

1. APLICACIÓN DE SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA Y EVALUACIÓN MULTICRITERIO EN LA DETERMINACIÓN DE ZONAS POTENCIALMENTE URBANIZABLES EN LA CIUDAD DE TUNJA

Diego Fernando Gualdrón Alfonso
Pedro Santiago Reyes Medina
José Julián Villate Corredor

1.1 Introducción

El crecimiento urbano y su expansión en superficie es uno de los temas más importantes en la agenda urbana a nivel mundial. “La ciudad es considerada como un ecosistema complejo socio – económico – natural, el cual es dominado por las actividades humanas” (Wenrui, Feng, Rusong, & Dan, 2011).

El desarrollo residencial o urbano usualmente invade tierras agrícolas, rondas de ríos, zonas rurales que por sus condiciones no son aptas para realizar asentamientos urbanos, causando conflictos del uso de la tierra. Los efectos secundarios derivados del crecimiento urbano tales como: la expansión descontrolada, pérdida del paisaje, afectación de zonas protegidas, pérdida de espacio abierto, entre otros, son una amenaza para el equilibrio ambiental, social y económico de una región.

Desde el punto de vista ambiental, las ciudades se ven limitadas por las condiciones que el territorio brinda, las cuales pueden favorecer o no el asentamiento de la población y el desarrollo de sus actividades. A pesar de ello, el progreso tecnológico y la falta de una política de asentamiento coherente, han favorecido el avance sobre espacios poco aptos (Da Silva & Cardozo, 2011).

La ciudad de Tunja se ubicada en el departamento de Boyacá, a 130 kilómetros al noroeste de Bogotá, sobre la cordillera oriental de los Andes. Tiene una altitud de 2782 m.s.n.m., con una temperatura media de 13 °C y una extensión total de 121.4920 Km² de los cuales 19.7661 Km² son urbanos y 101.7258 Km² pertenecen al área rural. Según el DANE para el 2017, la capital boyacense

cuenta con una población estimada de 195.496 habitantes, de los cuales 187.689 pertenecen a la zona urbana y 7.807 pertenecen al territorio rural.

El crecimiento urbano de la ciudad ha sido considerable en los últimos años, lo que ha acarreado problemáticas en la planeación de las zonas dispuestas para el crecimiento de la misma, tales como, la sobre posición de las zonas de protección y las zonas de expansión urbana definidas en el Plan de Ordenamiento Territorial (POT), efecto que conlleva a la afectación de las zonas de protección, pérdida del espacio abierto y representa una amenaza para el equilibrio ambiental y el desarrollo sostenible de la ciudad (Moreno Mojica, R. A., Rodríguez Forero, R. H., & López Díez, J. C., 2018).

Las zonas destinadas para el uso residencial, deben poseer ciertas características de habitabilidad, y estar siempre relacionadas con la salud y seguridad de la población, además de la necesidad de satisfacer ciertas demandas en cuestión de equipamiento; estas garantizarán a las personas, el disfrutar de una buena calidad de vida que posibilite a los habitantes acceso a cultura, educación, esparcimiento, salud y trabajo.

La determinación de la aptitud del territorio se basa en limitantes relativas ligadas a percepciones subjetivas, que pueden ser probables más no exactas. Idealmente un área o una zona específica con potencial para urbanizar y residir, debería ser el resultado del análisis de un conjunto de variables cuantitativas, que disminuyan la incertidumbre en la toma de decisiones.

Es por esto, que se requiere del uso de herramientas y metodologías que permitan realizar un análisis detallado de cada una de las variables que intervienen en la determinación de las zonas de expansión urbana. Es allí donde los sistemas de información geográfica (SIG), y la evaluación multicriterio (EMC), son una solución ideal para realizar este tipo de análisis dada su practicidad y facilidad en el desarrollo de procesos, análisis individuales y la interacción de relaciones espaciales entre múltiples conjuntos de datos de cada una de las variables que se tengan en cuenta para este tipo de estudios.

La combinación de los SIG con la EMC, para determinar las zonas potencialmente urbanizables en la ciudad de Tunja, puede brindar una solución al fenómeno de expansión urbana en sitios poco aptos, y que, históricamente han traído consecuencias ambientales negativas; tales como la inundación en construcciones asentadas en rondas de ríos, asentamientos en cárcavas, saturación de la malla vial y conflictos entre zonas de expansión urbana y zonas de protección.

El propósito, en suma, es obtener el mapa de las zonas potencialmente urbanizables de la ciudad de Tunja, aplicando SIG y EMC, como herramienta para la planificación e identificación de zonas idóneas de expansión urbana, localización de equipamientos y nueva infraestructura en la ciudad.

De esta forma, se identificó que la mayoría de las áreas que tienen las características de restricción e idoneidad propicias para urbanizar, se encuentran en el sector sur occidental de la ciudad de Tunja, de acuerdo a las variables de amenaza por inundación y erosión, amenaza antrópica, polígono minero, vías urbanas y rurales, espacio público y equipamientos, zonas de protección, zonas industriales, cobertura del suelo, geología, pendientes y zonas ya urbanizadas.

1.2 Aspectos conceptuales preliminares

1.2.1 Los SIG y la gestión del territorio

Durante los últimos 20 años, se ha venido estudiando a nivel mundial la aplicación de los SIG en conjunto con las EMC, como una solución a la problemática de la gestión del territorio. Entre los principales planteamientos a nivel mundial podemos encontrar los siguientes:

Santos Preciado (1997), presenta un planteamiento teórico de las EMC y su aplicabilidad en conjunto con los SIG; en primera instancia, se expone un contexto teórico sobre la toma de decisiones con base en una EMC, se evidencian algunas de las técnicas algebraicas que permiten obtener un resultado final en función de varios criterios. Una vez dado el fundamento teórico, el autor da a conocer la aplicación de la metodología multicriterio en el planteamiento y resolución de problemas ambientales y territoriales para después combinar dicha metodología con los SIG, mediante un caso práctico para el establecimiento de una actividad humana respecto al territorio.

Bosque & García (2000), muestran en su estudio, el uso de los SIG en la planificación territorial, iniciando con una explicación teórica referente a las aplicaciones de los SIG en el ámbito de la gestión del territorio, las fases de la planificación territorial, el papel de los SIG en la planificación ambiental y ordenamiento territorial; la aplicación de los SIG en la localización óptima de elementos puntuales, elementos geográficos de tipo lineal y de polígonos. Finalmente, da a conocer un ejemplo aplicativo de ordenación del territorio usando SIG y técnicas de EMC, para determinar la asignación óptima del uso del suelo realizada en la cuenca del Río Tuy en Venezuela.

Morelo, Grindla, & Asenso (2007), proponen escenarios que cuantifican nuevas potencialidades para el desarrollo regional en la ciudad de Granada (España), los autores modelizan la accesibilidad, considerando el territorio como una matriz de elementos discretos o malla, a la cual se le asignan valores que representan la resistencia al desplazamiento en términos de tiempo (superficie de fricción), esta es afectada por un algoritmo que denominan costo – distancia, el cual permite calcular el menor costo acumulado en términos de tiempo hasta el objetivo más cercano, dando como resultado una superficie continua a la que a cada celda se le ha asignado el tiempo que tarda en alcanzar dicho objetivo. Finalmente, el análisis de la aptitud de la urbanización involucra múltiples variables territoriales que condicionan la ocupación del suelo; se efectúa la evaluación multicriterio, teniendo en cuenta un análisis de la dinámica poblacional, obteniendo como resultado valores de superficie urbana demandada para cada año horizonte y para cada ámbito municipal.

Wenrui, Feng, Rusong, & Dan (2011), en su estudio dan a conocer una plataforma de gestión del ecosistema urbano, para ayudar a los planificadores territoriales a obtener un mejor desarrollo urbano utilizando un modelo denominado *neural cellular automata* (CA), con el cual se realizan simulaciones de la expansión urbana en tres escenarios, y se evalúan a la vez diferentes escenarios de desarrollo urbano y el beneficio ecológico complejo. En cada simulación o plataforma, se utiliza como ejemplo a Beijing oriental, con seis variables sensibles en la expansión urbana elegidas para modelar de 2004 a 2024, sobre una base de datos de expansión urbana obtenida para esta ciudad de 1991 a 2004. Los beneficios ecológicos complejos en diferente uso del suelo urbano, se evalúan a través de una metodología de evaluación multicriterio denominada Proceso Analítico Jerárquico (AHP), por sus siglas en inglés. Los resultados de este estudio muestran que el escenario de gestión del uso de la tierra orientada a los servicios ecológicos es más beneficioso y su índice de beneficio ecológico complejo alcanza un 0,78 % más alto que los demás escenarios evaluados, lo que les permitió proporcionar a los desarrolladores y gerentes urbanos de Beijín (China), una sugerencia científica para el desarrollo urbano.

De Pietri, Dietrich, & Mayo (2011), elaboran un modelo espacial que integra factores ambientales que constituyen una amenaza para la salud, el cual se aplica en la cuenca del Río Matanza – Riachuelo (CMR) en Argentina. En el modelo se implementan procedimientos de EMC entorno a los SIG para obtener una zonificación del territorio basada en grados de aptitud para residir, donde se georreferencian variables que caracterizan las condiciones de habitabilidad

de las viviendas y las posibles fuentes de contaminación de la cuenca. Por otra parte, realizan encuestas de factores de riesgo para determinar el riesgo relativo de vivir en zonas no aptas en relación con las zonas aptas. Encuentran que la CMR presenta 60% de su superficie en condición de aptitud, situación que afecta a 40 % de la población residente. El resto de la población habita en un territorio no apto y el 6% se encuentra en la condición más desfavorable de la cuenca.

Da Silva & Cardozo, (2011) plantean utilizar técnicas de EMC y SIG, con el fin de identificar espacios potenciales para la ocupación residencial en la ciudad de Resistencia (Argentina), delimitando espacial y temporalmente la ciudad, a partir de la recolección de información referente a equipamientos, cuerpos de agua, modelo digital de elevación (DEM), coberturas terrestres, entre otras, con el fin de clasificar y definir los criterios a emplear en el estudio y posteriormente darle una ponderación y tratamiento a los factores que influyen en cada criterio. Como resultado, determinan que el oeste y noroeste de la ciudad tiene buena capacidad para realizar una ocupación potencial de tipo residencial.

A nivel nacional, también se han establecido algunos estudios referentes a los SIG y la EMC aplicándolos a la gestión territorial.

(Gutiérrez Ossa & Urrego Estrada, 2011), analizan la aplicabilidad y el contexto de los SIG en el ordenamiento y la planeación territorial en Colombia. La implementación de los sistemas obedece a la relevancia de codificar y monitorear, por medio de las herramientas tecnológicas, la información que se tiene de la estructura geográfica de cada región, marco que implica la revisión de las formas estipuladas hasta el momento, para evaluar y hacer gestión territorial. En primera instancia, realizan un planteamiento teórico sobre la geografía y la interacción de esta entre el ordenamiento, la planeación y el territorio, con el fin de determinar la aplicación e instrumentalización de los SIG en estos temas y enfocarse finalmente sobre el uso de los SIG en el ordenamiento y planeación territorial en Colombia. Uno de los hallazgos cruciales derivados del estudio, radica en poder establecer los criterios de convergencia entre los planes de ordenamiento y los de desarrollo territorial que son tan dispares en el país.

Corzo Ramírez, Jerena, & Rubio Mendoza (2012), presentan una propuesta de diálogo interdisciplinar a través del uso de herramientas SIG, para la construcción de una metodología de identificación del potencial de restauración ecológica (PRE) en áreas del borde urbano y que hacen parte de la estructura

ecológica principal de Bogotá según el ordenamiento territorial. Se describen los pasos metodológicos para la identificación del PRE, discutiendo los alcances y limitaciones del uso de herramientas SIG, como posibilidad metodológica para la interacción entre disciplinas como la biología, la geografía física y la sociología, durante el proceso de restauración ecológica.

Patiño, León, & Ávila (2016), presentan en su artículo “Análisis de idoneidad del suelo para construcción de colegios públicos integrando SIG Y PAJ en el área urbana de Bogotá. Redes de Ingeniería, 145” un procedimiento de evaluación de la idoneidad del suelo para su destinación a nuevos equipamientos educativos públicos en el área urbana de la ciudad de Bogotá, utilizando AHP y los SIG, en los que se tienen en cuenta las directrices de la Norma NTC 4595, el Plan de Ordenamiento Territorial de la ciudad y diferentes usos de suelo, cuyo cambio de actividad es poco probable, así como los destinados a hospitales y cementerios. El resultado del análisis establece las zonas idóneas para la ubicación de terrenos reservados para estos fines, además de identificar qué equipamientos educativos cumplen o no con los criterios evaluados.

1.2.2 Parámetros de análisis

1.2.2.1 Proceso Analítico Jerárquico (AHP)

Es un método matemático creado por Thomas Saaty, para “evaluar alternativas cuando se tiene en consideración varios criterios” (Osorio Gómez & Orejuela Cabrera, 2008). Su aplicación “parte de la comparación de pares de criterios a través de una matriz cuadrada basándose en los juicios subjetivos de expertos que tiene como objetivo resolver una temática de manera particular” (Ordoñez & Cabrera, 2011-2012), por tal razón, es ideal para dar solución a distintas problemáticas territoriales.

El método AHP, se clasifica dentro del grupo de análisis multicriterio discreto y es capaz de emplear variables cualitativas y cuantitativas frente a múltiples objetivos. El AHP, es un método de descomposición de estructuras complejas en sus componentes, ordenando estos componentes o variables en una estructura jerárquica, donde se obtienen valores numéricos para los juicios de preferencia y, finalmente los sintetiza para determinar qué variable tiene la más alta prioridad. Esta fundado sobre una base teórica simple pero sólida, posee tres principios rectores, los que en términos generales, guían el proceso de evaluación:

- Construcción de las jerarquías. Los sistemas complejos pueden ser mejor comprendidos mediante su descomposición en elementos

constituyentes, la estructuración de dichos elementos jerárquicamente, y la composición o sinterización de los juicios, de acuerdo con la importancia relativa de los elementos de cada nivel de la jerarquía.

- Establecimiento de prioridades. Los seres humanos perciben relaciones entre los elementos que describen una situación, pueden realizar comparaciones a pares entre ellos con respecto un cierto criterio y de esta manera expresar la preferencia de uno sobre otro.
- Consistencia lógica. Existe en el cerebro un ordenamiento jerárquico para los elementos. Dada la ausencia de valores exactos para esta escala en la mente humana, esta no está preparada para emitir juicios 100% consistentes, por lo tanto, deben ser verificados.

La jerarquización representa la desintegración del problema en las partes que lo componen. En este sentido, un problema está constituido por: un foco, unos criterios generales (dimensiones), criterios específicos y las alternativas posibles como solución. El foco, es el objetivo amplio y global, es lo que se espera resolver. Los criterios generales son los elementos o dimensiones que definen el objetivo principal. Las alternativas, son las diferentes soluciones o cursos de acción.

1.2.2.2 Idoneidad

Se refiere a las variables optimas que convergen para un buen establecimiento geográfico de las zonas urbanizables.

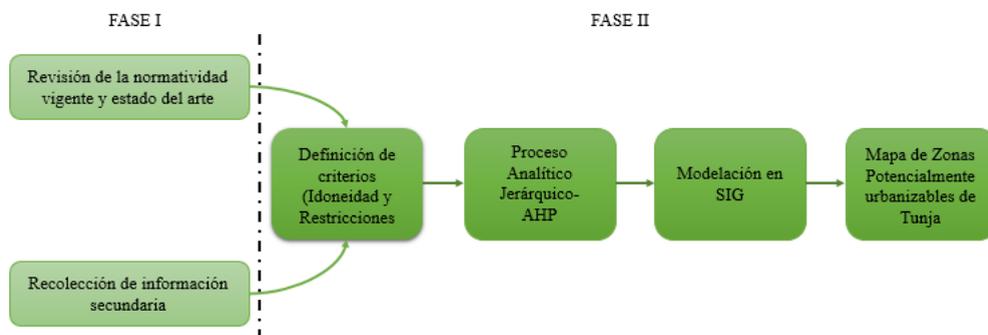
1.2.2.3 Restricciones

Son aquellas limitantes geográficas que, por sus características, configuran un impedimento físico y riesgo ambiental, social y económico para las zonas urbanizables.

1.3 Metodología

Para el desarrollo del presente estudio se propusieron dos fases metodológicas así: en la primera fase se obtuvo la información bibliográfica y secundaria, la segunda fase hizo referencia a la definición de los criterios que influirán en la EMC y en el análisis de la información en el SIG, tal como se observa en la Figura 1-1.

Figura 1-1 Metodología para la determinación de las zonas potencialmente urbanizables en la ciudad de Tunja (Colombia)



Fuente: Autores

1.3.1 Fase I

La revisión del estado del arte incluyó la búsqueda de investigaciones sobre los SIG, EMC y el ordenamiento territorial a nivel global, con el propósito definir la metodología a utilizar en el estudio; de igual manera, se consultó la normatividad nacional acerca de los planes de ordenamiento territorial (POT); por último, se obtuvo la información geográfica oficial (capas), para la conformación del modelo suministrado en formato vector (*shapefile*) y raster (TIFF).

1.3.2 Fase II

Se establecieron las capas base, correspondientes a las restricciones e idoneidad, teniendo en cuenta la información geográfica oficial. Mediante el AHP, se calcularon los pesos de los parámetros de idoneidad para cada criterio y subcriterio definido, para superponer las restricciones obteniendo así, las zonas potencialmente urbanizables.

La información en formato *shapefile* se convirtió a ráster, mediante el software ArcGIS, para la reclasificación y el cálculo de los pesos en la AHP. Se utilizó la metodología de panel de expertos, en la cual se consultó a diferentes profesionales según las temáticas de interés para el análisis, quienes basados en su experiencia y criterio, determinaron los valores de la reclasificación y los pesos que dan a cada criterio y subcriterio en el estudio; se contó con la opinión de especialistas agrónomos, biólogos, geotécnicos, de infraestructura vial y ordenamiento territorial egresados de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Universidad Nacional de Colombia, Escuela

Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, Universidad Católica de Colombia, Universidad de Los Andes y funcionarios de la Oficina Asesora de Planeación de la ciudad de Tunja.

1.3.2.1 Modelo de restricciones

Las restricciones o criterios limitantes se definieron con base en información del POT, suministrada por la Oficina Asesora de Planeación de la ciudad de Tunja. Esta información se fusionó por medio del álgebra de mapas, para obtener un único ráster con valores binarios, donde el valor de 0 representa las zonas restringidas y el valor de 1 corresponde a las zonas sin restricción. Las variables utilizadas para las restricciones son:

- Suelos de protección urbano y rural: incluye áreas de uso forestal, áreas del sistema nacional de áreas protegidas, suelos de infiltración para recarga de acuíferos, rondas de ríos, protección de fauna, zonas de restauración morfológica y rehabilitación del suelo, terrenos susceptibles a actividades mineras y áreas destinadas a la disposición de residuos líquidos y sólidos.
- Áreas con amenaza alta de inundación y erosión.
- Áreas con amenaza antrópica.
- Áreas destinadas a plantas de beneficio y faenado.
- Polígono minero existente.
- Zonas ya urbanizadas.
- Vías urbanas y rurales
- Espacio público y equipamientos.
- Zonas industriales.

1.3.2.2 Criterios de idoneidad para urbanizar

Basados en la información disponible, los lineamientos establecidos en el POT de la ciudad de Tunja y la normatividad vigente, se determinaron los criterios para realizar el análisis de idoneidad con sus respectivos subcriterios, los cuales fueron valorados en una escala de 1 a 5, siendo 5 el valor correspondiente a una mayor idoneidad para urbanizar y 1 el valor de menor idoneidad. Los criterios utilizados fueron los siguientes:

Físicos: Contemplan aquellos factores propios de las condiciones de la zona de estudio como las pendientes, geología y cobertura del suelo.

- **Pendiente:** Fue clasificada con base en el Manual de Diseño Geométrico de Vías del Instituto Nacional de Vías (INVIAS), según el criterio de los panelistas: un ingeniero civil especialista en infraestructura vial y magíster

en Ciencias y Sistemas de Información Geográfica y un ingeniero de vías y transporte magíster en ingeniería (infraestructura vial). Se establecieron cuatro tipos de terreno que dependen de la topografía que predomine en la zona de estudio, a continuación, se describen los diferentes tipos de terreno encontrados en el manual:

- Terreno plano: cuyas pendientes longitudinales son normalmente menores de tres por ciento (3%).
- Terreno ondulado: sus pendientes longitudinales se encuentran entre tres y seis por ciento (3% - 6%).
- Terreno montañoso: las pendientes longitudinales que predominan en este tipo de terreno se encuentran entre seis y ocho por ciento (6% - 8%).
- Terreno escarpado: generalmente sus pendientes longitudinales son superiores a ocho por ciento (8%).

En la ciudad de Tunja se encuentran pendientes desde el 0% hasta el 66%, debido a esto, se creó un nuevo rango para otorgar la valoración de idoneidad tipo 1. Para el análisis se determinaron los terrenos planos y ondulados como los más idóneos para desarrollar nuevos proyectos urbanos y con base en esto, se asignó la valoración correspondiente para los otros tipos de terreno. Tabla 1-1

Tabla 1-1 Reclasificación de valores subcriterio pendiente

Pendiente (%)	Valoración
0 – 3 Terreno Plano	5
3 – 6 Terreno Ondulado	4
6 – 8 Terreno Montañoso	3
8 – 14 Terreno Escarpado	2
> 66	1

Fuente: Autores.

- **Geología:** Se clasificó según el criterio de los panelistas: un ingeniero civil magíster en Geotecnia de la Universidad de los Andes, un ingeniero civil, magíster en Ingeniería con énfasis en Geotecnia de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, quienes, basados en las formaciones geológicas encontradas en la ciudad y la composición de cada una de ellas, dan su concepto para determinar la valoración de idoneidad correspondiente a cada formación. Tabla 1-2

Tabla 1-2 Reclasificación de valores subcriterio geología

Geología	Valoración
Formación Bogotá: compuesta por arcillolitas abigarradas, areniscas arcillosas blancas o amarillas.	3
Formación Guaduas: se compone por arcillolitas carbonáceas, areniscas y arcillas abigarradas y presencias de mantos de carbón en la parte inferior.	4
Depósitos Aluviales: conformados por gravas, gránulos de arenisca blanca y matriz arcillosa, cherts, arcilla amarilla, arena arcillosa, limos, arcilla y arenas en la parte superior.	1
Grupo Guadalupe: compuesto por porcelanitas, cherts y fosforita esporádica, en su parte intermedia cuenta con presencia de arcillas y areniscas.	4
Formación Tiltatá: compuesta por gredas, capas arenosas y cascajos, presencia de material arcilloarenoso.	2
Formación Conejo: esta formación tiene presencia de shales carbonosos y silíceos de color gris oscuro, intercalaciones de areniscas silíceas de grano fino, niveles de lutitas y areniscas cuarzosas.	5

Fuente: Autores.

- **Cobertura del suelo:** Su clasificación se determinó mediante el concepto de los panelistas: un ingeniero agrónomo, magíster en Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Colombia y un biólogo de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, quienes indican las características y el uso habitual que tiene cada cobertura de suelo existente en la ciudad de Tunja y con base en estos conceptos, se determina la valoración de idoneidad para cada una de ellas. Ver Tabla 1-3

Tabla 1-3 Reclasificación de valores subcriterio cobertura

Cobertura	Valoración
Tierras desnudas y degradadas: Esta cobertura corresponde a las superficies de terreno desprovistas de vegetación o con escasa cobertura vegetal, debido a la ocurrencia de procesos tanto naturales como antrópicos de erosión y degradación extrema. Se incluyen las áreas donde se presentan tierras salinizadas, en proceso de desertificación, o con intensos procesos de erosión que pueden llegar hasta la formación de cárcavas.	3

Cobertura	Valoración
Herbazal: cobertura constituida por una comunidad vegetal dominada por elementos típicamente herbáceos desarrollados en forma natural en diferentes sustratos, los cuales forman una cobertura densa (>70% de ocupación), el cual se desarrolla en áreas que no están sujetas a períodos de inundaciones, donde no existe presencia de elementos arbóreos y/o arbustivos, o en caso de existir en ningún caso representarán más del 2 %.	5
Tejido urbano continuo: son espacios conformados por edificaciones y los espacios adyacentes a la infraestructura edificada. Las edificaciones, vías y superficies cubiertas artificialmente cubren más del 80% de la superficie del terreno. La vegetación y el suelo desnudo representan una baja proporción del área del tejido urbano.	5
Tejido urbano discontinuo: son espacios conformados por edificaciones y zonas verdes. Las edificaciones, vías e infraestructura construida cubren artificialmente la superficie del terreno de manera dispersa y discontinua, ya que el resto del área está cubierta por vegetación. Esta unidad puede presentar dificultad para su delimitación cuando otras coberturas se mezclan con áreas clasificadas como zonas urbanas.	5
Pastos limpios: esta cobertura comprende las tierras ocupadas por pastizales con un porcentaje de cubrimiento mayor al 70%, son evidentes prácticas de manejo como limpieza, enclamiento o fertilización, etc., estas prácticas impiden la presencia o el desarrollo de otras coberturas.	1
Zonas verdes urbanas	4
Mosaico de pastos con espacios naturales: esta cobertura está constituida por las superficies ocupadas principalmente por coberturas de pastos en combinación con espacios naturales. Las coberturas de pastos representan entre el 30% y el 70% de la superficie total del mosaico. Los espacios naturales están conformados por las áreas ocupadas por relictos de bosque natural, arbustos, herbazales, bosque de galería o ripario, pantanos y otras áreas no intervenidas o poco transformadas y que debido a limitaciones de uso por sus características biofísicas permanecen en estado natural o casi natural.	1
Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales: comprende superficies ocupadas por cultivos y pastos en combinación con coberturas naturales. Las áreas de cultivos y pastos ocupan entre el 30 % y el 70 % de la superficie total de la unidad. Los espacios naturales están conformados por las áreas ocupadas por relictos de bosque natural, arbustales, bosque de galería o riparios, vegetación secundaria o en transición, pantanos u otras áreas no intervenidas o poco transformadas, que, debido a limitaciones de uso, o por sus características biofísicas permanecen en estado natural o casi natural.	1

Cobertura	Valoración
Cultivo de tubérculos	1
Bosque fragmentado: comprende los territorios cubiertos por bosques naturales con evidencia de intervención humana, aunque que mantienen su estructura original. Se pueden dar la ocurrencia de áreas completamente transformadas en el interior de la cobertura, originando parches donde hubo presencia de coberturas antrópicas como pastos y cultivos pero que han sido abandonadas para dar paso a un proceso de regeneración natural del bosque en los primeros estados de sucesión vegetal. Los parches de intervención deben representar entre el 5% y el 50% del total de la unidad.	1
Arbustal: cobertura constituida por una comunidad vegetal dominada por elementos típicamente arbustivos, los cuales forman un dosel irregular, pero que puede presentar elementos arbóreos dispersos cuya cubierta representa más del 70% del área total de la unidad. Esta formación vegetal no ha sido intervenida o su intervención ha sido selectiva y no ha alterado su estructura original y sus características funcionales (IGAC, 1999).	1
Bosque denso: corresponde a vegetación de tipo arbóreo caracterizada por un estrato más o menos continuo cuya área de cobertura arbórea representa más del 70% del área total de la unidad, con altura del dosel superior a 15 metros y que se encuentra localizada en zonas que no presentan procesos de inundación periódicos.	1
Zonas de extracción minera	1
Mosaico de pastos y cultivos: es una unidad que comprende una asociación de pastos y cultivos, en los cuales el tamaño de las parcelas es muy pequeño y el patrón de distribución de los lotes es demasiado intrincado para representarlos cartográficamente de manera individual.	2
Aeropuertos	1
Plantación forestal	1
Mosaico de cultivos: es una unidad que comprende cultivos anuales, transitorios o permanentes, en los cuales los tamaños de parcelas son muy pequeños y el patrón de distribución de los lotes es demasiado intrincado para representarlos cartográficamente de manera individual.	2
Suelos de uso agropecuario mecanizado o intensivo	1
Suelos de uso agropecuario semi - mecanizado o semi-intensivo	1

Fuente: Autores.

Accesibilidad: la accesibilidad expone la posibilidad de acceder e interrelacionar a las personas con el territorio, a la vez con servicios primordiales para el desarrollo de las actividades y necesidades básicas de

la población. Los criterios de accesibilidad que se tuvieron en cuenta para el análisis son los siguientes:

- **Cercanía a parques, centros de salud y colegios:** la valoración de idoneidad será mayor en cuanto las zonas potencialmente urbanizables estén más cerca de estos equipamientos, debido a que son establecimientos que brindan servicios de primera necesidad para la población. La clasificación para este criterio se determinó con base en la NTC 4595, ingeniería civil y arquitectura, planeamiento y diseño de instalaciones y ambientes escolares, en donde se estipula que los nuevos asentamientos urbanos deben estar en una distancia no mayor a 500 m en caso de situaciones críticas. En Tabla 1-4, se presenta la valoración otorgada a este subcriterio.

Tabla 1-4 Reclasificación de valores subcriterio cercanía a parques, centros de salud y colegios

Cercanía a parques, centros de salud y colegios(m)	Valoración
0 – 150	5
150 – 250	4
250 – 500	3
500 – 4000	2
> 4000	1

Fuente: Autores.

- **Cercanía a vías (urbanas y rurales):** Entre más cerca se este de la malla vial, será más favorable la valoración que se le dé a una zona, debido a que los desplazamientos de la población hacia diferentes partes de la ciudad serán más sencillos. Los valores otorgados con base en la distancia respecto a las vías se pueden observar en la Tabla 1-5.

Tabla 1-5 Reclasificación de valores subcriterio cercanía a vías urbanas y rurales

Cercanía a vías urbanas y rurales (m)	Valoración
0 – 150	5
150 – 370	4
370 – 590	3
590 – 810	2
> 810	1

Fuente: Autores.

- **Cercanía a zonas ya urbanizadas:** la clasificación de este subcriterio se basó en la importancia de la cercanía a espacios o zonas ya ocupadas por el hombre,

ya que esto garantiza una mayor interacción entre los pobladores que habitan estos lugares, mejor acceso a diferentes servicios como salud, recreación y cultura. Las zonas más próximas a áreas ya urbanizadas serán más favorables para nuevos asentamientos, los rangos de distancia a zonas ya urbanizadas y sus valoraciones se pueden ver en la Tabla 1-6.

Tabla 1-6 Reclasificación de valores subcriterio cercanía a zonas ya urbanizadas

Cercanía zonas ya urbanizadas (m)	Valoración
0 – 500	5
500 – 1500	4
1500 – 3000	3
3000 – 6000	2
> 6000	1

Fuente: Autores.

1.3.2.3 Proceso Analítico Jerárquico (AHP)

Para la aplicación del método se realizó una jerarquización en la que se definieron los criterios físicos y de accesibilidad, así como los subcriterios utilizados para el estudio y presentados en el numeral 1.3.2.2. Este AHP se presenta en la Figura 1-2.

Figura 1-2 Jerarquización de criterios para el proceso analítico jerárquico (AHP)



Fuente: Autores.

Posteriormente, se realizó una comparación por pares según los valores establecidos por Saaty, para cuantificar la importancia de un criterio con respecto a otro tal como se presenta en la Tabla 1-7. A partir de las matrices, se asignaron los pesos correspondientes a cada criterio y subcriterio, y se calculó el radio de consistencia RC, el cual debe ser menor al 10% para evitar posibles incoherencias y contradicciones a la hora de evaluar la importancia de los criterios en cada matriz.

Tabla 1-7 Escala de comparación de Thomas Saaty

Valor Importancia	Definición	Explicación
1	Igual importancia	Dos elementos contribuyen de igual manera a los objetivos
3	Importancia moderada	El criterio A es ligeramente favorecido sobre el criterio B
5	Importancia fuerte	El criterio A es fuertemente favorecido sobre el criterio B
7	Importancia muy fuerte	El criterio A es severamente favorecido sobre el criterio B
9	Importancia extrema	El criterio A es en extremo más importante que el criterio B
2,4,6,8	Valores intermedios	Cuando sea necesario un término medio

Fuente: Saaty, 2008

Para el cálculo del radio de consistencia RC se tuvieron en cuenta las siguientes ecuaciones (Saaty, 2008).

$$RC = \frac{CI}{RI} \quad (1)$$

$$CI = \frac{\tau_{max} - n}{n - 1} \quad (2)$$

Donde τ_{max} corresponde al máximo valor propio de la matriz de comparaciones y se calcula multiplicando la sumatoria de las columnas ΣCol de la matriz de comparación de criterios por el vector de prioridades W que representa el peso que tiene cada criterio o subcriterio en el objetivo general. El valor de n corresponde al tamaño de la matriz.

En cuanto al valor de RI índice aleatorio, Saaty proporciona los siguientes valores según el tamaño de la matriz.

Tabla 1-8 Índice aleatorio RI

Tamaño de la matriz (n)	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Índice Aleatorio (RI)	0	0,525	0,882	1,115	1,252	1,341	1,404	1,452	1,484

Fuente: Saaty, 2008

En cuanto al cálculo de los pesos de los criterios y subcriterios se utilizó un libro de Excel programado para el cálculo de la AHP del BPMSG (Business Performance Management), en donde se relaciona, en una de sus hojas de cálculo, una matriz resumen, de la cual se obtuvieron las ponderaciones que cada uno de los profesionales consultados determinaron para cada criterio y subcriterio evaluado. En la Figura 1-3, se presenta el cálculo de la ponderación realizada entre los criterios de accesibilidad y físicos en donde se obtuvo un valor RC de 0,1%, para la totalidad de los análisis realizados se obtuvieron valores de RC por debajo del 10% evitando así posibles inconsistencias en la evaluación de la importancia de los criterios.

Figura 1-3 Matriz de comparación de criterios-hoja de cálculo matriz resumen para el AHP del BPMS

AHP Analytic Hierarchy Process (EVM multiple inputs)

K. D. Goepel Version 11.10.2017 | Free web based AHP software on: <http://bpmmsg.com>

Only input data in the light green fields and worksheets!

n= Number of criteria (2 to 10) Scale: AHP 1-9

N= Number of Participants (1 to 20) a : Consensus: n/a

p= selected Participant (0=consol.) 2 7 Consolidated

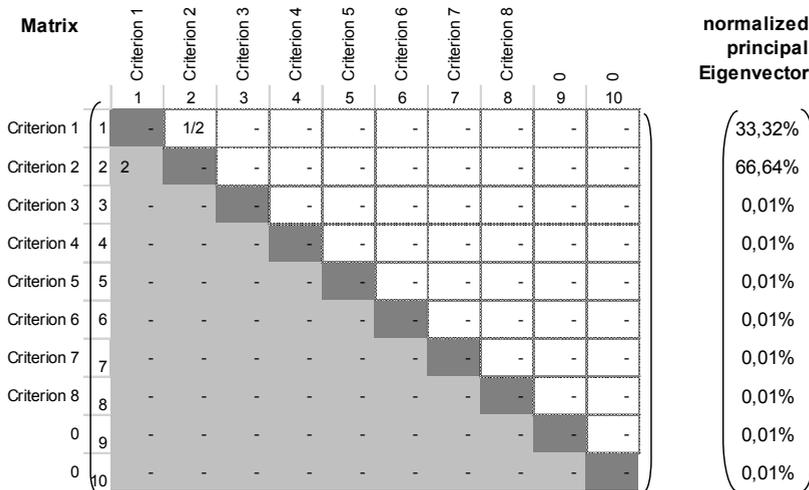
Objective Criterios para obtener zonas potencialmente urbanizables

Author Ing.Santiago

Date 24/09/2019 Thresh: Iterations: EVM check: 1,3E-07

Table	Criterion	Comment	Weights	Rk
1	Criterion 1	FISICOS	33,3%	2
2	Criterion 2	ACCESIBILIDAD	66,6%	1
3	Criterion 3		0,0%	
4	Criterion 4		0,0%	
5	Criterion 5		0,0%	
6	Criterion 6		0,0%	
7	Criterion 7		0,0%	
8	Criterion 8		0,0%	
9		for 9&10 unprotect the input sheets and expand the question section ("+" in row 66)	0,0%	
10			0,0%	

Result Eigenvalue lambda:
 Consistency Ratio 0,37 GCi: CR:



Fuente: Autores.

Una vez realizada la ponderación de cada criterio y subcriterio por parte de cada panelista, se obtuvieron como resultado los pesos finales para cada uno de ellos, en la Tabla 1-9 se relacionan los valores obtenidos para el estudio.

Tabla 1-9 Pesos encontrados para criterios y subcriterios según el AHP

Criterios	Pesos	Subcriterios	Pesos locales	Pesos globales
Físicos	33%	Pendiente	21%	6,93%
		geología	24%	7,92%
		Cobertura	55%	18,15%
Accesibilidad	67%	Cercanía a parques, centros de salud, colegios.	16%	10,52%
		Cercanía a vías (urbanas y rurales)	59%	39,80%
		Cercanía a zonas ya urbanizadas	25%	16,68%
Σ	100%		Σ	100%

Fuente: Autores.

Con el cálculo de los pesos globales de cada subcriterio (Tabla 1-9), se procedió a crear el modelo en ArcGIS, obteniendo un ráster que representa la idoneidad para urbanizar en la ciudad de Tunja. Los ráster de los criterios de accesibilidad se obtuvieron utilizando la herramienta de distancia euclideana, la cual calcula la distancia desde el centro de una celda de origen hasta el centro de las celdas aledañas.

Una vez reclasificado cada subcriterio en una escala de 1 a 5 teniendo en cuenta lo establecido en el numeral 1.3.2.2, se utilizó la herramienta de ArcGIS weighted overlay, para realizar la ponderación de las variables con base en los pesos globales encontrados con el método AHP.

1.3.2.4 Superposición de mapa restricciones y mapa de idoneidad

A partir del algebra de mapas, se realizó la superposición del ráster de restricciones con el ráster de idoneidad, por medio de una multiplicación, se obtuvo el mapa de zonas potencialmente urbanizables en la ciudad de Tunja. De esta manera, se enlazaron los criterios de idoneidad y las restricciones, encontrando una solución a la demanda de áreas que permitan implementar procesos de urbanización en la ciudad, que no solo cumplan con las necesidades de la población, sino que respete los espacios naturales y suelos de protección establecidos dentro del POT y garantice una disminución del

impacto ambiental que se genere a futuro con dichos procesos de expansión urbana de la ciudad.

1.4 Resultados

Una vez realizadas las dos fases de la metodología, se tienen como resultado tres mapas:

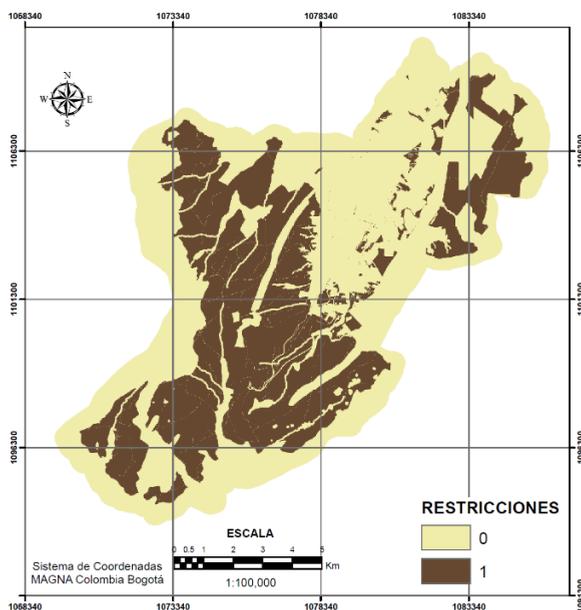
- Mapa de restricciones: en él se evidencian aquellas zonas que presentan restricción para realizar cualquier tipo de urbanismo.
- Mapa de idoneidad: espacio en el que se ven las zonas clasificadas según el rango estipulado de idoneidad.
- Mapa final: muestra las zonas potencialmente urbanizables de la ciudad de Tunja.

Finalmente, se generó un modelo en el software ArcGIS, el cual permite la realización de todo el análisis espacial, geométrico y de mapas, necesario para la determinación de las zonas potencialmente urbanizables.

1.4.1 Mapa de restricciones

Según el mapa de restricciones, 625 ha, presentan limitantes de algún tipo representadas en la Figura 1-4 con color claro, razón por la que no se puede realizar ningún tipo de urbanización en ellas, la mayoría de estas zonas restringidas se encuentran en el casco urbano de la ciudad y en las zonas perimetrales. En color oscuro, se muestran las 555 ha que no presentan restricción y se ubican en zonas aledañas al casco urbano de la ciudad y en la zona rural de la misma. Se encontró que un 53% del área total de la ciudad presenta restricciones, dejando el 47% del territorio sin algún tipo de restricción para realizar expansión urbana (Ver Figura 1-4).

Figura 1-4 Mapa de restricciones

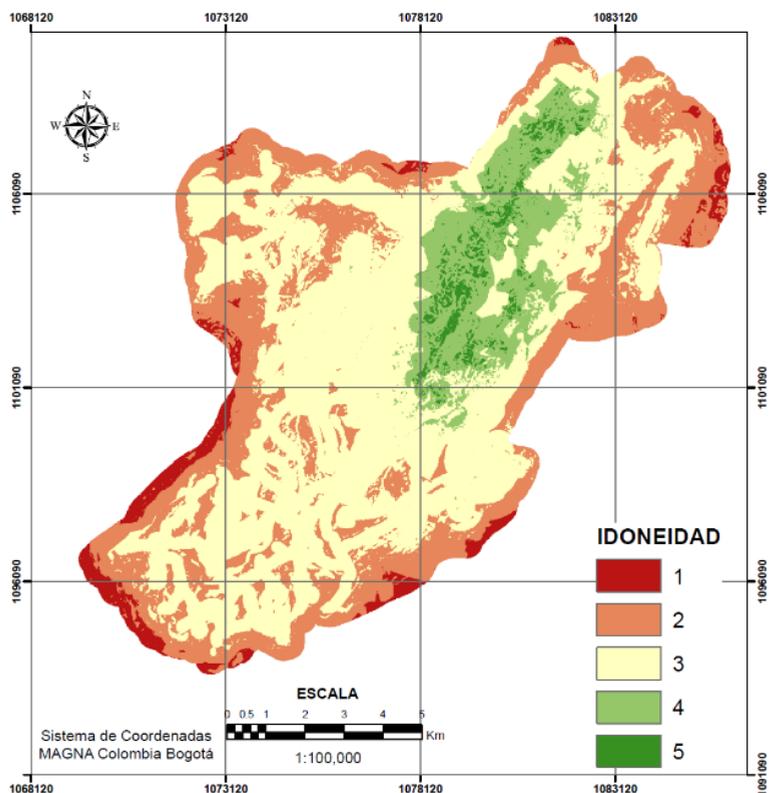


Fuente: Autores.

1.4.2 Mapa de idoneidad

En la Figura 1-5, se puede apreciar la distribución espacial del grado de idoneidad para la ciudad de Tunja, las áreas caracterizadas por color verde oscuro y verde claro, corresponden a las zonas idóneas para urbanizar dentro del perímetro urbano, las cuales corresponden al 35% del área de la ciudad con un total de 425 Ha, las restantes 765 Ha, no presentan condiciones óptimas para realizar obras de urbanización dentro del municipio, entretanto, la zona rural se caracteriza por la presencia de zonas con idoneidad urbanizable aceptable caracterizado en la leyenda con un valor de 3.

Figura 1-5 Mapa de idoneidad



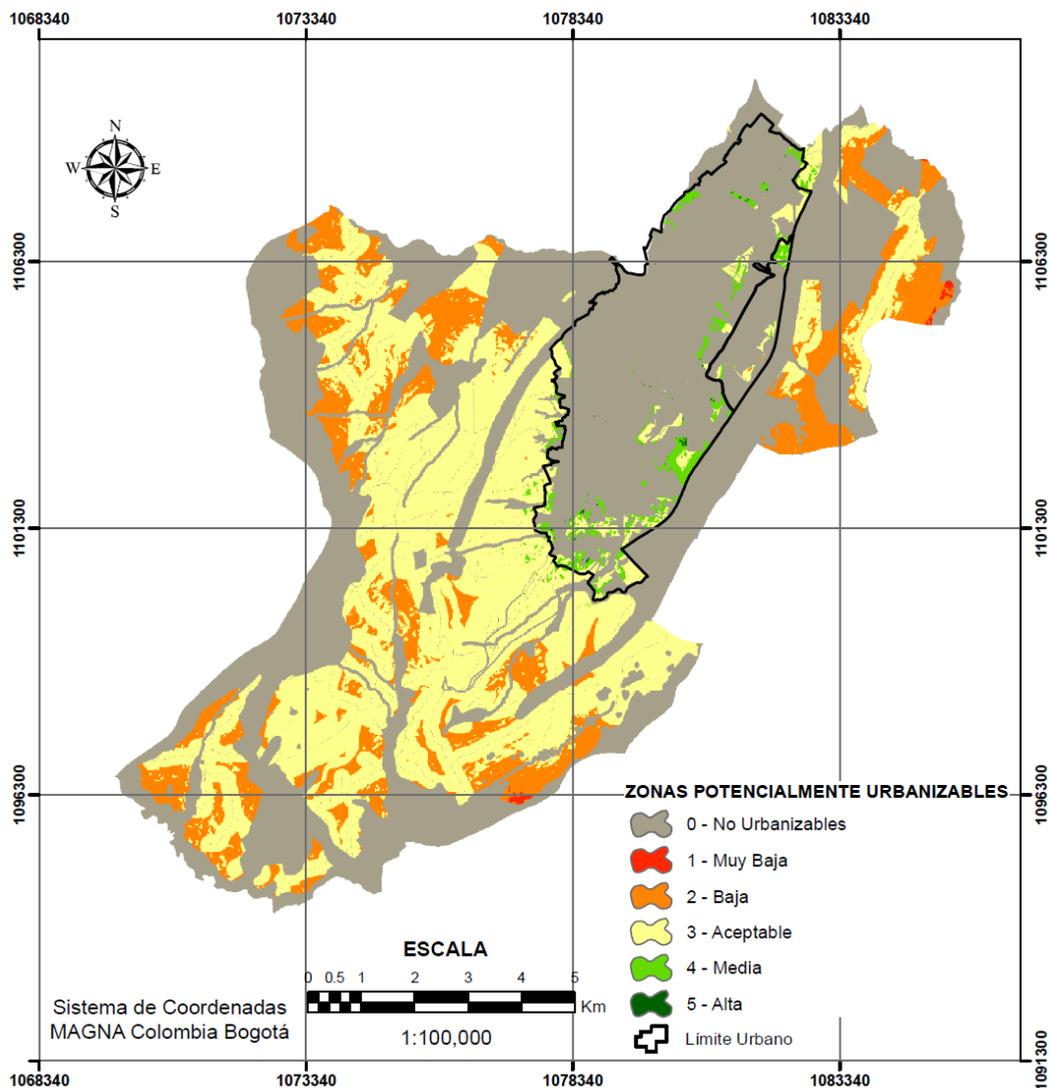
Fuente: Autores.

1.4.3 Mapa de zonas potencialmente urbanizables en la ciudad de Tunja

Se pudo identificar, que las zonas potencialmente urbanizables con clasificaciones 5 (alta) y 4 (media), tienen un área total de 768,19 Ha, distribuidas mayormente de sur a norte en el costado occidental de la ciudad; dicha área equivale a un 6,5% del territorio. Aquellas zonas con clasificación 3 (aceptable), presentan un área de 4090 Ha, las cuales representan un 35% del área total de la ciudad y se encuentran en su mayoría en la zona rural.

El área sin potencial de urbanismo es de 6944 Ha, lo que representa un 59% de la ciudad, ubicada dentro del casco urbano y en la periferia de la capital boyacense. En la Figura 1-6, se pueden ver las zonas potencialmente urbanizables de la ciudad de Tunja.

Figura 1-6 Mapa zonas potencialmente urbanizables Tunja



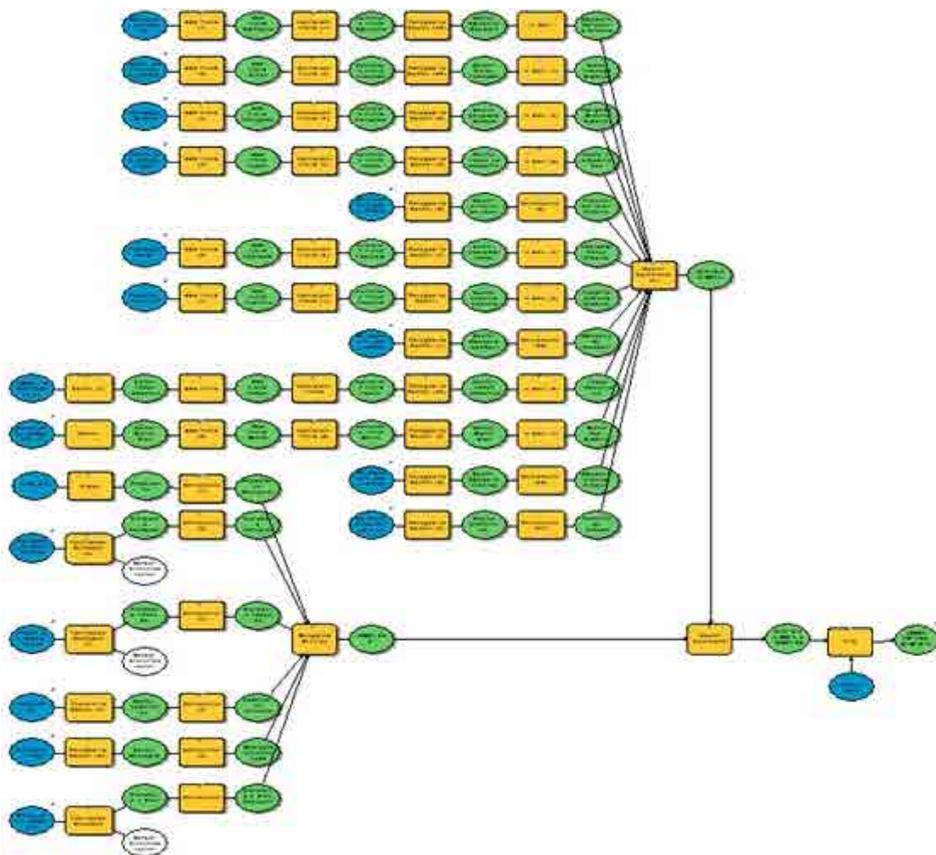
Fuente: Autores.

1.4.4 Modelo de zonas potencialmente urbanizables en ARCGIS

Como aporte final, se obtuvo el modelo mostrado en la Figura 1-7, obtenido en el software ArcGIS, donde se relaciona la información recolectada para realizar el análisis. En este modelo se efectuaron reclasificaciones, análisis de pendientes, determinación de distancias euclidianas, zonas de influencia,

asignación de criterios de valorización y la conformación de los mapas; modelo que es totalmente automatizado y podrá ser implementado por los entes territoriales para proyectar las zonas de expansión de acuerdo a la información de cada municipio basándose en los criterios físicos y de accesibilidad propios de cada uno de ellos.

Figura 1-7 Modelo para determinar zonas potencialmente urbanizables Tunja



Fuente: Autores.

Las zonas destinadas para el uso residencial, deben poseer características específicas de habitabilidad, y estar relacionadas con la salud y seguridad de la población, así como con la necesidad de satisfacer ciertas demandas en cuestión de equipamiento; estas se encargarán de garantizar a las personas, el disfrutar de una buena calidad de vida que posibilite a los habitantes acceso a cultura, educación, esparcimiento, salud y trabajo.

La determinación de la aptitud del territorio se basa en limitantes relativas ligadas a percepciones subjetivas, que pueden ser probables más no exactas. Idealmente, un área o una zona específica con potencial para urbanizar y residir, debería ser el resultado del análisis de un conjunto de variables cuantitativas, que disminuyan la incertidumbre en la toma de decisiones.

Teniendo en cuenta lo anterior, se hace necesario el uso de herramientas y metodologías que permitan realizar un análisis detallado de cada una de las variables que intervienen en la determinación de las zonas de expansión urbana. Es allí, donde los sistemas de información geográfica (SIG) y la evaluación multicriterio (EMC), se convierten en una solución ideal para realizar este tipo de análisis, dada su practicidad y facilidad en el desarrollo de procesos, análisis individuales y la interacción de relaciones espaciales entre múltiples conjuntos de datos, de cada una de las variables que se tengan en cuenta para este tipo de estudios.

1.5 Conclusiones

La magnitud de la información y la cantidad de variables asociadas al análisis del panel de expertos, fueron fácilmente procesados por la integración de los SIG con la EMC; lo que permitió modelar la información alfanumérica con una estructura de datos simple, facilitando su análisis espacial, obteniendo una herramienta sencilla y versátil para la gestión del territorio, la cual puede ser utilizada por los entes territoriales en la toma de decisiones.

Se encontró un área total de 4858,19 Ha, en las cuales se puede desarrollar una zona de expansión urbana, una amplia fracción de esta área se encuentra en la parte rural, y la que fue clasificada como zona aceptable para urbanizar, por lo que se debe determinar un polígono adecuado para zonas de expansión, con el fin de no realizar una afectación importante a la parte rural de la ciudad.

El estudio se ajusta a las condiciones y características propias de la ciudad de Tunja, razón por la que no se recomienda tener en cuenta los mismos criterios, subcriterios y valores de las matrices de comparación para otros lugares, ya que estos criterios varían según el lugar, el tipo y cantidad de información que se tengan para realizar el análisis.

La metodología planteada en el presente estudio, puede ser utilizada por las autoridades competentes den cuanto a la planeación territorial, para la planificación e identificación de zonas idóneas, no solo para lugares de expansión urbana o posible urbanización, sino para localización de equipamientos, nuevas infraestructuras, etc., debido a que es una metodología

sencilla y versátil convirtiéndola en una herramienta apropiada para la gestión del territorio.

De igual manera, la información encontrada frente a las zonas potencialmente urbanizables es de gran utilidad para la ciudadanía, debido a que expone aquellas zonas donde no se tiene ningún impedimento para poder construir o urbanizar, lo que garantiza a los ciudadanos la posibilidad de adquirir predios que no presenten problemas en el futuro, identificar si predios ya adquiridos cuentan con restricciones y así continuar con el proceso pertinente para dar solución a dichas problemáticas.

Al realizar este tipo de análisis se garantiza que se realice una expansión urbana de manera responsable, sin afectar aspectos ambientales, sociales o económicos, al territorio y las personas que lo habitan, lo que permite que estas expansiones se hagan de forma sostenible.

1.6 Recomendaciones

Se recomienda actualizar constantemente el modelo con un volumen mayor de información, ya sea de tipo primaria o secundaria, con el fin de tener una amplia cantidad de criterios para realizar el análisis, lo que permitirá determinar de manera precisa las zonas potencialmente urbanizables de la ciudad.

La aplicación de la metodología presente en este estudio, depende significativamente de la información que se obtenga para el análisis en cada ciudad o área que se quiera analizar, lo que hace necesario realizar las respectivas modificaciones a los modelos y ponderaciones que aquí aparecen, con el fin de obtener resultados veraces en cada lugar donde se realice el estudio.

Se recomienda a los entes territoriales utilizar estudios como el expuesto, para la planificación e identificación de zonas idóneas, no solo para lugares de expansión urbana o posible urbanización, sino para localización de equipamientos, nuevas infraestructuras, etc., ya que esta es una metodología sencilla y versátil, lo que la convierte en una buena herramienta para la gestión del territorio.

Es necesario que se evalué lo más pronto posible la ubicación actual de las zonas de expansión urbana de la ciudad, para no realizar expansiones en lugares no aptos para estos fines, de igual forma, evitar la compra de predios que a futuro pueden tener conflictos en el uso del suelo, de esta manera, evitar un impacto ambiental, social y económico en la ciudad y las personas que la habitan.