estadísticamente significativos. La magnitud de las diferencias se reporta mediante tamaños de efecto expresados como η , lo que permite interpretar la relevancia práctica más allá de la significancia estadística. La Tabla [6.3](#) resume, para cada combinación de patrón y tipo de movilidad, el estadístico U , su p -valor y el tamaño de efecto η .

Tabla 6.3: Resultados del análisis *post hoc* para patrones de movilidad según tipologías morfológicas.

Tipo de movilidad	Patrón 1	Patrón 2	n_1	n_2	Estadístico U	Valor p	Diferencia de medias	Diferencia de medianas	η
	Reticular	Orgánico	590	308	124255	1.24×10^{-19}	0.087	0.049	0.302
A (Activa)	Cul-de-sac	Reticular	344	590	69984.5	2.12×10^{-15}	-0.066	-0.048	0.259
	Reticular	Híbrido	590	167	58648.5	1.67×10^{-4}	0.052	0.034	0.137
	Orgánico	Híbrido	308	167	20628.5	3.58×10^{-4}	-0.034	-0.016	0.163
	Cul-de-sac	Híbrido	344	167	24249.5	4.18×10^{-3}	-0.014	-0.014	0.126
	Reticular	Orgánico	590	308	146207.5	5.79×10^{-51}	0.143	0.188	0.501
	Cul-de-sac	Reticular	344	590	46113	3.50×10^{-44}	-0.129	-0.189	0.456
B (Pública)	Reticular	Híbrido	590	167	67370	3.92×10^{-13}	0.088	0.125	0.264

Tabla 6.3: Resultados del análisis *post hoc* para patrones de movilidad según tipologías morfológicas.
(Continuación)

Tipo de movilidad	Patrón 1	Patrón 2	n_1	n_2	Estadístico U	Valor p	Diferencia de medias	Diferencia de medianas	η
60	Orgánico	Híbrido	308	167	18634	5.92×10^{-7}	-0.055	-0.063	0.228
	Cul-de-sac	Híbrido	344	167	22009.5	1.52×10^{-5}	-0.041	-0.064	0.190
C (Privada)	Reticular	Orgánico	590	308	35447	5.57×10^{-51}	-0.220	-0.281	0.501
	Cul-de-sac	Reticular	344	590	150614	4.54×10^{-35}	0.168	0.270	0.404
C (Privada)	Reticular	Híbrido	590	167	30866.5	1.65×10^{-13}	-0.136	-0.202	0.268
	Orgánico	Híbrido	308	167	32400.5	2.89×10^{-6}	0.085	0.079	0.215
	Cul-de-sac	Híbrido	344	167	33539	2.10×10^{-3}	0.032	0.068	0.136

El análisis *post hoc* confirma una relación consistente entre morfología urbana y patrones modales, con tipologías que favorecen o restringen distintos modos de viaje. La retícula destaca por su apoyo sostenido a la movilidad activa y al transporte público, con diferencias medias significativas frente a los patrones orgánico y cul-de-sac especialmente en transporte público ($\eta = 0.50$), y exhibe el menor uso relativo del automóvil. A la inversa, el patrón cul-de-sac se asocia a una alta dependencia del vehículo privado y a efectos negativos sobre movilidad activa y pública, atribuibles a su conectividad limitada. Esta tendencia se intensifica en el patrón orgánico, que por su mayor complejidad geométrica registra el uso de automóvil más elevado, la diferencia media respecto de la retícula alcanza $+0.220$ ($r = 0.50$), el efecto más fuerte del análisis, acompañado por el peor desempeño en modos activo y público. La morfología híbrida muestra un comportamiento intermedio en todos los modos; sus tamaños de efecto respecto de la retícula son menores (η entre 0.13 y 0.27), coherentes con su naturaleza mixta.

6.2.3. Insumos para política pública

Los hallazgos subrayan la relevancia de la morfología de la red vial como factor estructural que moldea el comportamiento de movilidad, más allá de las explicaciones socioeconómicas tradicionales. Al evidenciar asociaciones robustas entre subpatrones morfológicos y cuotas modales, se respalda la integración de indicadores morfológicos en el diseño de políticas urbanas y de transporte. Esta integración habilita una planificación más fina y basada en evidencia, con aplicaciones potenciales en métricas de accesibilidad, evaluación de equidad en transporte y estrategias de desarrollo urbano orientado a la movilidad, entre otras: inversión focalizada en infraestructura para movilidad activa en ámbitos reticulares o híbridos con alta conectividad; ajustes de ordenamiento y usos de suelo en tramas dendríticas para incrementar la permeabilidad; priorización espacial de mejoras de transporte público en barrios con condiciones morfológicas desfavorables; evaluación ex ante de proyectos mediante escenarios morfológicos; y comunicación visual de tipologías para procesos participativos.

6.3. Análisis complementario de la centralidad de la red urbana

Si bien estas métricas no se incluyeron en el proceso de clasificación teórica y clustering para preservar la pureza del análisis morfológico, su estudio ofrece una visión de la estructura funcional y jerárquica de las ciudades que enriquece la interpretación de los resultados. Este análisis permite contextualizar cómo los patrones morfológicos se insertan dentro de la estructura global de la red, revelando corredores y nodos estratégicos que articulan los flujos a escala metropolitana. A continuación, se presenta este análisis para la ciudad de Salt Lake City como caso de estudio representativo.

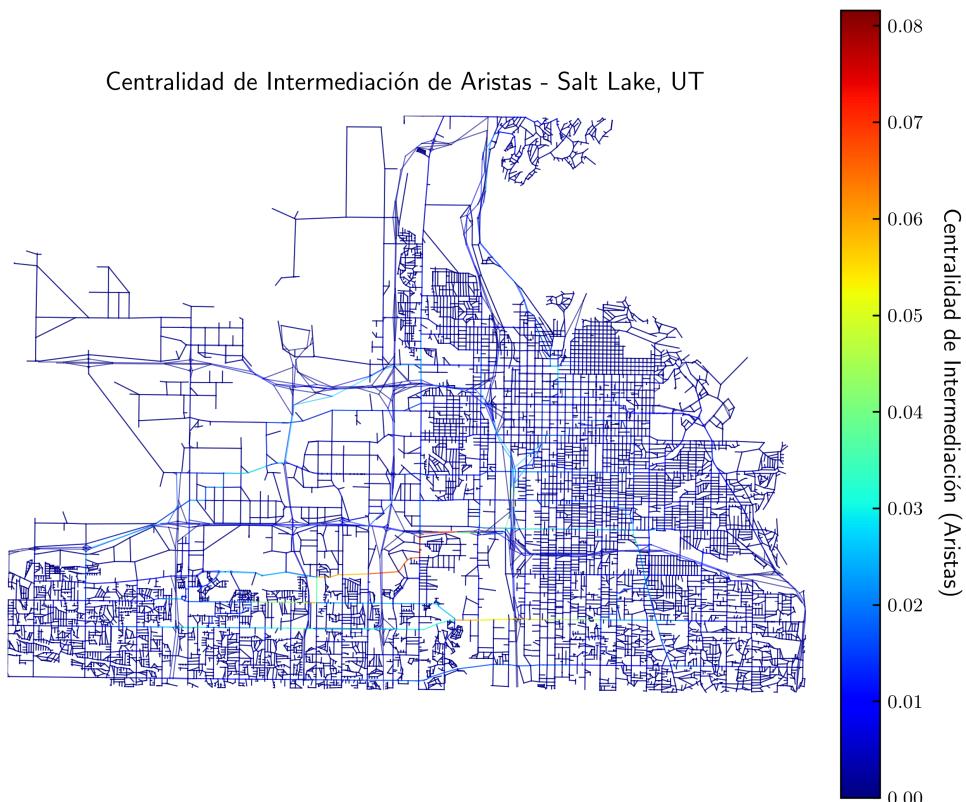


Figura 6: Mapa de centralidad de intermediación de aristas para la red vial de Salt Lake City. La intensidad de los valores refleja los corredores con mayor flujo potencial de tránsito.

La estructura jerárquica de la red vial de Salt Lake City se evidencia en las métricas de intermediación de aristas (Figura 6), que resaltan un conjunto reducido de corredores con orientación este–oeste. Estos ejes actúan como arterias principales al concentrar la mayoría de los trayectos más cortos dentro del sistema urbano.

Por su parte, la intermediación de nodos (Figura 7) pone de relieve la retícula ortogonal del centro, donde se ubican las intersecciones más críticas y densamente conectadas, configurando el núcleo de mayor accesibilidad de la ciudad.

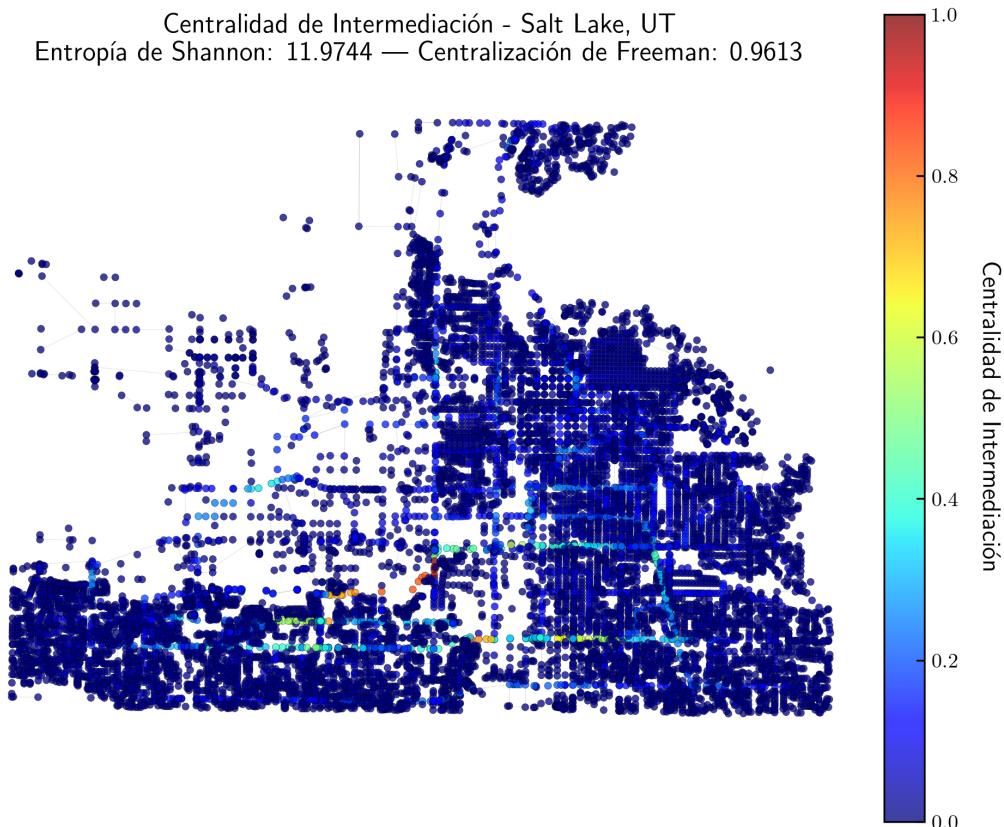


Figura 7: Mapa de centralidad de intermediación de nodos para la red vial de Salt Lake City. Los valores más altos indican intersecciones que concentran mayor tránsito dentro de la estructura urbana.

La centralidad de cercanía (Figura 8) destaca el núcleo urbano como la zona

de mayor accesibilidad dentro de la red. Desde este sector, los desplazamientos hacia el resto de la ciudad pueden realizarse con la menor distancia media, reflejando una alta eficiencia espacial.

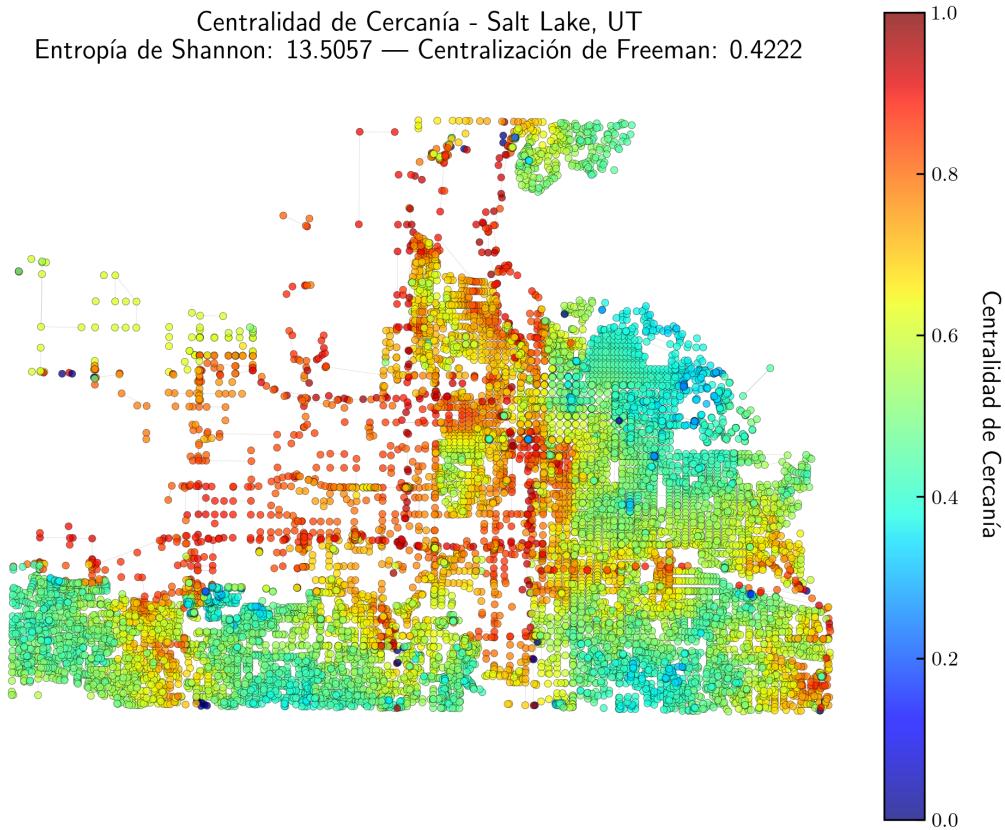


Figura 8: Mapa de centralidad de cercanía para la red vial de Salt Lake City. Los valores más altos representan intersecciones con acceso más eficiente al resto de la red, reflejando el núcleo de mayor accesibilidad.

Por su parte, la centralidad de grado (Figura 9) refuerza este patrón al identificar la malla central como el área más densamente conectada y con mayor concentración de enlaces directos entre nodos. En esta zona se localizan los puntos de mayor interacción entre flujos locales y arteriales, lo que favorece la continuidad del tránsito y la redundancia de trayectorias cortas. Esta acumulación de conexiones convierte al centro urbano en el articulador del sistema vial, donde convergen la actividad funcional y la accesibilidad estructural.

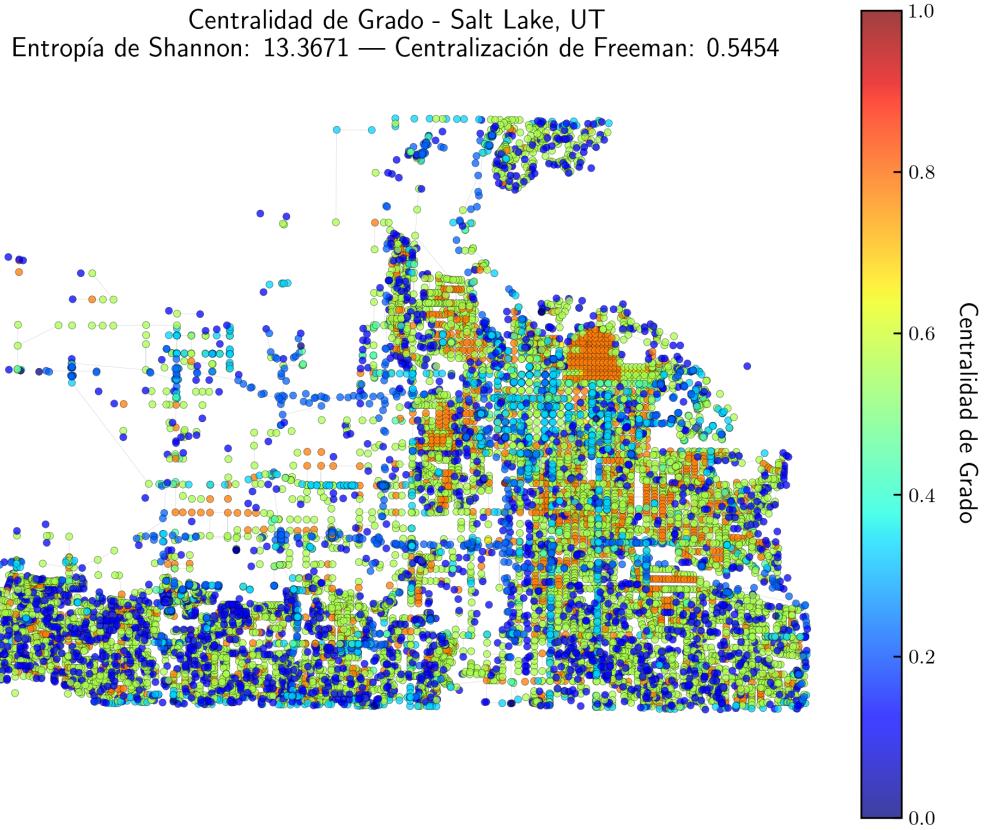


Figura 9: Mapa de centralidad de grado para la red vial de Salt Lake City. Este indicador identifica los nodos con mayor número de conexiones directas dentro de la estructura urbana.

Finalmente, la centralidad de PageRank (Figura 10) matiza esta visión, mostrando cómo la importancia de los nodos se distribuye no solo en el centro, sino también en sub-centros secundarios bien conectados. Este diagnóstico multi-escalas, que combina la estructura de la red con los patrones morfológicos previamente analizados, proporciona un marco interpretativo robusto. Permite entender, por ejemplo, cómo un mismo patrón morfológico puede tener implicaciones de movilidad diferentes según su localización respecto a los ejes de alta centralidad.

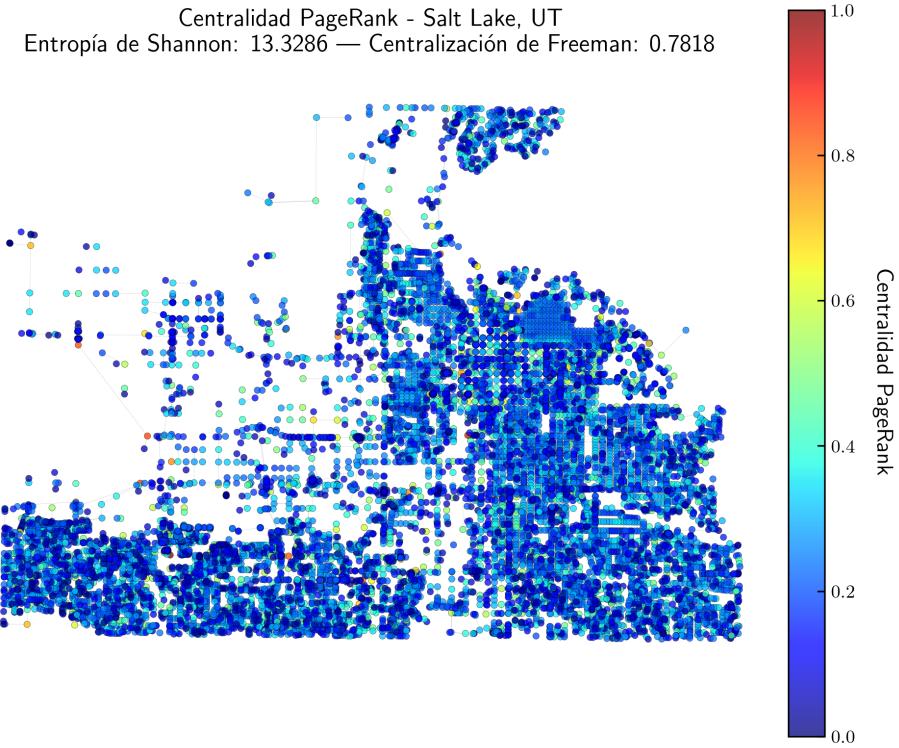


Figura 10: Mapa de centralidad de PageRank para la red vial de Salt Lake City. Esta métrica pondera la importancia jerárquica de los nodos en función de las conexiones recibidas y su relación con otros nodos relevantes dentro del sistema.

6.4. Discusión

El conjunto de resultados aporta evidencia consistente sobre la relación entre morfología urbana y patrones modales. Como se observa en la Figura 4, los entornos con estructuras ortogonales exhiben mayor prevalencia de modos activo y público frente a tramas más fragmentadas como las orgánicas o *cul-de-sac*. Esta regularidad es funcionalmente coherente: las retículas tienden a concentrar actividades económicas e institucionales y a ofrecer conectividad transversal, lo que favorece caminar, pedalear y usar transporte público. Salt Lake City ofrece un ejemplo ilustrativo: sus áreas centrales (Downtown, Central City y Capitol Hill) son clasificadas consistentemente como reticulares tanto en el marco teórico (Figura 3b1) como en el agrupamiento (Figura 3b2), y

muestran dominancia modal activa y pública (Figura 4).

Esta asociación se refuerza en los resultados cuantitativos del análisis *post hoc* (Tabla 6.3). Por ejemplo, la comparación entre retícula y orgánico arroja diferencias estadísticamente significativas en movilidad privada ($p = 5.57 \times 10^{-51}$), con un tamaño de efecto negativo ($d = -0.220$) que indica menor proporción de este modo en áreas con red más estructurada. De forma análoga, los efectos sobre movilidad activa y pública son positivos ($d = -0.281$ y $d = 0.501$, respectivamente), reforzando la idea de que el orden espacial de la forma urbana favorece comportamientos modales más sostenibles. Tendencias congruentes aparecen en el contraste entre *cul-de-sac* y retícula, destacando el rol estructural de la morfología en las decisiones modales de los residentes.

Entre las limitaciones, el uso de unidades espaciales basadas en *tracts* censales puede encapsular heterogeneidades internas, concentrando ciertos modos o tipos de calle y afectando la representatividad. Unidades más pequeñas (manzana o submanzana) ofrecerían mayor granularidad, pero implicarían un número muy elevado de observaciones homogéneas, con riesgo de incrementar valores atípicos y distorsionar indicadores agregados. Por ello, los *tracts* ofrecen un compromiso razonable entre detalle espacial y manejabilidad. Adicionalmente, el análisis adopta una representación planar del espacio urbano (Boeing, 2020; Bruyns et al., 2020), lo que limita la incorporación de factores topográficos tales como pendiente, barreras naturales o diferencias de cota, elementos con influencia demostrada sobre la movilidad y la configuración vial (Zhou et al., 2021; Liang et al., 2022). Estas restricciones deben considerarse al interpretar los resultados y apuntan al valor de incorporar modelos urbanos tridimensionales en investigaciones futuras.

De cara a trabajos posteriores, resulta pertinente profundizar en cómo la morfología vial influye por procesos socioespaciales más amplios. Si bien este estudio aporta un método escalable y transferible para clasificar la forma urbana y relacionarla con el comportamiento de viaje, quedan abiertas líneas para explorar su interacción con restricciones topográficas, disposiciones de uso del suelo, riesgos ambientales y desigualdades infraestructurales. En particular, se vislumbra el potencial de un marco crítico-computacional que articule teoría urbana, análisis topológico y herramientas de datos abiertos, con el fin de construir comparativas morfológicas en geografías diversas —especialmente en ciudades del Sur Global— y apoyar transformaciones urbanas equitativas, resilientes y sostenibles.

Capítulo 7

CONCLUSIONES

El análisis cuantitativo de las redes viales en las ciudades estudiadas confirma que la morfología urbana es un factor estructural determinante en la configuración de los patrones de movilidad. La metodología de clasificación no supervisada no solo replicó las tipologías teóricas de patrones reticulares, orgánicos, cul-de-sac y sus variantes híbridas, sino que además aportó una contribución significativa al identificar variaciones internas dentro de cada tipología. Esta granularidad de las categorías teóricas permite observar que no son entidades monolíticas ni absolutas, sino que albergan una variabilidad discernible a través de métricas de densidad, conectividad y geometría, cumpliendo así con el objetivo de cuantificar la estructura vial de manera detallada.

La correspondencia entre estas formas urbanas y el reparto modal es sistemática y estadísticamente significativa. Los hallazgos revelan que las tramas reticulares, caracterizadas por su alta conectividad y permeabilidad, facilitan mayores cuotas de movilidad activa y de transporte público. En contraposición, las estructuras dendríticas tipo cul-de-sac y las irregulares de tipo orgánico se asocian a una dependencia marcadamente superior del vehículo privado. La magnitud de esta relación queda evidenciada en los análisis post hoc, donde las diferencias entre patrones, como la observada en el uso del automóvil entre la retícula y la trama orgánica, presentan tamaños de efecto elevados que subrayan su relevancia práctica. Al comparar las distintas morfologías, se identifican tendencias consistentes que vinculan la conectividad de la red con la sostenibilidad del sistema de transporte, dando respuesta a

los objetivos centrales de la investigación. La morfología, por tanto, no es un telón de fondo pasivo, sino un mecanismo activo que habilita o restringe comportamientos de viaje específicos.

Los resultados confirman que la estructura de la red vial condiciona significativamente los patrones de movilidad, apoyando los postulados de la teoría de forma urbana. Sin embargo, la magnitud de estos efectos varía entre contextos, lo que sugiere que factores adicionales, como las condiciones socioeconómicas, topográficas y de planificación, también influyen en la relación entre forma y movilidad. Esta heterogeneidad subraya la necesidad de emplear enfoques multiescalares en futuras investigaciones, integrando la morfología urbana con dinámicas territoriales y sociales más amplias. De este modo, los hallazgos de este trabajo no solo validan la importancia estructural de la forma urbana, sino que abren un campo de exploración comparativa hacia contextos más diversos, particularmente en ciudades latinoamericanas, donde la complejidad espacial y las desigualdades territoriales plantean nuevos desafíos para la movilidad sostenible.

7.1. Limitaciones y Trabajo Futuro

El alcance de estas conclusiones debe entenderse en el contexto de dos limitaciones metodológicas principales. La primera se refiere a la unidad espacial de análisis. Si bien los tracts censales proporcionan un equilibrio funcional entre detalle y viabilidad computacional, su agregación puede ocultar heterogeneidades morfológicas a menor escala. La segunda limitación es la representación planar de las redes viales, que omite deliberadamente las complejidades topográficas del terreno. Factores como las pendientes o las barreras geográficas influyen directamente en la viabilidad de los modos de transporte activos, las características sociales y económicas de los terrenos estudiados y, por ende, su incorporación a través de modelos tridimensionales constituye una vía clara para enriquecer futuros análisis. El estudio se basa en datos de red estáticos, sin incorporar dinámicas temporales o de flujo. Futuras investigaciones podrían integrar datos de movilidad observada (GPS, transporte público, entre otros) o simulaciones para capturar interacciones dinámicas entre forma urbana y comportamiento de movilidad.

Estas consideraciones abren líneas de investigación prometedoras. A futuro, resulta fundamental aplicar este marco metodológico para explorar la inter-

acción entre la morfología vial y otras variables urbanas, como los patrones de uso del suelo, los indicadores de segregación socioespacial o la exposición a riesgos ambientales. El carácter escalable y transferible del método invita a su aplicación en geografías diversas, especialmente en ciudades del Sur Global, para construir una teoría comparada de la forma urbana.

7.1.1. Productos derivados del trabajo

El desarrollo de esta investigación ha dado lugar a diversos productos académicos y técnicos orientados a consolidar una línea metodológica reproducible para el estudio de la morfología urbana. Entre los principales resultados se destacan:

- **Software:** desarrollo de una herramienta para la clasificación morfológica y el análisis topológico de redes viales (grafos planares), cuyo código fuente se encuentra disponible en el repositorio del Grupo de Mecánica Aplicada de la Universidad EAFIT (github.com/AppliedMechanics-EAFIT/urban_morphology), entorno computacional que integra procesos de extracción, limpieza y síntesis de métricas urbanas mediante técnicas de análisis multivariado y aprendizaje no supervisado.
- **Presentación académica:** exposición de los resultados y fundamentos teóricos en el espacio *De Cerchas a Ciudades*, orientado a la divulgación de investigaciones que vinculan la ingeniería estructural con el estudio de las formas urbanas.
- **Publicación científica:** artículo en evaluación en la revista *Computers, Environment and Urban Systems*, cuyo *preprint* está disponible en arxiv.org/abs/2507.19648. En este manuscrito se discuten los alcances del enfoque propuesto y su relevancia para la comprensión de los patrones espaciales de movilidad en entornos metropolitanos.

En conjunto, estos productos consolidan una base metodológica abierta y replicable, orientada a fortalecer el vínculo entre análisis morfológico, planificación urbana y movilidad sostenible.

Bibliografía

- R. Ewing and R. Cervero, “Travel and the built environment,” *Journal of the American Planning Association*, vol. 76, no. 3, pp. 265–294, 2010.
- S. Marshall, *Streets and Patterns*. Routledge, 2004.
- A. Cardillo, S. Scellato, V. Latora, and S. Porta, “Structural properties of planar graphs of urban street patterns,” *Phys. Rev. E*, vol. 73, p. 066107, Jun 2006. [Online]. Available: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevE.73.066107>
- G. Quesada-Thompson, “Reflexiones teóricas sobre la movilidad y la planificación urbano sostenible aplicadas a la gran Área metropolitana, costa rica,” *Revista Geográfica de América Central*, vol. 70, no. 1, pp. 153–177, 2023, recibido: 04/01/2022, Aceptado: 13/05/2022. [Online]. Available: <https://www.revistas.una.ac.cr/index.php/geografica/>
- K. T. Geurs and B. Van Wee, “Accessibility evaluation of land-use and transport strategies: Review and research directions,” *Journal of Transport Geography*, vol. 12, no. 2, pp. 127–140, jun 2004.
- S. M. H. Bamakan, I. Nurgaliev, and Q. Qu, “Opinion leader detection: A methodological review,” *Expert Syst. Appl.*, vol. 115, pp. 200–222, 2019. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0957417418304950>
- M. Southworth and E. Ben-Joseph, “Street standards and the shaping of suburbia,” *Journal of the American Planning Association*, vol. 61, no. 1, pp. 65–81, 1995.
- Y. Asami, A. S. Kubat, and C. Istek, “Characterization of the street networks in the traditional turkish urban form,” *Environment and*

Planning B: Planning and Design, vol. 28, no. 5, pp. 777–795, 2001. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1068/b2718>

A. P. Masucci, K. Stanilov, and M. Batty, “Limited urban growth: London’s street network dynamics since the 18th century,” *PLOS ONE*, vol. 8, no. 8, p. e69469, 2013.

G. Boeing, “Osmnx: New methods for acquiring, constructing, analyzing, and visualizing complex street networks,” *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, vol. 45, no. 3, pp. 617–636, 2017.

—, “Measuring the complexity of urban form and design,” *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, vol. 45, no. 5, pp. 847–866, 2018.

NetworkX Developers, *NetworkX Developers Documentation*, Python Software Foundation, 2023. [Online]. Available: <https://networkx.org/documentation/stable/>

G. Boeing, “The morphology and circuitry of walkable and drivable street networks,” in *The Mathematics of Urban Morphology*, L. D’Acci, Ed. Basel, Switzerland: Birkhäuser, 2019, <https://doi.org/10.31235/osf.io/edj2s>.

—, “Urban spatial order: street network orientation, configuration, and entropy,” *Applied Network Science*, vol. 4, no. 1, p. 67, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s41109-019-0189-1>

L. C. Freeman, “Centrality in social networks conceptual clarification,” *Social Networks*, vol. 1, no. 3, pp. 215–239, 1978. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0378873378900217>

D. Chen, L. Lü, M.-S. Shang, Y.-C. Zhang, and T. Zhou, “Identifying influential nodes in complex networks,” *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, vol. 391, no. 4, pp. 1777–1787, 2012. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378437111007333>

A. H. Dekker, “Conceptual distance in social network analysis,” *J. Soc. Struct.*, vol. 6, 2005. [Online]. Available: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:19244692>

- U. Brandes, “A faster algorithm for betweenness centrality,” *Journal of Mathematical Sociology*, vol. 25, no. 2, pp. 163–177, 2001.
- , “On variants of shortest-path betweenness centrality and their generic computation,” *Social Networks*, vol. 30, no. 2, pp. 136–145, 2008. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378873307000731>
- NetworkX Community, “edge_betweenness_centrality,” https://networkx.org/documentation/stable/reference/algorithms/generated/networkx.algorithms.centrality.edge_betweenness_centrality.html, 2023, documentación oficial de NetworkX v3.1.
- L. Page, “The pagerank citation ranking: Bringing order to the web. technical report,” *Stanford Digital Library Technologies Project, 1998*, 1998.
- C. E. Shannon, “A mathematical theory of communication,” *The Bell System Technical Journal*, vol. 27, no. 3, pp. 379–423, 1948. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1948.tb01338.x>
- M. Dehmer and A. Mowshowitz, “A history of graph entropy measures,” *Information Sciences*, vol. 181, no. 1, pp. 57–78, 2011. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0020025510004147>
- E. Triantaphyllou, *Multi-Criteria Decision Making Methods: A Comparative Study*. Boston, MA: Springer, 2000.
- C. Wu, J. Wang, M. Wang, and M.-J. Kraak, “Machine learning-based characterisation of urban morphology with the street pattern,” *Computers, Environment and Urban Systems*, vol. 109, p. 102078, 2024. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0198971524000073>
- C. Barrington-Leigh and A. Millard-Ball, “A global assessment of street-network sprawl,” *PLOS ONE*, vol. 14, no. 11, pp. 1–16, 11 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0223078>
- B. Jiang, “A topological pattern of urban street networks: Universality and peculiarity,” *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, vol. 384, no. 2, pp. 647–655, 2007. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378437107006140>

- J. H. Lowry and M. B. Lowry, “Comparing spatial metrics that quantify urban form,” *Computers, Environment and Urban Systems*, vol. 44, pp. 59–67, Mar. 2014. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0198971513001142>
- F. Xie and D. Levinson, “Measuring the structure of road networks,” *Geographical Analysis*, vol. 39, 02 2005.
- I. T. Jolliffe, *Principal Component Analysis*, 2nd ed. Springer, 2002.
- U.S. Census Bureau, “Mobility data,” <https://www.census.gov/en.html>, 2020.
- R. Prieto-Curiel and J. P. Ospina, “The abc of mobility,” *Environ. Int.*, vol. 185, p. 108541, 2024.
- M. Southworth and E. Ben-Joseph, *Streets and the Shaping of Towns and Cities*. Island Press, 2003.
- J. W. Reps, *The Making of Urban America: A History of City Planning in the United States*. Princeton University Press, 1965.
- K. T. Jackson, *Crabgrass Frontier: The Suburbanization of the United States*. Oxford University Press, 1985.
- S. Greenspan. (2016, Dec.) Plat of zion. 99
- S. B. Warner Jr., *Streetcar Suburbs: The Process of Growth in Boston, 1870-1900*. Harvard University Press, 1978.
- M. Southworth and P. M. Owens, “The evolving metropolis: Studies of growth and structure,” *Journal of the American Planning Association*, vol. 59, no. 3, pp. 271–287, 1993.
- W. M. Whitehill and L. W. Kennedy, *Boston: A Topographical History*. Belknap Press, 2000.
- D. P. Crouch, D. J. Garr, and A. I. Mundigo, *Spanish City Planning in North America*. MIT Press, 1982.
- A. Garvin, *The American City: What Works, What Doesn't*. McGraw-Hill, 2002.

R. O'Toole, *Gridlock: Why We're Stuck in Traffic and What to Do About It.* Cato Institute, 2009.

Town of Cary, "Cary community plan," Town of Cary, NC, Tech. Rep., 2020.

S. Handy, R. G. Paterson, and K. Butler, "Planning for street connectivity: Getting from here to there," American Planning Association, Tech. Rep., 2003.

W. H. Kruskal and W. A. Wallis, "Use of ranks in one-criterion variance analysis," *Journal of the American Statistical Association*, vol. 47, no. 260, pp. 583–621, 1952.

H. B. Mann and D. R. Whitney, "On a test of whether one of two random variables is stochastically larger than the other," *The Annals of Mathematical Statistics*, vol. 18, no. 1, pp. 50–60, 1947.

G. Boeing, "Planarity and street network representation in urban form analysis," *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, vol. 47, no. 5, pp. 855–869, 2020.

G. Bruyns, C. Higgins, and D. Nel, "Urban volumetrics: From vertical to volumetric urbanization and its extensions to empirical morphological analysis," *Urban Studies*, vol. 58, 07 2020.

Y. Zhou, J. Wang, and X. Li, "Influence of relief degree of land surface on street network complexity in china," *ISPRS International Journal of Geo-Information*, vol. 10, no. 10, p. 705, 2021.

Z. Liang, W. Kong, X. Zhan, and Y. Xiao, "Analysis of the impact of ride-hailing on urban road network traffic by using vehicle trajectory data," *Journal of Advanced Transportation*, vol. 2022, no. 1, p. 6940850, 2022. [Online]. Available: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1155/2022/6940850>