



Vigilada Mineducación

Análisis de Metodologías Estadísticas y Morfométricas para la Estimación y Valoración de la Geodiversidad en la Cuenca del Río Samacá (Boyacá), en Contexto de Ambientes Sedimentarios-Estructurales con Enfoque en la Gestión del Patrimonio Geológico

CAMILO ANDRÉS PINZÓN BOCAREJO

Proyecto de Grado

Docente

DR. MARÍA ISABEL MARÍN CERÓN.

UNIVERSIDAD EAFIT
ESCUELA DE CIENCIAS
GEOLOGÍA
MEDELLÍN
2023

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi profundo agradecimiento a la Universidad EAFIT por brindarme la oportunidad de cursar la carrera de Geología. En especial, quiero destacar el invaluable apoyo de la profesora María Isabel Marín Cerón, cuya dedicación y orientación fueron fundamentales para culminar este camino académico con éxito. Su conocimiento y pasión por la geología han sido una fuente constante de inspiración. Además, no puedo dejar de mencionar el apoyo incondicional de mi familia, quienes estuvieron a mi lado en cada paso del camino, brindándome su amor y aliento. Su presencia ha sido el pilar que me ha permitido superar desafíos y perseguir mis sueños. Estoy profundamente agradecido por el invaluable respaldo de todas estas personas y entidades, sin las cuales este logro no habría sido posible.

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	8
2. GENERALIDADES	9
2.1 PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN:	9
2.2 HIPÓTESIS:.....	9
2.3 OBJETIVO GENERAL.....	9
2.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	9
3 CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO.....	10
4 MARCO TEÓRICO O MARCO CONCEPTUAL	13
4.1 ÁREAS PROTEGIDAS:	14
4.2 ECOSISTEMA:.....	14
4.3 ELEMENTOS ABIÓTICOS (EA):.....	14
4.4 GEOCONSERVACIÓN:.....	15
5 METODOLOGÍA.....	17
5.1 CONFORMACIÓN DE BASE DE DATOS E INVENTARIO DE LIG.....	18
5.2 RECLASIFICACIÓN SEGÚN ÍNDICES DE DIVERSIDAD	18
5.2.1 Clasificación Geomorfológica	18
5.2.2 Clasificación geológica.....	18
5.2.3 Clasificación Hidrológica	19
5.2.4 Clasificación climática y eco sistemática	19
5.3 METODOLOGÍA PARA EL CÁLCULO DE GEODIVERSIDAD	21
5.4 ANÁLISIS DE CUENCAS A PARTIR DE ÍNDICES MORFOMÉTRICOS..	22
6 RESULTADOS	25
6.1 CONFORMACIÓN DE GDB E INVENTARIO DE LIG'S (LUGARES DE INTERÉS GEOLÓGICO)	25
6.2 ESTIMACIÓN DE LA GEODIVERSIDAD.....	28

6.2.1	Reclasificación subíndices de geodiversidad	28
6.3	MAPA DE GEODIVERSIDAD FINAL	30
6.4	CLASIFICACIONES ÍNDICES MORFOMÉTRICOS	31
6.5	MAPA DE GEODIVERSIDAD MODIFICADO	33
8	DISCUSIÓN	34
8.1	MAPA DE GEODIVERSIDAD ESTADÍSTICA MODIFICADO	34
8.2	GEODIVERSIDAD COMO HERRAMIENTA PARA LA GESTIÓN DE PATRIMONIO GEOLÓGICO Y GEOTURISMO	35
9	CONCLUSIONES	37
10	REFERENCIAS	38
11	ANEXOS	42

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Mapa de Localización Cuenca del río Samacá.....	12
Figura 2 Flujograma metodológico para el calculo de geodiversidad, Cuenca río Samacá	17
Figura 3 Mapa de variables temáticas Cuenca del río Samacá. (a) Geología; (b) geomorfología; © clima; (d) títulos mineros; (e) suelos y (f) estructuras (Referencias en el texto Tabla 1)	20
Figura 4 Porcentajes de reclasificación de LIG´s.....	26
Figura 5 Mapa Puntos de Interés Geológico – Cuenca río Samacá.....	27
Figura 6 Mapas de índices reclasificados mediante el análisis estadístico (a) geología, (b) geomorfología, (c) clima, (d) estructural, (e)hidrología, (f) pedología.	29
Figura 7 Porcentajes de distribución porcentual de LIG´s.....	30
Figura 8 Mapa final de geodiversidad por métodos estadísticos – Cuenca río Samacá	31
Figura 9 Mapas índices morfométricos – Cuenca río Samacá, (a) gradiente de pendiente; (b) índice de disección; (c) densidad de drenaje; (d) frecuencia de corriente; (e) índice de humedad topografica; (f) relieve relativo.....	32
Figura 10 Mapa de Geodiversidad estadística modificado, Cuenca río Samacá.....	33
Figura 11 Distribución porcentual de los lugares de interés en el mapa de Geodiversidad final.	34

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Tabla de información de suministros del área de estudio proporcionados por Geoportales.....	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 2 Inventario de LIG´s en la cuenca del río Samacá.	26

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1 Infográfico Valoración de la Geodiversidad en la Cuenca del Río Samacá (Boyacá) – Elaboración propia.....	42
---	----

RESUMEN

La geodiversidad en Colombia es una herramienta invaluable para analizar patrones de diversidad, sobre todo cuando se cuenta con una definición unificada. Este estudio pretende resaltar la importancia de la geodiversidad aplicando enfoques estadísticos (Valentín, 2021) y morfométricos (Ramírez, 2022). Esto abre una perspectiva educativa y/o turística, para que diferentes tipos de públicos comprendan el paisaje que los rodea. Los mapas de geodiversidad, los inventarios de Lugares de Interés Geológico (LIG's) en función de las categorías: científica, turística y didáctica, benefician a las comunidades locales para entender y proporcionar guías a los visitantes, y con ello generar oportunidades de desarrollo económico mediante servicios de hospedaje, transporte y personal capacitado. La metodología utilizada, que combina un enfoque estadístico que incluye la diversidad morfométrica en la cuenca del río Samacá, permite validar la técnica en ambientes sedimentarios complejos estructuralmente (típicos en la Cordillera Oriental Colombiana) e iluminar zonas de especial interés en el futuro entorno a la geoeducación y el geoturismo en la cuenca del río Samacá. Los resultados obtenidos revelaron una variabilidad espacial de la geodiversidad controlada por la geología estructural y la red fluvial de la zona de estudio.

Palabras clave: Geodiversidad, LIG's, diversidad, geoturismo.

ABSTRACT

The geodiversity in Colombia is an invaluable tool for analyzing diversity patterns, especially when a unified definition is available. This study aims to highlight the importance of geodiversity by applying statistical (Valentín, 2021) and morphometric (Ramírez, 2022) approaches. This opens an educational and/or touristic perspective for several types of audiences to understand the landscape that surrounds them. Geodiversity maps and inventories of Geosites of interest (LIGs) categorized for scientific, touristic, and didactic purposes help local communities in understanding and supplying guidance to visitors, thereby creating economic development opportunities through lodging, transportation, and trained personnel. The method used, which combines a statistical approach including morphometric diversity in the Samacá River basin, allows validation of the technique in complex structurally sedimentary environments (typical in the Colombian Eastern Cordillera) and sheds light on areas of special interest in the future for geoeducation and geotourism in the Samacá River basin. The results obtained revealed spatial variability of geodiversity controlled by the structural geology and the river network in the study area.

Keywords: Geodiversity. Geosites, diversity, geotourism.

1. INTRODUCCIÓN

A lo largo de los años, Colombia ha tenido el reconocimiento de venir desarrollando una valoración de acuerdo con caracteres geológicos relacionados en una región determinada, considerando el concepto geodiversidad (p.e. Valentín, 2022; Marín-Cerón, 2023). Este término se ha definido de diferentes maneras como: Geodiversidad o diversidad geológica, patrimonio geológico, ordenación y gestión del territorio y perspectiva económica integrando el concepto de geoparques (p.e. Zapata et al, 2014).

Es común abordar diversas disciplinas geológicas, como la topografía, geomorfología, litología y geología estructural, al considerar y establecer una posición organizada en la gestión del territorio. Esto se realiza sin descuidar los componentes abióticos del entorno (p.e. Nieto, 2001; Valentín, 2022). La agrupación de estas disciplinas en el territorio influye en la frecuencia y distribución de elementos clave que impactan tanto en la economía como en la cultura, tales como el paisaje, el clima y la geografía. El propósito es analizar la relevancia geológica bajo el término “Patrimonio Geológico” (Carcavilla et al., 2007).

El patrimonio geológico es un interés general a las generaciones futuras por la riqueza natural de nuestro planeta que permite conocer la evolución del paisaje, ya con la ley 1185 de 2008 nombrada la ley de la Cultura cubre la intervención adecuada de estos puntos para su divulgación y turismo (Carcavilla U et al., 2015). Para el departamento de Boyacá, con su distintiva característica de suelos, minerales, patrimonio arqueológico e histórica-arquitectónica y su utilidad de conocimiento para generar un inventario de lugares de interés y analizar la información (Casas et al., 2017). La percepción del entorno se debe conocer como derecho para promover un desarrollo sostenible con el medio ambiente, regulando su utilización con normativas legales (Jaramillo et al., 2014). Por eso, la responsabilidad de las administraciones públicas y de la comunidad es de vital importancia para proporcionar esa unión del conocimiento y participación de los problemas que afecten en su entorno. Como resultado del uso de metodologías de valoración y clasificación se dará una concepción de riqueza geopatrimonial, en índices de geodiversidad para el procesamiento de la Cuenca del río Samacá (Boyacá), en sentido de aquellos valores originales para actividades geoturísticas y académicas, para despertar el interés por la conservación en el territorio y la democratización del conocimiento científico.

2. GENERALIDADES

2.1 PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN:

¿La estimación de la geodiversidad por métodos estadísticos (*sensu* Valentín, 2022) y modificado teniendo en cuenta la diversidad morfométrica, representa una herramienta para la validación de Lugares de Interés Geológico (LIG's) en ambientes sedimentarios altamente complejos de la Cordillera Oriental con miras a potencializar los procesos de geoeducación y geoturismo?

2.2 HIPÓTESIS:

La geodiversidad presente en áreas sedimentarias y estructurales altamente complejas, de la Cordillera Oriental de los Andes Colombianos, se puede aprovechar de manera efectiva para la creación de georutas o rutas escénicas, que resalten las características geológicas únicas de la región, ofreciendo oportunidades educativas y recreativas.

2.3 OBJETIVO GENERAL

Estimar la Geodiversidad presente en la cuenca del Rio Samacá a partir de dos métodos: estadísticos (*sensu* Valentín, 2022) y modificado con la diversidad de los índices morfométricos, como herramienta para la creación de itinerarios goecientíficos y geoturísticos.

2.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Conformar una base de datos nativa de ArcGIS de la cuenca del rio Samacá (escala 1:10.000) seguido de un inventario preliminar de Lugares de Interés Geológico (LIG's).
- Estimar la Geodiversidad con la metodología estadística propuesta por (*sensu* Valentín, 2022).
- Interpretar la variabilidad de los índices morfométricos (Argyrius, 2016) e incorporar la diversidad morfométrica en el análisis estadístico.
- Analizar los resultados en el contexto de la propuesta de gestión del territorio hacia el geoturismo y la geoeducación.

3 CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

La cuenca sedimentaria Cordillera Oriental, abarca aproximadamente 60.000 km² desde el Macizo de Quetame hasta los límites con la Serranía del Perijá (Upme, U. T. P, 2018), presenta un cinturón plegado y fallado como resultado de procesos y acontecimientos geológicos, principalmente asociados a su evolución tectónica bajo un régimen transgresivo (Acosta, 2004). En gran parte del área de estudio, prevalece un estilo estructural mayormente compresivo, evidenciado en pliegues y fallas de extensión regional, aparentemente interconectadas entre si (Dickey, 1941).

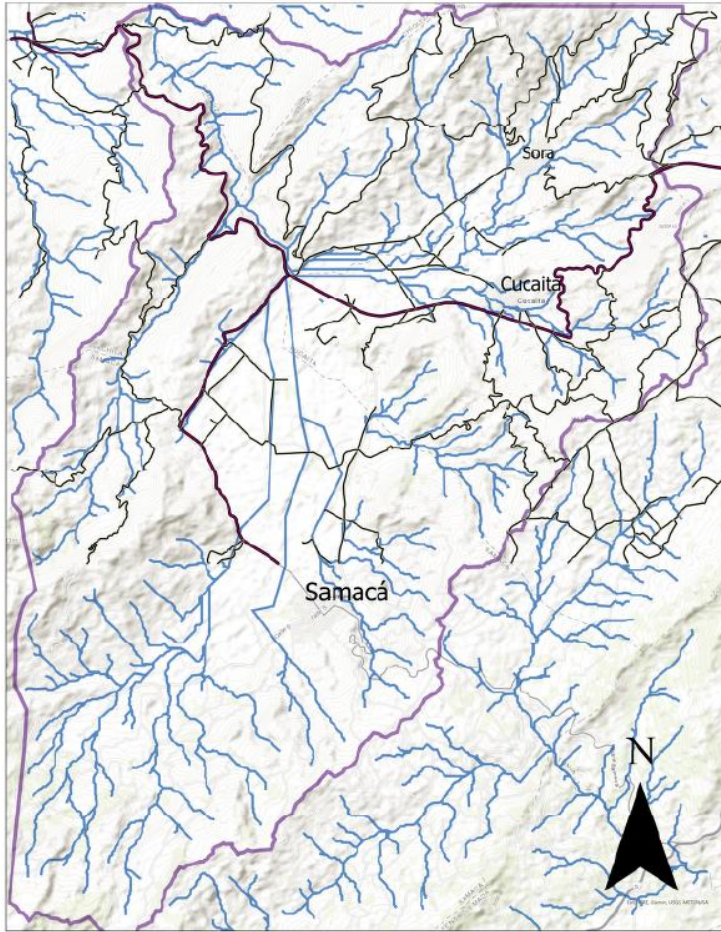
En el caso específico del departamento de Boyacá, la geología regional de la zona se caracteriza por la presencia de diversas formaciones rocosas, principalmente sedimentarias del periodo Cretácico, tales como la Formación Paja, San Gil inferior y superior, Churuvita, Conejo, Plaeners, Labor y Tierna, así como la formación Guaduas. Los procesos antrópicos, junto con los eventos meteorológicos en el territorio boyacense, ejercen influencias notables en los aluviones del periodo Cuaternario (Renzoni et al., 1967)

Localmente, la cuenca hidrográfica (p.e. cuenca del río Samacá), situada en cercanía a los municipios como Cucaita, Sora y Samacá, abarca una porción del territorio de la Provincia Centro de Boyacá junto con otros 11 municipios y la capital, conocida como Tunja. Esta zona se destaca por su valioso patrimonio natural, donde una variada gama de cultivos como la cebolla y la papa que prosperan en esplendor. Además, cada municipio tiene un rico patrimonio cultural, histórico y arquitectónico, reflejado en el paisaje de la región y académico de la historia de nuestro país (Báez Osorio, et al 2019).

La red hidrografía de la zona de estudio incluye el Río Samacá, Río Gachaneque, Quebrada Churuvita, Quebrada la Honda, Quebrada Soacha, Quebrada Chareva, Quebrada Alcalá, Quebrada el Chulo, Quebrada Porquería, Quebrada Tintoque Quebrada las Cruces, Quebrada Porquería, Quebrada el Chulo (INGEOMINAS, 1976). Estos cuerpos de agua son de la cuenca del Río Medio y Bajo Suárez, según el Plan de Ordenación y Manejo de las Cuencas Hidrográficas y Acuíferos de Corpoboyacá. Se encuentra atravesada por importantes vías de comunicación, como las carreteras principales que conectan la capital del departamento con Sora, Cucaita y Samacá (CMGRD, 2012).

En cuanto a la actividad minera, está enfocada a la explotación de carbón, con una producción destinada a la exportación. Esta explotación se lleva a cabo en el miembro medio de la Formación Guaduas, distribuida en 8 mantos con espesores entre 0,70 y 2,0 metros. El municipio de Samacá posee 35.7 millones de toneladas, comparado con las 170.4 millones medidas para 2002 (UPME (Unidad de Planeación Minero-Energética), 2012), lo que ha generado una significativa cantidad de empleos directos e indirectos. Esta actividad ha contribuido de manera notable a la ampliación de oportunidades laborales e ingresos, promoviendo así el desarrollo económico de la región.

El área se distingue por su elevada altitud de 2.665 metros sobre el nivel del mar, lo que confiere un carácter frío al 68.89% de su territorio, mientras que el restante 31.11% corresponde a zonas de paramo. En términos climáticos, prevalece un clima templado a frío, con temperaturas que oscilan entre los 15° y 22°C, (Naranjo, 2021). clasificación se traduce en un periodo seco, donde los meses de junio y julio marcan las temperaturas más bajas del año (CMGRD, 2012).



Mapa de Localización Cuenca del río Samacá
Leyenda

Via	— Via Tipo 5
Tipo_Via	~ Drenajes dibujo
— Via Tipo 1	□ Cuenca río Samaca
— Via Tipo 3	
— Via Tipo 4	



Figura 1 Mapa de Localización Cuenca del río Samacá.

4 MARCO TEÓRICO O MARCO CONCEPTUAL

A principios de la década de 1990, surgió el concepto de geodiversidad, aunque se caracterizó por tener interpretaciones diversas con términos relacionados a geología ecológica y geoconservación, sin que ninguna de ellas predominara en ese momento (Zwoliński et al., 2018). Mientras tanto, fue en la cumbre de Rio de Janeiro en 1992 donde la palabra “biodiversidad” se popularizó y se empezaron a acuñar términos relacionados como geodiversidad, edafo-diversidad y patrimonio geológico. A pesar de que en aquel momento estos conceptos no fueron ampliamente difundidos ni formalmente establecidos, se comenzaron a explorar sus interacciones, abordando la diversidad y características geológicas, geomorfológica e hidrológicas que influyen en la evolución del paisaje. (Carcavilla et al., 2008).

Entre las definiciones más comúnmente empleadas que distinguen la geología, geomorfología y edafología como componentes del medio natural abiótico, Nieto (2001) “*el número y variedad de estructuras (sedimentarias, tectónicas, materiales geológicos (minerales, rocas, fósiles y suelos), que constituyen el sustrato de una región, sobre las que se asienta la actividad orgánica, incluida la antrópica*” e incluyendo Gray (2004) es “*el rango natural de diversidad de rasgos geológicos (rocas, minerales y fósiles), geomorfológicos (formas del terreno y procesos) y suelos, incluyendo sus relaciones, propiedades, interpretaciones y sistemas*”. Su propuesta conceptual sostiene el proceso de revisión y recopilación de diversidad definiciones con el objetivo de llegar a una conceptualización unificada involucro el análisis de distintas acepciones de geodiversidad (Carcavilla et al., 2008).

La geodiversidad de un territorio a escala local, regional o global, a partir de ciertas frecuencias en la distribución entorno a la cantidad de elementos abióticos por unidad de área (*sensu* Valentín 2021) como un análogo a la biodiversidad. Su validación inicial se puede hacer mediante inventarios de Lugares de Interés Geológico (LIG), que pueden catalogarse según su valor científico, didáctico o turístico. A nivel mundial existen pocas figuras en las que zonas de alta geodiversidad sean proclamadas a su vez como áreas protegidas, encontrándose una dicotomía entre Parque Nacionales Naturales, Reservas Naturales, etc, donde se prioriza la biodiversidad de un lugar determinado.

4.1 ÁREAS PROTEGIDAS:

Las áreas protegidas son áreas definidas como reservorios vitales de la diversidad biológica para todo el mundo, reguladas y administradas para alcanzar objetivos de riqueza ecológica, paisajística y social para conservar tierra o agua que benefician a la localidad, nación y mundo en el presente y en el futuro. También, son espacios especialmente para el turismo, investigación y educación biológica y cultural. Hasta ahora esta figura de protección no considera la geodiversidad. Solo la figura de la UNESCO llamada Geoparques, hace alusión a la importancia de la geología en un área de reserva definida.

4.2 ECOSISTEMA:

El ecosistema es un conjunto de sistemas naturales en interrelación con el entorno (subsistemas meteorológicos, hidrológicos y suelo-geomorfológicos) como unidad fundamental de organización en ecología, y de la biósfera producto de una evolución de infinitos procesos e interacciones que interactúan espacial y temporalmente. En teoría de sistemas, el ecosistema debería ser analizado en una relación bio-geodiversidad, y servicios geo-ecosistémicos (Peña et al., 2016)

4.3 ELEMENTOS ABIÓTICOS (EA):

Son elementos fisicoquímicos que posee un medio, que no dependen directamente de los seres vivos, estos elementos se pueden agrupar en: compuestos inorgánicos, compuestos orgánicos, factores climáticos y factores edáficos

- **Clima:** El clima es un elemento o fenómeno meteorológico de un lugar y que caracteriza el estado medio en la atmósfera con sus variaciones anuales para dar un carácter individual a la influencia de los seres vivos (Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales, 2019).
- **Geología:** Es la ciencia que estudia la dinámica a lo largo del tiempo geológico, ocupando los procesos que percuten en el interior y superficie terrestre. Tal la importancia de esta geociencia que ayuda a la prevención y entendimiento de la tectónica de placas,

yacimientos minerales, fenómenos naturales y cambios climáticos (Tarbuck & Lutgens, 2010).

- **Geomorfología:** La geomorfología es una rama de la Geología y se encarga del estudio del relieve de la superficie generados por procesos exógenos y endógenos sobre las rocas en escalas regionales a locales (Tarbuck & Lutgens, 2010).
- **Hidrología:** La hidrología evalúa el comportamiento de la precipitación anual, la extensión de la cuenca hidrográfica, los volúmenes de agua que se manejarían por efecto de la escorrentía superficial, las corrientes naturales del área y sus posibles desviaciones y las alternativas del control de inundaciones (Escuder & De Hidrología Subterránea, 2009).
- **Edafología:** Estudio del suelo en conexión a obtener los mejores rendimientos agropecuarios, conociendo sus características, origen y distribución por su función de soporte de las diferentes actividades del recurso del suelo (PORTA, J., et al 1994).

4.4 GEOCONSERVACIÓN:

Conjunto de acciones particulares que adoptan medidas de conservación del patrimonio geológico, ayudándose con herramientas científicas y de planeación para reconocer su fragilidad asegurando el mantenimiento natural de los procesos y permitir su evolución. También abarca los valores culturales, estéticos, paisajísticos, etc. (Carcavilla et al., 2008).

- **Patrimonio Geológico Paleontológico:** Son elementos dentro de la Geodiversidad que, por su interés científico, didáctico que deben ser preservados. Involucrando factores descubiertos en la evolución del planeta en la disciplina de la geología. Para su valoración se consideran tres aspectos fundamentales: Valor intrínseco, potencialidad de uso y riesgo de degradación (Carcavilla U et al., 2015).
- **Lugares de Interés Geológico:** Zonas visitadas dentro del marco de patrimonio geológico y paleontológico de la zona de estudio que conservan elementos naturales, hay dos tipos: Los genéricos: que se pueden caracterizar por su medida de gestión para estrategias departamentales o nacionales; y los específicos: que son parecidos a un geotopo en un territorio específico que condicionan criterios de valoración para tener un nivel de conservación (Lema, H & CSIGA, 2007)

- Geo sitio: Se refiere a un bien de un interés geológico o paleontológico dentro del patrimonio natural de la humanidad, por consiguiente, entra como un tipo especial de un geotopo que permiten un estudio de registros de la evolución del planeta abarcando todas las áreas y procesos geológicos (Gallego, 1998)

5 METODOLOGÍA

Para el desarrollo de la investigación acerca de la cuantificación de la geodiversidad en la cuenca hidrográfica del río Samacá (municipios Cucaita y Samacá – Boyacá). Se consideró como punto de partida la metodología propuesta en el siguiente flujograma metodológico.

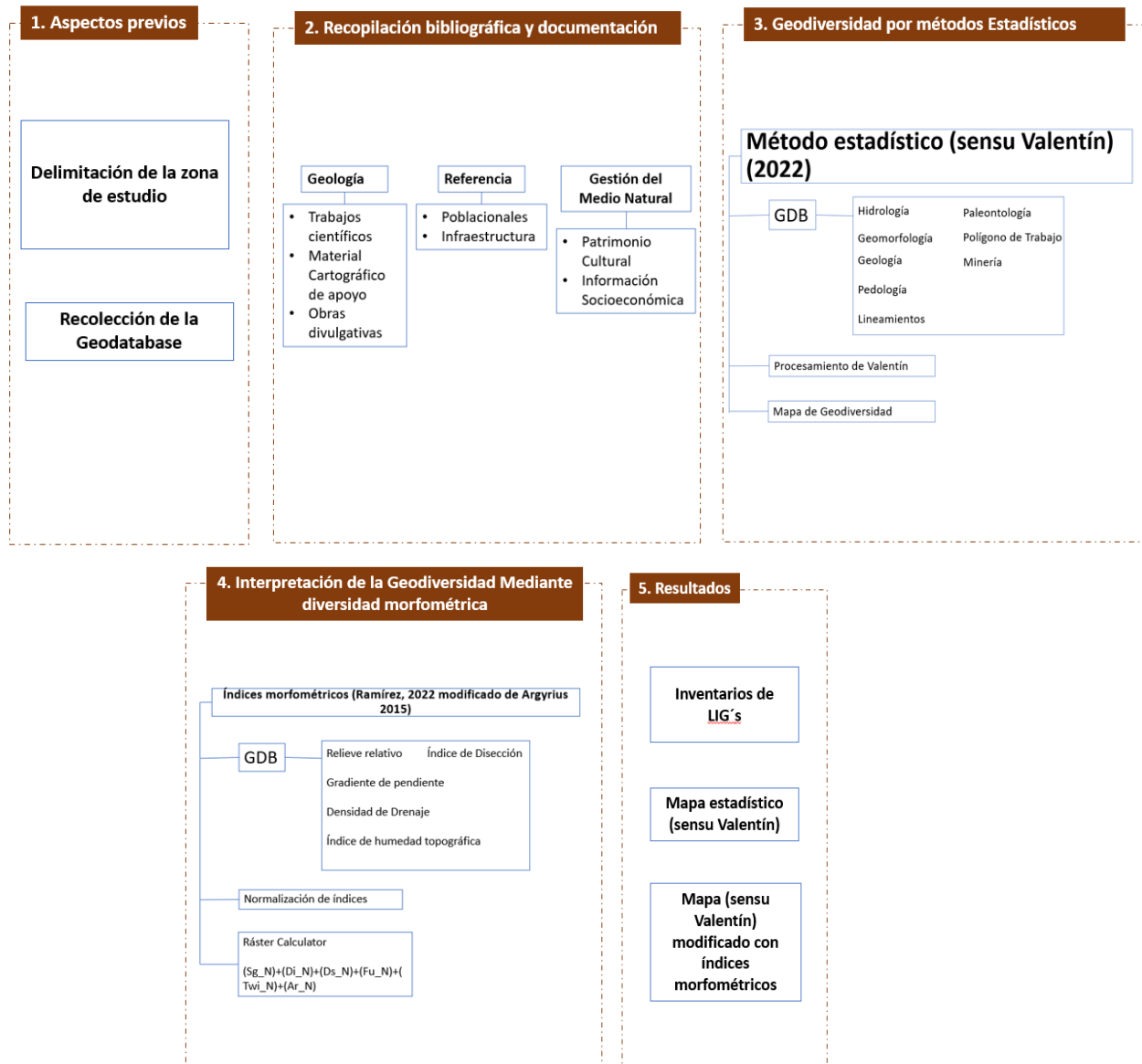


Figura 2 Flujograma metodológico para el cálculo de geodiversidad, Cuenca río Samacá

5.1 CONFORMACIÓN DE BASE DE DATOS E INVENTARIO DE LIG

En esta fase se hace la representación de la distribución espacial con un mapa base, a partir del Modelo de Elevación Digital o DEM con tamaño de celda de 10 metros. Para desarrollar de forma específica los mapas temáticos que parten de particularidades físicas de una cuenca, siguiendo el análisis morfométrico y adaptando variables lineales, de superficie, de relieve y drenaje.

Como un complemento a la geodatabase, se procedió a estructurar el inventario preliminar de LIG's, los cuales fueron obtenidos a partir de compartir el potencial de valores naturales y culturales para realizar actividades recreativas. La identificación fue ayudada por fuentes de información sobre turismo del sector, sistemas de información geográfica y validación en campo con habitantes del sector. Un total de 28 LIG's fueron georeferenciados.

5.2 RECLASIFICACIÓN SEGÚN ÍNDICES DE DIVERSIDAD

5.2.1 Clasificación Geomorfológica

Para la variable de geomorfología, se implementó la Propuesta Metodológica Sistemática para la Generación de Mapas Geomorfológicos Analíticos Aplicados a la Zonificación de Amenaza por Movimientos en Masa Escala 1:100000 del (Servicio Geológico Colombiano, 2015) que clasifica los diferentes ambientes morfogenéticos con base en la expresión e interpretación de los procesos registrados en el terreno (Ambiente morfoestructural, volcánico, denudacional, fluvial, marino profundo y costero, glaciar, eólico, kárstico, antropogénico y/o biológico) En el área de estudio, solo se delimitaron 26 geoformas del ambiente . A partir del modelo Hillshade y el mapa geomorfológico de la Plancha 191 – Tunja escala 1:100.000

5.2.2 Clasificación geológica

Para determinar la clasificación geológica de la zona, se utilizó la Plancha 191-Tunja, escala 1:100.000 del servicio Geológico Colombiano, donde el proceso de obtener información en campo define más las unidades litoestratigráficas. Además, elaborando mapas de sombras o Hillsahade a

diferentes grados 0° - 45° - 90° - 180° - 270° - 360° y con el Software Catalyst se obtuvieron las tendencias de lineamientos estructurales interpolándose con las evidencias cartográficas en el mapa geológico 1:100.000 del Servicio Geológico Colombiano.

5.2.3 Clasificación Hidrológica

A través del geoprosesamiento en el software ArcGIS se calculó y determino la red hidrológica de ordenes basándose en el método de clasificación de Strahler. A partir de los siguientes pasos: (I) Se realizo un arreglo a las imperfecciones al DEM con la herramienta Fill; (II) Para generar la red hidrológica a partir del DEM se utilizar como herramientas el Flow direction y Flow accumulation para la determinar la dirección del flujo y la acumulación de acuerdo a la pendiente; (III) Con la herramientas Raster Calculator se aplicó el comando Log 10 para identificar la red hídrica de la Cuenca del rio Samacá; (IV) Se le asigno un condicional (≥ 3); (V) Con la Herramienta Steren link se ejecuta el condicional y el Flow direction, por último, (VI) Se ejecuta la herramienta Stream order con el método Strahler para determinar el orden de los drenajes.

5.2.4 Clasificación climática y eco sistemática

Con los datos de la geodatabase obtenidos del IDEAM (2017), la clasificación del clima de la cuenca se dividió en 3 tipos de clima: Muy frio Semihúmedo, Frio Semiárido, Frio semihúmedo. La clasificación de ecosistemas fue tomada de datos del IDEAM (2017) y fue distribuida según sus atributos en 13 categorías, obteniendo un mapa de coberturas categorizado según el (IDEAM, 2010). La clasificación de coberturas se elaboró con datos del IDEAM (2017) y se distribuyó según sus atributos en 10 categorías.

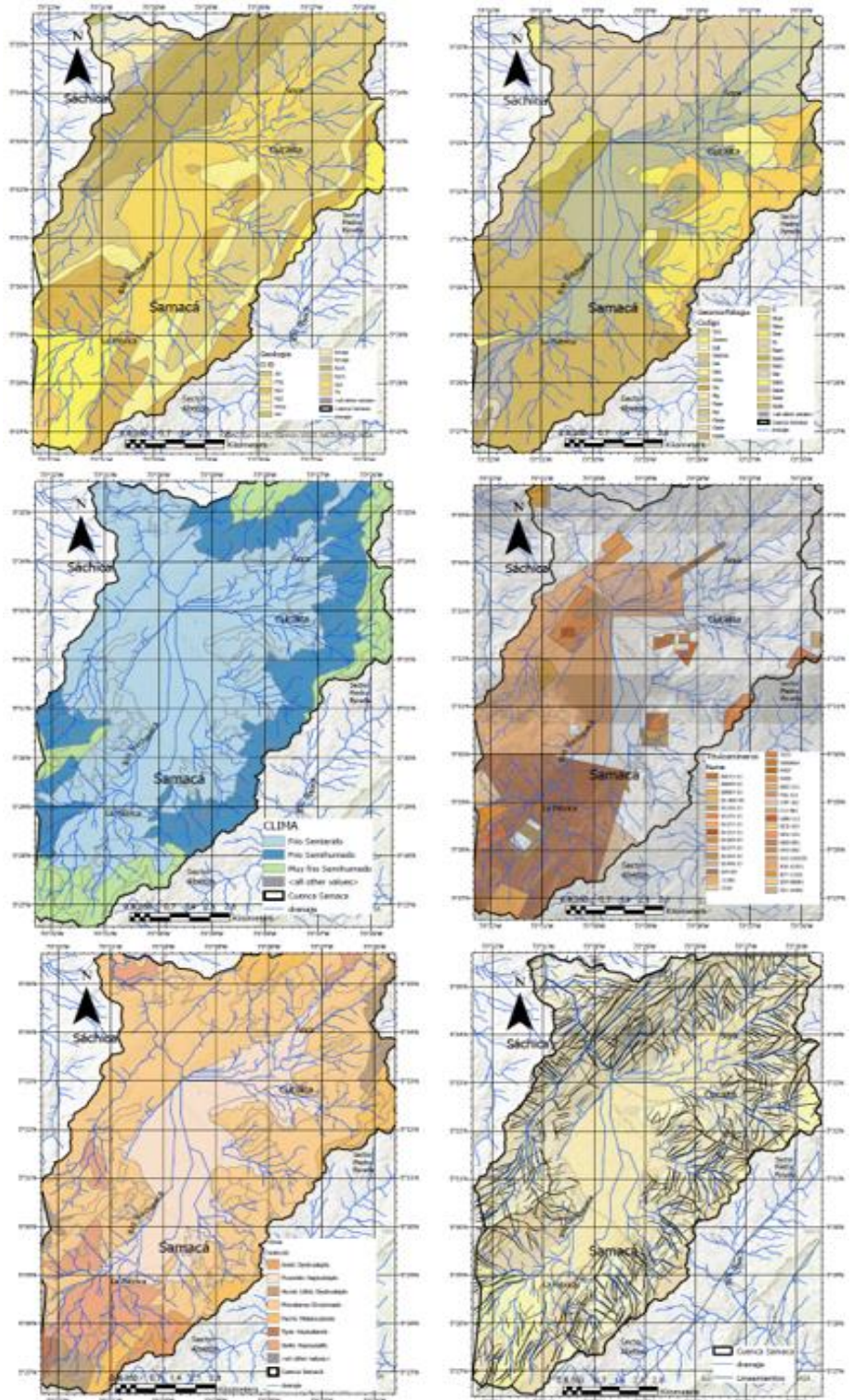


Figura 3 Mapa de variables temáticas Cuenca del río Samacá. (a) Geología; (b) geomorfología; (c) clima; (d) títulos mineros; (e) suelos y (f) estructuras (Referencias en el texto Tabla 1)

5.3 METODOLOGÍA PARA EL CÁLCULO DE GEODIVERSIDAD

Autores como (*sensu* Valentín, 2022), recientemente propusieron el desarrollo una herramienta para la evaluación de geodiversidad a partir de varias metodologías instauradas 20 años atrás en diferentes zonas del mundo, usadas para el ordenamiento territorial, georutas, divulgación científica, correlación de riesgos y la conservación de elementos abióticos. La cuantificación está escrita en lengua Python 2.7 para el Software ArcGIS nombrada como “geodiversidad” y agrupa diferentes clasificaciones que no son excluyentes entre sí, por sus variables utilizadas y proporcionando como resultado divisiones tipo cuadrícula de tamaño personalizable con el objetivo de definir la conexión según su geodiversidad, pertenecientes al conjunto abiótico almacenados en formato raster divulgándolo como fenómenos del mundo real.

La base de datos conformada incluye diferentes mapas temáticos visualizados mediante una cuadrícula, para establecer los mapas de diversidad geológica, geomorfológica, paleontológica, estructural, pedológica (suelos), climática, hidrográfica, diversidad de ocurrencias minerales (títulos mineros). Cada uno de estos Field debe conocer el nombre de cada unidad, tamaño de la cuadrícula en metros y el sistema de referencia. En este trabajo se usó un tamaño de celda de 600 m. Los mapas de diversidad obtenidos se explican a continuación:

- **Diversidad geomorfológica:** Este subíndice se tomó de Pereira et al (2013), lo cual consiste en la suma de los subíndices de diversidad de relieve y diversidad hidrográfica.
- **Diversidad geológica:** Este subíndice como el precedente se tomó de Pereira et al (2013), lo cual identifica los sitios en los que se han registrado la presencia de unidades litológicas y se plasmaron en el mapa.
- **Diversidad estructural:** Este subíndice se toma de Silva et al. (2013), y se desarrolla a partir de la influencia de las estructuras geológicas en el paisaje geomorfológico.
- **Diversidad ocurrencia de minerales:** Este subíndice se toma de Silva et al. (2013), donde se toma la cantidad de actividades mineras presentes en la zona de estudio.
- **Diversidad climática:** Este subíndice se toma de Argyriou et al. (2016), donde esta clasificación climática prueba el enfoque de Kottek et al. (2006) que analiza la temperatura y la precipitación de cada cantidad de elementos abióticos por zonas del área de estudio.

- **Diversidad edafológica:** Este subíndice se toma de la bibliografía de Silva et al. (2013). Aquí se toma el conteo de las unidades de suelo que se encuentran en el área de estudio.
- **Diversidad hidrológica:** Este subíndice se toma de Pereira et al (2013), donde se calcula dividiendo el mayor orden de jerarquía de los cauces presentes en cada sector, entre dos, y posteriormente aproximándolo al mayor entero más cercano.
- **Geodiversidad final:** la cantidad total de elementos abióticos finales, dado que cada elemento presenta un mismo valor.

5.4 ANÁLISIS DE CUENCAS A PARTIR DE ÍNDICES MORFOMÉTRICOS

Esta metodología radica en las variables geomorfométricas derivadas por el Modelo de Elevación digital de la zona de estudio. Usando el enfoque de procesamiento Argyriou et al. (2016), se realizará la categorización de los índices morfométricos. Se utilizaron distintos índices para analizar la información geomorfológica: el Gradiente de pendiente (Sg) y el índice de disección (Di). Por otro lado, el índice Gradiente relativo (Ar) se aplicó para evaluar la información morfotectónica. Además, se incorporaron índices adicionales como la Densidad de drenaje (Dd), la Frecuencia de corriente (Fu) y el índice de humedad topográfica (Twi) para el análisis hidrológico, Estos últimos también ofrecen valiosa información para el estudio geomorfológico y morfotectónico.

- **Relieve relativo (Ar):** Este índice representa el desplazamiento vertical reciente para dar información morfotectónica, sobre la diferencia de elevación de los elementos en la región de interés. (Ciotoli et al., 2003)
- **Índice de disección (Di):** Representa la diferencia entre el relieve absoluto y el relieve relativo, simbolizando la interacción entre la erosión y deposición a fin de sugerir la evolución del terreno (Mukhopadhyay, 1984; Sen, 1993).
- **Gradiente de pendiente (Sg):** Determina el cambio que ocurre en la elevación entre una celda y con las de su alrededor. Los valores de gradiente bajos son superficies planas, en cambio, los valores altos son pendientes muy pronunciadas (ESRI, 2014).
- **Densidad de drenaje (Dd):** Informa sobre el potencial de escorrentía de acuerdo con la longitud de afluentes dentro de la cuenca (Horton, 1945). Además, indica sobre ciertos parámetros como el relieve, la permeabilidad, etc. (Strahler, 1964; Awasthi et al., 2002).

- **Frecuencia de corriente (Fu):** La frecuencia de la corriente (Fu) evalúa el número total de segmentos de la corriente en el área de la cuenca (Horton, 1945) Los valores altos de Fu (>5) están asociados con material de superficie impermeable, alto relieve y baja capacidad de infiltración, mientras que los valores bajos de Fu implican material de superficie permeable, bajo relieve y alta capacidad de infiltración
- **índice humedad topográfica (Twi):** Representa la acumulación de humedad de acuerdo con la superficie en regiones con bajo y alto relieve. Valores bajos en valles en forma de V, superficies de alto relieve y crestas y valores altos en superficies de bajo gradiente y depósitos aluviales (Migon et al., 2013).

Para iniciar el proceso de geoprocesamiento en ArcGIS Pro, es crucial contar con un modelo digital del Terreno (DEM) en proyección plana CMT-12, actualizado al estándar más reciente del país. Entre las herramientas utilizadas, se emplea “Create Fishnet” donde se especifica el nombre de salida como “Fishnet”, un tamaño de celda de 600 x 600, y se deshabilita la opción de etiqueta de punto.

Posteriormente, se ejecutó la herramienta “Zonal Statistics as Table”, con el Fishnet como entrada y el DEM con interpolación de píxeles vacíos como valor de entrada raster, y lo nombramos “Fishnettable”. A continuación, se procede a añadir unión con la herramienta “Add Join”, incorporando el Fishnet como tabla de entrada y el Fishnettable como tabla de unión. Luego, se utiliza la herramienta “Feature to Point” con el Fishnet como entrada y se nombra el conjunto de puntos como “Points”. A través de la interpolación IDW, se obtiene un raster con herramientas de análisis espacial, donde se emplean los puntos como entrada y el campo de valores z, así como se especifica la extensión de salida como archivo raster. Para el cálculo el índice morfotectónico que indica áreas con desplazamiento verticales más pronunciados, se recurre a la calculadora raster, dividiendo el índice “Ar” / DEM.

La capa de pendiente se genera utilizando la herramienta “Slope” en las herramientas de análisis espacial, y luego se realiza una reclasificación en seis rangos. La densidad de drenaje se calcula de manera análoga al método de Valentin, y al finalizar, se aplica la herramienta “Line Density”. Seguidamente, se utiliza la capa de cursos de Stream Feature para calcular índice de frecuencia de corriente (“FU”) mediante la herramienta “Kernel Density”, especificando “grid code” como

campo de población. Para el último índice se emplea raster calculator para los el siguiente calculo $(\text{SlopeD} * 1.579796) / 90$ y así tendremos Slope 2, luego se tiene que condicionar el raster con la formula $\text{Con}(\text{Slope2} > 0, \tan(\text{Slope2}), 0.001)$ donde el resultado lo nombraremos Tanslope, para determinar el siguiente paso con la formula $(\text{Flow Accumulation} + 1) * \text{cellsize}$ que donde se obtiene como resultado la capa FAScaled y ya para finalizar con $\text{Ln}(\text{FAScaled} / \text{Tanslope})$ se tiene el índice TWI (TOPOGRAPHIC WETNESS INDEX).

Es importante normalizar los seis índices utilizando la formula en la herramienta Raster Calculator (“capa – valor mínimo estadístico”) / “(valor máximo estadístico – valor mínimo estadístico)”. Luego se suman todos los índices normalizados $(\text{Sg_N}) + (\text{Di_N}) + (\text{Dd_N}) + (\text{Fu_N}) + (\text{TWIN_N}) + (\text{Ar_N})$, y se obtiene el Mapa de diversidad morfométrica normalizado.

En el presente estudio, se propone incorporar este último mapa de diversidad morfométrica, en el análisis de (*sensu* Valentín, 2022), como un complemento al procesamiento estadísticos, con el fin de evaluar si el mapa final resultante de (*sensu* Valentín, 2022), valida mejor la geodiversidad en un territorio como la cuenca del río Samacá.

6 RESULTADOS

6.1 CONFORMACIÓN DE GDB E INVENTARIO DE LIG'S (LUGARES DE INTERÉS GEOLÓGICO)

Dentro de la metodología explicada anteriormente, se integraron mapas temáticos de la Cuenca rio Samacá de varios Geo portales (escala 1:100.000) y con coordenadas geográficas establecidas MAGNA COLOMBIA BOGOTÁ. La determinación de la red hidrológica de órdenes se llevó a cabo a través de geoprocésamiento en el software ArcGIS, empleando el método de clasificación de Strahler basado en datos del Modelo de Elevación Digital (DEM). Los insumos proporcionada se verán en la siguiente tabla (Ver tabla 1)

Tabla 1 Tabla de información de suministros del área de estudio proporcionados por Geoportales.

GDB		
Información suministrada	Referencia	Año
Geomorfología	SGC	2015
Geología	SGC	2015
Paleontología	SGC	2015
Hidrografía	DEM	
Estructural	SGC y Catalyst	2015
Suelos	IDEAM	2017
Ocurrencias Minerales	SGC	2015
Clima	IDEAM	2017

Los LIG's en la cuenca del Rio Samacá fueron obtenidos a partir de compartir el potencial de valores naturales y culturales para realizar actividades recreativas. Así lograr una adecuada difusión de este Patrimonio en el área de estudio con un valor científico para que el acceso educacional sea relativamente fácil. La identificación fue ayudada por fuentes de información sobre turismo del sector, sistemas de información geográfica y habitantes del sector, para conformar 28 lugares de

interés, sitios clasificados dentro de las características: Valor científico (50 %); Turismo (27%) y Didáctico (23 %), como se observa en la figura 4 y Tabla 2.

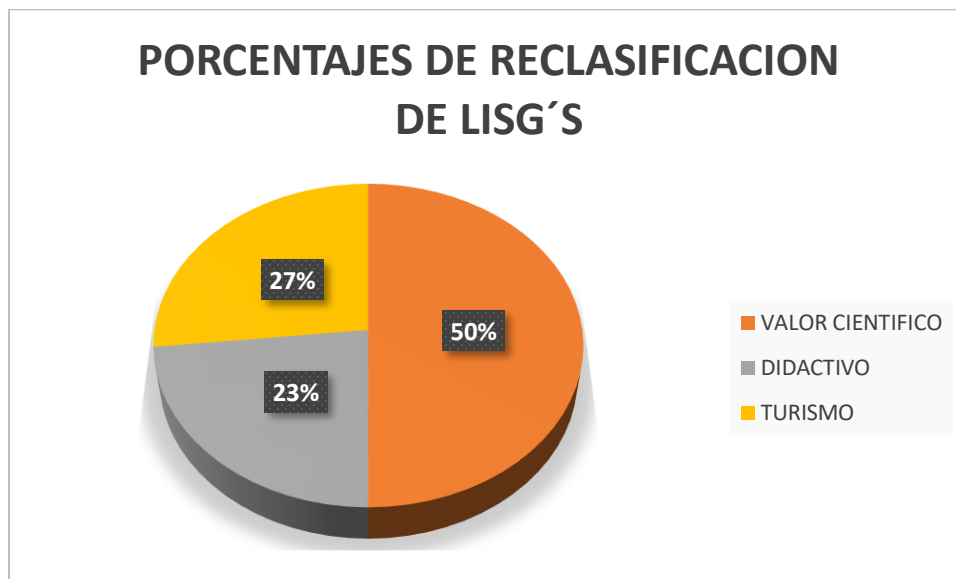


Figura 4 Porcentajes de reclasificación de LIG's

Tabla 2 Inventario de LIG's en la cuenca del rio Samacá.

LUGARES DE INTERÉS GEOLÓGICO "LIG'S"			
Cód	Clasificación	Descripción	Re-Clasificación
CP1	Geología	Planta la Libertad	didáctico
CP2	Geología	Sinforme	Valor científico
CP3	Geología	Antiforme	Valor científico
CP4	Geología	Falla Antiforme	Valor científico
CP5	geomorfología	Rio Samacá	didáctico
CP6	Geología	Plegamiento	Valor científico
CP7	geomorfología	Movimiento en Masa	Valor científico
CP8	Turístico	Mirador	Turismo
CP9	Geología	Plegamiento	Valor científico
CP10	geomorfología	Movimiento en Masa	Valor científico
CP11	geomorfología	Movimiento reptacional	Valor científico
CP12	Geología	Falla Antiforme	Valor científico
CP13	geomorfología	Movimiento en Masa	Valor científico
CP14	turístico	Mirador Anticlinal Arcabuco	didáctico
CP15	geomorfología	Mirador Pliegues	didáctico

CP16	Geología	Capas	Valor científico
CP17	Geología	Pliegues	Valor científico
CP18	Geología	Sinforme y Antiforme	Valor científico
CP19	Geomorfología	Valle	Turismo
CP20	Turismo	Casa de la Cultura Samacá	Turismo
CP21	Geología	Cooprocabon	didáctico
CP22	Geología	Planta San Miguel - Mina la Esperanza	didáctico
CP23	Geología	Mina Santa Martha - Milpa	didáctico
CP24	turístico	Mirador del Valle	Turismo
CP25	turístico	Templo Doctrino de Cucharita	Turismo
CP26	turístico	Museo de Antigüedades - Cucaita	Turismo
CP27	turístico	Casa Municipal de Sora	Turismo
CP28	turístico	Iglesia de Sora	Turismo

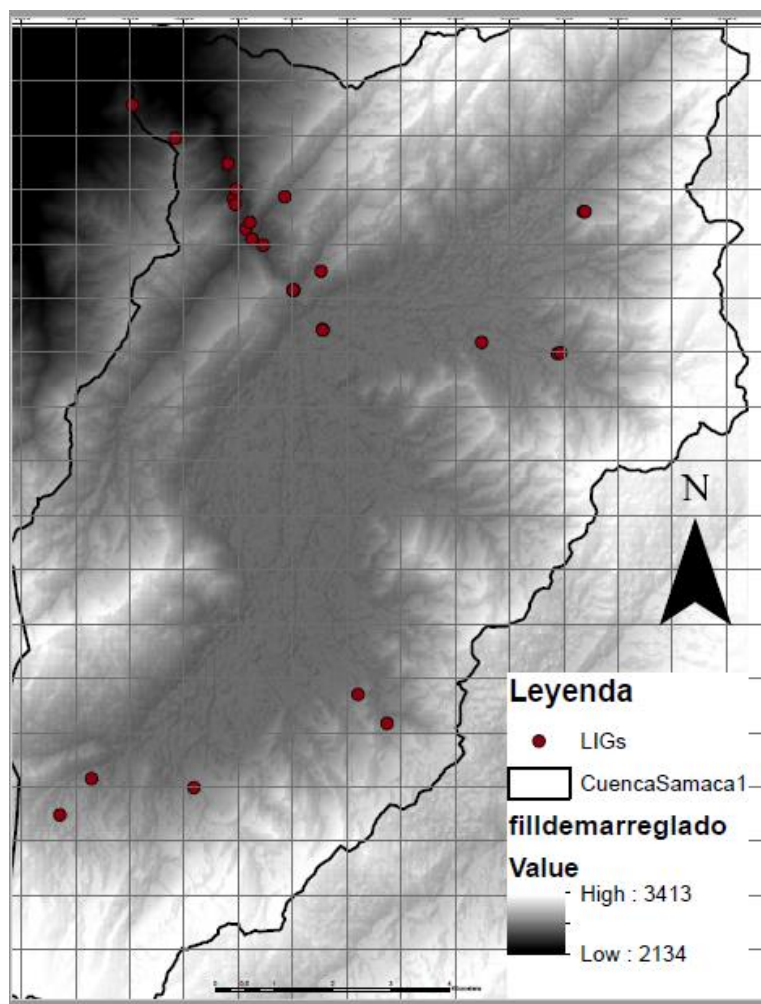


Figura 5 Mapa Puntos de Interés Geológico – Cuenca rio Samacá

6.2 ESTIMACIÓN DE LA GEODIVERSIDAD

Siguiendo la metodología expuesta para el cálculo de la geodiversidad por métodos estadísticos, se obtienen la reclasificación de los mapas temáticos como se describe a continuación:

6.2.1 Reclasificación subíndices de geodiversidad

Los datos obtenidos durante la clasificación mediante el análisis estadístico (*sensu* Valentín, 2022), se derivaron seis variables consideradas: clima, estructural, hidrología, geología, geomorfología y suelos (ver figura 5), Estos indicadores reflejan la estimación de la geodiversidad en el área de estudio, que reflejan la predominancia y demostrando así la influencia de los índices geológicos y estructurales en la cuenca.

En la mayor parte del área de investigación, se observa un claro predominio de un estilo estructural compresivo, atribuible a su ubicación en la cordillera oriental. Esta característica se manifiesta a través de estructuras que indican un carácter compresivo, manifestándose en pliegues y fallas de extensión regional. Esto explica las variaciones entre los extremos del valle y la parte central de la zona de estudio, como se aprecia en el mapa D de la figura 5, lo que sugiere una influencia en la geología de la zona, como si estuviera controlada estructuralmente en dirección NE. En cuanto al mapa E de la figura 5, la representación hidrológica revela una marcada concentración en el curso principal de drenaje, la cual disminuye en las áreas periféricas. Esta distribución se relaciona con la pedología (Figura 5f), uso del agua para cultivos. La mayoría de estos se encuentran en las llanuras aluviales.

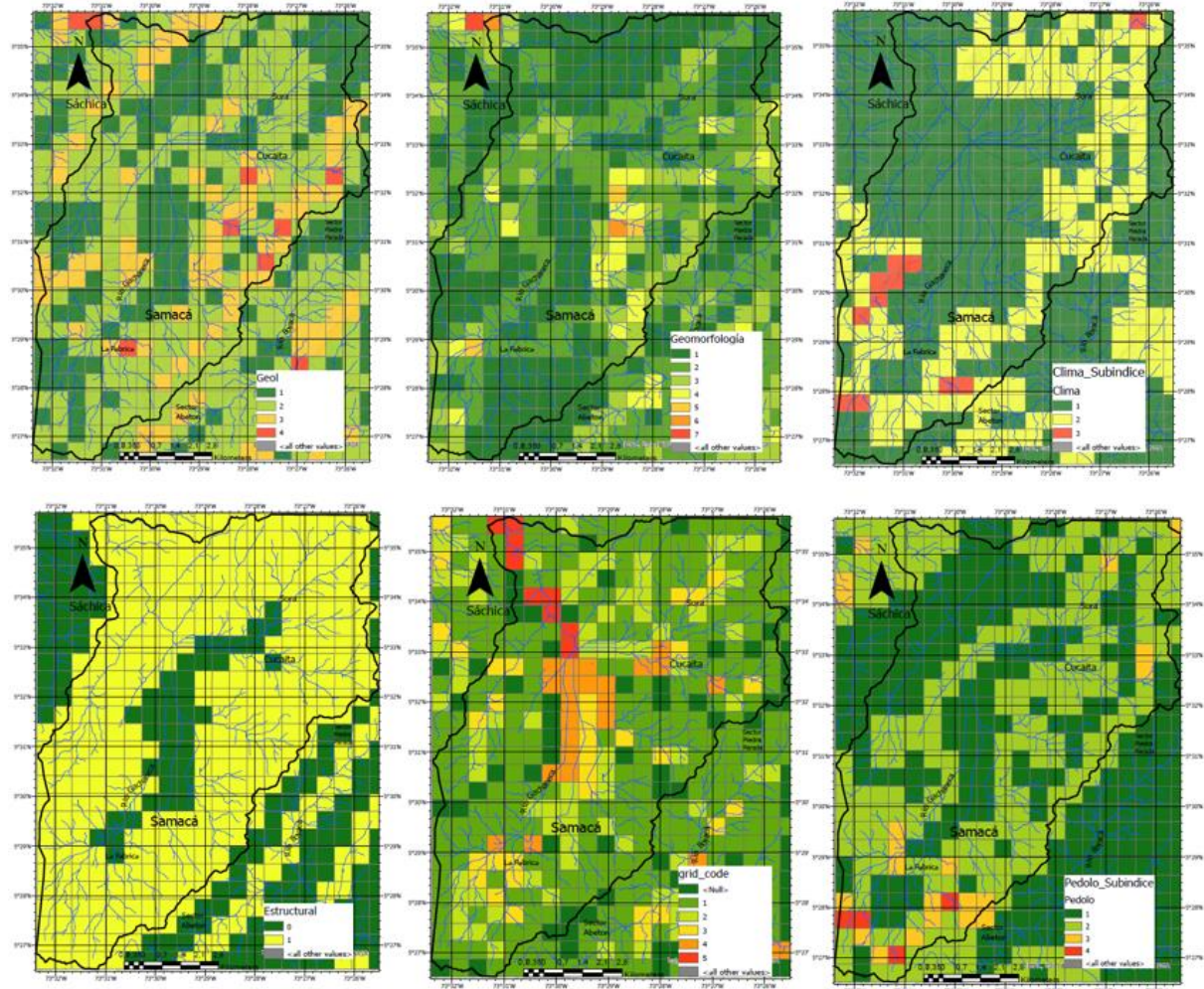


Figura 6 Mapas de índices reclasificados mediante el análisis estadístico (a) geología, (b) geomorfología, (c) clima, (d) estructural, (e) hidrología, (f) pedología.

6.3 MAPA DE GEODIVERSIDAD FINAL

La clasificación de la geodiversidad se fundamenta en la distribución de elementos abióticos (ver figura 5). Para lograr comparaciones entre distintas zonas y analizar la división del área de estudio, se propuso una resolución de 600 metros. Los valores de estos elementos se calcularon en un rango y luego se clasificaron en cinco niveles para determinar la geodiversidad final: Muy Alta, Alta, Media, Baja y Muy Baja. Para la validación del método, se propone usar el inventario de LIG's en función de la geodiversidad. Con esto se obtuvo la figura 6, donde se analiza la distribución porcentual de los mismos en función de la geodiversidad estimada.

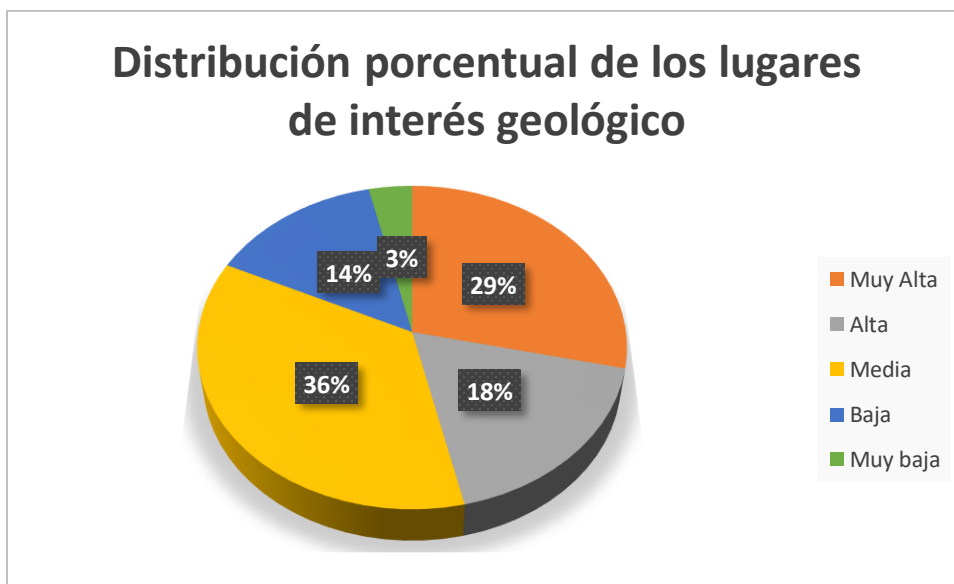


Figura 7 Porcentajes de distribución porcentual de LIG's

La distribución porcentual de los lugares de interés geológico se presenta de la siguiente manera: muy alta (29%), alta (18%), media (36%), baja (14%) y muy baja (3%), como se puede apreciar en la figura 6. Estos LIG's están distribuidos en dos áreas principales: Sector noroeste - carretera a Villa de Leyva; a lo largo de esta ruta se pueden identificar cortes en la carretera que exponen diversidad de LIG's didácticos y de interés científico asociada a la diversidad de estructuras geológicas (p.e. estratos, pliegues, fallas y cicatrices de movimientos en masa). En el sector sur, hacia la vía que lleva hacia el municipio de Samacá, se concentran los LIG's con enfoque turístico y de patrimonio minero. Ver en la figura 7 la distribución de los LIG'S.

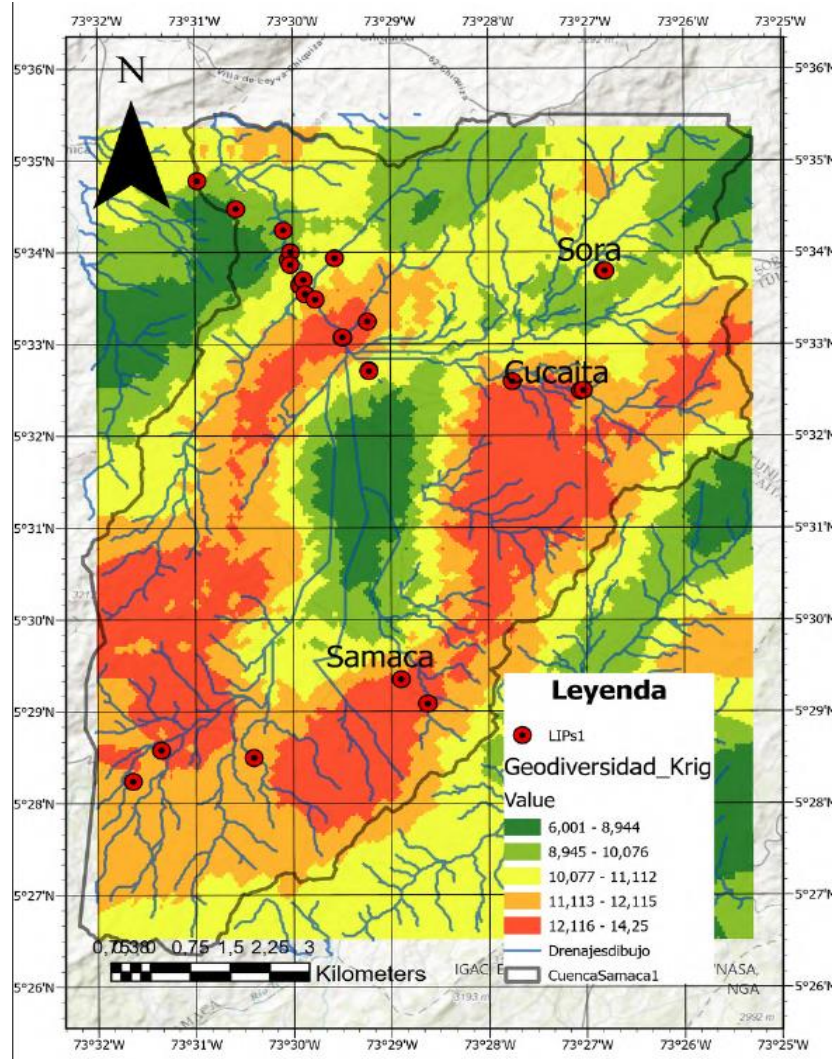


Figura 8 Mapa final de geodiversidad por métodos estadísticos – Cuenca rio Samacá

6.4 CLASIFICACIONES ÍNDICES MORFOMÉTRICOS

Se obtuvieron seis mapas de índices morfométricos con la metodología descrita. La variabilidad morfométrica ilustra los procesos de mayor relevancia en la evolución del paisaje de la zona de estudio. La figura 8 muestra los diferentes mapas obtenidos; allí claramente se observa las zonas de mayor diversidad asociadas marcadas por los índices Di (índice de disección), Ar (gradiente relativo) y Sg (gradiente de pendiente). En relación con los indicadores más significativos, como el diseño de la cuenca, se nota que el valle aluvial no exhibe signos de una actividad tectónica

activa. No obstante, en las zonas circundantes, se aprecia una clara actividad tectónica, tal como se ilustra en el mapa B de la figura 8. Además, los valores de F_u , que superan 5, se relacionan directamente con la presencia de material de superficie impermeable, ubicado en el área del valle, como se indica en el mapa D de la figura 8.

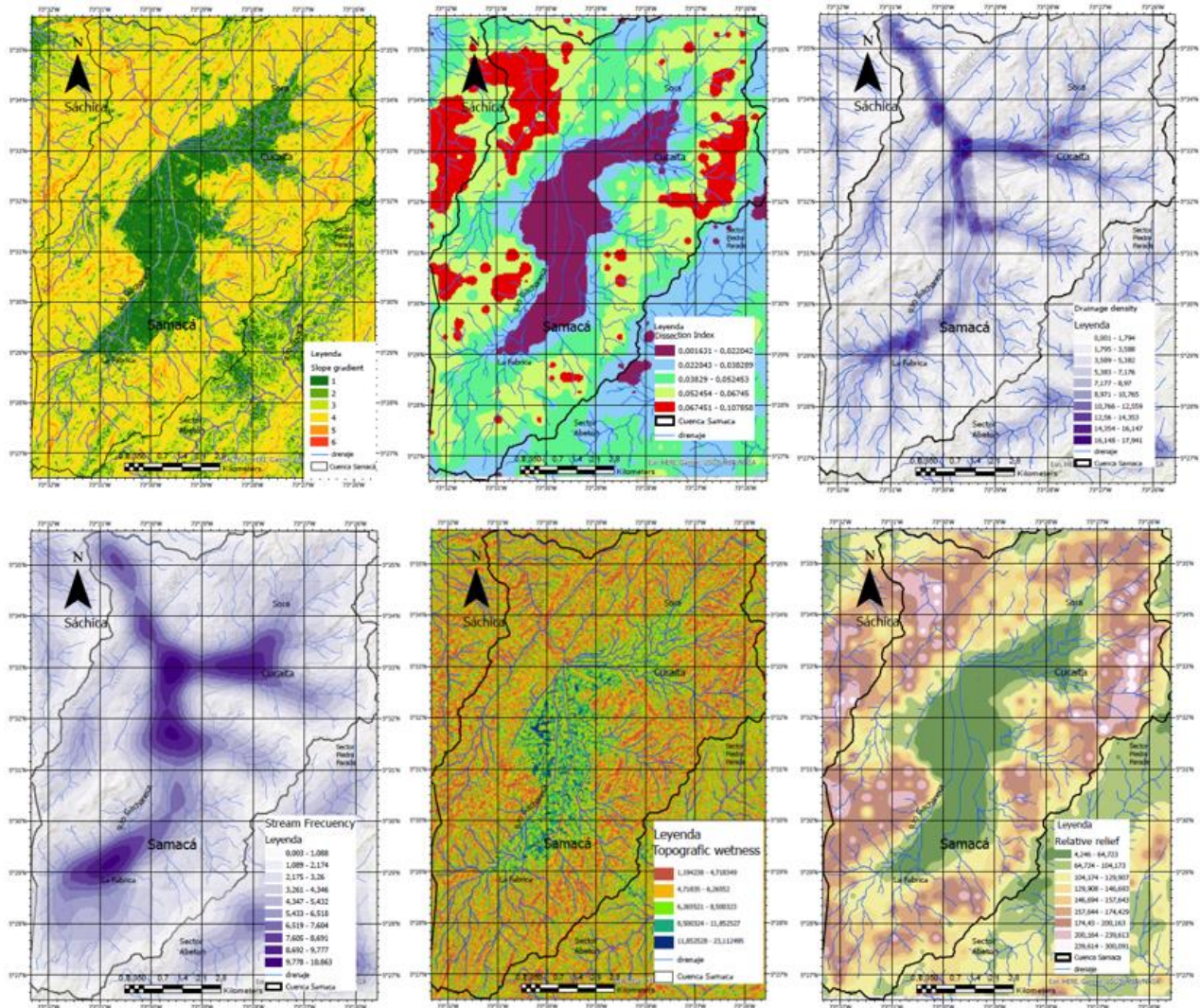


Figura 9 Mapas índices morfométricos – Cuenca río Samacá, (a) gradiente de pendiente; (b) índice de disección; (c) densidad de drenaje; (d) frecuencia de corriente; (e) índice de humedad topográfica; (f) relieve relativo

6.5 MAPA DE GEODIVERSIDAD MODIFICADO

Para comparar los mapas de geodiversidad (*sensu* Valentín, 2022) y su versión modificada incluyendo la diversidad morfométrica, se generó el mapa de geodiversidad modificado (Figura 8).

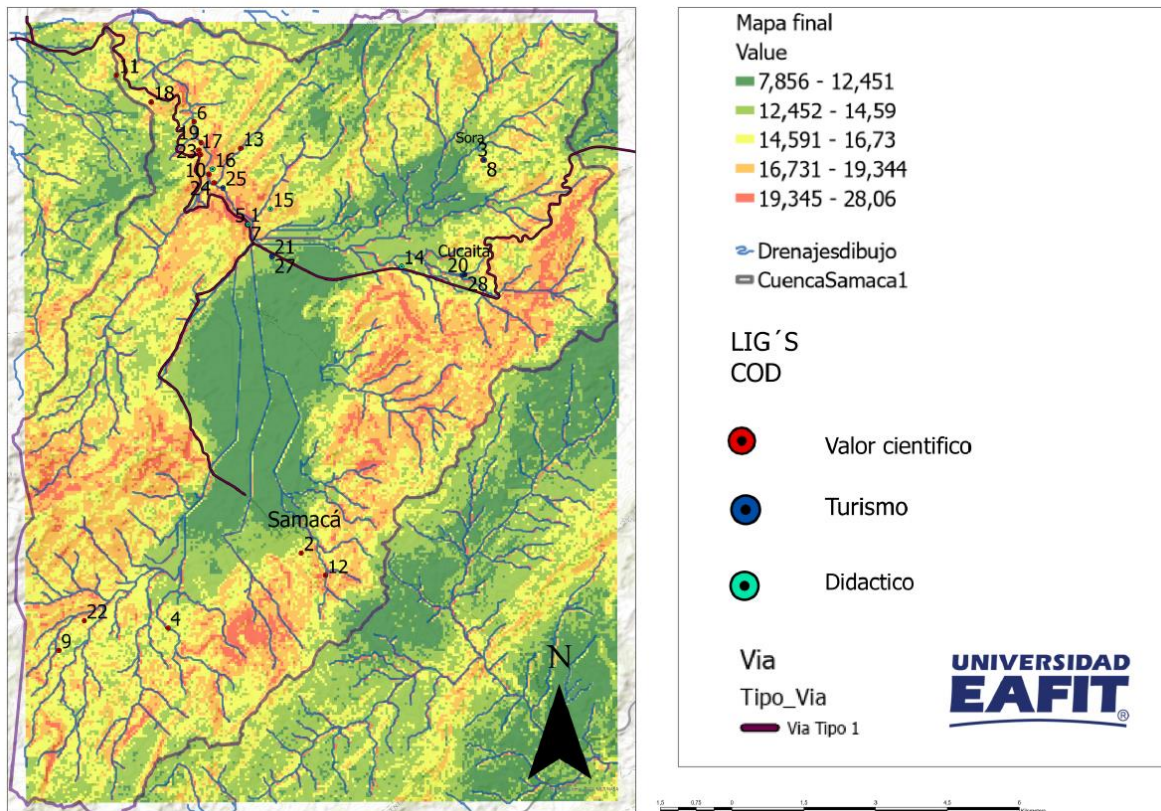


Figura 10 Mapa de Geodiversidad estadística modificado, Cuenca río Samacá

Este mapa que integra la diversidad morfométrica logra captar patrones de distribución más definidos al destacar los índices morfométricos, los cuales revelan aspectos clave de la topografía y los procesos naturales que influyen en la configuración del paisaje. Esto proporciona una comprensión esencial para la gestión adecuada del terreno. En el área de estudio, se observa un notable aumento en la alta y muy alta distribución de los lugares de interés geológico, lo cual está vinculado a componentes estructurales (estratos, fallas y plegamientos) y geomorfológicos significativos (depósitos aluviales, planicies, laderas afectadas por erosión hídrica y escarpes). La

distribución porcentual de los LIG's (Figura 10) se distribuye de la siguiente forma: muy alta (32%), alta (25%), media (25%) y baja (18%).

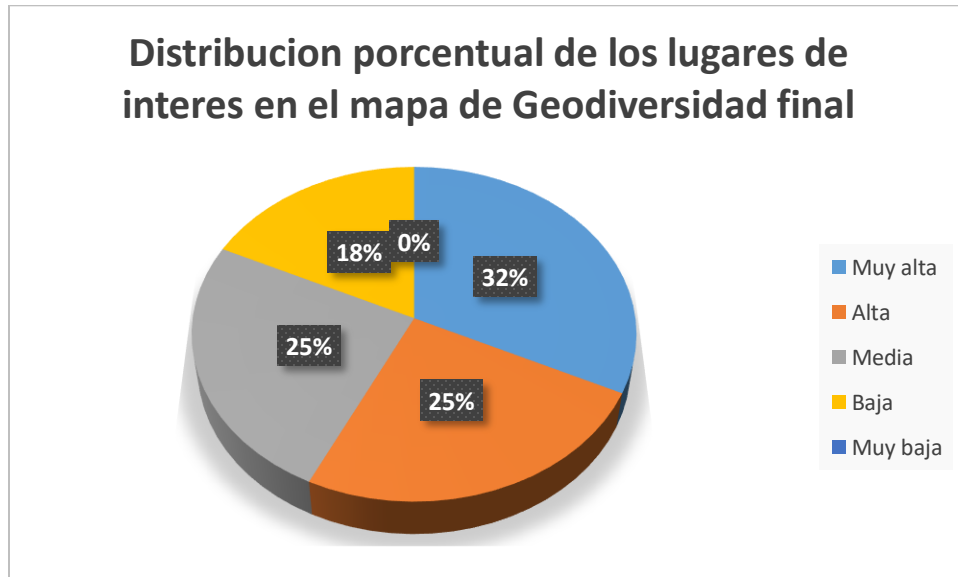


Figura 11 Distribución porcentual de los lugares de interés en el mapa de Geodiversidad final.

8 DISCUSIÓN

8.1 MAPA DE GEODIVERSIDAD ESTADÍSTICA MODIFICADO

A manera de discusión, es importante resaltar que el enfoque de (*sensu* Valentín, 2022), se basa en aplicar metodologías que agrupan diferentes clasificaciones, que no son excluyentes entre sí. Esto se logra mediante el uso de diversas variables abióticas y la proporción de cada cuadrícula para definir la geodiversidad en función de cada área de estudio. Esto hace que la metodología sea comparable con otras zonas a igual escala e igual cuadrícula, lo que es una gran ventaja frente a los métodos heurísticos que dependen del conocimiento y la valoración de expertos.

Por otro lado, la diversidad morfométrica se enfoca en analizar las variables geomorfológicas derivadas del Modelo de Elevación Digital. Estas son utilizadas para caracterizar los aspectos morfotectónicos e hidrológicos de la zona, mediante la metodología propuesta por (Argyrius,

2016), en el software ArcGIS, proporcionando un mayor detalle de las geoformas presentes en un lugar determinado en función de las fuerzas modeladoras (p.e. clima, agua y tectónica).

Ambos métodos son complementarios, el primero es rápido, tiene una plataforma de libre acceso y puede utilizar manejo de bases de datos con software libre como QGIS. Adicionalmente, tiene un bajo tiempo de computación. El cálculo de la diversidad morfométrica, por el contrario, necesita el uso de ArcGIS y un mayor tiempo computacional.

En comparación con la distribución porcentual de lugares de interés geológico en el método de Valentín, la metodología modificada, demostró un incremento del 37.5% en la categoría alta y muy alta. Por otro lado, se observó una disminución del 30% en la categoría media, un aumento del 25% en la categoría baja y una reducción del 7.5% en la categoría muy baja, como se puede apreciar en la figura 9. Este análisis abarcó lugares importantes para identificar y entender rasgos estructurales detallados en los paisajes de la zona. Los resultados muestran claramente la efectividad de la complementación de ambas metodologías para el estudio de la geodiversidad en ambientes sedimentarios y estructurales andinos de alta complejidad.

8.2 GEODIVERSIDAD COMO HERRAMIENTA PARA LA GESTIÓN DE PATRIMONIO GEOLÓGICO Y GEOTURISMO

En la región noroeste de la zona de estudio, se observa una rica diversidad de Lugares de Interés Geológico (LIGs). La metodología complementaria, indica un notable aumento del 37.5% en la clasificación de alta y muy alta importancia en esta área. Esta zona, es de fácil acceso mediante carreteras pavimentadas, ofrece la oportunidad de contemplar una amplia gama de estructuras geológicas y geomorfológicas como los que se observan en los LIG's. Los paisajes son notables por su belleza y proporción dan un entorno altamente educativo, especialmente valioso para excursiones de campo especializadas (p.e. grupos universitarios) y no especializadas (p.e. grupos de estudiantes de básica primaria y secundaria). Esto no solo enriquece nuestra comprensión y análisis del paisaje desde una perspectiva científica, sino que también tiene un valor intrínseco en la narrativa de la historia terrestre, donde se involucran los conceptos de sedimentación, fauna y flora fósil, tiempo geológico, invasiones y transgresiones marinas, ecosistemas marinos,

transicionales y terrestres. A su vez, permite ubicar al público general en el concepto de evolución de la vida y ciclos biológicos, que incluyen la depositación y transformación de la materia orgánica hasta transformarse en turba y carbón. Este enfoque permita a la sociedad entender que la naturaleza (elementos bióticos y abióticos) se encuentran entrelazados en complejas relaciones sistémicas entorno al concepto de bienes y servicios indispensables para el desarrollo de la sociedad. Los servicios de aprovisionamiento de agua, minerales y suelos; control y soporte del clima y la agricultura, conocimiento y cultura de la zona hacia el desarrollo y manejo de museos naturales (museo paleontológico de Villa de Leyva). Existen iniciativas promovidas por organizaciones de base comunitaria que buscan establecer sistemas territoriales para la gestión del patrimonio geológico, como el caso del Geoparque Zaquezipa. Este se presenta como un atractivo turístico fundamentado en disciplinas como la geología y la paleontología, destinado a brindar una experiencia enriquecedora tanto a visitantes nacionales como extranjeros. La colaboración con representantes de geoparques reconocidos por la UNESCO proporcionará un espacio para abordar diversos temas y así fortalecer aspectos técnicos y metodológicos, beneficiosos para aquellos interesados en iniciativas similares en el futuro.

Este enfoque no se limita simplemente a la apreciación estética o al contexto científico estático, sino que se extiende a una entidad dinámica que interactúa con la sociedad. Está vinculado a iniciativas que abarcan desde la conservación hasta la educación y la posterior divulgación del conocimiento geológico. Asimismo, se abre un horizonte para la creación de proyectos que impulsen tanto el desarrollo cultural como el económico en la zona. Todo esto, respaldado por legislaciones que garantizan el adecuado mantenimiento y preservación de este valioso patrimonio natural.

El valor científico de un lugar se manifiesta a través de la información que proporciona para reconstruir la historia geológica de la región y para ilustrar los procesos geológicos que contribuyen al origen y evolución tectónica. En este contexto, se obtienen diversos rasgos morfotectónicos, como fallas, cabalgaduras, plegamientos y datos estructurales. El régimen transpresional, común en cinturones de deformación, induce cambios en el volumen, acortamiento y la formación de fallas oblicuas. La conjugación de fallas tipo strike-slip, particularmente en el flanco occidental de la Cordillera Oriental, revela un desplazamiento horizontal en sentido dextral, indicando la dirección diferencial de los tensores de deformación.

El infográfico propuesto, detallado en el anexo 1, ofrece una presentación concisa y altamente visual. Su diseño facilita la asimilación de la información acerca de la ubicación y distribución de los lugares de interés geológico (LIG's). Este recurso desempeña un papel crucial al proporcionar una percepción educativa y atractiva. Su objetivo es permitir a las autoridades y a las comunidades adquirir una comprensión más profunda de su entorno geológico y apreciar en mayor medida el valor de su patrimonio geológico.

Villa de Leyva posee un gran potencial para impulsar esta nueva iniciativa y expandir la geo ruta de aprendizaje, dado que sus alrededores albergan una notable riqueza en términos de conocimiento y turismo. Además, es uno de los dos sitios en Colombia registrados entre los 100 lugares de patrimonio geológico a nivel mundial. Tiene el Museo Paleontológico de Colombia, que promueve la preservación de restos fósiles que son parte del patrimonio paleontológico y cultural del país. Esta riqueza contribuye de manera significativa al conocimiento y desarrollo global, dada la abundancia y diversidad de fósiles tanto terrestres como marinos. Asimismo, la arquitectura y el apego al pasado colonial enriquecen aún más el patrimonio de esta región.

9. CONCLUSIONES

Para la integración de nuevas geo rutas de aprendizaje y divulgación científica, se emplearon varios enfoques como métodos cuantitativos (Argyrius et al., 2016) y estadístico (*sensu* Valentín, 2022). Estas dos metodologías normalizadas brindan un propósito para tener un panorama más preciso de la geodiversidad de la cuenca del río Samacá, facilitando la idea de sectores con valiosa información sobre las características del terreno.

Empezando por el método estadístico de (*sensu* Valentín, 2022), se basa en técnicas avanzadas instauradas por varios autores para modelar y predecir patrones de geodiversidad en un área a base de elementos abióticos, la aproximación ofrece esta visualización de escala regional, para comprender esta variabilidad y el cuantitativo se apoyó en mediciones directas a partir de modelo de elevación digital enfocado a administrar la distribución morfométrica.

Lo más interesante es la aplicación conjunta de estos dos métodos normalizados en la información que generan uniéndolas con los lugares de interés (LIG's). Esto significa que se puede desarrollar estratégicamente una geo ruta que tenga en cuenta la conservación y creando un equilibrio sostenible entre el desarrollo humano y la preservación del entorno natural. Esta geo ruta estará

más enfocada a nivel estructural dado a que en el sector y su ambiente dan al descubierto ciertas estructuras geológicas como antiforme, sinforme, pliegues antiformes y sinforme por propagación de falla, fallas normales e inversas,

Este proyecto busca originar la necesidad de sensibilizar sobre la relevancia de comprender los LIG's y su papel especial en la sociedad, especialmente en un entorno de gran geodiversidad. Se propone la creación de rutas geológicas y promover la conciencia acerca de su presencia y significado entre la población.

10. REFERENCIAS

Acosta, J, L. Lonergana, M.P. Cowarda. (2004). "Oblique Transpression in the Western Thrust Front of the Colombian Eastern Cordillera." *Journal of South American Earth Sciences*, vol. 17, no. 3, pp. 181–194., doi: 10.1016/j.jsames.2004.06.002.

AMERIGE OSS community platform DataHub. (2019). Sitios de Interés Geológico - Datasets - AmeriGEOSS Community Platform DataHub. Available at: <https://data.amerigeoss.org/ne/dataset/sitios-de-interes-geologico> (Accessed: November 9, 2022).

Arribas, A. y Durán, J.J. (1998). Geodiversidad versus biodiversidad. *Tierra y Tecnología*, 18, 48-49.

BAÉZ OSORIO, M., ROBAYO, J. M., & RUEDA MENDEZ, D. (2019). PROVINCIA DEL CENTRO DEL DEPARTAMENTO DE BOYACÁ. *Cuaderno Archivístico*, (5), 10–12. Recuperado a partir de https://revistas.uptc.edu.co/index.php/cuadrenos_archivistico/article/view/9247-.

Carcavilla, L., López-Martínez, J. y Durán, J.J. (2007): Patrimonio geológico y geodiversidad: investigación, conservación, gestión y relación con los espacios naturales protegidos. Instituto Geológico y Minero de España, Serie Cuadernos del Museo Geominero, n° 7, Madrid, 360 p.

Carcavilla, L.; Durán, J. J. y López-Martínez, J. (2008). «Geodiversidad: concepto y relación con el patrimonio geológico». *Geo-Temas*, 10: 1299-1303

Carcavilla U, L., Martínez J, C., & García C, Á. (2015). Guía de buenas prácticas para la gestión del Patrimonio Geológico y Paleontológico de Colombia. (1ª ed., pp. 1-59). Bogotá, Colombia: Servicio Geológico Colombiano.

Casas, L. F., Pineda, M., Andrade, M. y Pulgarín, Y. (2017). El Alto Ricaurte e Iguaque territorio de patrimonio natural y cultural, acciones para un manejo sostenible. Bogotá, D. C., Colombia: Fundación Erigaie, Fundación Natura.

Corredor, F. (2003). Eastward extent of the Late Eocene- Early Oligocene onset of deformation across the northern Andes: constraints from the northern portion of the Eastern Cordillera fold belt, Colombia. *Journal of South American Earth Sciences*, 16(6), 445-457.

Durán, J.J., Brusi, D., Palli, Ll., López-Martínez, J., Palacio, J. y Vallejo, M. (1998): Geología Ecológica, Geodiversidad, Geoconservación y Patrimonio Geológico: la Declaración de Girona. En Durán J.J. y Vallejo, M. (Eds.). Comunicaciones de la IV Reunión de la Comisión de Patrimonio Geológico, 67-72. Sociedad Geológica de España.

Escuder, R., & De Hidrología Subterránea, F. C. I. (2009). Hidrogeología: conceptos básicos de hidrología subterránea

Gallego, E. (1998), "Protección y conservación de espacios naturales y del patrimonio geológico", ZUBÍA, núm. 16, Logroño, pp. 155–179.

Gray, M. (2004): Geodiversity. Valuing and conserving abiotic nature. John Wiley & Sons, Sussex, 434 p. International Association of Geomorphologists (2003): Geomorphological sites: research, assessment and improvement. IAG website.

Gómez – Cruz, A. de J., Moreno – Sánchez, M., Castillo – González, H. (2007). Ciclos de sedimentación durante el Carbonífero superior (Morrowan) en el “Paleozoico de La Jagua”, Huila, Colombia. XI Congreso Colombiano de Geología.

Gómez Guerrero, M. E., & Salgado Jáuregui, E. (Eds.). (2017). Guía para reconocer objetos del patrimonio geológico y paleontológico. Libros del Servicio Geológico Colombiano. Recuperado a partir de <https://libros.sgc.gov.co/index.php/editorial/catalog/book/41>

Gonera, M. (1999). Fossil-site protection- new plan for Carpathian Flysch in Poland. En: Baretino, D., Vallejo, M. y Gallego, E. (eds.), Towards the balanced management and conservation of the Geological Heritage in the New Millenium, Sociedad Geológica de España, Madrid, 73-76.

GRONGGRIJP, G. (1999). Geodiversity: the key to a holistic approach in renaturation, In: BARETTINO, D.; VALLEJO, M. & GALLEGO, E. (editors). Towards the Balanced Management and Conservation of the Geological Heritage in the New Millenium. Madrid: Instituto Tecnológico Geominero de España, p. 77-80.

G. Renzoni, H. Rosas, F. Etayo. (1967). Mapa geológico de la plancha 191, Tunja. Esc: 1:100.000, Ingeominas Bogota, CO.

Ingeominas. (1976). Geologia de las Plancha 171 Duitama, 191 Tunja, 211 Tauramenay 230 Monterrey cuadrángulos j-12 y k-13 escala 1:100.000, Volumen 24 N° 2.

Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales. (2019). Glosario Meteorológico (Subdirección de Meteorología (ed.)). <http://www.ideam.gov.co/documents/11769/72085840/Anexo+10.+Glosario+meteorológico.pdf/6a90e554-6607-43cf-8845-9eb34eb0af8>

Jaramillo, Z. Humberto, J. Molina. J. (2014). Patrimonio Geológico y Geodiversidad: Bases para su definición en la Zona Andina de Colombia: Caso Santa Fe de Antioquia, Boletín de Ciencias de la Tierra, 35:53, <https://doi.org/10.15446/rbct.n35.43146>

Jorge Acosta, Francisco Velandia, Jairo Osorio, Lidia Lonergan, Hector Mora. (2007). Strike- Slip deformation within the Colombian Andes, Geological Society, London, Special Publications, p303-319, doi: 10.1144/GSL.SP.2007.272.01.16

Johansson, C.E., Andersen, S. y Alapassi, M. (1999). Geodiversity in the Nordic Countries. ProGeo News, 1, 1-3. (<http://www.sgu.se/hotell/progeo>).

Julián Jaramillo, José Caballero, Jorge Molina. (2014). Patrimonio Geológico y Geodiversidad: Bases para su definición en la zona Andina de Colombia caso Santa Fe de Antioquia, DOI: 10.15446/rbct. n35.43146.

Keppie, J. d., dostal. J., miller, b. V., ramos – Arias, m. A.,morales – Gámez, m., nance, r. d., murphy, J. b., orte-ga – rivera, A., lee, J. W. K., Housh, t., Cooper, P., (2008) .Ordovician – earliest silurian rift tholeiites in the Acatlan Complex, southern Mexico: Evidence of rifting on the southern margin of the Rheic ocean. Tectonophysics, 461,1 - 4, 130 – 156. Doi : 10.1016/j.tecto.2008.01.010.

Lema, H. y Grupo CSIGA. (2007). Sitios de Interés Geológico de la República Argentina. 6° Convención Internacional sobre Medio Ambiente y Desarrollo. 5° Congreso de Áreas Protegidas. Resúmenes, 125. La Habana, Cuba.

Medina Peña, Rolando, Machado López, Libertad, & Vivanco Vargas, Germania. (2016). NATURALEZA, MEDIOAMBIENTE Y LOS ECOSISTEMAS BOSCOSOS SECOS DESDE EL DERECHO PÚBLICO. *Revista Universidad y Sociedad*, 8(3), 108-115. ISSN 2218-3620

Naranjo. (2021). ANÁLISIS DE SITUACIÓN DE SALUD CON EL MODELO DE LOS DETERMINANTES SOCIALES DE SALUD, MUNICIPIO DE SAMACÁ BOYACÁ 2021.

Nieto, L.M. (2001). Geodiversidad: propuesta de una definición integradora. Boletín Geológico y Minero, 112 (2): 3-11.

Noè, L. F., and M. Gómez-Pérez. (2019). Plesiosaurs, Palaeoenvironments and the Paja Formation Lagerstätte of Central Colombia: an overview; in J. Gómez-Tapias (ed.), *The Geology of Colombia*. Servicio Geológico Colombiano, Bogotá

Obi Egbue, James Jellog, Hector Aguirre, Carolina Torres. (2014). Evolution of the Stress and Strain fields in the Eastern Cordillera, Colombia. *Journal of Structural Geology*, DOI: 10.1016/j.jsg.2013.10.004.

Parke A. Dickey. (1941). "Pre-Cretaceous Sediments in Cordillera Oriental of Colombia." AAPG Bulletin, 1941, doi:10.1306/3d9333ec-16b1-11d7-8645000102c1865d.

Patarroyo, P. (2020). Barremian deposits of Colombia: A special emphasis on marine successions. In: Gómez, J. & Pinilla-Pachon, A.O. (editors), *The Geology of Colombia, Volume 2 Mesozoic*. Servicio Geológico Colombiano, Publicaciones Geológicas Especiales 36, p. 403–439. Bogotá. <https://doi.org/10.32685/pub.esp.36.2019.12>

PORTA, J.; M. LÓPEZ – ACEVEDO y C. ROQUERO. (1994). *Edafología para la agricultura y el medio ambiente*. Ediciones Mundi Prensa. Madrid. 807 p.

Tarbuck, E. J., & Lutgens, F. K. (2010). *Ciencias de la Tierra volumen 1*. PRENTICE HALL.

UPME. (2012). *Cadena del Carbón, Unidad de Planeación Minero-Energética*, ISBN: 978-958-8363-12-7.

Upme, U. T. P. (2018). Determinar los escenarios de incorporación de reservas de petróleo y gas con un horizonte mínimo de 25 años, que incluyan recursos convencionales y no convencionales, y se estime las inversiones asociadas a cada escenario, a partir de la actualización de las variables de entorno nacional e internacional, que impactan el desarrollo de la actividad exploratoria y de producción de hidrocarburos en Colombia. URI: <http://bdigital.upme.gov.co/handle/001/1340>

Valentín Ramírez, C. D. (2021). Desarrollo de una herramienta de ArcGis para el cálculo de la geodiversidad en Latinoamérica, y su análisis estadístico y de correlación con las amenazas en un caso de estudio. UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO.

Zapata, Julian & Caballero-Acosta, Jose & Molina Escobar, Jorge. (2014). PATRIMONIO GEOLÓGICO Y GEODIVERSIDAD: BASES PARA SU DEFINICIÓN EN LA ZONA ANDINA DE COLOMBIA CASO SANTA FE DE ANTIOQUIRA. *Boletín de Ciencias de la Tierra*. 56-65. 10.15446/rbct.235.43146.

Zwoliński, Z., Najwer, A., & Giardino, M. (2018). Methods for assessing geodiversity. In *Geoheritage* (pp. 27-52). Elsevier.

11 ANEXOS



Anexo 1 Infográfico Valoración de la Geodiversidad en la Cuenca del Río Samacá (Boyacá) –
Elaboración propia