

Identificación de áreas idóneas para el desarrollo urbano mediante el uso de análisis multicriterio AHP y herramientas geoinformáticas

Gerson Fabian Ortiz Melo

Proyecto presentado como requisito parcial para optar al título de Especialista en Sistemas de Información Geográfica

Universidad de Manizales

Facultad de Ciencias e Ingeniería

Manizales, 2021

Resumen

El desarrollo urbano es un enfoque fundamental en la planificación territorial y la sostenibilidad, este se enmarca en el mejoramiento integral de las ciudades con el objetivo de brindar una mejor calidad de vida a la población. Hay una serie de herramientas que permiten analizar y tomar mejores decisiones para los proyectos de desarrollo urbano.

Para este estudio, se utilizó la metodología de Proceso de Jerarquía Analítica (AHP) junto a herramientas geoinformáticas aplicado en el barrio Los Sauces, municipio de Santiago de Cali para identificar áreas idóneas para el desarrollo urbano. Para ello, se seleccionaron diez (10) criterios urbanísticos principales para el análisis. Utilizando el método de comparación por pares, se determinó la importancia relativa de cada criterio en forma de ponderación de criterio. Por último, se aplicó la técnica de superposición ponderada a las cuatro (4) categorías urbanísticas para obtener las áreas idóneas para desarrollo urbano.

Los resultados confirmaron que el modelo de AHP es una técnica útil para la planificación urbana y; por consiguiente, para el desarrollo urbano. En diez (10) manzanas del área de estudio que ocupan una extensión de 52.209,47 m², se pueden llevar a cabo diferentes proyectos de desarrollo urbano. Se evidenció que los inmuebles que se ubican sobre las vías de mayor importancia y cuentan con un tamaño considerable son los más adecuados para desarrollar proyectos; por el contrario, los predios que se ubican hacia las partes internas, son los que presentan una baja idoneidad.

Palabras clave: Análisis multicriterio, proceso de jerarquía analítica, desarrollo urbano, herramientas geoinformáticas.

Abstract

Urban development is a fundamental approach in territorial planning and sustainability, this is part of the comprehensive improvement of cities with the aim of providing a better quality of life to the population. There are a number of tools that allow you to analyze and make better decisions for urban development projects.

For this study, the Analytical Hierarchy Process (AHP) methodology was used together with geoinformatics tools applied in the Los Sauces neighborhood, municipality of Santiago de Cali to identify suitable areas for urban development. For this, ten (10) main urban criteria were selected for the analysis. Using the pairwise comparison method, the relative importance of each criterion was determined in the form of criterion weighting. Finally, the weighted superposition technique was applied to the four (4) urban categories to obtain the ideal areas for urban development.

The results confirmed that the AHP model is a useful technique for urban planning and; therefore, for urban development. In ten (10) blocks of the study area that occupy an area of 52,209.47 m², different urban development projects can be carried out. It was evidenced that the buildings that are located on the most important roads and have a considerable size are the most suitable for developing projects; on the contrary, the properties that are located towards the internal parts, are those that present a low suitability.

Keywords: Multi-criteria análisis, analytical hierarchy process, urban development, geoinformatics tools.

Contenido

1. Planteamiento del problema de Investigación y su Justificación	8
1.1. Área Problemática	8
1.2. Justificación	9
2. Objetivos	11
2.1. Objetivo General.....	11
2.2. Objetivos Especificos	11
3. Antecedentes.....	12
4. Referente Legal y Normativo	23
4.1. Constitución Política de Colombia de 1991	23
4.2. Ley 388 de 1997 o de Desarrollo Territorial en la Gestión del Suelo Urbano	23
4.3. Ley General Ambiental de Colombia Ley 99 de 1993	23
4.4. Acuerdo 0373 de 2014 - Plan de Ordenamiento Territorial de Santiago de Cali.....	24
5. Marco Conceptual.....	25
5.1. Desarrollo Urbano.....	25
5.2. Análisis Multicriterio	29
6. Área de Estudio	35
7. Materiales y Métodos.....	37
7.1. Definición de Categorías y Criterios a Evaluar	38
7.2. Construcción de Base de Datos Geoespacial	40
7.3. Matriz de Comparación por Pares.....	41

7.4.	Cálculo de la Relación de Consistencia (RC)	42
7.5.	Conversión de Datos Vectoriales a Ráster.....	43
7.6.	Superposición Ponderada y Normalización de Criterios.....	44
7.7.	Áreas idóneas para desarrollo urbano	45
8.	Resultados.....	47
8.1.	Definición de categorías y criterios a ponderar	47
8.1.1.	Categoría e Indicadores Catastrales.....	48
8.1.2.	Categoría e Indicadores Físicos.....	50
8.1.3.	Categoría e Indicadores de la Norma Urbana	51
8.1.4.	Categoría e Indicadores de Movilidad.....	52
8.2.	Construcción de la base de datos	52
8.3.	Desarrollo de la matriz de comparación por pares	53
8.3.1.	Cálculo de Relación de Consistencia.....	55
8.4.	Transformación de datos vectoriales a ráster.....	55
8.5.	Superposición ponderada y reclasificación	56
	Superposición Ponderada, Categoría Catastral	56
	Superposición Ponderada, Categoría Física	58
	Superposición Ponderada, Categoría Normativa Urbana.....	60
	Superposición Ponderada, Categoría Movilidad	62
	Superposición Ponderada Final	63
8.6.	Áreas idóneas para desarrollo urbano	65
9.	Conclusiones	66

10. Recomendaciones.....	67
11. Bibliografía	68

Lista de Figuras

Figura 1.....	36
Figura 2.....	38
Figura 3.....	40
Figura 4.....	44
Figura 5.....	45
Figura 6.....	49
Figura 7.....	50
Figura 8.....	51
Figura 9.....	52
Figura 10.....	53
Figura 11.....	56
Figura 12.....	58
Figura 13.....	60
Figura 14.....	61
Figura 15.....	63
Figura 16.....	64
Figura 17.....	65

Lista de Tablas

Tabla 1.....	41
Tabla 2.....	45
Tabla 3.....	47
Tabla 4.....	53
Tabla 5.....	54
Tabla 6.....	54
Tabla 7.....	54
Tabla 8.....	54
Tabla 9.....	55
Tabla 10.....	57
Tabla 11.....	57
Tabla 12.....	57
Tabla 13.....	58
Tabla 14.....	59
Tabla 15.....	59
Tabla 16.....	60
Tabla 17.....	61
Tabla 18.....	62
Tabla 19.....	62

1. Planteamiento del problema de Investigación y su Justificación

1.1. Área Problemática

En diferentes lugares del mundo la población está migrando del campo a la ciudad en busca de mejores oportunidades. Dicho caso no es ajeno en el territorio colombiano donde día a día las ciudades reciben nuevos habitantes; este fenómeno se puede observar especialmente en las grandes ciudades como Bogotá, Medellín y Cali. Lo mencionado, ha conllevado a una alta demanda de vivienda y; por consiguiente, de servicios recreacionales, de educación, de cultura y ambientales.

Ante dicha situación, los gobernantes de cada ciudad junto a los expertos urbanistas deben planificar y ordenar el territorio brindando espacios nuevos que contengan oferta de vivienda y servicios al alcance de toda la población que los demanda. Es así como las zonas de expansión urbana se han vuelto los lugares adecuados para ofertar vivienda y servicios, debido que dentro de la ciudad no hay espacios para desarrollar grandes proyectos urbanísticos. No obstante, en las zonas de expansión se están generando implicaciones en los bienes comunes naturales afectando cuerpos de agua, flora y fauna.

De acuerdo con lo anterior, surge la necesidad de identificar espacios dentro de las ciudades donde se puedan llevar a cabo proyectos urbanísticos que no afecten de manera negativa el patrimonio natural. Es ahí donde entra el Desarrollo Urbanístico como un mecanismo mediante el cual se identifiquen lugares de las ciudades que no estén siendo aprovechados o que estén faltos de equipamientos, vivienda y servicios. Dichas áreas a través de un análisis y planificación minuciosa, se intervienen con el fin de generar nuevos desarrollos urbanísticos o explotar el máximo potencial de desarrollo que se esté dando en el territorio, esto con el fin de transformar las áreas para brindar una calidad de vida mejor para las personas que habitan el lugar, para las que llegarán y para las que transitan o viven en la zona de influencia del proyecto.

El presente trabajo surge para dar respuesta al interrogante ¿qué áreas son idóneas para el desarrollo urbano en el barrio Los Sauces - Cali, para el año 2021? Para ello se aplica un análisis multicriterio (AHP) con el fin de integrar diferentes atributos que permitan obtener una visión integral de los lugares más apropiados para el desarrollo urbano.

1.2. Justificación

El desarrollo urbano es un mecanismo que propende por el mejoramiento integral físico y ambiental de las ciudades; incidiendo a su vez en una mejor calidad de vida de la población que habita o circula en el área donde se realizan este tipo de proyectos. Cabe resaltar que, para identificar los lugares más adecuados donde se pueda realizar proyectos de desarrollo urbano es pertinente analizar múltiples variables de carácter ambiental, catastral, normativo, jurídico, de movilidad y social.

Este trabajo es importante, pues muestra como los métodos de decisión multicriterio y los sistemas de información geográfica SIG pueden utilizarse para una planificación urbana más eficaz. Para ello, se implementa una metodología para la valoración del desarrollo urbano basada en técnicas de evaluación multicriterio donde se incorporan una serie de atributos los cuales son identificados y ponderados previamente para brindar mayor relevancia, eficiencia y seguridad en la toma de decisiones para diferentes proyectos urbanísticos, dejando de lado la subjetividad. Igualmente, se implementan los sistemas de información geográficos SIG a fin de contar con información espacial que represente los resultados de la metodología multicriterio y, de dicha manera, se pueda analizar la información de manera gráfica y comprensible para posteriormente tomar decisiones.

Este tipo de estudios son necesarios, pues brindan soportes teóricos y metodológicos que permiten orientar la toma de decisiones tomando como base criterios comunes; además, simplifican el manejo de cantidad de datos.

2. Objetivos

2.1. Objetivo General

Realizar un análisis multicriterio (AHP) para la identificación de áreas idóneas para el desarrollo urbano a nivel predial en el barrio Los Sauces - Cali en el año 2021, mediante el uso de herramientas geoinformáticas.

2.2. Objetivos Específicos

- Analizar casos de estudio sobre desarrollo urbano y análisis multicriterio.
- Derivar un conjunto de criterios urbanísticos con distribuciones espaciales que sean útiles para analizar el desarrollo urbano a nivel predial.
- Implementar un método de evaluación multicriterio AHP aplicado al desarrollo urbano integrando cada uno de los factores definidos.
- Elaborar un análisis de información urbanística multicriterio a través de herramientas geoinformáticas.
- Identificar las áreas espaciales caracterizadas por una alta idoneidad para el desarrollo urbano.

3. Antecedentes

En este capítulo se abordan documentos relacionados con el tema de estudio. Se citan investigaciones previas orientadas al estudio de diferentes elementos geográficos desde diferentes aristas que han aportado al urbanismo y a otras disciplinas con metodologías multicriterio y sistemas de información geográfica. Los documentos van desde publicaciones actuales a las más antiguas.

El primer antecedente relacionado con el caso de estudio lo encontramos con Ogródnik y Kolendo (2021), desarrollaron un método de identificación de áreas urbanas compactas, que se caracterizan por una estructura funcional y espacial completamente desarrollada. Para ello, utilizaron tecnología SIG y el Proceso de Jerarquía Analítica (AHP) para proponer un conjunto de criterios medibles para la compacidad de las estructuras urbanas. Como resultado, obtuvieron una serie de mapas que presentan la categorización del área de estudio en términos del nivel de desarrollo de una estructura funcional y espacial compacta. El método propuesto por los autores puede ser tanto una herramienta de apoyo para los gobiernos locales en Polonia como una herramienta para evaluar las estructuras de cualquier ciudad del mundo en términos de los criterios seleccionados de la ciudad compacta. Dicha metodología es importante en el contexto de la planificación y ubicación de edificios residenciales unifamiliares y multifamiliares.

Por el contrario, González (2020), empleo la evaluación espacial multicriterio en la conjugación de los factores integrantes del análisis general con el objetivo de seleccionar un espacio geográfico óptimo para la ubicación de una PTR-SU. Para la ejecución de las operaciones espaciales durante el análisis construyeron una base de datos geoespacial con dos grupos diferenciados de datos. Luego, para la selección de los sitios candidatos, emplearon la Evaluación Multicriterio a través del Proceso de Análisis Jerárquico (AHP). Posteriormente, emplearon el Método del Auto vector Principal por la Derecha (EGVM)

propuesto por Saaty para el cálculo de prioridades. Los resultados obtenidos corroboraron que la metodología de Evaluación Espacial Multicriterio en conjunción con el Proceso de Análisis Jerárquico y soportada sobre plataformas de Sistemas de Información Geográfica es apropiada en la determinación de sitios factibles para ejecutar la etapa de disposición final de los residuos sólidos urbanos.

Continuando con análisis ambientales, Liu y Li (2020), tomaron la ciudad montañosa del condado de Qianxi como objeto de investigación para realizar un análisis de sensibilidad ecológica con el método analítico espacial SIG y el método el Proceso de Jerarquía Analítica (AHP) para encontrar un sistema de evaluación de recursos del paisaje para el condado. La investigación mostro que los recursos del paisaje de la ciudad pueden reconocerse de manera vivida y global con SIG y AHP. El método evaluado, ayuda a integrar el paisaje terrestre y acuático de la ciudad y, a construir un patrón de paisaje de ciudad ecológica montañosa, cultural y habitable.

La calidad ambiental en las ciudades ha sido un factor a evaluar en los últimos años, Anza et al., (2020), versaron sobre el diseño una metodología para la correcta ubicación de tejados verdes en la ciudad de Madrid, que ayudaran a paliar las consecuencias de la excesiva contaminación, tráfico y escasez de áreas verdes. Su empleo logra, entre otras ventajas, reducir los efectos de las islas de calor, disminuir la contaminación acústica, reducir la contaminación, proteger las viviendas de la insolación y el frio, captar el agua de lluvia y mejorar la biodiversidad. En el estudio desarrollaron un método para seleccionar la ubicación ideal de los tejados verdes. En la primera fase, escogieron los barrios más problemáticos en cuanto a contaminación, trafico, población y áreas verdes a través de una evaluación multicriterio (basándose en el método de Saaty, 1980). En segundo momento, localizaron los edificios que presentan determinadas características en cuanto a altura y disponibilidad de azoteas para ubicar los tejados verdes. En la última fase, propusieron mejorar la conectividad

de los espacios verdes de la ciudad, conectando los tejados seleccionados con el arbolado urbano. La metodología propuesta fue sencilla y extrapolable a cualquier ciudad del mundo, con el que se pueden mejorar las condiciones ambientales existentes.

En el campo agrícola se han aplicado bastantes metodologías multicriterio, Ramamurthy et al., (2020), evaluaron las áreas aptas para maíz en el ecosistema semiárido del distrito de Mysuru de Karnatakam en el sur de la India, utilizando el enfoque integrado del Proceso de Jerarquía Analítica (AHP) y el Sistema de Información Geográfica (SIG). Los investigadores, utilizaron el método AHP para determinar los pesos de los parámetros y las puntuaciones de los subparámetros en el estudio. Las capacidades de modelado de SIG las utilizaron en el análisis de superposición ponderada de los parámetros de entrada en la evaluación de la aptitud de la tierra para el cultivo de maíz. El estudio demostró que el enfoque integrado de AHP y GIS resultó ser muy eficaz para aumentar la precisión en la evaluación de la idoneidad de la tierra. De dicho modo, los autores sugirieron que el marco de la FAO se utilice con AHP y GIS integrados en la futura evaluación de idoneidad de la tierra.

Por su parte, Ameen y Mourshed (2019), presentaron la etapa final de la investigación sobre el desarrollo urbano del Marco de Evaluación de la Sostenibilidad Urbana Iraquí (IUSAF), con el objetivo de clasificar los indicadores de sostenibilidad urbana locales identificados y traducirlos en un sistema de ponderación apropiado utilizando el proceso de jerarquía analítica (AHP), una técnica estructurada para organizar y analizar un conjunto complejo de criterios de decisión. Los resultados indicaron que los factores identificados y sus pesos y prioridades para Irak fueron marcadamente diferentes de las herramientas ampliamente utilizadas, lo que sugiere que las herramientas globales no son directamente aplicables en los países en desarrollo.

Continuando, Parvez y Islam (2019), realizaron un análisis de idoneidad basado en SIG utilizando el modelo AHP con criterio con el objetivo de descubrir los posibles sitios de

crecimiento urbano y ayudar al sector de planificación de Bangladesh a nivel de base y con el fin de resolver los problemas urbanos. Los sitios de crecimiento adecuados se determinaron a través de la opinión de expertos, de la matriz de comparación por pares y; de la determinación del valor ponderado. En el estudio, se prefirió el uso de análisis de decisiones multicriterio basado en SIG y AHP como una forma posible de tomar decisiones óptimas en la selección de un sitio adecuado para el potencial crecimiento urbano. El estudio cuantificó la dinámica espacial y funcional de los cambios en el uso de la tierra e identificó áreas potenciales para el desarrollo futuro. Los investigadores observaron que la asimilación de SIG con la evaluación de preferencias de estándares múltiples de AHP sirvió para identificar un lugar apropiado y alcanzable para el auge de la ciudad. Los resultados sugieren que la integración de SIG con AHP para metrópolis manejables apropiadas aumenta la decisión del sitio de crecimiento urbano de manera factible y poderosa.

Dos Santos et al., (2019), realizaron una revisión sistemática de la literatura sobre el apoyo del proceso de jerarquía analítica AHP en la toma de decisiones para el desarrollo sostenible con el fin de identificar brechas y futuras trayectorias de investigación. El estudio tuvo como objetivo recopilar, mapear, analizar y resumir la literatura académica internacional sobre AHP y el SP, dentro del periodo 2014-2018. Dentro de los modelos, encontraron que el AHP se ha utilizado cada vez más en conexión con otras técnicas MCDM, como la teoría difusa, TOPSIS, MIVES y TRIZ. De igual modo, los hallazgos arrojaron luz sobre los principales campos de aplicación de AHP para apoyar la toma de decisiones para el desarrollo urbano (SD). El documento sirve como un catálogo de mejores prácticas para el uso del AHP en todos los entornos y adoptarlo para los problemas de toma de decisiones prometedores para futuras investigaciones.

Por otro lado, en un caso de estudio agrícola Seyedmohammadi et al., (2019), evaluaron la idoneidad de la tierra para la producción de cebada utilizando un marco que

integró el modelo de elementos de materia, AHP, RS y GIS en la región de Dasht-e-Moghan, en el noroeste de Irán. La combinación y el análisis de criterios en un modelo de elementos de materia AHP generó un mapa de aptitud de la tierra para la producción de cebada. Se compararon estimaciones modeladas y se demostró que el enfoque híbrido de AHP y técnicas de elementos de materia era más preciso que los métodos de historia y raíz cuadrada para seleccionar las áreas más adecuadas para la producción de cebada. Por lo tanto, el método híbrido AHP puede mejorar la planificación y la toma de decisiones con respecto a la tierra que es adecuada para el cultivo de cebada. Este enfoque también puede ser adecuado para otros cultivos.

Siguiendo, Boggia et al. (2018) presentaron un modelo denominado GeoUmbriaSUIT, que integró Análisis Multicriterio y Sistemas de Información Geográfica, desarrollado específicamente para ayudar a los tomadores de decisiones a tomar decisiones de política sobre sostenibilidad en planificación. El modelo GeoUmbriaSUIT, estuvo destinado a evaluar la sostenibilidad de ciertas áreas a nivel local, regional y nacional en Malta utilizando múltiples criterios que cubrieron aspectos ambientales, económicos y sociales. Los resultados mostraron que la integración de MCDA y SIG son adecuados para la evaluación de sostenibilidad. En conclusión, el modelo ayuda al proceso complejo de evaluar el nivel de sostenibilidad de un área determinada.

Parry et al., (2018), consultaron la idoneidad del suelo urbano para la prestación de servicios urbanos utilizando el modelo AHP junto a un conjunto de criterios que involucraron variables geofísicas y socioeconómicas. Los resultados evidenciaron la idoneidad de los servicios urbanos en los distritos centrales de la ciudad en comparación con los distritos periféricos, los cuales exhibieron un nivel medio de idoneidad para el establecimiento de servicios. Finalmente, el estudio proporcionó información sobre la idoneidad del suelo para el establecimiento de comodidades urbanas futuras.

Hidalgo et al., (2018), buscaron explicar como la incorporación del suelo rural al desarrollo urbano de las ciudades intermedias, es un fenómeno creciente en que los desarrolladores inmobiliarios solo contemplan la variable de costo beneficio. Por ello propusieron un modelo multicriterio (Proceso Analítico Jerárquico, AHP), que ayudó a priorizar la vocación urbana, partiendo de cinco micro variables. La investigación busco dar una propuesta de ordenamiento territorial y evitar caos existente en la ciudad de Pachuca y sobre todo que exista una mejor calidad de vida.

Carli et al., (2018), propusieron el uso de una técnica de toma de decisiones multicriterio del Proceso de Jerarquía Analítica para su aplicación en el contexto de la ciudad metropolitana inteligente con el objetivo de analizar el desarrollo sostenible de los sistemas de energía, agua y medio ambiente, a través de un conjunto de indicadores objetivos de desempeño. AHP proporcionó resultados similares a los obtenidos por los procedimientos establecidos, confirmando así su robustez. Por otro lado, AHP presentó características distintivas y ventajosas reduciendo las decisiones complejas a una serie de comparaciones que sintetizan los resultados cuantitativos.

Zarghami et al., (2018), realizaron una investigación con el objetivo de personalizar las categorías y los criterios de las herramientas de evaluación de la sostenibilidad conocidas con respecto a las prioridades en las preocupaciones de sostenibilidad de Irán con el fin de desarrollar una herramienta de evaluación de la sostenibilidad iraní adecuada para edificios residenciales. Para la revisión de los puntos de acuerdo con las necesidades de sostenibilidad de Irán, llevaron a cabo el método Fuzzy Analytical Hierarchy Process (FAHP). Se concluyó que existen similitudes y diferencias de las categorías de ISAT, en comparación con las herramientas internacionales de evaluación de la sostenibilidad. Los expertos locales recomendaron que la herramienta de evaluación podría ser rentable y adaptable para el contexto iraní, ya que se basaba en el conocimiento técnico y las experiencias de expertos

profesionales en construcción residencial. En conclusión, la plataforma implementada podría ser una herramienta confiable que sirva de guía para los responsables políticos y los expertos en construcción para implementar la sostenibilidad con respecto a los problemas de insostenibilidad de los edificios residenciales de Irán.

Bathrellos et al. (2017), realizaron una estimación de idoneidad para el desarrollo urbano donde el objetivo principal fue sintetizar mapa de amenazas naturales en un solo mapa de amenazas múltiples y, así identificar áreas adecuadas para el desarrollo urbano. La metodología aplicada se basó en análisis multicriterio y SIG. Los mapas de evaluación de deslizamientos de tierra, inundaciones y peligros sísmicos se generaron por separado y se combinaron mediante la aplicación del Proceso de Jerarquía Analítica (AHP) y el uso de un Sistema de Información Geográfica (GIS) produciendo un mapa de peligros múltiples. Los resultados demostraron el uso de mapas de peligros múltiples en el desarrollo urbano y se puede utilizar en la planificación del uso de la tierra y la mitigación de peligros.

Aburas et al., (2017), utilizaron un Sistema de Información Geográfica (SIG) y un Proceso de Jerarquía Analítica (AHP) para elegir las mejores ubicaciones de crecimiento urbano en Seremban, Malasia. Para el AHP basado en SIG, utilizaron estudios previos y opiniones de expertos para identificar los factores significativos que influyen en la determinación de sitios apropiados para el crecimiento urbano. Las herramientas SIG que utilizaron fueron distancia euclidiana, reclasificación, conversión, unión, calculadora de ráster y generador de modelos. Se evidenció que dichas técnicas pueden ayudar a salvar el ecosistema en áreas marginales, así como crear un desarrollo sostenible para el futuro. Los resultados confirmaron que el modelo SIG y AHP son una técnica útil para la gestión ambiental y la planificación urbana.

De otro lado, Myagmartseren et al., (2017), plantearon un documento con conocimientos de las oportunidades que brindan las herramientas multicriterio con SIG para

localizar nuevas áreas urbanas. La metodología la desarrollaron mediante el Proceso de Jerarquía Analítica (AHP) donde se identificaron criterios relevantes con respecto a las consideraciones físicas y los requisitos mínimos que se encuentran en el plan urbano y documentos de visión de Ulaanbaatar. Posteriormente, hicieron el procesamiento SIG y; finalmente, procedieron con un análisis de sensibilidad con el fin de evaluar la respuesta del modelo. Los resultados produjeron mapas de restricciones combinados para el proceso de planificación de nuevas áreas urbanas, demostrando las ventajas de considerar las oportunidades utilizando MCDA con SIG para el desarrollo urbano.

Banani et al., (2016), propusieron un marco para el desarrollo de criterios de evaluación de edificios no residenciales sostenibles nacionales para Arabia Saudita. Los autores utilizaron un Proceso de Jerarquía Analítica (AHP) para determinar la importancia relativa de las variables, que incluyeron criterio, subcriterios y grupos de indicadores. Los resultados de AHP mostraron que en Arabia Saudita el acceso al agua es el tema más importante debido a su relación con la salud humana y las condiciones áridas del Reino Unido. Es así, como los resultados mostraron que el método AHP podría proporcionar soluciones para problemas complejos que involucren criterios, partes interesadas y tomadores de decisiones en escenarios de alta incertidumbre y alto riesgo.

Para la ubicación de estructura también se ha implementado los métodos multicriterio. Chaudhary et al. (2016), documentaron el mapeo de la zonificación de idoneidad de la estación de bomberos en la ciudad metropolitana de Katmandú utilizando el proceso de toma de decisiones grupales (GDMP) en la interfaz SIG. Se consideraron para el análisis cuatro factores de criterios de selección diferentes y, el Proceso de Jerarquía Analítica (AHP) desarrollado por Saaty se utilizó para el Proceso de toma de decisiones grupales (GDMP). Los resultados revelaron que solo el 13,46% del área de estudio es muy adecuada para la ubicación de la estación de bomberos. Por lo tanto, mediante la técnica de superposición en SIG, se obtuvo el

mapa de zonificación de idoneidad de la estación de bomberos el cual fue confiable. El mapa que se presentó en el estudio puede ser una buena fuente para las autoridades interesadas y proporcionar información valiosa para los trabajos de desarrollo relacionados con la gestión de la estación de bomberos.

Por su parte, Wey (2015), presento un modelo de toma de decisiones para llegar a una decisión grupal donde se identificará los mejores sitios para la construcción de una nueva estación de tránsito de metro en Tapei-Taiwan. El modelo se basó en un enfoque combinado de Proceso Jerárquico Analítico Difuso (FAHP) y análisis envolvente de datos con región de garantía probabilística (DEA/AR). El enfoque propuesto amplía los estudios previos al evitar el principal inconveniente de los métodos existentes y, lo que es más importante, al abordar el problema de la selección del sitio de una manera más convincente y persuasiva.

Mosadeghi et al., (2015), compararon los resultados de diferentes técnicas de MCDM como el Procedimiento de Jerarquía Analítica (AHP) y AHP Difuso en el contexto de la expansión urbana a lo largo de un importante corredor de transporte entre las dos ciudades más grandes del sureste de Queensland, la Gold Coast y Brisbane. El estudio mostro como la toma de decisiones espaciales puede usarse no solo para clasificar la prioridad de las opciones y realizar el análisis de escenarios, sino también para proporcionar información sobre la expansión espacial de las alternativas. El hallazgo proporcionó una nueva dirección para seleccionar el método MCDM para fines urbanísticos, si la planificación tiene como objetivo identificar la prioridad de áreas de desarrollo urbano como punto focal, los métodos MCDM como AHP son suficientes.

En la ciudad de Dhanbad – India, Khan y Samadder (2015), utilizaron un enfoque de análisis de decisiones multicriterio (MCDA) basado en SIG para evaluar los vertederos más adecuados para el medio ambiente en el área de estudio. Los mapas que mostraron los vertederos adecuados se generaron aplicando una combinación lineal ponderada (WLC) de

pesos derivados de AHP en SIG utilizando una matriz de comparación para agregar diferentes escenarios significativos asociados con objetivos ambientales y económicos. En el estudio, once posibles vertederos fueron identificados utilizando SIG que satisfacen la mayoría de los requisitos deseables.

Zietsman y Vanderschuren (2014), discutieron la aplicación de un análisis de Proceso de Jerarquía Analítica (AHP) para la evaluación de un desarrollo potencial de múltiples aeropuertos. Los autores consideraron mejor el uso de una herramienta de evaluación del Proceso de Jerarquía Analítica (AHP) comúnmente aplicada en los sistemas de Toma de Decisiones de Criterios Múltiples (MCDM). Los hallazgos proporcionaron una indicación para la planificación futura de la CTIA, y el método utilizado puede adoptarse en otros lugares. La aplicación del método del Proceso de Jerarquía Analítica (AHP) se identificó como una herramienta apropiada para embarcarse en la evaluación del tamaño del aeropuerto de la CTIA. Se concluyó que AHP aborda adecuadamente estas necesidades, ya que amalgama diferentes puntos de vista y mide la importancia en un proceso ordenado que da como resultado una ponderación de criterios.

Taleai et al., (2014) introdujeron un Marco de Evaluación Integrado de la Equidad Espacial (ISEE) basado en el análisis espacial multicriterio para evaluar la equidad espacial. El objetivo del trabajo fue desarrollar un sistema multifuncional de evaluación de la equidad en múltiples escalas a nivel de parcela que abordara los problemas de distribución espacial urbana. Para ello, aplicaron el método multicriterio de Jerarquía Analítica (AHP) para obtener las preferencias de los tomadores de decisiones y producir ponderaciones de cada criterio. Este marco midió el equilibrio entre las demandas generadas por las zonas residenciales y la oferta brindada por los servicios urbanos en diversas escalas espaciales. Los resultados mostraron que en general el área de estudio tiene un exceso de oferta de servicios educativos y una oferta insuficiente de servicios recreativos.

En conclusión, el modelo propuesto por Taleai et al., (2014) se puede aplicar para evaluar la eficacia de posibles políticas para abordar desequilibrios que ayuden a los planificadores urbanos a desarrollar propuestas de servicios que promuevan la equidad espacial considerando los estándares mínimos del servicio.

Finalmente, Iojă et al., (2014) utilizaron un análisis multicriterio aplicado en el Área Metropolitana de Bucarest para crear una herramienta para integrar los conflictos de uso del suelo en las estrategias para la planificación del territorio a nivel metropolitano. Concluyeron que los conjuntos presentados de indicadores de conflictos de uso espacial de la tierra son instrumentos útiles para mejorar las políticas y estrategias de planificación, aumentar la conciencia social de la población y proporcionar proyecciones económicas directas para desarrolladores. Los conflictos pueden ser de gran ayuda para los responsables políticos y las autoridades en el proceso de toma de decisiones, especialmente en los países de Europa del Este, porque esta metodología puede representar un punto de partida para estas evaluaciones.

4. Referente Legal y Normativo

En este apartado se abordan las normativas que tienen relación con el caso de estudio y que permiten que se pueda desarrollar de manera eficaz y articulada acorde con lo establecido en el territorio nacional y local. El referente legal y normativo permite orientar la identificación de las áreas idóneas para el desarrollo urbano indicando los parámetros y elementos que constituyen la planificación.

4.1. Constitución Política de Colombia de 1991

La Constitución Política de Colombia de 1991 como carta magna del país, entiende el ordenamiento territorial como política de estado y como instrumento para la planificación de desarrollo y la ocupación y administración del territorio. De la Constitución se desprenden Leyes y decretos, entre ellos los de ordenamiento territorial el cual orienta el desarrollo urbano.

4.2. Ley 388 de 1997 o de Desarrollo Territorial en la Gestión del Suelo Urbano

La Ley 388 de 18 de Julio de 1997 o ley de desarrollo territorial es la que define las herramientas para el ordenamiento territorial. En el Capítulo III, la Ley 388 define el Plan de Ordenamiento Territorial POT como el instrumento básico para desarrollar el proceso de ordenamiento del territorio municipal. En este se definen las directrices para orientar y administrar el desarrollo físico del territorio y la utilización del suelo. La Ley 388 constituye un organismo normativo urbanístico de aplicación en todo el país, en teoría esta Ley dota que dota a los municipios de herramientas o instrumentos de planificación y gestión, entre ellos el POT.

4.3. Ley General Ambiental de Colombia Ley 99 de 1993

Créase el MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE como organismo rector de la gestión del medio ambiente y de los recursos naturales renovables, encargado de impulsar una relación de respeto y armonía del hombre con la naturaleza y de definir, en los términos de la presente ley, las políticas y regulaciones a las que se sujetarán la recuperación, conservación,

protección, ordenamiento, manejo, uso y aprovechamiento de los recursos naturales renovables y el medio ambiente de la Nación a fin de asegurar el desarrollo sostenible.

4.4. Acuerdo 0373 de 2014 - Plan de Ordenamiento Territorial de Santiago de Cali

El POT es el instrumento encargado de la planificación de los territorios, permite el uso racional del suelo, además muestra las condiciones para el reparto de cargas. El Concejo Municipal de Santiago de Cali en el Acuerdo 0373 de 2014, Artículo 1, expone que el POT tiene como parte de la Visión: conocer, visibilizar las potencialidades de todo tipo que existan en el territorio para desarrollarlas y aprovecharlas sin desmeritar sus calidades ambientales teniendo como principio rector el interés general y búsqueda de calidad de vida de sus habitantes. El POT motiva al desarrollo urbano compacto que dinamice diversas zonas de la ciudad.

Gracias al POT, se conoce la ruta para poder planificar y generar proyectos de desarrollo urbano que vayan articulados con la norma.

5. Marco Conceptual

En este capítulo se muestran los conceptos más esenciales para abordar los procesos de desarrollo urbano y las herramientas geoespaciales que se pueden utilizar para apoyar la planificación y toma de decisiones en la selección de soluciones óptimas que permitan manejar cantidad de datos e integración de múltiples criterios. Siendo así, en orden jerárquico, partiendo de lo general a lo particular, el primer aspecto teórico a tratar es el desarrollo urbano sostenible, este como un concepto que se construye y aborda principalmente desde el desarrollo sostenible. Además, de ser el concepto que comprende el desarrollo del presente trabajo.

En segundo momento, se aborda el concepto sobre análisis multicriterio, este necesario para saber la importancia de dicho instrumento y los métodos de aplicación, los cuales nos dan las herramientas pertinentes para aplicar al caso de estudio.

5.1. Desarrollo Urbano

En el presente estudio, se entiende el desarrollo urbano como un enfoque que va de la mano con la planificación territorial y la sostenibilidad y; por consiguiente, del ordenamiento territorial, que se enmarca en el mejoramiento integral de las ciudades con el fin de brindar mejor calidad de vida a la población respondiendo a los requerimientos que se demandan, haciendo uso razonable de los bienes naturales y explotando el potencial de desarrollo de las ciudades.

El concepto mencionado, ha sido empleado desde hace varios años, “como actividad instrumentada regulada, desde el planteamiento urbano, emerge como temática y actividad con la expansión de las viejas ciudades europeas a mediados del siglo XIX” (Marquez, 2010, p.110). Con el tiempo el concepto de desarrollo urbano ha ido evolucionando adaptándose a las nuevas necesidades físico-sociales que exigen las urbes; es de tal manera, que a la actualidad se habla de Desarrollo Urbano Sostenible (SUD) el cual se enmarca en el

mejoramiento integral de las ciudades incorporando fuertemente el ámbito ambiental y de la salud.

Partiendo de lo anterior, se encuentra una definición donde el concepto de desarrollo urbano es empleado de la siguiente manera:

Para referirse a procesos relacionados con el crecimiento de las ciudades. Asimismo, suele emplearse el concepto de desarrollo urbano de manera indistinta e intercambiable con el concepto de urbanización, o bien se lo usa a partir de una amplia variedad de aspectos desde los cuales se aborda el fenómeno, pero tomándolo más como contexto en el cual se desenvuelve el aspecto específico que se analiza que como fenómeno en sí. (Correa y Rozas, 2006, p. 12)

Para complementar y; adentrando en la definición del desarrollo desde la parte urbana, Marquez (2010) hace referencia que:

El desarrollo urbano está ligado, de un lado, al crecimiento de las ciudades a partir del aumento poblacional y el incremento en la demanda, por parte de la población, de suelo, vivienda, espacios públicos y áreas para el aprovisionamiento de bienes y servicios, generando un aumento en la densidad de la ocupación del territorio y un mayor consumo de suelo; y de otro lado en el crecimiento económico de los centros urbanos, a partir del aumento en los ingresos de las finanzas públicas y de sus ciudadanos, y aunque más relegado de los estudios urbanos, el desarrollo urbano está igualmente ligado al crecimiento en los indicadores sociales relacionados por ejemplo con el acceso a la educación, los servicios de salud, entre otros. (p.111)

Prosiguiendo, Correa y Rozas (2006) mencionan que:

El desarrollo urbano suele ser analizado desde diferentes miradas, énfasis o ejes, a los cuales se les atribuye un cierto peso causal en el perfil que adquiere dicho

desarrollo. En algunos casos se aporta alguna evidencia empírica en tal sentido, sino para establecer correlaciones estadísticas, al menos para descubrir regularidades empíricas y; desde allí, hacer algunas inferencias analíticas. Estas miradas o ejes pueden agruparse en cuatro grandes categorías, no necesariamente excluyentes entre sí en el sentido que las políticas de desarrollo urbano que se impulsen pueden ser complementarias, a saber: sostenibilidad, equidad social, crecimiento económico - competitividad y calidad de vida. (p.13-14)

Por otro lado, con el pasar del tiempo el concepto de desarrollo urbano ha evolucionado, hasta incorporar el concepto de sostenibilidad. De dicha manera, se encuentra una definición de hogaño de Van Hauwermeiren (como se citó en Villena y Galiano, 2017), menciona que “el desarrollo sostenible es el desarrollo que satisface las necesidades del presente, sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras, de satisfacer sus propias necesidades” (p.7). Igualmente, el desarrollo urbano sostenible “se caracteriza por permitir condiciones como la inclusión y la accesibilidad a todos sus habitantes, además, que propicia el crecimiento económico y social de los pobladores con el uso óptimo de los recursos, y lo hace buscando la mayor armonía posible con el medio ambiente” (Muñoz, 2015, p.9).

Por su parte, Tan (2016) comenta lo siguiente:

En un contexto urbano, el desarrollo urbano sostenible (SUD) puede definirse como un proceso de integración, interacción y coevolución sinérgica entre los subsistemas económico, social, físico y ambiental que conforman una ciudad que garantiza un nivel de bienestar no decreciente para la ciudad y población a largo plazo manteniendo un equilibrio con las áreas circundantes y contribuyendo a reducir los efectos nocivos sobre la biosfera (Camagni, 1998). (p.418)

De acuerdo con las definiciones citadas y según Millard-Ball (como se citó en Campos et al. (2018), “el objetivo principal del planeamiento y desarrollo urbano sostenible consiste en desarrollar un capital social, y proporcionar los indicadores adecuados para conseguir calidad de vida en las ciudades” (p.46).

De acuerdo a lo anterior, “se percibe el desarrollo urbano sostenible como un paradigma para proporcionar una oportunidad de formar nuevos mecanismos para construir un futuro urbano deseable. El desarrollo urbano sostenible mejora la calidad de vida en una ciudad, incluyendo ecología, cultura, componentes políticos, institucionales, sociales y económicos” (Yigitcanlar y Teriman, 2014, p.1-2).

“Asumir un desarrollo urbano sostenible conlleva necesariamente la incorporación al planeamiento de la innovación y la creatividad, así como de procedimientos para su evaluación, lo que afecta directamente a su impacto económico sobre la ciudad. (Campos et al., 2018, p. 59).

Por otro lado, desde la normativa nacional, la Ley 99 de 1993 define el desarrollo sostenible como “el que conduzca al crecimiento económico, a la elevación de la calidad de la vida y al bienestar social, sin agotar la base de recursos naturales renovables en que se sustenta, ni deteriorar el medio ambiente o el derecho de las generaciones futuras a utilizarlo para la satisfacción de sus propias necesidades” (Art. 3). La anterior definición, permite entender hacia dónde se direcciona el desarrollo urbano sostenible en el territorio colombiano.

También, el Acuerdo 0373 de 2014 de Santiago de Cali define el desarrollo sostenible como “el desarrollo que conduzca al crecimiento económico, a la elevación de la calidad de vida y al bienestar social, sin agotar la base de recursos naturales renovables en que se sustenta, ni deteriorar el medio ambiente o el derecho de las generaciones futuras a utilizarlo para la satisfacción de sus propias necesidades” (p.414).

Adicionalmente, el Acuerdo 0373 de Santiago de Cali expone la reciprocidad entre el Ordenamiento Territorial y el desarrollo urbano:

en un marco de desarrollo urbano compacto que dinamice diversas zonas de la ciudad, facilitando el crecimiento e incluyendo su ruralidad bajo criterios de sustentabilidad y sostenibilidad ambiental, humana, económica y equidad social protegiendo los recursos naturales, el medio ambiente y los demás recursos físicos, económicos, financieros públicos y privados que intervienen en la dinámica del territorio , dándole un mayor impulso al espacio público, el sistema de movilidad, donde se respete el peatón y tenga prioridad el transporte. (Acuerdo 0373, 2014, p.2)

Es fundamental resaltar que las concepciones teóricas aludidas brindan una explicación general del contexto a abordar en el área de estudio.

5.2. Análisis Multicriterio

La identificación de áreas para el desarrollo urbanístico requiere de instrumentos, metodologías y técnicas idóneas que estén soportadas por bases científicas que permitan integrar múltiples atributos que componen el territorio, eliminando de cierto modo el sesgo en la toma de decisiones y aumentando la eficiencia en la planificación urbana. Ante ello, se encuentran las técnicas de análisis espacial como el análisis de decisión multicriterio, este permite la valoración de diferentes elementos en el desarrollo urbano como los son las dimensiones sociales, ambientales, jurídicas, físicas, económicas, de movilidad y culturales.

Adentrando en definiciones sobre decisiones multicriterio, se encuentra la siguiente:

La evaluación multicriterio y multiobjetivo es un conjunto de técnicas utilizadas en la toma de decisiones multidimensional para evaluar una serie de alternativas, que satisfacen uno o varios objetivos, a la luz de múltiples criterios (Delgado, 2008). Este tipo de análisis se emplea como complemento a la aplicación de modelos de

asignación-localización, para la selección final entre las variantes calculadas.

(González, 2020, p.115)

Por otros autores, el análisis multicriterio (MCA) es definido como:

Un método que se puede utilizar en la planificación espacial para ayudar a los responsables de la toma de decisiones a explorar y resolver múltiples problemas complejos. El MCA representa un análisis de la toma de decisiones basado en la teoría de la ciencia de la decisión que es capaz de evaluar cuantitativamente las alternativas teniendo en cuenta diferentes perspectivas y prioridades para producir un resultado común. (Iojă et al., 2014, p.113)

Según Rodríguez (como se citó en González, 2020) “la evaluación espacial multicriterio es un proceso donde datos geográficos son combinados y transformados en una decisión; es mucho más difícil que la evaluación multicriterio convencional, pues un gran número de factores necesitan ser identificados y considerados con una alta correlación entre los mismos”. (p.113)

Prosiguiendo, Nijkamp y Van Delft, 1977 cit. en Delgado, 2008 (como se citó en González, 2020), “los análisis multicriterio y los modelos de decisión multiobjetivo ofrecen la oportunidad de obtener un análisis equilibrado de todas las facetas de los problemas de planificación, particularmente debido a que varios efectos intangibles, como los sociales y las repercusiones ambientales pueden ser considerados cabalmente”. (p.115)

Por parte de Zietsman y Vanderschuren (2014), la Toma de Decisiones Multicriterio (MCDM) se define como un enfoque "utilizado para evaluar las ventajas y desventajas de las alternativas sobre la base de múltiples criterios, especialmente cuando existen diferentes opciones con múltiples dimensiones potencialmente conflictivas, que no pueden ser evaluadas

mediante la medición de una dimensión simple y única (Postorio y Pratico, 2012)". (Zietsman y Vanderschuren, 2014, p.42)

Por otro lado, Boggia et al. (2018) afirma que "el análisis de decisión de criterios (MCDA), asume un papel central en la evaluación multidimensional. Se utiliza para resolver problemas complejos evaluando todas las capacidades, tanto individual como colectivamente y, asignando importancia a cada uno" (p.282).

Continuando con el objeto de análisis multicriterio, De Groot et al. (como se citó en Esse et al., 2014), considera que "son herramientas que contribuyen a simplificar la lectura de información territorial, permitiendo generar bases de datos respecto a los atributos que componen el espacio geográfico" (p.290).

Sumado a lo anterior, Esse et al. (2014) afirman que:

El análisis espacial multicriterio ofrece la posibilidad de definir los estándares metodológicos para el mapeo de servicios ecosistémicos, debido a que dicha técnica es flexible en su forma, permite rescatar la opinión de expertos y actores sociales, la cual es especializada a través de una plataforma SIG.

La evaluación multicriterio incorpora la opinión o percepción de los actores en las variables y criterios que componen el modelo de evaluación. Los criterios son seleccionados cuidadosamente por expertos (evitando la presencia de sesgos), para luego ser ponderados y valorados por los actores locales, mientras que los SIG permiten integrar las variables y sus criterios con atributos geoespaciales. (p.290)

Avanzando, Malczewski (2006), Sherrouse et al. (2011) (como se citó en Esse et al., 2014), discurre que "las técnicas de evaluación multicriterio se han posicionado de manera progresiva en la comunidad científica y en la gestión pública, dado que permiten integrar tanto

valores percibidos por las personas como aquellos que son expresados en términos económicos” (p.296).

Adentrando en las preeminencias del análisis multicriterio, Feick (como se citó en Esse et al., 2014) menciona que “la mayor ventaja de incorporar la evaluación multicriterio a las herramientas SIG, es la posibilidad de asignar diversos juicios de valor a los componentes del paisaje y otorgarles proyección espacial” (p.297). Feick (como se citó en Esse et al., 2014) complementa mencionando que “la evaluación multicriterio incorpora la opinión o percepción de los actores en las variables y criterios que componen el modelo de evaluación. Los criterios son seleccionados, cuidadosamente, por expertos (evitando la presencia de sesgos), para luego ser ponderados y valorados por los actores locales, mientras que los SIG permiten integrar las variables y sus criterios con atributos geoespaciales (p. 290).

Se debe resaltar que los instrumentos multicriterio tienen diversos métodos de abordaje como la Ponderación Lineal, Utilidad Multiatributo, Relaciones de Superposición y Proceso Analítico Jerárquico (AHP). La técnica mencionada de último es una de las más utilizadas, es así como Myagmartseren et al. (2017) mencionan que:

En los últimos 20 años de trabajos científicos relacionados con la integración de MCDA con GIS se han inventado una serie de reglas de decisión multicriterio. Sin embargo, algunas se utilizan con más frecuencia. El método más desarrollado, es el proceso de jerarquía analítica (AHP) desarrollado por Saaty, que utiliza ponderación aditiva y también puede derivar las ponderaciones asociadas con las capas del mapa, además de poder agregar e incluir el nivel que representa alternativas en la estructura jerárquica. Además, AHP es capaz de relacionar criterios tanto tangibles como intangibles. (pp.3-4)

Por su parte, Zietsman y Vanderschuren (2014) indican que:

AHP es un modelo matemático derivado para analizar decisiones complejas integrando diferentes unidades de medida en una sola escala. El AHP es ampliamente utilizado por los investigadores (Janic y Reggiani, 2002) y se aplica ampliamente a una variedad de problemas de toma de decisiones debido a su capacidad para lidiar con los efectos conflictivos, multidimensionales, inconmensurables e inciertos de las decisiones de manera inequívoca (Yoo y Choi, 2006). Los profesionales utilizan AHP por su especificidad, ya que ofrece libertad a quien toma las decisiones para expresar una preferencia por criterios particulares utilizando una escala determinada. Además, no requiere una cuantificación explícita de criterios. Por esta razón, el AHP se considera una herramienta de apoyo a la toma de decisiones utilizada para resolver problemas complejos mediante la formulación y el análisis de decisiones (Berrittella et al., 2009). AHP descompone el problema en el objetivo / meta, los criterios y subcriterios, y las alternativas de decisión, en términos de orden jerárquico (Berrittella et al., 2009), analizando los factores que inciden en el problema (Castelli y Pellegrini, 2011).

El método AHP utiliza datos recopilados a través de una encuesta. La importancia de un elemento sobre otro se estima mediante comparaciones por pares de los elementos de la jerarquía, según el juicio del encuestado. (p.42)

En otras palabras, González (2020) alude:

El AHP es según (Saaty, 2008) una teoría de la medida a través de comparaciones por pares que se basa en los juicios de los expertos para derivar escalas de prioridad. Es una técnica de decisión multicriterio propuesta por T.L. Saaty entre los años 1977 y 1980 que combina aspectos tangibles e intangibles para obtener, en una escala de razón, las prioridades asociadas con las alternativas del problema.

(p.116)

Finalmente, Convertino et al. (como se citó en Lojã et al., 2014) nombra que “todos los análisis de ACM tienen un patrón común: definir las alternativas a clasificar, identificar los criterios que influirán en el resultado, asignar ‘pesos’ a los criterios y normalizarlos, y determinar los valores finales.” (p.113)

Se puede concluir que todas las definiciones sobre análisis multicriterio apuntan hacia un mismo camino, que es incorporar, analizar y evaluar varios factores de acuerdo al contexto a trabajar con el objetivo de tomar la decisión más adecuada. Es de saber que cada técnica multicriterio trae consigo unas características intrínsecas que permiten abordar respectivas problemáticas. Para este caso de estudio, el análisis multicriterio de Proceso Analítico Jerárquico (AHP) permite ahondar mejor en técnicas que se relacionan con el desarrollo urbano.

6. Área de Estudio

El área de estudio se enmarca en el país de Colombia, departamento del Valle del Cauca, distrito de Cali, precisamente hacia la zona centro-oriente de la ciudad, en la comuna 11, barrio Los Sauces lugar objeto de estudio. Los barrios que circundan el espacio objeto son Unión de Vivienda Popular, Antonio Nariño, Villa del Sur, La Independencia, Maracaibo, San Carlos y José María Córdoba.

El distrito de Cali cuenta con una población de 2.227.642 habitantes según cifras DANE para el año 2018¹. A su vez, el barrio Los Sauces tiene 7.794 hab., equivalente al 0,35% de la población total presente en el Distrito; de dicha población, hay 4.171 mujeres y 3.623 hombres. Dentro del barrio hay un total de 1.036 predios que se integran por 2.261 viviendas y 2.136 hogares.

Urbanísticamente el área de estudio se encuentra en una zona con actividades heterogéneas; en el interior del barrio se concentran las áreas de actividad residencial predominante y algunos espacios públicos; por el contrario, en las partes externas del barrio hay áreas de actividad mixta y un equipamiento. En cuanto a la movilidad, el lugar es atravesado por varias vías relevantes, en sentido sur a nororiente esta la vía arteria principal Autopista Oriental (Cll 36), hacia el norte, en sentido occidente-oriente se encuentra la vía arteria secundaria Av. Nueva Granada (Cra. 39), hacia la zona occidental se encuentran tres (3) vías colectoras y, finalmente están las vías locales. Lo señalado, hace del barrio Los Sauces un lugar con condiciones urbanas valiosas y estratégicas.

El área de análisis se caracteriza por contener buen comercio, por concentrar una población considerable y, por contar con un buen sistema de movilidad. Sin embargo, en el área no se cuenta con equipamientos de salud y educación de alto impacto que satisfaga las

¹ La información poblacional se obtuvo del Censo realizado para el año 2018 por parte del DANE.

7. Materiales y Métodos

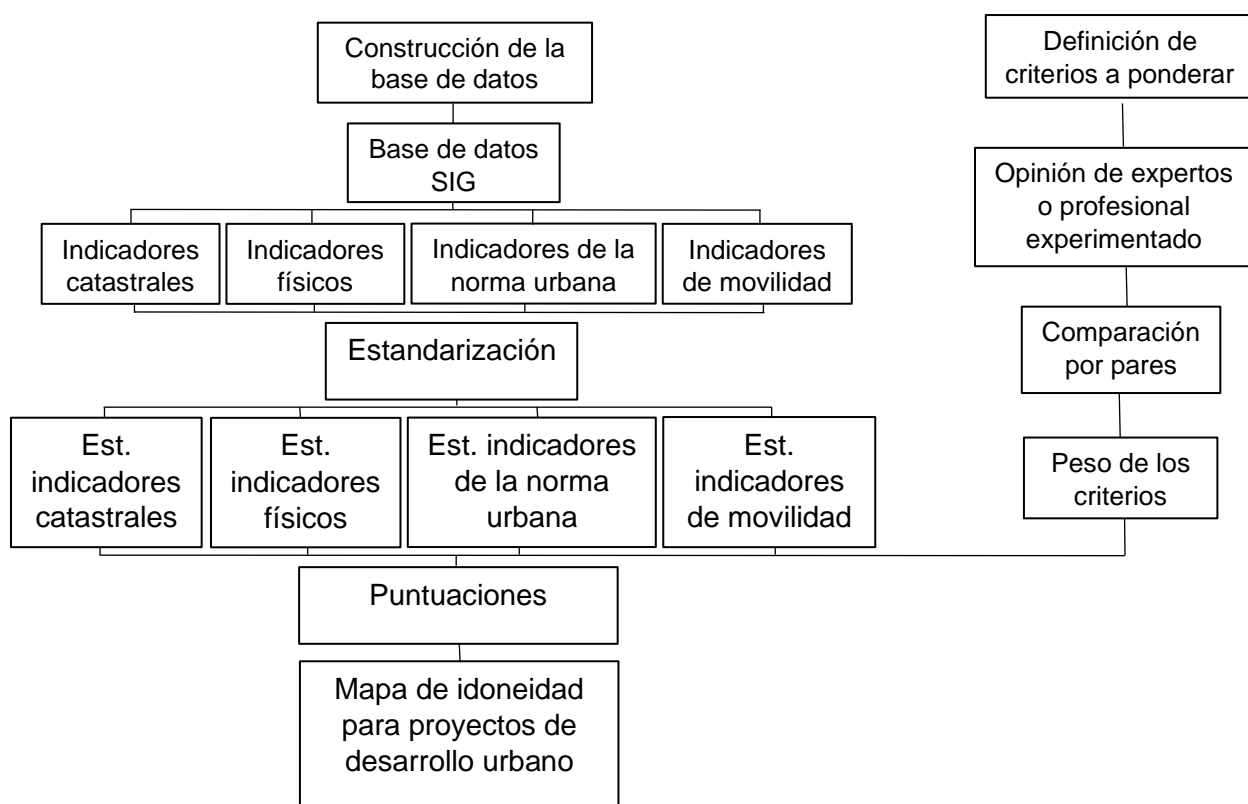
Para este trabajo se implementó la combinación del Proceso de Jerarquía Analítica (AHP) propuesto por Thomas Saaty, el cual se complementó con una serie de herramientas geoinformáticas, destinadas a evaluar la idoneidad urbanística a nivel predial haciendo uso de cuatro (4) categorías como lo son catastrales, normativas, físicas, y de movilidad las cuales se complementaron por múltiples criterios. AHP se trata de una teoría de cálculos que utiliza el método de comparación por pares de los criterios, donde parte de una matriz cuadrada en la cual el número de filas y columnas está definido por el número de criterios a ponderar, determinando de dicho modo la importancia relativa de cada uno.

Lo mencionado se basa en juicios de expertos para obtener escalas de prioridad. Saaty (como se citó en Basharat et al., 2016) menciona que “la técnica de superposición ponderada se define para desarrollar un mapa utilizando superposiciones de varias capas ráster dando el peso de cada capa ráster de acuerdo con su importancia” (p.10). Para esta investigación se utilizó el método de superposición ponderada AHP para producir un mapa temático de idoneidad para el desarrollo urbano dentro del barrio Los Sauces, en la ciudad de Cali, esto se debe a que es una técnica confiable para este propósito.

Para identificar el potencial de los inmuebles a proyectos de desarrollo urbano, se implementó un esquema general de la metodología que se describe mediante las etapas siguientes.

Figura 2

Diagrama de flujo de la metodología para la identificación de áreas idóneas para desarrollo urbano



7.1. Definición de Categorías y Criterios a Evaluar

Los criterios a ponderar y evaluar, deben ser seleccionados por múltiples expertos en el área que incorporen información completa, precisa y de alta calidad para resolver los problemas complejos. Los factores deben ser adecuados, de alto impacto en el caso de estudio y se debe evitar la repetitividad. Como menciona Iojá et al., (2014):

Los indicadores elegidos deben permitir una interpretación intuitiva basada en simplicidad matemática y datos modestos (Jaeger et al., 2010) y deben ser

cuantificables, sensibles a los cambios en la cobertura del suelo, temporal y espacialmente explícitos y escalables (Larondelle y Haase, 2013); deben poder reflejar no solo los fenómenos analizados, sino también las necesidades y objetivos particulares representados por la diversidad en un área de estudio elegida (Shen et al., 2011) (p. 112).

Prosiguiendo, Keeney y Raiffa (como se citó en Makropoulos, 2004):

Identificaron una serie de propiedades de un conjunto de criterios de evaluación. Sugirieron que cada criterio de evaluación debe ser integral y medible y el conjunto debe ser completo (cubrir todos los aspectos del problema), operativo (significativo en el análisis), descomponible (dividido en partes para simplificar el proceso), no redundante (evitar el doble contando) y mínimo. El proceso de selección tiene que ser particular al problema en cuestión y depender de las características del sistema que se analiza. Una observación detallada del sistema aumenta la comprensión de los procesos involucrados, sus interacciones y la importancia de los diferentes conjuntos para el rendimiento y la precisión del modelo, lo que a su vez conduce a la adopción de un conjunto apropiado. (p.70)

Para el estudio, se basó la selección de los criterios en su relevancia para los objetivos planteados y la disponibilidad de datos. Siendo así, se escogieron diez (10) criterios relacionados con cuatro (4) categorías: catastrales, de movilidad, normativas y físicas las cuales son de suma importancia en el sector urbanístico.

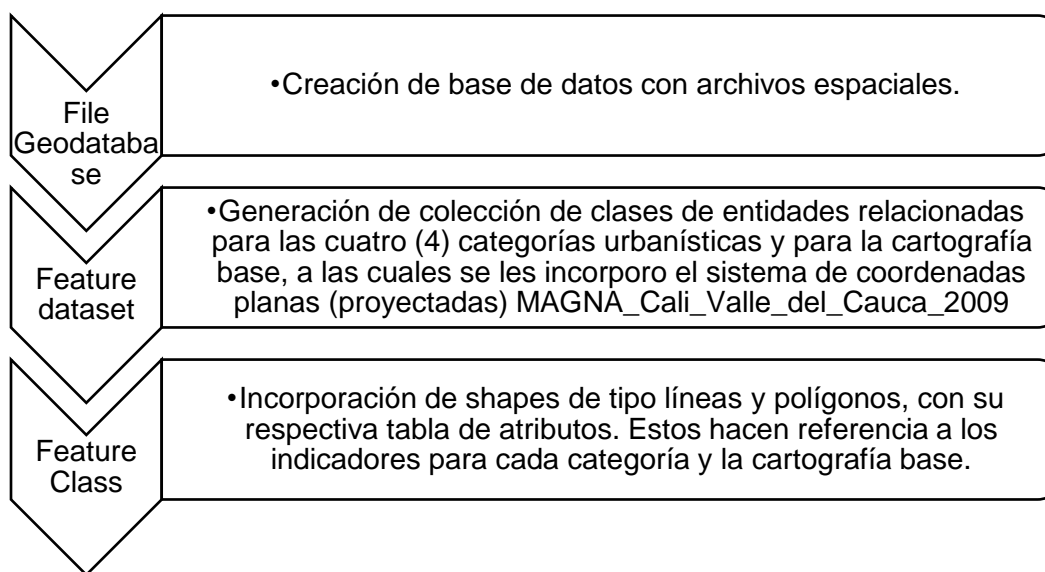
Cabe señalar, que acorde a los expertos e información con que se cuenta, se puede hacer uso de más categorías y más criterios que permitan dar solución a los problemas urbanos planteados.

7.2. Construcción de Base de Datos Geoespacial

Una vez establecidos los criterios a evaluar, se procedió a construir la base de datos² en el software ArcGIS y; posteriormente, se recopiló y almacenó la información geoespacial en capas SIG. Cada criterio a evaluar estuvo compuesto por información cuantitativa o cualitativa que posteriormente fue reclasificada (estandarizada) con el objetivo de tener una apreciación acorde a su nivel de importancia. “Para poder utilizar los criterios y su representación espacial, deben asociarse con una escala de medición común. El proceso de traducir las diversas entradas de un problema de decisión a una escala común, para permitir la comparación, el análisis y la síntesis se denomina estandarización”. Keeney y Raiffa (como se citó en Makropoulos, 2004).

Figura 3

Secuencia para la construcción de la base de datos



² Oracle señala que “una base de datos es una colección organizada de información estructurada, o datos, típicamente almacenados electrónicamente en un sistema de computadora. Una base de datos es usualmente controlada por un Sistema de Gestión de Base de Datos (DBMS)”. <https://www.oracle.com/co/database/what-is-database/>

La información geográfica para las respectivas observaciones, geoprocesos, análisis y formulación; se obtuvieron de la cartografía base oficial de la alcaldía distrital de Cali para el año 2014 la cual sigue vigente, las capas obtenidas fueron valor del suelo por m² (ZGH), índices de construcción tope, áreas de actividad, corredores de actividad, sistema integrado de transporte masivo y jerarquización vial. Así mismo, se contó con la información geográfica predial de la entidad Catastro para el año 2014. Finalmente, se construyó información geoespacial para cada uno de los inmuebles presentes en el lugar de estudio mediante el uso de Google Earth y ArcGIS, incorporando atributos nuevos y actualizados a la base predial.

7.3. Matriz de Comparación por Pares

Ramamurthy et al., (2020), menciona que “la matriz de comparación por pares se basa en la importancia de un criterio sobre otro en el par, se creó para determinar los pesos de los parámetros de acuerdo con la escala de preferencia AHP” (p.6). La importancia de este método radica en que luego de la asignación de los pesos, otorga una medida global de consistencia de la matriz que permite valorar la relación de los criterios entre si determinando su coherencia y pertinencia. Para este trabajo la matriz está basada en factores que contribuyen al diagnóstico y formulación de proyectos de desarrollo urbano dentro de la ciudad.

Tabla 1

Escala de juicios Saaty, AHP para par de comparación

Calificación numérica	Escala de importancia de AHP	Correlación
9	Sumamente importante	1/9
8	Muy fuerte a extremadamente	1/8
7	Importancia muy fuerte	1/7
6	Fuerte a muy fuerte	1/6
5	Importancia fuerte	1/5
4	Moderadamente a fuerte	1/4
3	Importancia moderada	1/3
2	Igual a moderadamente	1/2
1	Igual importancia	1

Para el caso de estudio se generaron cinco (5) matrices de comparación, una (1) que corresponde al análisis de las categorías principales y, otras tres (3) matrices que corresponden a las subcategorías. Dentro de las matrices, los criterios a evaluar se compararon y se calificaron en una escala del 1 al 9 cuando el factor en el eje vertical era más importante que el factor en el eje horizontal. En contraste, los criterios se calificaron en una escala entre 1/2 y 1/9 cuando el factor en el eje vertical era menos importante que el factor en el eje horizontal. (Ver tabla 1)

Los valores de peso y los valores de calificación para los criterios se asignaron por parte del estudiante, soportados en experiencias previas adquiridas en la Empresa Municipal de Renovación Urbana EMRU EIC, donde el equipo de expertos urbanistas les daba importancia a los criterios fundamentados en la incidencia para la gestión de los proyectos de desarrollo urbano. No obstante; en este trabajo se adicionó la matriz de Saaty con el fin de calcular los criterios de comparación por pares utilizando una escala de calificación común y soportada científicamente, que tuviera validez y consistencia.

7.4. Cálculo de la Relación de Consistencia (RC)

Una vez valorada la matriz de comparación por pares e identificados los pesos relativos para cada criterio; se procedió a realizar el cálculo de la relación de consistencia (RC) que se utiliza para medir la coherencia entre las opiniones de los expertos o la coherencia de la matriz respecto a los criterios comparados, para saber si los pesos son aceptables. Carli et al., (2018) mencionan sobre como hallar la RC y sus rangos adecuados:

Dado que la inconsistencia es natural en los juicios humanos, AHP hace frente a este problema mediante el cálculo del índice de consistencia (CR) (Saaty, 1980, 2008). Se define el índice de consistencia CR (C) de una matriz de consistencia C que tiene la dimensión $\dim(C)$. como sigue:

$$CR(C) = CI(C)/RCI(C)$$

donde RCI (C) es el llamado Índice de Consistencia Aleatoria (RCI) de una matriz cuadrada $\dim(C)$ dimensional generada con valores pertenecientes al conjunto $\{1/9, 1/8, 1/7, \dots, 1, \dots, 7, 8, 9\}$ (Saaty, 2008) y CI (C) es el índice de consistencia (CI) de la matriz C que tiene λ_{max} como valor propio máximo:

$$CI(C) = (\lambda_{max} - \dim(C)) / (\dim(C) - 1).$$

Si el CR de la matriz de juicios es mayor que un valor de umbral, entonces los juicios de entrada no son consistentes, por lo tanto, no son confiables. Se demostró que se pueden tolerar las inconsistencias en las respuestas si la relación de consistencia permanece dentro de un pequeño intervalo. En general, se considera aceptable una relación de consistencia igual o inferior a 0,10. Por el contrario, los juicios pueden no ser confiables y deben ser obtenidos nuevamente. (p.49)

A lo aludido, Aburas et al., (2017), complementan que “el índice de consistencia aceptable (CR) debe ser $CR < 0.10$, que se refiere a un nivel razonable de consistencia en las comparaciones por pares. Por el contrario, $CR > 0,10$ se refiere a valores de razón que son indicativos de juicios inconsistentes”. (p.1130)

7.5. Conversión de Datos Vectoriales a Ráster

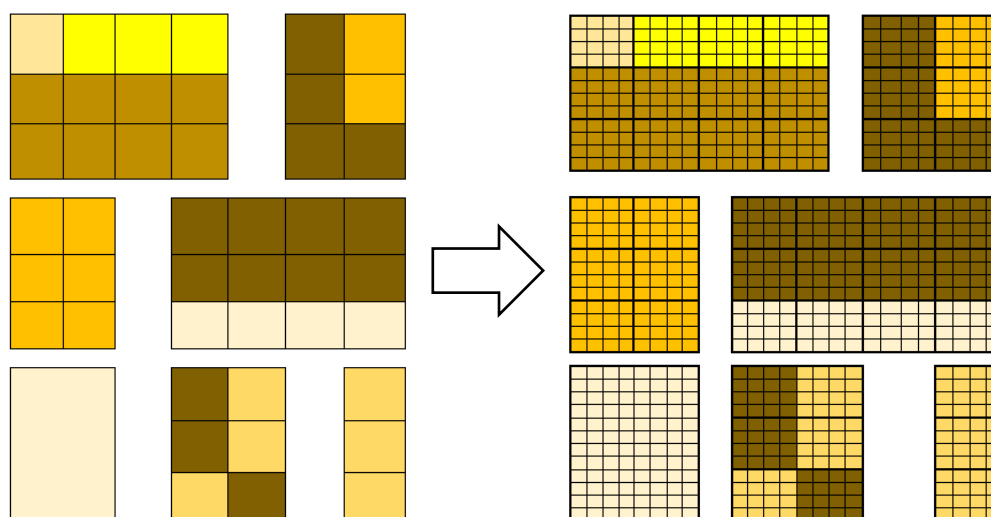
Una vez consolidada la información urbanística producto de la matriz de calificación, del cálculo de factores, del cálculo de la Relación de Consistencia y de la incorporación de los resultados *a priori* en la base de datos geográfica; se procedió a transformar las entidades vectoriales a datos dataset ráster con el fin de realizar el proceso de superposición ponderada y reclasificación para todas las capas, pues el geoproceto multicriterio de superposición solo recibe información ráster.

Para transformar los datos vectoriales a ráster se hizo uso de la caja de herramientas de ArcGIS donde se encuentra el geoproceto de conversión “Polygon to Raster”, en los campos que requirió la herramienta se ingresó la capa y variable a convertir. El proceso

mencionado se le realizó a cada una de las capas a evaluar. La figura 4 muestra como ingresan los datos en la herramienta “Polygon to Raster” y el resultado final en formato ráster.

Figura 4

Conversión de criterios vectoriales a ráster



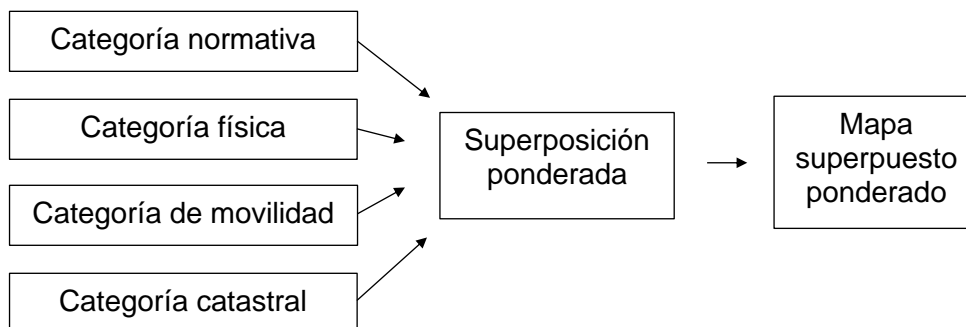
7.6. Superposición Ponderada y Normalización de Criterios

La técnica de superposición ponderada se les aplicó a las categorías catastrales, físicas, de movilidad y de normatividad. El proceso consistió en definir los problemas a ejecutar, los modelos se dividieron en submodelos (criterios), se normalizaron (reclasificaron) cada uno de los valores de entrada a una escala de evaluación común con el fin de poder multiplicar los valores de celda de cada ráster de entrada por el peso de influencia acorde a lo obtenido en el cálculo de pesos de las matrices de calificación y, sumar los valores de celda resultantes para producir los rústeres de salida los cuales hacen referencia a mapas de idoneidad para cada categoría.

A los resultados obtenidos *a priori*, se les procedió a ejecutar la superposición ponderada con el fin de generar el mapa final de los inmuebles idóneos para proyectos de desarrollo urbano, este se muestra en la figura 5.

Figura 5

Procesos para realizar superposición ponderada



Para realizar el geo proceso, se accedió a la caja de herramientas de ArcGIS, “Spatial Analyst – Overlay – Weighted Overlay”. Las capas de entrada se reclasificaron en una escala de preferencia común con el fin de combinar las capas en un análisis único. Para el caso de estudio se generaron cinco (5) clases que se reclasificaron del 0 al 10, siendo 0 los datos restringidos, cinco (5) la clasificación menos favorable y diez (10) la clasificación más favorable.

Tabla 2

Clasificación de categorías a ponderar

Clase	Categoría	Reclasificación
1	Restringido	0
2	Altamente favorable	9 - 10
3	Favorable	7 - 8
4	Desfavorable	6
5	Altamente desfavorable	5

7.7. Áreas idóneas para desarrollo urbano

Este apartado es el resultado de cada uno de los procesos desarrollados previamente. Al mapa final obtenido de la superposición ponderada, se le excluyeron lugares que presentaban preexistencias por su nivel de desarrollo o por estar con una ocupación de

equipamientos-espacio público. Adicionalmente, dentro del mapa se generaron propuestas de áreas óptimas para llevar a cabo proyectos de desarrollo urbano, teniendo como resultado final el mapa de idoneidad.

8. Resultados

8.1. Definición de categorías y criterios a ponderar

En esta parte de la investigación, las fuentes de información previas se utilizaron para identificar los criterios significativos que tienen alta injerencia en la idoneidad de inmuebles para procesos de desarrollo urbano. Se eligieron cuatro (4) categorías urbanísticas que se integran por diez (10) indicadores o subcategorías que permiten realizar una evaluación detallada y eficaz a la aptitud de los predios, para lograr de dicha forma el objetivo planteado. Las categorías catastral, física, normativa y de movilidad fueron las seleccionadas. Consecutivamente, se identificaron los subfactores derivados de cada categoría (Tabla 3).

Tabla 3

Criterios e indicadores a evaluar

Categoría	Indicador	Descripción
Catastral	C1 - Valor del suelo por m2 (ZGH)	Son los espacios geográficos determinados a partir de Zonas Homogéneas Físicas con valores unitarios similares en cuanto a su precio, según las condiciones del mercado inmobiliario. (catastro Bogotá, 2021)
	C2 - Índice de construcción tope	Corresponde al índice de construcción máximo alcanzable en un área determinada con base en el aporte urbanístico por edificabilidad. (Acuerdo 0373 de 2014, p278.)
	C3 - Área del terreno	Hace referencia al área total del terreno con la que cuenta cada predio.
Físico	C4 - Altura de los inmuebles	Corresponde a la altura en pisos con que cuenta cada inmueble.
	C5 - Uso del suelo	Corresponde al uso al que se encuentra destinado cada inmueble en la actualidad.
	C6 - Estado de conservación	Hace referencia al estado actual en que se encuentra el predio.

Norma Urbana	C7- Áreas de actividad	Son áreas del suelo con condiciones socio-económicas similares, y se caracterizan por el predominio de un uso determinado del suelo en función del cual se reglamentan y definen los usos complementarios permitidos, y la intensidad para su aprovechamiento. Ejes que concentran actividades económicas. (Acuerdo 0373 de 2014, p247)
	C8 - Corredores de Actividad	
Movilidad	C9 - Sistema integrado de transporte	Corresponde a las vías dentro de la ciudad que son cubiertas por el Sistema Integrado de Transporte Masivo SITM
	C10 - Jerarquización Vial	Corresponde al tipo de vía al que se encuentra cercano cada inmueble.

Las categorías y criterios nombrados en la tabla 3, se seleccionaron de acuerdo a información manejada por expertos en el tema urbano, a información literaria y a datos disponibles.

8.1.1. Categoría e Indicadores Catastrales

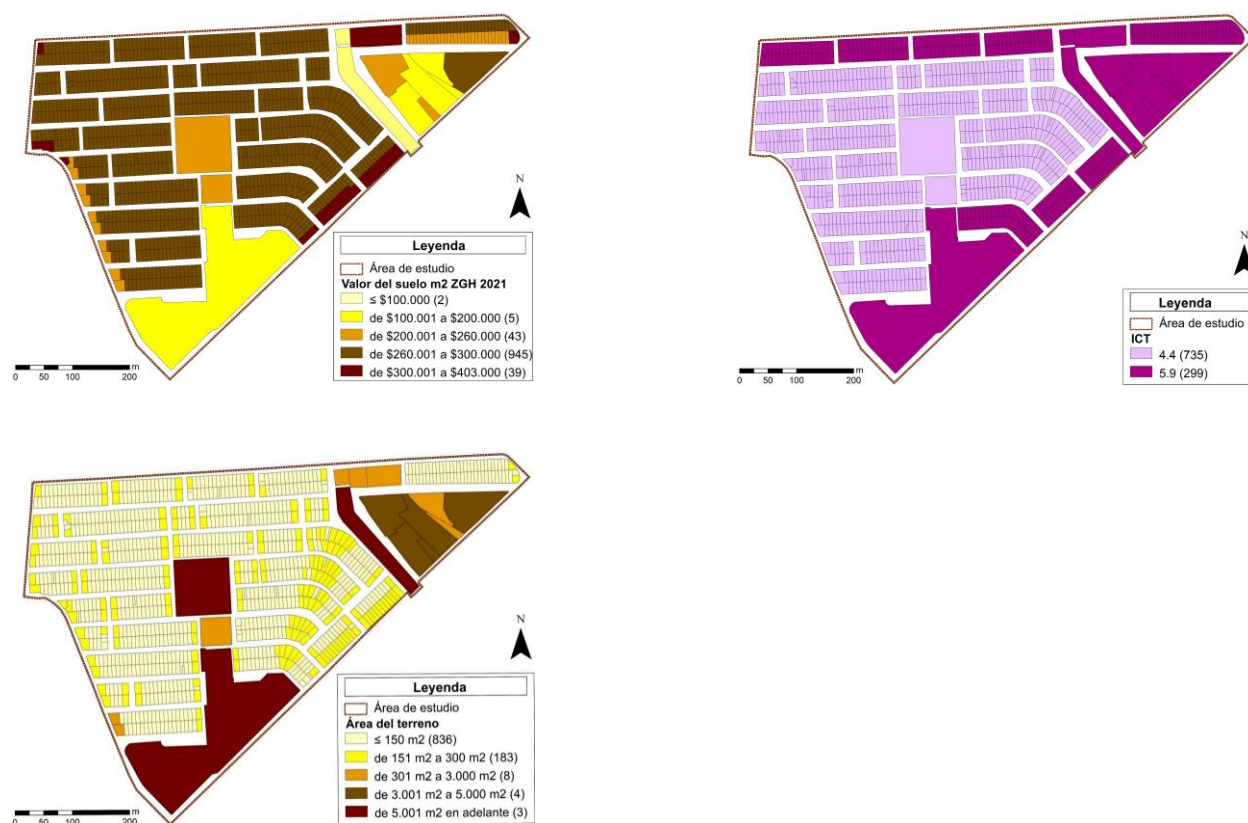
Esta categoría se integró por tres (3) criterios que guardan relación en aspectos catastrales. En primer momento, está el valor del suelo por m² acorde a las Zonas Geoeconómicas Homogéneas (ZGH) de la cartografía base del POT para el año 2014 de la ciudad de Cali³, información obtenida de la base de datos geográfica oficial del municipio y actualizada mediante el Índice de Precio al Consumidor IPC al año 2021 mediante cifras del DANE, encontrando de dicho modo precios que oscilan entre \$61.000 pesos hasta \$402.882 pesos el m².

³ El valor de las Zonas Geoeconómicas Homogéneas para el año 2021 se obtuvo mediante actualización, donde a la base catastral del año 2014, se le aplicó el Índice de Precio al Consumidor IPC para el año 2016, 2017, 2018, 2019, 2020 y 2021, teniendo de dicha manera una aproximación del valor del suelo por m².

Posteriormente, se encuentra el criterio Índice de Construcción Tope (ICT) obtenido de la cartografía base del POT el cual arrojo dos índices máximos de área en edificabilidad, el más bajo 4,4 se ubica sobre los lugares internos del área de estudio y, el más alto 5,9 hacia las zonas externas. Finalmente, está el criterio área del terreno, derivado de la base predial de Catastro, donde se encontraron áreas que van desde los 47 m² hasta los 31.049,75 m². Los inmuebles más grandes, corresponden a dos (2) equipamientos y una zona verde. (Ver figura 6)

Figura 6

Mapas de indicadores catastrales

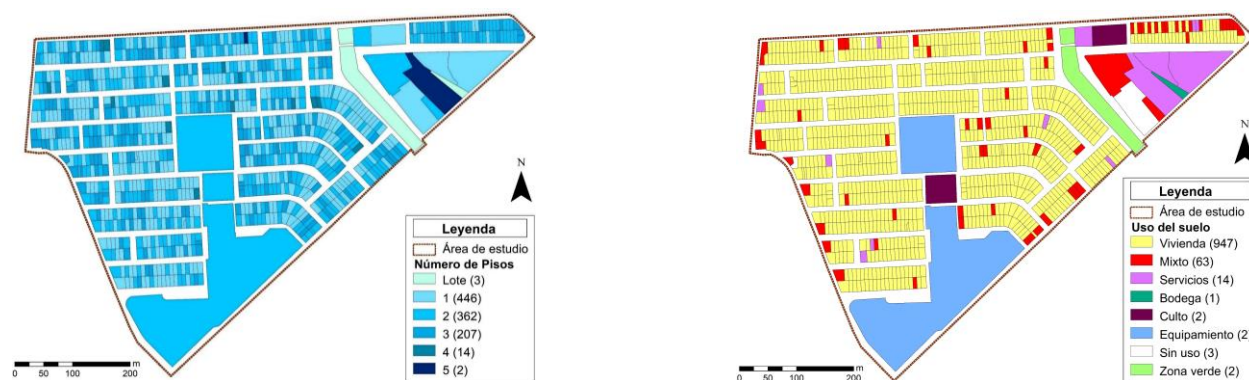


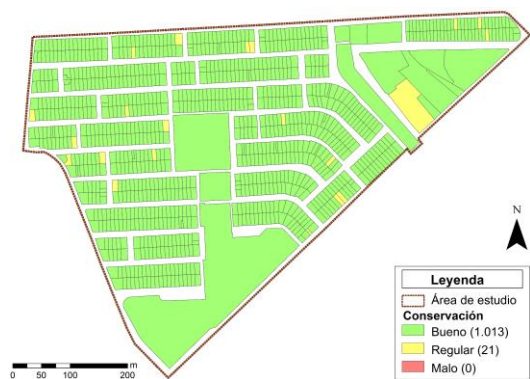
8.1.2. Categoría e Indicadores Físicos

Esta categoría se compuso por tres (3) factores que concentran características físicas intrínsecas de los predios. La primera categoría es la altura en pisos de los inmuebles la cual fue construida con base en información visualizada en Google Earth donde se hizo revisión de cada predio y, posteriormente la información se incorporó en la base de datos. Se encontraron varios predios con poco desarrollo inmobiliario como lotes o con un solo piso; por el contrario, el máximo desarrollo vertical lo presentaron solo siete (7) predios, uno de ellos corresponde a un establecimiento de servicios de hospedaje que cuenta con cinco (5) pisos. La segunda categoría, concierne al uso del suelo, este criterio se enfoca en el uso actual que les dan las personas a los predios, la información se construyó igual que la primera categoría. Siendo así, el uso del suelo que predomina es el de viviendas con el 91,58% de inmuebles, el uso de bodega lo presenta un solo predio. Finalmente, está el indicador estado de conservación, este alude a las condiciones estéticas de los inmuebles, la información se cimentó con base en Google Earth. Se pudo evidenciar que las propiedades en su mayoría presentan buenas condiciones, es el caso que no se encontraron predios con condiciones malas (Figura 7).

Figura 7

Mapas de indicadores físicos



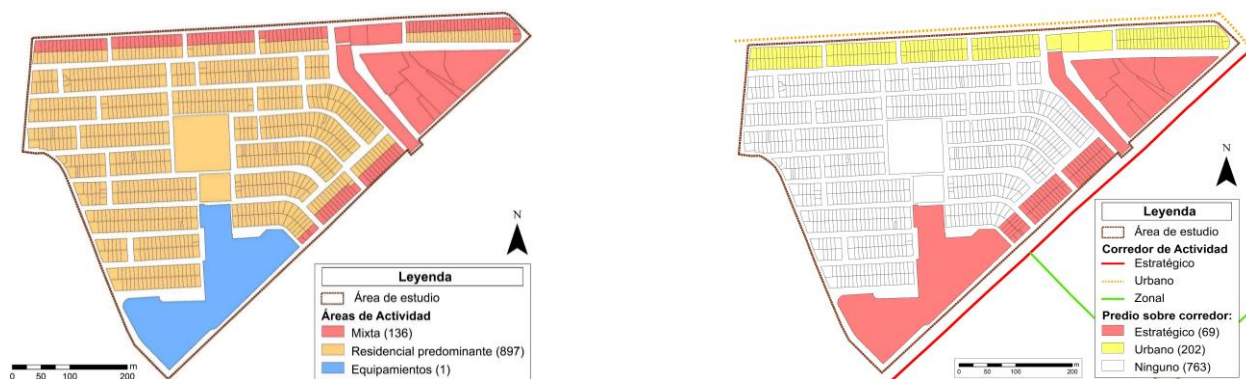


8.1.3. Categoría e Indicadores de la Norma Urbana

Dos factores integraron la categoría de norma urbana, uno fue las áreas de actividad obtenidas de la cartografía base del POT para el año 2014, se evidenció que en el lugar prima la actividad residencial predominante, seguida por la actividad mixta y, de último los equipamientos; no obstante, a pesar de que solo hay un equipamiento, este ocupa una extensión considerable. Seguidamente, está el segundo criterio que hace referencia a los corredores de actividad y su analogía con los inmuebles, información obtenida de la cartografía base del POT para el año 2014. El 74,37% de los predios no tienen frente a corredores, doscientos dos (202) se encuentran frente a un corredor urbano y, sesenta y nueve (69) inmuebles se relacionan con un corredor estratégico y ocupan una extensión grande (Figura 8).

Figura 8

Mapas de indicadores de la norma urbana

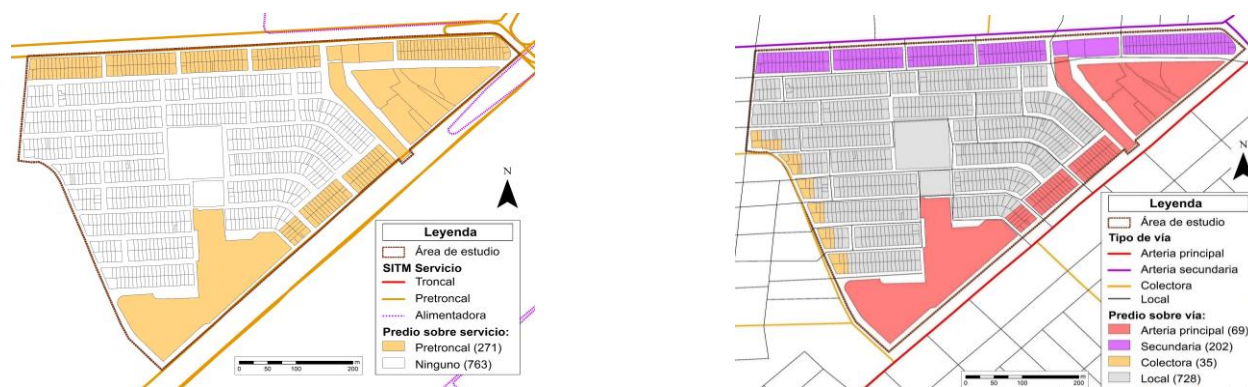


8.1.4. Categoría e Indicadores de Movilidad

La última categoría seleccionada para el caso de estudio la compusieron dos (2) indicadores. Inmuebles con cercanía a rutas del Sistema Integrado de Transporte Masivo SITM de la ciudad de Cali es la primera categoría, información construida con base en la cartografía del POT para el año 2014. A pesar de que en el área de estudio hay servicio de ruta alimentadora y pretroncal, la segunda es la que prima, pues cubre la mayoría del área de análisis mostrando cercanía con doscientos setenta y un (271) predios; el resto de inmuebles no tiene cercanía directa con el servicio del SITM. El posterior indicador fue la jerarquización vial y su vínculo con los predios, información construida de acuerdo con la cartografía base del POT para el año 2014. Se pudo observar que la mayoría de los inmuebles se hallaban sobre vías de tipo local, seguidos por las vías secundarias; por el contrario, solo el 6,67% de los predios tenían cercanía con la vía arteria principal Autopista Oriental (CII 36), localizada diagonalmente hacia el costado sur del área de estudio (Figura 9).

Figura 9

Mapas de indicadores de movilidad



8.2. Construcción de la base de datos

Para poder administrar y procesar la información geográfica, se generó una base de datos (GDB) denominada AHP_LOS_SAUCES con un sistema de coordenadas planas

(proyectadas) MAGNA_Cali_Valle_del_Cauca_2009. Dentro de la GDB se incorporaron cada uno de los criterios a evaluar mencionados en el punto anterior, los cuales sus datos estaban disponibles por parte de la Alcaldía de Cali. Para el caso de la categoría física, se recopiló la información de los indicadores, debido a que no se encontraba georreferenciada. Como resultado final, se obtuvo una base de datos consolidada la cual se exhibe en la figura 10.

Figura 10

Geotabbase AHP_LOS_SAUCES



8.3. Desarrollo de la matriz de comparación por pares

La matriz de comparación por pares, se desarrolló con base en las categorías e indicadores obtenidos de las actividades anteriores. Los criterios fueron comparados uno a uno para cada categoría, generando como resultado los porcentajes de influencia. Primero se generó las comparaciones de las categorías y, luego la comparación de las subcategorías.

Tabla 4

Matriz de comparación por pares, categorías principales

Categoría	C1	C2	C3	C4	Suma	Peso	λ Lambda
C1 - Catastral	1	5	1	3	10,00	0,45	1,13
C2 - Física	1/5	1	1/2	1	2,70	0,12	1,09
C3 - Norma urbana	1	2	1	3	7,00	0,31	0,89

C4 - Movilidad	1/3	1	1/3	1	2,67	0,12	0,95
----------------	-----	---	-----	---	------	------	------

Posteriormente, se obtuvo las matrices de comparación de cada subcategoría.

Tabla 5

Matriz de comparación por pares, categoría catastral

Criterios	C1	C2	C3	Suma	Peso	λ Lambda
C1 - Valor del suelo m2 (ZGH)	1	1/2	4	5,50	0,37	1,20
C2 - Índice de construcción tope	2	1	5	8,00	0,54	0,91
C3 - Área del terreno	1/4	1/5	1	1,45	0,10	0,97

Tabla 6

Matriz de comparación por pares, categoría física

Criterios	C1	C2	C3	Suma	Peso	λ Lambda
C1 - Altura de los inmuebles	1	2	6	9,00	0,53	0,89
C2 - Uso del suelo	1/2	1	5	6,50	0,39	1,23
C3 - Estado de conservación	1/6	1/5	1	1,37	0,08	0,97

Tabla 7

Matriz de comparación por pares, categoría norma urbana

Criterios	C1	C2	Suma	Ci	λ Lambda
C1 - Áreas de actividad	1	3	4,00	0,75	1,00
C2 - Corredores de actividad	1/3	1	1,33	0,25	1,00

Tabla 8

Matriz de comparación por pares, categoría de movilidad

Criterios	C1	C2	Suma	Peso	λ Lambda
-----------	----	----	------	------	------------------

C1 - Sistema integrado TM	1	1/3	1,33	0,25	1,00
C2 - Jerarquización vial	3,0	1	4,00	0,75	1,00

8.3.1. Cálculo de Relación de Consistencia

La Relación de Consistencia (RC) fue importante para identificar si las comparaciones realizadas entre criterios y categorías eran consistentes o no para el caso de estudio. En la tabla 9, se muestran cada una de las RC obtenidas de las matrices de comparación por pares.

Tabla 9

Relación de Consistencia para las categorías y criterios

Categoría / Criterio	No. Criterios	λ (Lambda)	IC	RC
Criterios finales	4	4,06	0,020	0,02
Catastral	3	3,08	0,038	0,05
Físico	3	3,09	0,043	0,07
Normativa	2	2	0,000	0
Movilidad	2	2	0,000	0

Los resultados obtenidos en la tabla 9, evidenciaron que se cumplen las condiciones de la RC, pues los valores son menores a $<0,10$ tal como menciona la teoría. De dicha manera, los pesos obtenidos de la comparación por pares son aceptables.

8.4. Transformación de datos vectoriales a ráster

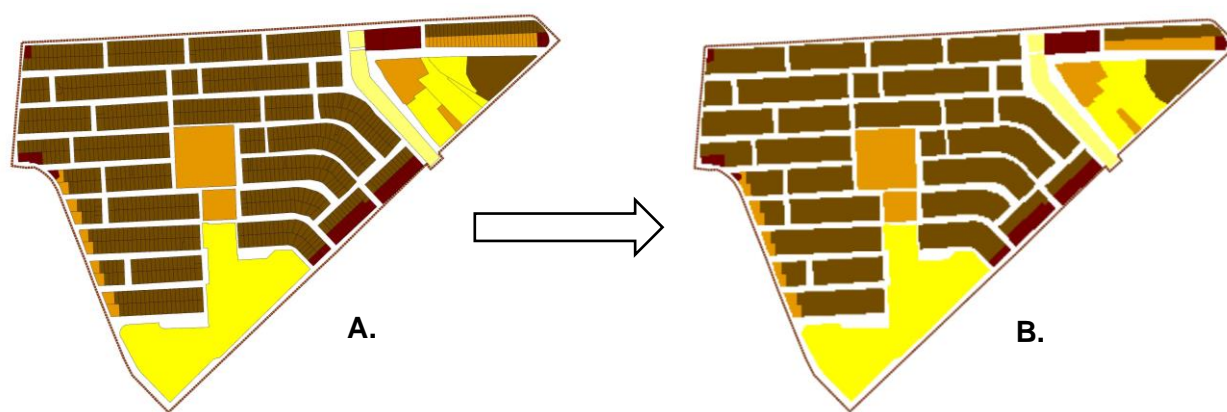
En este ítem, los criterios a evaluar que se encontraban en formato vector (polígono), se transformaron a formato ráster en ArcGIS con la herramienta de entidad a ráster

, esto con el fin de poder realizar los procesos geoespaciales de superposición ponderada que solo reciben y trabajan con datos ráster. Producto de lo mencionado, se generaron diez (10) capas en formato ráster.

En primer momento, los inmuebles contenían información del suelo en cada polígono; posteriormente, con la conversión de los polígonos a ráster, se creó una capa ráster con múltiples píxeles que de manera reclasificada contenía la información del suelo. A continuación, se presenta el resultado para la capa de Valor del Suelo por m2 (ZGH).

Figura 11

Conversión de ráster a polígono, valor del suelo por m2 (ZGH)



El proceso anterior, se realizó para las diez (10) capas vectoriales, teniendo como resultado capas ráster con información de los inmuebles reclasificada.

8.5. Superposición ponderada y reclasificación

Toda la información espacial que fue transformada a ráster, se le realizó la técnica de superposición ponderada. Dentro de la herramienta, se reclasificó cada uno de los criterios a evaluar, posteriormente se aplicaron los porcentajes obtenidos en la matriz de calificación y; finalmente, se generaron los mapas de idoneidad para cada categoría.

Superposición Ponderada, Categoría Catastral

Los indicadores de la categoría catastral se ingresaron a la herramienta de superposición ponderada y se reclasificaron como muestra las tablas 10,11 y 12.

Tabla 10*Reclasificación, valor del suelo m2*

Valor del Suelo m2 ZGH	
Valor (COP)	Normalización
≤ \$100.000	10
de \$100.001 a \$200.000	9
de \$200.001 a \$260.000	7
de \$260.001 a \$300.000	6
de \$300.001 a \$403.000	4

Tabla 11*Reclasificación, área del terreno*

Área del Terreno	
Área (m2)	Normalización
de 5.001 en adelante	10
de 3.001 a 5.000	10
de 301 a 3.000	8
de 151 a 300	6
≤ 150	4

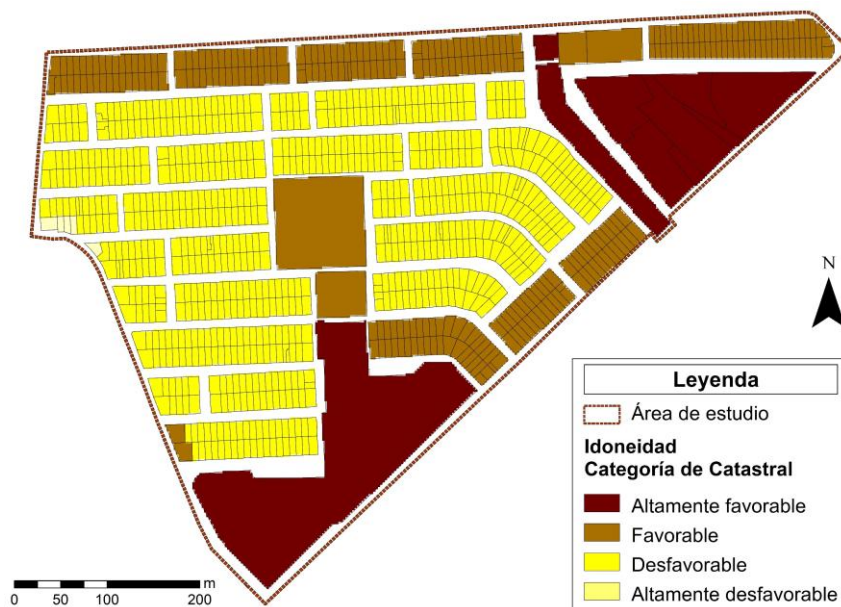
Tabla 12*Reclasificación, Índice de Construcción Tope*

Índice de Construcción Tope	
ICT	Normalización
5,9	10
4,4	6

Reclasificados los valores catastrales, se procedió a asignar los porcentajes de influencia que se obtuvieron de la comparación por pares, generando finalmente el mapa de idoneidad catastral.

Figura 12

Superposición ponderada de categoría catastral



Superposición Ponderada, Categoría Física

Los indicadores de la categoría física se ingresaron a la herramienta de superposición ponderada y se reclasificaron como muestra las tablas 13,14 y 15.

Tabla 13

Reclasificación, altura en pisos

Altura en Pisos	
Altura	Normalización
Lote	10
1	8
2	6
3	4
4	2
5	2

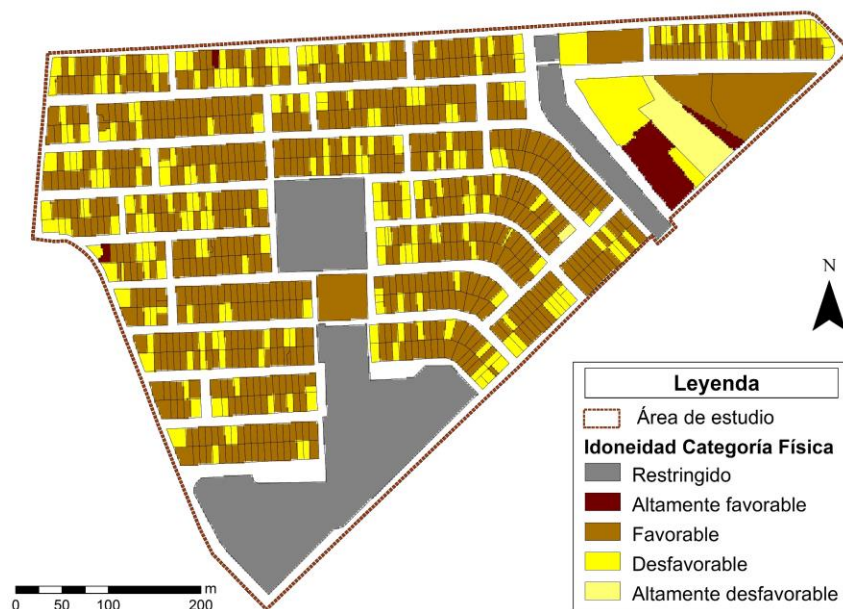
Tabla 14*Reclasificación, usos del suelo*

Usos del Suelo	
Uso	Normalización
Sin uso	10
Bodega	8
Vivienda	6
Culto	6
Mixto	4
Servicios	4
Equipamiento	0
Zona verde	0

Tabla 15*Reclasificación, estado de conservación*

Estado de Conservación	
Conservación	Normalización
Malo	10
Regular	6
Bueno	3

Reclasificados los valores físicos, se procedió a asignar los porcentajes de influencia que se obtuvieron de la comparación por pares, generando finalmente el mapa de idoneidad físico.

Figura 13*Superposición ponderada de categoría física****Superposición Ponderada, Categoría Normativa Urbana***

Los indicadores de la categoría física se ingresaron a la herramienta de superposición ponderada y se reclasificaron como muestra las tablas 16 y 17.

Tabla 16*Reclasificación, áreas de actividad*

Áreas de Actividad	
Actividad	Normalización
Mixta	10
Residencial predominante	6
Equipamientos	0

Reclasificados los criterios de la norma urbana, se procedió a asignar los porcentajes de influencia que se obtuvieron de la comparación por pares, generando finalmente el mapa de idoneidad de la norma urbana.

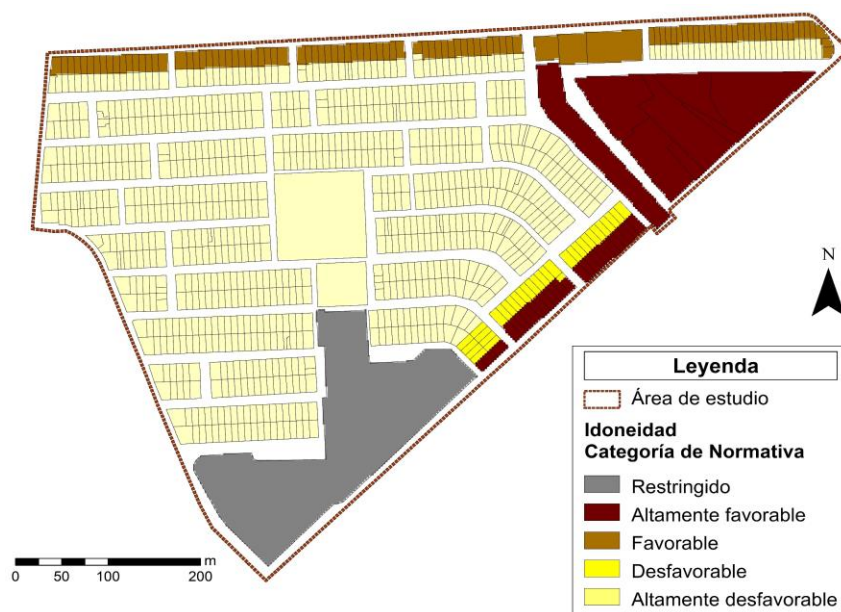
Tabla 17

Reclasificación, corredor de actividad

Corredor de Actividad	
Corredor	Normalización
Estratégico	10
Urbano	7
Ninguno	5

Figura 14

Superposición ponderada de categoría de normativa urbana



Superposición Ponderada, Categoría Movilidad

Los indicadores de la categoría física se ingresaron a la herramienta de superposición ponderada y se reclasificaron como muestra las tablas 18 y 19.

Tabla 18

Reclasificación, SITM

SITM	
Servicio	Normalización
Pretroncal	10
Ninguno	6

Tabla 19

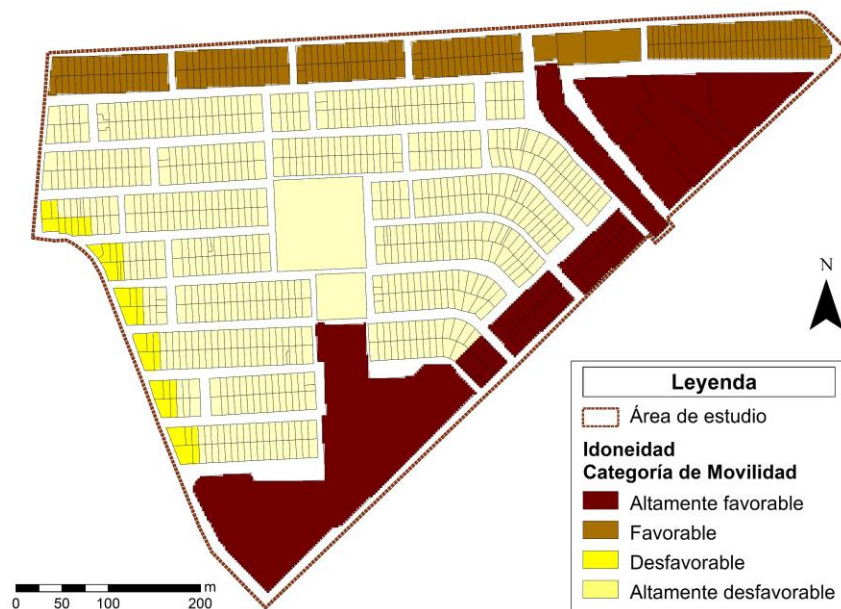
Reclasificación, jerarquía vial

Jerarquización Vial	
Tipo de Vía	Normalización
Principal	10
Secundaria	8
Colectora	6
Local	3

Reclasificados los criterios de movilidad, se procedió a asignar los porcentajes de influencia que se obtuvieron de la comparación por pares, generando como resultado el mapa de idoneidad de movilidad.

Figura 15

Superposición ponderada de categoría de movilidad

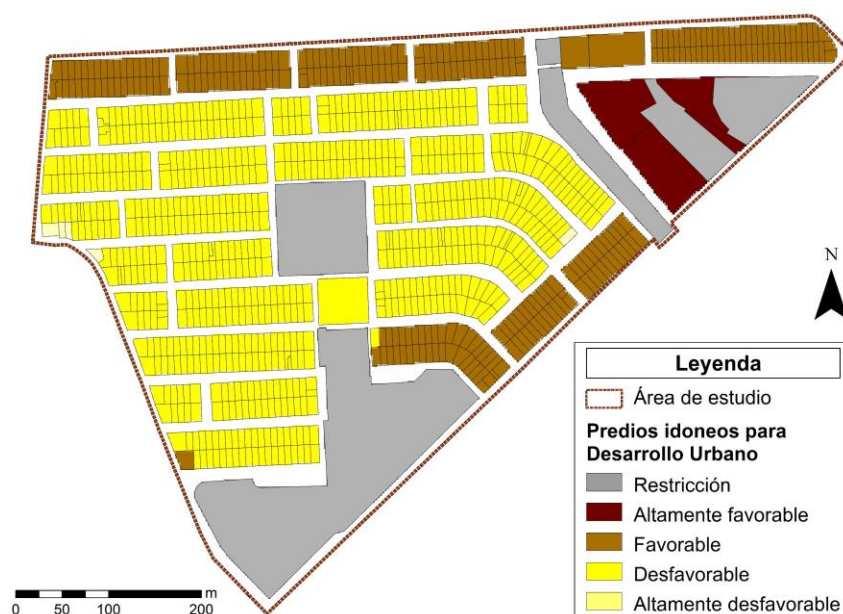


Superposición Ponderada Final

Las capas ráster obtenidas para cada categoría, se superpusieron en la herramienta de ponderación, las clasificaciones se dejaron con los valores adquiridos previamente y, se aplicó los porcentajes de influencia obtenidos en la matriz de ponderación principal. Este proceso generó el mapa final de superposición ponderada.

Figura 16

Superposición ponderada, categoría catastral, física, normativa y de movilidad



La figura 16 de superposición evidencia seis (6) sitios con restricción, demarcados de color gris, esto se debe a que en dichos lugares hay equipamientos, espacios públicos, una estación de gasolina y un inmueble con alto desarrollo urbano. La restricción es generada por la alta complejidad jurídica y económica para la intervención de los inmuebles.

Por el contrario, cinco (5) predios mostraron alta idoneidad para proyectos de desarrollo urbano producto de sus condiciones. Así mismo, doscientos noventa (290) inmuebles fueron favorables para desarrollar proyectos urbanos, la mayoría localizados sobre cercanía a vías principales.

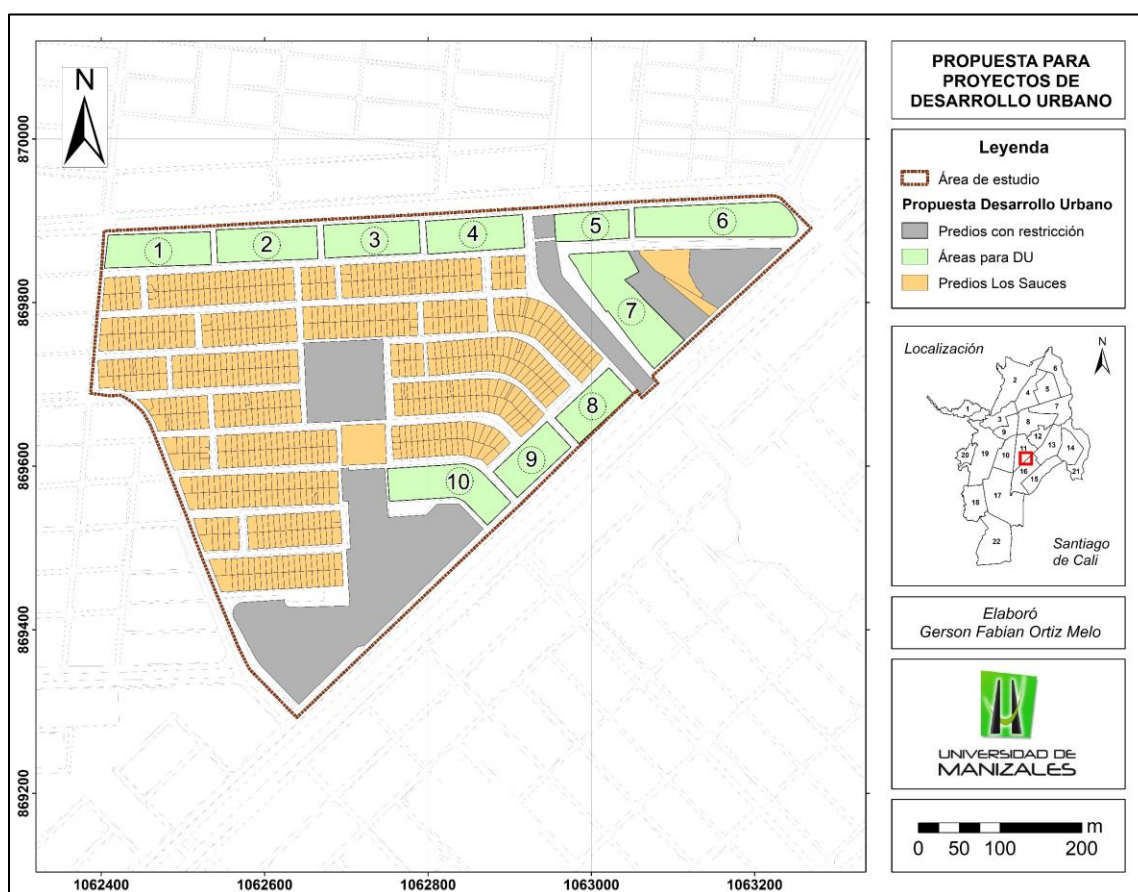
Finalmente, el 70,5% de los inmuebles mostraron viabilidad desfavorable y cinco predios idoneidad altamente desfavorable; la mayoría de los inmuebles mencionados se encuentran ubicados hacia la parte centro del área de estudio.

8.6. Áreas idóneas para desarrollo urbano

El Proceso Analítico Jerárquico (AHP) junto a las herramientas geoinformáticas implementados durante el caso de estudio, permitió realizar un breve diagnóstico a la actualidad de los inmuebles. Gracias a lo mencionado, se realizó una propuesta en la que se señalan los espacios idóneos donde se pueden desarrollar proyectos urbanos.

Figura 17

Mapa de idoneidad, propuesta para proyectos de desarrollo urbano



La propuesta se fundamentó en seleccionar los inmuebles más adecuados y unirlos a nivel de manzana con el objetivo de generar lugares de intervención grandes. No obstante, dependiendo del proyecto que se quiera llevar a cabo, se debe revisar lo que exige la normativa nacional y local las cuales señalan los requisitos pertinentes para cada proyecto.

9. Conclusiones

En este estudio se realizó un análisis de idoneidad de los inmuebles para determinar las mejores ubicaciones para proyectos de desarrollo urbano dentro del barrio Los Sauces utilizando el método AHP y herramientas geoinformáticas. Se pudo evidenciar que el método multicriterio Proceso Analítico Jerárquico (AHP) es una herramienta muy importante que permite comparar cantidad de criterios de forma lógica y brindar unas ponderaciones eficaces gracias a la Relación de Consistencia que acompaña el método, además de reducir la subjetividad en los juicios de valor. De igual modo, las herramientas geoinformáticas junto al AHP jugaron un papel fundamental, pues permitieron incorporar, procesar, analizar y representar los datos geográficos para la toma de decisiones dando una visión integral del caso de estudio.

Los resultados confirmaron que el modelo de AHP es una técnica útil para la planificación urbana y; por consiguiente, para el desarrollo urbano. Los hallazgos ilustran que los inmuebles que se ubican sobre las vías de mayor importancia y cuentan con un tamaño considerable son los más adecuados para desarrollar proyectos; por el contrario, los predios que se ubican hacia las partes internas, son los que presentan una baja idoneidad.

Este estudio es una guía para la planificación urbana, brinda categorías y criterios que se pueden trabajar y evaluar para la intervención de inmuebles dentro de las ciudades, acompañados de los análisis multicriterio y las herramientas geoinformáticas.

10. Recomendaciones

Para trabajos futuros de carácter educativo, investigativo y profesional, se recomienda tener en cuenta más criterios jurídicos, ambientales y catastrales que den mayor detalle a las evaluaciones y; por consiguiente, permitan tomar las mejores decisiones para los respectivos proyectos urbanos.

Adicionalmente, las investigaciones deben concentrarse en mejorar el aporte de opiniones de expertos para asignar pesos y revelar el potencial de replicación en otras áreas o en diferentes temas. En caso de haber diferentes opiniones de expertos, se recomienda aplicar la media geométrica la cual integra todas las opiniones y genera una decisión única. Cabe mencionar, dentro de los análisis urbanísticos, se pueden considerar más criterios acordes a las necesidades del proyecto y de la disponibilidad de información con que se cuente.

En este estudio, los límites del sitio seleccionado fueron el acceso a información catastral más detallada y actualizada, además de no contar con acceso a información jurídica que permite saber los estados legales de los inmuebles. La inclusión de otros métodos de toma de decisiones y apoyo a la decisión multicriterio, especialmente aquellos basados en conjuntos difusos, podrían ser enfoques adicionales de investigaciones futuras.

Para el área de estudio, se recomienda la formulación e implementación de proyectos de infraestructura de salud de tercer nivel y cuarto nivel; debido a que la mayoría están concentrados hacia el centro-occidente y sur de la ciudad; por tal motivo, el área con menos cobertura está en el oriente de la ciudad (zona de estudio). Por otro lado, se recomienda la formulación e implementación de proyectos de infraestructura educativa de nivel superior, pues en la zona no hay oferta y la mayoría de infraestructuras se concentran hacia el sur de la ciudad. Cabe mencionar, que en el área se pueden llevar a cabo otro tipo de proyectos de desarrollo urbano acorde a las necesidades y condiciones de la normativa urbana.

11. Bibliografía

- Aburas, M., Abdullah, S., Ramli, M. y Asha'ari, Z. (2017). Land Suitability Analysis of Urban Growth in Seremban Malaysia, Using GIS Based Analytical Hierarchy Process. *Procedia Engineering*, 198, pp.1128-1136. doi: 10.1016/j.proeng.2017.07.155
- Ameen, R. y Mourshed, M. (2019). Urban sustainability assessment framework development: The ranking and weighting of sustainability indicators using analytic hierarchy process. *Sustainable Cities and Society*, 44, pp.356-366. doi: 10.1016/j.scs.2018.10.020
- Anza, P., Velázquez, J., Gutiérrez, J. y Sánchez B. (2020). Metodología para la ubicación de tejados verde en entornos urbanos. Universidad Católica de Ávila. https://www.researchgate.net/publication/338833733_Metodologia_para_la_ubicacion_de_tejados_verdes_en_entornos_urbanos p.58-64
- Banani, R., Vahdati, M., Shahrestani, M. y Clements, D. (2016). The development of building assessment criteria framework for sustainable non-residential buildings in Saudi Arabia. *Sustainable Cities and Society*, 26, pp.289-305. doi: 10.1016/j.scs.2016.07.007
- Basharat, M., Shah, H. y Hameed, N. (2016). Landslide susceptibility mapping using GIS and weighted overlay method: a case study from NW Himalayas, Pakistan. *Arabian Journal of Geosciences*, 9(4). doi: 10.1007/s12517-016-2308-y
- Bathrellos, G., Skilodimou, H., Chousianitis, K., Youssef, A. y Pradhan, B. (2017). Suitability estimation for urban development using multi-hazard assessment map. *Science of The Total Environment*, 575, pp.119-134. doi: 10.1016/j.scitotenv.2016.10.025
- Boggia, A., Massei, G., Pace, E., Rocchi, L., Paolotti, L. y Attard, M. (2018). Spatial multicriteria analysis for sustainability assessment: A new model for decision making. *Land Use Policy*, 71, 281-292. doi: 10.1016/j.landusepol.2017.11.036

- Campos, F., Abarca, F. y Domingues, A. (2018). Sostenibilidad, planificación y desarrollo urbano: en busca de una integración crítica mediante el estudio de casos recientes. *ACE: Architecture, City and Environment*, 12(36), pp.39-72. doi: 10.5821/ace.12.36.5145
- Carli, R., Dotoli, M. y Pellegrino, R. (2018). Multi-criteria decision-making for sustainable metropolitan cities assessment. *Journal of Environmental Management*, 226, pp.46-61. doi: 10.1016/j.jenvman.2018.07.075
- Chaudhary, P., Chhetri, S., Joshi, K., Shrestha, B. y Kayastha, P. (2016). Application of an Analytic Hierarchy Process (AHP) in the GIS interface for suitable fire site selection: A case study from Kathmandu Metropolitan City, Nepal. *Socio-Economic Planning Sciences*, 53, pp.60-71. doi: 10.1016/j.seps.2015.10.001
- Concejo Municipal de Santiago de Cali. (2014). Acuerdo 0373 de 2014: Por medio del cual se adopta la revisión ordinaria de contenido de largo plazo del Plan de Ordenamiento Territorial del municipio de Santiago de Cali. Cali.
- Correa, G. y Rozas, P. (2006). *Desarrollo urbano e inversiones en infraestructura*. Santiago de Chile: CEPAL, División de Recursos Naturales e Infraestructura.
- Dos Santos, P., Neves, S., Sant'Anna, D., Oliveira, C., y Carvalho, H. (2019). The analytic hierarchy process supporting decision making for sustainable development: An overview of applications. *Journal Of Cleaner Production*, 212, 119-138. doi: 10.1016/j.jclepro.2018.11.270
- Esse, C., Valdivia, P., Encina, F., Aguayo, C., Guerrero, M. y Figueroa D. (2014). Modelo de análisis espacial multicriterio (AEMC) para el mapeo de servicios ecosistémicos en cuencas forestales del sur de Chile. *Bosque (Valdivia)*, 35(3), 289-299. doi: 10.4067/s0717-92002014000300004

- González, R. (2020). Evaluación espacial multicriterio para la ubicación de una planta de tratamiento de residuos sólidos urbanos. *Revista Cubana De Transformación Digital*, 1(2), 111-126. Recuperado a partir de <https://rctd.uic.cu/rctd/article/view/63>
- Hidalgo, V., Escamilla, J., Montaña, O. y Navarro, I. (2018). Priorización del suelo para la vivienda al desarrollo metropolitano de la ciudad de Pachuca Hidalgo, mediante modelos multicriterio. *Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI*, 6(11). doi: <https://doi.org/10.29057/icbi.v6i11.3041>
- Ioja, C., Niță, M., Vânău, G., Onose, D. y Gavriliadis, A. (2014). Using multi-criteria analysis for the identification of spatial land-use conflicts in the Bucharest Metropolitan Area. *Ecological Indicators*, 42, 112-121. doi: 10.1016/j.ecolind.2013.09.029
- Khan D. y Samadder, S. (2015). A simplified multi-criteria evaluation model for landfill site ranking and selection based on AHP and GIS. *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*, doi: 10.3846/16486897.2015.1056741
- Liu, Y., y Li, L. (2020). Mountainous City Featured Landscape Planning Based on GIS-AHP Analytical Method. *ISPRS International Journal Of Geo-Information*, 9(4), 211. doi: 10.3390/ijgi9040211
- Makropoulos, C. y Butler, D. (2006). Spatial ordered weighted averaging: incorporating spatially variable attitude towards risk in spatial multi-criteria decision-making. *Environmental Modelling & Software*, 21(1), pp.69-84. doi: 10.1016/j.envsoft.2004.10.010
- Mosadeghi, R., Warnken, J., Tomlinson, R. y Mirfenderesk, H. (2015). Comparison of Fuzzy-AHP and AHP in a spatial multi-criteria decision making model for urban land-use planning. *Computers, Environment and Urban Systems*, 49, pp.54-65. doi: 10.1016/j.compenvurbsys.2014.10.001

- Muñoz, C. (2015). Desarrollo urbano sostenible a partir de un modelo de reactivación para cascos urbanos. *Entorno*, (59), 9-34. doi: 10.5377/entorno.v0i59.6180
- Myagmartseren, P., Buyandelger, M. y Brandt, S. (2017). Implications of a Spatial Multicriteria Decision Analysis for Urban Development in Ulaanbaatar, Mongolia. *Mathematical Problems In Engineering*, 2017, 1-16. doi: 10.1155/2017/2819795
- Ogrodnik, K., y Kolendo, Ł. (2021). Application of gis technology and AHP to determine the areas with fully developed, compact functional and spatial structure: A case study of Bialystok, Poland. *Land Use Policy*, 109, 105616. doi: 10.1016/j.landusepol.2021.105616
- Parvez, M. y Islam, S. (2019). Sites Suitability Analysis of Potential Urban Growth in Pabna Municipality Area in Bangladesh: AHP and Geospatial Approaches. *Geographical studies* 3(2), 82-92. doi: <http://dx.doi.org/10.21523/gcj5>
- Parry, J., Ganaie, S., y Sultan Bhat, M. (2018). GIS based land suitability analysis using AHP model for urban services planning in Srinagar and Jammu urban centers of J&K, India. *Journal Of Urban Management*, 7(2), 46-56. doi: 10.1016/j.jum.2018.05.002
- Ramamurthy, V., Reddy, G., y Kumar, N. (2020). Assessment of land suitability for maize (*Zea mays* L) in semi-arid ecosystem of southern India using integrated AHP and GIS approach. *Computers And Electronics In Agriculture*, 179, 105806. doi: 10.1016/j.compag.2020.105806
- Seyedmohammadi, J., Sarmadian, F., Jafarzadeh, A., y McDowell, R. (2019). Development of a model using matter element, AHP and GIS techniques to assess the suitability of land for agriculture. *Geoderma*, 352, 80-95. doi: 10.1016/j.geoderma.2019.05.046

- Taleai, M., Sliuzas, R. y Flacke, J. (2014). An integrated framework to evaluate the equity of urban public facilities using spatial multi-criteria analysis. *Cities*, 40, 56-69. doi: 10.1016/j.cities.2014.04.006
- Tran, L. (2016). An interactive method to select a set of sustainable urban development indicators. *Ecological Indicators*, 61, pp.418-427. doi: 10.1016/j.ecolind.2015.09.043
- Villena, F. y Galiano, A. (2017). El desarrollo urbano sostenible y sus implicaciones para las empresas y los territorios. *Revista De Estudios Empresariales. Segunda Época*, (1). doi: 10.17561/ree.v0i1.3185
- Wey, W. (2015). Smart growth and transit-oriented development planning in site selection for a new metro transit station in Taipei, Taiwan. *Habitat International*, 47, pp.158-168. doi: 10.1016/j.habitatint.2015.01.020
- Yigitcanlar, T. y Teriman, S. (2014). Rethinking sustainable urban development: towards an integrated planning and development process. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 12(1), pp.341-352. doi: 10.1007/s13762-013-0491-x
- Zarghami, E., Azemati, H., Fatourehchi, D. y Karamloo, M. (2018). Customizing well-known sustainability assessment tools for Iranian residential buildings using Fuzzy Analytic Hierarchy Process. *Building and Environment*, 128, pp.107-128. doi: 10.1016/j.buildenv.2017.11.032
- Zietsman, D. y Vanderschuren, M. (2014). Analytic Hierarchy Process assessment for potential multi-airport systems – The case of Cape Town. *Journal of Air Transport Management*, 36, pp.41-49. doi: 10.1016/j.jairtraman.2013.12.004