

DOI: 10.25100/eg.v0i24.12239
Espacios y Territorios

Diseño metodológico de análisis espacial para la conservación del agua en la cuenca alta del río Cauca

Methodological design of spatial analysis for water conservation in the high basin of the Cauca River

Desenho metodológico de análise espacial para a conservação da água na bacia alta do rio Cauca

Margoth Rocío Mera Garzón

Programa de Estudios de Posgrados en Geografía (EPG). Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Bogotá, Colombia. margomera@gmail.com | 0000-0002-9501-3925

Para citar este artículo: Mera, M. (2022). Diseño Metodológico de Análisis Espacial para la Conservación del Agua en la Cuenca Alta del Río Cauca. *Entorno Geográfico*, (24), e21112239. <https://doi.org/10.25100/eg.v0i24.12239>

Resumen

El presente diseño metodológico de análisis espacial se realizó a partir de la herramienta de los Sistemas de Información Geográfica (SIG), que busca resolver el problema de integrar o combinar componentes de variables bióticos, físicos y socioculturales que demuestren una correlación hacia la conservación del agua en una estructura ecológica. Este trabajo se desarrolló en el nacimiento del río Cauca que se localiza al sur occidente de Colombia, en el departamento del Cauca, en los municipios de Puracé, Sotaré y Popayán. La cuenca está conformada por tres tipos de biomas de bosque húmedo (subandino, alto andino y páramo), además de ser poblada por comunidades ancestrales, comunidades campesinas y rurales y territorios urbanizados. Los resultados de este análisis espacial se presenta en un formato raster o grillas de un mismo tamaño de la cuenca alta, donde se evidencia que por la combinación de 16 variables y 3 componentes se obtiene 21 combinaciones para la conservación de agua, que son esenciales para producción, almacenamiento y regulación del agua en la cuenca alta del río Cauca, teniendo presente la importancia de incluir temas socioculturales donde las prácticas agrícolas y culturales propician en la transformación del espacio geográfico.



Palabras clave: agua, análisis espacial, integración, estructura ecológica, ecosistema, sociocultural y cuenca alta

Abstrac

The present spatial analysis was carried out using the Geographic Information Systems (GIS) tool, which seeks to solve the problem of integrating or combining components of biotic, physical and sociocultural variables that demonstrate a correlation towards water conservation in a structure. ecological. This work was developed at the source of the Cauca river, which is located in the southwestern part of Colombia, in the department of Cauca, in the municipalities of Puracé, Sotará, and Popayán. The basin is made up of three types of humid forest biomes (sub-Andean, high Andean and páramo), in addition to being populated by ancestral communities, peasant and rural communities and urbanized territories. The results of this spatial analysis are presented in a raster format or grids of the same size of the upper basin, where it is evident that by combining 16 variables and 3 components, 21 combinations are obtained for water conservation, which are essential. for production, storage and regulation of water in the upper basin of the Cauca river, bearing in mind the importance of including socio-cultural issues where agricultural and cultural practices are present in the transformation of the geographic space.

Keywords: water, spatial analysis, combination, ecological structure, ecosystem, sociocultural, and high basin

Resumo

O presente desenho metodológico de análise espacial foi realizado com base na ferramenta dos Sistemas de Informação Geográfica (SIG), com o objetivo de resolver o problema da integração ou combinação de componentes de variáveis bióticas, físicas e socioculturais que demonstrem correlação com a conservação da água em uma estrutura ecológica. Este trabalho foi desenvolvido no nascente do rio Cauca, localizado no sudoeste da Colômbia, no departamento do Cauca, nos municípios de Puracé, Sotará e Popayán. A bacia é composta por três tipos de biomas de floresta úmida (subandino, altoandino e páramo), além de ser habitada por comunidades ancestrais, comunidades camponesas e rurais, e territórios urbanizados.

Os resultados desta análise espacial são apresentados em formato raster ou grades de tamanho uniforme para toda a bacia alta, evidenciando que, pela combinação de 16 variáveis e 3 componentes, obtêm-se 21 combinações para a conservação da água. Estas são essenciais para a produção, o armazenamento e a regulação da água na bacia alta do rio Cauca, considerando a importância de incluir aspectos socioculturais, nos quais as práticas agrícolas e culturais influenciam a transformação do espaço geográfico.

Palavras-chave: água, análise espacial, integração, estrutura ecológica, ecossistema, sociocultural e bacia alta

Recibido: 20 de enero de 2022

Aceptado: 27 de mayo de 2022

Publicado: 1 de julio de 2022

1. Introducción

La identificación de estructuras ecológicas se realiza con el propósito de identificar áreas funcionales y ecológicas que cumplan con el ejercicio de conservar y proteger ecosistemas y áreas ambientales; estos análisis son aplicados en su mayoría, a partir de modelos matemáticos, estadísticos, cartográficos y espaciales. Esta identificación de estructuras ecológicas inicia en la historia de la geografía física, a partir de varios conceptos, el primero de ellos fue el concepto de paisaje aparece en los análisis geográficos por las corrientes naturales y ecológicas, que practicaban sus análisis con el método descriptivo y de forma general hasta la mitad del siglo XVIII y se ven referenciadas en las obras de los geógrafos: Hommeyer en el año 1805, Humboldt en el año 1845, Ritter en el año 1852, Ratzel en el año 1882 y von Richthofen en el año 1883. A partir de este pensamiento descriptivo nace una nueva noción de la ecología como: paisaje integrado, sistema ecológico, geo sistema, geo – biocenosis, ecología del paisaje, eco geografía, ecología y sociedad, hasta la mitad del siglo XIX con los geógrafos: Hettner en el año 1927, Carl Troll en el año 1938 y C. Bertrand y G. Bertrand en el año 1968. Quienes consideraban que era importante entender las relaciones del componente natural y físico del entorno con las prácticas y actividades cotidianas de la sociedad.

Entre el año de 1859 y 1900 se fue construyendo conceptos como: red ecológica, vías verdes y estructuras de hábitats, utilizadas como herramienta para el ordenamiento y planificación del territorio y para la implementación de políticas ambientales para reducir los impactos de la revolución industrial en las zonas urbanas y rurales en lugares de Europa y Norteamérica, que buscaban incluir corredores ecológicos o estructuras de hábitats llamadas también “bulevares verdes” en París; “Parkways” en Boston y “cinturón verde” en Inglaterra (Rob H.G. Jongman, Mart Külvik, Ib Kristiansen, 2004, págs. 305 - 319), surgen como elementos para la planeación del territorio con fines de proteger la biodiversidad y proveer funciones para la sociedad. Pero la mayoría de estas propuestas e investigaciones, se han desarrollado desde un solo enfoque científico aplicando leyes universales, caracterizado por métodos cuantitativos, de modelos que buscan interpretar una realidad y conectar el espacio geográfico de un modo inmaterial, sin tener en cuenta la producción natural y social del espacio.

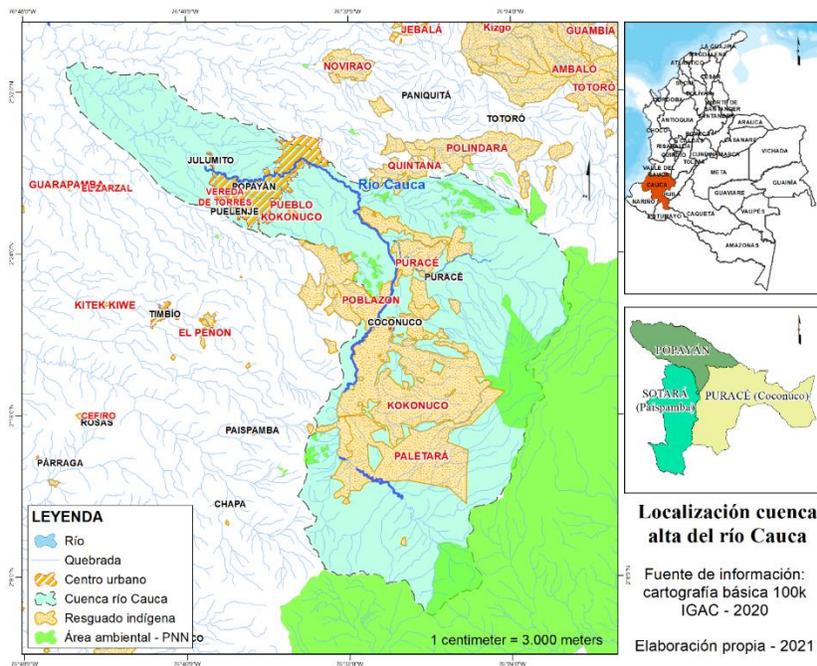
En Colombia el concepto de estructura ecológica surge en el año 1998, como forma de estudiar el espacio geográfico, en el plan ambiental de la cuenca alta del río Bogotá por Thomas van der Hammen. Luego este análisis fue aplicado a un contexto a nivel nacional en el año 2003, como estructura ecológica principal de Colombia - IDEAM 2003, como una primera aproximación, elaborada por van der Hammen y Andrade. En este modelo de estructura ecológica nacional se analizó la cobertura vegetal natural principal, además de sus cambios en la protección y conservación de los ecosistemas. Este concepto permite tener una mirada global de la importancia de las estructuras ambientales del país en los procesos ecológicos entre los ecosistemas y la sociedad.

La estructura ecológica que se estableció en Colombia se presenta como herramienta de planificación y determinante ambiental que evalúa las categorías de conservación, restauración y uso sostenible. Algunas de las estructuras ecológicas estudiadas son las cuencas hidrográficas que representan en la geografía la integración de los componentes naturales y sociales, en su manifestación espacio – temporal, que incorporan componentes institucionales y de control político Burgos, Bocco, y Sossa Ramirez, 2015, pág. 15). Para el desarrollo del diseño de análisis espacial, es necesario seleccionar una estructura ecológica, con características naturales regionales con fines a la conservación del agua. Esta estructura

ecológica seleccionada fue la cuenca alta del río Cauca que se localiza al sur occidente del país, en el departamento del Cauca; está formada por un paisaje de montaña altoandino entre los municipios de Popayán, Puracé y Sotará.

Esta cuenca comprende un área aproximada de 85.323,16 (ha), distribuidas en un 6,40% en el municipio de Sotará, un 59,05% en el municipio de Puracé y un 65,03% en el municipio de Popayán. La ocupación territorial se localiza entre alturas de 1.357 hasta 4.653 metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m). Se caracteriza por la presencia de comunidades étnicas: Páez, Kokonuco y Yanaconas, que corresponden a los resguardos ancestrales legalizados de Puracé, Poblazon Quintana, Kokonuco y Paletará, consultado en el visor geográfico (Agencia Nacional de Tierras - ANT, 2020). En la ocupación de la cuenca también se cuenta con presencia de población campesina agrícola dedicada a cultivos agroforestales y ganaderos que representan 67,75% de la superficie. Y por último está los centros urbanos que representa el 1,74% de la superficie terrestre dedicada al intercambio de servicios comerciales, educativos, administrativos y residenciales. (Figura 1).

Figura 1. Localización de la cuenca alta del río Cauca.



Fuente: Capa geográfica de comunidades étnicas de la ANT, año 2019 y cartografía básica nacional 100k del IGAC, año 2020.

La cuenca alta del río Cauca nace entre los cerros El Español, Crestá de Gallo y El Cubilete, en dirección noroeste entre los volcanes de Puracé y Sotará, formando el Valle de Paletará. El límite de la cuenca de la parte alta termina en el municipio de Popayán en las veredas del Julumito, La Meseta y Los Cerrillos. “Esta formación geológica se caracteriza por estar en una serie de fosas tectónicas e interpuestos entre la cordillera Central y Occidental el cual generó la dirección de la cuenca hidrográfica en el primer tramo y el resto de su recorrido se realiza de norte a este” (Camacho J. H., 1992, pág. 43). Por su ubicación geográfica la cuenca alta del río Cauca cuenta con una riqueza en su ecosistema importante, al pertenecer a una formación montañosa como el macizo Colombiano formado por biomas de vegetación arbustiva y herbácea de páramo con vegetación de bosque húmedo y vegetación seca. Estas características bióticas hacen del río Cauca, uno de los ríos más importantes por su riqueza natural ecológica, el cual aporta al país un aprovisionamiento de agua dulce, que es aprovechado en las diferentes regiones del país.

Una aproximación del estado actual del conocimiento de la biota en Colombia, lo presento Jorge Hernández Camacho conocido por sus aportes al pensamiento naturalista y científico en Colombia; quien en colaboración con otros actores sobre el tema; definieron caracterizar la biota Colombiana “a partir de la información sobre la historia evolutiva de las especies y la diferenciación de la unidades biogeográficas, como reflejo actual de dichos procesos; por lo tanto se tuvo en cuenta la convergencia de procesos orogénicos, tectónicos y pedogénicos, cambios climáticos, periodos de aislamiento geográfico, etc.” (Camacho J. H., 1992, pág. 44). Por las condiciones ambientales que la cuenca alta del río Cauca tiene, se distingue tres tipos de biomas de bosque andino que se localizan entre alturas de 1.000 m.s.n.m. hasta 4.000 m.s.n.m. Esta clase de biomas andinos normalmente se encuentra en Colombia en las principales cuencas hidrográficas como es el caso del río Cauca, información (Figura 2).

La cuenca del río Cauca está conformado por un bioma del bosque húmedo alto Andino que se localiza en un 56% en la zona agrícola de la cuenca; el bioma de bosque húmedo subandino que se localiza en la zona urbana del municipio de Popayán y representa un 23% del área total de la cuenca hidrográfica y por último está el bioma herbáceo de páramo con un porcentaje de participación del 21 % en la cuenca, que corresponde a la influencia del volcán Puracé y el parque nacional de Puracé (Figura 2). Estas variables están asociadas con las

características de la cobertura vegetal, las áreas de zonificación ambiental, las áreas de conservación y protección, los ecosistemas y los parques y complejo de páramos.

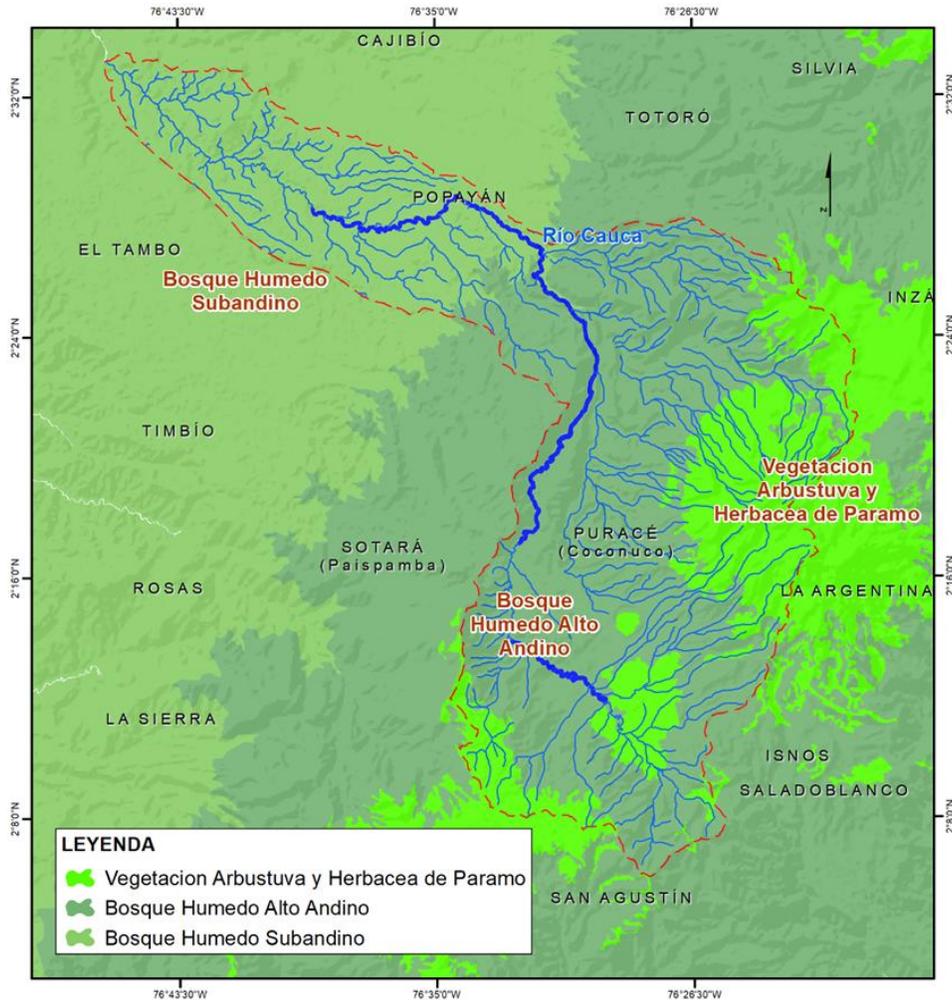
El primer bioma que se localiza en la cuenca es el bosque húmedo alto andino o de páramo es un ambiente húmedo que se encuentra en alturas de 2800 y 3200 metros de altitud; crecen árboles y arbustos de gran altura, producto de las corrientes de aire húmedo generado por el aire ascendente y saturado de vapor de agua, proveniente de regiones bajas, húmedas y cálidas se condensan para producir regularmente nubosidad o niebla, además esta ambiente cumple con una función específica en la naturaleza y es la generación y la regulación del flujo hídrico el cual desciende de los páramos, produciendo la acumulación de nutrientes, por eso crecen abundante variedad de epifitas como los musgos, los helechos, los líquenes, y las orquídeas.

El segundo bioma es el bosque húmedo subandino o de bioma higrofitico, se caracteriza por el predominio de bosque de piso térmico templado isomacrotérmico, con temperaturas medias anuales de 18 a 24 grados centígrados, en climas húmedos a súper húmedos, donde la frecuencia de las nieblas tiende a elevar la humedad ambiental y a reducir la evapotranspiración, en la cuenca se localiza el municipio de Popayán el cual tiene un 23% del área del bosque húmedo subandino.

El tercer bioma es la vegetación arbustiva y herbácea de páramo que se caracteriza por contar con arbustos y herbáceo con una cobertura del piso por musgos y helechos que llega a ser densos y extensos, igualmente las palmeras son especies que pueden ser numerosas y dominantes. Con relación a la delimitación del bioma de bosque altoandino y subandino no es muy claro de diferenciar. En el área de páramos, la vegetación característica es matorrales o vegetación arbustiva, pajonales o vegetación herbácea, frailejones o vegetación con estrato arbustivo emergente, prados o vegetación pre coberturas. Con las anteriores categorías de paisaje y características biofísicas de la cuenca alta del río Cauca, este diseño metodológico inicia su análisis espacial en la integración de 16 variables y 3 tipos de componentes el cual incluye el tema sociocultural relacionado con las prácticas agrícolas o culturales que desarrollen en la cuenca. El resultado de la metodología es analizar la correlación de la conservación del agua en la estructura ecológica teniendo presente el número de capas geográficas combinadas para la cuenca alta del río Cauca. Teniendo claro que el agua cumple

con distintas funciones ecológicas, entre ellas como ecosistema regulador para evitar inundaciones, en la descarga o recarga de acuíferos en épocas de lluvia y tiempo seco, como cadena biológica en la retención de nutrientes y sedimentos para la creación de espacios de refugio para aves y especies acuáticas.

Figura 2. Distribución de biomas en la cuenca alta del río Cauca.



Fuente: capa geográfica de Parques Nacionales Naturales de Colombia año 2018.

Con la integración de las diferentes variables biofísicas y socioculturales del análisis espacial en la estructura ecológica, el recurso agua se manifiesta también como un elemento esencial para la sostenibilidad del ciclo hidrológico de la región y la forma estructural natural que

tiene la cuenca alta del río Cauca para interactuar como elemento vital acuático para la regulación de energía y la autorregulación de la misma, funcionando como un sistema abierto donde se intercambia masa y energía con su entorno.

2. Metodología

Revisión metodológica de análisis espacial

El diseño metodológico de análisis espacial inicia con una revisión de los procesos metodológicos ambientales a escala nacional, regional y local; donde se revisa diferentes metodologías para la identificación y priorización de ecosistemas importantes y áreas ambientales, para la conservación del agua, el protocolo que se utilizó fue el de revisar doce metodologías ambientales que se caracterizaban por ser actuales y tener objetivos conceptuales para plantear nuevos geoprocesos que buscaban caracterizar e identificar estructuras ambientales. De las metodologías revisadas se encontraron que en sus geoprocesos más usuales fueron el análisis multicriterio o análisis de superposición ponderada, la clasificación supervisada y no supervisada, el cruce o superposición de capas, los análisis geo estadísticos y la captura de elementos a partir de sensores remotos.

Con la revisión de las metodologías y procesos se identificó que no se incluye información sociocultural referente a comunidades étnicas ni tampoco campesinas, estas comunidades en sus territorios pueden desarrollar actividades asociadas al cuidado y mantenimiento de los ecosistemas. Esta información puede tener un valor agregado al estudio en cuanto a la localización de los actores sociales y sus prácticas. Además de ser un factor que puede incidir en las transformaciones de las coberturas vegetales o en la estructura ecológica de la cuenca.

Entre los estudios evaluados se identificó que, en sus análisis espaciales, utilizaron la configuración de varios geo procesos y variables, que tuvieron que ser desarrollados por etapas, por los resultados intermedios y síntesis final de los procesos. Entre esta clase de metodologías revisadas esta la guía técnica para la ordenación y manejo integrado de la zona costera (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible e INVEMAR, 2017). La metodología para la definición de las bases técnicas para la zonificación ambiental a escala

1:100.000 en unidades supra municipales de Colombia priorizadas en el posconflicto (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible y PNUD, 2016).

Otras de las características en común que se comprobó entre las metodologías es la similitud en la búsqueda de criterios y procedimientos de análisis espacial para incorporar lineamientos para la planificación y ordenación del territorio. En esta lista de estudios está la guía técnica para la formulación de los planes de ordenación y manejo de cuencas hidrográficas (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2014). La metodología técnica para la identificación de la estructura ecológica para áreas urbanas (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015). La zonificación ambiental y ordenamiento de la Reserva Forestal de la Amazonia, creada mediante la Ley 2ª de 1959 (SINCHI y MINAMBIENTE, 2014).

Entre los estudios analizados también se identificó un propósito común de unificar la información ecológica, biótica del recurso agua, para analizar ecosistemas con fragmentación y deterioro. Para ello, los estudios de identificación de bosque seco tropical (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible e Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, 2014) y el estudio nacional del agua elaborado por el (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM, 2014), fueron clave.

En la revisión y análisis de las metodologías también se incorporó los ejercicios que se relacionan directamente con el tema de estructura ecológica. Por ejemplo, en el campo de los agroecosistemas se realizó un estudio sobre Estructura agroecológica Principal (EAP) del agro ecosistema mayor (La Finca) como un criterio taxonómico para plantear una aproximación conceptual para el uso y manejo de la conservación de la biodiversidad en los procesos productivos y servicios ambientales de las fincas (León Sicard, 2014)

Otra de las categorías de análisis que identifiqué fueron las estructuras ecológicas desarrolladas en un ambiente local, regional y nacional. Como la propuesta de aplicación en la renovación urbana de Fenicia, Las Aguas que funciona como un diagnóstico y acercamiento con actores (Remolina, et al., 2013). La estructura ecológica principal de la región de Chocó Biogeográfico (Grupo de Investigación: Conocimiento, Manejo y Conservación de los Ecosistemas del Chocó, 2011). La estructura ecológica y ordenamiento

territorial ambiental por (Germán Márquez y Elizabeth Valenzuela, 2008), en este análisis se utilizó la herramienta de los sistemas de información geográfica, para identificar la estructura ecológica de soporte mínima en el territorio. Por último, está la propuesta conceptual de la estructura ecológica regional para la región central (Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca, 2008).

Con lo anterior se concluye que en los métodos de análisis espacial falta incluir componentes o variables socioculturales, como zonas donde se desarrollen prácticas agrícolas tradicionales, actividades culturales, económicas y espirituales, donde el conocimiento sobre la naturaleza está a favor del cuidado y el mantenimiento de los ecosistemas. Además, es necesario plantear diseños metodológicos de análisis espaciales sencillos sin generar complejidad en el cruce de las variables y los datos, demostrando que los sistemas naturales y sociales están integrados en un espacio geográfico específico, (Figura 3). Estas características o aspectos pueden ser tenidos en cuenta en un análisis espacial de combinaciones de variables y componentes como sumatoria de superposiciones de capas geografías que se puede priorizar con un objetivo ambiental.

Figura 3. Línea de tiempo de las metodologías analizadas



Fuente: Elaboración propia.

El diseño metodológico de análisis espacial propuesto contiene un enfoque mixto geográfico, cuantitativo y ecológico (matemático y geo estadístico), donde se tiene en cuenta los aspectos socioculturales, como un factor decisivo para el análisis espacial de la estructura ecológica

de la cuenca. Este procesamiento es una herramienta tecnológica de la geomática, donde se utilizan datos espaciales, para lograr obtener un análisis cercano al espacio real, donde realmente se presenta los fenómenos naturales y sociales.

3. Resultados

Propuesta de diseño metodológico y aplicación

El método de análisis aplicado en el geo procesamiento parte del concepto de geosistema propuesto por Claude Bertrand y George Bertrand (2006), donde los componentes están organizados en 3 tipos de dimensiones espaciales: abióticos, bióticos y antrópicos.

El diseño metodológico inicia con la identificación de 16 variables representadas de forma geográfica en la localización de la cuenca y que son esenciales de interés para el agua en la cuenca alta del río Cauca y la que dispone actualmente la zona de estudio. Con esta identificación se procede a agrupar cada uno de estas variables en tres clases de componentes (biótico, físico y sociocultural), que luego deben ser llevados a un geo proceso llamado combinación, donde la información vectorial es ajustada en formato raster o grillas de un mismo tamaño para su combinación o integración de datos. Este ejercicio se realiza normalmente con imágenes de satélite para la combinación de bandas espectrales, pero en este caso se realizó con la información vectorial de las variables seleccionadas para la cuenca alta del río Cauca.

Las variables bióticas están relacionadas con las características que tiene la cobertura vegetal, zonificación ambiental, área de conservación y protección, biomas, ecosistema, parque natural nacional y complejo de páramos. Con este diseño de análisis espacial, se ejecuta y se obtienen resultados en el área de estudio y sus relaciones con el recurso agua en la estructura ecológica para el componente biótico.

Las variables físicas, se relacionan con las características del entorno donde se localiza el río Cauca, sus componentes físicos como el sistema de acuíferos, los humedales, la localización de agua subterránea, la altura, la capacidad de uso, la clasificación agrologica clase VIII y las zonas susceptibles a inundación.

Las variables socioculturales están asociadas a los territorios étnicos constituidos, estas comunidades se diferencian y se caracterizan por ser ancestrales y las comunidades más conocidas en el territorio son los pueblos étnicos Nasa o Páez, Kokonuko y Yanaconas, estas comunidades son reconocidas como resguardos indígenas del agua. Como se define es la siguiente frase: “Un indígena de Puracé condensó así el principio del pensamiento de su etnia y del mundo indígena: nosotros somos gente de la madre agua.” (Paz, 2001, pág. 199). Los ríos y lagunas representan para la población indígena, lugares sagrados donde realizan rituales de limpieza y establecen reglamentos para su convivencia y armonía con la naturaleza. Este estudio tiene presente la importancia del pensamiento y la cosmovisión de sus territorios en su organización a favor de la naturaleza y sus relaciones.

Para las comunidades indígenas, el concepto de territorio es el espacio de vida donde logran conservar su cultura y su cosmovisión que se relaciona con la armonía y el equilibrio con la naturaleza; en este espacio de vida desarrollan y fortalecen la identidad a partir de las practicas ancestrales, espirituales, realizando rituales, llevando la medicina tradicional, cultivando la tradición oral, los mitos y las leyendas para conservar los sitios sagrados y transmitir usos como costumbres para la próximas generaciones.

Etapas y procesos de combinación de datos espaciales:

El análisis espacial contiene varios procesos o pasos, donde cada proceso tiene una actividad específica que se desarrolla con el número de variables seleccionadas para la aplicación del análisis. Los resultados varían dependiendo del número de variables seleccionadas y los componentes temáticos construidos para su posterior agrupación.

Para el desarrollo del análisis espacial, se utilizó información nacional a escala 1: 100.00 para realizar un estudio general ambiental, ya que la cuenca alta del río Cauca no dispone de información geográfica detallada regional para su aplicación. Esta información es recopilada por las diferentes instituciones públicas y grupos de investigación entre los años 2018 a 2020. (Tabla 1).

Tabla 1. Variables y fuentes de información

Variable	Fuente
1.Bioma	Parques nacionales naturales de Colombia – año 2018
2.Áreas protegidas	Parques nacionales naturales de Colombia – año 2020
3.Ecosistemas Magdalena – Cauca	Parques nacionales naturales de Colombia – año 2001
4.Cobertura de uso	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – año 2005 y 2018
5.Ecosistemas de páramo	Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt – año 2015
6.Ecosistemas	Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt – año 2015
7.Acuíferos	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – año 2018
8.Captación de agua subterránea	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – año 2018
9.Suelos	Instituto Geográfico Agustín Codazzi – año 2018
10.Capacidad de uso	Instituto Geográfico Agustín Codazzi – año 2018
11.Precipitación	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – año 2018
12.Zonas susceptibles a inundación	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – año 2018
13.Altura	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – año 2018

Variable	Fuente
14.Estaciones pluviométricas	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – año 2018
15.Resguardos indígenas legalizados	Agencia Nacional de Tierras - 2020
16.Zonas de reserva civil	Parques nacionales naturales de Colombia – año 2018

Fuente: elaboración propia.

El análisis espacial se desarrolla en 7 procesos. El primero: a cada variable del componente se le asigna valor de 1 a 3 estos valores están seleccionados por análisis similares que se han realizado en otros ecosistemas, según la relación que tenga con el agua; donde 1 representa menor relación con el agua para su mantenimiento y protección y 3 mayor relación con el agua para su mantenimiento y protección. El segundo: cada variable geográfica se convierte en un formato de columnas y filas (cuadrícula), conocido como formato raster, que contiene grillas de un mismo tamaño espacial (30 x 30). Este tamaño se relaciona con la escala de los datos e información geográfica de la zona de estudio. En el tercer proceso a las variables que están de forma puntual se les realiza un cálculo de mapas de distancias para tener zonas de aproximación a estos sitios identificados. Este análisis se realiza a las variables 6 y 7 de la lista. En el cuarto proceso las variables que están en formato raster se combinan, integrándose en una sola capa geográfica. A esta capa unificada con todas las variables en una capa por componente se le realiza un quinto proceso que corresponde a un cálculo sumatorio de los valores asignados, obteniendo un valor total por celda de la integración de las variables por componente. En el sexto proceso, con el resultado de la sumatoria de las variables por componente se hace una reclasificación de los datos, obteniendo rangos de 1 a 3 por componente. Por último, con el resultado de la reclasificación por componente, se integran o se combinan, obteniendo una capa integrada con características relacionadas a las variables y componentes combinados para la protección del agua en la cuenca alta del río Cauca. Este

resultado cumple con algunos principios geográficos de localización, distribución y relación de componentes en un espacio específico. (Figura 4)

El modelo cartográfico de análisis espacial está diseñando en forma de matriz donde se distinguen los componentes, las variables, el análisis y los resultados. El cruce de las variables se diferencia de otras metodologías, porque utiliza un mismo proceso para toda la información seleccionada, donde la cuenca del río Cauca es dividida a partir de una grilla de un mismo tamaño con el fin de integrar todas las variables. El resultado es la identificación de las zonas con mayor corrección de información para la conservación del agua.

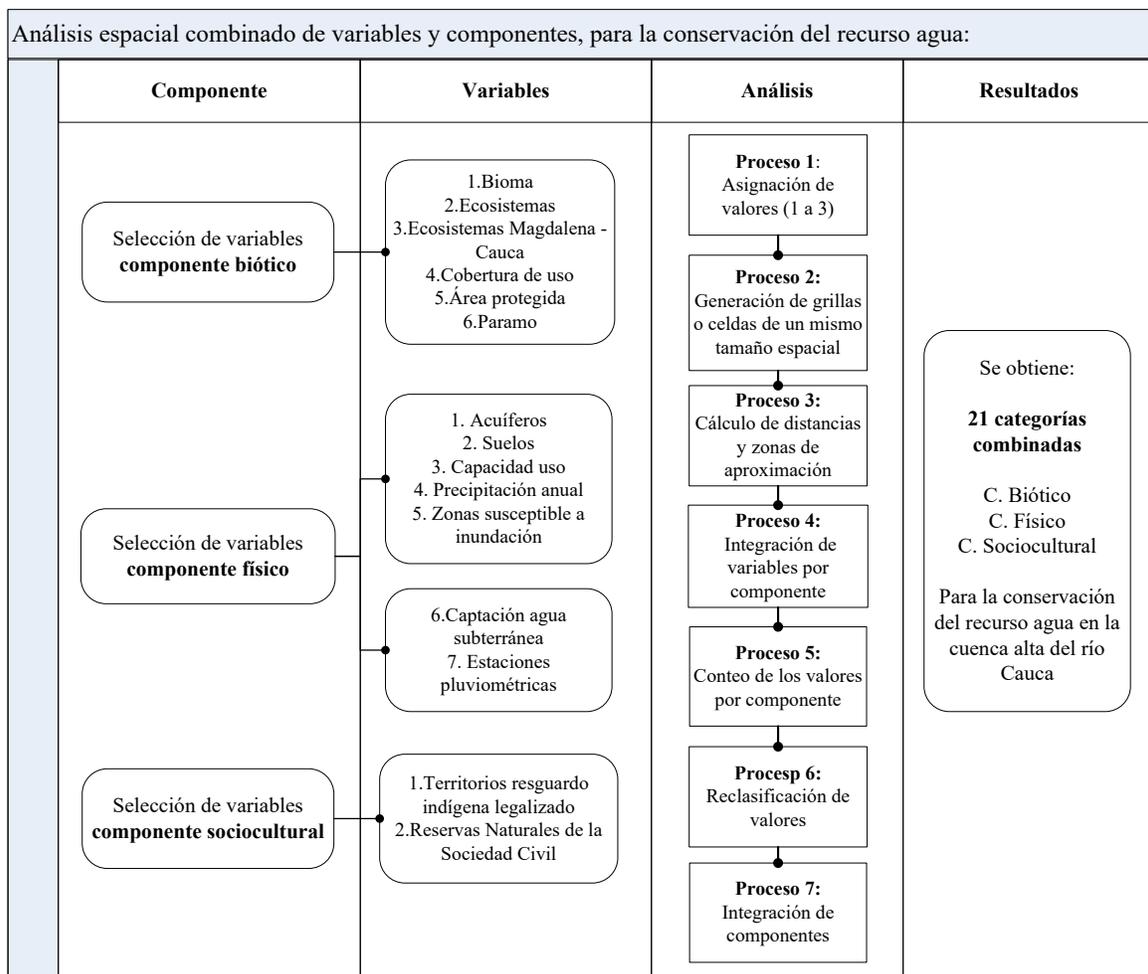
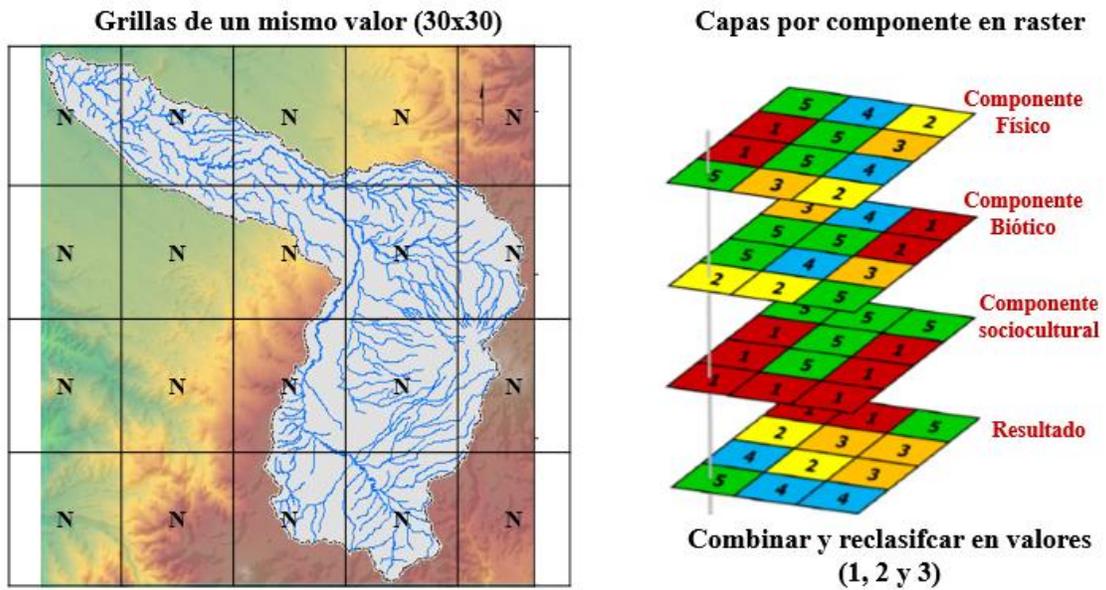


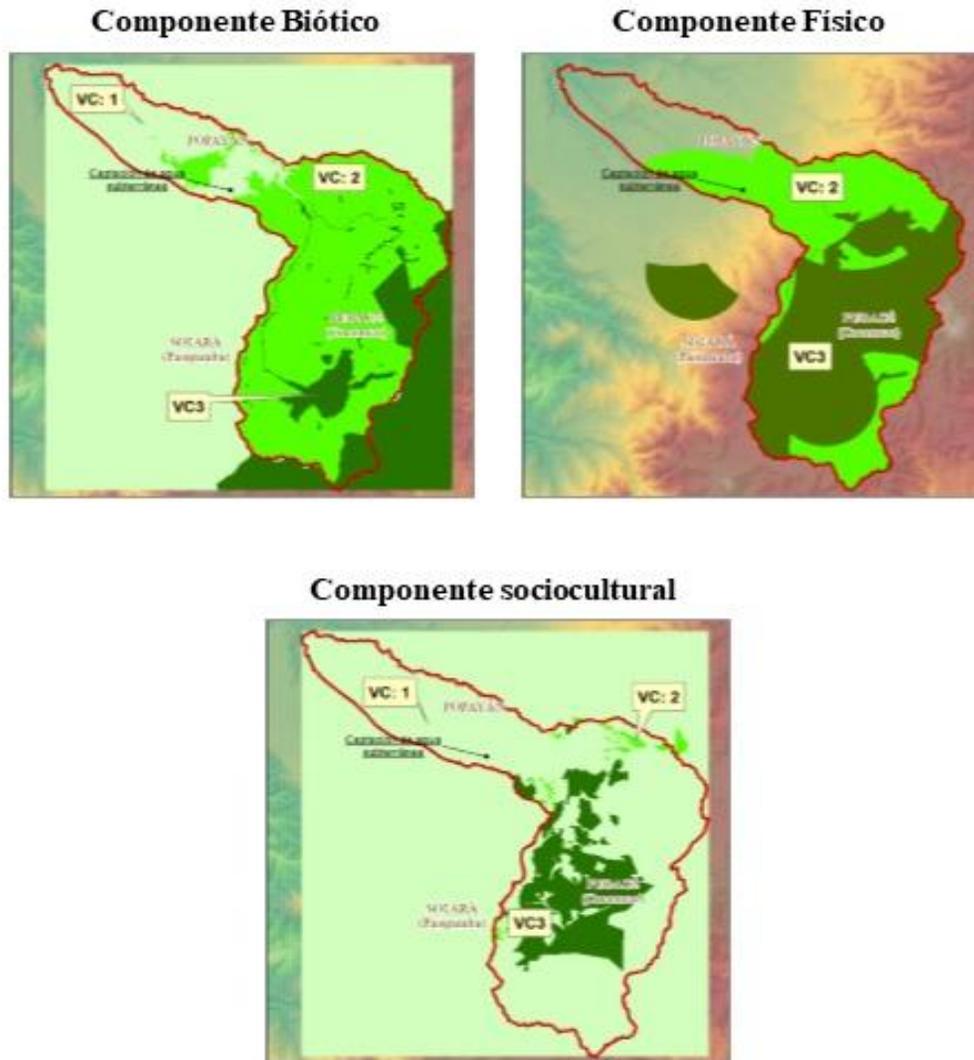
Figura 4. Proceso metodológico de análisis espacial



Fuente: elaboración propia

Representación de capas en formato raster donde se integra por componente las variables: bióticas, físicos y socioculturales que serán combinadas o integradas para identificar las zonas para la conservación del agua, cada resultado por componente tiene un total de variables que intervienen para el resultado final. Como el proceso y cálculo se realiza por medio de grillas de un mismo tamaño el resultado final da una sumatoria de píxeles que representa el área combinada y el número total de variables que se están relacionando. (Figura 5)

Figura 5. Combinación de variables en formato raster por componente.



Fuente: Elaboración propia.

4. Resultados

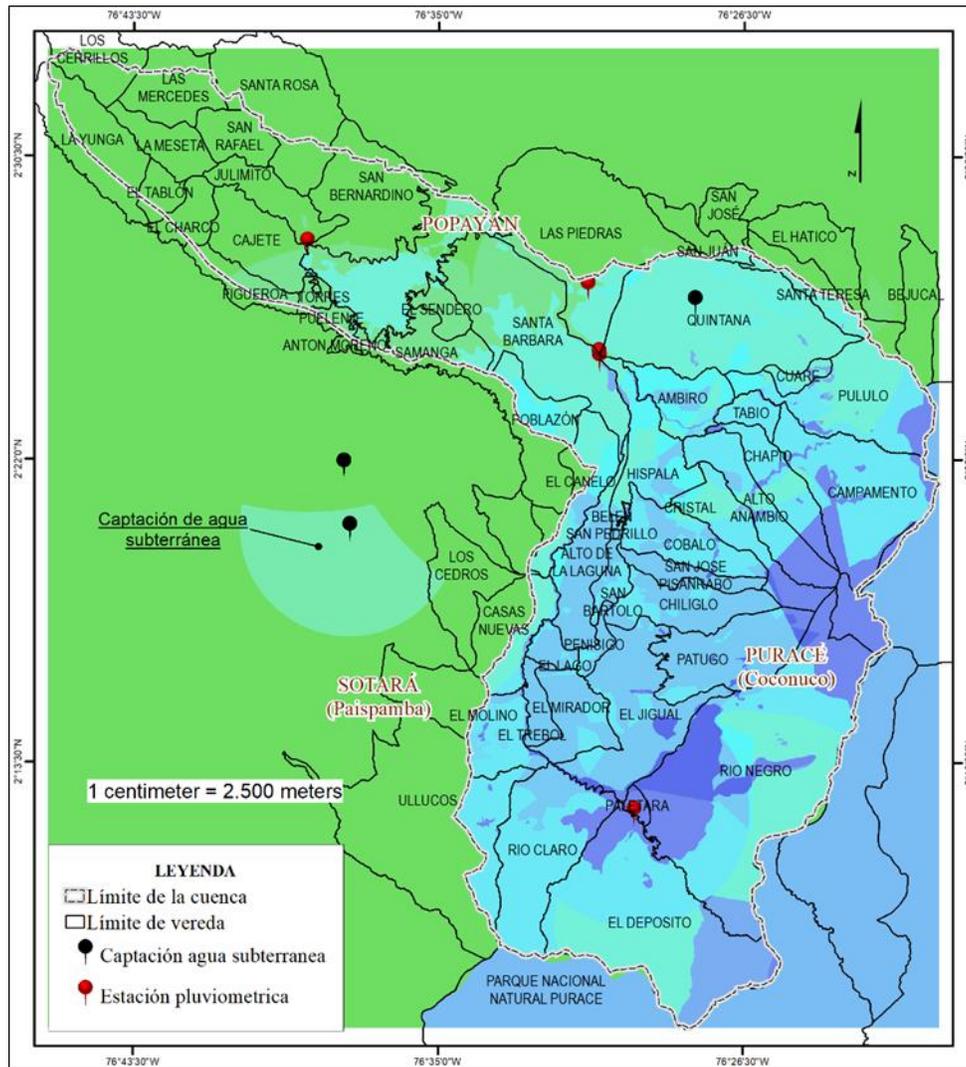
Del análisis espacial se obtienen como resultado 21 combinaciones entre los componentes biótico, físico y sociocultural, en un área aproximada de 85.323,16 (ha); que representa las combinaciones de las variables y los componentes con relación al agua para su almacenamiento o producción. Los colores que van de tonalidad verde significan que hay al menos una variable por componente favorable para la permanencia del agua y a medida que

aumenta la presencia de variables el color cambia a tonalidades azul profundo, donde indica que las relaciones entre los componentes bióticos, físicos y sociales están teniendo una mayor participación o relación referente al tema del agua; es decir, hay lugares que contienen un número de variables por componente con mayor disponibilidad que en otros lugares (3 biótico, 3 físico, 3 sociocultural), en donde la dinámica de los componentes interactúan con mayor ocurrencia que otras zonas.

Por ejemplo, se pueden encontrar espacios combinados con pocas variables por componente (1 biótico, 1 físico, 1 sociocultural), esto no significa que las variables o componentes no están aportando nada a la cuenca, al contrario, quiere decir que las condiciones ambientales son diferentes en relación con otras zonas de la cuenca y su impacto no es representativo en el tiempo para el mantenimiento del agua. Por ejemplo, si en estas zonas donde se registra una sola variable por componente tuviera más presencia de comunidades o se identificara más ecosistemas de importancia para el agua, la formación de componentes tendría como resultado un impacto positivo frente al agua y a la estructura ecológica del río Cauca.

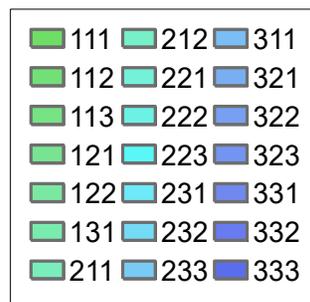
Estos resultados se dan a partir de la sumatoria o combinación de información que están organizados en un formato de grillas de un mismo tamaño y que al combinarlo o integrarlo en un espacio nos da como resultado 21 combinaciones relacionadas con la disponibilidad de información que se relacionan con el agua y la conservación que se debe tener al interior de la cuenca alta del río Cauca. La estructura ecológica de la cuenca nos evidencia los ecosistemas que se están correlacionando para la conservación del agua y que elementos se deben cuidar y evitar el desabastecimiento de agua en periodos de bajo caudal o cuando el tiempo climático de fenómenos de sequía se extienda más de lo normal. (Figura 6)

Figura 6. Resultados de las variables y componentes combinados



Fuente: Elaboración propia.

Legenda de combinaciones de variables



Interpretación de los resultados

Combinación de variables por componente (biótico, físico y sociocultural) que van de 311 al 333

Esta es la combinación con el resultado óptimo para el mantenimiento y protección del agua, porque la mayoría de las variables físicas, bióticas y sociales están presentes en este espacio geográfico relacionándose y dando como resultado una zona estratégica para el agua. De acuerdo a los resultados se calculan las áreas y porcentajes al interior de la cuenca hidrográfica en un área aproximada de 1.908,63 (ha) y representa el 2, 2% del total del área de la cuenca.

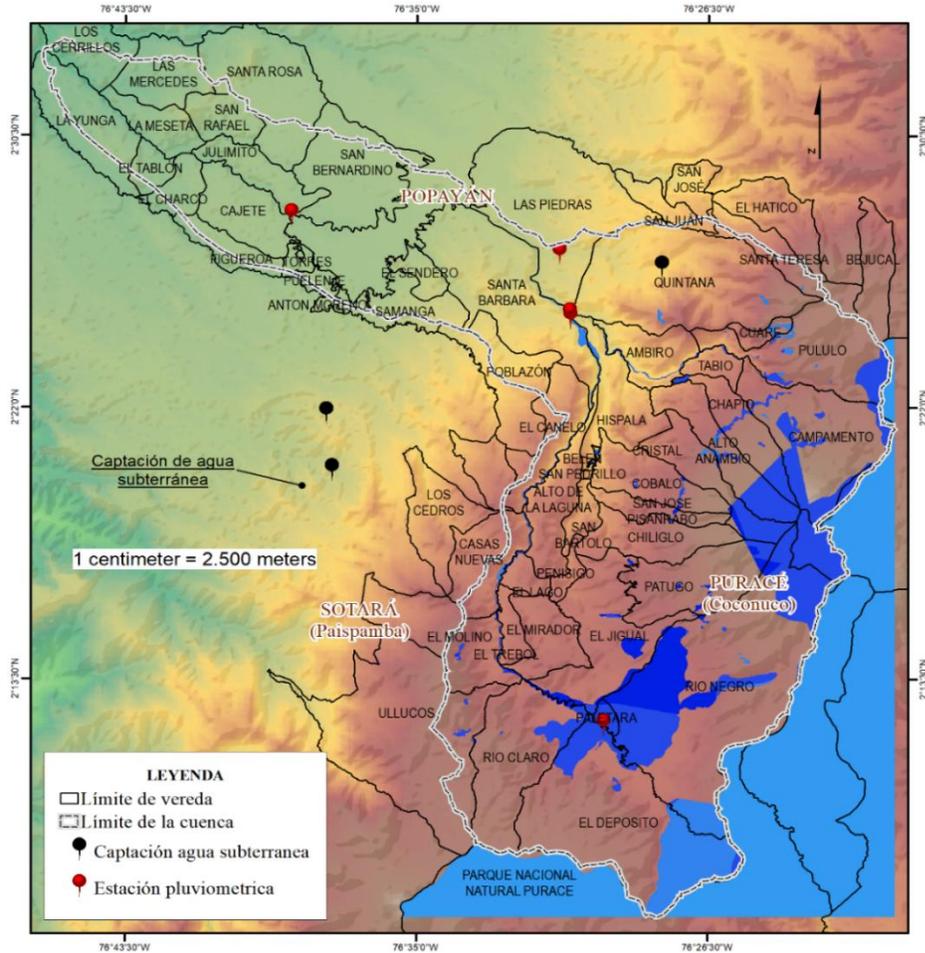
Los elementos naturales presentes en esta área optima son: la captación de agua subterránea, los suelos destinados por su capacidad de uso como suelos de protección, zonas con susceptibilidad a inundación, además de contar con alturas entre valores de 4.653 m.s.n.m. Igualmente en esta combinación de variables bióticas sobresale el complejo de páramo de Guanacas - Puracé – Kokonukos del distrito del macizo Colombiano, la demarcación del área protegida del Parque Natural Nacional, la vegetación arbustiva y herbácea del páramo, y donde también se encuentran las comunidades étnicas quienes han estado establecidos desde la colonia en reservas, resguardos, cabildos y con sus prácticas tradicionales y culturales han aportado al mantenimiento de los ecosistemas de la cuenca alta del río Cauca. Este tipo de combinación se presenta en las veredas (Alto de la Laguna, Ambiro, Casas Nuevas, Chiliglo, Cobalo, Cristal, El Canelo, El Jigual, El Lago, El Mirador, El Molino, El Trébol, Hispala, Paletara, Patugo, Pululo, Río Claro, Río negro, San José Pisanrabo, Tabio) (Figura 8 y 9)

Figura 8. Leyenda de combinaciones de variables.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 9. Resultado de Combinación de Variables 311 al 33.



Fuente: Elaboración propia.

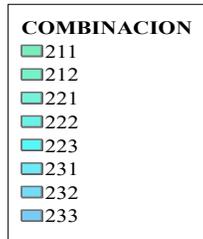
Combinación de variables por componente

(Biótico, físico y sociocultural) que va de 211 al 233

Esta es una combinación de variables recomendable para el mantenimiento y protección del agua por la presencia de zonas de sustracción de agua subterránea y bosques fragmentados de vegetación secundaria, esta clase de cobertura está en un bosque húmedo alto andino, donde su cobertura es transformada por pastos y mosaicos de cultivos. En esta relación de variables por componente interactúan zonas de actividades agrícolas realizadas por indígenas y campesinos de ocho veredas: Quintana, Santa Bárbara, Población, Ambiro, El Canelo, Hispala, Ambiro y Pululo. No es óptima porque en esta zona se está realizando una

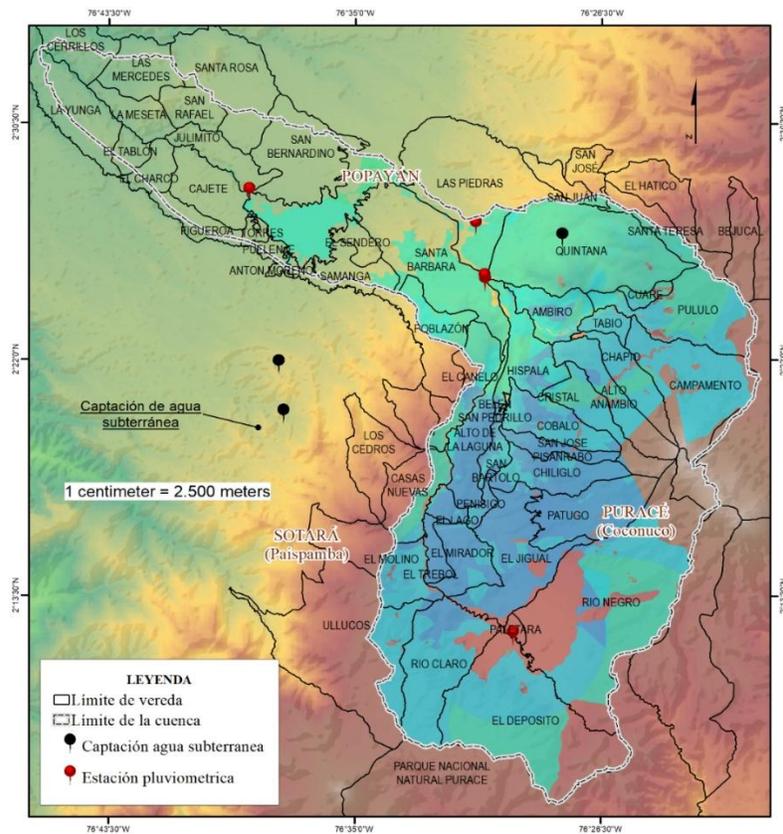
transformación por las prácticas y usos que se están desarrollando, donde las actividades de agricultura y el crecimiento de las zonas urbanas están transformado el espacio en diferentes usos. Estas relaciones se desarrollan en un área aproximada de 71.174,34 ha y representa un 83,30% al interior de la cuenca. (Figura 10 y 11)

Figura 10. Leyenda de combinaciones de variables



Fuente: Elaboración propia.

Figura 11. Resultado Combinación de Variables 211 al 233.



Fuente: Elaboración propia.

Combinación de variable por componente

(Biótico, físico, sociocultural) que va 111 al 131

Esta combinación de una variable por componente indica que hay pocos elementos físicos, naturales y humanos que actúan de forma positiva para la producción y el mantenimiento del agua. Este resultado se localiza en un área aproximada de 12.356,19 (ha) y representa el 14,4% del área total. Esta combinación se caracteriza por tener una variable por componente de bosque húmedo subandino donde los elementos físicos se asocian alturas de 1.357 metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m.). Además, se resalta las extensas zonas urbanizadas continuas y discontinuas, que se relacionan con diferentes cultivos de pastos y cultivos mixtos. Estas actividades se relacionan con un promedio anual de precipitación de 2000-3000 mm y un suelo poco húmedo y de bajo drenaje. Estas características se localizan en 13 veredas: Cajete, El Charco, El Tablón, Figueroa, Julumito, La Meseta, La Yunga, Las Mercedes, Los Cerrillos, San Bernardino, San Rafael. (Figura 12 y 13) Esta clase de combinación indica que las variables no representan una relación fuerte para la producción y mantenimiento del agua, necesitando la presencia de grupos sociales consientes con la protección de la naturaleza que generen de manera positiva actividades y usos para el cuidado de los ecosistemas.

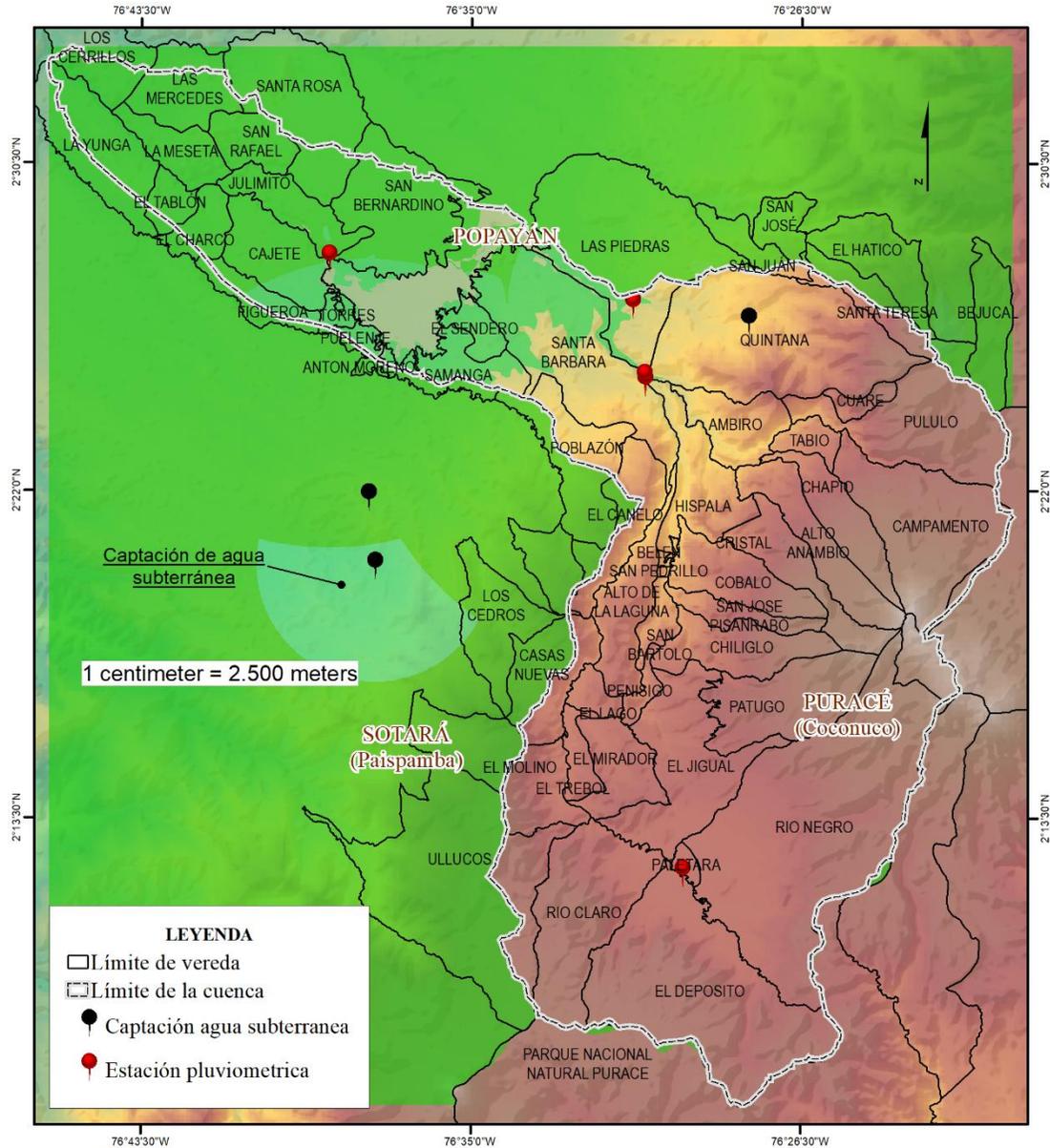
Figura 12. Leyenda de resultados.

Leyenda de combinaciones de variables.

COMBINACION	
■	111
■	112
■	113
■	121
■	122
■	131

Fuente: Elaboración propia.

Figura 13. Resultado y Combinación de variables 111 al 131.



Fuente: Elaboración propia.

5. Síntesis del análisis espacial.

El proceso del análisis espacial diseñado corresponde a la identificación de 16 variables que son organizadas en 3 tipos de componentes (físicos, bióticos y socioculturales) y para su

posterior combinación y resultados de superposición de información referente al mantenimiento del agua.

De este resultado de análisis espacial se obtiene 21 formas integrar variables seleccionadas para la producción y mantenimiento del agua, teniendo presente la localización del área de estudio y sus relaciones sociedad naturaleza. Con estos resultados se analiza cómo funciona la estructura ecológica de la cuenca, qué le hace falta para seguir manteniéndola, además de comprender la dinámica de los actores sociales y la intervención del estado.

La disponibilidad del agua en la cuenca está determinada por los ecosistemas y las características propias del lugar, que hacen que los sitios sean estratégicos ambientalmente con las variables físicas, bióticas y sociales que interactúan. Además de los manejos que las comunidades realicen en estos lugares a través de sus prácticas productivas, la delimitación de usos, las acciones de deforestación, el incremento de la frontera agrícola entre otros factores.

Las zonas declaradas como territorios étnicos tienen un valor para el análisis espacial porque con esta información geográfica se puede relacionar con otras variables de aspecto biótico o físico que están presentes en la naturaleza. Estas relaciones pueden ser políticas, ecológicas, productivas y culturales. En la cotidianidad se asocia en actividades como recorridos por los sitios sagrados, educación ambiental en las escuelas e instituciones educativas, encuentros en mercados para el intercambio de productos y fortalecer las economías locales. Intercambio de conocimiento en la siembra y producción agrícola, construcción de senderos ecológicos y el dialogo permanente con las autoridades ambientales de la región por los derechos al pertenecer a la cuenca del río Cauca.

En el resultado de las 21 combinaciones se puede observar que en distintas veredas de la cuenca alta del río Cauca las variables se relacionan de diferentes formas, algunas variables se concentran en los biomas de bosque húmedo alto andino y páramo, por sus características el paisaje que lo integra, conformando varios elementos importantes para la protección del agua. Igualmente, es importante resaltar que los temas del mantenimiento de las estructuras ecológicas están integrados con las actividades que realizan los humanos y se integran al paisaje o geosistema de una forma directa.

Las transformaciones de los ecosistemas también se pueden identificar en las 21 combinaciones como resultado del análisis, ya que la presencia de actores sociales que están presentes en cada uno de las zonas que conforman la cuenca alta del río Cauca intervienen de forma positiva como negativa en el manteniendo del sistema natural, un ejemplo de estas transformaciones es la zona urbana de la ciudad de Popayán que en estos últimos 13 años ha crecido de forma constante, generando nuevos espacios de transformación relacionados con el río Cauca el cual se ha visto afectado por la contaminación de los desechos domésticos e industriales.

Es importante resaltar que la cuenca alta de río Cauca representa una de las principales estructuras ecológicas del país, que cuenta con una diversidad ecosistémica rodeada de un paisaje cultural de saberes y lenguajes tradicionales, que al aplicar este diseño de análisis espacial se requiere construir más información geográfica relacionada a temas sociales y culturales a una escala de información regional como local con este proceso permite complementar el análisis de las relaciones sociedad naturaleza en la estructura ecológica del río Cauca.

6. Conclusiones

Los resultados de la metodología planteada de análisis espacial permiten comprobar que las variables combinadas por componentes responden a un objetivo común, en este caso, el de encontrar correlaciones entre los datos para e identificar que variables de la estructura ecológica se localizan en lugares estratégicos, que aporten a la producción y almacenamiento del agua.

Para este análisis espacial se tuvo en cuenta la teoría del geosistema que funciona como un conjunto de relaciones de variables donde los humanos también hacen parte de ella, en la transformación, configuración de los territorios y en la implementación de técnicas como herramienta de producción. Por lo tanto, en este ejercicio se incluyen componentes de variables físicas, bióticas y socioculturales entendiendo este último como los espacios donde las comunidades realizan sus prácticas agrícolas, culturales, ambientales, políticas para la administración y gestión de su territorio.

Con los resultados del análisis espacial se puede entender el funcionamiento de la estructura ecológica de la cuenca, visualizando las actividades y procesos que se desarrollan en los territorios rurales como zonas urbanas que se localizan en la cuenca. Algunas de las variables seleccionadas para el análisis son; la transformación de la cobertura de usos de suelo, la identificación de acuíferos, las zonas susceptibles a inundación, los humedales, la captación de agua subterránea, el tipo de suelos, la precipitación, la localización de territorios indígenas y las zonas de reserva civil.

El diseño metodológico no es un simple cruce de capas, es una integración de información donde a partir de una grilla de un mismo tamaño, se fusionan diferentes variables seleccionadas, que luego deben ser reclasificadas, para tener parámetros de medida simples para su correlación con la conservación del agua. Para llegar a tener un resultado con el anterior proceso, las variables o la información debe cumplir con un solo criterio para ser reasterizadas y es que la información geográfica inicial debe estar representada a partir de polígonos o áreas definidas al interior de la cuenca.

7. Referencias bibliográficas

- Agencia Nacional de Tierras. (2020). Portal de Datos Abiertos de la ANT. Capa de territorios étnicos. Recuperado de: <https://bit.ly/3yOCI6F>
- Bertrand, C. y Bertrand, G. (2006). *Geografía del Medio Ambiente El Sistema GTP: Geosistemas, Territorio y Paisaje*. Editorial Universidad de Granada.
- Burgos, A., Bocco, G., y Sossa, J. (2015). *Dimensiones sociales en el manejo de cuencas*. Universidad Autónoma Nacional de México, Dimensiones sociales en el manejo de cuencas y Dimensiones sociales en el manejo de cuencas.
- Camacho, J. (1992). Caracterización Geográfica de Colombia en G. Halffter (Ed.), *La Diversidad Biológica de Iberoamérica I* (pp. 43-50). Instituto de Ecología.

Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca. (2008). *Propuesta de estructuración ecológica regional para la región central*. Gobernación de Cundinamarca, Alcaldía Mayor de Bogotá Distrito Capital y Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca-CAR y Centro de las Naciones Unidas para el Desarrollo Regional – UNCRD del Departamento de Asuntos Económicos y Sociales de la Secretaría de las Naciones Unidas-UNDESA / Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.

Corporación Regional Natural del Cauca. (2017). *Formulación del POMCA cuenca alta del río Cauca. Informe ejecutivo de la fase de diagnóstico*. Corporación Regional Natural del Cauca.

Grupo de Investigación: Conocimiento, Manejo y Conservación de los Ecosistemas del Chocó. (2011). *Estructura ecológica principal de la región de Chocó biogeográfico*. Grupo de Investigación: Conocimiento, Manejo y Conservación de los Ecosistemas del Chocó.

Instituto Alexander von Humboldt. (2015). Ecosistemas de Páramos en C. Sarmiento y O. León (Eds.), *Páramos vivos, transición bosque páramo bases conceptuales y métodos para su identificación en los Andes colombianos* (pp. 18-29). Instituto Alexander von Humboldt. <https://bit.ly/3PAevrE>

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (2005 - 2018). *Cartografía Cobertura y uso de la tierra*. Datos abiertos: Información geográfica de datos abiertos del IDEAM

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (2003). *Estructura ecológica principal de Colombia: primera aproximación*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (2014). *Estudio nacional del agua*. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (2018). *Capa de acuíferos*. Datos abiertos: Información geográfica de datos abiertos del IDEAM.

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (2018). *Captación de agua*. Datos abiertos: Información geográfica de datos abiertos del IDEAM.

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (2018). *Precipitación*. Datos abiertos: Información geográfica de datos abiertos del IDEAM

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (2018). *Zonas susceptibles a inundación*. Datos abiertos: Información geográfica de datos abiertos del IDEAM

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (2018). *Altura*. Datos abiertos: Información geográfica de datos abiertos del IDEAM

Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (2018). *Datos geográficos Capa de suelos*. Datos abiertos: Datos Abiertos IGAC

Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (2018). *Datos geográficos Capa capacidad de uso del suelo*. Datos abiertos: Datos Abiertos IGAC

León, T. (2014). *Perspectiva ambiental de la agroecología. La ciencia de los agrosistemas*. Universidad Nacional de Colombia.

Márquez, G. y Valenzuela, E. (2008). Estructura ecológica y ordenamiento territorial ambiental: aproximación conceptual y metodológica a partir del proceso de ordenación de cuencas. *Gestión y Ambiente*, 11(2).

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible e Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. (2014). *Bosque seco tropical*. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible e Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible e Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras José Benito Vives de Andrés. (2017). *Guía técnica para la ordenación y manejo integrado de la zona costera*. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible e Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras José Benito Vives de Andrés.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible y Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. (2016). *Metodología para la definición de las bases técnicas para la zonificación ambiental a escala 1:100.000 en unidades supra municipales de Colombia priorizadas en el posconflicto*. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible y Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2014). *Guía técnica de zonificación ambiental y ordenación y manejo de cuencas hidrográficas*. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2015). *Documento técnico para la identificación de la estructura ecológica para áreas urbanas*. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.

Parques Nacionales Naturales de Colombia. (2018). *Cartografía de biogeografía y biomas de Colombia*. Parques Nacionales Naturales de Colombia.

Parques Nacionales Naturales de Colombia. (2020). *Cartografía reservas nacionales de la sociedad civil y áreas de protección - RUNAP*. Parques Nacionales Naturales de Colombia.

Paz, J. (2001). Estructura de la tenencia de la tierra: 1973 – 1997 en *Territorios Posibles, Tomo I*, (p. 199). Universidad del Cauca.

Remolina, A., Andrade. G., Wiesner., D. y Montenegro, F. (2013). La estructura ecológica principal en lo local. Propuesta de aplicación en la renovación urbana de Fenicia, Las Aguas, Bogotá. *Revista Nodo*, 16(8), 42-54.

Jongman, R., Külvik., M. & Kristiansen, I. (2004). European ecological networks and greenways. *Landscape and Urban Planning*, 68(2-3), 305-319. [https://doi.org/10.1016/S0169-2046\(03\)00163-4](https://doi.org/10.1016/S0169-2046(03)00163-4).

Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas SINCHI y Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2014). *Metodología de zonificación ambiental y ordenamiento de la reserva forestal de la Amazonia*. Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas SINCHI y Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.