

Characterization of Green Infrastructure at the Local Level with Geographical Information System, Tunja (Colombia)

Cristian Hernández-Rojas; Rigaud Sanabria-Marín

Citación: C. Hernández-Rojas, R. Sanabria-Marín,
“Characterization of Green Infrastructure at the Local Level with
Geographical Information System, Tunja (Colombia),” *Revista
Facultad de Ingeniería*, vol. 29 (54), e10294, 2020.

<https://doi.org/10.19053/01211129.v29.n54.2020.10294>

Recibido: Octubre 15, 2019; **Aceptado:** Diciembre 15, 2019;

Publicado: Diciembre 16, 2019

Derechos de reproducción: Este es un artículo en acceso
abierto distribuido bajo la licencia [CC BY](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)



Conflicto de intereses: Los autores declaran no tener conflicto
de intereses.

Characterization of Green Infrastructure at the Local Level with Geographical Information System, Tunja (Colombia)

Cristian Hernández-Rojas¹

Rigaud Sanabria-Marin²

Abstract

This article presents a characterization of the areas likely to integrate a Green Infrastructure (GI) for the Tunja city at local scale and spatial analysis is mainly applied to the land cover and land use of the study area. To identify the areas that could be integrated into the GI, four thematic dimensions were first zoned (ecological connectivity, multifunctionality, ecological status and accessibility to the population); they were later normalized on a scale of 1 to 10 to make them comparable; the dimensions were combined by a Analytic Hierarchy Process (AHP) and finally those areas whose pixel values were above the third quartile were selected in the integration of the dimensions. The zoned dimensions the following weights were obtained: *ecological connectivity* (48%), *multifunctionality* (30%), *ecological status* (13%) and *accessibility to the population* (9%). It was found that the main areas likely to integrate into the GI are concentrated in the western fringe of the city; however, the northwestern area has a greater fragmentation and lower ecological status than the southwestern zone (which refers mainly to the Protective Forest Reserve El Malmo). Likewise, several areas or patches were identified to the south of the city (referring mainly to wooded areas and presence of wetlands) as well as small wooded areas in the urban perimeter, but with greater isolation among the other

¹ Independent researcher. ORCID: [0000-0002-8394-0158](https://orcid.org/0000-0002-8394-0158).

² Ph. D. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (Tunja-Boyacá, Colombia). rigaud.sanabria@uptc.edu.co. ORCID: [0000-0003-3914-3407](https://orcid.org/0000-0003-3914-3407).

areas of GI. Within the urban perimeter the zoning of areas that could be integrated into a GI was practically null.

Keywords: accessibility; connectivity; ecological status; green infrastructure; multifunctionality; spatial analysis.

Caracterización de la Infraestructura Verde a nivel local con Sistemas de Información Geográfica, Tunja (Colombia)

Resumen

Se presenta una caracterización de las áreas susceptibles de integrarse a la Infraestructura Verde (IV) del municipio de Tunja a una escala local y aplicando principalmente análisis espacial sobre las coberturas y usos del suelo de la zona de estudio. Para identificar las áreas susceptibles de integrarse a la IV se zonificó en primer lugar cuatro dimensiones temáticas (conectividad ecológica, multifuncionalidad, estado ecológico y accesibilidad a la población); posteriormente se normalizaron en una escala de 1 a 10 para hacerlas comparables; enseguida se combinaron las dimensiones mediante un Proceso de Análisis Jerárquico (AHP, siglas en inglés) y finalmente se seleccionaron aquellas zonas cuyos valores de pixel estaban por encima del tercer cuartil de datos en la integración de las dimensiones. En las dimensiones zonificadas se obtuvieron los siguientes pesos: conectividad ecológica (48%), multifuncionalidad (30%), estado ecológico (13%) y accesibilidad a la población (9%). Se encontró que las principales áreas susceptibles de integrarse a la IV se concentran en la franja occidental del municipio; sin embargo, la zona noroccidental presenta una mayor fragmentación y menor estado ecológico que la zona suroccidental (la cual hace referencia principalmente a la Reserva Forestal Protectora El Malmo). Igualmente se identificaron varias áreas o parches al sur del municipio (haciendo referencia principalmente a zonas arboladas y presencia de humedales) así como pequeñas áreas arboladas en el perímetro urbano, pero con un mayor aislamiento entre las demás áreas de IV. Dentro del perímetro urbano la zonificación de áreas susceptibles de integrarse a una IV fue prácticamente nula.

Palabras clave: accesibilidad; análisis espacial; conectividad; estado ecológico; infraestructura verde; multifuncionalidad.

Caracterização da Infraestrutura Verde a nível local com Sistemas de Informação Geográfica, Tunja (Colômbia)

Resumo

Apresenta-se uma caracterização das áreas susceptíveis de integrar-se à Infraestrutura Verde (IV) do município de Tunja a uma escala local e aplicando principalmente análise espacial sobre as coberturas e usos do solo da zona de estudo. Para identificar as áreas susceptíveis de integrar-se à IV zoneou-se em primeiro lugar quatro dimensões temáticas (conectividade ecológica, multifuncionalidade, estado ecológico e acessibilidade à população); posteriormente normalizaram-se em uma escala de 1 a 10 para fazê-las comparáveis; em seguida combinaram-se as dimensões mediante um Processo de Análise Hierárquica (AHP, sigla em inglês) e finalmente selecionaram-se aquelas zonas cujos valores de pixel estavam acima do terceiro quartil de dados na integração das dimensões. Nas dimensões zoneadas obtiveram-se os seguintes pesos: conectividade ecológica (48%), multifuncionalidade (30%), estado ecológico (13%) e acessibilidade à população (9%). Encontrou-se que as principais áreas susceptíveis de se integrar à IV concentram-se na franja ocidental do município; porém, a zona noroeste apresenta uma maior fragmentação e menor estado ecológico que a zona sudeste (a qual faz referência principalmente à Reserva Florestal Protetora El Malmo). Igualmente identificaram-se várias áreas ou parches ao sul do município (fazendo referência principalmente a zonas arborizadas e presença de pântanos) assim como pequenas áreas arborizadas no perímetro urbano, mas com um maior isolamento entre as demais áreas de IV. Dentro do perímetro urbano o zoneamento de áreas susceptíveis de integrar-se a uma IV foi praticamente nula.

Palavras chave: acessibilidade; análise espacial; conectividade; estado ecológico; infraestructura verde; multifuncionalidade.

I. INTRODUCCIÓN

De acuerdo con la Comisión Europea [1] la Infraestructura Verde (IV) “es una red estratégicamente planificada de zonas naturales y seminaturales de alta calidad con otros elementos medioambientales, diseñada y gestionada para proporcionar un amplio abanico de servicios ecosistémicos y proteger la biodiversidad tanto de los asentamientos rurales como urbanos”. Por tanto, la identificación, conexión y preservación de dichas redes es esencial en el ordenamiento sostenible del territorio. Así lo reconoce Canto [2], quien señala que a nivel europeo, la implementación de proyectos de IV se ha convertido en un elemento normalizado en la ordenación y desarrollo territorial. La implementación de proyectos de IV aporta beneficios ecológicos, económicos y sociales que contribuyen con un desarrollo sostenible, siempre y cuando la conservación y gestión del espacio verde se integre con el desarrollo del territorio y la planificación de la infraestructura ya constituida [3]. Vásquez [4] considera a la IV como un componente primordial en la planificación de sistemas urbanos-ecológicos resilientes ante el cambio climático, mediante la provisión de servicios ecosistémicos de mitigación y adaptación, por ejemplo, en el almacenamiento y secuestro de dióxido de carbono, en la regulación de temperaturas o la posibilidad del uso de transportes sostenibles (y la correspondiente reducción en la generación de gases de efecto invernadero). Así mismo, Jones y Samper [5] reconocen el papel de la IV como respuesta para enfrentar el cambio climático en Londres. En [3, 6] se resumen los principales beneficios que puede aportar la implementación de proyectos de IV, por ejemplo, en la mejora de calidad ecológica y paisajística, mantenimiento de hábitats, regulación del clima local, mejora de la calidad de vida de la población, entre otros. Para generar zonas de IV, el Green Infrastructure Center [7] ofrece un proceso de seis pasos orientados a crear e implementar planes de IV: *i)* fijación de metas de la comunidad, *ii)* revisión de los datos locales, *iii)* generación de los mapas o activos ecológicos, *iv)* evaluación de riesgos de los activos, *v)* oportunidades sobre los riesgos y metas propuestas, e *vi)* implementación de oportunidades. Complementariamente, Esri [3] propone tres pasos fundamentales para generar áreas de IV, donde se identifican las áreas con *valores ecológicos, culturales* y

escénicos para generar áreas núcleo y posteriormente generar corredores o conexiones entre estas. Por otro lado, Aguilera, Rodríguez y Gómez [8] exponen una metodología desde el punto de vista netamente espacial, sobre las coberturas y usos del suelo, para la selección de áreas susceptibles a integrarse a una IV desde las dimensiones de *multifuncionalidad, conectividad ecológica, permeabilidad o accesibilidad a la población y valor ecológico*. Asimismo, Liqueste *et al* [9] proponen una metodología bajo las nociones de *conectividad ecológica, multifuncionalidad de los ecosistemas y prestación de servicios* o benéficos ecosistémicos para la conservación natural. En Estados Unidos, Esri [3] ha compilado un recurso online para la planificación de la IV en el marco nacional, proporcionando información sobre “núcleos intactos” como insumo de partida para la definición de infraestructuras verdes a escalas de mayor detalle. En Colombia no se han realizado estudios sobre la generación de áreas para integrarse a una IV desde un enfoque espacial, sin embargo, Remolina [10] encontró mediante una revisión de 32 Planes de Ordenamiento Territorial (POT) de municipios de Cundinamarca, que 16 municipios revisados podrían tener una IV de acuerdo a las denominaciones y clasificaciones de los elementos de conservación que conforman cada POT.

El municipio de Tunja, capital del departamento de Boyacá, está ubicado sobre la cordillera Oriental, posee una extensión de 121.4 Km² y una población, de acuerdo al DANE para el 2018, de 167991 habitantes. Dentro de las actividades económicas principales se encuentran la agricultura y el comercio de bienes y servicios. De acuerdo con la Alcaldía municipal de Tunja [11], el efecto antrópico de una dinámica de rápido y desordenado crecimiento de la malla urbana evidencia múltiples riesgos asociados a la escasez de coberturas vegetales protectoras del suelo, desaparición de humedales, inundaciones, sedimentación de cauces, entre otros. Igualmente, Rincón [12] expone que Tunja recibió al siglo XXI como una ciudad compleja producto de las transformaciones históricas de sus modelos espaciales: ciudad *compacta, lineal, dispersa* y finalmente *fragmentada*. Este último modelo genera grandes retos en la ordenación adecuada del territorio y, por lo tanto, la sustentabilidad del mismo, ya que en un espacio fragmentado la delimitación y

conectividad de paisajes con valores ecológicos y servicios ecosistémicos para la población se pierden por completo.

Por otro lado, el municipio de Tunja, en el POT adoptado mediante el Decreto 0241 de 2014, tiene delimitadas zonas o áreas de importancia ecosistémica donde se incluyen los suelos que hacen parte de una *Estructura Ecológica Principal*, pero no posee como tal una delimitación explícita de dicha estructura ni mucho menos posee una zonificación de redes o áreas que cumplan con la definición o características de una IV, la cual puede servir como un insumo para una adecuada ordenación del territorio bajo los criterios de sostenibilidad y aporte en la calidad de vida de la población. Por lo tanto, el objetivo de esta investigación fue caracterizar las áreas susceptibles de integrarse a la IV del municipio de Tunja a una escala local, mediante análisis con Sistema de Información Geográfica.

II. METODOLOGÍA

En la identificación de las áreas que son susceptibles de integrarse a una IV se realizó la zonificación y posterior combinación de cuatro dimensiones: *multifuncionalidad, accesibilidad, conectividad y estado ecológico*; de acuerdo a la metodología propuesta por Aguilera, Rodríguez y Gómez [8]. En esta metodología los insumos base son: *i)* las coberturas y usos del suelo (a escala 1:25000, correspondiente a las actualizaciones de los Planes de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas del Río Alto Chicamocha y Río Garagoa) y *ii)* la cartografía base (a escala 1:25000, correspondiente a las planchas del Instituto Geográfico Agustín Codazzi - IGAC).

A. Multifuncionalidad

Se determinó el aporte potencial que tiene cada cobertura y uso de suelo sobre la prestación de los servicios ecosistémicos de aprovisionamiento (agua dulce), regulación (calidad del aire, almacenamiento de carbono, moderación de eventos extremos, prevención de la erosión), cultura (recreación, turismo) y de soporte (hábitat). Este aporte se evaluó mediante una calificación cualitativa (1-nulo a 4-alto) por medio de la aplicación de ocho encuestas a profesionales inmersos en temas

de planificación territorial de diferentes campos profesionales y conocedores del medio ambiente en Tunja, tomando como valor de multifuncionalidad final el promedio de las calificaciones de todos los servicios ecosistémicos y encuestados.

B. Conectividad ecológica

Esta se basó en los trabajos de Marull y Mallarach [13, 14, 15], en los cuales, a partir de las coberturas y usos de suelo, y mediante el uso de la herramienta *CostDistance* (Arcmap), se identificó el Índice de Afectación por Barreras (IAB) a través de una matriz de afectación, y posteriormente, el Índice de Conectividad Ecológica (ICE) a partir del IAB y de una matriz de afinidad de áreas a conectar (áreas ecológicas funcionales).

Para el cálculo del IAB se utilizó la clasificación de las coberturas y usos del suelo de acuerdo a la tipología de afectación en el medioambiente de la Tabla 1. La superficie de costo se determinó mediante la suma de superficies raster para cada tipología con la distancia y coeficiente de afectación registrados en la Tabla 1.

Tabla 1. Matriz de afectación potencial de las coberturas de suelo. Adaptado de [13].

Descripción	Coefficiente de afectación (a_s) [*]	Valor de Afectación (Λ_s)
Neutros (N)	1000	0.10
Agrícolas (Ag)	750	0.13
Forestales (F)	500	0.20
Barreras (b_s)	250	0.40
Conectores (C)	1	100.00
(*) distancia máxima (m) afectada por la tipología $b_5 = 100$, peso de la barrera de clase 5 (Tabla 2)		$\Lambda_s = b_5 / a_s$

Por medio de la herramienta *CostDistance*, a partir de la superficie de costo generada y el origen en cada tipo de barrera subclasificada (Tabla 2) se generó una distancia de costo (d_s) para cada origen (o bien, para cada tipo de barrera b_s).

Tabla 2. Coberturas y uso de suelo que actúan como barreras. Adaptado de [13].

Clase de Barrera	B_s (*)	K_{s1} (**)	K_{s2} (**)
Espacios ajardinados (b_1)	20	11.10	0.253
Vías secundarias (b_2)	40	22.21	0.123
Vías principales (b_4)	80	44.42	0.063
Espacios urbanos (b_5)	100	55.52	0.051
(*) Peso base de afectación de la barrera			
(**) Constantes para caída logarítmica del 30%			

Para el cálculo del efecto que tiene cada clase de barrera sobre el espacio circundante (Y_s) y el IAB se utilizaron las ecuaciones (1) y (2) [13].

$$Y_s = B_s - k_{s1} \ln(k_{s2}(B_s - d'_s) + 1) \quad , \quad Y = \sum Y_s \quad (1)$$

$$IAB = 10 \left(\frac{Y_i}{Y_{max}} \right) \quad (2)$$

Donde, los valores de B_s , k_{s1} y k_{s2} , se encuentran registrados en la Tabla 2, ($d'_s = B_s - d_s$, donde $B_s - d_s > 0$), Y_i es el valor que toma cada pixel de Y , Y_{max} es el valor máximo de Y .

En cuanto al cálculo del ICE, las áreas ecológicas funcionales (AEF) se seleccionaron de acuerdo a la clasificación de áreas de conservación y protección ambiental del POT y el área delimitada como Páramo Altiplano Cundiboyacense del municipio. La superficie de costo se determinó a partir del efecto que tiene el IAB y la matriz de afinidad entre las coberturas y usos del suelo con cada AEF (la matriz de afinidad se evaluó de 0 a 1, "afín" a "no afín", respectivamente). Con la superficie de costo adaptada para cada AEF y mediante la función *CostDistance*, se obtuvo una distancia de costo (X_i) para cada AEF. De esta manera se empleó la ecuación (3) [13, p. 12] para determinar el Índice de Conectividad Ecológica relativo (ICE_r).

$$ICE_r = 10 - 9 \left[\frac{\ln(1 + (X_i - X_{min}))}{\ln(1 + (X_{max} - X_{min}))} \right]^3 \quad (3)$$

Donde, X_i valor de cada pixel de la distancia de costos i , X_{max} y X_{min} son los valores máximos y mínimos, respectivamente, de la distancia de costos i .

Finalmente, con la ecuación (4) se deriva el Índice de Conectividad Ecológica absoluto (ICE_a), el cual tiene en cuenta todas las AEF analizadas en la zona de estudio.

$$ICE_a = \frac{\sum ICE_r}{\text{número de ICE}_r} \quad (4)$$

C. Accesibilidad de la población

Para determinar el grado de accesibilidad que tiene la población a cada punto de la superficie de estudio, se utilizó nuevamente la herramienta *CostDistance* y una posterior reclasificación lineal para la interpretación de resultados. La superficie de costo se generó mediante la clasificación de la pendiente del suelo y el grado de

“dificultad” de desplazamiento en cada rango de pendiente. En cuanto al origen de la herramienta (CostDistance), se seleccionaron las vías de tipo sendero y camino, esto con el fin de priorizar de alguna manera, el desplazamiento a pie. El puntaje de costo de desplazamiento se asignó de manera que se priorizaran las zonas de menor inclinación como se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3. Clasificación pendiente. Elaboración propia. Rangos de pendiente a partir de [16].

Pendiente (%)	Clasificación	Costo
0 – 3	Ligeramente plano	1
3 – 7	Ligeramente inclinado	2
7 – 12	Moderadamente inclinado	3
12 – 25	Fuertemente inclinado	5
25 – 50	Ligeramente escarpado	8
50 – 75	Moderadamente escarpado	9
> 75	Fuertemente escarpado	10

D. Estado ecológico

Esta dimensión se evaluó como una aproximación del estado ecológico asociado a la composición y configuración de las clases de coberturas y usos de suelo [8]. Esta aproximación se realizó mediante la zonificación de la naturalidad y el contraste entre las coberturas y usos de suelo presentes. Para García [17] la naturalidad implica el reconocimiento de las condiciones naturales, algo que es muy difícil de medir en la práctica, por lo tanto, este concepto se suele referir más a los sistemas seminaturales, cuasi naturales o artificiales, es decir, a los sistemas con algún grado de influencia antrópica. El contraste se entiende como la magnitud de diferencia o afinidad entre características ecológicas de coberturas y usos de suelo adyacentes [8].

En el trabajo de Aguilera [8], la naturalidad se determina a partir de información del Sistema de Información sobre Ocupación del Suelo de España (SIOSE), la cual permite para cada “tesela” del territorio obtener varios atributos (por cada tipo de uso/cubierta y por cada nivel de naturalidad). Dado que la información de partida del presente trabajo fue CORINE LAND COVER se tuvo que modificar el procedimiento de obtención. Por lo tanto, para zonificar la naturalidad se generó una malla (100x100 divisiones, 5195 teselas. El tamaño de malla se escogió de modo arbitrario de manera que permitiera una gran intersección de polígonos adyacentes)

que cubría la zona de estudio y enseguida se realizó una intersección de dicha malla con las coberturas y usos de suelo. De esta manera, se obtuvo el área de cada tesela de la malla y el área de cada tesela intersectada con las coberturas. Posteriormente, de acuerdo a la Tabla 4, se reclasificó las coberturas y usos de suelo y se determinó los grados de naturalidad de acuerdo al porcentaje de ocupación de cada tesela intersectada con respecto al área de la tesela de la malla respectiva. De este modo se obtuvo un valor promedio de naturalidad para cada tesela de la malla, el cual se utilizó para generar una superficie raster.

Tabla 4. Grados de naturalidad por cobertura y uso de suelo. Adaptado de [8].

Cobertura y uso de suelo	Grado de Naturalidad			
	1	2	3	4
Arbolado - matorral, láminas de agua	< 20 %	20-50 %	50-70 %	> 70 %
Prados, pastizales	> 50 %	20-50 %	10-20 %	< 10 %
Cultivos	> 50 %	20-50 %	10-20 %	< 10 %
Superficies artificiales	> 25 %	10-25 %	5-10 %	< 5 %

En cuanto al contraste, se utilizó el programa Fragstats, mediante el empleo de la métrica *Mean Edge Contrast Index* (ECON_MN) y de la ventana móvil a nivel de paisaje, para obtener un valor de contraste para cada pixel de la superficie de la zona de estudio. Igualmente fue necesario ingresar una matriz de contraste entre las coberturas y usos del suelo adyacentes, cuya valoración se hace de 0 a 1 (contraste nulo a alto, respectivamente) [18].

Con las superficies de naturalidad y contraste de la zona de estudio, se procedió a normalizarlas a una misma escala de valores, esto con el fin de poder restar las zonas de contraste a las zonas de naturalidad, y obtener una aproximación al estado ecológico de la zona de estudio.

E. Integración de las dimensiones

Con las cuatro dimensiones zonificadas, se procedió a verificar el grado de correlación de dichas dimensiones, debido a que, variables correlacionadas pueden sesgar los resultados y en dado caso de integrarlos mediante una evaluación multicriterio se debería repartir los pesos de ponderación [8]. De esta manera, mediante el coeficiente de determinación r^2 , se encontró que no existe una

correlación lineal significativa entre ninguna de las cuatro dimensiones (el mayor valor de correlación obtenido fue de 0.13 entre multifuncionalidad y conectividad ecológica, entre las demás dimensiones es menor a 0.04). Para integrar las cuatro dimensiones se procedió a normalizarlas en una escala de 1 a 10 para hacerlas comparables y enseguida, mediante un proceso de análisis jerárquico-AHP elaborado en plantilla Excel de AHP (<http://bpmsg.com>), se determinó el peso de cada dimensión para su integración, obteniendo: *conectividad ecológica* (48%), *multifuncionalidad* (30%), *estado ecológico* (13%) y *accesibilidad a la población* (9%).

La asignación del peso se da por medio de una calificación de la importancia de cada dimensión sobre las demás, en una escala de 1 a 9 (igual importancia a demasiada importancia). Dicha calificación se realizó teniendo en cuenta la forma de obtención y mayor número de parámetros de cálculo en las dimensiones, es decir, que la dimensión que involucro mayor cantidad de parámetros para su zonificación tiene mayor peso que las demás dimensiones.

F. Infraestructura verde

A partir de la integración de las cuatro dimensiones se obtuvo el índice de IV, por lo tanto, se eligieron los pixeles que tuvieran un valor por encima del tercer cuartil (valor que concentra el 25 % más alto de las frecuencias u observaciones de un conjunto de datos) como las áreas susceptibles de integrarse a una IV.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A. Multifuncionalidad

En la Figura 1(a) se muestra la multifuncionalidad de Tunja y en la Tabla 5 están los valores del promedio de las calificaciones de los encuestados y servicios ecosistémicos evaluados para cada cobertura y uso de suelo. Se obtuvo que las coberturas de bosque denso, abierto, ripario y los humedales presentaron un mayor promedio en la calificación (>3) seguidos de las coberturas de arbustales, herbazales, pastos arbolados y la plantación forestal (2.5 a 3). Las coberturas de

mosaicos con espacios naturales y zonas verdes y las recreativas urbanas presentaron valores medio bajos (2 a 2.5). Finalmente, las coberturas de pastos limpios, mosaico de cultivos zona urbana, industrial, explotación de recursos y tierras desnudas y degradadas aportaron el promedio más bajo en la calificación (<2).

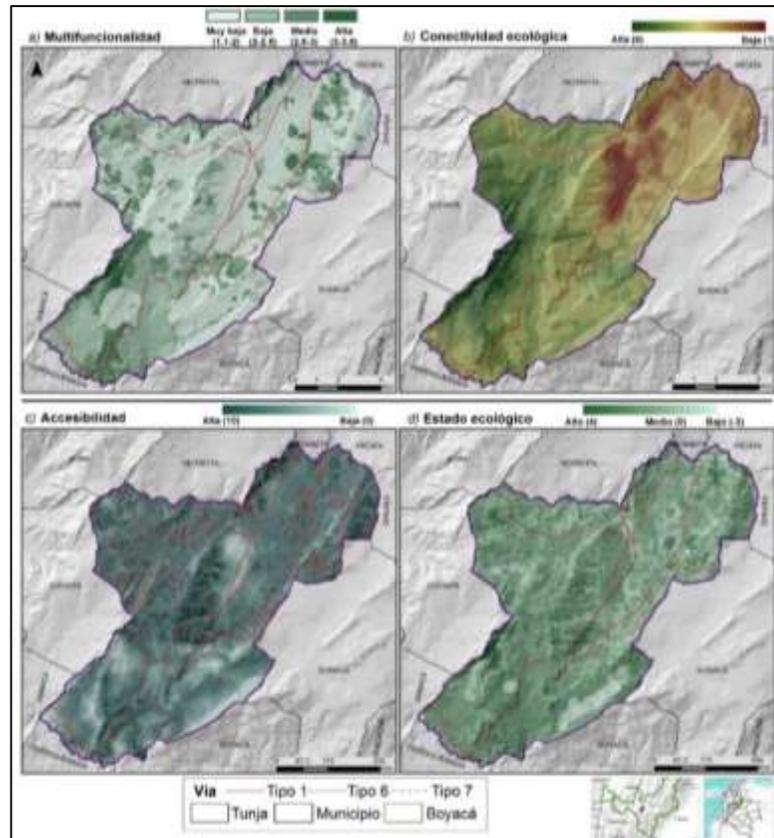


Fig. 1. Dimensiones de la IV de Tunja. a) Multifuncionalidad, b) conectividad ecológica, c) accesibilidad de la población, d) estado ecológico.

Tabla 5. Promedio evaluación de la multifuncionalidad.

Cobertura y uso de suelo	Valor	Cobertura y uso de suelo	Valor
Tierras desnudas y degradadas	1.16	Plantación forestal	2.63
Zona industrial	1.19	Herbazal denso	2.69
Explotación de recursos	1.22	Pastos arbolados	2.69
Tejido Urbano	1.78	Arbustal denso	2.81
Mosaico de cultivos	1.8	Humedal	3.42
Pastos limpios	1.92	Bosque abierto bajo	3.47
Instalaciones recreativas	2.09	Bosque abierto alto	3.52
Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	2.34	Bosque de galería y/o ripario	3.59

Cobertura y uso de suelo	Valor	Cobertura y uso de suelo	Valor
Zonas verdes urbanas	2.44	Bosque denso bajo	3.64
Mosaico de pastos con espacios naturales	2.44	Bosque denso alto	3.8
Arbustal abierto	2.61		

Los anteriores valores son producto de la calificación de ocho profesionales en el campo de la planificación territorial, que con diversos enfoques, ayudan a dar una visión sistémica del aporte que pueden ofrecer las diferentes coberturas y usos del suelo en la prestación de variados servicios ecosistémicos, sin embargo, es necesario involucrar mayor cantidad de personas en la calificación que puedan aportar, además del conocimiento teórico, un conocimiento empírico sobre las dinámicas particulares de las coberturas y usos del suelo en el municipio de Tunja.

B. Conectividad ecológica

Mediante el cálculo del IAB se obtuvo que la zona urbana, la red viaria principal y la férrea actúan como las barreras más importantes para la conectividad ecológica espacial de Tunja, por lo tanto, estas zonas representan los valores más bajos en el Índice de Conectividad Ecológico obtenido. En este índice, ver Figura 1(b), el mayor valor obtenido fue de 8, encontrándose las zonas de mayor conectividad en el occidente del municipio, en límites con el municipio de Cucaita y Samacá (referente al área de la Reserva Forestal Protectora El Malmo y el Páramo Altiplano Cundiboyacense). Asimismo, se presentan zonas con gran valor en esta conectividad en las inmediaciones del humedal al suroriente del municipio (humedal Paso Amarillo) y las coberturas arbóreas al sur del mismo.

C. Accesibilidad

Se obtuvo una superficie predominantemente permeable o accesible en cuanto a las vías de tipo sendero y camino, especialmente desde el centro hasta la parte norte de Tunja, como se observa en la Figura 1(c). No obstante, esta es una simplificación, dado que no se tuvo en cuenta la concentración o densidad poblacional como objeto de desplazamiento.

D. Estado ecológico

Se observa, Figura 1(d), la presencia de valores negativos que representan aquellas zonas que poseen una naturalidad baja-media y alto contraste, sin embargo, la proporción de estos valores negativos (que representan el peor estado ecológico) es relativamente baja y se concentran principalmente en el perímetro de humedales y de la vegetación arbórea. a) *Naturalidad*: las coberturas con algún tipo de intervención antrópica (por ejemplo, mosaicos con cultivos, pastos limpios, zona urbana, entre otros), obtuvieron la menor valoración de naturalidad (0 a 2); coberturas de tipo natural, o bien, donde la proporción de cobertura arbórea es mayor, como bosques y humedales, recibieron los valores más altos (3 a 4). Las valoraciones intermedias (2 a 3) se dan principalmente en la relación de las adyacencias de las teselas con diferentes tipos de coberturas y usos del suelo. b) *Contraste*: se obtuvo un resalte importante en la zona de humedales del sureste del municipio (humedal Paso Amarillo) y en las zonas con predominio de vegetación arbórea; asimismo, al analizar el contraste como una relación entre adyacencias de coberturas, se resalta las zonas que poseen mayor cantidad de coberturas de diferentes tipos evidenciando una fragmentación ecológica del territorio.

E. Infraestructura verde

En la Figura 2 se observan las áreas cuyos valores de pixel se encuentran por encima del Q3 en el índice de IV mediante la integración de las cuatro dimensiones, y por lo tanto son susceptibles a integrarse a una IV. Sin embargo, estas áreas son una aproximación, ya que valores inferiores como los comprendidos sobre el Q2 podrían ser relevantes como espacios de transición o potenciales para reforzar la funcionalidad ambiental. Las áreas susceptibles de integrarse a una IV se concentran principalmente en la parte oeste del municipio de Tunja, en límites con los municipios de Cucaita y Samacá. La zona referente a la Reserva Forestal Protectora El Malmo presenta la mejor homogeneidad, y partiendo de esta se desprenden ramificaciones hacia la parte sur del municipio, igualmente susceptibles. Asimismo, se obtuvo el área de perímetro de la quebrada (drenaje) Tobayá (referente al humedal Paso Amarillo) y pequeñas zonas (en su mayoría

arboladas) al sur y oriente del perímetro urbano, sin embargo, la fragmentación de estas zonas es más evidente. Por último, se observa pequeños parches que cubren la trayectoria del río la Vega (límite con Motavita) y el río Teatinos (límite con Ventaquemada).

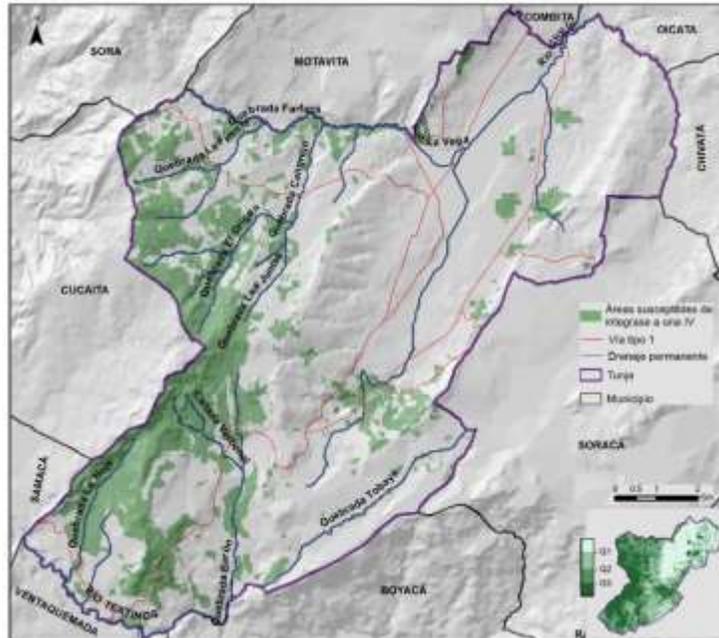


Fig. 2. Áreas susceptibles de integrarse a la IV de Tunja.

Específicamente en el casco urbano se obtuvo que la zonificación de áreas susceptibles a una IV es prácticamente nula. Esto no quiere decir que no existan zonas cuyas características intrínsecas y contextuales no permitan la clasificación bajo este concepto, sino que es necesario la adaptación de la información de partida a una escala de mayor detalle y el uso de otra metodología acorde a dicha escala, ya que si se quisiera calcular la conectividad ecológica (por medio del IAB) para una escala urbana, el análisis será prácticamente de tipologías de barreras. Igualmente, la priorización de los servicios ecosistémicos se debe centrar en el contexto urbano. Es importante resaltar que en la integración de las dimensiones se podría haber trabajado con pesos iguales (25% cada una) mediante un enfoque conservador. No obstante, la asignación de pesos de acuerdo a las características y formas de cálculo de cada dimensión, permitió priorizar de alguna manera aquellas áreas que

poseen una potencial conectividad y multifuncionalidad en el territorio frente a la posibilidad de acceso a la población y el estado ecológico de acuerdo a la interacción de adyacencias de tipologías de coberturas.

De las áreas obtenidas como susceptibles de integrarse a la IV se pueden tomar como referencia 4 zonas (Z1a, Z1b, Z2, Z3 y Z4) dada sus características como cercanía, fragmentación, microcuenca y coberturas presentes, como se observa en las Figuras 3 y 4.

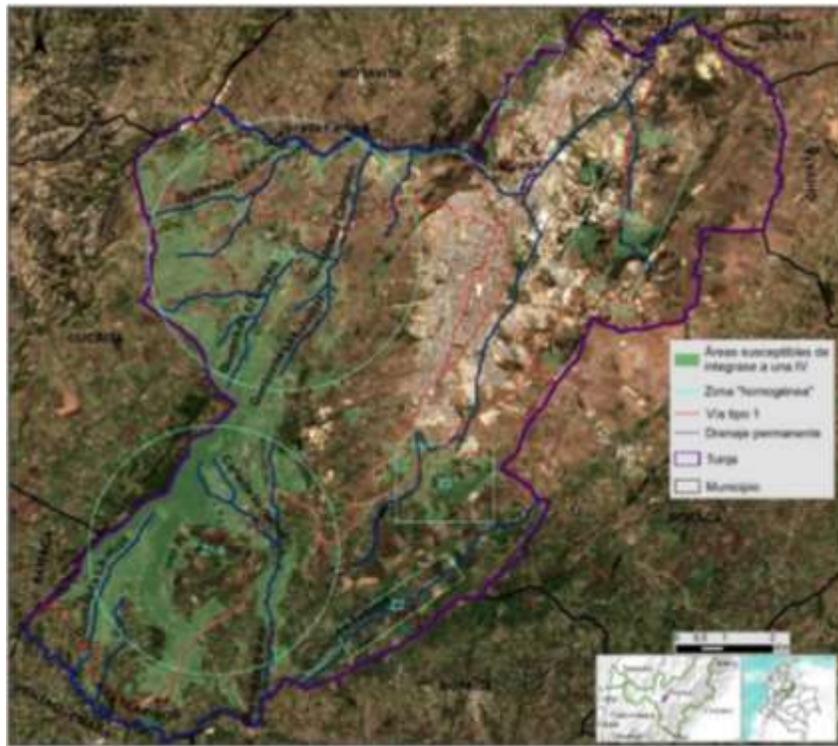


Fig. 3. Zonas homogéneas en la IV de Tunja sobre imagen satelital. Sentinel 2 (febrero, 2019).

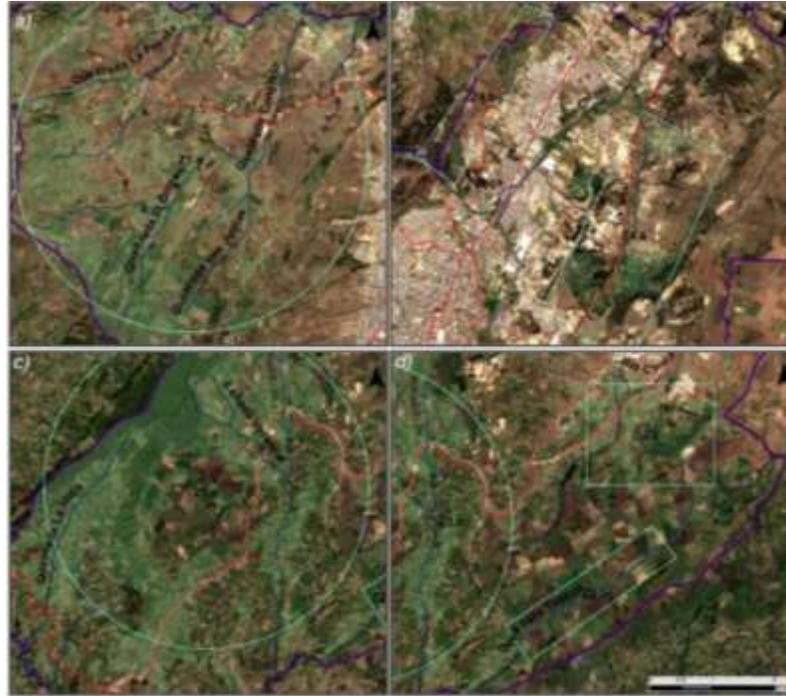


Fig. 4. Detalle zonas homogéneas en la IV de Tunja sobre imagen satelital. a) Zona Z1a, b) zona Z4, c) zona Z1b, d) zona Z2 y Z3. Sentinel 2 (febrero, 2019).

1) Zona Z1a. Franja occidental (centro hacia el norte). Esta zona se compone principalmente por coberturas de pastos limpios y cultivos, así como de pequeñas áreas de bosques, pastos arbolados y espacios naturales. El humedal “El Cardon” en la vereda El Porvenir, no presenta aislamiento alguno por lo que las actividades agrícolas circundantes afectan la vegetación nativa y la aparición de tensoactivos (sustancias que disminuyen la tensión superficial) en el agua debido al uso de detergentes [19] alterando de esta manera la calidad ecológica de dicho sistema. En el área delimitada como Páramo Altiplano Cundiboyacense se encuentra el nacimiento de quebradas (o drenaje menor) como La Fuente, El Origen, El Cangrejo y Las Juntas (microcuencas Farfaca, El Floral y El Cangrejo), las cuales son afluentes de la quebrada Farfacá y el río La Vega y por lo tanto de la subcuenca La Vega. De acuerdo con Acero y Cortes [20] esta subcuenca posee un deterioro en el suelo y las especies de fauna y flora debido a las actividades propias de la región, por lo que se deben implementar estrategias de restauración ecológica.

2) Zona Z1b. Franja occidental (centro hacia el sur). Esta zona está compuesta principalmente por bosque y arbustal denso (Área de Reserva Forestal Protectora

El Malmo), bosque de galería en la franja de los principales drenajes, pastos arbolados y cultivos ubicados en el perímetro del área de reserva. Igualmente hay presencia de los humedales “Aposentos”, “Fuente Negra” y “Yerbabuena” en las veredas La Hoya, Barón Germania y La Lajita. En la zona circundante a la reserva, nacen quebradas como La Hoja, Las Perdices, Barón, Cañada Verbenal, (microcuencas Barón Gallero, Teatinos-Verde y Yerbabuena), las cuales son afluentes del río Teatinos y por lo tanto de la subcuenca Teatinos. El bosque de esta subcuenca se caracteriza por generar los procesos de captación, almacenamiento y regulación del agua hacia el acuífero de Tunja y de varios acueductos veredales [21]. Así mismo, se puede encontrar con mayor detalle las especies presentes en la Reserva Forestal Protectora El Malmo [19].

3) Zona Z2. En esta zona predomina la actividad ganadera y agrícola, la cual rodea al humedal “Paso Amarillo” en la vereda Chorro Blanco, uno de los más extensos del municipio. Debido a las actividades agrícolas presentes en el humedal se encuentran residuos agropecuarios [19], afectando el estado ecológico de dicho sistema. Igualmente se encuentra la quebrada Tobayá (microcuenca Tobayá) la cual es afluente de la subcuenca Teatinos.

4) Zonas Z3 y Z4. Hacen referencia principalmente a áreas de bosques y sus inmediaciones más próximas, con la particularidad que se encuentran dentro y en el perímetro del casco urbano del municipio de Tunja y con una fragmentación evidente. Al sur de municipio se encuentra principalmente el área de bosque entre el río Jordan (río Chulo) y la Quebrada Tobayá, en lo que sería límites del casco urbano con la vereda Runta. La zona 4 hace referencia, de igual manera, a parches de coberturas arbóreas. En el oriente se encuentran las áreas de bosques aledañas a la quebrada La Colorada en la vereda Pirgua, en las proximidades de la vía Bogotá-Tunja-Sogamoso (BTS) y vía que conduce a Soracá. En la parte occidental se hace referencia a parches de bosque en límites con Motavita, como la zona de bosque aledaña al río La Vega y la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.

IV. CONCLUSIONES

El aporte en los servicios ecosistémicos de las coberturas y usos del suelo de Tunja, o bien de la multifuncionalidad, está muy ligado a la presencia de coberturas de bosques y humedales.

La zona urbana del municipio de Tunja y las vías de comunicación principales se presentan como el mayor obstáculo para la conectividad ecológica del municipio. En cuanto a las áreas con mayor índice de conectividad ecológica, la franja occidental del municipio de Tunja presenta una mayor homogeneidad, principalmente por la presencia de la Reserva Forestal Protectora El Malmo y el área de Páramo Altiplano Cundiboyacense. Por el contrario, la zona centro hacia el nororiente del municipio se presenta como la franja de menor conectividad ecológica por la acción de las barreras.

La accesibilidad de la población de Tunja es muy alta desde prácticamente cualquier punto de su superficie, sin embargo, en este cálculo no se tuvo en cuenta factores como la densidad poblacional, sitios de interés cultural, medios de transporte, entre otros.

El estado ecológico, como una aproximación de cálculo entre naturalidad y contraste de las coberturas y usos de suelo, refleja la fragmentación de coberturas que existe especialmente desde la parte centro a la franja noroccidental, referente al Páramo Altiplano Cundiboyacense. Asimismo, se observa la vulnerabilidad que presentan ecosistemas valiosos por los usos de suelo que se dan en sus perímetros.

Las áreas susceptibles de integrarse a la IV se concentran principalmente en la franja occidental del municipio, con mayor fragmentación en la parte noroccidental que la zona suroccidental (la cual hace referencia principalmente a la Reserva Forestal Protectora El Malmo). Estas zonas susceptibles de IV deben ser objeto de una evaluación más detallada que permita la priorización de acciones encaminadas a la planificación territorial o planes de IV. Se evidencia la necesidad de incluir áreas de menor valor en la integración, como espacios de transición facilitadores de una conectividad ecológica.

La metodología empleada en el presente trabajo posee múltiples beneficios en la aproximación de áreas susceptibles de integrarse a una IV a nivel local y regional,

y como herramienta de apoyo en el ordenamiento territorial. No obstante, a un nivel urbano, la aplicabilidad de dicha metodología se debe modificar debido a que, el planteamiento de la conectividad ecológica y estado ecológico podría enmascarar los resultados, por lo cual se debería enfatizar en el análisis de barreras. Igualmente, la identificación de los servicios ecosistémicos y las áreas de accesibilidad para el disfrute de los mismos se deben centrar en el aspecto urbano.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

El desarrollo del procedimiento metodológico fue llevado a cabo por Cristian Hernández Rojas bajo la coordinación de Rigaud Sanabria Marin. La recopilación, análisis de la información y escritura del documento estuvo a cargo de los dos autores.

REFERENCIAS

- [1] Comisión Europea, *Construir una infraestructura verde para Europa*. Oficina de Publicaciones Oficiales de la Unión Europea, Luxemburgo. pp. 1-24. 2014. <https://doi.org/10.2779/2738>
- [2] M. Canto, "La ordenación de la Infraestructura Verde en el sudeste Ibérico (Comunidad Valenciana, España)," *Cuadernos de Biodiversidad*, vol. 45, pp. 10-22, 2014. <https://doi.org/10.14198/cdbio.2014.45.03>
- [3] Environmental Systems Research Institute-ESRI, *Green Infrastructure for the US: Maps and Apps to connect the most valuable landscapes in the nation*. United States of America, pp. 1-35, 2016. https://www.naco.org/sites/default/files/event_attachments/ESri_Green_Infrastructure_Booklet.pdf
- [4] A. Vásquez, "Infraestructura verde, servicios ecosistémicos y sus aportes para enfrentar el cambio climático en ciudades: el caso del corredor ribereño del río Mapocho en Santiago de Chile," *Revista de Geografía Norte Grande*, vol. 63, pp. 63-86, 2016. <https://doi.org/10.4067/S0718-34022016000100005>
- [5] S. Jones, and C. Somper, "The role of green infrastructure in climate change adaptation in London," *The Geographical Journal*, vol. 180 (2), pp. 191-196, 2014. <https://doi.org/10.1111/geoj.12059>
- [6] O. Moreno, C. Lillo, and V. Gárate, "La infraestructura verde como espacio de integración: análisis de experiencias y estrategias sustentables para su consideración en la planificación, diseño y gestión del paisaje en la Intercomuna Temuco - Padre las Casas, Chile," in *XI Simposio de la Asociación Internacional de Planificación Urbana y Ambiente*, Argentina, 2014. <https://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/53434>.
- [7] Environmental Systems Research Institute-ESRI, *Planning a Sustainable Community Begins with You: Six Step Process to Green Infrastructure*. United States of America, 2018. <https://www.esri.com/about-esri/greeninfrastructure/plan>
- [8] F. Aguilera, V. Rodríguez, and M. Gómez, "Definición de infraestructuras verdes: una propuesta metodológica integrada mediante análisis espacial," *Documents D'Anàlisi Geogràfica*, vol. 64 (2), pp. 313-337, 2018. <https://doi.org/10.5565/rev/dag.419>

- [9] C. Liqueste, S. Kleeschulte, G. Dige, J. Maes, B. Grizzetti, B. Olah, and G. Zulian, "Mapping green infrastructure based on ecosystem services and ecological networks: A Pan-European case study," *Environmental Science & Policy*, vol. 54, pp. 268-280, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2015.07.009>
- [10] F. Remolina, "Figuras municipales de conservación ambiental en Colombia: ¿áreas protegidas, redes ecológicas o infraestructuras verdes?," *Revista nodo*, vol. 11 (6), pp. 65-76, 2011.
- [11] Alcaldía municipal de Tunja, *Análisis de la situación de salud con el modelo conceptual de determinantes sociales de la salud*. Colombia, pp. 1-138, 2013. https://www.boyaca.gov.co/SecSalud/images/Documentos/ASIS_2013/ASIS%20TUNJA%202013.pdf
- [12] M. Rincón, "Procesos de transformación urbana: El caso de Tunja 1900-2005," *Perspectiva Geográfica*, vol. 1 (14), pp. 13-44, 2009.
- [13] J. Marull, and J. Mallarach, "La conectividad ecológica en el Área Metropolitana de Barcelona," *Ecosistemas*, vol. 2, pp. 1-22, 2002.
- [14] J. Mallarach, *Análisis y diagnóstico de la conectividad ecológica y paisajística en el sector sur del Anillo Verde de Vitoria-Gasteiz: Estudio de opciones y alternativas para maximizar el beneficio social y ecológico de los enlaces potenciales del Anillo Verde con los Montes de Vitoria*. Vitoria-Gasteiz, pp. 1-21, 2004.
- [15] J. Marull, "Metodologías paramétricas para la evaluación ambiental estratégica," *Ecosistemas*, vol. 2, pp. 1-9, 2005.
- [16] Unidad de Planificación Rural Agropecuaria-UPRA, *Evaluación de Tierras para la Zonificación con fines Agropecuarios: Metodología a Escala General (1:100.000)*. Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, Colombia, pp. 1-111, 2013. https://www.upra.gov.co/documents/10184/13821/Metodolog%C3%ADa_Evaluaci%C3%B3n_de_Tierras+1-100000.pdf
- [17] L. García Leyton, *Aplicación del análisis multicriterio en la evaluación de impactos ambientales*, Doctoral Thesis, Universitat Politècnica de Catalunya, Departament de Projectes d'Enginyeria, 2004. <http://hdl.handle.net/10803/6830>
- [18] K. McGarigal, *Fragstats Help*. University of Massachusetts, Amherst. pp. 1-182. 2015. Available at: <https://www.umass.edu/landeco/research/fragstats/fragstats.html>
- [19] Universidad Nacional De Colombia, *Primera Revisión POT de Tunja: Anexo Técnico Físico Biótico*. Alcaldía de Tunja, Colombia, pp. 1-111, 2014.
- [20] A. Acero, and F. Cortés, "Propagación de especies nativas de la microcuenca del río La Vega, Tunja, Boyacá, con potencial para la restauración ecológica," *Ciencias Naturales*, vol. 38 (147), pp. 195-205, 2014.
- [21] Corpoboyacá, *Cartilla Plan de Manejo Ambiental Acuífero de Tunja*, pp. 1-32. <https://www.corpoboyaca.gov.co/nuestra-gestion/planes/plan-de-manejo-ambiental-acuifero-de-tunja/>