Geospatial Innovation for Mapping Pedestrian Accessibility: Isochrones and Public Space Deficits in Emerging Cities (Alto Trujillo, Peru)

Brandon Emanuel Sal y Rosas Sanchez, Bach.[1]; Oliver Briam Navarro Viera, Mg.[2]; Daniel Alejandro Baca Cáceres, Mg.[3]
[1,2,3]Universidad Privada del Norte, Perú, [1]*N00289736@upn.pe,* [2]*oliver.navarro@upn.pe,* [3]*daniel.baca@upn.pe*
[1,2,3]Grupo de Investigación SIGNA

Abstract– ***Accelerated urban growth in Latin America generates deficits and an unequal distribution of public spaces. Contrasting traditional Euclidean buffers that overestimate accessibility, this study proposes an open-source geospatial framework that models estimated pedestrian accessibility using walkability isochrones (5, 10, and 15 minutes) based on the road network, integrating demographic projections for 2026 and polyfunctional sports platforms. Applied to Alto Trujillo (Peru), the model reveals that the isochrones cover 56.67% of the urban area but intersect 84.51% of the population (69,194 inhabitants) due to high density, leaving a baseline spatial exclusion rate of 15.49%. The district exhibits a provision of only 1.08 m²/inhabitant, representing an 89.20% deficit compared to the regulatory standard (R.M. N° 338-2020-VIVIENDA). The contrast with traditional buffers confirms that network analysis prevents overestimation errors in fragmented urban fabrics, offering an efficient dual approach to prioritize public investment and promote environmental justice in the Global South.***

Keywords-- ***Isochrone Analysis, Network Analysis, Public Space Deficit, Emerging Cities, Geospatial Innovation.***

Innovación geoespacial para el mapeo de la accesibilidad peatonal: Isócronas y déficit de espacio público en ciudades emergentes (Alto Trujillo, Perú)

Brandon Emanuel Sal y Rosas Sanchez, Bach.[1]; Oliver Briam Navarro Viera, Mg.[2]; Daniel Alejandro Baca Cáceres, Mg.[3]
[1,2,3]Universidad Privada del Norte, Perú, [1]*N00289736@upn.pe,* [2]*oliver.navarro@upn.pe,* [3]*daniel.baca@upn.pe*
[1,2,3]Grupo de Investigación SIGNA

Resumen– ***El crecimiento urbano acelerado en Latinoamérica genera déficits y una distribución desigual de espacios públicos. Frente a los buffers euclidianos tradicionales que sobreestiman la accesibilidad, este estudio propone un marco geoespacial de código abierto que modela la accesibilidad peatonal estimada mediante isócronas de caminabilidad (5, 10 y 15 minutos) basadas en la red vial, integrando proyecciones demográficas al 2026 y plataformas deportivas polifuncionales. Aplicado a Alto Trujillo (Perú), el modelo revela que las isócronas cubren el 56.67% del área urbana pero intersecan al 84.51% de la población (69,194 hab.) debido a la alta densidad, dejando como valor mínimo al 15.49% de exclusión espacial. El distrito exhibe una dotación de solo 1.08 m²/hab., un déficit del 89.20% respecto al estándar normativo (R.M. N° 338-2020-VIVIENDA). El contraste con buffers tradicionales confirma que el análisis de red evita errores de sobreestimación en tejidos fragmentados, ofreciendo un enfoque dual eficiente para priorizar la inversión pública y promover la justicia ambiental en el sur global.***

Palabras clave-- ***Análisis de Isócronas, Análisis de Redes, Déficit de Espacio Público, Ciudades Emergentes, Innovación Geoespacial.***

I. Introducción

El crecimiento urbano acelerado en las ciudades latinoamericanas ha impulsado una expansión desordenada y fragmentada hacia las periferias urbanas, intensificando las desigualdades socioespaciales históricas [1]. En estos bordes metropolitanos en consolidación, la urgencia habitacional prioriza la ocupación del suelo para uso residencial —predominantemente de carácter informal—, relegando u omitiendo la planificación estructurada de áreas libres y zonas de recreación pública [2]. No obstante, en estos contextos de alta vulnerabilidad socioeconómica, los espacios públicos trascienden su función meramente estética u ornamental: se consolidan como infraestructuras sociales vitales que facilitan la integración comunitaria, actúan como mecanismos urbanos de mitigación de la inseguridad y constituyen elementos indispensables para garantizar una calidad de vida digna [3], [4].

Tradicionalmente, los instrumentos de planificación territorial, tales como Planes de Desarrollo Metropolitano o Planes de Desarrollo Urbano, han evaluado la cobertura y el acceso a los espacios públicos mediante la delimitación de áreas de influencia geométrica simple o buffers euclidianos [5]. Estos parámetros se fijan habitualmente entre 400 y 800 metros, distancias estandarizadas en normativas locales y directrices internacionales que representan el límite de tolerancia del desplazamiento peatonal activo, equivalente a umbrales de caminata de entre 5 y 10 minutos [6]. A pesar de que este enfoque geométrico permite una aproximación diagnóstica inicial, carece de la precisión analítica requerida para la escala barrial [7]. Al proyectar radios de cobertura puramente lineales, el modelo asume erróneamente un desplazamiento peatonal isotrópico y sin fricción; en consecuencia, ignora por completo la morfología urbana real, las barreras arquitectónicas, la topografía y la desconexión intrínseca de la trama vial, factores que en la práctica obligan al ciudadano a recorrer distancias significativamente mayores para acceder al mismo recurso espacial [8].

Frente a estas limitaciones métricas, la presente investigación propone una innovación metodológica fundamentada en el despliegue avanzado de Sistemas de Información Geográfica (SIG) [9]. En sustitución de los radios teóricos tradicionales, se implementa el análisis espacial de isócronas temporales mediante algoritmos de modelación de redes, los cuales evalúan el desplazamiento peatonal real a través de la topología vial disponible, contabilizando calles, pasajes y senderos transitables [10]. Esta transferencia tecnológica e instrumental permite transitar desde la cuantificación de una cobertura teórica abstracta hacia la medición y visualización de una accesibilidad peatonal estimada basada en la experiencia física del habitante [11]. Para validar la operatividad de esta propuesta metodológica, se seleccionó como caso de estudio el distrito de Alto Trujillo, ubicado en la provincia de La Libertad (Perú), un escenario idóneo de evaluación debido a su origen derivado de una expansión informal acelerada, la alta complejidad morfológica de su tejido urbano y la acuciante necesidad de dotación de servicios e infraestructura básica [12].

En este contexto, la presente investigación responde a la siguiente pregunta: ¿en qué medida el modelado de isócronas peatonales de red, frente al enfoque convencional de buffers euclidianos, modifica el diagnóstico de cobertura y déficit de espacio público en una periferia urbana de origen informal? Para responderla, el estudio ofrece tres contribuciones específicas: (1) un flujo de trabajo metodológico replicable,

basado enteramente en herramientas de código abierto (QGIS, OpenStreetMap), para el modelado de isócronas peatonales jerarquizadas por tipología de equipamiento; (2) un enfoque dual de evaluación (cobertura territorial y cobertura demográfica) que permite neutralizar los sesgos de obsolescencia censal característicos de los asentamientos informales; y (3) una cuantificación empírica y comparativa, para el caso de Alto Trujillo, del contraste entre isócronas de red y buffers euclidianos convencionales, evidencia hasta ahora escasa en la literatura aplicada al contexto peruano. La evidencia espacial resultante proporciona el sustento técnico necesario para formular políticas públicas orientadas a la inserción estratégica de nuevas áreas verdes y espacios de recreación, optimizando la inversión pública y promoviendo la recuperación del tejido social y urbano en regiones emergentes [13]–[15].

II. Marco Teórico

A. Espacios públicos y calidad urbana

El espacio público urbano constituye la piedra angular de la habitabilidad, la cohesión social y la resiliencia en las dinámicas metropolitanas contemporáneas. En el contexto actual de mitigación climática y descarbonización, la configuración morfológica y la conectividad de las redes espaciales a nivel de barrio ejercen una influencia directa sobre los modos de vida locales, condicionando de manera significativa las decisiones de movilidad no obligatoria o recreativa de los ciudadanos [16]. Estas áreas sociales, espacios verdes y de esparcimiento no actúan únicamente como elementos estéticos aislados, sino como catalizadores multifuncionales de la salud pública, el bienestar psicológico y la biodiversidad urbana. En consecuencia, el establecimiento de estándares normativos rigurosos sobre la accesibilidad física a dichos espacios verdes se vuelve una precondición indispensable para asegurar el desarrollo sostenible de los asentamientos urbanos modernos [17].

B. Accesibilidad urbana y modelo de proximidad

El auge del cronourbanismo ha reconfigurado los paradigmas de la planificación territorial a través de modelos de proximidad hiperlocal, tales como la “ciudad de los 15 minutos” o los entornos caminables de 5 y 10 minutos, los cuales postulan que los servicios esenciales deben ser alcanzables mediante modos activos de transporte [18]. La efectividad real de una red de proximidad depende directamente de la permeabilidad física de sus infraestructuras; políticas urbanas enfocadas en intervenciones tácticas, como la adición estratégica de nuevos accesos en infraestructuras verdes preexistentes, tienen la capacidad de modificar sustancialmente el radio de cobertura efectiva y reducir los tiempos de viaje a pie dentro del umbral crítico de los 15 minutos [19]. Cuando este análisis se realiza con datos de alta resolución a nivel de parcela o vivienda, se evidencia con mayor claridad que la distribución equitativa de los accesos residenciales a parques consolida un marco de justicia social y derecho equitativo al espacio público urbano [20], [21].

C. Tecnologías geoespaciales y SIG en urbanismo inteligente

La operacionalización del diseño urbano contemporáneo descansa sobre el despliegue de Sistemas de Información Geográfica y el procesamiento analítico de datos masivos, lo que permite a investigadores y planificadores capturar patrones dinámicos de uso del suelo, movilidad e interacción ciudadana con una resolución espacial y temporal sin precedentes [22]. Esta base tecnológica robustece los análisis geoespaciales al permitir la combinación de aproximaciones metodológicas a micro y macroescala, resultando vital para ejecutar evaluaciones precisas de justicia ambiental y verificar la correspondencia entre densidades demográficas y recursos ecológicos distribuidos en el territorio [23], [24].

D. Análisis de redes viales e isócronas espaciales

El núcleo metodológico para determinar la proximidad física real en entornos urbanos exige el abandono de las mediciones lineales simples y la adopción de modelos de análisis de redes viales e isócronas de tiempo-distancia. Este instrumental adquiere relevancia crítica no solo en dinámicas cotidianas de esparcimiento, sino también en escenarios de vulnerabilidad extrema o gestión de riesgos de desastre; la modelación de isócronas peatonales hacia parques y jardines públicos, por ejemplo, permite evaluar su rol potencial como áreas de reunión seguras ante eventos catastróficos como sismos [25]. Al basarse en la topología vial, el modelado de redes mediante software SIG procesa de manera exacta las características del tejido de calles, aceras, pendientes y barreras arquitectónicas existentes, ofreciendo un reflejo fidedigno de la accesibilidad peatonal que supera los sesgos inherentes al cálculo de distancias euclidianas [8], [26]. La convergencia entre el análisis de redes de transporte y teorías geométricas avanzadas —como los diagramas de Voronoi estructurados sobre redes— dota además a los algoritmos de la capacidad de sectorizar y balancear matemáticamente la oferta y demanda de centralidades verdes en tramas urbanas emergentes [27].

E. Planificación urbana basada en evidencia

La consolidación de un modelo urbano inclusivo demanda una transición hacia la planificación basada en evidencia empírica, capaz de identificar con rigor espacial los déficits de infraestructura y las asimetrías socioeconómicas. El diseño de marcos metodológicos fundamentados en SIG viabiliza la evaluación sincrónica de tres dimensiones críticas del espacio verde urbano: su disponibilidad física cuantitativa, su equidad distributiva y su nivel real de accesibilidad peatonal [28]. Estos diagnósticos indican, mediante análisis espaciales

exhaustivos, que las poblaciones vulnerables suelen experimentar déficits severos de accesibilidad a áreas verdes públicas [29]. La documentación empírica de estas asimetrías provee el sustento analítico necesario para justificar políticas de redistribución de recursos territoriales y defender la justicia ambiental urbana [30]. Índices compuestos, como el coeficiente de distribución espacial integrado a indicadores de accesibilidad, proporcionan a los tomadores de decisiones métricas paramétricas replicables para intervenir de manera focalizada el territorio [31].

La revisión de la literatura evidencia un consenso amplio sobre la superioridad analítica de las isócronas de red frente a los buffers euclidianos [7]–[9], [26], así como sobre el valor de los enfoques duales de accesibilidad y equidad distributiva [20], [28]. Sin embargo, la mayoría de estos estudios se ha desarrollado en ciudades consolidadas del Norte Global o en metrópolis asiáticas de alta densidad planificada [22], [24], [27], con escasa evidencia empírica en periferias latinoamericanas de origen informal, donde la desactualización censal y la irregularidad del tejido vial introducen fuentes de sesgo adicionales no abordadas por los marcos existentes. Esta investigación atiende dicho vacío mediante un modelo dual —territorial y demográfico— calibrado específicamente para las condiciones de un asentamiento informal en expansión.

III. Metodología

La presente investigación adopta un enfoque metodológico cuantitativo de carácter espacial, fundamentado en el modelado geoespacial mediante Sistemas de Información Geográfica. Con el propósito de evaluar la accesibilidad peatonal real y determinar de manera paramétrica el déficit de infraestructura recreativa, se diseñó un flujo de trabajo estructurado en cinco fases sistemáticas.

A. Área de estudio e inventario espacial de la oferta

El distrito de Alto Trujillo constituye un escenario idóneo para la validación del modelo debido a su dinámica de expansión urbana informal acelerada y a la consecuente ausencia de espacios públicos consolidados [12]. La catalogación del inventario espacial de la oferta recreativa se rigió bajo los criterios técnicos del Decreto Supremo N° 028-2023-VIVIENDA, enfocándose en los espacios destinados a la recreación activa y pasiva de escala barrial [32]. Se integraron cartográficamente los parques locales, los polideportivos y las plataformas deportivas polifuncionales; la incorporación de estas últimas se justifica en las dinámicas socioespaciales de los asentamientos emergentes latinoamericanos, donde estos complejos actúan como los principales núcleos de cohesión social [33].

Para garantizar que estas plataformas deportivas fueran permanentemente accesibles y compatibles con la definición normativa de espacio público, se aplicó un filtro de verificación visual mediante revisión satelital y cartografía colaborativa. Mediante este procedimiento, se corroboró que dichas infraestructuras carecieran de barreras físicas privativas o controles de acceso restrictivos. En consecuencia, se descartaron explícitamente los campos deportivos de instituciones educativas por su carácter privativo, y se calculó exclusivamente el área neta utilizable de cada equipamiento, corrigiendo las omisiones presentes en el Plan de Desarrollo Metropolitano (PDM) vigente.

B. Construcción de la topología de la red peatonal y parámetros de enrutamiento

El procesamiento geográfico se realizó en el software libre QGIS versión 3.44. Con el fin de asegurar mediciones métricas exactas, los datos vectoriales (ejes viales y puntos de acceso) se reproyectaron al Sistema de Referencia de Coordenadas WGS 84 / UTM Zona 17S (EPSG:32717). En contraposición a las metodologías convencionales basadas en buffers euclidianos —que proyectan áreas de influencia circulares abstractas omitiendo la fricción espacial y la configuración real del tejido urbano [9]—, esta investigación se fundamentó en el análisis topológico de redes de transporte.

La fase analítica inicial comprendió la estructuración de un modelo de grafos viales a partir de una capa vectorial de la red de circulación del distrito. Utilizando bases de datos abiertas como OpenStreetMap, con fecha de descarga de Julio 2026 se extrajo la red conectiva. Los tipos de vías admitidos incluyeron vías principales, calles locales, pasajes y senderos no motorizados a microescala [34]. Como criterios de exclusión y reglas de conectividad, el modelo se configuró para admitir exclusivamente el tráfico peatonal bidireccional.

Posteriormente, la capa vectorial fue sometida a una limpieza y tolerancia topológica, aplicando un tratamiento de eliminación de vías desconectadas (nodos sueltos) para evitar errores algorítmicos en el enrutamiento. Adicionalmente, para resolver la obsolescencia cartográfica característica de las áreas periféricas, el procedimiento se complementó con la digitalización y edición vectorial manual para integrar los nuevos polígonos habitacionales que exceden la planimetría oficial del año 2020, evitando invisibilizar la exclusión espacial de las ocupaciones más recientes

C. Generación de isócronas y modelación del cronourbanismo

Una vez consolidada la topología vial y georreferenciados los puntos de acceso de la oferta recreativa, se procedió a la extracción de la red vial desde OpenStreetMap utilizando el complemento HCMGIS (con fecha de corte de la base de datos entre el 4 y 6 de julio). Posteriormente, se implementó el algoritmo de enrutamiento del complemento QNEAT3 integrado en QGIS (versiones 3.40.5 Bratislava para el procesamiento inicial y 3.44.15 Solothurn para el levantamiento de observaciones), el cual procesó el grafo vial para calcular las matrices de distancia y tiempo de

desplazamiento efectivo sobre la infraestructura disponible. El algoritmo delimitó los polígonos de isócronas reales para los umbrales críticos de caminabilidad, segmentados en correspondencia jerárquica con la escala y tipología de cada equipamiento (ver Tabla 1).

TABLA 1
INVENTARIO ESPACIAL Y ASIGNACIÓN DE TIEMPOS DE ACCESIBILIDAD PEATONAL

Tipología de espacio público	Cantidad (N°)	Superficie total m²	Proximidad/ escala	Umbral tiempo / distancia
Losas deportivas y parques menores *(< 1,000 m²)*	22	41,517.83 m²	Inmediata *(Escala vecinal)*	5 min. /~400 m
Polideportivos y parques locales *(1,000 m²–7,999 m²)*	08	38,712.42 m²	Barrial *(Escala de sector)*	10 min. /~800 m
Parque principal y Plaza Cívica (≥ 8,000 m²)	01	8,197.66 m²	Distrital *(Escala urbana)*	15 min. /~1200 m
Total general	**31**	**88,427.91 m².**	-	-

Nota. Las distancias equivalentes asumen una velocidad peatonal promedio de 4.8 km/h sobre la topología de la red vial, parámetro estándar en estudios de cronourbanismo y caminabilidad urbana [18].

Para garantizar que los criterios de clasificación sean mutuamente excluyentes, los intervalos de superficie operaron como parámetro principal. Las únicas excepciones morfológicas propias del tejido informal (una losa y un polideportivo que superaban los 8,000 m²) fueron asignadas a sus umbrales de 5 y 10 minutos priorizando estrictamente su función barrial. Posteriormente, los polígonos de las áreas de servicio de cada punto de la oferta fueron sometidos a una operación de disolución geométrica (*dissolve*) para eliminar las superposiciones internas, generando un único mapa de cobertura unificada de accesibilidad peatonal para todo el ámbito distrital.

Respecto a los puntos de origen espacial para el algoritmo de redes, se determinó utilizar los centroides geométricos de cada equipamiento en lugar de accesos efectivos. Esta decisión metodológica se justifica en la morfología del tejido urbano de origen informal de Alto Trujillo, donde las áreas recreativas y plataformas deportivas carecen, en su gran mayoría, de cerramientos perimetrales restrictivos, presentando una permeabilidad física irrestricta en la totalidad de sus bordes. Ante esta configuración espacial abierta, el centroide actúa como el punto de gravedad más representativo para modelar el alcance del equipamiento, superando además la limitación de la inexistencia de un catastro oficial a microescala que detalle pórticos de entrada específicos.

D. Intersección geoespacial y construcción de indicadores de déficit

La evaluación cuantitativa integró las variables demográficas y territoriales mediante un análisis de superposición espacial, intersecando la geometría del polígono de cobertura unificada con la capa de manzanas censales. Para mitigar la brecha temporal del Censo del INEI de 2017, se proyectó la población al horizonte 2026 aplicando la tasa de crecimiento intercensal media del distrito (3.09%) [5], [12] mediante el modelo geométrico, donde P_{2026} es la población proyectada, P_{2017} la base demográfica, r la tasa de crecimiento y t el intervalo temporal transcurrido:

$$P_{2026} = P_{2017}(1+r)^t$$

Durante esta etapa se implementó un control de calidad geoespacial para registrar un sesgo detectado en la periferia norte, donde existen manzanas con consolidación física evidente, pero valores poblacionales nulos en los registros de origen; esta limitación fue codificada explícitamente para evitar distorsión por sobreestimación espacial. La demanda poblacional se contrastó de forma dual frente a la cobertura territorial real, mitigando los falsos positivos analíticos de accesibilidad comunes en asentamientos informales [19], [35].

Para las manzanas censales parcialmente intersecadas por los polígonos de isócronas, la estimación de la población cubierta se calculó de manera estrictamente proporcional al área geométrica intersecada. Este procedimiento algorítmico se fundamenta en el supuesto de una distribución demográfica espacialmente homogénea dentro de cada manzana. Si bien se reconoce que en los tejidos de origen informal pueden existir variaciones micro espaciales en la densidad intra-manzana, la adopción de este criterio de asignación proporcional resulta el método más riguroso para evitar la sobreestimación estadística que se generaría al contabilizar la totalidad de los habitantes en aquellos polígonos con una cobertura física meramente parcial.

Para el cálculo del déficit cuantitativo, se adoptó como parámetro de evaluación el estándar de 10 m² por habitante. Esta métrica se fundamenta en el Sistema Nacional de Estándares de Urbanismo (Resolución Ministerial N° 338-2020-VIVIENDA) y se aplica sectorialmente como Indicador de Brecha (Formato N° 04-A) para la formulación de proyectos de inversión pública en desarrollo urbano [36]. En el marco normativo peruano, este parámetro posee un carácter orientativo u óptimo para la planificación territorial. Asimismo, su aplicabilidad se restringe a las áreas de recreación, tipología que, de acuerdo con el marco de protección de espacios públicos (D.S. N° 028-2023-VIVIENDA) y la clasificación del Artículo 8 del D.S. Nº 001-2023-VIVIENDA, incluye explícitamente parques, plazas y losas deportivas, validando empírica y normativamente la inclusión de estas últimas en el presente inventario espacial [32]. Se calculó el Espacio Público Requerido (EPR) a nivel de manzana censal aplicando este estándar de dotación de la siguiente manera:

$$EPR = 10(P_{2026})$$

y el porcentaje de Espacio Público No Atendido (%EPNA), que aísla el desajuste entre la demanda teórica (EPR) y el Espacio Público Existente (EPE) derivado del inventario territorial:

$$\%EPNA = (1 - (EPE / EPR))100$$

IV. Resultados y Discusión

A. *Cobertura espacial del entorno caminable*

Esta formulación matemática permite establecer una métrica porcentual precisa sobre la carencia estructural de áreas recreativas en el distrito.

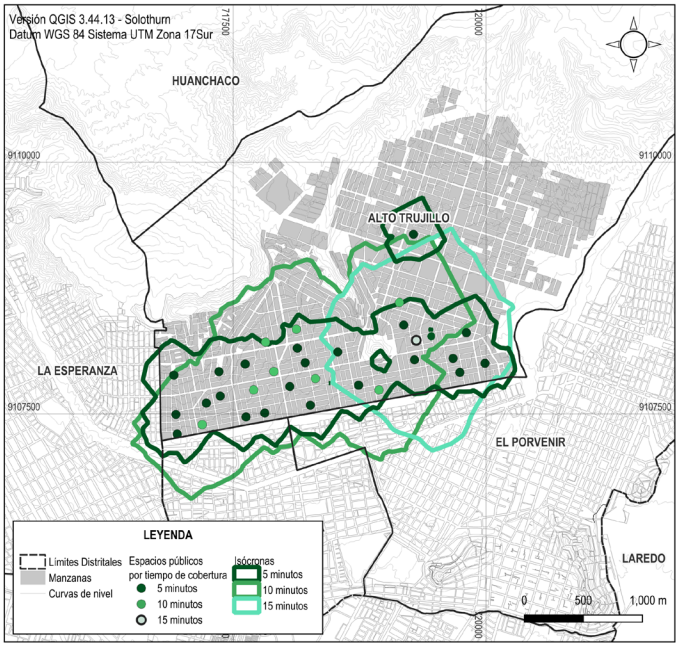


Fig. 1 Cobertura espacial de isócronas peatonales en Alto Trujillo.

Al ejecutar el algoritmo de modelación sobre el grafo vial y disolver las áreas de influencia individuales en un polígono continuo de servicio, los resultados cartográficos revelan que la cobertura territorial en el distrito de Alto Trujillo alcanza el 56.67% (*3,089,934.85 m²)* del suelo urbano consolidado. Este hallazgo sugiere que, en términos estrictamente geográficos, el 43.33% (*2,362,705.75 m²)* del entramado urbano carece de conectividad y permeabilidad peatonal hacia cualquier tipología de espacio público (ver Tabla 2).

TABLA 2
PORCENTAJE DE COBERTURA ESPACIAL POR ÁREA DE MANZANAS EN ALTO TRUJILLO

Cobertura espacio público	**Área por manzana**	**%**
Cobertura	*3,089,934.85 m²*	56.67%
Sin cobertura	*2,362,705.75 m²*	43.33%
Total	***5,452,640.60 m²***	**100%**

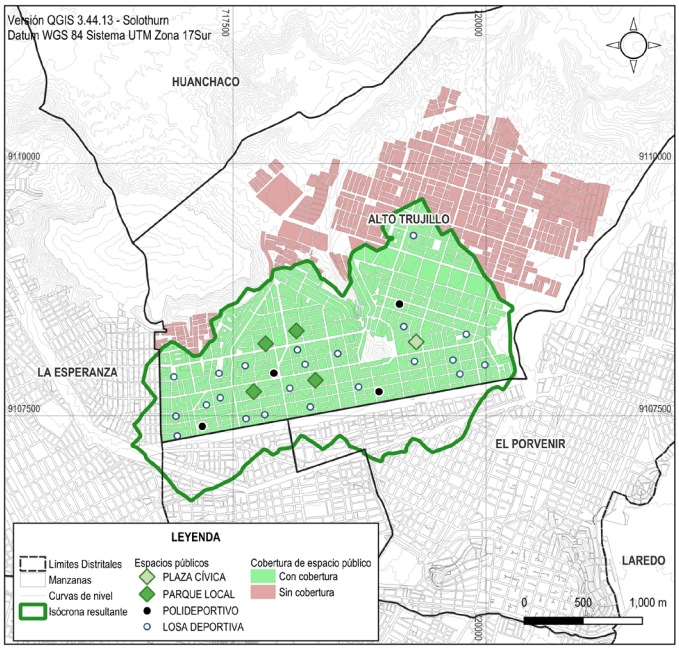


Fig. 2 Polígono unificado de cobertura territorial frente al área desatendida del distrito.

Es imperativo subrayar que este 56.67% de cobertura territorial se sostiene de manera predominante gracias a la inclusión estratégica de las plataformas deportivas polifuncionales dentro del inventario de la oferta. Si la delimitación analítica se hubiese restringido a los parques consolidados y plazas cívicas formales, la brecha territorial desatendida habría adquirido dimensiones críticas. Este hallazgo indica empíricamente que, en las periferias de origen informal, la infraestructura deportiva vecinal opera como un mecanismo de soporte primario que suple las deficiencias crónicas del diseño urbano institucional, asumiendo el rol central de espacio público efectivo [35].

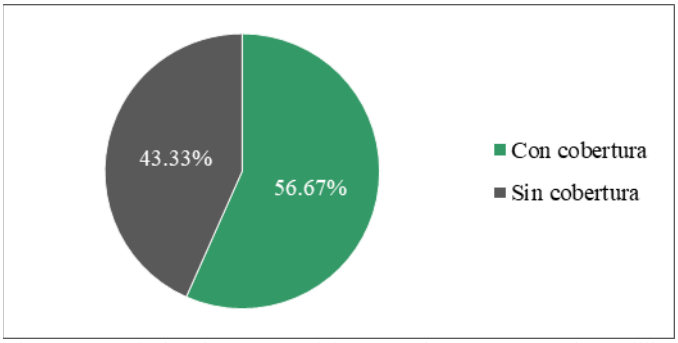


Fig. 3 Porcentaje de cobertura espacial por área de manzanas en Alto Trujillo.

B. *Equidad distributiva y cobertura demográfica*

Al transicionar del análisis geométrico del suelo hacia la evaluación de la equidad demográfica —empleando la proyección poblacional al horizonte 2026 [12]—, los hallazgos revelan un comportamiento analítico divergente. La

intersección espacial determina que el 84.51% de la población proyectada del distrito (69,194 habitantes) reside dentro de las cuencas de accesibilidad de las isócronas modeladas. En contraposición, el 15.49% restante (12,683 habitantes) carece de cobertura espacial respecto a la red de espacios públicos (ver Tabla 3).

TABLA 3
PORCENTAJE DE COBERTURA DEMOGRÁFICA POBLACIONAL PROYECTADA AL 2026 EN ALTO TRUJILLO

Cobertura espacio público	Población estimada (hab.)	%
Cobertura	*69,194*	84.51%
Sin Cobertura	*12,683*	15.49%
Total	*81,877*	**100%**

Es imperativo precisar que este 84.51% representa exclusivamente una cobertura de accesibilidad física (proximidad espacial). Esta cifra no debe interpretarse como la satisfacción de la demanda recreativa o suficiencia del espacio, dado que la superficie real de estas infraestructuras resulta insuficiente para albergar óptimamente a dicha concentración demográfica. Cabe aclarar que este 15.49% debe interpretarse como un límite inferior y no como una medida de exclusión absoluta, dado que el análisis territorial revela áreas periféricas potencialmente ocupadas que no están representadas adecuadamente en la base demográfica.

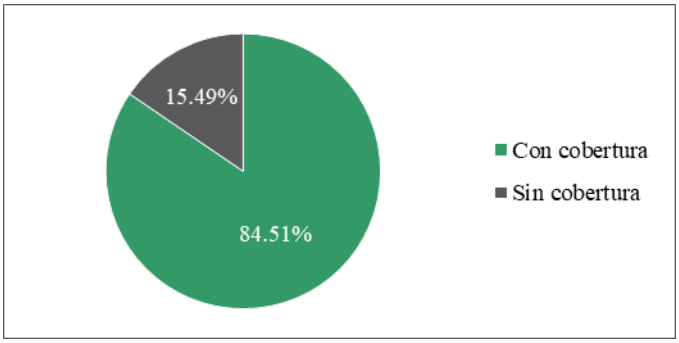


Fig. 4 Porcentaje de cobertura demográfica poblacional proyectada en Alto Trujillo.

C. Interpretación de la disociación espacial mediante el enfoque dual

La discrepancia estadística entre la cobertura demográfica (84.51%) y la cobertura territorial (56.67%) evidencia empíricamente la pertinencia del enfoque metodológico dual propuesto. Esta disociación sugiere que el distrito de Alto Trujillo presenta un tejido urbano irregular y asimétrico, caracterizado por una densa concentración poblacional en micro-manzanas consolidadas que logran ser intersecadas por las isócronas de los equipamientos principales, en contraste con extensas manzanas periféricas en proceso de ocupación que configuran vastos "desiertos urbanos" carentes de servicios (ver Tabla 4).

TABLA 4
COMPARATIVA DE DISOCIACIÓN ENTRE COBERTURA ESPACIAL Y COBERTURA DEMOGRÁFICA

Indicador de Accesibilidad	Con cobertura (servida)	Sin cobertura (no servida)	Total
Cobertura espacial (área)	56.67%	43.33%	100%
Cobertura demográfica (población)	84.51% *(69,194 hab.)*	15.49% *(12,683 hab.)*	100% *(81,877 hab.)*

Depender exclusivamente de la variable demográfica tradicional habría generado un "falso positivo" estadístico en la planificación del distrito, sugiriendo un escenario optimista de accesibilidad cercano al 84.51%. Las observaciones planimétricas de control identificaron que múltiples manzanas en los márgenes de expansión reciente presentan una ocupación física efectiva que, por la obsolescencia material de la base censal, figura formalmente con población nula. Es precisamente ante esta limitación institucional donde se constata la robustez del modelo dual: al contrastar la base demográfica con la cobertura territorial real —la cual expone que el 43.33% del territorio está desatendido—, el algoritmo geoespacial logra neutralizar los sesgos del censo oficial [19], [35]. Este procedimiento no solo visibiliza el déficit real que padecen las comunidades periféricas excluidas, sino que consolida a la metodología como una herramienta de adecuada precisión y replicabilidad para el diagnóstico de asentamientos informales en regiones emergentes.

D. Cuantificación paramétrica del déficit espacial normativo

El inventario territorial consolidado determinó que el distrito dispone de una oferta física real de Espacio Público Existente (EPE) equivalente a 88,427.91 m². Al relacionar esta superficie con la demanda de los 81,877 habitantes proyectados al 2026, se devela un indicador crítico de dotación de apenas 1.08 m² de espacio público por habitante. Al contrastar este escenario frente al estándar óptimo de 10 m²/hab. estipulado por la Resolución Ministerial N° 338-2020-VIVIENDA [36], la demanda urbana exige un Espacio Público Requerido (EPR) de 818,770.00 m². La sustracción de la oferta actual determina un déficit cuantitativo absoluto de 730,342.09 m². En consecuencia, el indicador de Espacio Público No Atendido (%EPNA) alcanza un 89.20% (ver Tabla 5), clasificando a la mayor parte del territorio distrital como un déficit crítico de infraestructura recreativa.

TABLA 5
INDICADORES DE DÉFICIT Y REQUERIMIENTO ESPACIAL NORMATIVO

Métricas de Evaluación	Valor Cuantificado
Ratio de Dotación Actual	1.08 m² / hab.
Espacio Público Existente (EPE)	88,427.91 m²
Espacio Público Requerido (EPR)	818,770.00 m²
Déficit Absoluto	730,342.09 m²
Porcentaje de Espacio Público No Atendido (%EPNA)	**89.2%**

E. Contraste metodológico: radios euclidianos vs. isócronas peatonales de red

El análisis comparativo entre el modelo de isócronas peatonales y el enfoque tradicional de radios euclidianos resulta fundamental para justificar la transferencia tecnológica propuesta. Si bien el modelado euclidiano ofrece ventajas operativas por su bajo costo computacional, induce a errores de diagnóstico a escala vecinal al asumir un entorno isotrópico libre de fricción, omitiendo la discontinuidad vial, las barreras topográficas y las restricciones físicas del tejido urbano. En contextos de periferias urbanas caracterizadas por tramas irregulares y fragmentadas, la distancia cartesiana pierde validez científica, provocando una sobreestimación de la población con acceso real a la infraestructura pública [7].

Frente a estas limitaciones analíticas, el modelado topográfico mediante isócronas vectoriales basadas en redes de transporte se consolida como la alternativa con mayor rigor científico para la planificación inteligente de ciudades [9]. Aunque esta metodología exige la estructuración de bases de datos espaciales significativamente más complejas y un mayor consumo de capacidades de geoprocesamiento, posee la virtud indispensable de modelar el desplazamiento real del peatón sobre la infraestructura transitable. En el caso de Alto Trujillo, la aplicación del análisis de redes viales permitió cartografiar con precisión la falta de permeabilidad en los bordes urbanos, exponiendo desiertos habitacionales críticos que un buffer tradicional de 400 u 800 metros habría invisibilizado por completo.

Para evidenciar visualmente esta disociación, la Figura 5 presenta el mapeo comparativo entre ambas metodologías bajo los mismos parámetros espaciales y umbrales temporales. Asimismo, la magnitud de este falso positivo de accesibilidad se cuantifica en la Tabla 6. El cálculo del porcentaje de sobreestimación poblacional revela la cantidad de habitantes que la planificación tradicional asume erróneamente con cobertura.

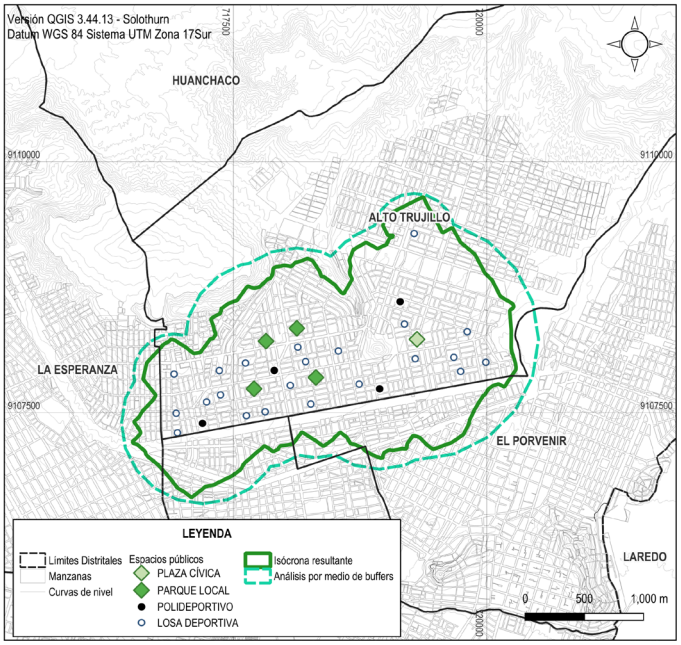


Fig. 5 Contraste espacial de accesibilidad peatonal: Isócronas de red vial vs. Buffers euclidianos tradicionales.

TABLA 6
COMPARATIVA DE COBERTURA ESPACIAL Y DEMOGRÁFICA: ISÓCRONAS DE RED VS BUFFERS EUCLIDIANOS

Métrica de Evaluación	**Método de Isócronas (Red Vial)**	**Método Tradicional (Buffer Euclidiano)**	**Porcentaje de Sobreestimación / Diferencia**
Área cubierta (%)	56.67%	63.24%	10.39%
Población alcanzada (Servida)	84.51% *(69,194 hab.)*	90.56% (*74,149 hab*)	6.68% / 4,955 hab
Población excluida (No servida)	15.49% *(12,683 hab.)*	9.44% *(7,728 hab.)*	6.05% dif.

Este contraste metodológico valida la necesidad urgente de transicionar hacia marcos de gobernanza y planificación urbana fundamentados en evidencia algorítmica y tecnológica de alta resolución espacial. En el contexto de estudio, el porcentaje de sobreestimación comprueba que miles de habitantes, que teóricamente son contabilizados con acceso a espacios públicos, en la realidad física sobrepasan los umbrales de tiempo límite caminable. Por lo tanto, el modelado basado en la red vial es indispensable para corregir esta falsa accesibilidad y visibilizar la exclusión espacial auténtica.

F. Limitaciones del estudio

Este estudio presenta limitaciones inherentes a la estimación paramétrica que deben considerarse al interpretar sus resultados. Primero, la accesibilidad peatonal estimada se basó en la topología de la red vial extraída de OpenStreetMap

y complementada con digitalización manual; aunque este procedimiento mitiga la obsolescencia cartográfica, no sustituye una validación sistemática en campo sobre el estado físico de las aceras, pendientes o cruces inseguros, por lo que persiste un margen de incertidumbre. Segundo, la proyección demográfica 2026 aplicó una tasa de crecimiento uniforme del 3.09% para todas las manzanas. Dado que la periferia experimenta una expansión desigual, la cobertura poblacional constituye una estimación condicionada por este modelo geométrico de tasa fija. Tercero, el análisis asume una velocidad peatonal constante de 4.8 km/h; sin embargo, se reconoce que las variaciones topográficas y las características de los usuarios (adultos mayores, niños o personas con movilidad reducida) requerirían modelar escenarios de sensibilidad con velocidades menores (ej. 3.5 y 4.0 km/h), lo que podría contraer el área efectiva de cobertura. Finalmente, el análisis no incorpora variables micro espaciales de calidad, seguridad percibida o mantenimiento de los espacios públicos, dimensiones que exceden el alcance de este estudio, pero resultan relevantes para evaluar el derecho a la ciudad. La incorporación de un análisis multidimensional para estas variables representa una línea de investigación futura para afinar el diagnóstico en asentamientos informales.

V. Conclusiones

La aplicación del análisis de isócronas peatonales se ratificó como una herramienta analítica de adecuada precisión frente al enfoque convencional de los radios de influencia euclidianos. Al operar como un riguroso modelo de filtrado espacial fundamentado en la literatura contemporánea de la movilidad activa, el algoritmo desarrollado superó la abstracción de las distancias lineales teóricas para visibilizar las condiciones reales de equidad urbana a través de umbrales temporales de accesibilidad de 5, 10 y 15 minutos [6], [9]. Este enfoque permitió evidenciar una marcada disociación espacial en el distrito de Alto Trujillo, caracterizada por una cobertura territorial de solo 56.67% en contraste con una cobertura demográfica del 84.51%. Este hallazgo confirma que el valor empírico del modelo de redes radica en su capacidad para intersecar la topología vial real con las densidades habitacionales efectivas, neutralizando los sesgos de homogeneidad urbana implícitos en los buffers geométricos tradicionales.

En el contexto específico de Alto Trujillo, los resultados sugieren la necesidad de transferir esta metodología hacia los instrumentos oficiales de planificación local. Al transicionar hacia este marco analítico basado en evidencia geoespacial, los Planes de Desarrollo Metropolitano (PDM) y los Planes de Desarrollo Urbano (PDU) adquieren la capacidad analítica de diferenciar dos problemáticas críticas: la accesibilidad y la capacidad espacial. El modelo evidencia que no basta con estar dentro del área de cobertura peatonal; la infraestructura resulta insuficiente ante la alta densidad, ofreciendo apenas 1.08 m² frente a los 10 m²/hab exigidos normativamente [36]. Esta doble dimensión del diagnóstico, que cuantifica un déficit estructural absoluto de 730,342.09 m² (equivalente a un 89.20% de Espacio Público No Atendido), provee a los tomadores de decisiones una base paramétrica sólida para priorizar la inversión pública y optimizar los presupuestos estatales en las zonas de mayor exclusión espacial.

Asimismo, una de las principales virtudes de esta investigación reside en su alta replicabilidad metodológica y escalabilidad computacional. Al estructurarse a partir de la integración de proyecciones demográficas [12], cartografía colaborativa global (OpenStreetMap) [34] y entornos de geoprocesamiento de código abierto (QGIS), el flujo de trabajo propuesto elimina las barreras tecnológicas y económicas asociadas a los softwares privativos, viabilizando su transferencia a escala global.

Como líneas de investigación futura, se propone: (1) incorporar análisis de autocorrelación espacial (Índice de Moran) para identificar clústeres estadísticamente significativos de déficit, orientando la priorización de inversión pública; (2) extender el modelo a un índice de accesibilidad ponderado por calidad y seguridad del espacio público, más allá de la métrica cuantitativa de m²/hab.; (3) evaluar la robustez del modelo ante escenarios de riesgo sísmico, retomando el rol potencial de los espacios públicos como zonas de refugio temporal apuntado en la Sección II.D; y (4) replicar el flujo de trabajo en distritos periféricos comparables de la costa norte peruana para evaluar la generalización del hallazgo de disociación espacial-demográfica.

Finalmente, este estudio aporta contribuciones significativas para la comprensión teórica y la gestión del territorio en las periferias del Sur Global y América Latina. La evaluación de las redes recreativas mediante umbrales peatonales escalonados ofrece un marco de justicia ambiental idóneo para diagnosticar y mitigar las asimetrías socioespaciales, validando empíricamente los alcances técnicos del Decreto Supremo N° 028-2023-VIVIENDA [32] al demostrar que, en los asentamientos autoconstruidos, las plataformas deportivas polifuncionales asumen fácticamente la función de centralidad y soporte social que el diseño institucional restringe a los parques consolidados [33], [35]. La incorporación de estas dinámicas locales bajo un modelo paramétrico SIG constituye un paso fundamental para superar el desfase de los registros oficiales y avanzar hacia el paradigma de ciudades inteligentes, inclusivas y sostenibles en la región.

Referencias

[1] ONU-Hábitat, Estado de las Ciudades de América Latina y el Caribe: Rumbo a una nueva transición urbana, 2012.

[2] CEPAL, Transformación del hábitat y las ciudades: hacia un desarrollo urbano sostenible en América Latina y el Caribe, 2023.

[3] ONU-Hábitat, Guía para la Prevención en Barrios: Seguridad Urbana y Espacios Públicos, 2008.
[4] A. C. Domingo (Universidad de la República), El espacio público en las periferias críticas como lugar de integración social, 2024.
[5] Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento (MVCS), Manual para la Elaboración de Planes de Desarrollo Metropolitano y Planes de Desarrollo Urbano, Lima, Perú, 2020.
[6] P. Calthorpe, The Next American Metropolis: Ecology, Community, and the American Dream. New York: Princeton Architectural Press, 1993.
[7] P. Apparicio et al., "Comparing alternative approaches to measuring the geographical accessibility of urban health services: Distance types and aggregation-error issues", 2008.
[8] F. R. Rojas et al., "A comparative analysis of Manhattan, Euclidean and Network distances. Why are network distances more useful to urban professionals?", 2018.
[9] D. O'Sullivan, A. Morrison y J. Shearer, "Using desktop GIS for the investigation of accessibility: an isochrone approach", International Journal of Geographical Information Science, 2000.
[10] C. Raffler, "QNEAT3: QGIS Network Analysis and Accessibility Tools", 2018.
[11] V. Karamitov y D. Petrova-Antonova, "Pedestrian Accessibility Assessment Using Spatial and Network Analysis", The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2022.
[12] PLANDET (Plan de Desarrollo Territorial de Trujillo), Plan de Desarrollo Metropolitano de Trujillo. Municipalidad Provincial de Trujillo, 2020.
[13] I. de Solà-Morales, "Terrain Vague", en Anyplace, C. Davidson, Ed. Cambridge, MA: MIT Press, 1995, pp. 118-123.
[14] J. Lerner, Acupuntura urbana. Barcelona, España: IAAC, 2005.
[15] F. Carrión y J. Erazo, El derecho a la ciudad en América Latina: visiones desde la política. México: UNAM, 2016.
[16] S. Xu, Z. Zhou, J. Ni, J. Li, and L. Zhang, "Study on the Impact of Neighbourhood Spatial Networks on Residents' Non-Commuting Travel Modes under Carbon Constraint Targets: A Case Study of Residential Historic Neighbourhoods," in *Conference Proceedings of the 13th International Symposium on Project Management, ISPM 2025*, vol. 2, 2025, pp. 805–818. doi: 10.52202/081497-0101.
[17] J. Rubaszek, J. Gubański, and A. Podolska, "Do We Need Public Green Spaces Accessibility Standards for the Sustainable Development of Urban Settlements? The Evidence from Wrocław, Poland," *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 20, no. 4, p. 3067, 2023. doi: 10.3390/ijerph20043067.
[18] J. Cáceres-Merino, A. N. Masot, and J. A. Gutiérrez Gallego, "Chrono-urbanism and mid-sized cities: GIS analysis of pedestrian trips in Cáceres, Spain," *Boletin de la Asociacion de Geografos Espanoles*, no. 102, 2024. doi: 10.21138/bage.3559.
[19] Q. Cui, L. Tan, H. Ma, X. Wei, S. Yi, D. Zhao, H. Lu, and P. Lin, "Effective or useless? Assessing the impact of park entrance addition policy on green space services from the 15-min city perspective," *Journal of Cleaner Production*, vol. 467, p. 142951, 2024. doi: 10.1016/j.jclepro.2024.142951.
[20] Á. Clua Uceda and F. Valls Dalmau, "Proximity walks: Multimetric evaluation of the walkability network efficiency in Barcelona," *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, 2025. doi: 10.1177/23998083251368680.
[21] S. Yu, X. Zhu, and Q. He, "An assessment of urban park access using house-level data in urban China: Through the lens of social equity," *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 17, no. 7, p. 2349, 2020. doi: 10.3390/ijerph17072349.
[22] W. Wang and L. Dong, "Research on accessibility analysis of park green space based on big data: Taking Xiongan New Area in China as an example," in *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, vol. 12506, p. 125064T, 2022. doi: 10.1117/12.2662571.
[23] N. Moos, C. Juergens, and A. P. Redecker, "Combined Small-and Large-Scale Geo-Spatial Analysis of the Ruhr Area for an Environmental Justice Assessment," *Sustainability*, vol. 14, no. 6, p. 3447, 2022. doi: 10.3390/su14063447.
[24] Z. Yiqiu, D. Xinlei, W. Yajuan, W. Wenguo, and W. Mingjing, "GIS-based accessibility analysis of urban park green space landscape," *Scientific Reports*, vol. 15, no. 1, p. 28498, 2025. doi: 10.1038/s41598-025-13750-5.
[25] M. Mikaili and O. Aksoy, "Assessing accessibility to gathering areas in the event of an earthquake: Bursa Doğanbey National Garden, Türkiye case," *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, vol. 40, no. 4, pp. 2773–2783, 2025. doi: 10.17341/gazimmfd.1701508.
[26] Y. Cui, W. Tan, L. Cheng, T. Chen, L. Lv, and H. Pan, "Analysis of Walking Accessibility of Park Green Space in Weidu District of Xuchang City Based on GIS," *E3S Web of Conferences*, vol. 165, p. 04017, 2020. doi: 10.1051/e3sconf/202016504017.
[27] J. Yang, "Research on optimization strategies for urban park green space planning in Nanjing based on GIS from the perspectives of network analysis and Thiessen polygon theory," *International Journal of Modern Physics C*, vol. 36, no. 8, p. 2441002, 2025. doi: 10.1142/S012918312441002X.
[28] A. Yunitsyna and S. Sadushi, "Assessing availability, distribution equity and accessibility of urban green spaces: a GIS-based framework," *Open House International*, 2025. doi: 10.1108/OHI-01-2025-0031.
[29] E. B. Miller, A. P. Seyfried, S. E. Pender, K. Heard, and G. A. Meindl, "Racial Disparities in Access to Public Green Spaces: Using Geographic Information Systems to Identify Underserved Populations in a Small American City," *Environmental Justice*, vol. 15, no. 4, pp. 246–256, 2022. doi: 10.1089/env.2021.0067.
[30] L. Daradkeh, S. AlGharaibih, R. Shawaqfeh, and A. Gharaibeh, "Green Spaces and Environmental Justice: Measuring the Accessibility and Fair Distribution of Public Green Spaces in the Town of Al-Mughayyer," in *Advances in Science, Technology and Innovation*, 2021, pp. 293–306. doi: 10.1007/978-3-030-65181-7_24.
[31] A. M. Salehabadi, S. H. Ghoddusifar, and A. Mohammadpor, "Creation of an urban park New ASD index with a spatial distribution coefficient (Case study: region 1 of Tehran)," *Informes de la Construccion*, vol. 75, no. 571, p. e512, 2023. doi: 10.3989/IC.92808.
[32] Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. (2023, 14 de diciembre). Decreto Supremo N° 028-2023-VIVIENDA. Reglamento de la Ley N° 31199, Ley de Gestión y Protección de los Espacios Públicos. Diario Oficial El Peruano.
[33] Vega Centeno, P. (2017). El espacio público: la movilidad y la revalorización de la ciudad. Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP).
[34] Chirinos Colunga, M. (2025). Cuantificación del Espacio Público al Aire Libre de los Municipios Metropolitanos en la República Mexicana Utilizando OpenStreetMaps. State of the Map Latam - Track Académico, Medellín.
[35] Velarde, F. (2025). Espacio público y desigualdad urbana. Análisis espacial del acceso al espacio público en la Provincia Constitucional del Callao. *Revista EURE - Revista De Estudios Urbano Regionales*, *51*(153), 1–25.
[36] Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, "Resolución Ministerial N° 338-2020-VIVIENDA", Diario Oficial El Peruano, Lima, Perú, 2020.