

Análisis de conectividad estructural en el corredor kárstico del oriente antioqueño: un análisis exploratorio para el manejo ambiental del territorio

Daniel Augusto Martínez Castaño, ✉ [danielmarcas93@gmail.com](mailto:danielmarcas93@gmail.com)

Trabajo de Grado presentado para optar al título de Especialista en Sistemas de Información Geográfica

Asesor: Helena Pérez Garcés, Magíster (MSc) en Ciencias Ambientales



Universidad de San Buenaventura  
Facultad de Ingenierías (Medellín)  
Especialización en Sistemas de Información Geográfica  
Medellín, Colombia

2019

---

Citar/How to cite [1]

Referencia/Reference [1] D. A. Martínez-Castaño, “Análisis de conectividad estructural en el corredor kárstico del oriente antioqueño: un análisis exploratorio para el manejo ambiental del territorio”, Trabajo de grado Especialización en Sistemas de Información Geográfica, Universidad de San Buenaventura, Facultad de Ingenierías, Medellín, 2019.

Estilo/Style:  
IEEE (2014)



Especialización en Sistemas de Información Geográfica, Cohorte VIII.

### **Bibliotecas Universidad de San Buenaventura**



Biblioteca Digital (Repositorio)  
<http://bibliotecadigital.usb.edu.co>

- Biblioteca Fray Alberto Montealegre OFM - Bogotá.
- Biblioteca Fray Arturo Calle Restrepo OFM - Medellín, Bello, Armenia, Ibagué.
- Departamento de Biblioteca - Cali.
- Biblioteca Central Fray Antonio de Marchena – Cartagena.

### **Universidad de San Buenaventura Colombia**

Universidad de San Buenaventura Colombia - <http://www.usb.edu.co/>

Bogotá - <http://www.usbbog.edu.co>

Medellín - <http://www.usbmed.edu.co>

Cali - <http://www.usbcali.edu.co>

Cartagena - <http://www.usbctg.edu.co>

Editorial Bonaventuriana - <http://www.editorialbonaventuriana.usb.edu.co/>

Revistas - <http://revistas.usb.edu.co/>

## **Agradecimientos**

A mis padres, por apoyarme siempre en mis decisiones profesionales y por aconsejarme para la vida. A mis amigos y compañeros, por apoyarme y ayudarme a mejorar cada día más. A la Universidad de Antioquia por formarme profesional y éticamente, y a la Universidad San Buenaventura, por sus enseñanzas.

## TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN .....	8
ABSTRACT .....	9
I. INTRODUCCIÓN .....	10
II. JUSTIFICACIÓN.....	11
III. OBJETIVOS.....	12
IV. MARCO TEÓRICO.....	13
A. Coberturas .....	14
B. Distancia a vías, minas, centros poblados e industrializados .....	14
C. Variables abióticas .....	15
V. METODOLOGÍA .....	17
A. Zona de estudio .....	17
B. Tratamiento cartográfico de las variables .....	18
1). Coberturas.....	18
2). Distancia a vías, centros poblados y minero-industriales.....	20
3). Distancia a ríos .....	21
4). Rugosidad y pendiente.....	22
C. Tratamiento cartográfico de los nodos .....	24
1). Obtención del ráster de resistencia .....	26
D. Algoritmo seleccionado para el análisis de conectividad.....	26
VI. RESULTADOS.....	27
A. Obtención de los nodos .....	27
B. Variables y análisis de resistencia.....	28
C. Análisis de conectividad.....	32
VII. DISCUSIÓN .....	33

VIII. RECOMENDACIONES .....35

REFERENCIAS .....36

ANEXOS.....41

## LISTA DE TABLAS

TABLA I. VALOR DE RESISTENCIA ASIGNADOS A CADA UNO DE LOS USOS DEL SUELO.....	19
TABLA II. CLASIFICACIÓN DE LOS VALORES DE RESISTENCIA A CATEGORÍAS DE DISTANCIA A CENTROS POBLADOS, MINEROS, INDUSTRIALES O COMERCIALES .	20
TABLA III. CLASIFICACIÓN DE VALORES DE RESISTENCIA CORRESPONDIENTES A CADA CATEGORÍA DE DISTANCIA A LAS VÍAS.....	21
TABLA IV. VALOR DE RESISTENCIA ASIGNADO A LAS CATEGORÍAS DE DISTANCIA A LOS RÍOS. ....	22
TABLA V. VALORES DE RESISTENCIA ASIGNADOS A CADA CADA CATEGORÍA DE RUGOSIDAD. ....	23
TABLA VI. VALORES DE RESISTENCIA ASIGNADOS A CATEGORÍAS DE PENDIENTES. ....	23
TABLA VII. PESO DE CADA VARIABLE UTILIZADA PARA GENERAR EL RÁSTER DE RESISTENCIA DE ACUERDO CON EL MÉTODO SAATY .....	30

## LISTA DE FIGURAS

Fig. 1. Mapa de localización del área trabajada. ....	17
Fig. 2. Archivo vectorial resultante del análisis de segmentación morfológica.....	27
Fig. 3. Área de núcleo que corresponden a los parches de bosque mayores a 1 km <sup>2</sup> en el área de interés. ....	28
Fig. 4. En esta serie de imágenes se muestran los mapas ya reclasificados de: A) Coberturas, B) Distancia a minas y centros poblados, C) Distancia a ríos, D) Distancia a vías, E) Pendiente, F) Rugosidad.....	29
Fig. 5. Mapa resultante de resistencia calculado a partir de seis variables y el método de ponderación propuesto. ....	31
Fig. 6. Mapa de conectividad resultante.....	32

## RESUMEN

Los análisis de conectividad biológica son aquellos “puentes” o “enlaces” que permiten la conexión entre dos o más elementos naturales de interés a escala de paisaje. Por ejemplo, aportan conocimiento acerca de cómo se pueden unir dos parches de bosque y cuál es el camino más adecuado para lograr esta conexión, de modo que las especies de animales y plantas puedan utilizarlos y pasar a través de ellos para ir de un lugar a otro. De este modo, este tipo de ejercicios se convierten en herramientas clave a la hora de establecer programas de conservación o restauración en un territorio. Asimismo, esta conectividad se puede evaluar desde dos perspectivas: una funcional, cuando se trabaja con alguna especie de interés y su interacción con el paisaje; y una estructural, cuando se trabaja con hábitats naturales. Para el presente estudio se realizó un análisis de conectividad estructural en una matriz paisajística del corredor kárstico del oriente antioqueño con el objetivo de definir prioridades en la conservación de la diversidad biológica asociada a un área protegida que ha definido la corporación ambiental de este territorio. Se espera que este ejercicio sirva como base para otros estudios posteriores y que abra las puertas a otros análisis de conectividad basados en funcionalidad.

**Palabras clave:** Conectividad ecológica, conectividad estructural, conservación biológica, ordenamiento territorial, áreas protegidas.

## ABSTRACT

Biological corridors are those linkages that connect two or more remnants of one original habitats within a studied landscape. For example, they tell us about how forest patches can be connected in a fragmented matrix in order to allow wildlife flow throughout their habitats in an evaluated landscape. Thus, these kind of GIS explorations become relevant in conservation projects or in spatial planning. Also, connectivity can be seen from two non-excluded perspectives: functional connectivity, which focuses on how plants or animals move between natural habitats in a landscape; and structural connectivity, which only calculate how natural habitats can be connected in the evaluated matrix. Here I present a structural connectivity analysis in the karstic corridor of eastern Antioquia, in order to define which sites of this zone are better for conservation purposes, and with the interest to bring GIS tools for the environmental corporation of this zone. It is expected that this kind of studies provide a baseline information for other explanatory or scientific studies in the zone, as well as giving some basic tools for other academic studies in biological corridors.

**Keywords:** Biological corridors, ecological connectivity, wildlife management, conservation, protected areas.

## I. INTRODUCCIÓN

La región del oriente antioqueño presenta cerca de 270000 hectáreas de bosque natural, lo que corresponde al 33 % del territorio. Gran parte de estos ecosistemas naturales se conservan en 19 áreas protegidas que se han venido declarando desde 1970 hasta la fecha. Actualmente, en el oriente antioqueño se pretenden declarar cerca de 14500 hectáreas de una nueva área protegida que abarca una parte significativa del Cañón de Río Claro, el corredor kárstico<sup>1</sup> del oriente antioqueño y las cavernas asociadas a este [1].

Para el diseño, la delimitación y el manejo de las áreas protegidas debe haber unos requerimientos técnicos asociados a los sistemas de información geográfica. Estos requerimientos son: levantamiento de coberturas, evaluación de predios, evaluación de la geología y la hidrología del terreno y la posible presencia de corredores de conectividad entre ecosistemas naturales, por destacar algunos.

En el presente trabajo de grado se evaluará el componente de conectividad desde el punto de vista cartográfico. El concepto de conectividad se divide en dos: conectividad estructural y conectividad funcional. La primera se refiere a los elementos del paisaje que están conectados mediante corredores; la segunda se refiere a los aspectos de la conectividad estructural que se relacionan con el comportamiento o la biología de una o varias especies [2]. Con lo anterior, el presente trabajo buscará determinar cuáles son las áreas importantes para la conectividad estructural de una matriz del paisaje en el corredor kárstico del oriente antioqueño, de modo que esto pueda servir como herramienta para las acciones de conservación que se desarrollen a futuro en esta área.

---

<sup>1</sup> El karst es un término geológico que se usa para referirse a rocas como el mármol, el yeso, la caliza o la dolomita, que sufren procesos de disolución química ocasionadas por el agua a través del tiempo, formando así relieves particulares conocidos como “corredores kársticos”, dentro de los cuales hay cavernas y una gran variedad de geformas asociadas.

## II. JUSTIFICACIÓN

El cañón de Río Claro y el corredor kárstico asociado a este es una de las zonas más deforestadas del oriente antioqueño, aunque aún se mantienen algunos remanentes boscosos que se pueden conservar. Para tal fin se pretende establecer un área protegida en esta zona, cuya justificación, diseño y manejo requiere de las herramientas que brindan los sistemas de información geográficos. Tales herramientas se encuentran enmarcadas, por ejemplo, en lo que representa la identificación o el diseño de corredores de conectividad estructural o funcional entre distintos parches de bosque, de modo que pueda garantizarse de forma más puntual en dónde deben hacerse esfuerzos para la conservación o por qué se deben seleccionar ciertas áreas para la restauración ecológica sobre otras. En otras palabras, el diseño de corredores biológicos son una herramienta de gestión ambiental, por lo que desarrollarlos podrían impactar de manera positiva una región o una biota en particular cuando se hacen ejercicios de conservación.

### **III. OBJETIVOS**

#### ***A. Objetivo general***

Determinar corredores de conectividad estructural para el cañón de Río Claro y el corredor kárstico asociado a este en el oriente antioqueño.

#### ***B. Objetivos específicos***

Se describen algunos ejemplos de verbos comunes que se utilizan en el planteamiento de objetivos, los cuales cambiarán dependiendo de su investigación.

- Evaluar la conectividad ecológica al interior de un área protegida definida por la corporación ambiental del territorio, la cual abarca el cañón del río claro y el corredor kárstico en mención.
- Emplear la metodología de análisis de patrones de segmentación morfológica (*MSPA* por sus siglas en inglés) para estimar los remanentes los nodos de interés en el análisis de conectividad.

#### IV. MARCO TEÓRICO

La conectividad ecológica suele definirse como aquellos corredores o puentes que permiten conectar diferentes parches de hábitat natural dentro de una matriz paisajística determinada, estudiada a una escala puntual. Asimismo, estas conexiones tienen sentido biológico cuando permiten el intercambio o el paso de individuos, poblaciones, comunidades o genes de diferentes especies entre los parches analizados [3], [4], [5]. De este modo, estudiar la conectividad y diseñar corredores biológicos permiten mejorar las estrategias de conservación y planificación de un territorio, a la vez que se ayudan a reducir la tasa de extinción de determinadas especies que son de interés de los análisis de la ecología del paisaje [4], [6], [7], [8], [9], [10].

El estudio de la conectividad ecológica se da en diferentes niveles y puede analizarse desde dos componentes: uno estructural y otro funcional. La conectividad estructural se refiere a la conexión espacial de diferentes tipos de hábitat en el paisaje; mientras que la conectividad funcional está relacionada con la respuesta de cada una de las especies que conforman una comunidad biológica ante la estructura física del paisaje [2], [7]. Evidentemente, para evaluar la conectividad funcional es necesario conocer uno o varios organismos biológicos en particular (especies focales), su comportamiento, el hábitat o los parches que utilizan en el paisaje evaluado, la tolerancia a la perturbación, entre otros aspectos. En cambio, la conectividad estructural puede evaluarse sin conocer todos estos aspectos que se obtienen en campo. En vez de esto requiere algunos insumos dados por los sistemas de información geográfico y algunos supuestos teóricos, según la metodología empleada [2], [11], [12]. En todo caso, es necesario aclarar que la conectividad estructural es la base sobre la cual se trabaja la conectividad funcional. Determinar esta última es lo que finalmente determinará el éxito o no de la conformación de un corredor biológico [2]. La conectividad estructural es, en otras palabras, una de las bases que permitirían determinar la conectividad funcional cuando se tengan especies focales [13].

El análisis de este estudio se basa en la conectividad estructural de un paisaje del corredor kárstico del oriente antioqueño. Como insumos para este estudio se requieren básicamente dos cosas: un mapa de resistencia, el cual indica cómo ciertos aspectos o variables del paisaje afectan o favorecen la conexión entre parches de hábitat; y los nodos, que son, precisamente, aquellos puntos o áreas

de interés que se desean conectar dentro del análisis [14]. En este estudio se han definido los nodos como los parches de bosque dentro del paisaje evaluado. En cuanto al mapa de resistencia, la literatura nos menciona algunas variables importantes dentro de los análisis de conectividad que este estudio ha tomado en cuenta [15], [16], [17]. Algunas de esas variables que podrían afectar o favorecer la conectividad se agrupan en tres clases: 1) las coberturas del terreno, 2) variables relacionadas a la intervención antrópica, y 3) variables derivadas de las características abióticas del terreno evaluado [12]. Luego, las variables seleccionadas se ponderan; tras esta ponderación se realiza un álgebra de mapas considerando el peso asignado a cada variable. El ráster resultante se reclasificará de modo que este tenga valores de pixel desde 1 hasta 100, donde el menor número representa menor resistencia, y viceversa [14], [15].

Tomando en consideración las tres clases descritas en el párrafo anterior, las variables que se escogieron para construir el ráster de resistencia para este estudio fueron:

#### *A. Coberturas*

Las coberturas de la tierra permiten identificar los diferentes hábitats o ecosistemas naturales presentes en un paisaje, que es en donde finalmente los organismos desarrollan todos sus procesos biológicos que son de interés de la conservación [12]. Por lo anterior, son un insumo fundamental en el análisis de conectividad. En el presente estudio se asumen aquellos sitios boscosos o en regeneración natural como aspectos del paisaje que favorecen la conectividad. En contraste, aquellas áreas degradadas o transformadas en pastos se consideran zonas de mayor resistencia.

#### *B. Distancia a vías, minas, centros poblados e industrializados*

- **Distancia a vías:** Se ha comprobado mediante diferentes estudios en todo el mundo que las vías son un componente antagonista para los ejercicios de conservación de las especies debido a que funcionan como una barrera para organismos con una capacidad de desplazamiento relativamente limitada y, además, por los atropellamientos de fauna silvestre que a menudo ocurren en ellas [18], [19].

Para la zona de interés se ha detectado una carretera importante a nivel nacional. Se trata de la autopista Medellín-Bogotá. Además, de esta se desprenden algunas vías de tipo secundario y terciario que se dirigen hacia algunos corregimientos, veredas o centros minero-industriales dentro de la zona. Debido al alto flujo vehicular de la zona y a la evidencia que existe sobre los impactos de las vías sobre la biodiversidad, esta variable se tomó como negativa para la conectividad del paisaje. La forma de evaluar cartográficamente esta variable se puede realizar mediante un mapa de densidad o de distancia hacia las vías. De acuerdo con Beier, Majka y Spencer [12], es mejor utilizar una variable basada en distancia hacia las carreteras más cercanas, pues evita así problemas relacionados al tamaño del pixel y, por otro lado, tiene más sentido biológico.

- **Distancia a centros poblados y de actividad minero-industrial:** Esta es una variable intrínseca de este estudio, pues la zona estudiada presenta unas dinámicas económicas propias de un territorio con una gran actividad minera. Es evidente que las actividades mineras impactan negativamente la biodiversidad y, por consiguiente, la conectividad. No obstante, la afectación que estas actividades generan sobre los ecosistemas naturales no se ha cuantificado cartográficamente, por lo que no es fácil hablar aquí de un umbral de distancia a partir de la literatura. Por lo anterior, la construcción de esta variable se interpretó de acuerdo con la opinión de varios expertos en geología y profesionales de la conservación implicados en el área de trabajo.

### *C. Variables abióticas*

- **Distancia a ríos.** El agua es un agente efectivo para la conexión de elementos paisajísticos; por lo tanto, resultan muy importantes a la hora de evaluar la conectividad del paisaje [20], [21]. Por ejemplo, a través de los ríos ocurre el intercambio de materia orgánica, organismos, energía y también marcan el borde de un determinado hábitat [22]. Por otro lado, el estilo de vida de muchas especies es dependiente de los sistemas ribereños, independientemente de si estos son sésiles, acuáticos, terrestres o voladores [20], [23], [24]. De hecho, existe evidencia de que la biodiversidad de una zona es, en líneas generales, mayor en las áreas cercanas a los ríos o cuerpos de agua dentro del paisaje [21], [25], [26].

De este modo, los ríos se pueden comprender como un elemento del paisaje que favorece la conectividad entre parches, bien sea a lo largo del río (longitudinalmente), por los patrones de inundación del cuerpo de agua (transversalidad) o por la distancia que hay desde un punto en la tierra hasta el río más cercano [20]. Así, la interpretación que se le dará a los ríos en este análisis es que los puntos más cercanos a estos sistemas lóticos favorecen la conectividad.

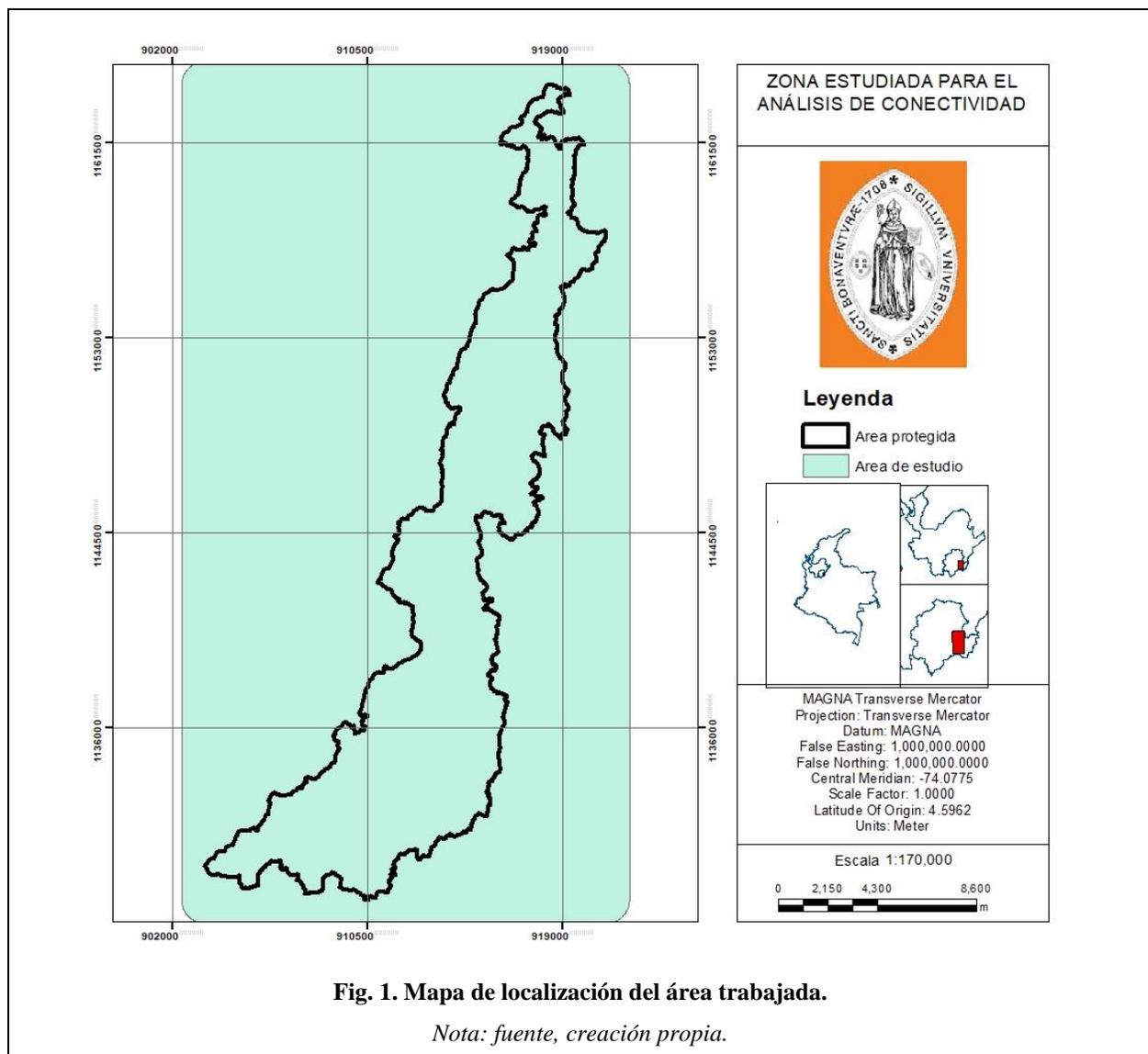
- **Topografía del terreno.** La topografía del terreno puede jugar un papel importante en la funcionalidad o estructura de un paisaje, y un problema de muchos análisis de conectividad es que consideran el terreno como algo plano, ignorando el relieve del territorio estudiado, generando así posibles errores en los análisis de conectividad, particularmente para zonas montañosas [27]. Por ejemplo, la superficie de un territorio puede ser un determinante en la riqueza o composición de plantas vasculares [28], [29]. Así, para evaluar los efectos de la topografía sobre la conectividad se han propuesto algunos índices basados en rugosidad, pendiente, concavidad/convexión o geomorfología [27].

Después de la realización del ráster de resistencia y de la selección de los nodos se procede a seleccionar un algoritmo que permita evaluar la conectividad estructural. Algunos de los más usados en este tipo de análisis son los siguientes: modelos basados en menor costo de viaje [30], modelos basados en teoría de circuitos [31] o modelos que utilizan algoritmos de menor costo de viaje combinados con distancias euclidianas [32]. Para este estudio se utilizó este último tipo de algoritmos debido a que se empleó un ráster de resistencia, pero al mismo tiempo se desea conocer cuáles son los corredores más cercanos en términos de distancia para plantear la conexión entre dos parches de bosque a futuro.

## V. METODOLOGÍA

### A. Zona de estudio

El área de estudio comprende los municipios de San Luis, Puerto Triunfo, San Francisco y Sonsón (corregimientos de Jerusalén y La Danta), en las subregiones de Oriente y Magdalena Medio del departamento de Antioquia. Justo en esta zona se encuentra un corredor de cavernas y karst que van a lo largo de la cuenca de los ríos Claro y Cocorná Sur (Fig. 1).



## ***B. Tratamiento cartográfico de las variables***

### ***1). Coberturas***

Las coberturas se tomaron a partir del POMCA del río Cocorná y directos al Magdalena medio del año 2012, con ajustes para el año 2018, de acuerdo a la información suministrada por la Corporación Autónoma Regional de las Cuencas de los Ríos Negro y Nare [33]. Las coberturas se levantaron de acuerdo con la metodología Corine Land Cover a una escala de 1:25000 [34]. A la capa vectorial de coberturas se le asignó un nuevo campo en la tabla de atributos denominado “Valor”. Este campo se encargó de almacenar un número de 1 a 95 asignado a cada categoría de uso del suelo, donde 1 representa valores más aptos para la conectividad y 95 a los de mayor resistencia (TABLA I).

En este análisis se consideró que las coberturas de tipo bosque denso, bosque fragmentado, bosque abierto, bosque de galería y vegetación secundaria alta son más propicias para la conectividad de los diferentes parches de bosque. Las zonas de herbazales, pastos arbolados, mosaico de cultivos con espacios naturales o plantaciones forestales adquirieron un valor mediano-bajo. En contraste, las zonas caracterizadas por presentar pastos y áreas degradadas adquirieron un valor medio-alto. Las vías, los centros poblados, las zonas minero-industriales y los ríos se extrajeron y se consideraron en un análisis cartográfico diferente.

Después de esta clasificación vectorial, el archivo de tipo *shapefile* se transformó a ráster considerando el campo “Valor” de la tabla de atributos de la capa de coberturas. El tamaño de pixel se tomó igual a 10 m.

**TABLA I. VALOR DE RESISTENCIA ASIGNADOS A CADA UNO DE LOS USOS DEL SUELO**

<b>Ítem</b>	<b>Cobertura</b>	<b>Valor</b>
1	Bosque denso, bosque abierto, bosque fragmentado	1
2	Vegetación secundaria o en transición Bosque de galería, ríos, lagos, lagunas y ciénagas naturales	5
3	Plantación forestal Arbustal Mosaico de cultivos y espacios naturales	10
4	Pastos enmalezados Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales Herbazal denso	25
5	Mosaico de pastos con espacios naturales Otros cultivos transitorios Pastos arbolados Mosaico de cultivos Cuerpos de agua artificiales	35
6	Cereales Mosaico de pastos y cultivos Cultivos permanentes arbóreos Cultivos permanentes herbáceos	50
7	Pastos limpios Zonas arenosas naturales Áreas abiertas sin o con poca vegetación	60
8	Tierras desnudas y degradadas Tejido urbano discontinuo	70
9	Instalaciones recreativas Tejido urbano continuo Aeropuertos	80
10	Zonas quemadas Red vial, ferroviaria y terrenos asociados Zonas de extracción minera y escombreras Zonas industriales o comerciales	95

*Nota: fuente, creación propia.*

## 2). *Distancia a vías, centros poblados y minero-industriales*

La capa de vías se extrajo a partir de la cartografía básica para el departamento de Antioquia, y la información sobre los centros poblados y minero-industriales se obtuvo a partir de la capa de coberturas del POMCA del río Cocorná y directos al Magdalena. Posteriormente, se realizó un análisis de distancia euclidiana para cada capa extraída con la herramienta “Euclidean distance” de ArcGis V. 10.5. Este análisis permite saber cuál es la distancia en metros desde cualquier punto de la extensión de la capa ráster a un sitio puntual de interés, que en este caso son las vías, los centros poblados o las áreas minero-industriales.

A partir de este ejercicio se obtuvieron dos capas ráster con un tamaño de 10 m de pixel: una para la distancia hacia las vías y otra para la distancia hacia centros poblados y minero-industriales. Estos ráster se reclasificaron posteriormente con valores de 0 a 95, donde 0 indica los pixeles que no son relevantes para el análisis, 1 los valores de más baja resistencia del territorio y 95 los valores más significativos para impedir la conectividad (TABLA II y TABLA III).

**TABLA II. CLASIFICACIÓN DE LOS VALORES DE RESISTENCIA A CATEGORÍAS DE DISTANCIA A CENTROS POBLADOS, MINEROS, INDUSTRIALES O COMERCIALES**

Ítem	Distancia (m)	Valor
1	0-30	95
2	30-60	80
3	60-90	70
4	90-120	60
5	120-150	50
6	150-180	35
7	180-210	25
8	210-250	10
9	250-300	5
10	>300	1

*Nota: fuente, creación propia.*

**TABLA III. CLASIFICACIÓN DE VALORES DE RESISTENCIA CORRESPONDIENTES A CADA CATEGORÍA DE DISTANCIA A LAS VÍAS.**

Ítem	Distancia (m)	Valor
1	0-30	95
2	30-60	80
3	60-90	70
4	90-120	60
5	120-150	50
6	150-180	35
7	180-210	25
8	210-250	10
9	250-300	5
10	>300	1

*Nota: fuente, creación propia.*

### **3). Distancia a ríos**

La capa de ríos se obtuvo también a partir de la cartografía básica de Antioquia y de Cornare. Para análisis de distancia a los ríos se tuvo en cuenta tanto drenajes dobles como drenajes sencillos permanentes e intermitentes. La evaluación se hizo con la herramienta “Euclidean distance”, tal y como se realizó para las variables de distancia a vías y a centros poblados y minero-industriales, también con un tamaño de pixel de 10 m.

El ráster de distancias se reclasificó, asignando valores más bajos a los sitios más cercanos a los ríos, y más altos a los sitios alejados (TABLA IV). En todo caso, los valores no superaron el umbral de 50, pues también se considera en este análisis que valores muy altos para sitios alejados a las fuentes de agua pueden generar ruido y ser contraproducentes en un sentido biológico.

**TABLA IV. VALOR DE RESISTENCIA ASIGNADO A LAS CATEGORÍAS DE DISTANCIA A LOS RÍOS.**

Ítem	Distancia (m)	Valor
1	0-100	1
2	100-200	3
3	200-300	5
4	300-400	10
5	400-500	15
6	500-600	20
7	600-700	25
8	700-800	30
9	800-900	40
10	>900	50

*Nota: fuente, creación propia.*

#### **4). Rugosidad y pendiente**

Las variables rugosidad y pendiente se produjeron a partir de un Modelo de Elevación Digital (DEM por sus siglas en ingles) para la zona de estudio, la cual consistía en una resolución de 10 m. La rugosidad del terreno se obtuvo después de calcular los valores máximos, mínimos y promedios de estadística focalizada del ráster DEM. Este cálculo se realizó con la herramienta *Focal statistics* del software ArcGis V. 10.5. Posteriormente, se utilizó la siguiente ecuación en la calculadora de ráster para obtener la matriz cartográfica de rugosidad:

$$Rug = \frac{(Promedio-Minimo)}{(Máximo-Minimo)} \quad (1)$$

Esta ecuación se introdujo en la herramienta *Raster Calculator* de ArcGis. Como consecuencia de esto se obtuvo un ráster que representa la rugosidad del terreno. Sobre este se procedió a realizar la reclasificación, considerando los valores de menor resistencia como menos rugosos, y viceversa (TABLA V).

**TABLA V. VALORES DE RESISTENCIA ASIGNADOS A CADA CATEGORÍA DE RUGOSIDAD.**

Ítem	Pendiente en grados	Valor
1	0-0.6	1
2	0.6-1.2	3
3	1.2-1.8	5
4	1.8-2.4	7
5	2.4-3.0	9
6	3.0-3.6	11
7	3.6-4.2	13
8	4.2-4.8	15
9	4.8-5.4	17
10	>5.4	19

*Nota: fuente, creación propia.*

Por otro lado, el ráster de pendiente se consiguió mediante la herramienta “Slope”, de la sección “3D analyst tools” del software ArcGIS V. 10. 5. En este análisis se consideró que las zonas de mayor pendiente ofrecen mayor resistencia a la conectividad del paisaje. En cambio, las áreas de menor pendiente son más aptas para establecer los corredores (TABLA VI).

**TABLA VI. VALORES DE RESISTENCIA ASIGNADOS A CATEGORÍAS DE PENDIENTES.**

Ítem	Pendiente en grados	Valor
1	0-20	1
2	20-40	5
3	40-50	10
4	50-60	25
5	60-70	35
6	70-80	50
7	80-90	60
8	90-100	70
9	100-120	80
10	>110	95

*Nota: fuente, creación propia.*

### C. Tratamiento cartográfico de los nodos

Los nodos que se desean conectar en este análisis de conectividad consisten en núcleos de bosque que tengan un área mayor a 1 kilómetro cuadrado. Este valor se basa en el *home range* de algunas de las especies más emblemáticas de esta zona, como lo son: el jaguar, el puma y el paujil de pico azul, los cuales suelen presentar densidades poblacionales de 0.5 a 5 individuos por kilómetro cuadrado, por lo que son buenos indicadores del tamaño que deberían tener los bosques para soportar animales grandes [35], [36], [37], [38], [39], [40].

Por otro lado, los núcleos de los nodos se obtuvieron a partir del método de fragmentación morfológica del software Guidos [41]. Este análisis permite hacer una clasificación morfológica de un ráster binario, en donde los valores asignados al número uno (1) representan el primer plano o *foreground*, que es todo lo que reconocemos como hábitats naturales o bosques; mientras que los ceros (0) representan el fondo o *background*, que son aquellos sitios transformados por el ser humano o que no son del interés del análisis de fragmentación; es decir, todo lo que no es un hábitat natural.

Para este análisis de fragmentación se tuvo en cuenta un ráster de bosque (1) y no-bosque (0) de del IDEAM del año 2016 [42], con un tamaño de pixel de 30 m. Además, otro insumo requerido para el análisis es el borde definido por el número de pixeles que contará el algoritmo desde la zona de *background*, contando hasta el número definido dentro de la zona de *foreground*. En este caso, el borde se tomó como un valor de 5 pixeles, que equivalen a 150 m aproximadamente desde la zona de no-bosque hacia el interior de las zonas de bosque. Este valor se obtuvo a partir de la tasa de deforestación en esta área, la cual es de 23 ha/año.

La capa resultante consistió en un ráster que muestra seis categorías de acuerdo con el método planteado Soille y Vogt [41], [43]:

- Núcleo: Son los pixeles de primer plano correspondientes a los bosques. Se definen como núcleo puesto que su distancia a los pixeles de fondo (no bosque) son mayores al umbral

indicado durante el análisis. Además, están rodeados de píxeles de primer plano (bosques) reconocidos como *bordes o perforaciones*.

- **Perforación:** Las perforaciones representan los fragmentos al interior de las áreas boscosas. Estas perforaciones son el borde que existe entre el núcleo y el área de no bosque. Por lo tanto, siempre estarán rodeadas por píxeles de núcleo.
- **Borde:** Los bordes representan el límite del primer plano (bosque) con el fondo (matriz de no bosque). Se diferencian de las perforaciones porque están por fuera de las áreas de núcleo.
- **Lazo:** Son las conexiones entre dos o más áreas de núcleo que atraviesan una perforación. Son grupos de píxeles de primer plano (bosque) cuyo tamaño es muy pequeño como para contener un núcleo en su interior, y que además representan conexiones entre los bosques sobre la matriz de paisaje.
- **Puente:** Son las conexiones entre dos o más áreas de núcleo que atraviesan la matriz de fondo del paisaje (la zona no boscosa). A su vez, son fragmentos boscosos muy pequeños como para contener un área núcleo, pero su agregación permite una conexión entre distintos parches de núcleos.
- **Rama:** Son los píxeles de primer plano (bosques) que parten desde las áreas de núcleo, como si fueran puentes o lazos, pero que no se conectan con otro núcleo; sino que terminan en la matriz de fondo.
- **Isla:** Son aquellos píxeles de primer plano (bosques) que no rodean ni tocan alguna zona de núcleo. Las islas son parches de bosque demasiado pequeños como para contener un área núcleo.
- **Fondo:** Son aquellos píxeles que representan el fondo; es decir, las áreas de no bosque.

Este ráster se transformó a polígono en el software de GIS y de él se extrajeron únicamente las áreas de núcleo mayores a  $1 \text{ km}^2$ , que, como se dijo antes, representan los nodos de interés en este análisis de conectividad. Finalmente, sobre ellas se calcularon los centroides, los cuales son puntos que sirven para representar los nodos que se utilizarán más adelante en el análisis de corredores biológicos.

### ***1). Obtención del ráster de resistencia***

Para obtener el ráster de resistencia se realizó un álgebra de mapas con cada una de las variables definidas anteriormente. Sin embargo, a cada variable se le asignó un peso de acuerdo con la idoneidad que estas presentan para la conectividad de los bloques de bosque. Para tal fin, un grupo de trabajo de Cornare conformado por 6 personas ponderó las variables de acuerdo con el método denominado “proceso jerárquico analítico” [44].

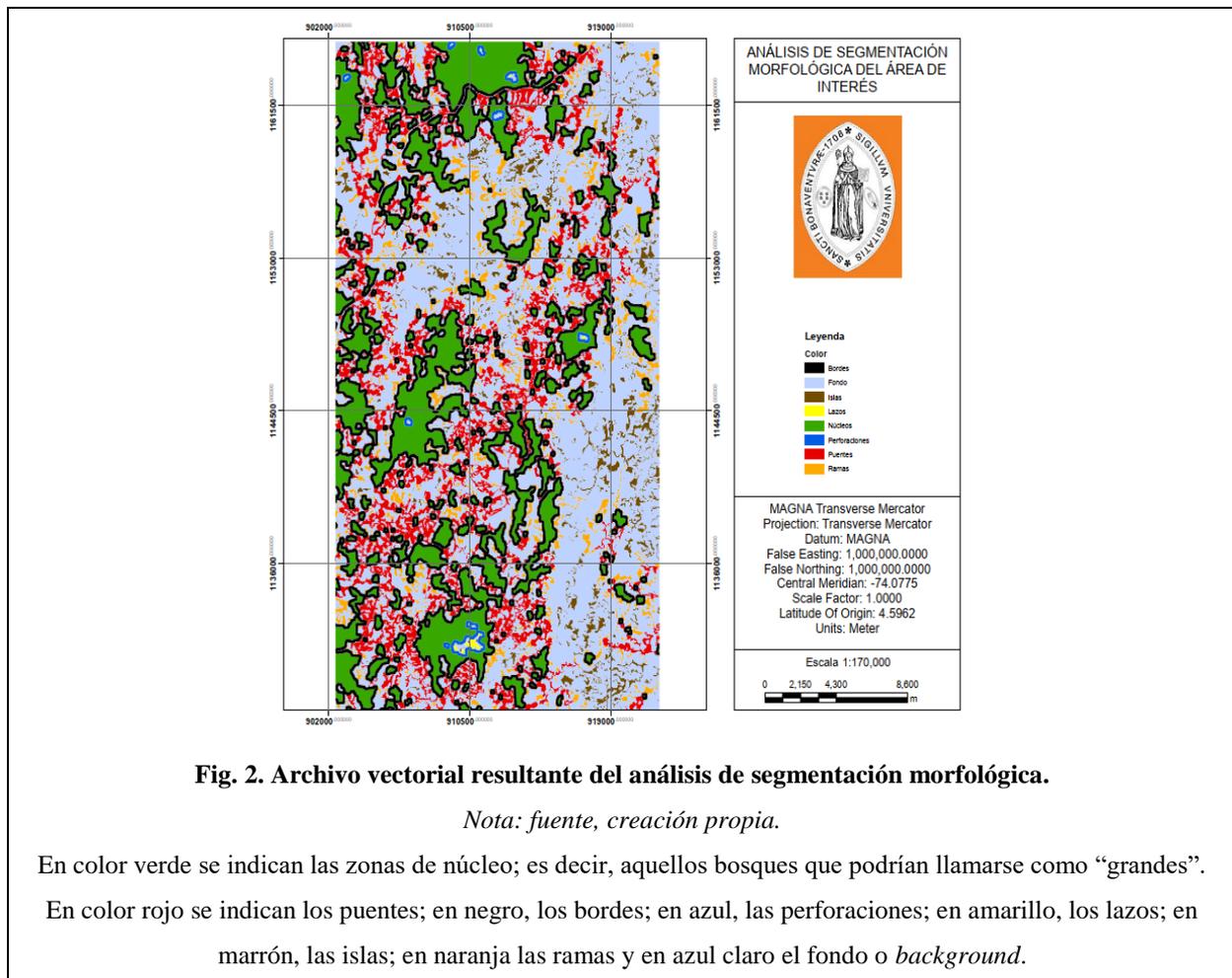
### ***D. Algoritmo seleccionado para el análisis de conectividad***

El algoritmo seleccionado para el análisis de conectividad fue el propuesto por McRae y Kavanagh [32], el cual contiene la caja de herramientas *Linkage Mapper Toolkit*, que puede incorporarse a las versiones 9 y 10 de ArcGIS. La función utilizada de esta caja de herramientas fue la de “Build Network and Map Linkages”. Esta recibe dos parámetros: un archivo de tipo vectorial que representa los nodos, y un ráster que representa la matriz de resistencia a la conectividad en el paisaje. Los nodos seleccionados correspondieron a centroides de áreas núcleo de bosques mayores a 1 kilómetros cuadrado. El mapa de resistencia se obtuvo a partir de la metodología explicada en el ítem anterior. Posteriormente, el algoritmo identifica cuáles son las distancias de menor costo, pixel a pixel, entre un nodo y otro. Este costo puede estar basado en distancia euclidiana, en resistencia o en ambos. Para este análisis se consideraron estos dos parámetros simultáneamente. Al final, el software arroja varios archivos, uno de ellos es un ráster con valores mínimos, intermedios y máximos; en este, los valores mínimos representan menor resistencia; es decir, que estos pixeles son más aptos para la conectividad. En contraste, los valores máximos identifican aquellos sitios que son menos idóneos para establecer corredores.

## VI. RESULTADOS

### A. Obtención de los nodos

El análisis de segmentación morfológica arrojó un mapa en donde se identificaron 8 categorías morfológicas del paisaje [43], donde se encuentran los bosques de interés de conectividad (Fig. 2). Las categorías encontradas en este análisis son: núcleos, bordes, perforaciones, lazos, puentes, islas, ramas y fondo. Con este resultado se extrajeron únicamente las áreas que comprendían los núcleos (que corresponden a las áreas boscosas), de modo que sobre ellas se hallaron los 22 centroides que sirvieron posteriormente para construir el análisis de conectividad (Fig. 3). De estos, seis (6) se encuentran al interior del área protegida propuesta por CORNARE que comprende el cañón del Río Claro y el corredor kárstico asociado a este.

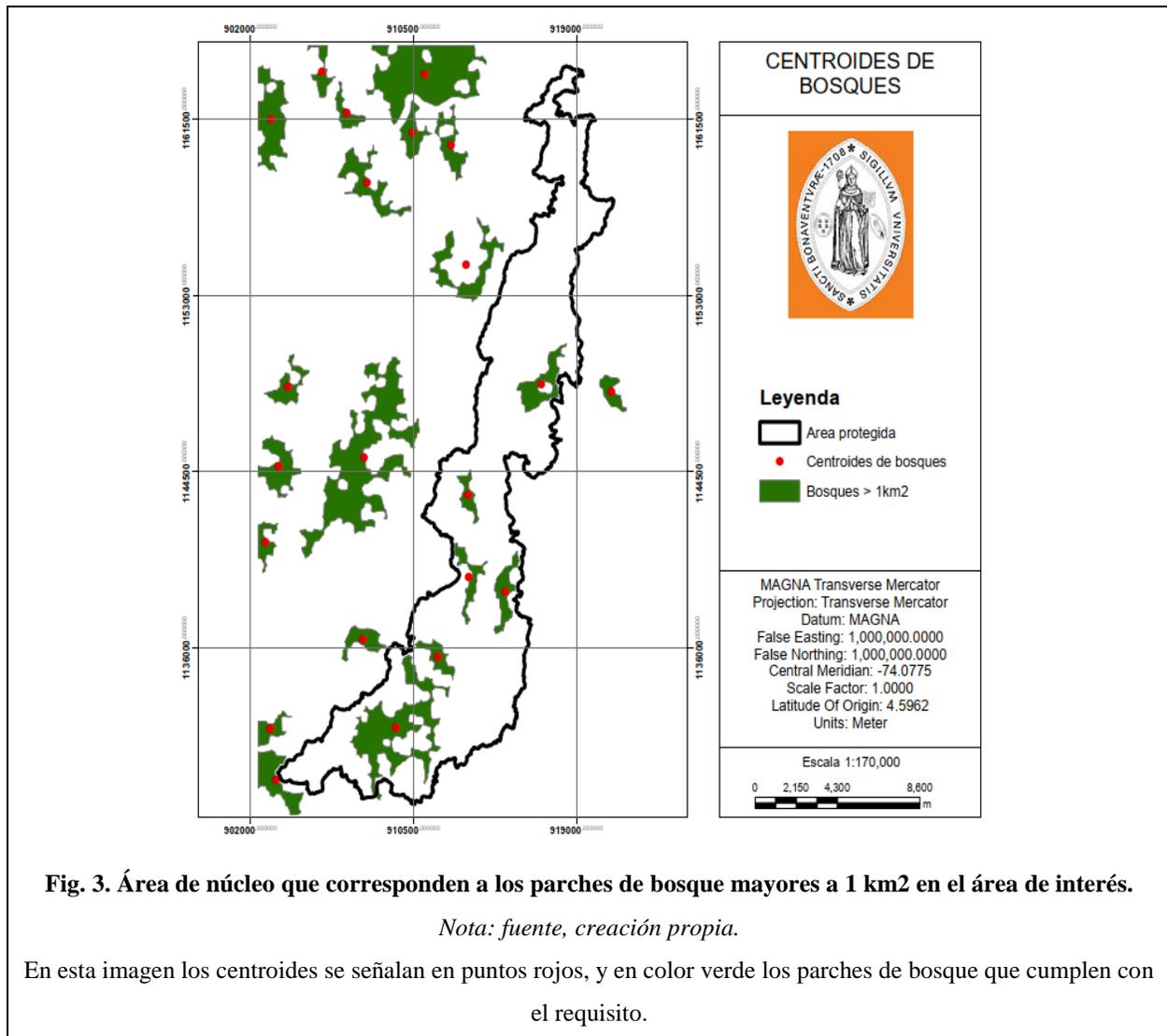


**Fig. 2. Archivo vectorial resultante del análisis de segmentación morfológica.**

*Nota: fuente, creación propia.*

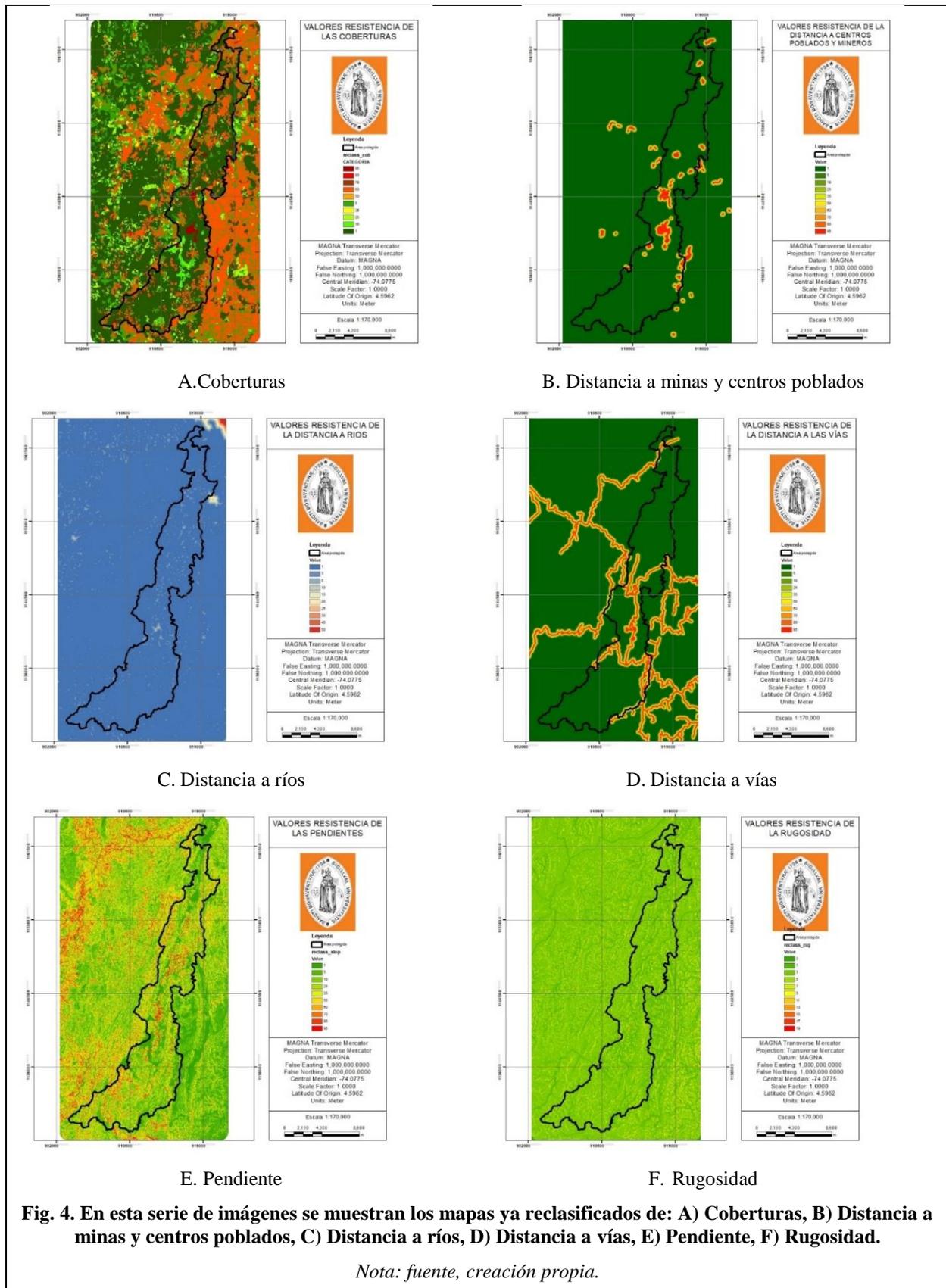
En color verde se indican las zonas de núcleo; es decir, aquellos bosques que podrían llamarse como “grandes”.

En color rojo se indican los puentes; en negro, los bordes; en azul, las perforaciones; en amarillo, los lazos; en marrón, las islas; en naranja las ramas y en azul claro el fondo o *background*.



### ***B. Variables y análisis de resistencia***

Las variables empleadas para obtener el ráster de resistencia fueron: usos del suelo, distancia a minas y centros poblados, distancia a ríos, distancia a vías, pendiente y rugosidad (Fig. 4). Cada una de estas variables fue validada por un equipo de trabajo conformado por seis (6) personas. Además, quienes conformaron este grupo de trabajo le asignaron un peso a cada variable; estos se promediaron y el resultado de este ejercicio de ponderación se expresa en la TABLA VII.



**TABLA VII. PESO DE CADA VARIABLE UTILIZADA PARA GENERAR EL RÁSTER DE RESISTENCIA DE ACUERDO CON EL MÉTODO SAATY.**

Variable	Abreviatura	Juliet	Eduardo	Santiago	Luz	Stiven	Daniel	Promedio
<b>Coberturas</b>	COB	0.32	0.32	0.24	0.38	0.43	0.35	<b>0.34</b>
<b>Distancia a minas</b>	MIN	0.04	0.30	0.24	0.2	0.19	0.29	<b>0.21</b>
<b>Distancia a ríos</b>	RIO	0.38	0.07	0.18	0.22	0.17	0.15	<b>0.20</b>
<b>Distancia a vías</b>	VIA	0.06	0.23	0.24	0.11	0.14	0.09	<b>0.15</b>
<b>Pendiente</b>	SLO	0.16	0.05	0.08	0.05	0.04	0.08	<b>0.08</b>
<b>Rugosidad</b>	RUG	0.04	0.03	0.02	0.04	0.03	0.04	<b>0.03</b>

*Nota: fuente, creación propia.*

Con estos resultados cartográficos y numéricos se procedió a calcular el ráster de resistencia mediante un álgebra de mapas, cuya expresión matemática se ve representado en la ecuación 2.

$$RR = ((V_1P_1) + (V_2P_2) + (V_3P_3) + (V_4P_4) + (V_5P_5) + (V_6P_6)) * N \quad (2)$$

Donde:

**RR:** Ráster de Resistencia.

**V<sub>n</sub>:** Variable n.

**P<sub>n</sub>:** Peso asignado a la variable n.

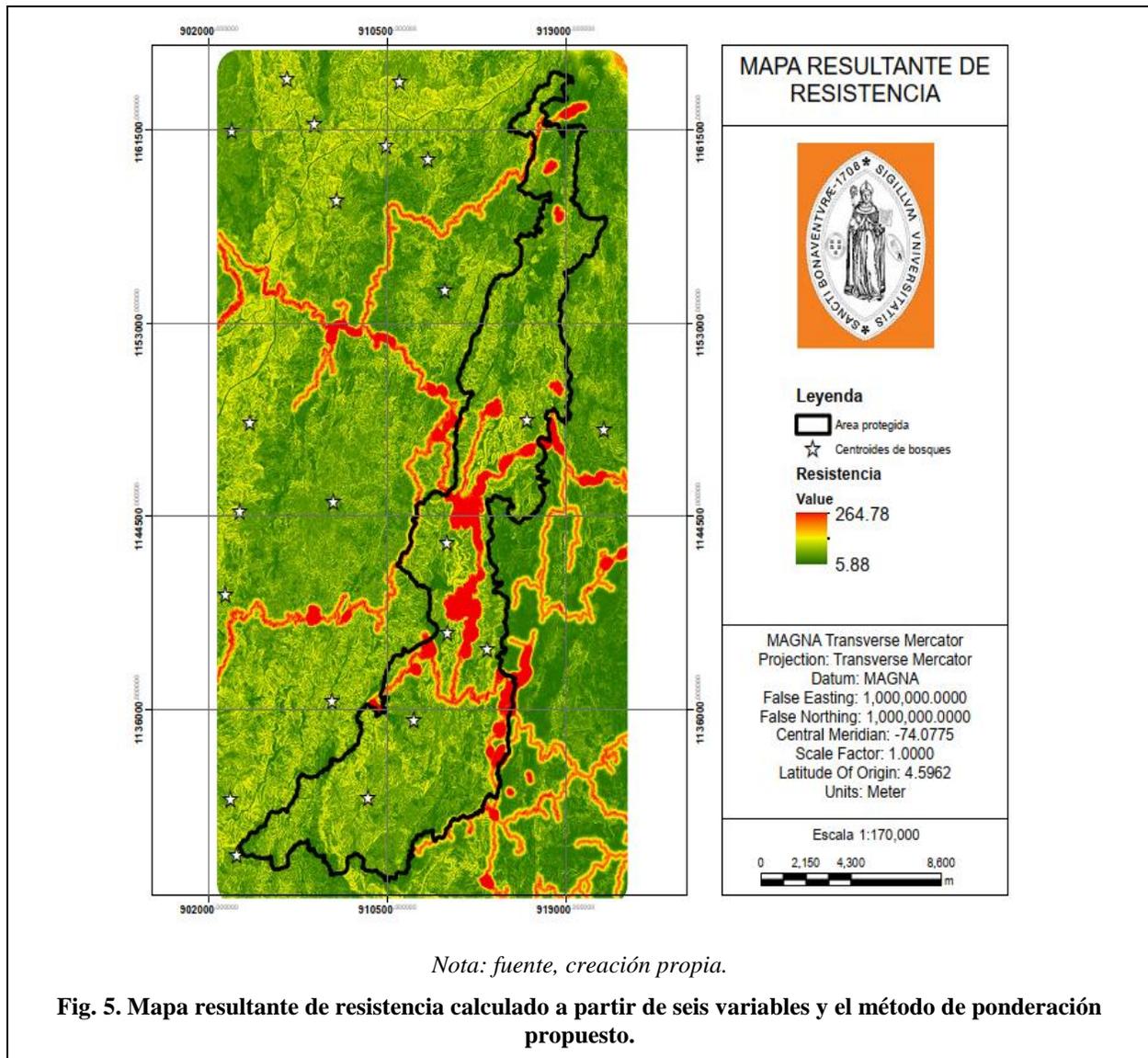
**N:** Número de variables.

Introduciendo los valores de la

TABLA **VII** en la ecuación 2, el cálculo del ráster de resistencia resultante fue el siguiente:

$$RR = ((COB * 0.34) + (MIN * 0.21) + (RIO * 0.20) + (VIA * 0.15) + (SLO * 0.08) + (Top * 0.03)) * 6$$

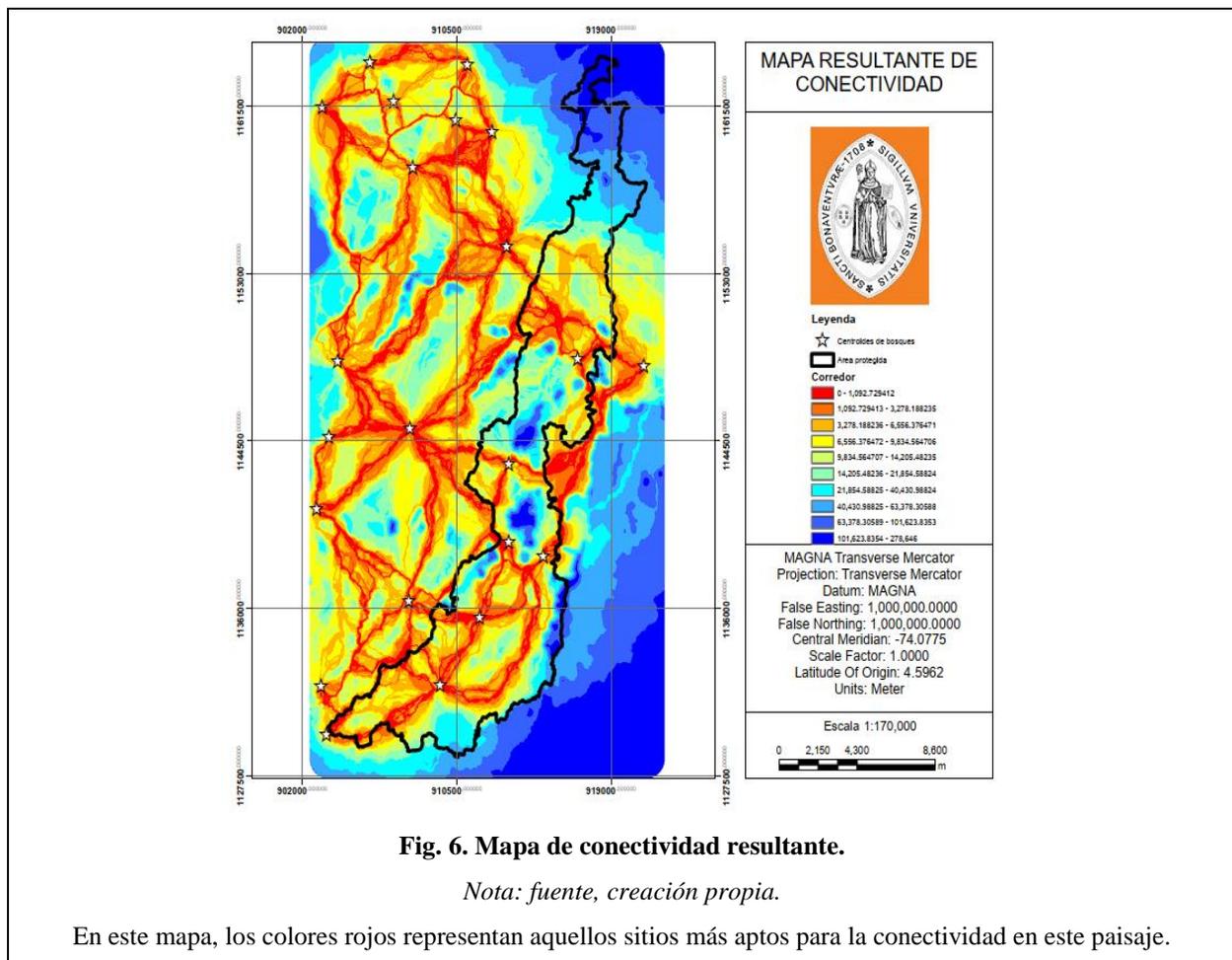
Esta variable **RR** representa al ráster de resistencia que se muestra en la Fig. 5.



En este mapa de resistencia, los valores de menor resistencia (en verde) correspondieron a las zonas más boscosas, en regeneración o restauración, cercanas a ríos o menos intervenidas. En contraste, las zonas de mayor resistencia (color rojo) correspondieron a aquellos sitios cercanos a vías, centros poblados, zonas industriales y de explotación minera y a potreros. Finalmente, los valores altos en rugosidad y pendiente tuvieron efectos intermedios sobre el mapa de resistencia (colores amarillos a verdes).

### C. Análisis de conectividad

Como se mencionó previamente, el algoritmo empleado por la función “Build Network and Map Linkages” de la caja de herramientas *Linkage Mapper Toolkit* para ArcGis V. 10.5. sirvió para tomar el ráster de resistencia resultante de la ecuación 2 y realizar el análisis de conectividad con los nodos mostrados en la Fig. 3. El resultado de este ejercicio se muestra en la Fig. 6.



En la **Fig. 6** se ve representado un gradiente de colores. En él, las zonas rojas representan aquellos corredores del paisaje idóneos para la conectividad de los grupos de bosque. En cambio, las áreas señaladas en color azul oscuro impiden la conectividad porque sus características paisajísticas hacen que ofrezcan una mayor resistencia ante este proceso ecológico. Las áreas remarcadas en color azul claro o amarillo son zonas que podrían favorecer o afectar la conectividad a futuro, dependiendo de lo que pueda suceder con el paisaje y los usos del suelo asociados a este.

## VII. DISCUSIÓN

Mediante este análisis de conectividad se pudo evidenciar que tanto la rugosidad como la pendiente del terreno tienen una importante influencia sobre el análisis, independiente del valor de ponderación que alguna de estas variables pudiera contener. Esto se pudo evidenciar en el ráster de resistencia, donde hay una gran cantidad de píxeles de color verde en sitios donde hay potreros o áreas degradadas por las actividades agrícolas; pero pese al impedimento de las actividades económicas a la conectividad [8], el valor que obtienen estas áreas resultan positivos debido a que tienden a ser zonas más planas y menos rugosas. En contraste, las áreas más boscosas de este territorio están ubicadas en lugares escarpados o de elevada pendiente, en donde el acceso a la tierra es complejo debido a estas mismas condiciones de terreno. Esto es un patrón común observado en zonas conservadas cuando se comparan con las áreas más intervenidas en un paisaje. Usualmente, las zonas de mayor difícil acceso para los humanos, por sus características físicas o climáticas, tienden a conservar más los ecosistemas naturales en el tiempo que las zonas planas [8], [45].

Durante el análisis también se notó como algunos sitios asociados a grandes ríos tienden a favorecer la conectividad. Por ejemplo, pese a que el área que comprende el cañón del Río Samaná, en el norte de paisaje de interés, tiende a tener pendientes altas y un terreno rugoso; la conectividad se ve favorecida por la presencia de cuerpos de agua asociados a la vegetación. Este es un patrón que también se ha corroborado en otros estudios de conectividad [20], [21], en donde los sistemas lóticos tienden a favorecer la dispersión de plantas y, como consecuencia, la conexión entre distintos parches de bosque. Así, en este estudio se comprobó que aquellas características del terreno (como rugosidad y pendiente) que estuvieran asociadas a ríos tuvieron un valor de píxel más favorable para la conectividad. Asimismo, la distancia a los cuerpos de agua es un factor clave para la ocurrencia de una gran cantidad de especies [20], [21], [25], [26]; razón por la cual es de esperarse que tanto factores bióticos como abióticos (poca rugosidad en este caso) favorezcan la conexión entre distintos parches de bosque en una matriz de paisaje.

Como era de esperarse, dentro del análisis el peso asignado a la distancia a centros mineros, poblados, industriales, comerciales y vías influyó de manera positiva sobre la resistencia que presenta el paisaje ante la posibilidad de conectar diferentes parches de bosque.

Una buena forma de comprobar si este análisis de conectividad es idóneo para las especies que habitan la zona es comenzar a incorporar especies de interés. Por ejemplo, la corporación CORNARE tiene un listado de especies que pueden verse beneficiada del establecimiento de corredores. De este modo, hacer un análisis de conectividad funcional en el futuro y compararlo con el análisis presentado en este estudio podría modificar los sitios por los cuales los parches de bosque podrían conectarse.

Por otro lado, otro factor que bien pudo haber afectado el análisis de conectividad es la rugosidad y la pendiente del terreno. Esto se debe a que el área de interés presenta una gran diversidad en cuanto a geomorfología por estar ubicada sobre un corredor kárstico, en donde se evidencian diferentes geoformas como: conos, dolinas, manantiales, cavernas, sumideros, entre otros [46]. Es probable que, debido a estas características del terreno, las especies de este territorio respondan diferente ante la rugosidad o la pendiente, por lo que eso podría alterar los resultados de este análisis en caso de que, por ejemplo, la rugosidad sea aprovechada por plantas reófitas que ocurren en las áreas más encañonadas, como ocurre con la especie de palma *Aiphanes argos* o *Miconia rheophytica* [47], [48], o se compruebe que tanto pendiente como rugosidad podrían afectar de forma diferente a las especies de este territorio debido a las particularidades geológicas que este presenta.

## VIII. RECOMENDACIONES

Este es un análisis de conectividad exploratorio que debe ser mejorado con información que tenga aporte más conocimiento desde un punto de vista biológico. Para tal fin, se recomienda hacer corredores biológicos en esta zona basándose en los registros biológicos que se tienen para las especies sombrilla como: el paujil de pico azul (*Crax alberti*), el jaguar (*Panthera onca*) y el puma (*Puma concolor*). Asimismo, se espera que estas herramientas cartográficas sirvan, no solo para mejorar los métodos de planificación del territorio basados en conservación, sino también para priorizar proyectos de restauración en aquellas zonas que puedan aportar más a la unión entre los distintos parches de bosque. Estos ejercicios biológicos cobran un gran sentido cuando son aplicados por los entes administrativos y gubernamentales, y posteriormente son divulgados a la comunidad científica, política y campesina que está involucrada en el territorio.

**REFERENCIAS**

- [1] Corporación Autónoma Regional de las Cuencas de los Ríos Negro y Nare "Cornare", «Plan de Gestión Ambiental Regional 2014 - 2032,» 11 Junio 2014. [En línea]. Available: <https://bit.ly/2kaD3ye>.
- [2] A. M. Alonso, B. Finegan, C. Brenes, S. Günter y X. Palomeque, «Evaluación de la Conectividad Estructural y Funcional en el Corredor de Conservación Podocarpus-Yacuambi, Ecuador,» *Caldasia*, vol. 1, n° 39, pp. 140-156, 2017.
- [3] P. D. Taylor, L. Fahrig, K. Henein y G. Merriam, «Connectivity is a Vital Element of Landscape Structure,» *Oikos*, vol. 19, n° 17, pp. 571-573, 1993.
- [4] P. Beier y R. F. Noss, «Do Habitat Corridors Provide Connectivity?,» *Conservation Biology*, vol. 12, n° 6, pp. 1241-1252, 1998.
- [5] D. Rudnick, S. J. Ryan, P. Beier, S. A. Cushman, F. Dieffenbach, C. Epps y A. M. Merenlender, «The Role of Landscape Connectivity in Planning and Implementing Conservation and Restoration Priorities,» *Issues in Ecology*, n° 16, pp. 1-20, 2012.
- [6] F. Adriansen, J. P. Chardon, G. Blust, E. Swinnen, S. Villalba, H. Gulnick y E. Matthysen, «The Application of Least Cost Modelling as a Functional Landscape Model,» *Landscape and Urban Planning*, vol. 4, n° 64, pp. 233-247, 2003.
- [7] A. F. Bennett, *Linkages in the Landscape: The Role of Corridors and Connectivity in Wildlife Conservation*, Segunda ed., vol. I, Gland: Cambridge, 2003.
- [8] R. B. Primack, *A Primer of Conservation Biology*, Sunderland, Massachusetts: Sinauer Associates, 2012.
- [9] S. A. Cushman, B. McRae, F. Adriaensen, P. Beier, M. Shirley y K. Zeller, «Biological Corridors and Connectivity,» de *Key Topics in Conservation Biology* ", New York, Wiley-Blackwell, 2013, pp. 384-404.
- [10] C. A. Correa-Ayram, M. E. Medonza, A. Etter y R. P. Salicrup-D, «Habitat Connectivity in Biodiversity Conservation: A Review of Recent Studies and Applications,» *Progress in Physical Geography*, vol. I, n° 40, pp. 7-37, 2016.

- [11] R. J. Lambeck, «Focal Species: A Multi-Species Umbrella for Nature Conservation,» *Conservation Biology*, vol. IV, n° 11, pp. 849-856, 1997.
- [12] P. Beier, D. R. Majka y W. D. Spencer, «Forks in the Road: Choices in Proceeding for Designing Wildland Linkages,» *Conservation Biology*, vol. 22, n° 4, pp. 836-851, 2008.
- [13] A. Moilanen y I. Hanski, «On the Use of Connectivity Measures in Spatial Ecology,» *Oikos*, vol. I, n° 95, pp. 147-151, 2001.
- [14] J. M. Calabrese y W. F. Fagan, «A Comparison-Shopper's Guide to Connectivity Metrics,» *Frontiers in Ecology and the Environment*, vol. X, n° 2, pp. 529-536, 2004.
- [15] A. P. Clavenger, J. Wierzchowski, B. Chruszcz y K. Gunson, «GIS-Generated, Expert-Based Models for Identifying Wildlife Habitat Linkages and Planning Mitigation Passages,» *Conservation Biology*, vol. 16, pp. 503-514, 2002.
- [16] S. F. Spear, N. Balkenhol, M. J. Fortin, B. H. McRae y K. I. Scribner, «Use of Resistance Surfaces for Landscape Genetic Studies: Considerations for Parameterization and Analysis,» *Molecular Ecology*, vol. IV, n° 30, pp. 3576-3591, 2010.
- [17] K. A. Zeller, K. McGarigal y A. R. Whiteley, «Estimating Landscape Resistance to Movement: A Review,» *Landscape Ecology*, vol. 27, n° 6, pp. 777-797, 2012.
- [18] N. Baskaran y D. Boominathan, «Road Kill of Animals by Highway Traffic in the Tropical Forests of Mudumalai Tiger Reserve, Southern India,» *Journal of Threatened Taxa*, vol. 2, n° 3, pp. 753-759, 2010.
- [19] R. Van der Ree, D. J. Smith y C. Grilo, *Handbook of Road Ecology*, Chichester, West Sussex: John Wiley & Sons, 2015.
- [20] J. A. Wiens, «Riverine Landscapes: Taking Landscape Ecology Into the Water,» *Freshwater Biology*, vol. 47, n° 4, pp. 501-515, 2002.
- [21] A. K. Fremier, M. Kiparsky, S. Gmir, J. Aycrigg, R. K. Craig, L. K. Svancara y J. M. Scott, «A Riparian Conservation Network for Ecological Resilience,» *Biological Conservation*, n° 191, pp. 29-37, 2015.
- [22] A. J. Hansen y F. Dicastri, *Landscape Boundaries: Consequences for Biotic Diversity and Ecological Flows*, vol. 92, New York: Springer Science & Business Media, 2012.

- [23] J. Zukal y Z. Reháč, «Flight Activity and Habitat Preference of Bats in a Karstic Area, as Revealed by Bat Detectors,» *Folia Zoologica*, vol. 55, n° 3, p. 273, 2006.
- [24] L. Cullen-Junior, D. A. Sana, F. Lima, C. D. Abreu-K y A. Uezu, «Selection of Habitat by the Jaguar, *Panthera onca* (Carnivora: Felidae), in the Upper Panama River, Brazil,» *Zoologia (Curitiba)*, vol. IV, n° 30, pp. 379-387, 2013.
- [25] C. Amoros y A. L. Roux, «Interaction Between Water Bodies Within the Floodplains of Large Rivers: Function and Development of Connectivity,» *Müntersche Geographische Arbeiten*, vol. I, n° 29, pp. 125-130, 1988.
- [26] J. V. Ward, F. Malard y K. Tockner, «Landscape Ecology Integrates Pattern and Process in River Corridors,» *Issues in Landscape Ecology*, vol. 97, p. 102, 1999.
- [27] S. Hoehstetter, U. Walz, L. H. Dang y N. X. Thinh, «Effects of Topography and Surface Roughness in Analyses of Landscape Structure - A Proposal to Modify the Existing Set of Landscape Metrics,» *Landscape Online*, vol. 3, pp. 1-14, 2008.
- [28] M. R. Burnett, P. V. August, J. H. Brown y K. T. Killingbeck, «The Influence of Geomorphological Heterogeneity on Biodiversity,» *Conservation Biology*, vol. II, n° 12, pp. 363-370, 1998.
- [29] M. T. Sebastiá, «Role of Topography and Soils in Grassland Structuring at the Landscape and Community Scales,» *Basic Applied Ecology*, vol. IV, n° 5, pp. 331-346, 2004.
- [30] D. Majka, P. Beier, J. Jenners, B. Brost y E. Garding, «GIS Tools and Information for Designing Wildlife Corridors,» 2006. [En línea]. Available: <http://corridordesign.org>. [Último acceso: Julio 2019].
- [31] B. H. McRae, V. B. Shah y T. K. Mohapatra, *Circuitscape 4: User Guide*, Washington D. C.: The Nature Conservancy, 2013.
- [32] B. H. McRae y D. M. Kavanagh, *Linkage Mapper Connectivity Analysis Software*, Seattle: The Nature Conservancy, 2011.
- [33] Colombia, Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible, «Formulación del Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca Hidrográfica del Río Cocorná y Directos al Magdalena Medio entre los Ríos La Miel y Nare,» Bogotá, D. C., 2018.

- [34] M. Bossard, J. Feranec y J. Otahel, «Corine Land Cover Technical Guide,» Addendum, Copenhagen, 2000.
- [35] B. J. Harmsen, R. J. Foster, S. C. Silver, L. E. Ostro y C. P. Doncaster, «Jaguar and Puma Activity Patterns in Relation to their Main Prey,» *Mammalian Biology*, vol. 76, pp. 320-324, 2011.
- [36] L. Silveira, A. T. Jacomo y J. A. Diniz-Filho, «Camera Trap, Line Transect Census and Track Surveys: A Comparative Evaluation,» *Biological Conservation*, vol. III, n° 114, pp. 351-355, 2003.
- [37] M. J. Kelly, A. J. Noss, M. S. Di Bitetti, L. Maffei, R. L. Arispe, A. Paviolo y Y. E. Di Blanco, «Estimating Puma Densities from Camera Trapping Across Three Study Sites: Bolivia, Argentina and Belize,» *Journal of Mammalogy*, vol. 89, pp. 408-418, 2008.
- [38] J. V. Melo, H. López-Arévalo y P. Velásquez-Sandino, «Pérdida de Área Potencial de Distribución y Cacería de Subsistencia del Paujil Colombiano, *Crax alberti*, Ave Endémica Críticamente Amenazada del Norte de Colombia,» *Caldasia*, vol. I, n° 33, pp. 161-177, 2008.
- [39] A. Quevedo, L. E. Urueña, E. M. Machado, H. D. Arias, E. M. Medina, Z. Castañeda, M. C. Moreno, E. L. Rodríguez, D. M. Cabarcas, P. Laza, I. Melo, H. D. Alvarado, J. M. Ochoa, P. Salaman, T. Donegan, J. Avendaño y J. D. González, «Proyecto Salvando al Paujil Piquiazul,» *Conservación Colombiana*, vol. I, n° 4, pp. 7-15, 2008.
- [40] N. Negrões, P. Sarmiento, J. Cruz, C. Eira, E. Revilla, C. Fonseca y L. Silveira, «Use of Camera Trapping to Estimate Puma Density and Influencing Factors in Central Brazil,» *The Journal of Wildlife Management*, vol. VI, n° 74, pp. 1195-1203, 2010.
- [41] P. Vogt y K. Riitters, «GuidosToolbox: Universal Digital Image Object Analysis,» *European Journal of Remote Sensing*, vol. 50, n° 1, pp. 352-361, 2017.
- [42] Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, «Geoportal Ideam,» IDEAM, 2017. [En línea]. Available: <http://www.ideam.gov.co/geoportal>. [Último acceso: Junio 2019].
- [43] P. Soille y P. Vogt, «Morphological Segmentation of Binary Patterns,» *Pattern Recognition Letters*, vol. IV, n° 30, pp. 456-459, 2009.

- [44] T. L. Saaty, «What is the Analytic Hierarchy Process?,» *Mathematical Models for Decision Support*, n° 1, pp. 109-121, Berlin 1988.
- [45] W. H. McNeil, «Human Migration in Historical Perspective: Population and Development,» *Population and Development Review*, pp. 1-18, 1984.
- [46] V. N. Uasapud-Enríquez, Aplicación de los Índices de Conservación Para Conocer el Estado y las Prioridades de Conservación en Algunos Elementos del Karst del Oriente Antioqueño (Doctoral Dissertation), Medellín: Universidad Nacional, 2018.
- [47] R. Bernal, S. E. Hoyos-Gómez y F. Borchsenius, «A New, Critically Endangered Species of Aiphanes (Arecaceae) From Colombia,» *Phytotaxa*, vol. I, n° 298, pp. 65-70, 2017.
- [48] J. M. Posada-Herrera y F. Almeda, «Miconia rheophytica (Melastomataceae: Miconieae), A New and Endangered Species from the Magdalena Medio Region of Colombia,» *Phytotaxa*, vol. I, n° 371, pp. 55-61, 2018.

## **ANEXOS**

A este trabajo se anexa una base de datos cartográfica (modelo GDB por sus siglas en inglés) en donde se incluyen los archivos generados durante el análisis. Estos archivos van anexos por medio electrónico.