



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

Accesibilidad a las áreas verdes urbanas de la Ciudad de México

TESIS

Que para obtener el título de
Ingeniera Geomática

P R E S E N T A

Ana María Durán Pérez

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Juan Manuel Núñez Hernández



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2022



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

AGRADECIMIENTOS

Gracias a la Universidad Nacional Autónoma de México por permitirme ser parte de esta grandiosa comunidad estudiantil.

Le agradezco la atención, paciencia y enseñanza de mi director de tesis, el Dr. Juan Manuel Núñez Hernández. Gracias por su confianza y amabilidad.

A todos mis sinodales, quienes me ofrecieron grandes enseñanzas durante mi trayectoria académica; les doy el agradecimiento por su atención y tiempo prestado para desarrollar este trabajo.

A todas las personas que se han cruzado en mi camino, gracias por los buenos (y también malos) momentos vividos.

A mis familiares, mis tíos y tía, quienes han sido el núcleo de mi vida. Gracias.

Finalmente, mi persona favorita: mi Madre. Gracias a Ti, que he llegado a concluir mis estudios, por tu apoyo incondicional, amor y enseñanza, que fueron, son y serán mi fortaleza para continuar mi camino por la vida.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	I
OBJETIVOS.....	III
CAPÍTULO I. ANÁLISIS ESPACIAL APLICADO A LAS REDES.....	1
1.1. Análisis espacial.....	1
1.1.1. Las teorías del análisis espacial	1
1.1.2. El análisis geográfico como análisis espacial	1
1.1.3. Los Sistemas de Información Geográfica para el análisis espacial	3
1.1.4. Definición de análisis espacial	5
1.1.5. Herramientas técnicas en el análisis espacial	8
1.1.6. El análisis espacial para la medición de la accesibilidad en redes urbanas.....	12
1.2. Teoría de redes.....	14
1.2.1. Definición de red.....	14
1.2.2. Teoría de grafos.....	16
1.2.3. Propiedades de los grafos	18
1.2.4. Red urbana	21
1.2.5. Componentes de la red urbana	21
1.2.6. Centralidad	22
1.2.7. Medidas de centralidad.....	24
1.2.8. Accesibilidad.....	27
1.2.9. Indicadores de accesibilidad.....	30
CAPÍTULO II. ANÁLISIS DE REDES APLICADO A LAS ÁREAS VERDES URBANAS	35
2.1. Las áreas verdes urbanas como espacio público	35
2.2. Definición de áreas verdes urbanas.....	38
2.3. Funciones de las áreas verdes	40
2.4. Las áreas verdes urbanas en la Ciudad de México	43
2.5. Tipología de las áreas verdes	48
2.6. Accesibilidad a las áreas verdes.....	52

2.7. Urban Network Analysis (UNA): una herramienta para medir el análisis de redes urbanas	57
2.7.1. Interfaz de la herramienta UNA.....	59
2.8. Índices de la herramienta Urban Network Analysis (UNA)	61
2.8.1. Alcance (Reach)	61
2.8.2. Índice de Gravedad (Gravity Index)	62
2.8.3. Intercesión (Betweenness)	63
2.8.4. Cercanía (Closeness)	64
2.8.5. Rectitud (Straightness)	65
CAPÍTULO III. CASO DE ESTUDIO I: TRANSPORTE PÚBLICO Y ESPACIOS ABIERTOS.....	67
3.1. Planteamiento del problema	67
3.2. Adquisición de datos	67
3.3. Delimitación del área de estudio	68
3.4. Creación de un Network Dataset para la red de transporte público	70
3.5. Aplicación de la herramienta Urban Network Analysis Toolbox	71
CAPÍTULO IV. CASO DE ESTUDIO II: VIALIDAD PEATONAL Y ESPACIOS ABIERTOS.....	73
4.1. Planteamiento del problema	73
4.2. Adquisición de datos	73
4.3. Delimitación del área de estudio	74
4.4. Creación de un Network Dataset para la vialidad peatonal.....	75
4.5. Aplicación de la herramienta Urban Network Analysis Toolbox	76
CAPÍTULO V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	78
5.1. Resultados del caso de estudio I	78
5.2. Resultados del caso de estudio II	84
5.3. Discusión	85
CAPÍTULO VI. CONCLUSIONES.....	89
REFERENCIAS.....	91

INTRODUCCIÓN

En el presente trabajo se analiza la accesibilidad a los espacios abiertos, definidos a partir de las áreas verdes urbanas, en la Ciudad de México; mediante las redes de transporte público y peatonal.

El desarrollo de este trabajo toma sus fundamentos en la importancia de que los espacios públicos representan para los habitantes de las ciudades, no solamente por la parte estética, sino también por la importancia de los beneficios ambientales, recreativos o deportivos que ofrecen. La facilidad con la que los usuarios puedan llegar a ellos, es la base para que las personas puedan acceder a estos destinos, en cualquier medio de transporte.

El concepto de áreas verdes se define como aquellos espacios donde la vegetación se hace presente y las personas tienen acceso a ellos. Para fines del presente estudio, las áreas verdes se clasifican por tamaño en tres categorías: pequeñas, medianas y grandes.

Para el primer caso de estudio, se analizan cinco índices de centralidad para medir la accesibilidad a las áreas verdes grandes y medianas, mediante la red de transporte público de la Ciudad de México. Para realizar el análisis, se considera como impedancia o costo, el tiempo recorrido dentro de la malla del transporte; tomando en cuenta la velocidad promedio en que se desplazan las rutas.

Para el segundo caso de estudio, se consideran solamente cuatro alcaldías, que pertenecen a la llamada Ciudad Central (Suárez-Lastra y Delgado-Campos, 2010) para determinar el grado de alcance que la población de dicho contorno tiene a las áreas verdes pequeñas; considerando el tiempo que, de acuerdo con la velocidad promedio de caminata en México, realizan un viaje de un punto a otro.

Para realizar el análisis de las medidas de centralidad, se recurre a los Sistemas de Información Geográfica con el propósito de procesar datos geoespaciales. La

herramienta Urban Network Analysis (UNA), desarrollada en el 2012 por el del Instituto Tecnológico de Massachusetts en el City Form Lab, es un plugin de libre acceso y de código abierto para ArcGIS. Esta herramienta se compone de tres características: arcos, nodos y, el elemento principal que lo diferencia de otras herramientas para el análisis de redes, el edificio. En este apartado se le puede asignar una ponderación cualquiera como superficie, volumen, número de habitantes/empleados, etc.; que para este estudio la superficie de las áreas verdes toma relevancia. Además, toma como característica adicional la impedancia, que puede ser el tiempo o la distancia.

Por último, esta herramienta dispone de cinco indicadores de centralidad: alcance, gravedad, intercesión, cercanía y rectitud; que son el núcleo de este trabajo. Cada uno de ellos mide la centralidad del elemento estudiado mediante métodos matemáticos, dado que parte desde el centro del objeto a su calle adyacente dentro de la distancia mínima recorrida.

OBJETIVOS

Objetivo general

Analizar la accesibilidad que tiene la población de la Ciudad de México a los espacios abiertos (áreas verdes urbanas), mediante el análisis espacial en un entorno SIG, por medio de la herramienta Urban Network Analysis Toolbox, mediante las redes de transporte público y peatonal, tomando como impedancia el tiempo.

Objetivos particulares

- ❖ Analizar la accesibilidad a las áreas verdes grandes y medianas mediante la red de transporte público dentro de la Ciudad de México, e implementar los cinco índices disponibles en la herramienta UNA.
- ❖ Analizar la accesibilidad a las áreas verdes pequeñas mediante la red peatonal, para la Ciudad Central, la cual forma parte de uno de los cuatro contornos urbanos de la Zona Metropolitana del Valle de México.

CAPÍTULO I. ANÁLISIS ESPACIAL APLICADO A LAS REDES

1.1. Análisis espacial

1.1.1. Las teorías del análisis espacial

El análisis espacial se remonta hacia el año 1854 en Londres, debido a una epidemia de cólera. Tal enfermedad, fue representada cartográficamente conocida como el *Mapa de John Snow*, en donde el doctor realizó un estudio aplicando técnicas de clúster se detectaron los focos de propagación de acuerdo a su localización geográfica; realizando así las bases del análisis espacial: la autocorrelación.

Dentro de los inicios del análisis espacial, fue el desarrollo de la autocorrelación espacial de retículas regulares. Ésta, se presenta cuando una variable tiende a tener otros valores similares a ella dentro de un entorno geográfico próximo. Entonces, la correlación espacial es un tipo de clúster, y que se establece por la Ley de Tobler (1970): “Todas las cosas se parecen a otros objetos, pero se parecen más a los objetos más cercano”.

El análisis espacial propone una descripción sobre los elementos geográficos sencillos, hasta la descripción estadística; que a través de herramientas informáticas se pueden desarrollar procesos complejos, que permiten procesar, integrar, almacenar y analizar información geográfica. A su vez, el análisis espacial se puede enfocar en dos ramas; temáticamente, el cual se constituye por una serie de técnicas matemáticas y estadísticas; y desde los SIG, donde se considera su núcleo de concentración para realizar operaciones a las entidades espaciales a partir de la base de datos geográficos.

1.1.2. El análisis geográfico como análisis espacial

Si bien la autocorrelación espacial es la parte fundamental para realizar técnicas de análisis espacial -como el *clustering*-, el geógrafo francés Emmanuel de Martone, estableció los *Principios Geográficos*, los cuales darían las primeras

técnicas del análisis y que se conforman por la localización, extensión, complejidad, dinamismo, conexión y globalidad territorial. Posteriormente, Vilá (1983) citado en Buzai (2009) realizaría una investigación más completa, la cual surgirían los cinco conceptos básicos para realizar análisis espacial con SIG: localización, distribución espacial, asociación espacial, interacción espacial y evolución espacial.

❖ Localización espacial

Todas las entidades, con sus correspondientes atributos, tienen una ubicación específica en el espacio geográfico. Existen dos tipos de ubicación: espacio absoluto y espacio relativo.

- a) El espacio absoluto se refiere a un sitio específico y fijo de emplazamiento sustentado por la topografía local.
- b) El espacio relativo indica una posición específica y variante con respecto a las diferentes entidades geográficas (transporte, comunicaciones).

Cabe destacar que la palabra *sitio* referido anteriormente, está determinado bajo un sistema de coordenadas geográficas, por lo tanto; se rige por una latitud y una longitud. Con respecto a la posición se puede medir por diferentes variables que son cambiantes con respecto al tiempo, costo y energía.

❖ Distribución espacial

El conjunto de entidades de un mismo tipo se reparte de una determinada manera sobre el espacio geográfico. Estas entidades, pueden ser en dos formatos; vectorial, el cual se representa por puntos, líneas o polígonos con diferentes atributos; y ráster, como localizaciones dispersas que representan puntos y zonas con clases similares. Además, es posible realizar transformaciones entre los dos formatos – de ráster a vectorial y viceversa-.

- ❖ Asociación espacial

Estudia las semejanzas entre distintas distribuciones espaciales. En este principio se realiza el análisis visual, la cual marca una superposición cartográfica entre dos o más capas de información, que son analizadas por el usuario y permite poner límites dentro del espacio geográfico.

- ❖ Interacción espacial

Considera la estructuración de un espacio relacional en el cual las localizaciones (sitios), distancias (ideales o reales) y vínculos (flujos) resultan fundamentales en el espacio geográfico.

- ❖ Evolución espacial

Considera la incorporación de la dimensión temporal a través de la permanente transición espacial de un estado a otro. En este principio se establecen tres preguntas: dónde, cuándo y cómo; que responden como la visión basada en la localización, en el tiempo y el camino evolutivo espacio-temporal, respectivamente.

1.1.3. Los Sistemas de Información Geográfica para el análisis espacial

A lo largo de la historia, los SIG han tomado importancia en diversas disciplinas que convergen en el área geográfica, planteando toma de decisiones que son reflejadas por consecuencias del mundo real, debido a que intentar capturar en su modelo de datos la realidad y no como una imagen determinada de esta.

Los Sistemas de Información Geográfica (Geographic Information Systems), por sus siglas en inglés, son herramientas de análisis espacial para resolver problemas por medio de modelos que permiten encontrar patrones y entender cuáles son los eventos que dan origen a los fenómenos que se estudian.

En la literatura, se citan algunas de las definiciones más aceptadas, sin embargo, no existe aún una definición global. Un SIG puede definirse como una herramienta de software para la gestión de datos espaciales dentro de un espacio geográfico que mediante procesos (como la adquisición, almacenamiento, interpretación y análisis de los datos geográficos) y métodos (algoritmos) aplicados a las variables se puede obtener información geográfica sobre esos datos, previamente georreferenciados¹, con la finalidad de generar resultados (tales como mapas, informes, gráficos).

Entendiendo como datos espaciales como al conjunto de valores conformado por un sistema de coordenadas, una localización geográfica de los datos en estudio y sus atributos (características descriptivas). Estos datos se dividen en dos tipos:

- a) Vectorial: las características que conforman este tipo de datos son por entidades geométricas, que son representadas por: puntos, que contienen coordenadas (x,y) o (x,y,z); líneas, que están interconectados que mediante segmentos se conectan en vértices, que éstos contienen coordenadas (x,y); y polígonos, son un conjunto de líneas cerradas; codificadas explícitamente que modelan el espacio geográfico.
- b) Ráster: se define por poseer un conjunto de unidades mínimas en forma de celdas, que constituyen una matriz de renglones y columnas, y cada elemento adopta un valor único por cada atributo, llamándolo como pixel. Estos valores pueden ser cualitativos (como el tipo de uso de suelo) y cuantitativa (como la elevación del terreno).

La ventaja que ofrecen los SIG es la facilidad del procesamiento de información espacial mediante la tipología que ofrecen por medio de las funciones

¹ El término georreferenciación es la posición en el espacio de la información adquirida, dentro de un sistema de coordenadas; el cual se deriva de una proyección cartográfica.

de análisis, representaciones gráficas y técnicas cuantitativas; con el fin de su representación temática, donde más adelante se retomará el tema para el entendimiento que hacen los SIG en el análisis espacial.

Si bien las técnicas de análisis espacial permiten la representación espacial y contenido de información de los datos geográficos, es necesario establecer algún método o técnica adecuada al objeto de estudio, que, además, se puede agregar información adicional a la requerida con el fin de contribuir al valor y descripción cualitativa, para la generación de mapeo.

1.1.4. Definición de análisis espacial

El análisis espacial de forma general y simple, de acuerdo a Baley y Gatrell (1995), se define como el estudio cuantitativo de fenómenos localizados en el espacio. Y aunque este concepto tiene diferentes significados, comparte características comunes:

- a) Se necesita definir un método adecuado para la descripción del comportamiento del objeto de estudio.
- b) Posibilitan la representatividad de la información espacial.
- c) Manipulan datos espaciales mediante transformaciones, métodos y técnicas.

Entre las definiciones más destacables, se encuentra la de Bosque (1992) define el análisis espacial como el conjunto de procedimientos de estudio de los datos geográficos, en los que se considera sus características espaciales. Berry (1996) citado en Buzai y Baxendale (2015) establece que el análisis espacial está en función de la localización espacial de las entidades, considerando únicamente su aspecto geométrico. En Buzai y Baxendale (2006), el análisis espacial está conformado por técnicas estadísticas y matemáticas aplicadas a los datos espaciales que los usuarios establecen de acuerdo al dato geográfico para analizar.

Para Goodchild y Janelle (2004), compartiendo la definición de Berry (1996), aclaran que el desarrollo de análisis mediante técnicas dependerá de la ubicación geográfica de los objetos analizados, es decir, si los lugares cambian, los resultados cambian (Figura 1). El análisis espacial se define como un conjunto de técnicas y modelos que utilizan la referencia espacial de los datos, y que, además, requiere de realizar conclusiones sobre los datos que describen las relaciones espaciales. (Goodchild y Haining, 2005).

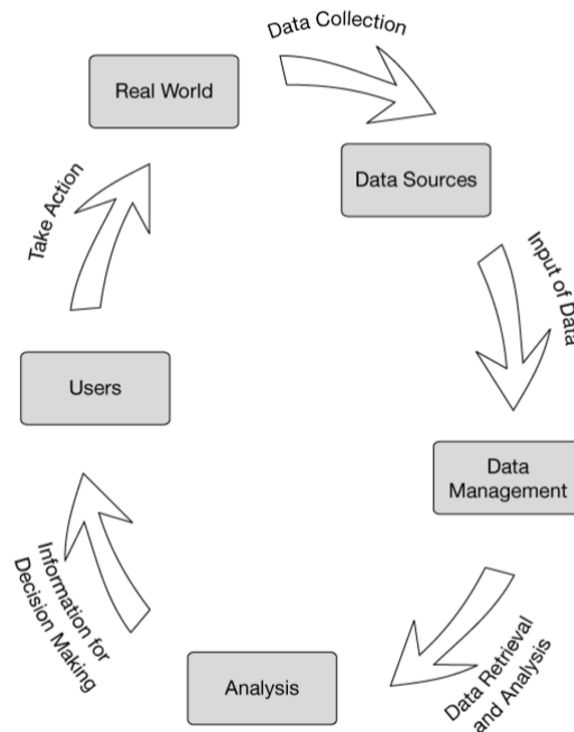


Figura 1. Esquema que representa la manipulación de los datos por medio del análisis espacial.
 Fuente: Introduction to spatial analysis. Geographic Information Technology Training Alliance (GITTA). http://www.gitta.info/AnalyConcept/en/html/Overview_learningObject1.html

De acuerdo a Buzai (2009), el análisis espacial al ser considerado como un método de técnicas matemáticas y estadísticas aplicadas a datos distribuidos dentro del espacio geográfico, se cumplen dos objetivos; identificación de los componentes del espacio, y el uso de un conjunto de procesos que permitan entender la funcionalidad de los componentes espaciales. A su vez, Haining (2002) citado en Fotheringham y Rogerson (2014) dice que, dentro de las posibles técnicas usadas en el análisis espacial, se puede dividir en tres tipos de análisis:

análisis estadístico de datos geográficos, basados en mapas y modelación matemática.

Como se ha mencionado, el análisis espacial puede ser visto desde el punto conceptual y aplicado a un SIG. La finalidad de este tipo de análisis hace caso a la descripción cuantitativa del espacio geográfico mediante la distribución, organización y estructuración de las variables de interés, ya sean físicas, económicas, sociales. Cabe destacar que el análisis espacial es un medio para obtener información de eventos, datos o patrones geográficos, y que esta información está en constante variación; pues cuando el objeto de estudio cambia de ubicación es necesario que los métodos aplicados también cambien.

Prácticamente, el análisis espacial responde a preguntas de carácter espacial como: ubicación y patrones, condición, tendencias y modelación de los objetos en el espacio geográfico para la toma de decisiones donde los usuarios se encargan de determinar de elegir el método más conveniente y que se apega a la realidad.

El análisis espacial tiene principalmente dos funciones:

❖ Consultas espaciales:

Conocidas como *queries*, son el resultado de la selección de objetos o variables dentro de una base de datos. Estas consultas pueden ser por atributos o espacialmente.

❖ Derivación de información geográfica a partir de los datos existentes:

Una función muy frecuente, y que básicamente es la mayormente utilizada, la salida de nueva información son el resultado de la manipulación de datos georreferenciados recolectados a través de imágenes satelitales o datos vectoriales. A su vez, de manera general, se puede visualizar en tres clasificaciones.

- a) Reclasificación: esta función está basada en un dato ráster, la cual cambia los valores de las celdas a valores definidos por el usuario mediante métodos como intervalos especificados o por área.
- b) Distancia y proximidad: la distancia entre un punto y otro es común en al análisis espacial. Para formatos vectoriales y ráster, la distancia Euclidiana es un cálculo que a menudo se utiliza a partir de las coordenadas geográficas de cada objeto o píxeles.
- c) Sobreposición: también conocido como *overlay*, esta función combina varias capas con características espaciales y temáticas de diferentes capas de información vectorial y ráster.

Para finalizar, el análisis espacial es el medio para modelar la realidad, los usuarios realizan métodos y técnicas para analizar el espacio geográfico, que recurre a la interpretación final de la información geográfica nueva obtenida de los datos recolectados, ya sea en formato vectorial o ráster; y que se emplea a la realidad.

1.1.5. Herramientas técnicas en el análisis espacial

Al definir el concepto de análisis espacial se ha observado que este análisis no es posible realizarlo sin algún tipo de medio o herramienta que permita entender el comportamiento de las entidades espaciales. Por tanto, se define como herramienta técnica al instrumento de tipo gráfico, cualitativo o mixto; aplicado a una serie de procedimientos donde involucre una o varias variables (entidades espaciales) que requiera explicar o entender su funcionalidad.

Para Madrid y Ortiz (2005) señalan que el análisis espacial estudia los componentes del espacio geográfico definido por los datos que lo constituyen y la forma en la que se comportan. En consecuencia, el análisis espacial constituye una serie de técnicas matemáticas y estadísticas aplicadas a los datos distribuidos

sobre el espacio geográfico (Figura 2). El espacio geográfico se constituye por las transformaciones –como la infraestructura urbana y la población– que la actividad humana ha adaptado dentro de un espacio natural a lo largo de su evolución (Racine y Bailly, 1993).

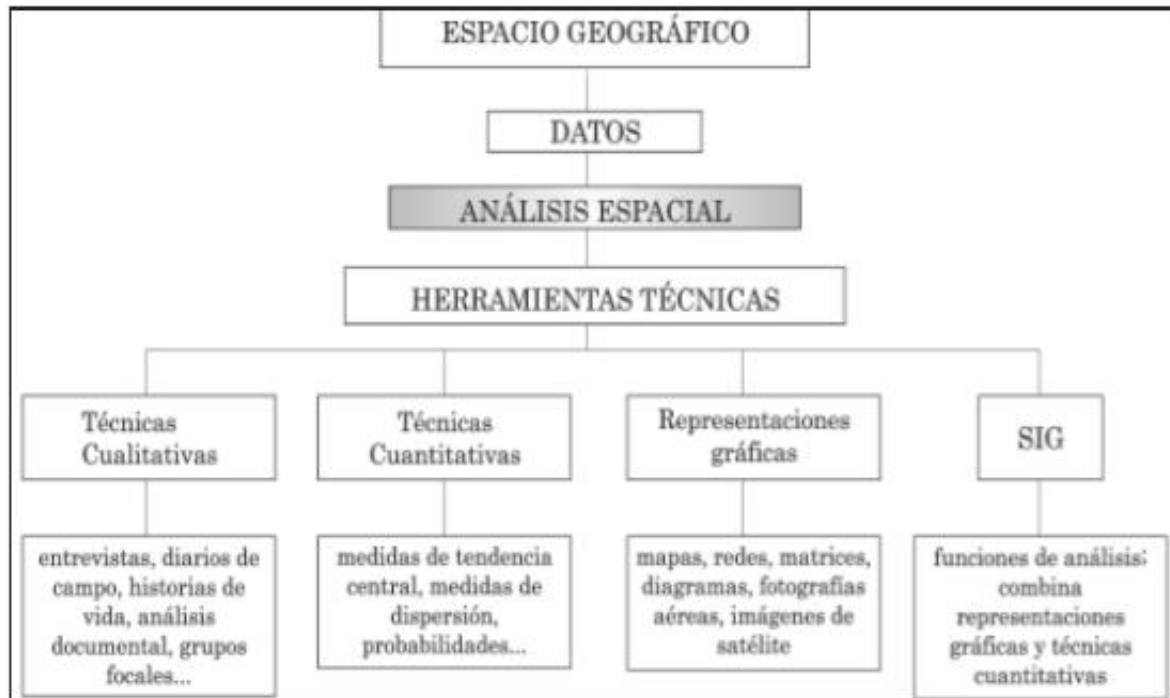


Figura 2. Herramientas técnicas para el análisis espacial. Fuente: Análisis y síntesis en cartografía: algunos procedimientos. Madrid y Ortiz (2005).

Las herramientas técnicas que se emplean en el análisis espacial, se pueden dividir en tres secciones: cuantitativas, cualitativas, representaciones gráficas y SIG (Madrid y Ortiz, 2005), las cuales tienen un potencial de representar la información geográfica.

❖ **Técnicas cualitativas**

Los estudios cualitativos se realizan en una escala pequeña y se nutren por la experiencia de las personas y sus comunidades en diferentes tiempos y espacios (como por ejemplo las entrevistas, diarios de campo, observación, por decir algunos) que, como resultado, es la percepción del investigador.

❖ Técnicas cuantitativas

También llamadas técnicas estadísticas, posibilita una mejor abstracción de los datos espaciales, logrando un entendimiento a los patrones de comportamiento de las entidades espaciales, a partir de una base de datos, principalmente. Este tipo de técnicas trabajan a través de cuatro funciones básicas, según Ebdon (1982) citado en Madrid y Ortiz (2005): la descripción, agrupa información espacial para su posterior tratamiento; la inferencia, plantea una hipótesis particular; la significación, establece la existencia de una relación entre dos conjuntos; y la predicción, como resultados de la probabilidad de la combinación de conjuntos.

❖ Representaciones graficas

Se definen como esquemas abstractos de la realidad, divididas en dos tipos: cartográficas, que incluyen mapas, imágenes aéreas y satelitales; y no cartográficas, como diagramas, redes y matrices; ambas, facilitan el análisis espacial debido a que pueden ser comparadas varias variables de manera agrupada.

No obstante, O'Sullivan y Unwin (2003) mencionan que, dentro de la extensa literatura de las técnicas de análisis espacial, existen cuatro áreas que desarrollan métodos para la comprensión del comportamiento de los objetos dentro del espacio geográfico y que determinan la relación entre ellos.

a) Análisis de datos espaciales

Este análisis es de índole descriptivo, debido a que los datos analizados se encuentran dentro de una referencia espacial a la que es necesario realizar una interpretación explícita de los resultados obtenidos.

b) Análisis estadístico espacial

Contiene métodos estadísticos que determinan la ocurrencia de los datos espaciales aleatoriamente mediante la relación de un modelo estadístico. Dicho de otra forma, este análisis es la base de la geoestadística; que mide

la relación entre los datos georreferenciados con las características de los sitios asociados.

c) Modelado espacial

Como lo indica el término, es la construcción de modelos, principalmente matemáticos, para la predicción de resultados espaciales que dependen de la interacción o de la relación espacial de los objetos con el modelo.

d) Manipulación de datos espaciales

Esta área se identifica, y es de interés para este análisis, dentro de los Sistemas de Información Geográfica; encargados de la captura, manipulación, administración y almacenamiento de los datos espaciales, los cuales son manejados por los usuarios.

Sin embargo, para Flitter, Weibel y Rogers en Geographic Information Technology Training Alliance (GITTA), presentan tres ramos principales del análisis espacial denominado análisis geométrico, análisis geoestadístico y visualización espacial, que se basan en las preguntas que el usuario se plantea al momento de realizar dicho análisis; y que de esta manera forman un conjunto de modelos para la representación de la realidad (Figura 3).

a) Análisis geoestadístico

Este análisis se refiere a la distribución espacial y temporal aleatoria de las variables para su análisis y predicción. Por ejemplo: análisis multivariante, autocorrelación espacial e interpretación geoestadístico.

b) Análisis geométrico

Basado en la geometría de los objetos de estudio, por medio de su locación y atributos. Aquí es donde se obtiene información nueva sin importar si proviene de un dato vectorial o ráster. Entre los ejemplos más frecuentes

son: elevación de modelos digitales, ráster de pendientes, distribución de puntos, análisis de redes, etc.

c) Visualización espacial

Mejor conocido como interpretación. En esta parte de cuestionamiento, los usuarios analizan visualmente la nueva información, por lo tanto; la interpretación es meramente cualitativa y explorativa en la cual se realizan hipótesis acerca del comportamiento de las variables.

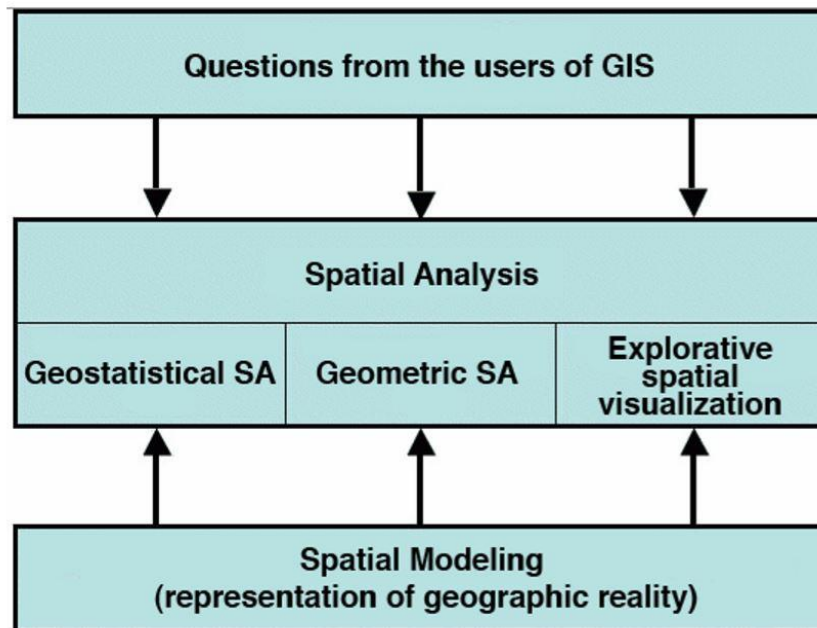


Figura 3. Esquema de las funciones del análisis espacial. Fuente: Introduction to spatial analysis. Geographic Information Technology Training Alliance (GITTA). http://www.gitta.info/AnalyConcept/en/html/Overview_learningObject2.html

1.1.6. El análisis espacial para la medición de la accesibilidad en redes urbanas

En el análisis espacial, de acuerdo con Seguí (1995), “los nodos o vértices de la red pueden venir constituidos por los puntos de origen y destino de los intercambios (ciudades, puertos, aeropuertos o centros de zona)- denominados centroides, si trabajamos a una escala urbana, a los que se les atribuyen las características del área que representan”. Los arcos o aristas se identifican con las rutas, tanto si tienen estructura física de soporte (rutas terrestres) como si no

cuentan con ella (rutas marítimas, aéreas o referidas a teleflujos), o con los flujos (pasajeros, mercancías).

La mayoría de las teorías que explican la localización geográfica y la distribución de actividades humanas, incluyen la distancia; y con ellos la variación de los lugares en función de su jerarquía. Algunas de las jerarquías más citadas para entender este análisis son la teoría centro-periferia, la teoría de los lugares centrales y la teoría de la difusión espacial de las innovaciones.

Los Sistemas de Información Geográfica han representado y hasta el día de hoy, una base sólida para el análisis espacial de datos. El análisis espacial, implementado en un SIG, se orienta hacia la creación de modelos de interpretación de datos. Como menciona Haining (2002), se pueden realizar esta interpretación bajo tres tipos de análisis: análisis estadísticos de datos geográficos, análisis basados en los mapas y modelación matemática.

El análisis de redes puede ser útil para diversos fenómenos urbanos de interés, tales como realización de rutas óptimas, geolocalizar instalaciones, comprobar la accesibilidad a un emplazamiento determinado, etc.

La accesibilidad en el entorno del análisis espacial, resulta interesante al aplicar distintas metodologías para comprender la interacción espacial entre los flujos que circulan en la red junto con sus respectivas identidades, distribuidas en el espacio geográfico.

Existen numerosos estudios que utilizan el análisis espacial para medir la accesibilidad dentro de una red urbana y que son estimados con base al tiempo de traslado (en el camino más corto), en el transporte motorizado o no motorizado, el costo del viaje, principalmente. Agregado a esto, la distancia es una variable que denota en cada estudio. La distancia euclidiana es una de las medidas más usadas para esta unidad, además de ella, dentro de la Teoría de Grafos existe la

distancia geométrica, el cual mide el número de bordes que un usuario debe viajar para ir de un nodo a otro dentro del camino más corto; y la distancia diamétrica, el cual mide la distancia más larga entre dos nodos (Ganster y Newman, 2004).

Cabe mencionar que estas medidas, estructuradas topológicamente por la Teoría de Grafos, básicamente se rigen por la geometría de sus componentes. Considerando que la red es, en general, plana y que los bordes se traslapan entre sí; automáticamente se habla de un objeto bidimensional que permite distinguir un camino corto de uno largo.

1.2. Teoría de redes

1.2.1. Definición de red

El término red comprende diversas definiciones, de acuerdo al campo de estudio en el que se esté trabajando; sin embargo, en primera instancia, se puede comprender que una red es necesariamente una unión de puntos que finalmente conforman una malla, en donde la forma que está adquiriendo no necesariamente representa una figura geométrica y que, dentro de esta interconexión, comparten alguna característica, dependiendo su uso. Las redes, tienen una diversidad amplia que involucra campos como la informática, computación, ecología, transportes, etc. En este trabajo, se definirá el concepto de red orientado hacia las características urbanas que poseen las ciudades.

Las redes son definidas como sistemas² interconectados de elementos lineales, que forman una estructura espacial por la que fluyen diferentes recursos, tales como personas, transporte, mercancías, etc. Hagget y Chorley (1969) citado en Delgado (2003), pioneros en análisis de redes, definieron el término de red como al conjunto de localizaciones geográficas que están conectadas entre sí, en donde existen distintos sistemas funcionales de flujos que circulan dentro de ella.

² Casti (1995) citado en Boix (2002) señala que un sistema es el conjunto de nodos dentro de una red que están conectados por vínculos(links).

Una red está constituida por elementos lineales (bordes, también llamados arcos) permanentes o temporarios, los cuales son representados por las vías de circulación y de elementos nodales (puntos) en donde representan los puntos de intersección (Bosque, 1992). En el caso de las redes urbanas, los bordes son representados por las calles que contienen el análisis y los nodos la intersección de dos o más calles (bordes).

De esta manera, estos nodos son conectados por un arco, y al existir un flujo entre un punto inicial y uno final; existe la impedancia o fricción. Ávila (1996) citado en Loyola y Albornoz (2009) define la impedancia como el costo que representa el desplazamiento a lo largo de un arco. A su vez, se emplea como la dificultad de movimiento en un desplazamiento de un arco a otro, debido a factores como el tiempo, distancia, o configuración topográfica.

Sin embargo, una red está relacionada no meramente con aspectos geográficos, también tiene una fuerte relación con aspectos económicos, culturales, sociales, tiempo y políticos. De acuerdo a Boix (2002) señala que una red es una estructura donde los nodos son las ciudades conectadas por arcos, a través de un intercambio de flujos socioeconómicos. Estos flujos se apoyan por infraestructuras de comunicación y telecomunicaciones. Una red se define como un conjunto de elementos:

$$G(t) = \{N(t), L(t), f(t) : J(t)\}$$

Donde t es el tiempo simulado o real.

G es la red en estudio.

$N = \{1, \dots, n\}$ representa el conjunto de nodos (n) de la red, los cuales se le asigna un peso dependiendo la jerarquía.

$L = \{1, \dots, l\}$ es el conjunto de arcos (l) que unen al conjunto N de nodos.

$f: N \times N$ es la matriz de adyacencia, la cual conecta los pares de los nodos, que de manera binaria se almacena información conteniendo el peso asignado al link.

J es el algoritmo que describe el comportamiento de los nodos y arcos en función del tiempo.

Por tanto, las redes constituyen una parte primordial para las ciudades, donde no sólo se involucran las variables geográficas, sino que, además; existe una relación con otros parámetros que son de carácter intangible, pero que además a partir de ellos es posible obtener un mejor entendimiento del funcionamiento de la vida diaria -hablando en términos de planeación vial- o en consecuencia, optimizar las ya establecidas para una mayor circulación de flujos.

1.2.2. Teoría de grafos

El análisis de redes urbanas tiene sus orígenes en la misma Teoría de Grafos. La Teoría de Grafos se remonta en el año de 1736 cuando el matemático y físico Leonhard Paul Euler, donde planteaba un problema de los siete puentes de Königsberg, sobre el río Pregel, en la ciudad de Kaliningrado; que consistía en cruzar cada puente de manera secuencial partiendo desde cualquier punto, una sola vez y llegar al mismo punto de partida (Figura 4). Para la solución a este planteamiento del problema, utilizó nodos y arcos, donde los nodos representaban un punto en la tierra y los arcos los puentes; mediante la interpretación algorítmica e intersección de estos datos, estudiando así la conectividad de la red.

Sin embargo, para el año 1852, Francis Guthrie retomó esta representación a manera de colorear estos elementos para realzar cartografía temática³. A partir de esta metodología, una gran variedad de investigadores, científicos, matemáticos desarrollaron esta teoría, por lo que se hizo un trabajo más productivo.

³ Francis Guthrie (1852), desarrolla el Teorema de los Cuatro colores; el cual consiste en colorear un mapa geográfico plano sin que dos de sus fronteras tengan el mismo color, utilizando solo cuatro colores diferentes (desde el punto de vista topológico).

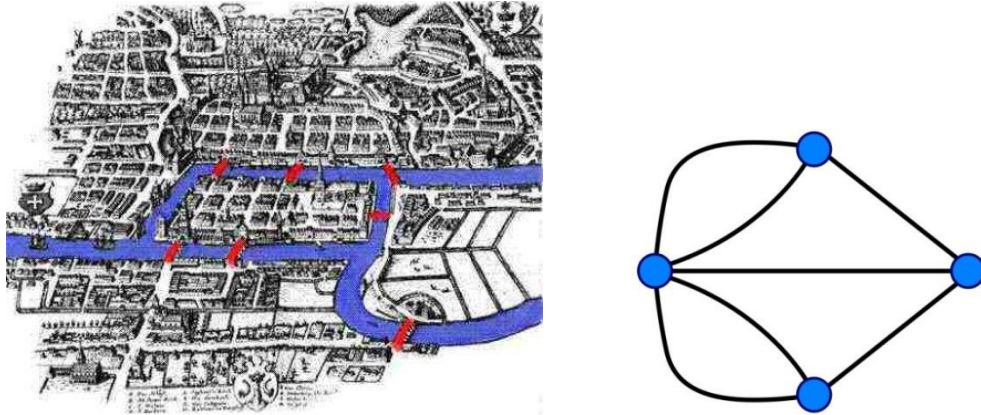


Figura 4. Los siete puentes de Königsberg, sobre el río Pregel,
Fuente: <https://aprendiendomatematicas.com/los-puentes-de-konigsberg/>

Una de las formas de representar el análisis de redes y flujos que circulan en ella, es por medio de una representación topológica de los nodos y sus bordes en un grafo y su matriz de conectividad. La teoría de grafos es una rama de la topología desarrollada en los años cuarenta del siglo XX (Hagget y Chorley, 1969), representando una red de transporte completa y sus partes como un sistema total.

De manera sencilla, un grafo es un término matemático que define a un conjunto formado por puntos y conectado por líneas. Formalmente, un grafo se define como un par de conjunto $G = (V, E)$ donde V es el conjunto de vértices, $v = \{v_1, v_2, v_3, \dots, v_n\}$ y E es el conjunto de bordes, conectados por pares de vértices que pertenecen al conjunto V , y que está conectado sin alguna ponderación, expresado de la siguiente manera:

$$R(G) = |r_{ij}|_{n \times n} \text{ donde } r_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si } v_i v_j \in E \\ 0 & \text{si no existe conexión} \end{cases}$$

La teoría de Grafos asocia la red de transporte o circulación a una estructura simple a base de nodos y arcos conectados. Esta teoría realiza un estudio morfométrico para conocer su estructura y desarrollo, basándose en las propiedades topológicas (conectividad, accesibilidad) y representaciones de la naturaleza. En concreto, un grafo es una representación simbólica de una red y su

conectividad, abstrae elementos reales en un conjunto de nodos conectados mediante un análisis descriptivo-explicativo.

Como se ha mencionado antes, los arcos o bordes pueden ser calles, pero también pueden representarse como líneas de metro, cableado eléctrico, canales, rutas aéreas o marítimas; en donde existe un flujo de personas, mercancías, materia, etc. En el caso de los nodos, aparecen ciudades, estaciones, cruce de calles, o bien, como negocios y servicios; que se distribuyen en la red en un nivel jerárquico. Por lo tanto, en un grafo se representa un conjunto de rutas (trayectorias) que conectan dos lugares diferentes.

La creación de la red se convierte en una representación compleja, los datos de la infraestructura a estudiar son variables, pues cada elemento funciona de manera distinta uno del otro dentro de la red, es decir; existen nodos que de acuerdo a la función que desempeñan, presentan mayor importancia por la cantidad de sus funciones; los arcos, de la misma manera, tiene mayor circulación de flujos o son más accesibles. Por lo que se refiere a una jerarquía de red, donde los nodos y arcos toman un orden diferente de acuerdo a sus funciones y elementos.

1.2.3. Propiedades de los grafos

Las propiedades que tienen los grafos, en particular las propiedades topológicas, ayudan a comprender su estructura. La representación de los grafos parte de la abstracción de un sistema vial o urbano, que identifica los bordes, los nodos y la conexión dentro de la red; estos elementos pueden ser vialidades o vías de ferrocarril, calles, o una red urbana.

En este trabajo no se hará una explicación exhaustiva sobre las estructuras y propiedades de los grafos, pero se definirán algunos conceptos para entender las posibles formas estructurales de las redes viales y urbanas. Entre sus propiedades simples y básicas están las siguientes:

- a) número finito de nodos;
- b) conexión entre dos nodos diferentes (inicio y final);
- c) y cada par de nodos se conectan por una sola ruta.

Principalmente, los grafos o las redes (comúnmente denominadas) se dividen en dos formas: estática y dinámica, si los nodos y las relaciones son constantes o cambiantes del tiempo, respectivamente.

De acuerdo a Seguí (1995) citado en Madrid y Ortiz (2005); el primer tipo, se concentra en las partes que conforman a la red (nodos y arco), que a su vez se van a ramificar en otras categorías; mientras que las dinámicas se basan en las variables socioeconómicas, en función del tiempo. Estas redes, están clasificadas de acuerdo a su tipología, la cual indica la manera en la que los nodos y los bordes están conectados entre sí dentro de una red geoméricamente.

❖ Redes dinámicas

Las redes dinámicas se basan en el valor de los elementos mediante variables reales (tiempo, costes, flujos). Las redes dinámicas se centran en la generación de flujos de la red a través de las fuerzas de cohesión de acuerdo a la tipología de estructura, sin menospreciar la accesibilidad y centralidad de la jerarquía de los nodos, que posteriormente se abordará estos temas. En contraste, las redes dinámicas sugieren variables como el costo, debido a que varía a lo largo del tiempo.

❖ Redes estáticas

Las redes que contienen variables estáticas no son suficientes para estimar el tiempo, dado que se concentran en el estudio de la forma y conexión de una red, es decir, su principal base serán los arcos y no en las variables que se han mencionado anteriormente.

En función del significado del arco

- a) Redes simples: Estos grafos solo contienen un solo tipo de arco entre sus nodos, de tal modo que cada arco se conecta a dos diferentes nodos y no existen arcos que conecten el mismo par de nodos, por ejemplo, un camino.
- b) Redes múltiples: Este tipo de grafos contienen una gran variedad de arcos conectados en el mismo par de nodos, algunos de estos nodos se conectan a un arco mientras que otros pueden ser conectados por más de uno paralelamente.

En función del tipo de arco

- a) Redes dirigidas: Todas las intersecciones de dos arcos se unen en un solo nodo, haciendo que la topología sea bidimensional; haciendo que sus aristas no se corten excepto en los vértices. Comúnmente, se refiere a redes como caminos o vías ferroviarias –como arcos- y los nodos a terminales, ciudades y almacenes.
- b) Redes no dirigidas: Los vértices de los que dispone estos grafos son, por lo menos, menos dos arcos (en realidad, este grafo presenta muchos arcos que uno plano), esto implica que la topología sea tridimensional. Este tipo de grafo se puede tener en transporte marítimo o aéreo, y en ocasiones en paso de niveles.

En función del peso del arco

- a) Red binaria: Son redes en las que no se indica el peso de las relaciones, es decir, indican únicamente la existencia o no de relación entre los nodos.
- b) Redes pesadas: Son redes en las que existe alguna relación que tenga definido su peso.

1.2.4. Red urbana

Una vez analizado la teoría de grafos, es necesario ahora definir los componentes de una red urbana. Una red urbana está conformada dentro de un espacio geográfico por un conjunto de ciudades o localidades donde el principal atributo son los edificios, y que por ende, tiene elementos conectivos como áreas peatonales y verdes, calles y vialidades (como ciclovías y carreteras), en donde existen flujos materiales e inmateriales que interactúan entre sí. La estructura urbana, se puede analizar desde el concepto de red y los principios que la estructuran –llamada Teoría de la Red Urbana- como son los nodos, conexiones y su jerarquía (Salingraros, 2005).

1.2.5. Componentes de la red urbana

Gehl (1987) citado en el trabajo de Salingraros, señala que el tejido urbano es una estructura de complejidad organizada que existe sobre todo el espacio entre los edificios. Una red urbana tiene por principal función conectar nodos distintos que convergen en la ciudad a través de las posibles conexiones que la red ofrezca, mediante tres principios estructurales: nodos, conexiones y jerarquías.

❖ Nodos

Los nodos de la red urbana son en gran medida, construcciones dentro de un territorio, tales como casas, oficinas, negocios, etc.; que cumplen la función de ser los conectores para que exista una interacción o actividades entre los flujos (en este caso, las personas) y las trayectorias para llegar a un sitio específico en donde las personas realizan actividades cotidianas, por ejemplo; ir al trabajo, realizar compras, asistir a eventos culturales, dar paseos en parques, entre otros.

❖ Conexiones

Como se explicó anteriormente, para hacer posible la conexión, es necesario que exista, al menos, dos nodos. Esto implicaría que las conexiones están diseñadas de manera recta, lo cual está lejos de serlo. En la planificación urbana, se realizan tramos cortos y rectos para trayectorias peatonales, por

ejemplo, el tramo de una calle. En cuanto a las conexiones que involucran más de dos links -conexiones múltiples- es casi imposible que sean rectas, normalmente son curvadas o irregulares. Una red muy amplia y múltiple implica mayores conexiones, y a la vez, presenta mayores impedancias.

❖ Jerarquías

La jerarquía de una red –ordenada-, crea conexiones múltiples para cada nivel, sin que sea caótica. La jerarquización de una red urbana inicia desde escalas menores como las sendas peatonales, y crece hacia escalas mayores como avenidas principales, codificándose de la siguiente manera: calles arteriales o principales, calles colectoras o secundarias y calles locales.

Para Suárez et al. (2011) existen tres factores principales que incrementan o disminuyen la accesibilidad a las áreas verdes: provisión de área verde; la eliminación o reducción de los obstáculos que dificultan la conexión entre la población y los espacios abiertos; y la movilidad entre ambos.

La representación del espacio se realiza a través de entidades mono o bidimensionales (polígonos o líneas, los cuales son expresados como centroides; y la intersección espacial que forman son los llamados nodos. Los nodos, dentro de una red urbana, bien pueden ser una representación del espacio público y las construcciones.

1.2.6. Centralidad

El término de centralidad fue desarrollado, en sus inicios, dentro del campo de las ciencias sociales, que poco después este término fue incluido en otras áreas tales como la biología, planeación urbana y, actualmente en ciencias geoespaciales. Las redes pueden ser representadas por grafos y su estructura puede ser analizada usando diferentes conceptos, uno de los más importantes es la centralidad.

El concepto de las medidas de centralidad fue introducido en su inicio por Bavelas (1950), en el contexto de las ciencias sociales, en la década de los 50, presentaba en un contexto social, en donde fueron descritos diversos conceptos como grado, rutas geodésicas y adyacencia; contribuyendo a las medidas de centralidad. La idea de un lugar central dentro de una red corresponde al control, en términos de influencia sobre otros lugares. Otro autor fundamentó el principio de centralidad fue Shaw (1954) citado en Freeman (1979), el cual denominó el término *grado* como indicador de la centralidad en un punto. El grado de un punto corresponde al número de puntos que son próximos a él y que están conectados dentro un grafo.

Por otra parte, Freeman (1979) realizó su trabajo con base en base a la Teoría de Grafos para una red social donde estableció la Teoría de la Centralidad. Demostró con simples diseños que una conexión de cinco nodos en forma de estrella, las personas que se ubicaban en el centro estaban, estructuralmente, conectados.

La centralidad se define como la medida que indica la importancia relativa de unos nodos dentro de la red, es decir, cuáles son los nodos que están mejor conectados; y con ello la centralización al conjunto de la estructura de una red. El funcionamiento de la centralidad supone que el centro mantiene en el transcurso del tiempo una buena accesibilidad para su periferia. Dicho de otra manera, indica la importancia relativa de cada nodo existente en la red, es decir, aquellos que mejor conectados están.

La función de la centralidad es un atributo estructural de los nodos en una red, al asignarle un valor o peso ponderado a los nodos, debido a la posición estructural en la que se encuentra. La centralidad, traducida en una red urbana, se refleja como aquella calle o vía que está más centrada que otras calles.

Dado que se ha mencionado el concepto de distancia, se identifica dos tipos de distancias: la distancia topológica y la distancia geométrica. La primera distancia, se refiere al número de aristas necesarias para pasar de un nodo a otro nodo, utilizada generalmente, para encontrar la ruta más corta en un camino. La segunda distancia, es la llamada distancia Euclidiana que se usa para medir la distancia entre dos nodos en un sistema de coordenadas cartesianas.

1.2.7. Medidas de centralidad

Las medidas de centralidad son muy bien conocidas en muchas áreas de conocimiento como las ciencias sociales, biología, ciencias computacionales y en la geografía. La base para cada medida de centralidad es, básicamente, la sumatoria de las distancias de un conjunto de nodos que están conectados entre sí, en un camino mínimo.

Uno de los autores pioneros en este tema es Freeman (1979), el cual establece –topológicamente- que un nodo es central en relación a otros nodos, si este se encuentra en su camino mínimo. Ingram (1971) citado en Krafta (2008), desarrollando el trabajo de Freeman; realiza una relación entre las distancias de los nodos y la accesibilidad en donde dice que las distancias mayores son menos accesibles, mientras que las distancias cortas (ruta más corta) resulta accesible. También, menciona que el término distancia puede ser una medida temporal o económica o una distancia geométrica (medidas en línea recta o por el sistema vial).

Con base en el trabajo de Freeman e Ingram, Krafta (1994) menciona que la relación entre dos nodos se expresa por el producto de sus atributos, en donde la distancia que los separa es la ruta más corta. Además, concluye que, si la distancia aumenta, la centralidad disminuye.

❖ Cercanía (Closeness centrality)

De acuerdo a Freeman (1979), la centralidad cercana de un nodo es la suma de la distancia teórica de todos los otros nodos, el cual es definido por la ruta de longitud (en arcos) más corta de un nodo a otro. Dicho de otro modo, es la distancia media desde un nodo inicial a todos los demás nodos de la red. Los nodos con baja cercanía entre ellos, permite que la distancia sea más corta que otros y mejor circulación de flujos (pensando que todos los nodos tienen la misma probabilidad). Matemáticamente, se expresa de la siguiente manera:

$$C_i^C = \frac{N - 1}{\sum_{j \in G; j \neq i} d_{ij}}$$

Donde C^C es la medida de centralidad, i es el nodo, G es la red en estudio, d_{ij} la distancia más corta entre cada nodo (i, j) y N el número total de nodos en la red.

❖ Intercesión (Betweenness)

La medida de intercesión se define como la cantidad de veces que un nodo i necesita un nodo k (cuya centralidad se está midiendo) para llegar a un nodo j a través de la ruta más corta (camino geodésico) (Freeman, 1979). Por lo tanto, la medida de intercesión se traduce como la frecuencia con la que un nodo aparece en el camino más corto entre los nodos restantes de la red. Matemáticamente, se puede expresar de la siguiente manera:

$$C_i^B = \frac{1}{(N - 1)(N - 2)} \sum_{j, k \in G, j \neq k \neq i} n_{jk}(i) l_{jk}$$

Donde C^B es la medida de intercesión, i es el nodo, G es la red en estudio, n_{jk} es la distancia geodésica (número de la ruta más corta) entre nodo y nodo (j, k) , $n_{jk}(i)$ el número de las rutas más cortas entre j y k que contiene el nodo i , l es la longitud más corta entre los nodos j, k , y N el número total de nodos en la red. La medida de intercesión da como resultado un rango de 0 a 1.

❖ Eigenvector

La medida de centralidad del eigenvector (o, también vector propio) se define como el vector propio principal de la matriz de adyacencia definida por la red, de manera que un nodo influye en otro nodo y así consecutivamente; teniendo en cuenta que es en el primer nodo donde tiene la mayor influencia. Por lo tanto, aquellos nodos con valores más altos estarán mejor conectados con otros nodos, y como repercute en los siguientes nodos, se puede inducir que los últimos nodos de la red estarán de igual forma mejor conectados. Se expresa de la siguiente forma:

$$\lambda v = Av$$

Donde A es la matriz de adyacencia del grafo, λ es el eigenvalor (constante) y v es el eigenvector. El eigenvalor más largo se conoce como el eigenvalor principal. Esta medida indica el grado con que un flujo puede moverse a través de caminos sin restricciones, en lugar de estar restringido por senderos, caminos o rutas geodésicas. A manera que la suma de cada centralidad de los vecinos (nodos cercanos) sea la centralidad del vértice.

❖ Rectitud (Straightness)

Esta medida de centralidad parte de una idea hipotética en donde el flujo entre dos puntos es mejor, cuando el camino que recorre es recto. En otras palabras, esta medida de centralidad mide la eficiencia de la red entre dos nodos, dentro del camino más corto.

$$C_i^S = \frac{1}{N-1} \sum_{j \in G; j \neq i} d_{ij}^{Eucl} l_{ij},$$

Donde C^S es la medida de rectitud, G es la red en estudio, d_{ij} es la longitud de la ruta más corta, d_{ij}^{Eucl} es la distancia euclidiana entre los nodos i, j , l es la longitud más corta entre los nodos i, j , y N el número total de nodos en la red.

❖ Grado de centralidad

Esta medida de centralidad propone definir una relación del número de vecinos de un vértice con el número total posible de vecinos. El grado de

centralidad se define como el número de las incidencias en un nodo (Freeman, 1979). Definiendo como grado, al número de caminos de longitud entre un nodo y nodo, por lo que modela la frecuencia de los flujos realizados en una ruta aleatoria a través de una red. La expresión matemáticamente sería:

$$C_D(v) = \frac{\text{deg}(v)}{N - 1}$$

Donde C_D es el grado de centralidad, $\text{deg}(v)$ es el grado del nodo v y N es el número de nodos en la red. Por lo tanto, se define como la normalización del grado del nodo (número de vecinos), donde demuestra el número de nodos a los cuales un nodo está directamente unido. Esta medida tiene un valor de 0 a 1, donde 0 significa que no existe algún nodo conectado con otro, mientras que 1 indica que todos los nodos se conectan entre sí.

1.2.8. Accesibilidad

El concepto de accesibilidad ha sido estudiado y definido en varios campos científicos, tales como planificación del transporte, planificación urbana y geografía, haciendo más compleja la definición de este concepto y que, a la vez, es paralelo con el concepto de movilidad y la centralidad.

A raíz de la Teoría de Grafos, nace una de las principales cualidades de una red urbana llamada accesibilidad. Para dicho análisis, según (Seguí y Petrus, 1991), la Teoría de Grafos se emplea mediante un estudio morfométrico de redes; para la identificación de los lugares que presenten una menor accesibilidad en relación con la ubicación de una o varios lugares a su alrededor. En Teoría de Grafos, si la distribución de los nodos no es homogénea crean una nueva característica que es la discontinuidad, que junto con el rendimiento de transporte que lo sirven y con la estructura, constituyen uno de los principales factores explicativos de las diferencias de accesibilidad en el espacio.

Una de las primeras definiciones y desarrollo de índices, fueron introducidos por Walter G. Hansen en 1959, donde define la accesibilidad como “el potencial de

oportunidades para interactuar”. Un territorio es accesible cuando interactúa con diversas oportunidades, haciendo que el acceso a ellas sea de mayor facilidad. Se llamarán oportunidades a los diferentes puntos de interés en donde, principalmente los habitantes de una locación, acudan a realizar sus actividades cotidianas. Por lo tanto, la accesibilidad se define como una medida de distribución espacial de cualquier actividad ajustada a la interacción de las oportunidades (Hansen, 1959).

Muchos son los autores que han definido este concepto, desde diferentes perspectivas, pues la accesibilidad no es un término absoluto, ya que depende del contexto o aplicación del objeto de estudio, que puede ser visto desde el medio de transporte, uso de suelo, por las actividades desarrolladas, en función del tiempo y costo, o por las capacidades de los individuos.

Ingram (1971) deduce que la accesibilidad está relacionada con algún tipo de transporte, el cual depende del costo y velocidad con la que se mueve, que puede ser medida por algún método de centralidad entre dos diferentes lugares. Para Bhat et al. (2000), la accesibilidad es una medida de la facilidad de un individuo para realizar actividades cotidianas, en el lugar que corresponda, usando cualquier modo de transporte que desee, y a una hora determinada. Desde esta definición, se tienen dos vertientes: el uso de suelo y el transporte, que coexisten para el beneficio de los usuarios.

La definición anterior responde a preguntas ¿quién o quiénes?, ¿dónde?, ¿cómo? y ¿cuándo?, por lo tanto, esto presenta un nuevo término *destino*. Para Goodall (1987) citado en Garrocho y Campos (2006), la accesibilidad es la facilidad de alcanzar algún sitio (destino), el cual parte de algún punto del territorio geográfico (origen) a manera de que el origen-destino interactúe con las oportunidades.

La accesibilidad, por lo tanto, se define como el grado de facilidad del que las personas disponen para poder llegar a un determinado lugar (equipamiento o servicio), a partir de un origen, mediante algún tipo de transporte (inclusive caminando) y realizar sus actividades cotidianas en alguna hora determinada, independientemente de su estado físico y de sus capacidades técnicas, culturales y cognitivas. Este término comprende dos vertientes: la distancia y el tiempo, sin embargo, la accesibilidad se asocia también a un contexto social, y no exclusivo a la localización espacial. Además, cuando el espacio es accesible, éste no presenta barrera alguna, es decir; cualquier obstáculo natural o artificial que afecte la circulación dentro de la red.

Por otro lado, cada vez es más frecuente que la accesibilidad dependa de la distancia a las infraestructuras de transportes que de la distancia real a los centros que ofrecen los servicios. Los espacios que cuentan con una buena accesibilidad, son más viables para la inversión que aquellos en donde los costos son elevados.

Como se ha mencionado, la accesibilidad no es un término limitado, no sólo se refiere a la única posibilidad de alcanzar o no un lugar dado, también toma en cuenta la movilidad de los usuarios en función de sus características, el tipo de desplazamiento, calidad de las calles, etc. La accesibilidad, también mide la peligrosidad del desplazamiento hacia el destino. Además, otro concepto que está ligado a la accesibilidad es la conectividad.

Una de las funciones de una red, es conectar una calle a otra calle con la finalidad de hacer que todos aquellos recursos, principalmente las personas, circulen dentro de ella puedan interactuar con el estilo de vida que cada una conlleva. Por lo que, a mayor incremento de las conexiones, determinado por una gran cantidad de arcos pequeños, numerosas intersecciones (nodos) y mínimos callejones, existe una mayor cohesión espacial para la red, que permitirá una relación integral dentro de la red.

Entre mayor sea la conectividad, las distancias de viaje disminuyen y las opciones de ruta aumentan; permitiendo un viaje más directo entre los diferentes destinos. La manera en la que se determina el grado de conectividad dentro de una red, se realiza por medio de índices que resultan significativos para determinar la calidad con la que la red sea eficaz o no, reflejando el aprovechamiento entre los flujos de comunicación y los asentamientos. Debido a esto, la accesibilidad se verá beneficiada o afectada por la manera en que se construye la red urbana.

El diseño de la accesibilidad dentro de una locación, debe considerar las necesidades de la población; la edad, género, nivel económico, desarrollo cultural y social, o discapacidad. Es por ello que, la accesibilidad debe ser integral, de manera que garantice la circulación, utilización, orientación, seguridad y funcionalidad para los habitantes de la ciudad.

1.2.9. Indicadores de accesibilidad

Los indicadores de accesibilidad fueron introducidos por el economista alemán J. H. Von Thünen en 1826, donde publicó un artículo sobre un análisis de la localización agrícola; el cual consideraba un punto en el centro de un territorio, de manera que los productos provenientes del campo trasladados a los mercados, estaban centradas en ese punto, expresando la accesibilidad en función del costo del transporte; llamándose principio de accesibilidad.

Son diversos los indicadores que miden la accesibilidad, que en gran parte se enfocan en dos características: impedancia y la atracción de los destinos con relación a la actividad económica que representa, mediante el número de viajes y tiempo de traslado.

De acuerdo a Geertman y van Eck (1995), reconocen que la mayor parte de las medidas de accesibilidad son fruto de la combinación entre el costo del transporte, actuando éste como impedancia o efecto de fricción de distancia; y la

capacidad de atracción de los espacios públicos, relacionándola con el volumen de su actividad económica. De aquí parte que la accesibilidad se considera como un factor de competitividad. Mientras más accesible sea un espacio público, tendrán mayor actividad y crecimiento económico, forzando así un mejor desarrollo y diseño de infraestructura de transporte y vial.

En su trabajo mencionan a Ingram (1971) donde señala que la accesibilidad puede ser dividida en dos partes: relativa e integral. La accesibilidad relativa se define como el grado en el que dos lugares están conectados dentro un mismo espacio, mientras que la accesibilidad integral mide el grado de interconexión en un punto con relación a los nodos que lo rodean dentro del mismo espacio.

Para entender la accesibilidad, según Geurs y Wee (2004), se integra de cuatro componentes ideales, que están en función del uso del suelo y del sistema de transporte los cuales deberían estar disponibles para un grupo de individuos que requieran realizar alguna actividad.

1. El componente de transporte, básicamente describe el sistema de transporte que el usuario requiere (ya sea vehículo o caminando), considerando el tiempo de traslado, costo y la movilidad dentro del espacio geográfico (incluyendo cualquier percance que ocurra dentro del traslado).
2. El componente de uso de suelo, el cual mide la cantidad, calidad y la distribución espacial de las actividades u oportunidades.
3. El componente temporal que evalúa el tiempo que requieren los usuarios para realizar sus actividades y la disponibilidad con que esas oportunidades funcionan de acuerdo al tiempo.
4. El componente individual que analiza las necesidades, oportunidades y capacidades de los usuarios que utilizan el transporte; considerando así los factores demográficos y socioeconómicos.

En el siguiente diagrama se sintetiza la circulación de la accesibilidad, en función de los usuarios, oportunidades, tiempo, costo y oferta-demanda (Figura 5).

Siguiendo este modelo, Geurs y Van (2004), concluyen que la accesibilidad, en función de las oportunidades y el nivel de servicio –como tiempo y costo- son proporcionales para cualquier actividad y en cualquier lugar.

Otras medidas, de acuerdo a Garrocho y Campos (2007), son los indicadores de accesibilidad, los cuales tienen dos vertientes: el componente físico, que se relaciona a los parámetros representados por la distancia geográfica entre oferta-demanda (es decir, servicio-usuario); y el componente social, se refiere a la distancia social que es representado por la impedancia entre las unidades de servicios y los usuarios. Estos indicadores se pueden clasificar en cinco diferentes categorías: separación espacial, de oportunidades acumulativas, de interacción espacial, de utilidad y espacio-temporales, que a comunicación se describen.

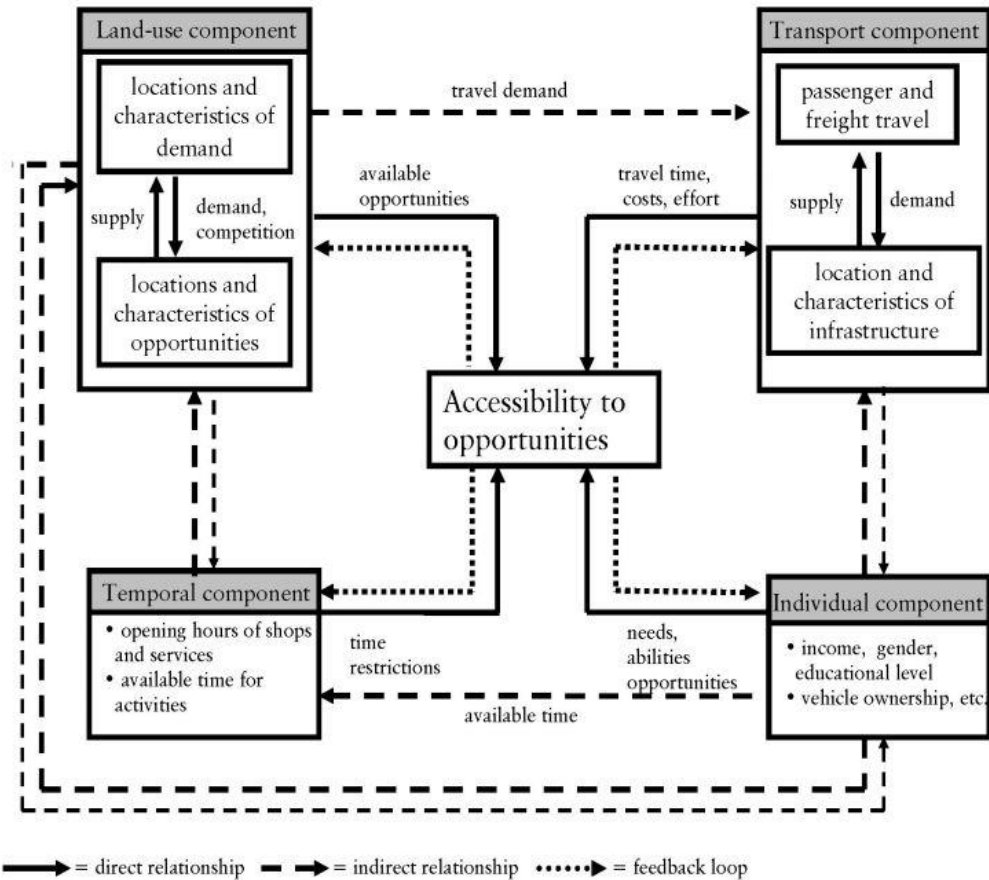


Figura 5. Componentes de la accesibilidad. Fuente: Accessibility evaluation of land-use and transport strategies: review and research directions. Geurs y Van (2004).

❖ Indicador de separación espacial

Estima el promedio de recorridos entre el desplazamiento origen-destino, utilizando la distancia; que separa al origen del destino y un parámetro, que es la demanda del costo del transporte, sin considerar características sociales, culturales, etc. (por ejemplo, tipo usuario). Matemáticamente se expresa como:

$$A_i = \sum_j \frac{d_{ij}}{b}$$

Donde A_i es el indicador de accesibilidad, d_{ij} costos de transporte y b demanda ante cambios en el costo de transporte (fricción de distancia).

❖ Indicador de oportunidades acumulativas

Considera que todos destinos son igualmente accesibles, definiendo el tiempo de transporte o umbral de distancia para cada origen, expresándose como:

$$A_i = \sum_t O_t$$

Donde A_i es el indicador de accesibilidad, d_{ij} es el tiempo de transporte o umbral de distancia y O_t destinos potenciales dentro del umbral definido. Sin embargo, a diferencia del anterior indicador, este no considera de los usuarios ni su conducta espacial, debido a que estos destinos –que pueden ser unidades de servicios- son potencialmente accesibles

❖ Indicador de interacción espacial

Este indicador está en función de la variación a los costos del transporte, sin omitir otros parámetros como distancia, tiempo, etc., estimando estos parámetros a partir de la atracción de los destinos (unidades de servicios).

$$A_i = \sum_t \frac{O_j}{d_{ij}^b}$$

Donde A_i es el indicador de accesibilidad, O_j factor de atracción (unidades de servicios), d_{ij} costo de transporte, b fricción de la distancia –sensibilidad ante cambios de los costos de transporte. Este indicador asume la demanda-oferta, el espacio geográfico, sistema de transporte, etc., en función de la impedancia como la fricción de la distancia.

❖ Indicador de utilidad

Fundamentalmente, mide la utilidad individual percibida por cada usuario respecto a las unidades de servicios (destino).

$$A_n = \ln \sum_{j \in C} \exp(V_j n)$$

Donde A_n es el indicador de accesibilidad, j representa el destino, C es el grupo de destinos y V la utilidad máxima entre las alternativas de j, C . En contraparte, este indicador sólo es disponible para un cierto grupo de usuarios;

que generalmente no interactúan con las oportunidades, como personas de bajo recurso.

❖ **Indicador espacio-temporal**

Se fundamenta en el periodo limitado que los usuarios tienen para realizar actividades determinadas; así mismo, considera que es un indicador inversamente proporcional; por ejemplo, si el tiempo de transporte incrementa, el tiempo de estadía en los destinos disminuye. Este indicador considera tres restricciones: de capacidad, limitaciones funcionales entre los diversos grupos de población; de sincronía, cuando los usuarios necesitan estar en un determinado sitio; y de autoridad, cuando los usuarios no pueden acceder a ciertos lugares por alguna autoridad.

Esto implica considerar un análisis a una microescala, debido a que considera un determinado tiempo y espacio para una determinada población, esencialmente individual. Como se observa, la accesibilidad no es uniforme para las personas que habitan una zona, debido a factores sociales, económicos, etc.

CAPÍTULO II. ANÁLISIS DE REDES APLICADO A LAS ÁREAS VERDES URBANAS

2.1. Las áreas verdes urbanas como espacio público

Han sido varias las civilizaciones que introducen las áreas verdes como lugares de bienestar y contacto con la naturaleza, con distintos objetivos. Por ejemplo, los primeros agricultores, al cultivar los huertos y la plantación de los árboles, de manera indirecta, éstos regulan microclimas y con ellos el descanso bajo los árboles ofrece un lugar fresco y agradable. Griegos, romanos y egipcios, ya incluían el concepto de áreas verdes dentro de sus ciudades tanto en casas propias como en espacio públicos, que dependiendo de la estación del año; los jardines (como solía decirse) eran ornamentalmente sencillos o lujosos.

Durante mucho tiempo las áreas verdes formaron parte de la estética de las ciudades, no fue hasta finales del siglo XIX y principios del siglo XX, cuando se les asigna un sentido más estricto en cuanto a los beneficios que ellas proveen a los ciudadanos tanto al medio ambiente; naciendo así grandes parques urbanos como Central Park en Nueva York, St. James Park en Londres, Bois de la Chambre en Bruselas, entre otros. De aquí, se comenzó a introducir espacios verdes de diferentes dimensiones y a reconsiderar este término.

Con el incremento de la población en las ciudades, se ha visto una fuerte presión que ejerce sobre las áreas verdes, haciendo que estos espacios sean cada vez menos; por lo que varios organismos públicos e instituciones necesitan fortalecer los espacios públicos, realizando una mejor estrategia o planes para designar las áreas verdes alrededor de las grandes urbes. El manejo de las áreas verdes urbanas bajo una estrategia efectiva, trae consigo una ciudad placentera y sustentable; que no sólo se debe reconocer la estética de las ciudades, sino que los beneficios también son de carácter ambiental y sociocultural.

El crecimiento constante de las ciudades ha desarrollado una serie de problemas ambientales y sociales, sustituyendo el paisaje natural por un paisaje artificial, incrementando así áreas destinadas a viviendas, edificios, red vial, etc. Dentro de estos problemas se encuentra la disminución o déficit de las áreas verdes urbanas, las cuales se conforman dentro de los espacios públicos y el principal protagonista es la vegetación, con la finalidad de cumplir funciones de recreación, ecológicas, protección, recuperación o rehabilitación del entorno, y, por ende, bienestar a la población urbana.

Las áreas verdes urbanas son parte del espacio público, razón por la que se debe abordar este tema; para entender el contexto que éstas funcionan. El espacio urbano, el cual ha sido estudiado desde los años 60's, entendido como lugares abstractos, cambiantes y de origen público (espacio público), para que existan intercambios recreativos, culturales o de descanso; que generalmente se

encuentran en un entorno donde la naturaleza está presente, tal como las calles, parques infantiles, mercados callejeros, playas y parques.

Borja y Muxi (2000), consideran al espacio público desde una perspectiva urbanística, jurídica y cultural; que pertenece al dominio público dentro de un territorio que se adapta al entorno urbano, en donde las personas de una comunidad interactúan entre sí, permitiendo establecer relaciones sociales. El espacio público, entonces tiene una función que hace aprovechar las riquezas tanto socioeconómicas, culturales, ambientales y educativas.

El espacio público abierto es un atributo de la ciudad tanto para su forma como para su funcionamiento, que tiene como característica principal la circulación libre de las personas en el área. De esta manera, se podría afirmar que las áreas verdes urbanas funcionan como un espacio público en donde se caracteriza por ser un territorio accesible por los habitantes de una zona, que se rige por la interacción de sus habitantes y de la administración pública, haciendo de éste un lugar público; donde se llevan a cabo actividades cotidianas que los propios habitantes asignan como intercambios socioculturales, económicos, políticos, de descanso y recreativos.

Por otra parte, la Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL), ahora la Secretaría de Bienestar, en el Programa de Rescate de Espacios Públicos (PREP) tiene su propia definición de espacio público:

Lugar de encuentro donde cualquier individuo tiene derecho a entrar o permanecer sin ser excluido. Se caracteriza por ser un ámbito abierto por y para el ejercicio de la vida en sociedad; representa el espacio idóneo para el desarrollo de actividades deportivas, recreativas, artístico-culturales y de esparcimiento. (SEDESOL, 2010)

Esta definición podría impactar en la calidad de vida de los habitantes de una zona. Es decir, los espacios públicos fomentan un lugar de convivencia y de bienestar para los usuarios; sin embargo, existe un gran número de mexicanos que perciben estos espacios como zonas de riesgos debido a actividades criminales, la ubicación y mal estado de espacio (García y Lara, 2016). Por lo que la gestión de las áreas verdes como espacio público también debe ser primordial tanto para las instituciones, gobierno y sociedad, no sólo por la estética de la ciudad, sino por todos aquellos beneficios ambientales y socioeconómicos que contribuyen para los habitantes de una zona.

2.2. Definición de áreas verdes urbanas

Cuando se habla de un área verde o espacio verde a menudo se relaciona con el color verde; y automáticamente, se representa por la vegetación, donde se infiere que hay vida. Por el contrario, se puede entender que aquellos lugares que no presenten un espacio dedicado a la vegetación y la naturaleza es pobre, se le denominará como espacio gris, que sería sin duda, un lugar donde sólo existen construcciones y pavimento, es decir; una zona impermeable (Figura 6).

Pero, esta percepción sobre área verde va más allá de ser un concepto tan simple como éste. De hecho, las áreas verdes, quizá, no sean tan verdes como se podría imaginar; ya que existen áreas con vegetación enferma y mal estructurada.



Figura 6. Espacio gris (imagen izquierda) espacio con áreas verdes (imagen derecha). Fuente: Infraestructura verde y corredores ecológicos de los pedregales: ecología urbana del sur de la Ciudad de México (2011).

Muchas de las definiciones sobre áreas verdes, apuntan hacia un espacio dentro de una zona urbana, en donde la vegetación es predominante dentro de ella, incluyendo árboles, plantas y arbustos; considerados tradicionalmente como zonas de recreación y ocio, y son influyentes en la calidad de vida de los habitantes de una zona.

La definición de área verde es tan abasta, que puede definirse y valorarse desde distintos enfoques: ecológicos, sociales, económicos y culturales. Según Falcón (2007) citado en Flores y González (2010), el significado de estas áreas dependerá de las actividades realizadas, del uso social y su extensión, donde la cobertura es predominante (árboles, arbustos y plantas) y equipamiento para diversas actividades; que, por otra parte, se pueden dividir en áreas privadas o de acceso restringido y públicas o de libre acceso.

Saillard (1992) citado en Gregório (2012) define el concepto de área verde como un espacio público o privado en óptimas condiciones, con la finalidad de ser un lugar recreativo, relajante y de reposo, rodeado de una composición vegetal. El aprovechamiento de las áreas verdes por los usuarios puede ser de manera directa o indirecta, mediante la realización de actividades de recreación activa o pasiva y los efectos que tienen hacia el ambiente urbano, respectivamente.

Por otro lado, la vegetación existente dentro del espacio público, puede ser natural, a través de la plantación forestal (seminatural) o artificialmente introducida por el hombre, tal como la vegetación sintética. Entonces, las áreas verdes urbanas son definidas también por su uso de suelo por lo que están ubicadas en zonas permeables, donde el pasto, arbustos, plantas y árboles son predominantes.

Muchas áreas verdes se encuentran en lugares donde las construcciones se hacen presentes, por ejemplo; museos, bibliotecas, estadios, entre otros, debido a esto, Dunnett, Swanwick y Woolley (2002), sugieren denominar estos

espacios como espacios públicos, para que exista una determinación entre áreas verdes y, quizá, a lo que comúnmente se denominaría como jardín. Aunque, por otro lado, el término jardín se relaciona con la estética del espacio urbano y el concepto de parque se refiere al uso del espacio, el cual puede contener algunas construcciones como fuentes, monumentos y área de juegos para niños; creados para diferentes actividades que los usuarios requieren.

2.3. Funciones de las áreas verdes

Las áreas verdes urbanas contribuyen tanto al desarrollo urbano como sustentable, el cual su uso no es exclusivo para el uso recreativo o para hacer incrementar el valor estético de una zona, sino que también trae consigo beneficios tanto ambientales como sociales, económicos, culturales, prevención a la salud y educativos.

❖ Función ecológica

Principalmente, se reconocen sus funciones ecológicas, como conservación de biodiversidad urbana. Pareciera que el beneficio es único al ser humano, sin embargo; estos espacios también son el refugio de la flora y fauna silvestre de las ciudades, de esta manera, se consigue introducir –de cierto modo- el paisaje natural en el tejido urbano.

Dentro de los principales beneficios ecológicos se reconoce que las áreas verdes actúan como reguladores climáticos. Para contrarrestar microclimas en las zonas urbanas, la presencia de masas vegetales, en especial los árboles, son por excelencia; reguladores térmicos, debido a que absorben la radiación solar en un 90%, disminuyendo así, la temperatura de superficies impermeables (Nowark, 1996). Debido a las inmensas construcciones en las ciudades y a la constante pavimentación de las calles, el agua de lluvia favorece la recarga de los mantos acuíferos, reteniendo su captación y almacenándola para así controlar la humedad del suelo, que al mismo tiempo actúa como controladores de erosión del suelo (Sorensen, 1998).

Ayudan a la reducción de los vientos, que dependerá del follaje de los árboles; el cual actúa sobre la dirección del viento y velocidad (Nowark, 1996). También, mejora la calidad del aire, al producir oxígeno y capturar el dióxido de carbono, por medio de la fotosíntesis.

Entre otras funciones destacables que se pueden mencionar son, por ejemplo, la reducción y amortiguación de la contaminación acústica y atmosférica, y la retención de partículas suspendidas (como polvo, humo y niebla). Las áreas verdes urbanas, entre sus funciones destacan la inmensa variedad de servicios ambientales que pueden proveer para el bienestar de la población, y no sólo a ella, sino además ayudan al medio ambiente y a la biodiversidad que reside en la ciudad.

❖ Función social

Las áreas verdes urbanas, como parte de los espacios públicos, Galindo y Victoria (2012) señalan que se convierten en puntos de reunión, fomentando la interacción entre los usuarios, lo cual favorece la inclusión social. Por otro lado, mencionan a Kuo y Sullivan (2001), donde asumen que las áreas verdes reducen la violencia comunitaria y el crimen, así como el vandalismo.

En esta sección, se puede incorporar las actividades de recreación, ocio y deportiva, como el descanso, paseos, espectáculos, entre otros; dependiendo al grupo de población al que se esté refiriendo, la población inactiva –como niños y ancianos- se inclinan a las actividades recreativas y de descansa o paseos, al contrario de la población activa –jóvenes y adultos- se benefician por las actividades deportivas, espectáculos, etc.

Otra de las funciones que se promueven gracias a la interacción espacio verde-usuarios es la fomentación de la educación ambiental. Zoológicos, jardines botánicos, parques, entre otros; son uno de los lugares donde existen actividades para el cuidado del medio ambiente y áreas verdes.

❖ Función preventiva de la salud

Este tipo de espacios urbanos no sólo son de gran importancia en el medio ecológico, sino también, tienen importancia en la salud y bienestar. Como beneficio mental, se puede decir que cuando existe una relación de contacto con las áreas verdes, la mejoría en la salud se ve reflejada. Ulrich (1984) citado en Nowark (1996), demuestra lo anterior mencionando que aquellos hospitales con vista a un espacio verde, la salud de los pacientes se mejora con mayor rapidez y satisfacción.

Un lugar rodeado de vegetación brinda una sensación de tranquilidad y armonía, disminuye el estrés, liberando las cargas de estrés laboral, y provee salud en los habitantes. La existencia de un área verde, sin duda, mejora el estado anímico de las personas y también llega a ser un lugar de reflexión.

Los beneficios también son físicos, es muy común encontrar personas realizando algún tipo de ejercicio físico como correr, caminar, jugar futbol, entre otros. De acuerdo a Lee, Jordan y Horsley (2015), estos espacios brindan la oportunidad de realizar actividades físicas para contrarrestar enfermedades no transmisibles como la obesidad, diabetes, enfermedades cardiovasculares, etc. También favorece mucho a las personas de la tercera edad, haciendo que su calidad de vida sea más activa y su esperanza de vida sea aún más larga (Sugiyama, Thompson y Alves, 2008).

❖ Función económica

Los beneficios económicos no se pueden dejar a un lado, debido a que son producto de las funciones ambientales, educativas, culturales y estéticas. Una de las principales ventajas de las áreas verdes es el incremento del turismo, gracias al valor estético e histórico que posee, y, por ende, el valor de las construcciones que lo rodean. Vista desde una función ahorradora a pequeña escala; como proveedoras de microclimas, disminuyen gastos de energía eléctrica, al disminuir

el uso del aire acondicionado, debido a las sombras que producen los árboles en los edificios.

La generación del empleo también se involucra, debido a que se requiere de personal para el mantenimiento, manejo, plantación, preparación del suelo, entre otras actividades, adaptados para trabajadores calificados y no calificados. (Sorensen et al., 1998).

❖ Función estética

Desde el punto de vista arquitectónico y paisajista, la presencia de áreas verdes urbanas, portan un lado estético y ornamental a los espacios urbanos. Los jardines, la abundancia de masas vegetales representan una gran atracción de las ciudades, que también incrementa el valor inmobiliario de espacio público, y el turismo aumenta, en medida de que ellas aumentan.

2.4. Las áreas verdes urbanas en la Ciudad de México

La Ciudad de México, hacia el año 1520 cuando en la gran Tenochtitlán existía un gran número de áreas verdes, planeadas y distribuidas en el paisaje natural. Las áreas verdes cumplían una función de equilibrio y armonía entre los habitantes de esta gran ciudad. Desde el momento en que se convirtió en la Nueva España, las áreas verdes habían sido menospreciadas y empezó a cambiar paisaje a las enormes estructuras urbanas.

Las ciudades latinoamericanas tienen una sobrepoblación dentro de las grandes urbes, por lo que los llamados espacios grises –construcciones, estructuras- predominan más que las áreas verdes. Pero no fue hasta finales del siglo XX, en donde el crecimiento urbano se fue intensificando, y las áreas verdes comenzaron a disminuir, debido a la alta demanda de viviendas.

En México, las áreas verdes urbanas son percibidas como lugares de recreación y ocio, ya que, en su mayoría, son los niños y adultos mayores los

grupos de población que asisten a estos espacios frecuentemente. Además, los habitantes también asisten a estos espacios públicos para caminar, descansar, hacer ejercicio, pasear mascotas, asistir a eventos culturales, entre otros.

Al inicio de este capítulo, se definió el concepto de áreas verde urbana, sin embargo, la legislación mexicana concede su propio significado. A continuación, se abordará las principales definiciones.

La Ley Ambiental de Protección a la Tierra en la Ciudad de México, define como área verde en su Artículo 5, publicada en la Gaceta Oficial de la Ciudad de México el 18 de noviembre de 2015, como:

“Toda superficie cubierta de vegetación, natural o inducida que se localice en la Ciudad de México”.

La manera en la que clasifica como área verde, se encuentra en su Artículo 87, de la siguiente manera: parques y jardines; plazas ajardinadas o arboladas; jardineras; zonas con cualquier cubierta vegetal en la vía pública; alamedas y arboledas; promontorios, cerros, colinas, elevaciones y depresiones orográficas, pastizales naturales y áreas rurales de producción forestal, agroindustrial o que presten servicios ecoturísticos; barrancas; zonas de recarga de mantos acuíferos; y las demás áreas análogas. (Ley Ambiental de Protección a la Tierra en la Ciudad de México, 2015). Esta Ley también incluye artículos para la interacción ente los ciudadanos y los espacios verdes, fomentando así la cultura ambiental y promoviendo la participación ciudadana.

También existen normas ambientales, como la norma NADF-001-RNAT-2015, en donde se reúnen los lineamientos y especificaciones técnicas que son avaladas por la Secretaría del Medio Ambiente, para la gestión de las áreas verdes. Mientras que, la norma NADF-006-RNAT-2016, dicta que:

Las áreas verdes contribuyen de manera fundamental al mejoramiento de la calidad de vida de los habitantes de la Ciudad de México, son indispensables para disminuir las “islas de calor”, capturar contaminantes y partículas suspendidas, producir oxígeno, frenar la erosión del suelo, incrementar la humedad, disminuir los niveles de ruido, captar agua pluvial y constituir sitios de refugio y alimentación para diversas formas de vida.

Recordando que las áreas verdes son parte del espacio público, la NADF-006-RNAT-2016 considera a las áreas verdes “como una sistema integral viviente”, en donde la ciudadanía lleva a cabo su fomento, mejoramiento y mantenimiento; lo cual hace que las contribuciones que realizan las áreas verdes, se apeguen mucho a las funciones que se dieron a conocer anteriormente, además; las considera como servicios ambientales, y no sólo como función social; a diferencia de la Ley de Desarrollo Urbano de la Ciudad de México, en su Artículo 7; donde considera a las áreas verdes dentro del equipamiento urbano y lo clasifica como áreas de deporte y recreación.

La Ciudad de México ha realizado inventarios que le ha permitido estimar las áreas verdes, todas ellas mediante imágenes satelitales que a continuación se describen. Para inicios del siglo XXI hasta la fecha, se han realizado tres inventarios para determinar la superficie de las áreas verdes, que, si bien son estimaciones, pues sólo se ha considerado aquellas que tienen altos niveles ambientales, sociales y económicos:

- a) El primero, realizado por el Centro de Investigación en Geografía y Geomática Ing. Jorge L. Tamayo (CentroGeo) por parte de la Secretaria de Medio Ambiente (SMA) en el año 2002 llamado *Inventario de Áreas Verdes urbanas del Distrito Federal*; mediante imágenes satélites IKONOS del año 2000, realizó un estudio de las áreas verdes en suelo urbano mayores a los 120 m², clasificándolas como árboles y pastos/arbustos (Tabla 1).

DELEGACIÓN	AREA km ² (*)	Total áreas verdes km ²	Áreas verdes % sup. Delegación	% Zonas arboladas	% Zonas de pastos y arbustos	Áreas verdes por habitante M ²	Zonas arboladas por habitante M ²	Población 2000 %
Alvaro Obregón	61.12	24.59	40.2	64.5	35.5	35.8	23.1	8.1
Azcapotzalco	33.51	4.28	12.8	54.7	45.3	9.7	5.3	5.2
Benito Juárez	26.51	1.19	4.5	99.0	1.0	3.3	3.3	4.2
Coyoacán	54.01	20.13	37.3	76.7	23.3	31.4	24.1	7.5
Cuajimalpa	15.08	5.55	36.8	46.4	53.6	36.7	17.0	1.8
Cuauhtémoc	32.67	1.81	5.5	74.0	26.0	3.5	2.6	6.1
Gustavo A. Madero	87.29	14.26	16.3	47.3	52.7	11.5	5.4	14.5
Iztacalco	23.12	2.25	9.7	54.7	45.3	5.5	3.0	4.8
Iztapalapa	113.37	18.32	16.2	27.1	72.9	10.3	2.8	20.8
Magdalena Contreras	14.08	1.82	12.9	69.2	30.8	8.3	5.7	2.6
Miguel Hidalgo	47.69	8.89	18.6	57.3	42.7	25.2	14.4	4.1
Tláhuac	19.17	2.27	11.8	4.4	95.6	7.5	0.3	3.6
Tlalpan	48.29	11.80	24.4	88.9	11.1	20.3	18.0	6.8
Venustiano Carranza	33.87	5.23	15.4	23.5	76.5	11.3	2.7	5.4
Xochimilco	22.90	5.89	25.7	60.8	39.2	15.9	9.7	4.3
DF	632.66	128.28	20.4	55.9	44.1	15.1	8.4	100.0

Tabla 1. Total de áreas verdes por alcaldía en la Ciudad de México. Fuente: Presente y futuro de las áreas verdes y del arbolado de la Ciudad de México.

De acuerdo a este estudio, la Ciudad de México contaba con 128.28 km² de áreas verdes, en donde el 55.9 % son zonas arboladas y 44.1% son pastos y arbustos, distribuidos en la ciudad; excepto la alcaldía de Milpa Alta debido a que está en suelo de conservación, es decir, un área que por su naturaleza está estrictamente libre de urbanización.

- b) El segundo, realizado por el CentroGeo por parte de la Procuraduría Ambiental y del Ordenamiento Territorial (PAOT) en el 2006 llamado *Estudios de corredores verdes* como estudio consecuente del año 2002; se realizó una estimación de las áreas de influencia (aproximadamente 12 m de distancia) de los corredores verdes, de acuerdo a su tamaño.
- c) El tercero, realizado por la PAOT y colaboración de la Universidad Autónoma Chapingo en el año 2009 llamado *Inventario de áreas verdes*; por medio de imágenes satelitales *QuickBird* de los años 2007 y 2008, en donde se consideran áreas verdes mayores a 50 m², tanto en suelo urbano

(árboles, pastos/arbustos, áreas deportivas) como en suelo de conservación (árboles, pastos/arbustos, zonas agrícolas). (Tabla 2).

Delegación	Superficie delegacional (SU+SC) (km ²)	Superficie total de AV (arbolado y pastos) (m ²)	Superficie total de arbolado (m ²)	Superficie total de pastos y arbustos (m ²)	Proporción arbolado (%) respecto a la superficie delegacional	Proporción pastos y arbustos (%) respecto a la superficie delegacional
Álvaro Obregón	80.94	31,148,290	22,644,412	8,483,878	28.0	10.5
Azcapotzalco	33.57	4,456,612	3,640,155	816,457	10.8	2.4
Benito Juárez	26.77	2,953,281	2,860,400	92,881	10.7	0.3
Coyoacán	54.02	14,880,827	11,301,298	3,579,529	20.9	6.6
Cuajimalpa	74.55	50,379,761	42,561,717	7,818,044	57.1	10.5
Cuauhtémoc	32.49	3,662,124	3,165,789	496,335	9.7	1.5
Gustavo A. Madero	87.78	19,250,491	10,036,296	9,214,195	11.4	10.5
Iztacalco	23.08	2,885,196	1,748,992	1,136,204	7.6	4.9
Iztapalapa	113.25	18,613,990	6,151,120	12,462,870	5.4	11.0
La Magdalena Contreras	75.57	57,611,083	51,818,352	5,792,731	68.6	7.7
Miguel Hidalgo	46.99	14,673,613	12,439,308	2,234,305	26.5	4.8
Milpa Alta	282.72	176,831,504	135,506,673	41,324,831	47.9	14.6
Tláhuac	85.65	11,013,139	901,222	10,111,917	1.1	11.8
Tlalpan	307.84	168,352,603	139,097,462	29,255,141	45.2	9.5
Venustiano Carranza	33.89	6,044,086	2,631,040	3,413,046	7.8	10.1
Xochimilco	126.56	34,977,404	14,608,902	20,368,502	11.5	16.1
Distrito Federal	1,485.67	617,734,004	461,133,138	156,600,866	31.0	10.5

Tabla 2. Total de áreas verdes por alcaldías en la Ciudad de México. Fuente: Presente y futuro de las áreas verdes y del arbolado de la Ciudad de México.

De acuerdo a la PAOT (2010), el estudio realizado en el 2009 determinó las áreas verdes en el suelo urbano y suelo de conservación de todas las delegaciones de la Ciudad de México, excepto Milpa Alta (por no tener suelo urbano).

El resultado concluyó que las áreas verdes, para zonas arboladas cubrían de 9.96 m²/habitante como pastos y arbustos de 4.44 m²/habitante, arrojando un índice total de 14.4 m² por habitante para una población de 7 836 485 (INEGI, 2005) en una superficie de 113 km², donde se incluyó tanto áreas verdes públicas

como privadas. De acuerdo a este estudio, algunos espacios verdes no han sido afectados; ya que están considerados como Áreas Naturales Protegidas (ANP) o bosques urbanos y Áreas de Valor Ambiental. Además, se mencionan a las Áreas verdes complementarias, que pertenecen a los espacios arbóreos ligados a la red vial y que se asignan a los camellones, glorietas y esquinas de calle.

Este índice, presenta un rango superior a lo que la OMS establece, sin embargo; las áreas verdes no se encuentran distribuidas espacialmente en toda la Ciudad de México de manera homogénea. Existe una distribución espacial que está ligada al nivel socioeconómico, a manera que las locaciones periféricas de la ciudad, con ingresos menores, son aquellas que tienen menos áreas verdes; pues las áreas verdes son vistas como algo lujoso y no cubre la demanda de vivienda. Por ejemplo, delegaciones como Tlalpan y Miguel Hidalgo alcanzan un número superior a los 10 m²/habitante; mientras que Iztapalapa y Cuajimalpa de Morelos el índice está por debajo de los 2 m²/habitante.

Las delegaciones que se encuentran en la parte sur de la Ciudad de México tienen gran parte de los parques nacionales y reservas, o en su defecto, como componente del suelo de conservación.

2.5. Tipología de las áreas verdes

Según Falcón (2007), las áreas verdes se dividen en privadas o de acceso restringido y público o de libre acceso, pues estos lugares son parte del espacio público.

Siguiendo esta clasificación, Salvador (2003) citado en Flores y González (2010) existen diferentes grupos de áreas verdes que se subdividen, propone de la siguiente manera; corredores verdes (árboles y pastizales) a lo largo de avenidas, calles y vías de tren; como espacio público destacan los parques, jardines, plazas ajardinadas, deportivos ajardinados y cementerios; como espacio privado se incluye los jardines y azoteas verdes de residencias y edificios; viveros forestales,

huertos, espacios agrícolas y terrenos baldíos con vegetación; y finalmente, cinturones verdes que rodean las ciudades como el Parque Nacional Cumbres del Ajusco en la Ciudad de México.

En Ezcurra, Pisanty y Mazari (2006), citado en Suárez et al. (2011), se menciona que dentro de la Ciudad de México existen, por lo menos, cinco tipos de áreas verdes; reservas naturales y áreas naturales protegidas; campos de cultivo y pastoreo; parques urbanos y jardines; jardineras en aceras, avenidas y camellones de bulevares; y terrenos baldíos.

Cabe mencionar que la clasificación de las áreas verdes no es de manera general, dependerá de factores ecológicos, uso social y político. Cada ciudad realiza su propia clasificación mediante las diferentes organizaciones, planes e instituciones que realicen estudios sobre el tema en cuestión. Flores-Xolocotzi y González-Guillén (2010), estructuran una clasificación de las áreas verdes, que de acuerdo con la Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL, 1999) establece una tipología de áreas verdes, con sus características y uso social (Tabla 3).

Tipología México	Características	Meta social
Juegos infantiles	Áreas de juegos infantiles y de descanso. De 1,250 a 5,500 m ² .	Dirigido a niños. En localidades a partir de 2,500 habitantes.
Jardín vecinal	Áreas de juegos infantiles y de descanso. De 2,500 a 10,000 m ² .	Dirigido a la población en general. En localidades mayores de 5,000 habitantes.
Parque de Barrio	Áreas de juegos infantiles, recreación diversa. De 11,000 a 44,000 m ² .	Dirigido a la población en general. En localidades mayores de 10,000 habitantes.
Parque urbano	Actividades recreativas diversas, estacionamiento, otros servicios. De 9.1 a 72.8 ha.	Población en general. En localidades mayores de 50,000 habitantes.

Tabla 3. Tipología de las áreas verdes. Fuente: Planificación de sistemas de áreas verdes y parques públicos. Flores-Xolocotzi y González-Guillén (2010).

Por otra parte, la Procuraduría Ambiental y del Ordenamiento Territorial (PAOT) en su *Inventario de áreas verdes* (2010) clasifica a las áreas verdes por su tamaño en cinco grupos (Tabla 4).

Tamaño	Rango en m ²
Áreas muy grandes	11,521 – o mayor
Áreas grandes	2,881 -11,520
Áreas medianas	961 – 2,880
Áreas pequeñas	321 – 960
Áreas muy pequeñas	160 – 320

Tabla 4. Clasificación de áreas verdes urbanas. Fuente: Presente y futuro de las áreas verdes y del arbolado de la Ciudad de México. PAOT (2010).

Un estudio reciente realizado por Ayala-Azcárraga, Díaz y Zambrano (2019) en el artículo *Characteristics of urban parks and their relation to user well-being*, se clasifica a las áreas verdes en tres tamaños medidos en hectáreas: pequeñas, medianas y grandes; siendo ésta la medida a implementar en este trabajo (Tabla 5).

Abercrombie (1943) citado en Flores-Xolocotzi (2017) denomina espacio verde abierto en su propuesta de planeación urbana en Londres, considerando: centros deportivos y canchas deportivas, parques recreativos, vías peatonales verde, los cuales señala que para ser considerados se necesita cubrir una extensión en la superficie de 8094 m² para los espacios deportivos y las áreas restantes de 1348 m² a 2698 m² por cada 1000 habitantes.

Size category (ha)	Urban park	Location in Mexico City		m ²	ha
		District	Neighborhood		
Small (< 1)	Playground Chicoasen	Tlalpan	Heroes de Padierna	3119	0.31
	Oasis Park	Xochimilco	Amp. Tepepan	4430	4.43
	Garden of Art	A. Obregon	San Angel	9030	9.03
Medium (1.1–4.5)	Masayoshi Ohira Park	Coyoacan	Country Club	10,988	1.09
	Cri-Cri Park	Iztapalapa	S. C. Meyehualco	32,070	3.20
	Lincoln Park	M. Hidalgo	Polanco	44,497	4.44
Large (> 4.6)	Deer's Park	B. Juarez	Portales Norte	82,036	8.20
	Mexico Park	Cuahutemoc	Hipodromo Condesa	88,000	8.80
	Sprouting Fountains Park	Tlalpan	Fuentes Brotantes	100,000	10.0

Tabla 5. Clasificación de parques urbanos por tamaño en la Ciudad de México. Fuente: *Characteristics of urban parks and their relation to user well-being*. Ayala-Azcárraga, Díaz y Zambrano (2019).

CATEGORIA	SUBCATEGORIA
Equipamiento urbano con vegetación	Asistencia Social con vegetación CDMX Deportivos Instituciones académicas privadas y publicas Panteones Unidades habitacionales
Forestación urbana	
Parques, arboledas y alamedas	Camellones centrales y laterales Jardines públicos Parques, plazas, arboledas
Vivero	
Áreas con características de protección	Zona de recarga de manto acuíferos
Áreas con categoría de protección	ANP y AVA
Áreas con vegetación <u>reminiscente</u>	Cerros y colinas Depresiones orográficas
Áreas verdes complementarias o ligadas a la red vial	Camellones centrales y laterales <u>Veg.</u> Arbórea, arbustiva y herbácea de glorietas Vialidades
Áreas verdes con estructura urbana	Azoteas verdes
Áreas verdes urbanas fragmentadas	Bordos y canales Camellones centrales y laterales Jardineras públicas y privadas Terrenos baldíos

Tabla 6. Clasificación de áreas verdes de la Ciudad de México. Fuente: https://datos.cdmx.gob.mx/explore/dataset/cdmx_areas_verdes_2017/information/

Sin embargo, como muchos autores proponen, las clasificaciones que se proponen están dentro de un marco europeo, y que no considera la parte cualitativa de la vegetación ni el aspecto social, sólo está enfocado en el carácter cuantitativo. Recientemente, la Secretaría del Medio Ambiente (SEDEMA) publicó en el geoportal Datos Abiertos Ciudad de México una base de datos sobre las áreas verdes de la Ciudad de México dividida en diez categorías y cada una con su subcategoría, tal y como en la Tabla 6 se muestra. Dicha clasificación es la que se considera dentro de este trabajo, es decir, sean espacios públicos o privados.

2.6. Accesibilidad a las áreas verdes

Estar en contacto con algún tipo de área verde, es sin duda, un derecho de todos los habitantes de alguna ciudad o zona rural, y es por esa razón por la que todos los ciudadanos deberían establecer algún tipo de contacto con la naturaleza en sus actividades cotidianas, sin la necesidad de realizar algún esfuerzo para poder realizar alguna actividad dentro de ella, ya sea por trayectoria de viaje, costo o alguna otra restricción.

La planificación de las áreas verdes ha ido tomando importancia a través del tiempo, de manera que la conectividad y accesibilidad a ellas dependerá de su distribución espacial y de la demanda de los usuarios; por lo que es necesario que dentro de la planificación se considere las posibles barreras, o impedancia, que llegase a existir; entre los principales obstáculos, es la distancia y, con ello el tiempo de traslado de un punto a otro.

Como se ha mencionado anteriormente, la conectividad no es independiente de la accesibilidad. Cuando la conectividad aumenta, la extensión de las áreas verdes se ve reducida; y así contribuyen a que los usuarios disfruten más de ellas; que aquellas que se encuentran más alejadas, es decir, en zonas periféricas. En diversos estudios, se ha demostrado que la distribución espacial de las áreas verdes no es homogénea, la cual esta relaciona con el nivel socioeconómico de los habitantes de las ciudades. Debido a que, en las zonas periféricas de las ciudades, generalmente se asientan grupos de escasos recursos económicos, las áreas verdes también se ven reducidas (Ojeda, 2012).

La estructura de las calles, como espacio público, determina la forma y la función dentro de una red urbana, así como el grado de conectividad entre ellas. Su geometría y destinos, están influenciados por la población que habita en ellas, la planificación urbana, el tipo de transporte que circula, la construcción del pavimento y de los edificios entorno, principalmente. La manera en la que las personas se trasladan, moverse de una locación a otra para realizar actividades

cotidianas, implica que las calles se hagan dinámicas y por ello es necesario que las calles sean lo suficientemente fuertes para que la circulación sea satisfactoria. Por ello, la palabra conectividad se hace presente cuando un individuo requiere atravesar de un punto A, a un punto B, y así sucesivamente.

La accesibilidad a las áreas verdes es cada vez más importante para los seres humanos, por diferentes razones: salud, recreación, descanso, etc., debido a los beneficios que proveen, por lo tanto, debería existir algún tipo de espacio verde a los alrededores de las viviendas, independientemente de su nivel socioeconómico, género, raza, edad, religión, por mencionar algunas. Una buena accesibilidad a los espacios públicos es importante para la calidad de vida de los residentes una locación, más aún cuando estos espacios públicos cuentan con vegetación, que hagan a la población una agradable visita.

No obstante, la accesibilidad es un término ligado a la distancia. La distancia en la se encuentra cada espacio verde y el usuario, Barker (1997) considera que debe ser alcanzable sin importar el medio de transporte que se utilice, ya sea por transporte público, automóvil, bicicleta o, inclusive, caminando. En García y Lara (2016) indica que los espacios abiertos no se distribuyen de manera homogénea, ya que dependen de las condiciones socioeconómicas, principalmente. En varios estudios, la asignación de los espacios públicos se ven en menor número o son nulos en locaciones donde existe pobreza. Esto, en consecuencia, la accesibilidad a las áreas verdes es menor, que aquellas donde las condiciones de nivel socioeconómico alto se distribuyen.

Varios estándares se han evaluado y asignado para que los habitantes de una locación tengan una mayor accesibilidad, en términos topográficos; tal y como Barker (1997) y Handley et al. (1997) señalan algunas consideraciones que las áreas verdes urbanas deben tener, incluyendo un diámetro establecido y un límite de área verde, tanto para ciudades como área rural.

- Para áreas verdes naturales, los usuarios deben estar a no más de 300 m (en línea recta), teniendo como punto de partida, el lugar donde viven.
- Deberá existir una reserva natural, de al menos 1 ha, por cada 1000 habitantes.
- Áreas verdes accesibles en radios diferentes: 2 km para 20 ha, 5 km para 100 ha y 10 km para 500 ha; a partir del hogar.

Aunque, por otra parte, estas consideraciones son exclusivas para grandes áreas, no se podría dejar a las áreas con menor superficie, porque es necesario considerar el contexto geográfico, social, cultural y hasta económico; y no reconocer, sea grande o pequeño, el beneficio que las áreas menores a las establecidas contribuyen, tanto al medio ambiente como a los habitantes. Un ejemplo, los espacios verdes menores a 5000 m², llamados parques de barrio porque suelen encontrarse dentro de una colonia o segmento de viviendas; poseen grandes efectos socioculturales y ecológicos, además; en comparación de las distancias establecidas anteriormente, la interacción con ellas es más próximo y frecuente.

En términos generales, cuando las áreas verdes sean más cercanas al lugar donde los ciudadanos habitan o realizan alguna actividad muy frecuente, la interacción entre ellos será más cercana, que aquellas áreas que se encuentren en distancias mayores. Esta última condición, puede estar determinada por diversos factores, uno de ellos es la percepción de la distancia para cada persona.

Existe una distancia máxima considerada que los usuarios están dispuestos a caminar entre un nodo y otro, que va desde los 400 hasta los 600 m que aproximadamente se recorre en un tiempo de 15 minutos. No obstante, dependería de las posibles barreras que se presenten durante el trayecto y de otros factores como la edad, género y movilidad motriz, por ejemplo. En general, la distancia máxima aceptable desde un punto origen hacia un área verde puede ser de 400 m, en un tiempo de 5 minutos caminando.

Las áreas verdes con mayor número de hectáreas se encuentran más alejadas del núcleo de la población o donde la concentración de la población es mayor, por lo tanto, el número de estos espacios verdes es más reducido, en comparación con aquellas áreas verdes menores –como los parques de barrio– que presentan una mayor conectividad y accesibilidad para los usuarios, ya que el tiempo de traslado no excede a los 15 minutos y la distancia, considerada de 400 m, es apropiada para realizar el recorrido caminando (Sorensen et al., 1998).

El tiempo o la distancia que se requiere para acceder a un espacio público mencionados líneas arriba, puede variar de acuerdo a la construcción de la red urbana, topografía del terreno, tipo de pavimentación de calles, la condición física de los habitantes en una determinada área, entre otros factores; que pueden alterar los resultados de la accesibilidad.

En México, de acuerdo al área de influencia de un espacio público que establece la SEDESOL (2010) en el *Documento Diagnóstico de rescate de espacios públicos*, recomienda una radio de 400 metros, el cual permite la mayor probabilidad para que las personas puedan acudir a un espacio público (Figura 7).

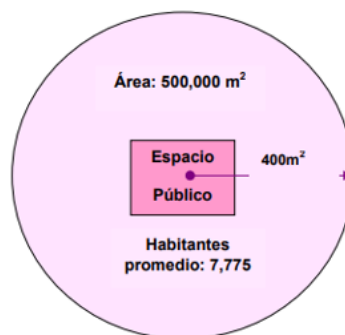


Figura 7. Área de influencia de un espacio público. Fuente: Documento Diagnóstico de rescate de espacios públicos. SEDESOL (2010).

Del mismo modo, la Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano (SEDATU) define el término área de influencia como el marco de referencia geográfico circundante al espacio público con un radio de 400 m, publicado en el

Diario Oficial de la Federación en el Capítulo 1, Artículo 1, *Reglas de Operación del Programa Rescate de Espacios Públicos, para el ejercicio fiscal 2015 y subsecuentes* el 30 de diciembre de 2014.

Sin embargo, en un estudio reciente realizado por Suárez, Galindo y Reyes (2019) como resultado de la *Encuesta de Movilidad y Transporte de la Ciudad de México, 2019* destaca que el tiempo promedio en el que las personas se trasladan de un punto origen a otro punto destino es de 10 minutos, y que, traduciendo a la distancia recorrida, equivale a caminar 800 m (Tabla 7).

Por otro lado, la accesibilidad no sólo es alcanzable o no de manera física. Las condiciones de accesibilidad también están influenciadas por el uso que los usuarios les den a estos espacios, de acuerdo a los diversos grupos de individuos que una locación presente, es decir, el uso varía de acuerdo a la edad, género o capacidades físicas; tal y como en el cuadro anterior, en donde las caminatas con un tiempo máximo de 10 minutos representan poco más de la tercera parte de la población en la Ciudad de México.

<i>Tiempo de caminata</i>		<i>0 a 10 min.</i>	<i>11 a 20 min.</i>	<i>21 a 30 min.</i>	<i>31 a 60 min.</i>	<i>Más de 60 min.</i>	<i>Total</i>
Al trabajo	Hombres	37.8	23.9	20.2	9.2	9.0	100
	Mujeres	51.0	29.1	17.8	2.1	0.0	100
	<i>Total</i>	<i>42.6</i>	<i>25.8</i>	<i>19.3</i>	<i>5.8</i>	<i>6.4</i>	<i>100</i>
Realizar compras	Hombres	40.1	37.8	12.3	3.1	6.7	100
	Mujeres	44.0	35.9	10.9	3.5	5.7	100
	<i>Total</i>	<i>54.3</i>	<i>30.9</i>	<i>7.3</i>	<i>4.4</i>	<i>3.1</i>	<i>100</i>
Llevar a alguien	Hombres	30.0	42.7	13.5	13.8	0.0	100
	Mujeres	37.7	41.2	10.4	7.9	2.8	100
	<i>Total</i>	<i>36.5</i>	<i>41.5</i>	<i>10.9</i>	<i>8.8</i>	<i>2.3</i>	<i>100</i>

Tabla 7. Tiempos de caminata por propósito de viaje y por sexo en la CDMX (%). Fuente: Cómo nos movemos en la Ciudad de México. Suárez, Galindo y Reyes (2019).

Este último parámetro, es el que se utilizó para realizar el estudio en este trabajo. Si bien la impedancia está dada por el tiempo que las personas están dispuestas a caminar, el mismo autor en la publicación *Los mexicanos vistos por sí mismos. Entre mi casa y mi destino. Movilidad y transporte en México* señala que una persona promedio se mueve a una velocidad de 5 km/h. Es decir, en 800 metros, se recorren en 10 minutos. Por lo tanto, este dato será el parámetro base para realizar el estudio de la accesibilidad a las áreas verdes en la Ciudad de México.

2.7. Urban Network Analysis (UNA): una herramienta para medir el análisis de redes urbanas

La herramienta de Urban Network Analysis es un plugin de acceso libre y de código abierto para ArcGIS, desarrollado por investigadores del Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT, por sus siglas en inglés) en el City Form Lab (Sevtsuk y Mekonnen, 2012). La herramienta UNA integra tres características importantes:

- a) Representa la geometría de la red urbana y la distancia entre nodos por medio de los bordes; de manera que utiliza algoritmos para encontrar aquellas rutas más cortas de aquellas que estén fuera de un radio establecido por el usuario.
- b) A diferencia de otras herramientas para realizar análisis de redes, donde sólo se emplean dos atributos (arcos y nodos), ésta incluye un tercer elemento: los edificios.
- c) La herramienta permite al usuario la asignación de un peso ponderado a los edificios, que puede ser el número de personas dentro de él, el volumen, etc.; de manera que el análisis sea más preciso.

Esta herramienta modela el entorno edificado analizando patrones espaciales, que mediante algoritmos matemáticos, ilustran la funcionalidad de una red en un espacio urbano, usando tres elementos básicos: arcos (*edges*),

definidos por las rutas donde existe un flujo de recursos (mercancía, personas, etc.) y pueden viajar por calles o caminos; nodos(*nodes*), que son las interconexiones entre uno y más arcos en el espacio; y edificios (*buildings*), representados por un punto o polígono, que son básicamente la medida de análisis y pueden ser espacios públicos, estaciones, servicios públicos, etc.

Estos elementos básicos pueden ser medidos a partir de cualquier propiedad que se le asigne una determinada importancia, dependiendo del estudio. Además, describen el diseño de la infraestructura urbana, que de manera tridimensional; representa a los edificios con su respectiva vialidad, la configuración de los espacios públicos y las calles adyacentes que los conectan.

Así, de esta manera, para los edificios se les puede atribuir parámetros tal como dimensiones (altura, volumen), número de personas que lo ocupan, tipo de establecimientos, las actividades que se desarrollan dentro de él. Cabe mencionar que, para este último parámetro, prácticamente se dividen en tres categorías: vivienda, trabajo y lugares de entretenimiento; que, a su vez, puede cambiar o intensificarse dependiendo del tiempo. En cuanto a las calles, los parámetros que se les puede asignar como medida de análisis pueden ser el sentido de vialidad, el tráfico que se acumula, características de las banquetas, etc.

Además de poder proporcionarle una ponderación a los elementos que conforman la red, también es posible añadir criterios específicos. Por ejemplo, es posible que exista un radio de distancia específico y una ponderación con mayor o menor peso, dependiendo del estudio.

Básicamente, la herramienta UNA permite medir la centralidad a través de estos métodos matemáticos; por lo que considera que los edificios se conectan a las calles permitiendo así a un transeúnte recorrer la distancia mínima a partir de la salida principal del edificio a su calle adyacente.

Las medidas de accesibilidad anteriormente mencionadas, se implementan en un SIG para su determinado análisis, recolección de datos, cálculo de indicadores en la red urbana, y finalmente, su representación cartográfica y evaluación. (Liu y Zhu, 2004).

2.7.1. Interfaz de la herramienta UNA

En esta sección se explica el funcionamiento de la herramienta UNA (Urban Network Analysis) para medir la accesibilidad a los espacios públicos abiertos; la cual está basada en tres elementos que conforma la red urbana: arcos (edges), definidos por las rutas del transporte público y la red peatonal; nodos (nodes), que son las interconexiones entre estos arcos en el espacio de trabajo; y finalmente –y punto de interés- los edificios (buildings), que en este caso serán las áreas verdes, representadas por puntos.

En la Figura 8, se observa la interfaz de las medidas de centralidad, los cuales son: alcance (Reach), índice de gravedad (Gravity Index), intercesión (Betweenness), cercanía (Closeness) y rectitud (Straightness).

Esta herramienta admite formatos vectoriales (*shape*), ya sea en geometría de polígonos o puntos, que se denominan como *Buildings*; en donde los modela como los nodos del grafo. Cuando el dato de entrada es de geometría poligonal, se asume que cada *building* conecta a una calle (es decir, a un *edge*) la cual está dentro del camino más corto y que es perpendicular al centroide de cada polígono. Cabe mencionar que la herramienta no permite trabajar con *geodatabases* (.gdb).

Otra configuración requerida es un *Building ID* de cada polígono o punto. Este atributo es un identificador de cada uno de ellos para realizar el análisis. También, permite asignar una ponderación a los edificios (*Building Weights Field*), que será dependiendo del caso de estudio, por ejemplo, el número de habitantes o empleados de un edificio, el volumen del edificio, tipo de comercio, etc.

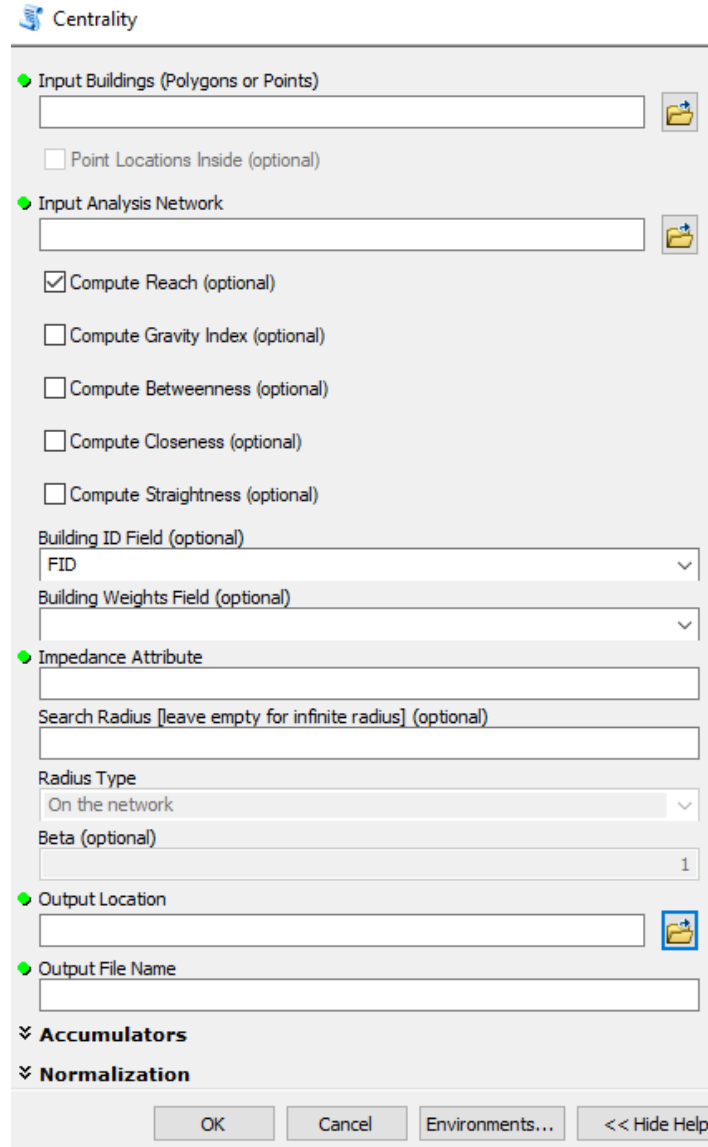


Figura 8. Interfaz de la herramienta Urban Network Analysis Toolbox. Fuente: Urban Network Analysis. A new toolbox for ArcGIS. Sevtsuk y Mekonnen (2012).

Otra configuración requerida es un *Building ID* de cada polígono o punto. Este atributo es un identificador de cada uno de ellos para realizar el análisis. También, permite asignar una ponderación a los edificios (*Building Weights Field*), que será dependiendo del caso de estudio, por ejemplo, el número de habitantes o empleados de un edificio, el volumen del edificio, tipo de comercio, etc.

Los atributos de impedancia que fueron especificados al momento de crear el *Network Dataset*, es la misma impedancia que la herramienta UNA señala en el

apartado *Impedance Attribute*, que, por default, calcula una distancia lineal entre el camino más corto y, si se indica, el radio asignado (*Search Radius*). Este último funciona como un radio de influencia, el cual considera aquellos edificios que están dentro del grafo. Tanto la impedancia como el radio que se aplica a la red, conservan las mismas unidades que fueron asignadas en el modelo de red.

Una vez que fueron configuradas estas entradas de datos anteriores la herramienta UNA procede a computar cualquiera de los cinco índices de los que dispone, mediante seis cálculos que se presentan a continuación:

1. Matriz de Adyacencia, que identifica al edificio más cercano en relación a otros edificios de todas las rutas posibles, mostrada en un archivo *.dbf*.
2. Construcción del grafo.
3. Cálculo de pesos asignados por el usuario.
4. Computación de la centralidad elegida por el usuario.
5. Tabla de resultados, que contiene una columna con el nombre de la centralidad computada, mostrada en un archivo *.dbf*.
6. Visualización de resultados.

2.8. Índices de la herramienta Urban Network Analysis (UNA)

La herramienta UNA se rige por cinco principios de centralidad: alcance (Reach), índice de gravedad (Gravity Index), intercesión (Betweenness), cercanía (Closeness) y rectitud (Straightness). Cada principio puede, además de medir las variables que se mencionaron anteriormente, ser medido con una ponderación de acuerdo a la importancia que represente, o bien, un radio de distancia específico (Figura 9).

2.8.1. Alcance (Reach)

Este principio de centralidad describe el número de edificios dentro de un radio de accesibilidad determinado en una mínima distancia (en función de su entrada principal), el cual es trazado desde el edificio de interés a sus calles

adyacentes; calculando así el número de destinos que se encuentran en este radio.

De manera matemática, indica la accesibilidad que abarca un nodo (i) (edificio) en un grafo G dentro de un radio determinado “ r ”, describiendo así todos los nodos posibles alcanzables en la distancia mínima. (Sevtsuk, 2010).

$$C^r_R[i] = |\{j \in G - \{i\}: d[i, j] \leq r\}|$$

Donde (i, j) son los nodos o edificios, G es el grafo; $d[i, j]$ representa la distancia más corta entre dos nodos; r es el radio limitado de búsqueda; $|S|$ es la cardinalidad del conjunto. Si se le agrega alguna ponderación, esta medida realizará una suma de todos los pesos asignados en lugar del número de destinos.

$$C^r_R[i] = \sum_{j \in G - \{i\}: d[i, j] \leq r} W[j]$$

Donde $W[j]$ corresponde al peso asignado al nodo j . En la Figura 10, se ilustra el índice de Alcance dentro de un radio específico, alcanzando así veinte locaciones a lo largo de él.

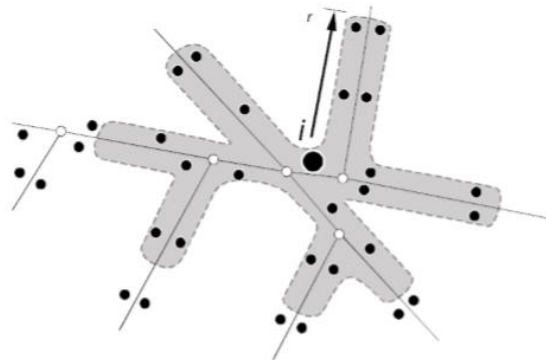


Figura 10. Gráfico del Índice de Alcance (Reach). Fuente: Urban Network Analysis. A new toolbox for ArcGIS Sevtsuk y Mekonnen, (2012).

2.8.2. Índice de Gravedad (Gravity Index)

La principal diferencia que alude al índice de Alcance, radica en que este incluye el factor de impedancia espacial para alcanzar a los diferentes destinos dentro de un radio determinado. Estos factores se refieren a costos, distancia o

tráfico dentro de una red, siendo así una de las principales medidas en planeación del transporte (Hansen, 1959). Matemáticamente, se define como:

$$C^r_R[i] = \sum_{j \in G - \{i\}; d[i,j] \leq r} \frac{1}{e^{\beta d[i,j]}}$$

Donde i, j son los nodos; G es el grafo; $d[i, j]$ representa la distancia más corta entre dos nodos; r es el radio limitado de búsqueda; $|S|$ es la cardinalidad del conjunto; β describe los efectos espaciales que existen entre dos nodos.

Expresando así, que el nodo " i " contenido en el grafo G , dentro de un radio determinado " r "; es inversamente proporcional a la distancia más corta entre cada nodo alcanzable dentro de una distancia geodésica " r ", correspondiente a la red en estudio. El exponente β controlará la distancia espacial existente (si la distancia entre dos locaciones incrementa, las interacciones entre estos disminuyen).

Si a cada edificio se le asigna un peso específico, entonces el índice de Gravedad será directamente proporcional al peso de cada edificio, definido como:

$$C^r_R[i] = \sum_{j \in G - \{i\}; d[i,j] \leq r} \frac{W[j]}{e^{\beta d[i,j]}}$$

Donde $W[j]$ corresponde al peso asignado al destino j alcanzable dentro del radio específico r .

2.8.3. Intercesión (Betweenness)

Este índice estima el potencial de transeúntes que viajan, dentro de la ruta más corta, entre un edificio y otro en un radio determinado. Básicamente, representa el nodo central de una red dentro de un determinado número de nodos, encontrando así los caminos más cortos que conectan a los arcos.

Si más de un solo camino mínimo se encuentra entre dos edificios, cada ruta equidistante será igual a la sumatoria de todos los pesos asignados. Expresado en términos matemáticos, se define como:

$$C^r_R[i] = \sum_{j \in G - \{i\}: d[i,j] \leq r} \frac{n_{jk}[i]}{n_{jk}}$$

Donde j, k son los edificios de interés; G es el grafo; $d[i, j]$ representa la distancia más corta entre dos nodos; r es el radio limitado de búsqueda; n_{jk} número de rutas más cortas entre dos edificios.

Si al análisis se le proporciona un peso específico, por ejemplo, características demográficas, determinará el potencial en las que los transeúntes viajan a dicho destino

$$C^r_B[i] = \sum_{j \in G - \{i\}: d[i,j] \leq r} \frac{n_{jk}[i]}{n_{jk}} \cdot W[j]$$

2.8.4. Cercanía (Closeness)

Determina la cercanía entre un nodo hacia sus adyacentes, dentro de la red vial, a lo largo del camino más corto en un determinado radio. El índice de Cercanía se define como el edificio i es inversamente proporcional a la distancia total desde un edificio hacia otros edificios que son alcanzables dentro de un radio limitado a lo de las rutas más cortas.

$$C^r_c[i] = \left[\sum_{j \in G - \{i\}: d[i,j] \leq r} d[i, j] \right]^{-1}$$

Considerando que el índice de Intercesión estima el potencial del tráfico que una locación asume en una red, el índice de Cercanía indica que tan cerca se encuentra cada una de las locaciones entorno a las demás en un radio específico. Aplicando alguna ponderación a los edificios, como una variable socioeconómica, este índice se expresa de la siguiente manera:

$$C^r_c[i] = \left[\sum_{j \in G - \{i\}: d[i,j] \leq r} d[i, j] \cdot W[j] \right]^{-1}$$

Cabe mencionar que, si no existiera algún radio determinado, los edificios más cercanos al centro de la red, dará como resultado los valores más altos de la ponderación asignada.

2.8.5. Rectitud (Straightness)

Este índice de centralidad describe la conexión entre dos nodos en el camino más corto de una línea recta - dentro de una distancia euclidiana- que permite obtener una mayor accesibilidad y centralidad. Expresándose como:

$$C^r_s[i] = \sum_{j \in G - \{i\}: d[i,j] \leq r} \frac{\delta[i,j]}{d[i,j]}$$

Donde $\delta[i,j]$ se define como la línea recta entre dos edificios; $d[i,j]$ es la distancia más corta entre los nodos.

Si existiera un radio entre la distancia euclidiana y la distancia geodésica entre cada locación, la impedancia puede ser estimada solo si es considerada como una distancia lineal y no topológica.

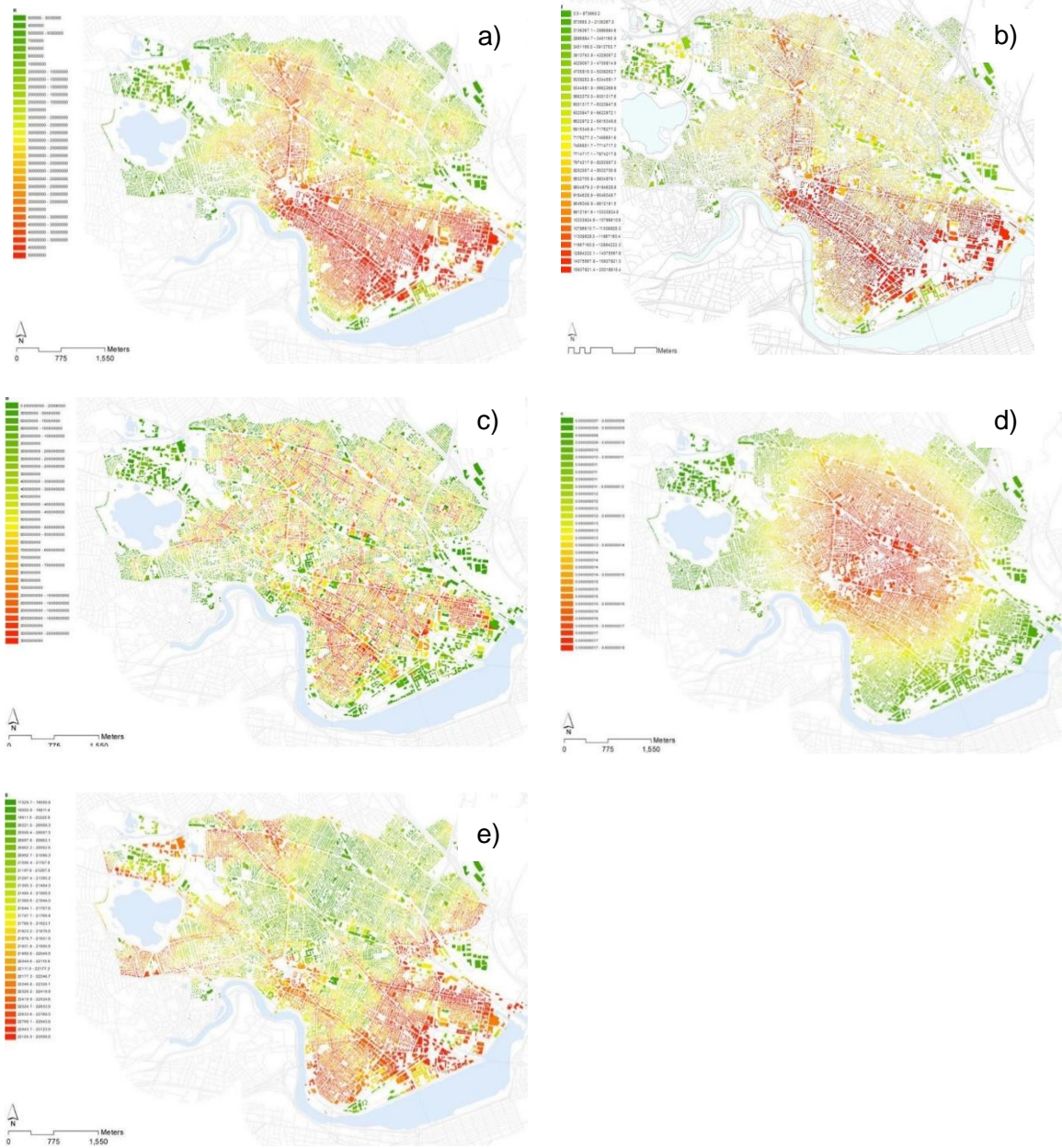


Figura 9. Medidas de centralidad con la herramienta Urban Network Analysis (UNA). a) Alcance (Reach) b) Índice de gravedad (Gravity Index) c) Intermediación (Betweenness) d) Cercanía (Closeness) e) Rectitud (Straightness). Fuente: Urban Network Analysis. A new toolbox for ArcGIS. Sevtsuk y Mekonnen (2012).

CAPÍTULO III. CASO DE ESTUDIO I: TRANSPORTE PÚBLICO Y ESPACIOS ABIERTOS

3.1. Planteamiento del problema

El transporte público en la Ciudad de México se ha convertido en un sistema masivo para poder llegar a diferentes lugares de interés. En este estudio se plantea analizar el grado de accesibilidad que el usuario enfrenta al utilizar el sistema de transporte colectivo público para acudir a las diferentes áreas verdes medianas y grandes que existen en la ciudad, considerando el tiempo como impedancia.

3.2. Adquisición de datos

Esta tesis se desarrolló en un entorno de Sistema de Información Geográfica a partir de datos vectoriales, en formato *shape*, obtenidos en distintos portales de información geográfica: Instituto Nacional de Geografía y Estadística (INEGI), Datos Abiertos Ciudad de México y OpenStreetMap (OSM).

Estas capas contienen información geoespacial, es decir, contienen atributos (tabla de atributos) o características de acuerdo a la temática de la capa, además de que cada atributo tiene un identificador único, es decir, un ID. A continuación, se presenta una tabla en la que se muestra los datos adquiridos de las fuentes mencionadas para el análisis de la accesibilidad a los espacios abiertos (Tabla 8).

Se realizó una selección de atributos, en aquellas capas que contenían información geográfica de todo el país, para que permitiera elegir el área de interés. De acuerdo al catálogo de Entidades Federativas del Servicio de Administración Tributaria (SAT), la Ciudad de México tiene la clave 09. Por lo tanto, con la herramienta *Select by Attributes* se realizó una consulta para seleccionar únicamente los atributos que pertenecen a la Ciudad de México.

NOMBRE DE LA CAPA	NOMBRE DEL ARCHIVO	FUENTE
Límite CDMX	División política estatal 1:250000. 2015	INEGI, (2017)
Transporte público	Líneas de metro	Datos Abiertos Ciudad de México, (2019)
	Líneas metrobús	Datos Abiertos Ciudad de México, (2018)
	Rutas y corredores del transporte público concesionado	Datos Abiertos Ciudad de México, (2019)
	Transporte Mexiligero	OSM
Áreas Verdes CDMX	Áreas verdes de la Ciudad de México	Datos Abiertos Ciudad de México, (2019)

Tabla 8. Datos para medir la accesibilidad a los espacios abiertos a través de la red del transporte público. Fuente: Elaboración propia.

Los datos mostrados en la tabla antes mencionada están contenidos en un sistema de coordenadas geográfico con datum WGS84. Debido a que el estudio está orientado sólo para la Ciudad de México, se requirió establecer una proyección cartográfica; por lo tanto, se designó la proyección UTM Zona 14 Norte, porque las zonas que rigen a México van desde la Zona 11 hasta la Zona 16, y la Ciudad de México se encuentra ubicada dentro de la Zona 14.

3.3. Delimitación del área de estudio

Una vez que los datos están contenidos en la proyección UTM Zona 14 Norte, se procedió a realizar la extracción de las capas correspondientes a la Ciudad de México.

Para el análisis, se consideró utilizar todas las categorías disponibles del portal de Datos Abiertos Ciudad de México, conforme al marco categorizado de la Secretaría del Medio Ambiente (SEDEMA). Posteriormente, se añadió un nuevo campo llamado Superficie la cual está calculada en hectáreas con la ayuda de la herramienta *Field Calculator*. Además, un nuevo campo numérico llamado CAT_AV fue añadido; el cual contiene la clasificación que en Ayala-Azcárraga, Díaz y Zambrano. (2019) se define para agrupar las áreas pequeñas, medianas y grandes; asignando el número 1,2 y 3, respectivamente.

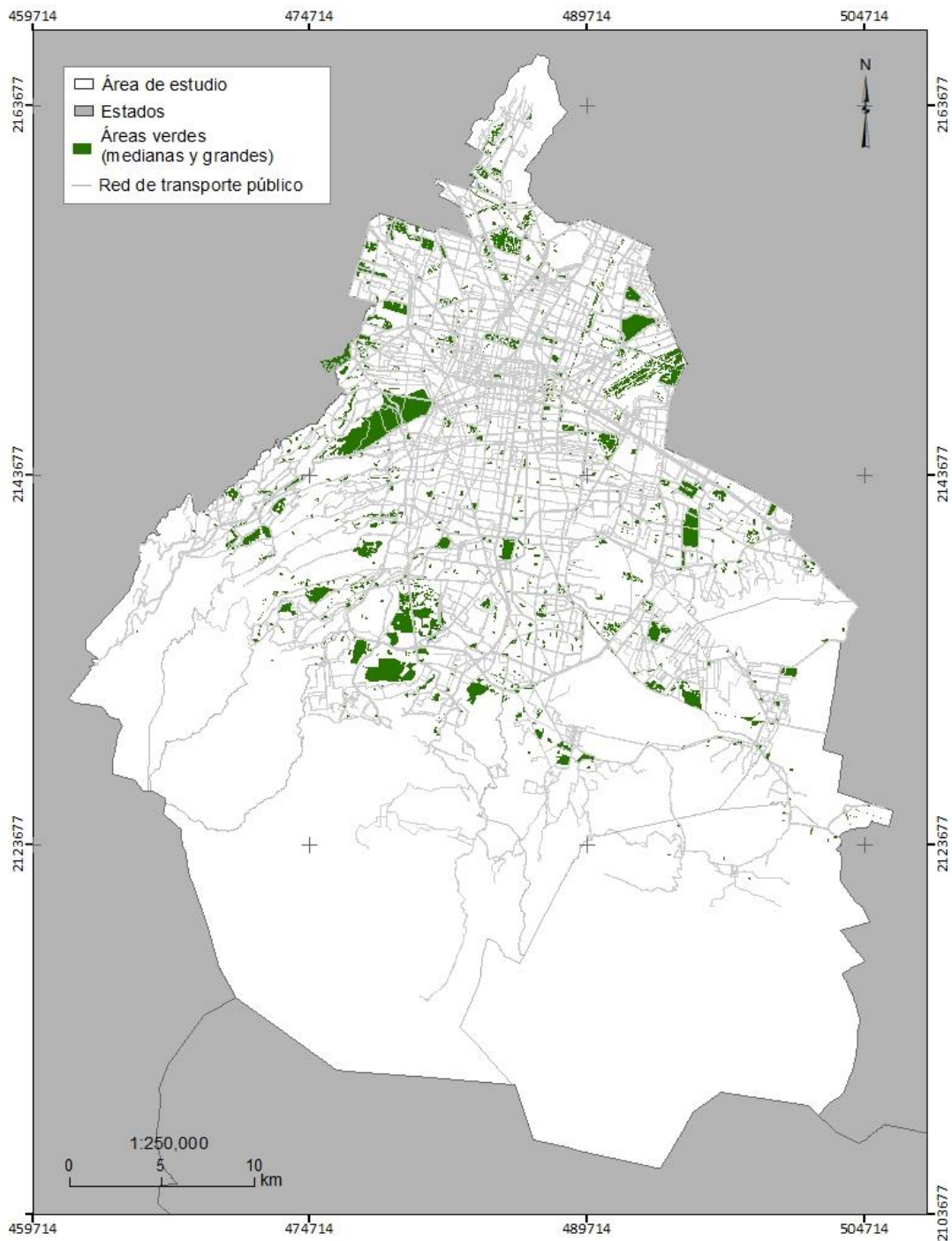


Figura 11. Red modelada para el transporte público de la Ciudad de México.
Fuente: Elaboración propia.

Con la finalidad de realizar este caso de estudio para la toda la Ciudad de México, se decidió trabajar solamente con las categorías 2 y 3, es decir, las áreas

verdes medianas y grandes, respectivamente, tal como se representa en la Figura 11.

3.4. Creación de un Network Dataset para la red de transporte público

La creación de una red modela las calles o una red de transporte. Se crean a partir de entidades de origen, que pueden incluir entidades simples (líneas y puntos) y giros, y almacenar la conectividad de las entidades de origen; creando un archivo con extensión *.nd*. (ESRI). Para poder utilizar este apartado es necesario tener la extensión ArcGIS Network Analyst. Las redes, dentro de una SIG, se dividen en dos grupos que permiten modelar la red en cuestión:

a) Redes geométricas

Conocida como redes de ríos o de servicios, por ejemplo, el gas, líneas de drenaje y electricidad, ductos, etc. Una característica principal es que los flujos que contiene la red circulan en una sola dirección, siendo sus nodos las válvulas, cierres o transformadores, quienes definen el diseño de la red.

b) Redes de transporte

Representan las características principales de la red urbana dentro de un espacio geográfico determinado. Al contrario de las redes geométricas, los flujos circulan de manera alterna.

La red modelada se diseñó con el fin de que siguiera una sola dirección cada tipo de transporte, que aunque en la realidad el transporte motorizado tiene la opción a cambiar de dirección de rutas (por ejemplo, cuando encuentra tráfico en las calles donde circula), se fijó así para observar el comportamiento dentro de una red idónea. Claro es, que no todas las líneas tienen conexión entre sí, y existen factores que modifican el movimiento del transporte, como el tráfico, semáforos, topes, entre otros; se modela la red sólo para el análisis de la accesibilidad a las áreas verdes dentro de la totalidad de la red masiva de transporte.

Se utilizó la herramienta de geoprocésamiento *Merge* con el fin de unir todas las líneas de transporte público. Una vez unidas las capas, se recurrió a la herramienta *Clip* para recortar las rutas correspondientes con el límite de la Ciudad de México. Adicionalmente, se añadieron tres campos nuevos a la tabla de atributos:

- a) Longitud, con la finalidad de recalculer la longitud en metros de la red, la cual será la impedancia a considerar.
- b) Velocidad, basada en el promedio con la que se traslada de un punto a otro en el transporte público; siendo una constante de 200 m/min.
- c) Tiempo, calculado por la distancia entre la velocidad medido en minutos.

Para realizar el modelo, en *ArcCatalog* existe una opción llamada *New Network Dataset*, y se dieron las siguientes instrucciones:


- a) restricción de los giros;
- b) calles unidireccionales;
- c) la impedancia para este modelo es el tiempo;
- d) y el nombre de las rutas (instrucción para conducir).

Dentro de estas indicaciones se omitió la elevación, pues no existen datos de elevación dentro de la red a modelar.


El resultado obtenido del modelo es la red misma con extensión *.nd*, la cual contiene todas las instrucciones definidas por el usuario y los nodos que unen a cada ruta de transporte.

3.5. Aplicación de la herramienta Urban Network Analysis Toolbox

Todos los índices mencionados a lo largo del texto fueron utilizados para este primer caso. Las áreas verdes se mantuvieron como puntos y no se les asignó ningún radio (Figura 12).

Input Buildings (Polygons or Points)
 

Point Locations Inside (optional)

Input Analysis Network
 


Compute Reach (optional)

Compute Gravity Index (optional)

Compute Betweenness (optional)


Compute Closeness (optional)

Compute Straightness (optional)

 Building ID Field (optional)


Building Weights Field (optional)

Impedance Attribute

 Search Radius [leave empty for infinite radius] (optional)

Radius Type

Beta (optional)

Output Location
 

Output File Name

Figura 12. Interfaz para el modelado de la accesibilidad a las áreas verdes grandes y medianas por medio del transporte público. Fuente: Elaboración propia.

Como primer parámetro, se añaden los espacios verdes con categoría 2 y 3, y la correspondiente red previamente modelada. En el siguiente apartado, se indica el índice que se desea modelar; de manera que se elige un ID para cada objeto, como ponderación se le indicó el campo de Superficie (Ha) y como impedancia, el tiempo (DriveTime). Por último, la ruta en la que se guardará el resultado.

CAPÍTULO IV. CASO DE ESTUDIO II: VIALIDAD PEATONAL Y ESPACIOS ABIERTOS

4.1. Planteamiento del problema

La vialidad peatonal es sin duda, el primer medio para trasladarse de un lugar a otros tantas veces se requiera. En este capítulo se analiza la accesibilidad que tienen las personas a través de la red peatonal a las áreas verdes pequeñas considerando al tiempo como impedancia, para el primer contorno urbano (alcaldías Benito Juárez, Cuauhtémoc, Miguel Hidalgo y Venustiano Carranza).

4.2. Adquisición de datos

En este capítulo se trabajaron con datos vectoriales, en formato *shape*, los cuales fueron obtenidos de distintos portales de información geográfica: Instituto Nacional de Geografía y Estadística (INEGI), CentroGEO y Datos Abiertos Ciudad de México.

A continuación, se presenta una tabla en la que se muestra los datos adquiridos de las fuentes mencionadas para el análisis de la accesibilidad a los espacios abiertos (Tabla 9).

NOMBRE DE LA CAPA	NOMBRE DEL ARCHIVO	FUENTE
Red Peatonal	Red Nacional de Caminos 2014 (RCN)	Datos Abiertos Ciudad de México, INEGI, (2019)
Alcaldías	Marco Geoestadístico, diciembre 2017	INEGI, (2016)
Límite CDMX	División política estatal 1:250000. 2015	INEGI, (2017)
Áreas Verdes CDMX	Áreas verdes de la Ciudad de México	Datos Abiertos Ciudad de México, (2019)

Tabla 9. Datos para medir la accesibilidad a los espacios abiertos a través de la red peatonal.
Fuente: Elaboración propia.

Los datos mostrados en la tabla antes mencionada están contenidos en un sistema de coordenadas geográfico con datum WGS84. Nuevamente, se le asignó la proyección cartográfica UTM Zona 14 Norte.

4.3. Delimitación del área de estudio

Se realizó la agrupación de las cuatro alcaldías contenidas en el primer contorno urbano llamado Ciudad Central de la Ciudad de México que Suárez-Lastra y Delgado-Campos (2007) propusieron para clasificar la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM).

Los contornos urbanos representan un modelo de círculos concéntricos que indica la densidad de la población dentro de un contexto histórico en relación a la distancia al centro de la Ciudad de México en función del empleo y cambios residenciales interurbanos (Núñez y Romero, 2016) (Figura 13). La clasificación que tienen los contornos urbanos son las siguientes:

- a) Ciudad Central correspondiente a las alcaldías Benito Juárez, Cuauhtémoc, Miguel Hidalgo y Venustiano Carranza.
- b) Primer contorno correspondiente a las alcaldías Álvaro Obregón, Azcapotzalco, Coyoacán, Gustavo A. Madero, Iztacalco e Iztapalapa.
- c) Segundo contorno correspondiente a las alcaldías Magdalena Contreras, Tlalpan y Xochimilco.
- d) Tercer contorno correspondiente a las alcaldías Cuajimalpa de Morelos, Milpa Alta y Tláhuac.
- e) Cuarto contorno, la mayor parte del Estado de México.

Posteriormente, se agruparon los espacios verdes que corresponden a dicho contorno urbano. Para este análisis, se consideró modelar las áreas verdes con categoría 1, es decir, pequeñas.

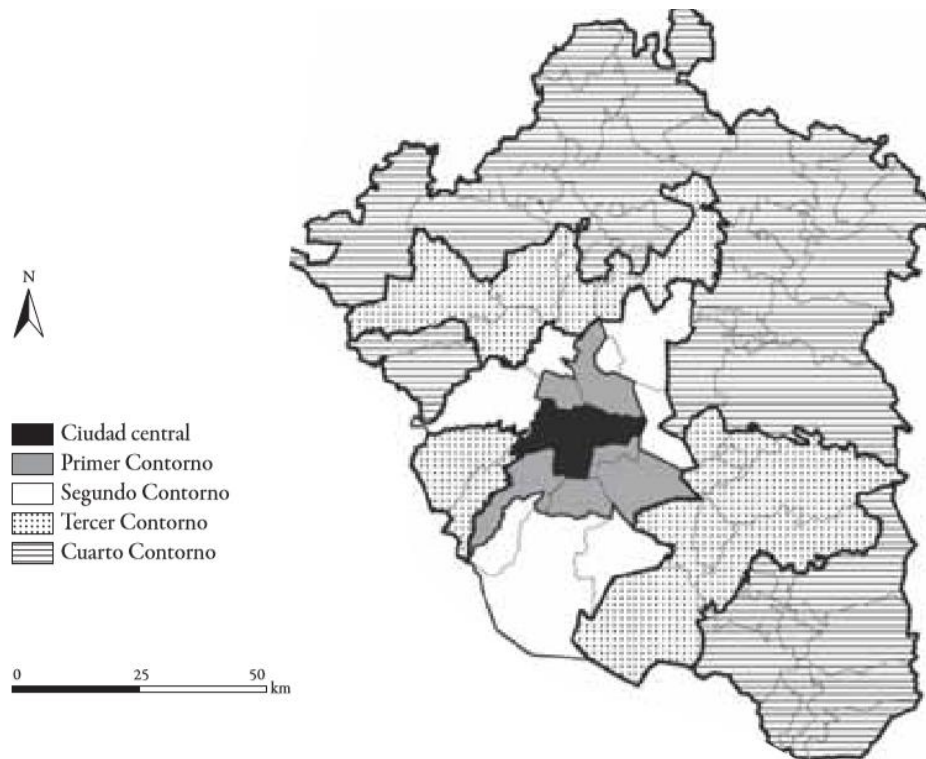


Figura 13. La Ciudad de México dividida en sus cuatro contornos urbanos. Fuente: Patrones de movilidad residencial en la Ciudad de México como evidencia de co-localización de población y empleos. Suárez y Delgado (2010).

4.4. Creación de un Network Dataset para la vialidad peatonal

En el capítulo anterior se mencionó los tipos de redes para modelar en un Sistema de Información Geográfico, por tanto; la red que se modeló en este caso de estudio fue la peatonal. Se recurrió a la herramienta de geoprocésamiento *Clip* para recortar, por cada contorno, la red peatonal correspondiente, el cual también se le añadió un nuevo campo en su tabla de atributos llamada Longitud con la finalidad de recalcular la longitud en metros de la red para dicho contorno.

Para realizar el modelo en el apartado *New Network Dataset de ArcCatalog* se dieron las siguientes instrucciones:

- a) giros habilitados;
- b) libertad para desplazarse en las calles;
- c) la impedancia para este modelo es el tiempo, por lo que se consideró una velocidad promedio de 5 km/h (mencionado en Suárez, Galindo y Reyes

(2019) en el apartado *Los mexicanos vistos por sí mismos. Entre mi casa y mi destino. Movilidad y transporte en México*. Es decir, que, en 800 metros, se recorren en 10 minutos a dicha velocidad).

El resultado obtenido del modelo es la red misma con extensión *.nd*, la cual contiene todas las instrucciones definidas por el usuario y los nodos que unen a cada calle del límite de estudio.

4.5. Aplicación de la herramienta **Urban Network Analysis Toolbox**

Para este análisis, se modeló sólo el índice de Alcance (Reach). Las áreas verdes se mantuvieron como polígonos, no se le asignó ningún radio y la ponderación se mantuvo como la Superficie de las áreas verdes (Figura 14).

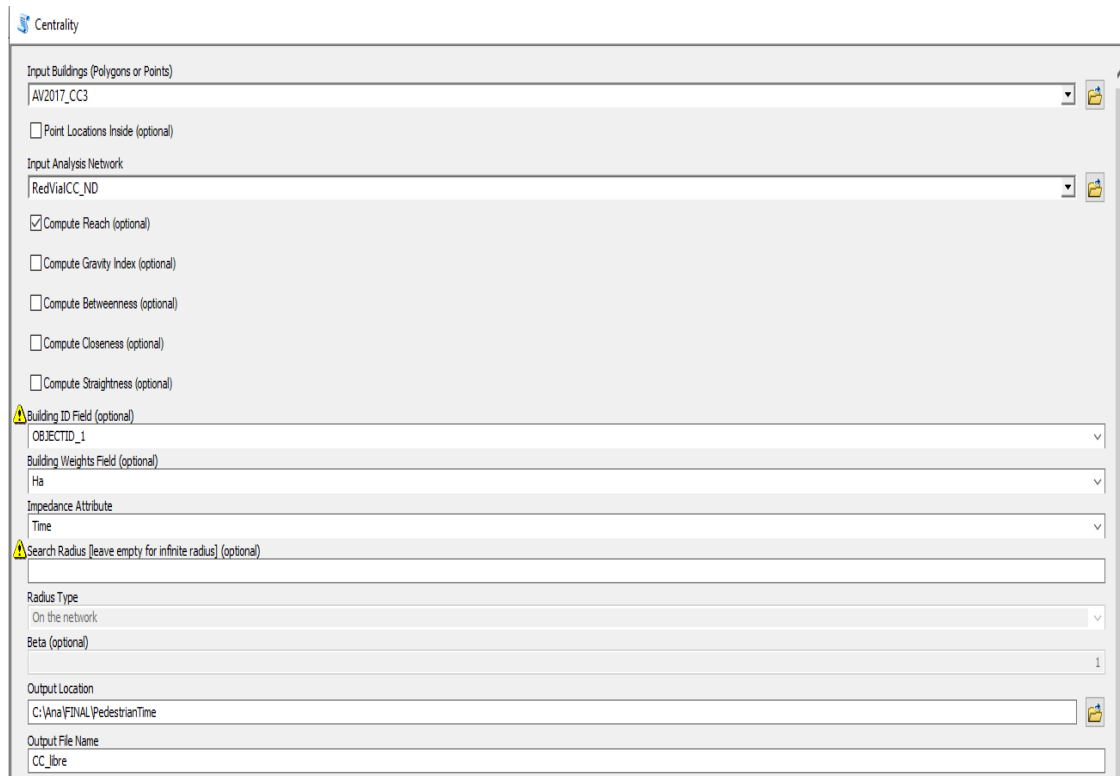


Figura 14. Interfaz para el modelado de la accesibilidad a las áreas verdes pequeñas y medianas por medio de la red peatonal. Fuente: Elaboración propia.

Como primer parámetro, se añaden los espacios verdes con categoría 1, así como la red previamente modelada. En el siguiente apartado, se indica el índice que se desea modelar, en este caso solamente se computa el índice de alcance; de manera que se elige un ID para cada objeto, la ponderación utilizada fue el tamaño de dichos espacios públicos (Ha). Como impedancia, se añadió el tiempo (Time) y se omitió el radio. Por último, la ruta en la que se guardará el resultado.

CAPÍTULO V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. Resultados del caso de estudio I

A continuación, se describe el análisis de los cinco índices computados para medir la accesibilidad a las áreas verdes medianas y grandes, anteriormente descritas, de la Ciudad de México utilizando el transporte público.

Cada índice computado, está representado cartográficamente por cuantiles, de manera que cada clase resultante está agrupada en un mismo número de valores de cada clase, y clasificada de una escala de mayor a menor accesibilidad. Cabe mencionar que los valores obtenidos de la herramienta UNA están normalizados entre 0 y 1.

Para cada figura mostrada, se representa a las áreas verdes medianas y grandes de forma puntual; cada punto será el centroide de estos espacios públicos, con su respectivo grado de accesibilidad, y los principales lugares que resaltan de cada índice computado.

Los resultados obtenidos tienen una relación fuerte entre sí, por lo que cada índice desarrollado

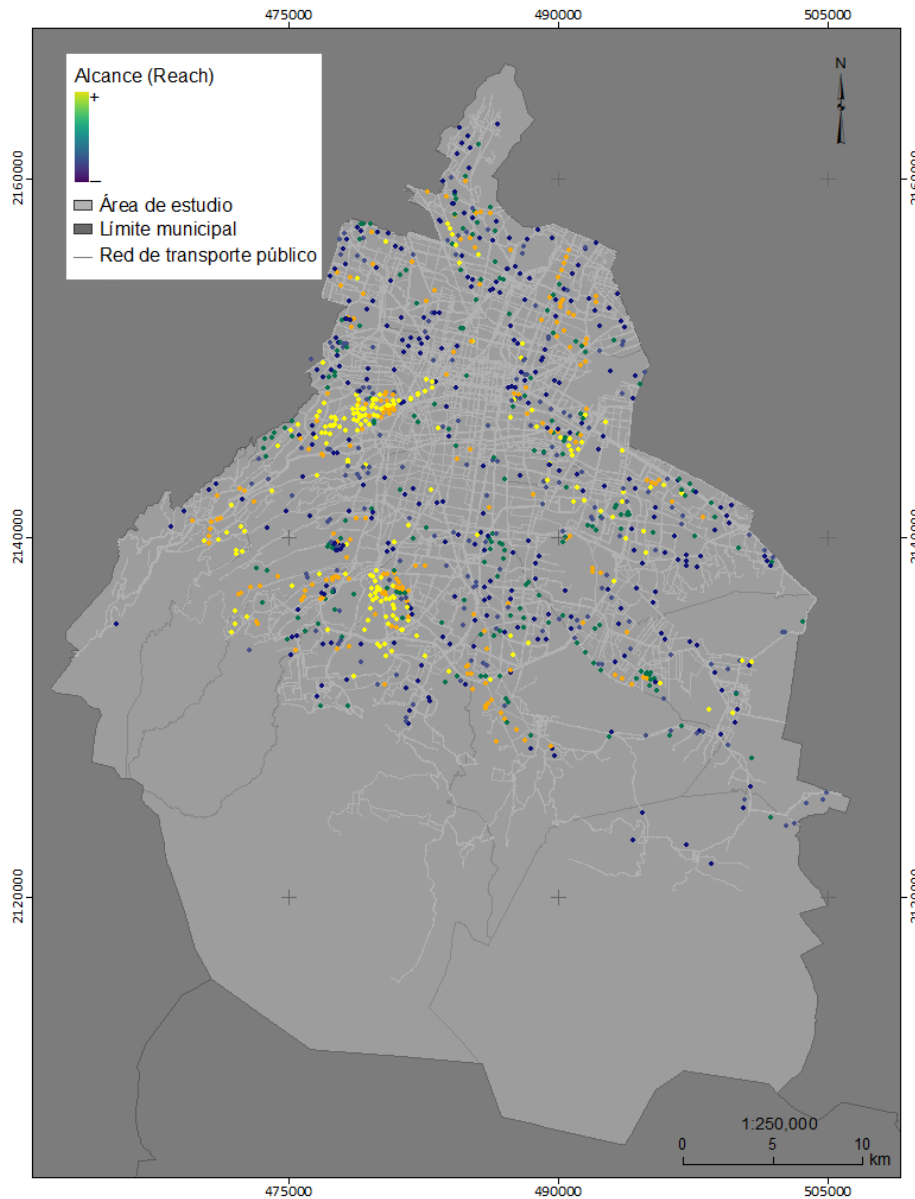


Figura 15. Medida de alcance (Reach) de las áreas verdes grandes y medianas a través del transporte público en la Ciudad de México. Fuente: Elaboración propia.

El índice de Alcance captura el número de las áreas verdes ponderadas por su tamaño dentro de la distancia más corta en la red del transporte público dentro de un radio dado (Figura 15). Son tres grandes áreas que, de acuerdo con su categoría son más alcanzables o accesibles; el bosque de Chapultepec, Ciudad Universitaria y Ciudad Deportiva Magdalena Mixhuca, muestran tener mayor alcance para los ciudadanos; sin embargo, lugares como el Parque “La Mexicana” y sus alrededores presentan buen alcance.

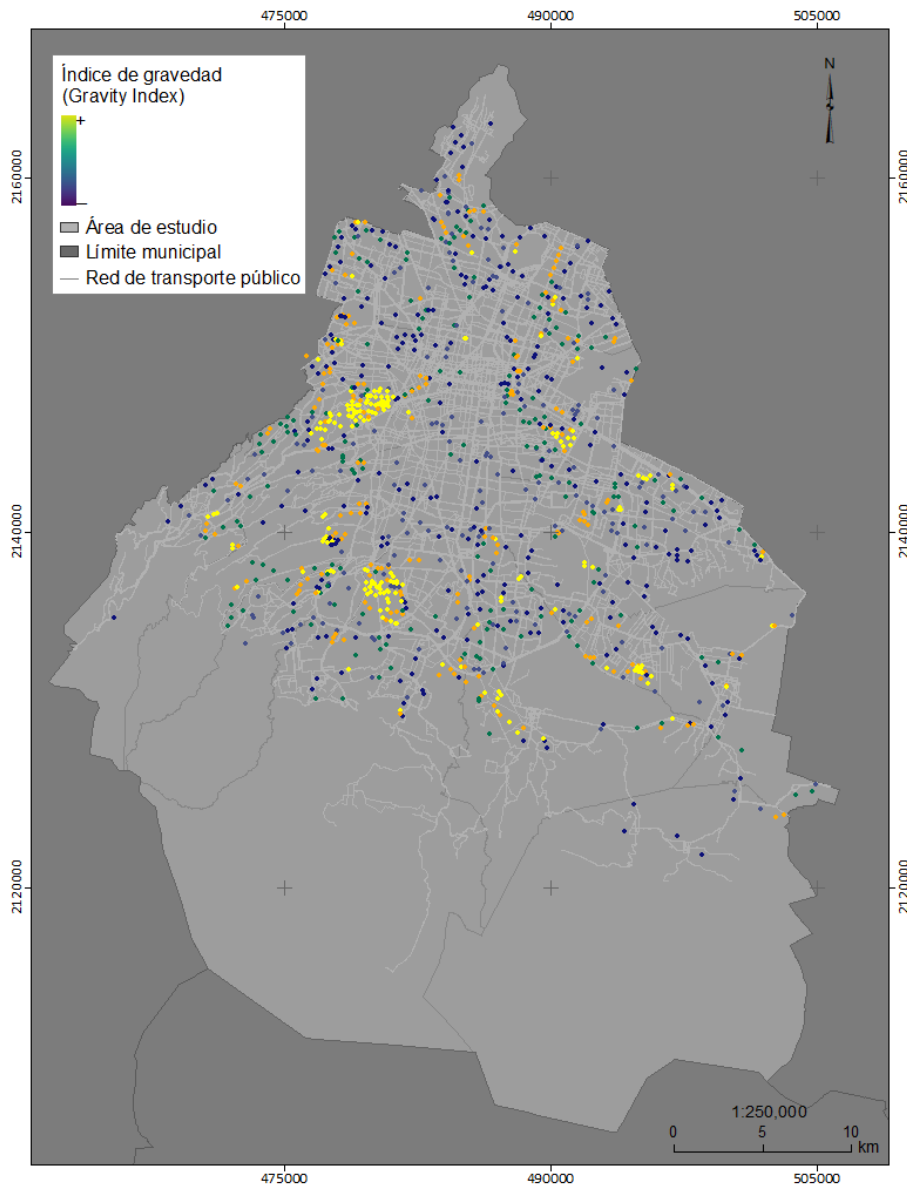


Figura 16. Medida de gravedad (Gravity Index) de las áreas verdes grandes y medianas a través del transporte público en la Ciudad de México. Fuente: Elaboración propia.

El índice de Gravedad es utilizado mayormente para medir la accesibilidad en la planeación del transporte. Asume que la accesibilidad de los orígenes es proporcional a qué tan atractivos son los destinos dada una ponderación (Figura 16). El resultado arrojado presenta una mayor atracción o gravedad en la zona sur de la ciudad a espacios públicos grandes tales como el Bosque de Tláhuac y sus alrededores, zona de Nativitas y Ciudad Universitaria, obviando al bosque de Chapultepec y Ciudad Deportiva Magdalena Mixhuca.

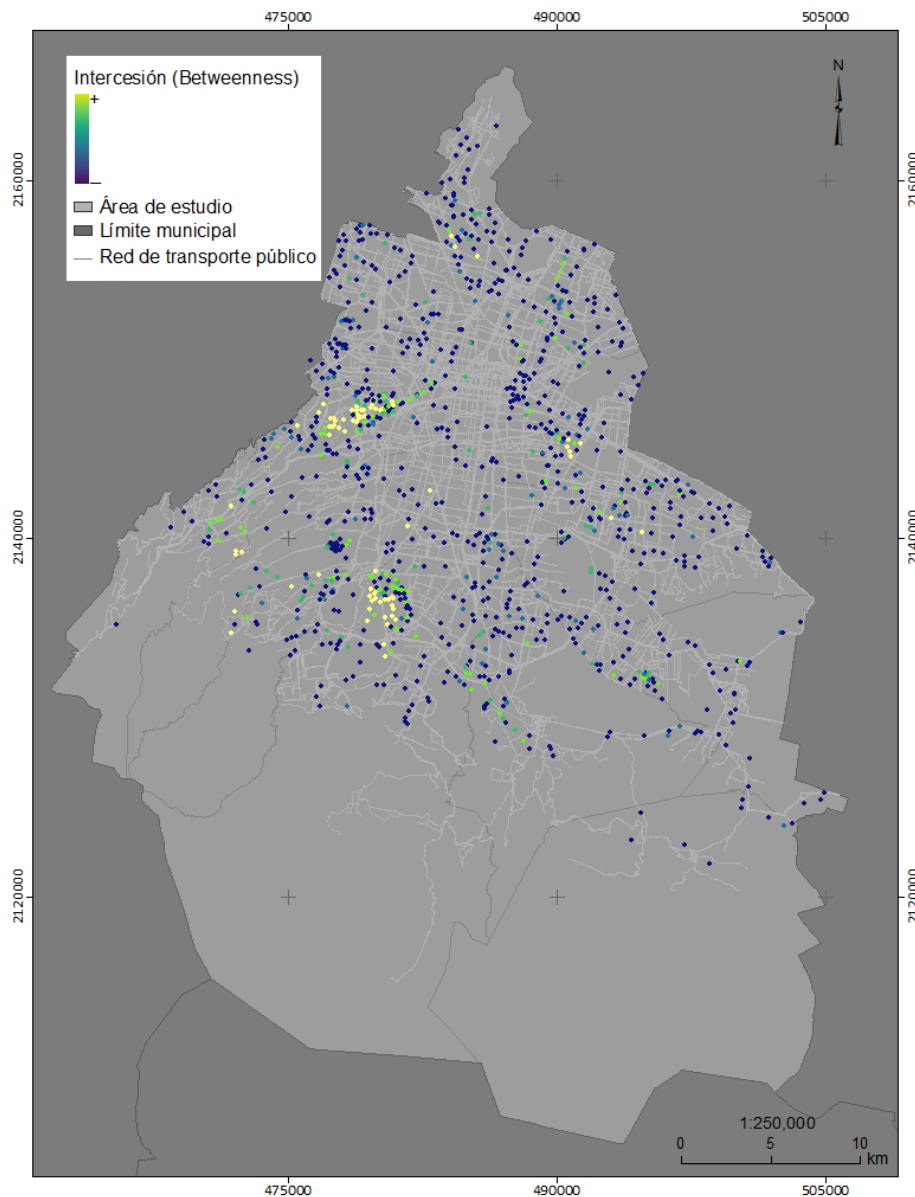


Figura 17. Medida de intercesión (Betweenness) de las áreas verdes grandes y medianas a través del transporte público en la Ciudad de México. Fuente: Elaboración propia.

El índice de Intercesión cuantifica el potencial de transeúntes que pasa por los espacios públicos, en este caso por las áreas verdes grandes; de manera que el número de viajes es proporcional a la superficie de los espacios públicos (Figura 17). Este índice está fuertemente relacionado con el de Alcance; al ser una zona más alcanzable que la otra, habrá una mayor fluidez de usuarios. Como resultado se observan tres grandes espacios el Bosque de Chapultepec, Ciudad Universitaria y el Ciudad Deportiva Magdalena Mixhuca, espacios públicos de mayor tamaño y que tienen una conectividad fuerte con el transporte público.

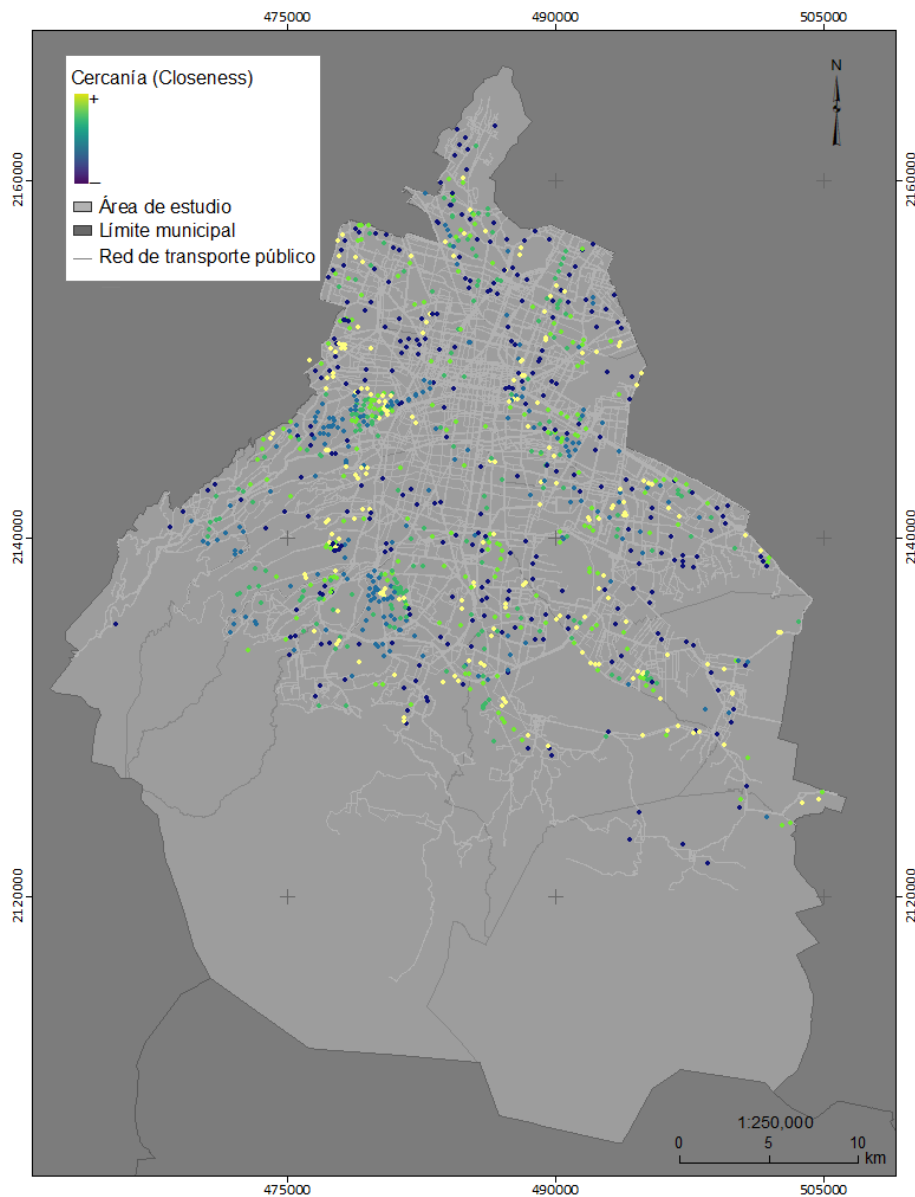


Figura 18. Medida de cercanía (Closeness) de las áreas verdes grandes y medianas a través del transporte público en la Ciudad de México. Fuente: Elaboración propia.

El índice de Cercanía muestra qué tan cerca está cada espacio con respecto a todos los demás espacios públicos en una distancia corta, es decir, indica la facilidad con la que se puede navegar a través de la red del transporte público, por lo que a mayor sea el grado del índice, se traducirá como espacios menos cercanos (Figura 18). Acorde a esto, son dos espacios públicos que presentan una cohesión más densa y concentrada: el Bosque de Chapultepec y el conjunto Ciudad Universitaria. Además, muestra que existe una cercanía muy fuerte en la zona de los alrededores del Parque “La Mexicana”.

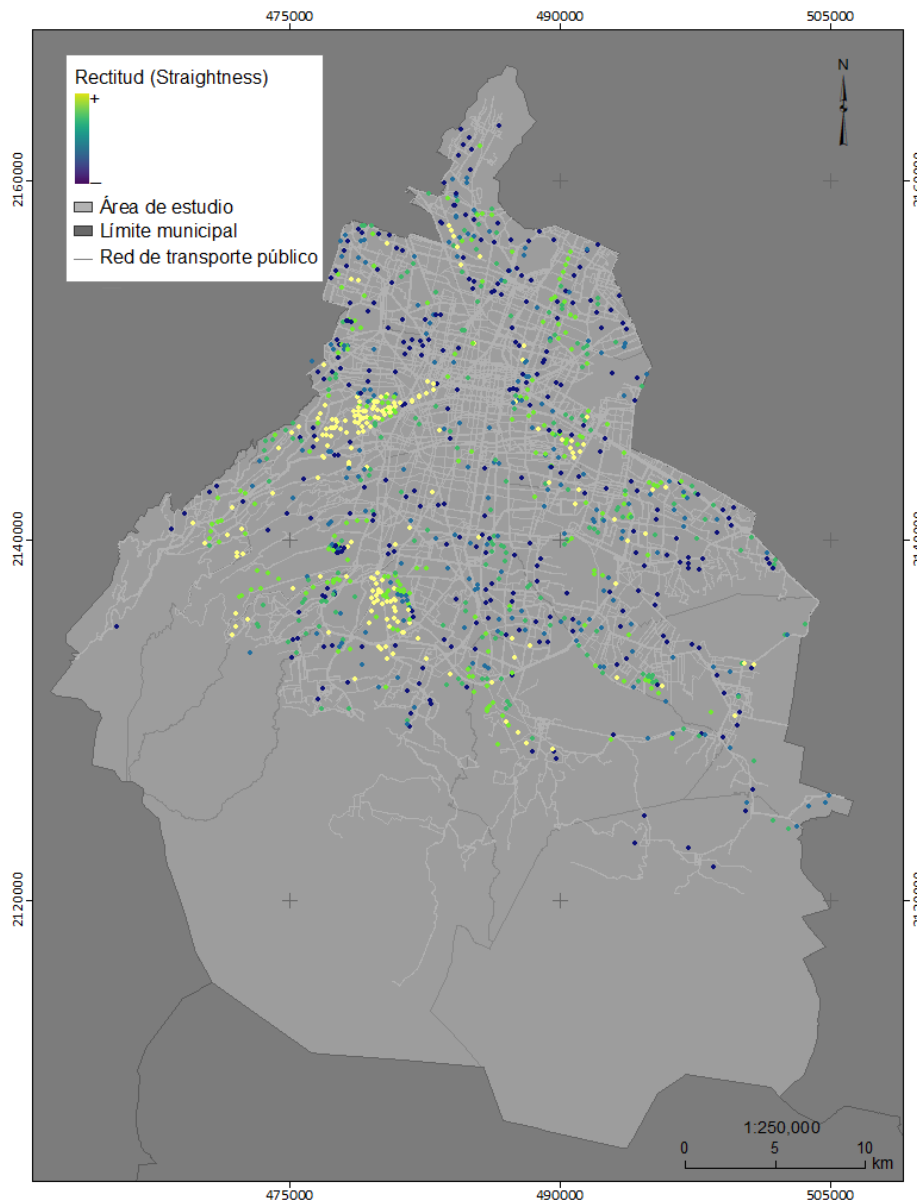


Figura 19. Medida de rectitud (Straightness) de las áreas verdes grandes y medianas a través del transporte público en la Ciudad de México. Fuente: Elaboración propia.

El índice de Rectitud se interpreta como una medida que evalúa qué tan recta es una ruta, conectada a los elementos de su alrededor. De manera que, este resultado muestra los espacios públicos que se encuentran en caminos más directos hacia los destinos, siendo más accesibles (Figura 19). En ese sentido, el Paseo de la Reforma muestra una rectitud evidente, conectando parte del inicio del centro histórico con el bosque de Chapultepec. La percepción de la cercanía de un espacio a otro puede parecer cerca, pero en realidad no lo es, por los viajes largos dentro de la red.

5.2. Resultados del caso de estudio II

En este apartado se muestra el grado de alcance para las alcaldías de Benito Juárez, Cuauhtémoc, Miguel Hidalgo y Venustiano Carranza, que pertenecen a uno de los contornos urbanos llamada Ciudad Central (Figura 20).

Debido a que en esta zona representa la relación entre distancia y la manera en que se comporta la población en función de su densidad, así como las actividades que realizan (principalmente económicas); al estudiar la relación con las áreas verdes de dicha área, la alcaldía Miguel Hidalgo y la Venustiano Carranza encabezan el mayor grado de alcance a los espacios públicos. Sin embargo, la mayoría de estos espacios están categorizados como áreas verdes complementarias o ligadas a la red vial, las cuales la mayoría de ellas pertenecen a la categoría 1, es decir, son áreas pequeñas.

Una de las razones por la que se obtiene este resultado, es por la alta actividad económica y poblacional que representa este espacio en la Ciudad de México. El constante flujo de usuarios a través de las principales avenidas de la ciudad, por ejemplo Paseo de la Reforma – Chapultepec, permite que estos espacios públicos tengan una mayor atracción y que las calles que conecten estos destinos tengan una mejor planificación.

Por otro lado, se observa que la zona periférica de las alcaldías mencionadas anteriormente, tales como el Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México, el Conjunto del Batallón de Fusileros Paracaidistas–SEDENA y el Parque Bicentenario presentan un bajo alcance, las calles que conectan a estos lugares presentan largas rutas de acceso; por lo que puede llegar a ser menos accesible para los peatones, ya sea por restricciones propias del lugar o por una escasa conexión de calles.

Otro factor a analizar es el tiempo, pues al considerar un viaje que conlleva un tiempo mayor al promedio ponderado, reduce el grado de alcance para el

usuario. Acorde a esto, se puede observar que aquellas calles que presenten un diseño geométrico rectangular o sean más compactas, la accesibilidad aumenta y va decreciendo conforme la forma de la red vaya siendo más larga o existan callejones que impidan el libre flujo de personas.

Con este resultado obtenido de la primera medida de centralidad realizada, se puede intuir el comportamiento de los siguientes cuatro índices disponibles en la herramienta UNA, pues recurren a los valores de esta medida para realizar el cálculos correspondiente a cada uno de ellos.

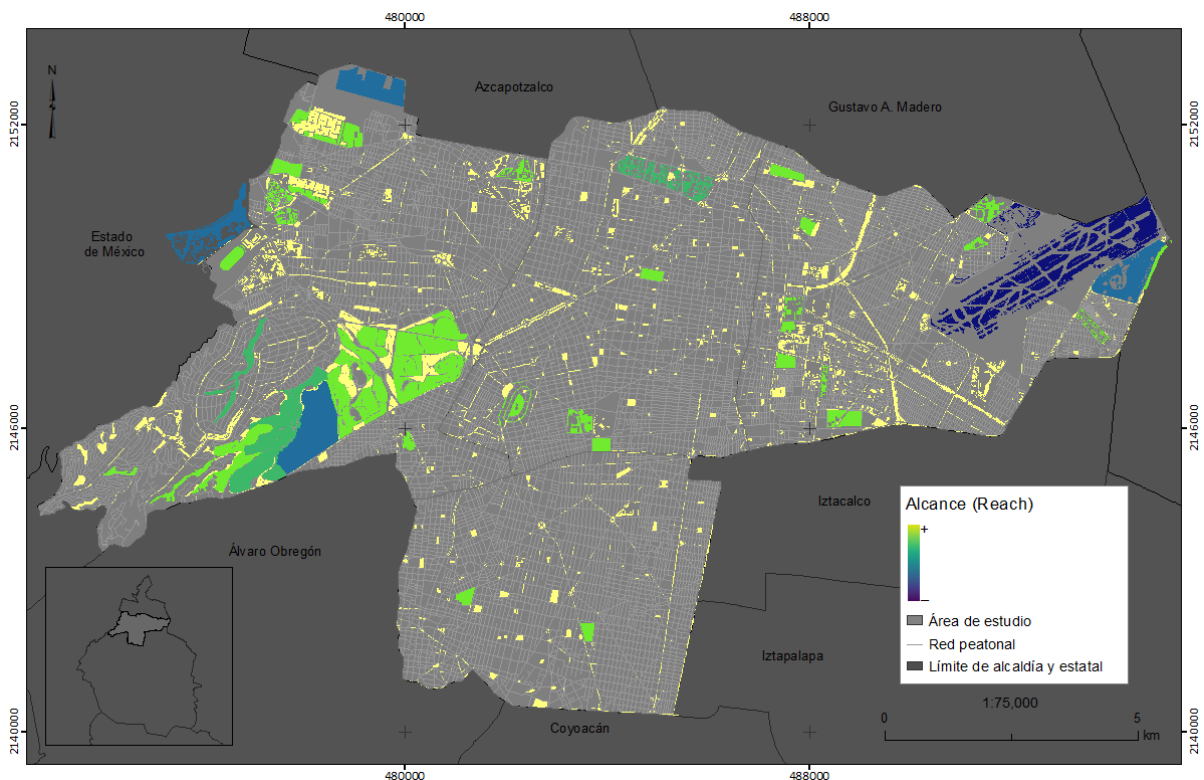


Figura 20. Medida de alcance (Reach) de los espacios públicos aplicado a la caminabilidad en la Ciudad Central. Fuente: Elaboración propia.

5.3. Discusión

En los dos casos de estudio realizados en este trabajo, mostraron resultados semejantes entre sí. El valor del costo o la impedancia dada en cada uno de ellos, como lo es el tiempo, es una característica que determina qué tan accesible se convierte un espacio para los ciudadanos en función de este costo. Teniendo en cuenta que el tiempo que se empleó para ambos estudios fue el

promedio, es una característica detonante para el modelo; pues al final se trata de una simplificación de la realidad.

Para el primer caso de estudio, el desarrollo de los cinco índices que la herramienta proporciona, presenta patrones que se repiten en cada uno de ellos. Desde el primer índice computado (Alcance), se ve reflejado que existen áreas en donde el grado de accesibilidad es mayor que en otras, entre ellos se nombran el Bosque de Chapultepec, Ciudad Universitaria, Ciudad Deportiva Magdalena Mixhuca y el Parque La Mexicana; así como los lugares que rodean dichos espacios.

A partir de que los índices computados son derivados del índice de alcance, el cual es un indicador para predecir qué zonas dentro de un área de estudio serán más atractivas, o con un mayor grado de accesibilidad; los resultados obtenidos mostraron que la red de transporte público en la Ciudad de México, en relación a los espacios públicos, tiene una mayor conectividad del centro a la parte sur de la ciudad, dejando un tanto carente la zona norte. Añadido a esto, cabe señalar que las delegaciones situadas en el sur de la ciudad tienen la gran parte de los parques nacionales y reservas.

En contraste con la zona norte de la ciudad, se puede decir que la accesibilidad a las áreas verdes se concentran mayormente en dos zonas: el complejo del Instituto Politécnico Nacional y las unidades habitacionales de Tlatelolco, seguido del Bosque de San Juan de Aragón y el parque Tezozómoc.

Los resultados obtenidos muestran tener clara evidencia de las zonas en donde los espacios públicos son mayormente frecuentados, y la red masiva del transporte es aún más densa.

Para el segundo caso de estudio, al ejecutar el índice de alcance, los resultados obtenidos para la Ciudad Central, la cual aborda las delegaciones

Miguel Hidalgo, Cuauhtémoc, Benito Juárez y Venustiano Carranza; mantiene el patrón de la zona de Chapultepec como un área altamente alcanzable para los ciudadanos.

El modelo realizado para este estudio, hace referencia a que las zonas periféricas dentro de una locación son menos accesibles para los usuarios. Si bien el estudio fue para analizar el grado de centralidad que tienen los espacios públicos dentro de un tiempo dado, en dónde se dice que los ciudadanos mexicanos están dispuestos a recorrer de un lugar a otro; el resultado obtenido afirma que existe un alto grado de accesibilidad a ellos, en relación a la red peatonal.

La mayoría de estos espacios públicos están categorizados como camellones centrales y laterales, dicho esto, la distribución espacial de ellos tiene una fuerte conectividad hacia las calles circundantes. Esto demuestra que un mayor número de áreas verdes pequeñas y numerosas intersecciones, tendrá un efecto positivo en la cohesión espacial de la red urbana.

Sin duda, uno de los espacios públicos que mantiene una alta accesibilidad tanto por la red de transporte público como la peatonal es el Bosque de Chapultepec y sus alrededores. Este espacio, que es uno de los pulmones más grandes e importantes de la Ciudad de México, partiendo de los factores que fueron considerados para modelar los índices, es un espacio que muestra tener una fuerte conectividad con su red urbana. La configuración de las calles que lo rodean y el transporte que transita en esa zona, permite que los usuarios puedan tener un mayor flujo dentro de la zona circundante. En parte, se debe a que los elementos que lo rodean, como oficinas y negocios, y la zona socioeconómica en la que se encuentra, requiere de una mayor conexión entre calle y calle; además, es una de las principales atracciones turísticas más grandes de la ciudad, por lo que la red es aún más densa y funciona como un imán.

El contraste que presentan las áreas verdes periféricas contra aquellas que son más céntricas, en términos históricos por la movilidad de la población para con su empleo y cambios residenciales, se observa que las periferias resultan ser las menos accesibles, además, la cantidad de áreas verdes presentes en ellas son, relativamente, menos. Por un lado, la distribución de barrancas en la zona poniente, la cual lo conforman las alcaldías Álvaro Obregón, La Magdalena Contreras, Miguel Hidalgo, Cuajimalpa y Tlalpan, las cuales están bajo resguardo; y la particularidad de la alcaldía de Milpa Alta, con suelo mayormente agrícola y de conservación; hacen que las áreas verdes se vean reducidas, pero no menos importantes.

En cuanto a la zona norte de la ciudad, que es principalmente industrial, las áreas verdes se sitúan en complejos de instituciones educativas y habitacionales. Esta zona es muy carente de espacios públicos, claro es, que al igual que el resto de la ciudad, los camellones, de cierto modo, contribuyen a que los usuarios tengan acceso a espacios públicos, como lo son las áreas verdes, sin embargo, la accesibilidad que presentan es muy baja.

CAPÍTULO VI. CONCLUSIONES

Los espacios públicos toman una gran importancia dentro de una ciudad, no sólo por su estética sino también por los beneficios que ofrece hacia los ciudadanos; y para gozar de ellos, es indispensable poseer de una accesibilidad hacia las distintas áreas verdes urbanas distribuidas entorno de una localidad, de forma que se recurre al análisis espacial para medir dicho factor.

Dentro del análisis espacial para evaluar los distintos indicadores de centralidad, se plantean el modelo de dos factores: los arcos (*edges*) y los nodos (*nodes*). Desde hace unos años, la herramienta Urban Network Analysis (UNA) implementó un tercer factor, el cual es el núcleo para el análisis: los *buildings*.

En este trabajo, se abordaron dos vertientes para el análisis del grado de accesibilidad que tienen las áreas verdes en la Ciudad de México: la primera, mediante el modelado de la red del transporte público; y la segunda, mediante la modelación de la red peatonal, tomando como impedancia el tiempo.

Para el primer caso de estudio, se modeló la red del transporte público de la Ciudad de México, y se tomó en cuenta las áreas verdes grandes y medianas, siendo la impedancia el tiempo promedio que recorre cada tipo de transporte dentro de su respectiva ruta. Al analizar los cinco índices que proporciona la herramienta UNA, se determina que los espacios públicos ubicados en la zona sur y suroeste de la ciudad, son los que presentan una mayor accesibilidad.

Para el segundo caso de estudio, al considerar solamente al primer contorno urbano; debido a que la red peatonal que constituye las cuatro alcaldías estudiadas es muy densa y con la impedancia considerada, realizar el cálculo de los cinco índices de centralidad disponibles en la herramienta UNA resulta complicado procesarlos, por esta razón sólo fue computado el primer índice (alcance).

De esta forma se modeló la red peatonal, tomando como criterio la velocidad promedio en la cual los ciudadanos se desplazan de un lugar a otro. El resultado obtenido demostró que los camellones, o las áreas verdes ligadas a la red vial; presentan una fuerte cohesión entre sí, dejando ver que en la periferia de la zona de estudio, la accesibilidad disminuye.

Es indiscutible que la accesibilidad hacia un lugar está en función de dos factores, uno la distribución espacial y la conectividad. Si la distribución espacial de los objetos de estudio no es homogénea, se crearán discontinuidades; y con ello; el grado de centralidad disminuye. A su vez, cuando las conexiones dentro de una red se mantienen más unidas; aumenta la posibilidad de tomar más alternativas de rutas para llegar a un destino y así aumentar el grado de accesibilidad.

Si bien este trabajo fue realizado para analizar la accesibilidad a los espacios públicos de la Ciudad de México, tomando como criterio el tiempo de traslado y el tamaño de dichos espacios; quedaría pendiente para futuras investigaciones un estudio para el análisis de centralidad de todas áreas verdes pequeñas de la ciudad entera, tomando como punto de referencia la caminabilidad de los usuarios hacia dichos espacios; de manera que se pueda planificar una mejor distribución de áreas verdes o, en su caso, mejorar la ya existentes.

También otro punto a mejorar, es la modelación de la red. Considerar la red, ya no vista como un todo; sino modelar cada tipo de transporte con sus respectivos tiempos, si fuera el caso de vehículos motorizados, adecuarla a los datos de tráfico, semáforos y restricciones de giro; sin duda, se apegaría más a la realidad. Visto desde la caminabilidad, se podría indicar otra ponderación, por ejemplo, el número de habitantes por manzana; y comparar con la percepción que los ciudadanos tienen respecto a la distancia que recorren, así como el horario, y las rutas que recorren para llegar a ellas.

REFERENCIAS

- Ayala-Azcárraga, C., Díaz, D. y Zambrano, L. (2019). Characteristics of urban parks and their relation to user well-being. *Landscape and Urban Planning*. 189, 27-35. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2019.04>.
- Bhat, C., Handy, S., Kockelman, K., Mahmassani, H., Chen, Q. y Weston, L. (2000). Development of an Urban Accessibility Index: Literature Review.
- Bavelas, A. (1950). Communication patterns in task-oriented groups. *Journal of the Acoustical Society of America*. 22, 723-730. <https://doi.org/10.1121/1.1906679>
- Boix, R. (2002). *Instrumentos de análisis de redes en economía urbana: caracterización de redes de ciudades mediante el análisis de cuatro estructuras urbanas simuladas*. V Encuentro de Economía. Universitat Autònoma de Barcelona. Oviedo, Barcelona.
- Borja, J. y Muxí, Z. (2000). Urbanismo vs espacio público. El espacio público, ciudad y ciudadanía.
- Bosque, J. (1992). Sistemas de Información Geográfica.
- Buzai, G. (2009). Análisis Espacial con Sistemas de Información Geográfica. Sus cinco conceptos fundamentales. En Buzai, G, *Geografía y Sistemas de Información Geográfica. Aspectos conceptuales y aplicaciones*, 163-195. https://www.researchgate.net/publication/298420203_Analisis_Espacial_con_Sistemas_de_Informacion_Geografica_Sus_cinco_conceptos_fundamentales
- Buzai, G. y Baxendale, C. (2006). Análisis socioespacial con sistemas de información geográfica. *GeoFocus (Recursos)*, (7), 5-7.
- Buzai, G. y Baxendale, C. (2015). Análisis socioespacial con sistemas de información geográfica marco conceptual basado en la teoría de la geografía. *Ciencias Espaciales*. 8(2), 391- 408.
- Delgado, O. (2003). Debates sobre el espacio en la geografía contemporánea. Universidad Nacional de Colombia. Unibiblos, Bogotá.
- Diario Oficial de la Federación. (2014). *Reglas de Operación del Programa Rescate de Espacios Públicos, para el ejercicio fiscal 2015 y subsecuentes*.

http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5377730&fecha=30/12/2014

- Dunnett, N., Swanwick, C. y Woolley, H. (2002). Improving urban parks play areas and green spaces.
- Flores-Xolocotzi, R. (2017). Una reflexión teórica sobre estándares de áreas verdes empleados en la planeación urbana. *Economía, Sociedad y Territorio*. 17(54), 491-522. <https://doi.org/10.22136/est002017682>
- Flores-Xolocotzi, R., y González-Guillén, M. (2010). Planificación de sistemas de áreas verdes y parques públicos. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 1(1),17-24.
http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-11322010000100003&lng=es&tlng=es
- Fotheringham, A. y Rogerson, P. (2014). GIS and spatial analysis: introduction and overview. Taylor & Francis.
- Freeman, L., (1979). Centrality in networks: Conceptual clarification. *Social Networks* 1, 215–239.
- Galindo, A. y Victoria, R. (2012). La vegetación como parte de la sustentabilidad urbana: beneficios, problemáticas y soluciones, para el Valle de Toluca. *Quivera*. 14 (1). Enero-junio, 98-108.
- García, H. y Lara, F. (2016). Equidad en la provisión de espacios públicos abiertos: accesibilidad, percepción y uso entre mujeres de Hermosillo, Sonora. *Sociedad y Ambiente*, (10), 28-56.
- Garrocho, C. y Campos, J. (2006). Un indicador de accesibilidad a unidades de servicios clave para ciudades mexicanas: fundamentos, diseño y aplicación. *Economía, Sociedad y Territorio*, 6(22) ,1-60.
- Garrocho, C. y Campos, J. (2007). Dinámica de la estructura policéntrica del empleo terciario en el área metropolitana de Toluca, 1994-2004. *Papeles de Población*, 13 (52), 109-135.
- Geertman, S. y van Eck, J. (1995). GIS and models of accessibility potential: an application in planning. *International Journal of Geographical Information Systems*, 9, 67-80.

- Geurs, K. y van Wee, B. (2004). Accessibility evaluation of land-use and transport strategies: review and research directions. *Journal of Transport Geography*, 12 (2), 127-140.
- Goodchild, M. y Janelle, D. (2004). Thinking spatially in the social sciences. *Spatially integrated social science*, 3-17.
- Goodchild, M. y Haining, R. (2005). SIG y análisis espacial de datos: perspectivas convergentes. *Investigaciones Regionales - Journal of Regional Research*, (6), 175-201.
- Gregório, R. (2012). Urbanismo y planificación: Áreas Verdes Urbanas. *Summa Humanitatis*, 6(1).
- Handley, J., Pauleit, S., Slinn, P., Lindley, S., Barber, A., Baker, M. y Jones, C. (2003). Accessible Natural Green Space Standards in Town and Cities: A Review and Toolkit for their Implementation. *English Nature 153*.
- Hansen, W. (1959). *How accessibility shapes land-use* [Tesis doctoral, Massachusetts Institute of Technology] Department of Urban Studies and Planning.
- Ingram, D. (1971). The concept of accessibility: A search for an operational form. *Regional Studies*, 5(2), 101-107.
- Krafta, R. (1994). Modelling intraurban configurational development. *Environment & Planning B: Planning and Design*, 21(1), 67-82. <http://dx.doi.org/10.1068/b210067>
- Krafta, R. (2008). Fundamentos del análisis de centralidad espacial urbana. *Centro-h*, (2), 57-72.
- Lee, A., Jordan, H., y Horsley, J. (2015). Value of urban green spaces in promoting healthy living and wellbeing: prospects for planning. *Risk Management and Healthcare Policy*, 8, 131-137. <https://doi.org/10.2147/RMHP.S61654>
- Liu, S. y Zhu, X. (2004). Accessibility Analyst: an integrated GIS tool for accessibility analysis in urban transportation planning. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 31(5), 105-124. <https://doi.org/10.1068/b305>

- Loyola, C. y Albornoz, E. (2009). Flujo, movilidad y niveles de accesibilidad en el centro de Chillán año 2007. Propuesta de mejoramiento mediante SIG. *Urbano*, 12(19), 17-27. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=19811644005>
- Madrid, A. y Ortiz, L. (2005). Análisis y síntesis en cartografía: algunos procedimientos. Repositorio Universidad Nacional <http://bdigital.unal.edu.co/1239/>
- Nowark, D., Dwyer, J. y Childs, G. (1997). Los beneficios y costos del enverdecimiento urbano, En Krishnamurthy, L. y J. Rente Nascimento(Eds.), *Áreas Verdes Urbanas en Latinoamérica y el Caribe*, 17-38.
- Núñez, J. y Romero, M. (2016). Imperativos para una ciudad sustentable: áreas arboladas y planeación territorial. En Mohar, A. (Coordinador), *Tendencias territoriales determinantes del futuro de la Ciudad de México*. Consejo Económico y Social de la Ciudad de México, 311-339. <http://centrogeo.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1012/230>
- Ojeda, L. (2012). Metodología para la planificación de las áreas verdes urbanas: el caso de Mexicali, Baja California. *Estudios fronterizos*, 13(26), 228-234. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-69612012000200010&lng=es&tlng=es.
- O'Sullivan, D. y Unwin, D. (2003). *Geographic Information Analysis*. John Wiley & Sons, Inc.
- Procuraduría Ambiental y del Ordenamiento Territorial (2010). *Presente y futuro de las áreas verdes y del arbolado de la Ciudad de México*.
- Racine, J. y Bailly, M. (1993). Geography and geographical space: towards an epistemology of geography. *Two decades of L'Espace géographique: an anthology*, 125-134.
- Secretaría de Desarrollo Social. (2010). *Documento diagnóstico de rescate de espacios públicos*.
- Seguí, J., Ruiz, M. y Gamir, A. (1995). *Prácticas de análisis espacial*. Oikos-Tau, Barcelona, 87-199.

- Seguí, J. y Petrus, J. (1991). Geografía de redes y sistemas de transporte. *Polígonos*, 198-201. <http://dx.doi.org/10.18002/pol>
- Sevtsuk, A. (2010). *Path and Place: A Study of Urban Geometry and Retail Activity in Cambridge and Somerville, MA* [Tesis doctoral, Massachusetts Institute of Technology]. Department of Urban Studies and Planning.
- Sevtsuk, A. & Mekonnen, M. (2012). Urban Network Analysis. A new toolbox for ArcGIS. *Journal of Geomatics and Spatial Analysis*, (22)2, 287–305.
- Shaw, M. (1954). Group structure and the behavior of individuals in small groups. *Journal of Psychology*, 38, 139-149. <https://doi.org/10.1080/00223980.1954.9712925>
- Sorensen, M., Barzetti, V., Keipi, K. y Williams, J. (1998). Manejo de las áreas verdes urbanas.
- Sugiyama, T., Thompson, C. W., y Alves, S. (2009). Associations between Neighborhood Open Space Attributes and Quality of Life for Older People in Britain. *Environment and Behavior*, 41(1), 3–21. <https://doi.org/10.1177/0013916507311688>
- Suárez, A., Camarena, P., Herrera, I. y Lot, A. (2011). Infraestructura verde y corredores ecológicos de los pedregales: ecología urbana del sur de la Ciudad de México. [En línea] México: UNAM, Coordinación de la Investigación Científica, Secretaría Ejecutiva de la Reserva Ecológica Pedregal de San Ángel. <http://ru.ameyalli.dgdc.unam.mx/123456789/981>
- Suárez, M. y Delgado, G. (2010). Patrones de movilidad residencial en la Ciudad de México como evidencia de co-localización de población y empleos. *EURE*, 36(107), 67-91.
- Suárez, M. y Delgado, G. (2015). Los mexicanos vistos por sí mismos. Entre mi casa y mi destino. Movilidad y transporte en México. Encuesta Nacional de Movilidad y Transporte, 141.
- Suárez, M., Galindo, C. y Reyes, V. (2019). Cómo nos movemos en la Ciudad de México. *Movilidad y transporte*, 283-284.