

Street network sub-patterns and travel mode

Juan F. Riascos-Goyes^a, Michael Lowry^b, Nicolás Guarín-Zapata^{a,d} and Juan P. Ospina^{a,c,*}

^a*School of Applied Sciences and Engineering, Universidad EAFIT, Medellín, Colombia*

^b*Department of Civil and Environmental Engineering, University of Idaho, Moscow, ID, United States*

^c*Nature and Cities Research Group, Universidad EAFIT, Medellín, Colombia*

^d*Math Applications in Science and Engineering Research Group, Universidad EAFIT, Medellín, Colombia*

ARTICLE INFO

Keywords:

Urban morphology
Unsupervised learning
PCA
Clustering
Modal share

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 (marginal effect = 0.49) and reduced car dependence (−0.41), while organic forms are associated with increased car usage (0.44), and substantial declines in public transport (−0.47) and active mobility (−0.30). These effects are statistically robust ($p < 10^{-19}$), 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.

1 Introducción

La estructura física de las ciudades ejerce una influencia determinante en la vida cotidiana de sus habitantes, moldeando la manera en que se desplazan, acceden a los servicios y participan en las dinámicas urbanas. En este contexto, la morfología urbana se presenta como un factor crucial en la organización de la movilidad. Esta morfología no solo define la accesibilidad y conectividad de un territorio, sino que también condiciona la participación modal en los desplazamientos y, en consecuencia, el acceso equitativo a las oportunidades laborales, educativas y sociales de la ciudad (Geurs and Wee, 2004).

Históricamente, las políticas urbanas y de transporte han tendido a abordar la movilidad desde una perspectiva predominantemente funcionalista, centrada en la eficiencia operativa de los sistemas de transporte. Sin embargo, este enfoque ha subestimado con frecuencia cómo el diseño urbano puede fomentar o restringir ciertos modos de viaje. Ante desafíos contemporáneos apremiantes como la congestión vehicular, la fragmentación espacial, la inequidad en el acceso y el impacto ambiental del transporte, comprender la relación entre morfología urbana y movilidad resulta crucial. Estudios previos han demostrado que algunas formas urbanas promueven los desplazamientos activos y el uso del transporte público, mientras que otras fomentan la dependencia del automóvil (Ewing and Cervero, 2010).

En este contexto, el presente estudio contribuye a la comprensión de cómo la configuración morfológica de las redes viales influye en los patrones de movilidad urbana. Examina los atributos estructurales de los sistemas viales a partir de indicadores topológicos y espaciales (Bamakan, Nurgaliev and Qu, 2019; Cardillo, Scellato, Latora and Porta, 2006a), y explora en qué medida las variaciones en la forma de la red se asocian con diferencias en la participación modal en distintas ciudades de Estados Unidos, aportando evidencia empírica que puede respaldar enfoques más integrados en la planificación urbana y del transporte. A través de un enfoque comparativo, se propone ofrecer evidencia empírica que oriente el diseño de políticas de planificación urbana y del transporte más integradas,

con el fin de promover sistemas de movilidad más equitativos, sostenibles y eficientes.

2 Morfología Urbana y Estructura Espacial

Para caracterizar la estructura espacial de las ciudades, nos basamos en los principios de la morfología urbana, los cuales ofrecen un marco para describir y medir la configuración física del entorno construido. Este enfoque enfatiza el papel de las redes viales como un componente clave en la conformación de la forma urbana, ya que su estructura suele reflejar patrones de calles identificables, tales como configuraciones en cuadrícula, orgánicas o de tipo “cul-de-sac”. Mediante el uso de variables cuantitativas, es posible capturar tanto las dimensiones topológicas como espaciales de estos patrones. Las variables topológicas capturan la estructura subyacente de conectividad y accesibilidad potencial dentro de la red vial, mientras que las variables espaciales reflejan sus propiedades geométricas, incluyendo la longitud, configuración y alineación direccional de calles y manzanas (Barrington-Leigh and Millard-Ball, 2019a; Jiang, 2007a). En conjunto, estas dimensiones ofrecen una base analítica robusta para detectar regularidades estructurales e interpretar la organización espacial del tejido urbano en los casos analizados.

2.1 Caracterización de la Morfología Urbana: Métricas y Dimensiones Fundamentales

La descripción de una red urbana, especialmente cuando se aborda desde la teoría de grafos, genera un amplio conjunto de variables topológicas y espaciales. Dado el número considerable de estas variables y su frecuente intercorrelación, su manejo directo puede ser complejo. Para abordar esto, las variables se agrupan en un número limitado de dimensiones relevantes que capturan aspectos clave de la morfología urbana. Esta agrupación conceptual ayuda a consolidar numerosas métricas individuales en un conjunto más manejable de descriptores con valor interpretativo claro. Aunque se proponen cuatro dimensiones principales basadas en asociaciones lógicas entre propiedades urbanas, esta estructura no es rígida. Dependiendo de la complejidad y escala del conjunto de datos (por ejemplo, en ciudades más grandes o heterogéneas), pueden ser necesarias agrupaciones adicionales o ligeramente diferentes. Estas agrupaciones mantienen coherencia con

 jfriascosg@eafit.edu.co (J.F. Riascos-Goyes); mlowry@uidaho.edu (M. Lowry); nguarinz@eafit.edu.co (N. Guarín-Zapata); jospinaz@eafit.edu.co (J.P. Ospina)

ORCID(s): 0009-0009-9599-1030 (J.F. Riascos-Goyes); 0000-0002-6203-1502 (M. Lowry); 0000-0002-9435-1914 (N. Guarín-Zapata); 0000-0001-6374-083X (J.P. Ospina)

las variables originales y preservan el marco interpretativo general, permitiendo flexibilidad y matices. A partir de esta organización teórica, se identifican las siguientes dimensiones principales:

- **Conectividad:** Evalúa el grado de interconexión entre nodos (intersecciones) y segmentos (calles) de la red.
- **Geometría:** Define las propiedades físicas de los segmentos viales y las manzanas, tales como la longitud promedio de las calles, su sinuosidad y la regularidad de las formas de las manzanas.
- **Densidad:** Mide la concentración de elementos viales por unidad de superficie.
- **Características angulares:** Describe los ángulos formados por los segmentos viales en las intersecciones.

La Tabla 1 presenta las diecisiete métricas organizadas según las categorías previamente definidas. Estas métricas permiten una cuantificación de las características tanto topológicas como espaciales de las redes viales urbanas. La selección prioriza no solo la solidez analítica, sino también la capacidad de estas métricas para ser interpretadas en términos morfológicos, permitiendo una comprensión más clara de las diferencias estructurales entre contextos urbanos.

Table 1: Métricas de redes viales urbanas agrupadas por categoría.

Categoría	Métrica	Definición	Observación sobre el valor
Conectividad	Proporción de callejones sin salida	Proporción de segmentos que terminan en callejones sin salida.	De 0 a 1; valores altos indican menor conectividad de paso.
	Cruce tipo L ¹	Proporción de nodos con 2 calles conectadas.	De 0 a 1; valores más altos reflejan menor conectividad.
	Cruce tipo T ¹	Proporción de nodos con 3 calles conectadas.	De 0 a 1; común en diseños irregulares.
	Cruce tipo X ¹	Proporción de nodos con 4 calles conectadas.	De 0 a 1; valores altos indican mayor conectividad.
	Calles por nodo ¹	Número promedio de calles que convergen en un nodo.	De baja (callejones) a alta (intersecciones complejas).
	Grado promedio ¹	Grado promedio de los nodos, que mide el número de conexiones.	De 0 a 1
Geometría	Sinuosidad ¹	Promedio del cociente entre la longitud del camino más corto y la distancia euclidiana.	Cercano a 1 (directo) hasta valores mayores (indirectos).
	Longitud promedio de calle ¹	Longitud promedio de calles continuas en la red.	Calles cortas a largas, según la forma urbana.
Densidad	Densidad de aristas ¹	Longitud de las aristas por unidad de área.	De baja a alta densidad, según la morfología.

Continued on next page

Table 1: Métricas de redes viales urbanas agrupadas por categoría. (Continued)

Categoría	Métrica	Definición	Observación sobre el valor
Propiedades angulares	Densidad de calles ¹	Número de calles por unidad de área dentro del límite espacial.	Se observan patrones de calles dispersos o densos.
	Densidad de nodos ¹	Proporción de nodos (intersecciones) por unidad de área.	De 0 a 1
	Densidad de intersecciones ¹	Número de intersecciones por km ² dentro del área de red.	Baja a alta frecuencia de intersecciones.
	Densidad de segmentos ¹	Proporción de segmentos de calle por km ² en el área.	De 0 a 1
	Ángulo promedio	Ángulo promedio formado en las intersecciones de la red.	De agudos a rectos a obtusos.
	CV del ángulo	Coefficiente de variación de los ángulos en intersecciones.	De baja a alta variabilidad angular en el trazado.
	Proporción ortogonal	Porcentaje de intersecciones que forman ángulos cercanos a 90°.	De 0 a 1
	Entropía de orientación ¹	Medida normalizada de incertidumbre angular.	De 0 a 1; valores altos indican mayor diversidad direccional.

Más allá de las dimensiones abordadas en este estudio, la literatura existente sobre análisis de redes urbanas ha enfatizado el papel de las medidas de centralidad como parte de los métodos utilizados para caracterizar la estructura interna de los sistemas viales. Estas métricas surgen de la perspectiva topológica inherente a la teoría de grafos y permiten caracterizar la posición relativa de nodos y aristas dentro de un sistema, más allá de su ubicación física o conectividad inmediata.

Desde esta perspectiva, las métricas de centralidad proporcionan una capa adicional de análisis que permite examinar cómo se distribuyen la accesibilidad y la conectividad a lo largo de diferentes configuraciones viales. Cuando se interpretan desde un enfoque funcional, estas medidas ayudan a identificar no solo patrones de conexión local, sino también dinámicas de articulación global dentro de la red. La centralidad de grado (Freeman, 1978), al estimar el número de conexiones directas que tiene cada nodo en relación con el total, ofrece una primera aproximación a su nivel de integración; a partir de ello, la centralidad de cercanía (Musiał, Kazienko and Bródka, 2009; Wasserman and Faust, 1994) amplía el análisis al considerar las distancias promedio entre nodos, lo que permite identificar puntos estratégicos con mayor potencial de acceso al sistema en su conjunto. Complementariamente, la centralidad de intermediación, según lo desarrollado por Freeman (1978), introduce una dimensión crítica al revelar qué nodos tienden a situarse en las rutas más cortas entre otros pares, destacando su papel como articuladores del flujo general. Una lógica similar puede aplicarse a los segmentos de la red mediante la centralidad de intermediación de aristas (Lu and Zhang, 2013), la cual permite identificar enlaces con alto peso estructural en la conectividad general. Aunque estas métricas no formaron parte del análisis empírico desarrollado en este estudio, representan una dimensión analítica complementaria que puede

¹Referencia interna – Documentación de OSMnx 1.6.0: <https://osmnx.readthedocs.io/en/stable/internals-reference.html#osmnx-stats-module>.

enriquecer el estudio de las configuraciones espaciales y la comprensión estructural de las redes urbanas.

2.2 Tipologías de Patrones Urbanos

El análisis sistemático de las métricas y dimensiones morfológicas descritas anteriormente conduce a la identificación y clasificación de diferentes tipologías de patrones urbanos. Estas representan configuraciones espaciales que, aunque pueden presentar variaciones locales y grados de mezcla en la realidad urbana, comparten características estructurales distintivas. Una comprensión clara de las tipologías urbanas es fundamental para analizar la morfología de las ciudades. En este sentido, Southworth and Ben-Joseph (1995) ofrece una visión histórica integral sobre la evolución de los patrones viales. A partir de esta base, la literatura existente (Marshall, 2004; Asami, Kubat and Istek, 2001) ha identificado varias tipologías predominantes, entre las cuales se destacan las siguientes por su relevancia en este estudio:

2.2.1 Reticular (Gridiron)

Caracterizada por un patrón de calles predominantemente ortogonal, donde las intersecciones forman ángulos rectos, generando manzanas de forma regular. Esta estructura tiende a ofrecer alta conectividad y permeabilidad, lo cual facilita la orientación y la distribución eficiente.

2.2.2 Suburbano (Cul-de-sac)

Presenta una estructura jerárquica, frecuentemente con un diseño dendrítico. Se distingue por un alto porcentaje de calles sin salida (*cul-de-sacs*) que desembocan en vías colectoras y, finalmente, en arterias principales.

2.2.3 Orgánico (o Irregular)

Surge a menudo de un crecimiento urbano más espontáneo, adaptado a la topografía o desarrollado históricamente sin un plan geométrico unificado. Se define por calles con trazados no uniformes, anchos variables y manzanas de formas y tamaños diversos.

2.2.4 Híbrido

En la práctica, muchas áreas urbanas no se ajustan estrictamente a una sola tipología, sino que presentan una combinación de características de los patrones previamente mencionados. Estos patrones híbridos pueden surgir de la superposición de diferentes fases de planificación, de la adaptación a contextos geográficos específicos o de la evolución orgánica de áreas previamente planificadas.

Para ilustrar la diversidad morfológica descrita anteriormente, la Fig. 1 presenta ejemplos representativos de las cuatro tipologías canónicas de redes viales urbanas. Estas incluyen el diseño en cuadrícula de Midtown Manhattan (Ciudad de Nueva York), la estructura dendrítica con *cul-de-sacs* de Mission Viejo (California), el trazado orgánico del barrio de Alfama (Lisboa) y la configuración híbrida observada en Canberra (Australia).

3 Clasificación y Tratamiento de la Movilidad Urbana

Con el fin de analizar la relación entre la morfología urbana y los patrones de movilidad, se recopilan y clasifican datos sobre el uso del espacio vial con base en la información proporcionada por U.S. Census Bureau (2020). Esta información se organiza siguiendo el marco conceptual del ABC de la Movilidad Prieto-Curiel and Ospina (2024), el cual clasifica los modos de transporte en tres categorías según su función y medio de desplazamiento. La movilidad activa incluye formas no motorizadas como caminar y andar en bicicleta; la movilidad pública comprende los desplazamientos realizados mediante sistemas de transporte colectivo o compartido; y la movilidad privada se refiere al uso de vehículos motorizados individuales. Esta clasificación permite estructurar el análisis de la distribución modal de manera clara y comparable.

A partir de esta tipología, los patrones de movilidad se examinan desde una doble perspectiva. Por un lado, el enfoque desagregado permite evaluar

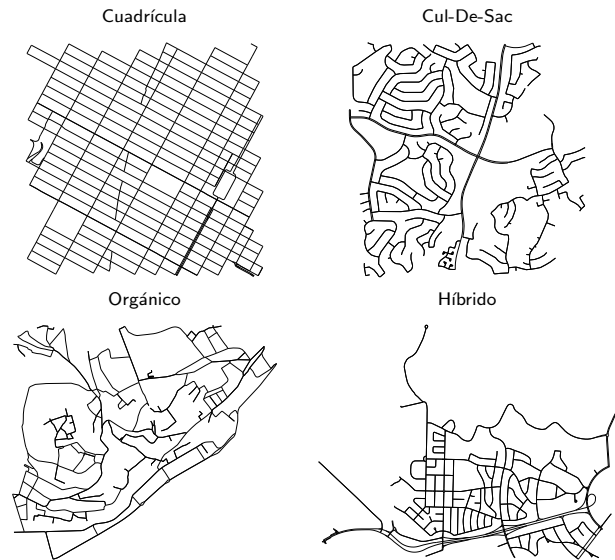


Figure 1: Casos ilustrativos de tipologías canónicas de redes viales urbanas. (Elaboración propia a partir de datos de OpenStreetMap).

la contribución específica de cada modo de transporte y su posible correlación con atributos morfológicos particulares. Por otro lado, el análisis agregado ofrece una visión general de la composición modal de cada unidad urbana, permitiendo comparaciones sistemáticas entre distintos contextos espaciales. Este enfoque metodológico no solo posibilita la caracterización de la distribución de los modos de transporte, sino que también facilita la exploración de posibles asociaciones entre el entorno construido y las prácticas cotidianas de movilidad.

4 Metodología para la Clasificación Teórica y Agrupamiento de Patrones Urbanos

Para llevar a cabo el análisis morfológico de las redes viales en las ciudades seleccionadas, el territorio urbano fue dividido en unidades administrativas definidas por la Oficina del Censo, conocidas como tramos censales. Esta segmentación territorial permite una caracterización precisa y consistente de la morfología urbana, facilitando la integración de propiedades topológicas y espaciales con datos complementarios como los indicadores de movilidad disponibles a nivel de tramo. Este enfoque permite comparaciones sistemáticas entre áreas urbanas mientras se preserva la granularidad necesaria para capturar la heterogeneidad interna.

La morfología urbana se analiza con base en las variables definidas previamente y resumidas en la Tabla 1, las cuales agrupan características espaciales y topológicas clave relevantes para describir redes viales. Sobre esta base, se aplica un método de clasificación sistemático y replicable para cuantificar el grado de correspondencia entre cada unidad urbana y los perfiles teóricos de patrones urbanos establecidos en la literatura (Sección 2.2). Este método emplea un marco de Toma de Decisiones Multiatributo (MADM) (Triantaphyllou, 2000) que asigna puntuaciones ponderadas y penalizaciones de acuerdo con qué tan cercanamente los atributos morfológicos observados se alinean con los valores característicos de cada patrón. Dentro de este marco, se identifican tres tipos de intervalos. El intervalo óptimo incluye valores que son altamente característicos y representativos de un patrón específico, el intervalo moderado comprende valores compatibles con el patrón pero menos distintivos o potencialmente superpuestos con otros, y el intervalo crítico o penalizante abarca valores que contradicen significativamente las características definitorias del patrón. Por ejemplo, una proporción muy alta de calles sin salida se considera crítica al evaluar el patrón reticular, lo que activa una penalización dentro del esquema de puntuación. Para cuantificar la correspondencia entre un

área urbana y cada perfil, se aplica un mecanismo de puntuación ponderada con penalizaciones. Sea d_i el valor de la dimensión i , y w_i el peso asignado con base en su relevancia para el patrón. La puntuación parcial para cada dimensión se determina por el intervalo en el que cae d_i .

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

donde S_o , S_m y P_c son coeficientes positivos que ponderan la contribución o penalización de manera correspondiente, con $S_o > S_m \geq 0$. La puntuación total para un área urbana dada y un patrón específico se obtiene sumando las puntuaciones parciales:

$$S_{\text{total}} = \sum_i s_i$$

Este enfoque permite una evaluación cuantitativa y replicable de la similitud morfológica entre las áreas urbanas observadas y los patrones teóricos, facilitando una clasificación sistemática basada en propiedades morfológicas seleccionadas. Como se indicó previamente en la Tabla 1, este estudio emplea un conjunto de propiedades topológicas y espaciales para caracterizar y clasificar patrones morfológicos urbanos. La definición de valores de referencia y rangos correspondientes para cada métrica no es arbitraria, sino que se fundamenta en una revisión detallada de estudios previos sobre redes viales urbanas desde diversas perspectivas analíticas. En cuanto a la conectividad, se han explorado múltiples métricas para capturar la integración estructural de las redes. Investigaciones como las de Wu, Wang, Wang and Kraak (2024); Barrington-Leigh and Millard-Ball (2019b) introducen indicadores como el Índice de Desconexión de Redes Viales (SNDi, por sus siglas en inglés), una medida basada en teoría de grafos que cuantifica la desconexión estructural usando un conjunto de datos global que abarca más de 46 millones de kilómetros de calles. Estas métricas incorporan variables como la proporción de calles sin salida, la continuidad de los enlaces según su clasificación jerárquica, y la presencia de conexiones redundantes. Complementariamente, el trabajo de Jiang (2007b), que analiza redes de 40 ciudades en Estados Unidos y en el extranjero, muestra que las configuraciones urbanas tienden a exhibir propiedades características de sistemas de mundo pequeño y libres de escala, tanto en términos de distribución de longitud de calle como de grado de conectividad, proporcionando así una base empírica robusta para establecer intervalos de referencia en las variables topológicas utilizadas. En la misma línea, el estudio de Lowry and Lowry (2014) compara 18 métricas morfológicas en más de 500 vecindarios del condado de Salt Lake, identificando cuáles permiten discriminar con mayor precisión entre distintos tipos de desarrollo urbano histórico y evidenciando que, pese a políticas orientadas al smart growth, persisten rasgos estructurales asociados a la urbanización dispersa.

Con respecto a la densidad, estudios como Cardillo, Scellato, Latora and Porta (2006b) y nuevamente Jiang (2007b) han examinado la concentración de elementos viales mediante representaciones gráficas espaciales ponderadas, comparando redes reales con estructuras ideales sintéticas utilizando metodologías como Árboles de Recubrimiento Mínimo (MST) y Triangulaciones Voraces (GT). Estos enfoques han demostrado la efectividad de estas medidas para capturar la complejidad estructural de contextos urbanos reales. Adicionalmente, para describir características geométricas y angulares de las redes, estudios como Xie and Levinson (2005) y Boeing (2019) han analizado indicadores como la entropía de orientación, patrones de conexión (anularidad, arborescencia, cinturonalidad, entre otros), y continuidad direccional. Estas métricas han sido aplicadas tanto a configuraciones idealizadas (por ejemplo, cuadrículas de 90°, 45° y 30°) como a datos empíricos de 100 ciudades de distintos continentes, permitiendo la evaluación del orden geométrico y la regularidad en las orientaciones de las calles.

Las propiedades seleccionadas para el análisis fueron adaptadas de los rangos y valores umbral reportados en estos estudios. Esta información fue integrada en el marco de clasificación propuesto, asegurando tanto la coherencia conceptual con la literatura como la viabilidad empírica

para su implementación, permitiendo así una evaluación estructurada y reproducible de la correspondencia entre las formas urbanas observadas y los patrones teóricos considerados.

4.1 Clasificación de Patrones e Identificación de Formas Híbridas

La clasificación de un área urbana se determina asignándola a la tipología de patrón para la cual alcanza la puntuación agregada más alta, siempre que dicha puntuación supere un umbral mínimo que asegure una correspondencia significativa. Por ejemplo, una ciudad se categoriza como Reticular si la puntuación asociada con ese patrón es la más alta entre todas las evaluaciones y alcanza un nivel de confianza predefinido.

Las formas híbridas se identifican en los casos en que un área urbana obtiene puntuaciones altas en dos o más tipologías distintas, lo que indica una combinación significativa de características de cada patrón. Esto puede observarse, por ejemplo, en áreas que presentan rasgos reticulares prominentes combinados con elementos típicos del crecimiento orgánico, a menudo como resultado de adaptaciones a la topografía o de capas históricas. También se reconoce una forma híbrida cuando ninguna puntuación individual domina claramente, pero la distribución específica de valores a lo largo de las dimensiones morfológicas revela una configuración mixta discernible —por ejemplo, una disposición predominantemente ortogonal que incluye una cantidad sustancial de calles sin salida, una característica típica de patrones suburbanos en desarrollos recientes. Esto permite una clasificación más matizada que va más allá de categorías mutuamente excluyentes y refleja con mayor precisión la complejidad y diversidad del tejido urbano.

4.2 Clasificación de Patrones y Subpatrones Basada en Clustering

La aplicación del Análisis de Componentes Principales (PCA) (Jolliffe, 2002) al conjunto inicial de variables topológicas y espaciales permitió la reducción de dimensionalidad, identificando un número limitado de dimensiones latentes que capturan la mayor parte de la variabilidad observada en la morfología urbana. Para determinar el número adecuado de componentes, se analizó su varianza explicada y se examinó la disminución exponencial del error de reconstrucción, adoptando un umbral del 95% de varianza explicada. Este enfoque aseguró una pérdida mínima de información al tiempo que evitó la inclusión de componentes irrelevantes en el análisis posterior.

Aunque la Tabla 1 definió grupos conceptuales para organizar las propiedades morfológicas, el análisis de PCA muestra que la expresión empírica de estas categorías puede variar según la escala urbana y la heterogeneidad interna. No obstante, las dimensiones extraídas tienden a preservar la lógica estructural de la clasificación teórica, lo que sugiere una correspondencia robusta entre los patrones conceptuales y las configuraciones urbanas reales, sin implicar una segmentación rígida. Con base en estas dimensiones, se aplicaron técnicas de agrupamiento para identificar patrones morfológicos predominantes, seleccionando el número óptimo de clústeres mediante métricas como el coeficiente de silueta. Aunque los agrupamientos resultantes reflejan configuraciones coherentes con el marco teórico, deben entenderse como estructuras flexibles en entornos urbanos complejos, como aquellos con grandes extensiones territoriales o desarrollos multinivel. Pueden emerger subgrupos periféricos que, a pesar de desviarse del centroide del clúster, conservan propiedades estructurales fundamentales que justifican su clasificación.

5 Resultados y Análisis Comparativo

5.1 Caracterización de Patrones Morfológicos en Ciudades Seleccionadas

Se definió una muestra de nueve ciudades estadounidenses con configuraciones morfológicas diversas, seleccionadas con base en la variación espacial, la cobertura geográfica y la disponibilidad de datos del Censo de los Estados Unidos. En cada caso, los tramos censales fueron clasificados

de acuerdo con su patrón morfológico teórico correspondiente, y los agrupamientos resultantes fueron analizados mediante técnicas de clustering. El objetivo fue explorar la correspondencia entre las tipologías teóricas y las configuraciones observadas en cada ciudad. Los resultados no solo replican los patrones teóricos en varios casos, sino que también revelan la existencia de subpatrones dentro de cada tipología. Estos subgrupos representan modulaciones internas que reflejan variaciones dentro de las principales categorías definidas sistemáticamente en la Sección 2.1. Cada subgrupo está etiquetado con un signo positivo (+) o negativo (−), indicando una desviación hacia arriba o hacia abajo, respectivamente, con respecto a las propiedades dominantes de su categoría.

La clasificación de estos subpatrones permite una interpretación más precisa de las diferencias intra-tipológicas observadas en las ciudades analizadas. Como se muestra en la Tabla 2, se presenta una síntesis de estas subcategorías, junto con las propiedades generales asociadas a cada una, completamente alineadas con las dimensiones morfológicas definidas previamente.

Table 2: Resumen de subgrupos morfológicos identificados mediante clustering.

Subgrupo	Descripción General
Density [±]	Variaciones en propiedades relacionadas con la densidad urbana
Intersection [±]	Cambios en características asociadas con las intersecciones viales
Mean [±]	Modificaciones en métricas promedio de la red como densidad de segmentos o sinuosidad
Street [±]	Alteraciones en características vinculadas a las calles principales y su conectividad
Std [±]	Diferencias en la dispersión geométrica o variabilidad de los ángulos de la red

El análisis de clústeres revela la presencia de subpatrones dentro de cada categoría morfológica general, destacando una variabilidad interna considerable moldeada por la diversidad de las ciudades estudiadas. No obstante, emerge una fuerte consistencia, ya que la mayoría de los subgrupos identificados se alinean estrechamente con las principales categorías morfológicas definidas previamente. Para ilustrar esto, la Tabla 3 presenta las nueve ciudades analizadas, detallando sus clasificaciones morfológicas teóricas junto con los resultados del clustering y los subpatrones identificados.

Table 3: Comparison between theoretical morphological patterns and sub-patterns obtained by clustering.

City	Primary Pattern		Clustering Sub-pattern	
Boston	Gridiron	44%	Gridiron	12.1%
	Organic	18%	Street [−]	35.4%
	Hybrid	14%	Street ⁺	0.3%
	Cul De Sac	24%	Organic	29.2%
			Street ⁺	7.9%
			Cul De Sac	15.2%
Cary Town	Gridiron	1%	Gridiron	1.3%
	Organic	28%	Cul De Sac	27.6%
	Hybrid	17%	Std ⁺	68.4%
	Cul De Sac	54%	Std [−]	2.6%
Chandler	Gridiron	2%	Organic	60.8%
	Organic	47%	Cul De Sac	37.4%
	Hybrid	10%	Street ⁺	1.9%
	Cul De Sac	41%		

Continued on next page

Table 3: Comparison between theoretical morphological patterns and sub-patterns obtained by clustering. (Continued)

City	Primary Pattern		Clustering Sub-pattern	
Charleston	Gridiron	23%	Gridiron	11.5%
	Organic	39%	Density [−]	9.8%
	Hybrid	8%	Density ⁺	4.9%
	Cul De Sac	30%	Density [−]	11.5%
			Organic	29.5%
			Density [−]	24.6%
			Cul De Sac	8.2%
Fort Collins	Gridiron	12%	Gridiron	7.7%
	Organic	31%	Organic	21.2%
	Hybrid	13%	Street ⁺	5.8%
	Cul De Sac	44%	Cul De Sac	13.5%
			Street ⁺	26.9%
			Street [−]	25.0%
Peachtree	Organic	13%	Organic	12.5%
	Hybrid	6%	Cul De Sac	18.8%
	Cul De Sac	81%	Mean ⁺	43.8%
			Mean [−]	25.0%
Philadelphia	Gridiron	59%	Gridiron	14.2%
	Organic	16%	Mean [−]	41.3%
	Hybrid	11%	Organic	44.5%
	Cul De Sac	14%		
Salt Lake	Gridiron	54%	Gridiron	43.1%
	Organic	17%	Intersection [−]	25.0%
	Hybrid	8%	Cul De Sac	31.9%
	Cul De Sac	21%		
Santa Fe	Gridiron	5%	Organic	26.2%
	Organic	43%	Density [−]	19.1%
	Hybrid	12%	Density ⁺	2.4%
	Cul De Sac	40%	Cul De Sac	19.1%
			Density ⁺	16.7%
			Density [−]	16.7%

Figure 2 presents selected examples of morphological categories and sub-patterns in cities like Sant Lake City, Boston, and Chandler, which show substantial internal variation. These cases exemplify how different urban contexts contribute to the morphological diversity captured by the clustering results, without delving into historical or social specifics.

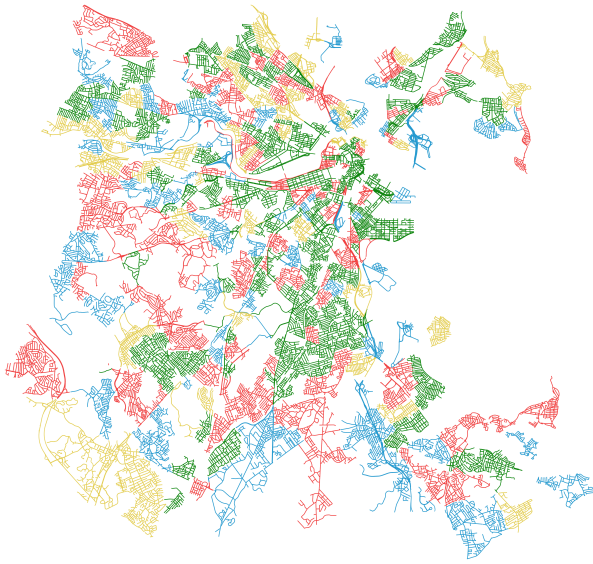
5.2 La Relación Entre la Estructura Urbana y los Patrones de Movilidad

Utilizando datos del censo sobre la proporción relativa de los modos de transporte activo, público y privado dentro de cada unidad urbana, se llevó a cabo un análisis agrupando las observaciones según su patrón morfológico predominante. Este enfoque permitió identificar tendencias generales de movilidad asociadas con diferentes configuraciones espaciales. La Figura 3 presenta gráficos de densidad que ilustran cómo varían las distribuciones modales entre estos patrones morfológicos.

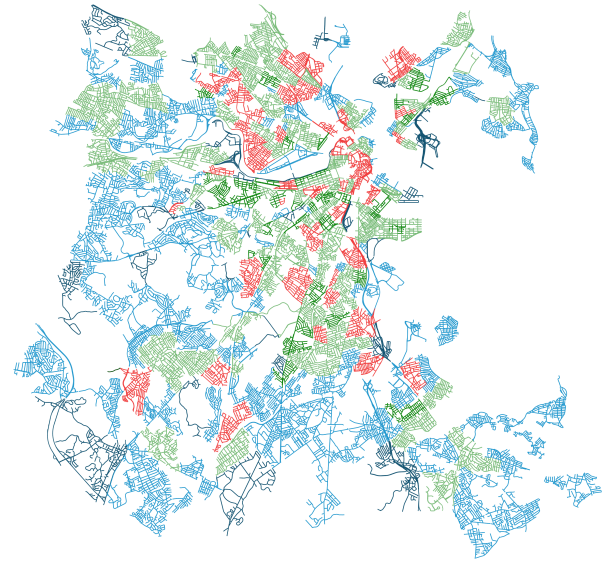
El análisis del comportamiento de la mediana y la dispersión para cada modo de transporte revela cambios sistemáticos que configuran perfiles de movilidad distintivos según la morfología urbana. Específicamente, las morfologías tipo retícula tienden a estar asociadas con mayores proporciones de transporte activo y público. En contraste, los patrones orgánicos y de tipo cul-de-sac—caracterizados por una menor conectividad y una prevalencia de calles sin salida—exhiben una mayor dependencia de vehículos privados. Esta tendencia se refleja estadísticamente en medianas consistentemente más bajas para los modos de transporte activo y público dentro de estas configuraciones espaciales.

5.2.1 Efectos Marginales de la Morfología Urbana sobre la Movilidad Modal

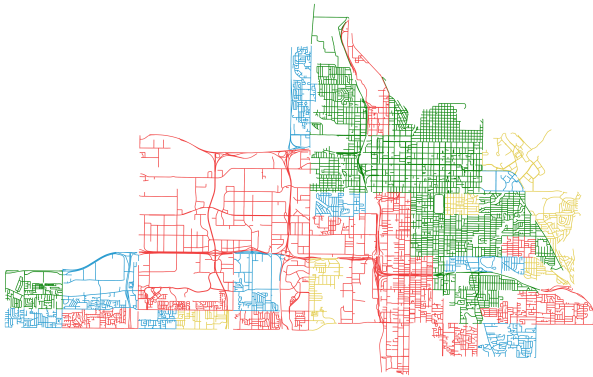
Para mostrar cómo diferentes configuraciones espaciales están asociadas con variaciones en el uso de modos específicos de transporte, se analizó



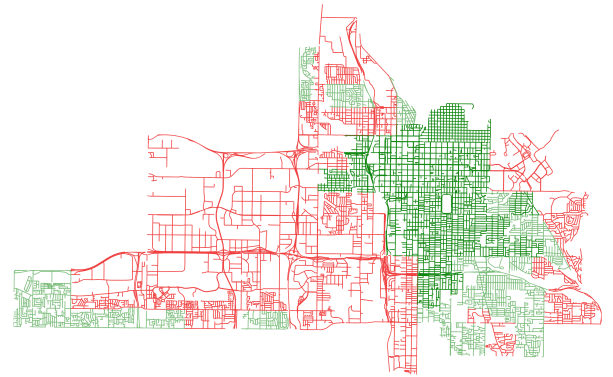
(a1) Boston, MA



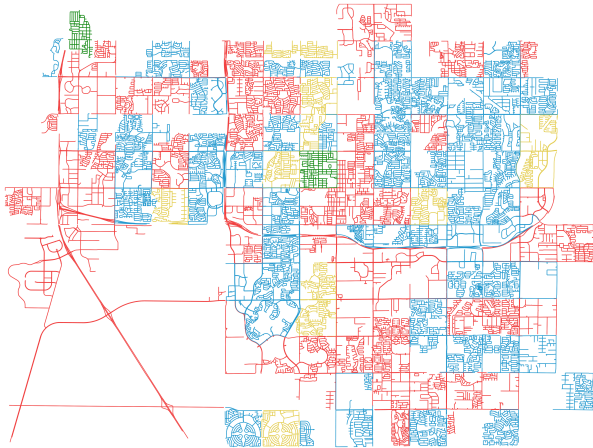
(a2) Boston Clustering



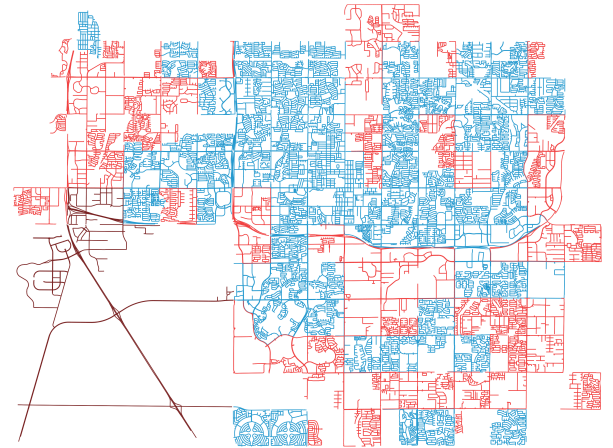
(b1) Salt Lake City, UT



(b2) Salt Lake City Clustering



(c1) Chandler, AZ



(c2) Chandler Clustering



Figure 2: Morphological classification of street networks. Top row (a1–c1): primary typologies. Bottom row (a2–c2): sub-patterns identified within each category via unsupervised learning.

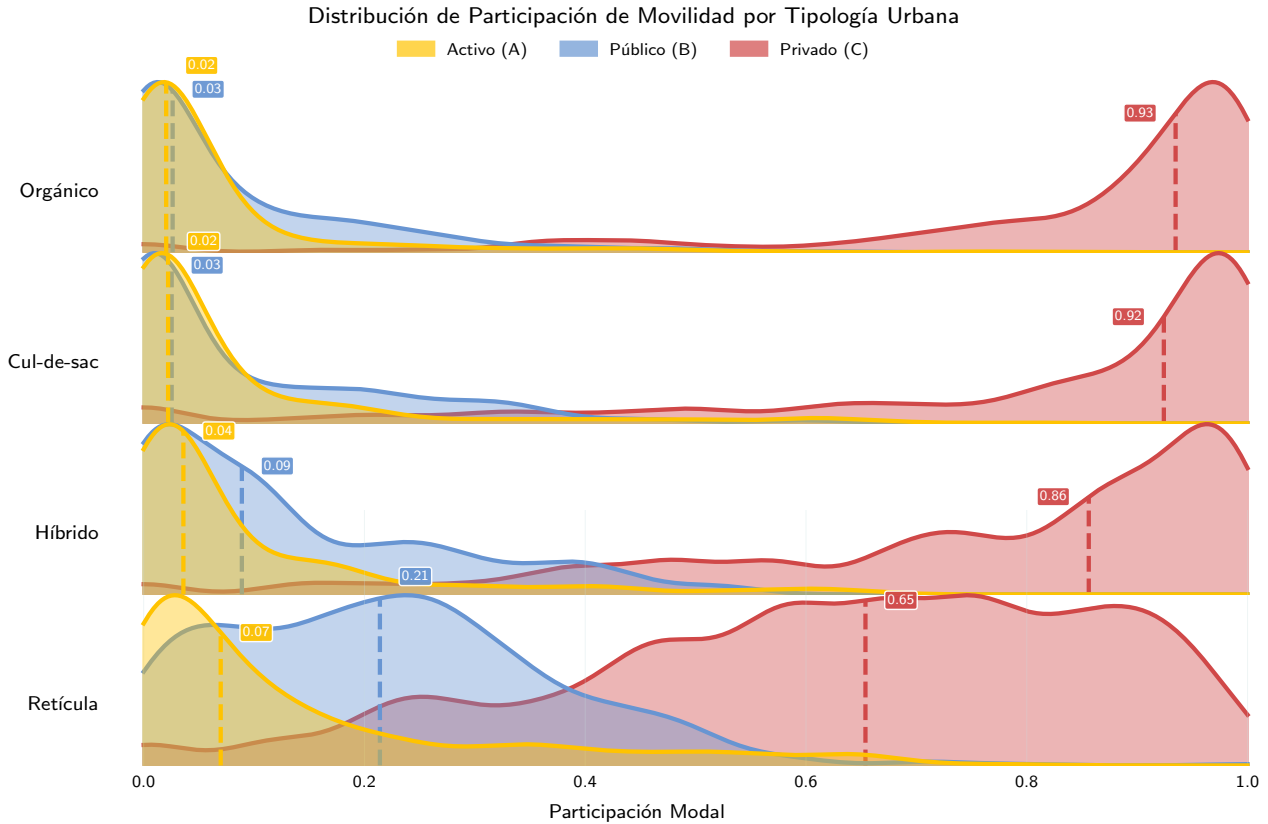


Figure 3: Gráfico de crestas que muestra la distribución de las proporciones modales (activo, público y privado) en los distintos patrones morfológicos urbanos. Cada cresta representa una estimación de densidad para una tipología específica.

la relación entre morfología urbana y uso modal a través de los efectos marginales estimados. La Figura 4 presenta un mapa de calor que muestra los coeficientes normalizados asociados a cada patrón urbano, lo que permite una interpretación visual de cómo ciertas formas morfológicas están vinculadas a desviaciones positivas o negativas en la propensión al uso de movilidad activa, pública o privada en comparación con el promedio general.

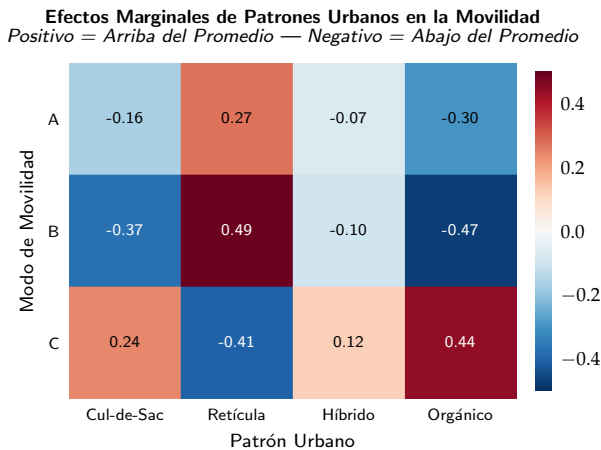


Figure 4: Mapa de calor de los efectos marginales de los modos de movilidad en los distintos patrones de disposición urbana.

Los efectos marginales estimados revelan contrastes significativos entre las diversas configuraciones morfológicas. La morfología tipo retícula, por ejemplo, está asociada con una mayor propensión al uso del transporte público (0.49) y una menor tendencia al uso de vehículo privado (−0.41), lo que sugiere un entorno urbano propicio para dinámicas de movilidad sostenible. En contraste, el patrón orgánico exhibe un fuerte efecto positivo sobre el uso del automóvil (0.44), junto con efectos negativos sobre el transporte público (−0.47) y la movilidad activa (−0.30), lo que indica una menor afinidad por modos alternativos de transporte en este tipo de tejido urbano.

5.2.2 Análisis Post Hoc

Para evaluar con mayor precisión las diferencias entre configuraciones viales en relación con los distintos tipos de movilidad, se realizó un análisis post hoc basado en comparaciones pareadas entre patrones. Se utilizó la prueba de Kruskal–Wallis Kruskal and Wallis (1952) como prueba global, seguida de pruebas de Mann–Whitney Mann and Whitney (1947) para identificar qué contrastes específicos eran estadísticamente significativos. Para estimar la magnitud de estas diferencias, se calcularon tamaños de efecto expresados como η . Esta métrica permite interpretar la relevancia práctica de las diferencias observadas más allá de su significancia estadística. La Tabla 4 resume los resultados para cada combinación de patrón vial y tipo de movilidad, incluyendo el estadístico U, el valor p asociado y el tamaño de efecto η .

El análisis post hoc revela una relación consistente entre la morfología urbana y los patrones de movilidad, donde cada tipología promueve o restringe distintos modos de transporte. La configuración tipo retícula destaca por su apoyo sostenido a la movilidad activa y al uso del transporte público, mostrando diferencias medias significativas en comparación con los patrones orgánico y cul-de-sac—particularmente en movilidad pública

Table 4

Post hoc analysis results for mobility patterns across urban morphological types.

Mobility Type	Pattern 1	Pattern 2	n1	n2	U statistic	p-value	Mean Diff	Median Diff	η
A	Gridiron	Organic	590	308	124255	1.24×10^{-19}	0.087	0.049	0.302
	Cul-de-sac	Gridiron	344	590	69984.5	2.12×10^{-15}	-0.066	-0.048	0.259
	Gridiron	Hybrid	590	167	58648.5	1.67×10^{-4}	0.052	0.034	0.137
	Organic	Hybrid	308	167	20628.5	3.58×10^{-4}	-0.034	-0.016	0.163
	Cul-de-sac	Hybrid	344	167	24249.5	4.18×10^{-3}	-0.014	-0.014	0.126
B	Gridiron	Organic	590	308	146207.5	5.79×10^{-51}	0.143	0.188	0.501
	Cul-de-sac	Gridiron	344	590	46113	3.50×10^{-44}	-0.129	-0.189	0.456
	Gridiron	Hybrid	590	167	67370	3.92×10^{-13}	0.088	0.125	0.264
	Organic	Hybrid	308	167	18634	5.92×10^{-7}	-0.055	-0.063	0.228
	Cul-de-sac	Hybrid	344	167	22009.5	1.52×10^{-5}	-0.041	-0.064	0.190
C	Gridiron	Organic	590	308	35447	5.57×10^{-51}	-0.220	-0.281	0.501
	Cul-de-sac	Gridiron	344	590	150614	4.54×10^{-35}	0.168	0.270	0.404
	Gridiron	Hybrid	590	167	30866.5	1.65×10^{-13}	-0.136	-0.202	0.268
	Organic	Hybrid	308	167	32400.5	2.89×10^{-6}	0.085	0.079	0.215
	Cul-de-sac	Hybrid	344	167	33539	2.10×10^{-3}	0.032	0.068	0.136

($\eta = 0.50$). También exhibe el uso relativo más bajo de automóviles privados. En contraste, el diseño cul-de-sac está asociado con una alta dependencia del vehículo privado y efectos negativos significativos sobre la movilidad activa y pública, atribuibles a su conectividad limitada. La diferencia media de +0.168 respecto a retícula en movilidad privada ($r = 0.40$) refuerza esta tendencia.

Esta tendencia es aún más pronunciada en el patrón orgánico, que, debido a su complejidad geométrica, muestra el mayor nivel de uso del automóvil. La diferencia media con respecto a retícula alcanza los +0.220 ($r = 0.50$), el efecto más fuerte observado en el análisis, acompañado del peor desempeño tanto en movilidad activa como pública. Finalmente, la morfología híbrida muestra un comportamiento intermedio en todos los modos de movilidad. Los tamaños de efecto relativos a retícula son menores (η entre 0.13 y 0.27), lo que sugiere que no optimiza ningún modo particular ni los penaliza severamente, en coherencia con su estructura morfológica mixta.

5.3 Implicaciones de Política Pública

Este estudio resalta la relevancia de la morfología de las redes viales como un factor estructural clave que configura el comportamiento de movilidad, más allá de las explicaciones socioeconómicas tradicionales. Al revelar asociaciones sólidas entre subpatrones viales y la distribución modal, los hallazgos respaldan la integración de indicadores morfológicos en el diseño de políticas urbanas y de transporte. Dicha integración puede permitir una planificación más matizada espacialmente y basada en evidencia, con aplicaciones potenciales en métricas de accesibilidad, evaluaciones de equidad en el transporte y estrategias de desarrollo urbano orientadas a la movilidad, tales como:

- **Inversión en infraestructura focalizada para la movilidad activa.** Las ciudades pueden usar clasificaciones morfológicas para identificar áreas donde la forma urbana ya favorece caminar y andar en bicicleta. Los patrones tipo retícula o híbridos, caracterizados por alta conectividad y densidad de intersecciones, ofrecen un terreno fértil para reforzar la movilidad activa mediante infraestructura adicional como ciclovías, aceras ampliadas y medidas de pacificación del tráfico.
- **Estrategias de planificación urbana y zonificación.** La morfología urbana puede informar políticas de uso del suelo y densidad.

Por ejemplo, las áreas con patrones viales desconectados o dendríticos pueden requerir intervenciones de planificación integradas que aumenten la permeabilidad, reequilibren la jerarquía vial o adopten zonificaciones de uso mixto para apoyar viajes no motorizados.

- **Priorización espacial de mejoras en el transporte público.** El método permite a los planificadores urbanos identificar vecindarios donde las condiciones morfológicas dificultan la accesibilidad y la integración multimodal. Tales áreas pueden priorizarse para nuevas rutas de transporte, mejoras en conexiones de primer/último kilómetro o servicios de transporte flexibles.
- **Modelado de escenarios y evaluaciones de impacto de proyectos.** Las tipologías morfológicas y sus asociaciones modales pueden utilizarse para simular cómo los cambios en la forma urbana (por ejemplo, nuevos desarrollos, reconfiguraciones viales) podrían afectar el comportamiento de viaje. Esto permite a los planificadores evaluar la probable efectividad de proyectos propuestos o planes de densificación para modificar la distribución modal hacia alternativas sostenibles.
- **Comunicación de políticas y planificación participativa.** La claridad visual y tipológica de la clasificación de patrones viales ofrece una herramienta útil de comunicación para interactuar con actores no técnicos. Ayuda a explicar por qué algunos vecindarios pueden requerir estrategias distintas para fomentar un acceso equitativo y sostenible a la movilidad.

6 Discusión

Esta investigación proporciona evidencia consistente de una relación entre la morfología urbana y los patrones modales de movilidad. Como se muestra en la Figura 3, los entornos caracterizados por estructuras ortogonales—particularmente aquellos con un patrón tipo retícula—presentan una mayor prevalencia de modos de transporte activo y público en comparación con diseños más fragmentados como los patrones orgánico o cul-de-sac. Esta tendencia es funcionalmente coherente, ya que las configuraciones en cuadrícula tienden a concentrar actividades económicas, institucionales y de servicios, promoviendo así el uso de modos de transporte sostenibles como caminar, andar en bicicleta y el transporte público. Salt Lake City

sirve como un ejemplo convincente que respalda esta hipótesis, ya que áreas centrales como Downtown, Central City y Capitol Hill son clasificadas de manera consistente como de patrón reticular tanto en el marco teórico (Figura 2b1) como en el análisis de agrupamiento (Figura 2b2), y estas mismas áreas muestran una dominancia modal del transporte activo y público (Figura 3).

Esta asociación se respalda aún más con los resultados cuantitativos obtenidos en todas las ciudades mediante el análisis post hoc (Tabla 4). Por ejemplo, la comparación entre los patrones reticular y orgánico revela diferencias estadísticamente significativas en movilidad privada (valor- $p = 5.57 \times 10^{-51}$), con un tamaño de efecto negativo ($d = -0.220$) que indica una menor proporción de este modo en áreas con una red vial más estructurada. De manera similar, los efectos sobre la movilidad activa y pública son positivos ($d = -0.281$ y $d = 0.501$, respectivamente), reforzando la noción de que el orden espacial en la forma urbana tiende a fomentar un comportamiento de transporte más sostenible. Estas tendencias también se observan en la comparación entre los patrones cul-de-sac y reticular, destacando el papel estructural de la morfología urbana en la configuración de las decisiones modales de los residentes. En general, los hallazgos respaldan la hipótesis central del estudio, sugiriendo que la forma urbana influye no solo en la accesibilidad física, sino también en la orientación funcional de los sistemas de movilidad.

Una limitación clave de este estudio se refiere a las unidades espaciales utilizadas para segmentar las ciudades, que se basan en las divisiones administrativas de la Oficina del Censo de los Estados Unidos, específicamente los tramos censales. Si bien estas unidades capturan eficazmente una amplia gama de patrones modales y de estructura vial, pueden abarcar heterogeneidad interna, concentrando potencialmente ciertos modos de movilidad o tipos de calles y comprometiendo la representatividad de los datos. Unidades más pequeñas como bloques o sub-bloques podrían proporcionar una mayor granularidad, pero su uso resultaría en un número muy elevado de observaciones altamente homogéneas, aumentando la probabilidad de valores atípicos y distorsionando los indicadores agregados. Por esta razón, el uso de tramos censales ofrece un equilibrio práctico entre el detalle espacial y la manejabilidad de los datos. Además, el análisis adopta una representación planar del espacio urbano (Boeing, 2020; Bruyns, Higgins and Nel, 2020), lo cual limita su capacidad para tener en cuenta factores topográficos como pendientes, barreras naturales o cambios de elevación—elementos que han demostrado influir significativamente tanto en los patrones de movilidad como en la configuración estructural de las redes viales (Zhou, Wang and Li, 2021; Liang, Kong, Zhan and Xiao, 2022). Estas limitaciones metodológicas deben tenerse en cuenta al interpretar los hallazgos y apuntan al valor de incorporar modelos urbanos tridimensionales en investigaciones futuras para lograr una comprensión más integral de las dinámicas espaciales y funcionales.

References

- Asami, Y., Kubat, A.S., Istek, C., 2001. Characterization of the street networks in the traditional turkish urban form. *Environment and Planning B: Planning and Design* 28, 777–795. URL: <https://doi.org/10.1068/b2718>, doi:10.1068/b2718, arXiv:<https://doi.org/10.1068/b2718>.
- Bamakan, S.M.H., Nurgaliev, I., Qu, Q., 2019. Opinion leader detection: A methodological review. *Expert Systems with Applications* 115, 200–222. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0957417418304950>, doi:10.1016/j.eswa.2018.07.069.
- Barrington-Leigh, C., Millard-Ball, A., 2019a. A global assessment of street-network sprawl. *PLOS ONE* 14, 1–16. URL: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0223078>, doi:10.1371/journal.pone.0223078.
- Barrington-Leigh, C., Millard-Ball, A., 2019b. A global assessment of street-network sprawl. *PLOS ONE* 14, 1–16. URL: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0223078>, doi:10.1371/journal.pone.0223078.
- Boeing, G., 2019. Urban spatial order: street network orientation, configuration, and entropy. *Applied Network Science* 4, 67. URL: <https://doi.org/10.1007/s41109-019-0189-1>, doi:10.1007/s41109-019-0189-1.
- Boeing, G., 2020. Planarity and street network representation in urban form analysis. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science* 47, 855–869. doi:10.1177/2399808318802941.
- Bruyns, G., Higgins, C., Nel, D., 2020. Urban volumetrics: From vertical to volumetric urbanization and its extensions to empirical morphological analysis. *Urban Studies* 58. doi:10.1177/0042098020936970.
- Cardillo, A., Scellato, S., Latora, V., Porta, S., 2006a. Structural properties of planar graphs of urban street patterns. *Physical Review E* 73, 066107. doi:10.1103/physreve.73.066107.
- Cardillo, A., Scellato, S., Latora, V., Porta, S., 2006b. Structural properties of planar graphs of urban street patterns. *Phys. Rev. E* 73, 066107. URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevE.73.066107>, doi:10.1103/PhysRevE.73.066107.
- Ewing, R., Cervero, R., 2010. Travel and the built environment. *Journal of the American Planning Association* 76, 265–294. doi:10.1080/01944361003766766.
- Freeman, L.C., 1978. Centrality in social networks conceptual clarification. *Social Networks* 1, 215–239. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0378873378900217>, doi:[https://doi.org/10.1016/0378-8733\(78\)90021-7](https://doi.org/10.1016/0378-8733(78)90021-7).
- Geurs, K., Wee, B., 2004. Accessibility evaluation of land-use and transport strategies: Review and research directions. *Journal of Transport Geography* 12, 127–140. doi:10.1016/j.jtrangeo.2003.10.005.
- Jiang, B., 2007a. A topological pattern of urban street networks: Universality and peculiarity. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* 384, 647–655. doi:10.1016/j.physa.2007.05.064.
- Jiang, B., 2007b. A topological pattern of urban street networks: Universality and peculiarity. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* 384, 647–655. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378437107006140>, doi:<https://doi.org/10.1016/j.physa.2007.05.064>.
- Jolliffe, I.T., 2002. *Principal Component Analysis*. 2nd ed., Springer. doi:10.1007/b98835.
- Kruskal, W.H., Wallis, W.A., 1952. Use of ranks in one-criterion variance analysis. *Journal of the American Statistical Association* 47, 583–621. doi:10.1080/01621459.1952.10483441.
- Liang, Z., Kong, W., Zhan, X., Xiao, Y., 2022. Analysis of the impact of ride-hailing on urban road network traffic by using vehicle trajectory data. *Journal of Advanced Transportation* 2022, 6940850. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1155/2022/6940850>, doi:<https://doi.org/10.1155/2022/6940850>, arXiv:<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1155/2022/6940850>.
- Lowry, J.H., Lowry, M.B., 2014. Comparing spatial metrics that quantify urban form. *Computers, Environment and Urban Systems* 44, 59–67. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0198971513001142>, doi:10.1016/j.compenvurbsys.2013.11.005.
- Lu, L., Zhang, M., 2013. Edge betweenness centrality, in: Dubitzky, W., Wolkenhauer, O., Cho, K.H., Yokota, H. (Eds.), *Encyclopedia of Systems Biology*. Springer New York, New York, NY, pp. 647–648. URL: https://doi.org/10.1007/978-1-4419-9863-7_874, doi:10.

- 1007/978-1-4419-9863-7_874.
- Mann, H.B., Whitney, D.R., 1947. On a test of whether one of two random variables is stochastically larger than the other. *The Annals of Mathematical Statistics* 18, 50–60. doi:10.1214/aoms/1177730491.
- Marshall, S., 2004. *Streets and Patterns*. Routledge.
- Musiał, K., Kazienko, P., Bródka, P., 2009. User position measures in social networks, in: *Proceedings of the 3rd Workshop on Social Network Mining and Analysis (SNA-KDD '09)*, Association for Computing Machinery, New York, NY, USA. pp. 6:1–6:9. URL: <https://doi.org/10.1145/1731011.1731017>, doi:10.1145/1731011.1731017.
- Prieto-Curiel, R., Ospina, J.P., 2024. The abc of mobility. *Environment International* 185, 108541. doi:10.1016/j.envint.2024.108541.
- Southworth, M., Ben-Joseph, E., 1995. Street standards and the shaping of suburbia. *Journal of the American Planning Association* 61, 65–81. doi:10.1080/01944369508975620.
- Triantaphyllou, E., 2000. *Multi-Criteria Decision Making Methods: A Comparative Study*. Springer, Boston, MA. doi:10.1007/978-1-4757-3157-6.
- U.S. Census Bureau, 2020. Mobility data. <https://www.census.gov/en.html>.
- Wasserman, S., Faust, K., 1994. *Social Network Analysis: Methods and Applications*. volume 8 of *Structural Analysis in the Social Sciences*. Cambridge University Press, Cambridge. URL: <https://doi.org/10.1017/CB09780511815478>, doi:10.1017/CB09780511815478.
- Wu, C., Wang, J., Wang, M., Kraak, M.J., 2024. Machine learning-based characterisation of urban morphology with the street pattern. *Computers, Environment and Urban Systems* 109, 102078. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0198971524000073>, doi:10.1016/j.compenvurbsys.2024.102078.
- Xie, F., Levinson, D., 2005. Measuring the structure of road networks. *Geographical Analysis* 39. doi:10.1111/j.1538-4632.2007.00707.x.
- Zhou, Y., Wang, J., Li, X., 2021. Influence of relief degree of land surface on street network complexity in china. *ISPRS International Journal of Geo-Information* 10, 705. doi:10.3390/ijgi10100705.