

**Geodiversidad en la cuenca La García como aporte a la gestión territorial en el Bosque
Modelo del Valle de Aburrá**

**Geodiversity in the La García basin as a contribution to territorial management in the
Bosque Modelo del Valle de Aburrá**

Autores:

**Sol Celeste Ortiz Correa
Juan Pablo Rojas Serna**

Director:

María Isabel Marín Cerón

Asesor:

Oscar Geovany Bedoya Sanmiguel

**UNIVERSIDAD EAFIT
GEOLOGÍA
ESCUELA DE CIENCIAS APLICADAS E INGENIERÍA
MEDELLÍN**

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a las personas que han hecho posible la realización de esta tesis. A mi padre Jwia Tungumu, por su apoyo incondicional durante toda mi carrera. Gracias por creer en mí y por siempre estar ahí para mí, tanto en los buenos como en los malos momentos, tu amor y tu consejo lleno de sabiduría me han ayudado a llegar hasta aquí. A la profesora María Isabel por su excelente labor como docente y mentora en esta tesis, gracias por su guía y su apoyo, por compartir sus conocimientos y por ayudarme a crecer como profesional. A mis amigos Angie, Paula y Juan, por haber hecho de la universidad una de las mejores etapas de mi vida. Gracias por su amistad, su apoyo y su compañía. Siempre estaré agradecida por haber tenido la oportunidad de compartir este camino con ustedes. A mi amigo Mateo, por su gran apoyo tanto a nivel personal como académico durante estos años. Gracias por estar ahí siempre para mí, por escucharme y por ayudarme a superar obstáculos. Enormemente a Wilton, Ana Lucia y Leidy, por todo su apoyo en los laboratorios y nuestro proceso de aprendizaje. Gracias por su paciencia, su dedicación y su disposición a ayudarnos. Agradezco a mis mascotas Menta y Terra por ser una gran compañía durante cada etapa de mi vida de forma incondicional.

Sol Celeste Ortiz

Quiero expresar mi sincero agradecimiento a mi madre, Eliana, y a mi padre, Darío, por proporcionarme la oportunidad de recibir una educación y por apoyarme en cada uno de los sueños que me he propuesto. Agradezco especialmente a mi hermana, Isabella y mi abuela Dora por contribuir en esta travesía. También quiero reconocer a los profesores que han sido fuentes de inspiración a lo largo de estos años especialmente María Isabel Marín. Agradezco de manera especial a mis amigas Angie, Sol y María Paula, quienes me acompañaron por una de las etapas más lindas de mi vida y a quienes les debo mucho. Finalmente doy gracias a la Universidad EAFIT donde crecí en innumerables formas.

Juan Pablo Rojas

Tabla de contenido

Resumen	5
Abstract	5
1. Introducción.....	6
2. Generalidades.....	7
2.1 Pregunta de investigación	7
2.2 Hipótesis	7
2.3 Objetivo general.....	7
2.4 Objetivos específicos.....	7
3. Caracterización de la Zona de estudio	8
3.1 Localización.....	8
3.2 Geología	9
3.3 Geomorfología.....	11
4 Metodología	13
4.1 Conformación de base de datos.....	13
4.2 Método de estimación de geodiversidad (sensu Valentín, 2001)	13
4.3 Diversidad morfométrica (Argyryus, 2016)	14
4.4 Estimación de la geodiversidad estadística (sensu Valentín modificada con Agyríous)	14
4.5 Inventario de LIG´s.....	15
5. Resultados	15
5.1 Estimación mediante el método geoestadístico (Valentín, 2021).....	15
5.2 Estimación de índices morfométricos	16
5.3 Estimación de geodiversidad total y LIG	18
6. Discusión	20
6.1 Interpretación de resultados finales.....	20
6.2 Geodiversidad dirigida a la Apropriación Social del Conocimiento Geocientífico (ASCG) por avenidas torrenciales	21
6.3 Propuesta aula viva y Lugares de Interés Geológico (LIG).....	22
7. Conclusiones	24
8. Bibliografía	26
9. Anexos	29

Lista de figuras

Figura 1. Mapa de localización de la cuenca La García.....9
Figura 2. Mapa geológico cuenca La García.....11
Figura 3. Mapa geomorfológico cuenca La García.....12
Figura 4. Flujograma metodológico para el cálculo de índices morfométricos a partir del DEM.....14
Figura 5. Mapa de geodiversidad metodología estadística.....16
Figura 6. Mapa de índices morfométricos cuenca La García.....17
Figura 7. Mapa de geodiversidad total.....18

Lista de tablas

Tabla 1. Porcentajes de índices de geodiversidad por unidad de celda19
Tabla 2. Listado de lugares de interés geológico.....19

Resumen

En este proyecto se realiza la estimación de la geodiversidad de la cuenca de la quebrada La García (Bello). Empleando las metodologías de Valentín (geoestadística) modificada con la diversidad de los índices morfométricos (sensu Argyryus), validadas con un inventario preliminar de Lugares de Interés Geológico (LIG's). El mapa final, permitió identificar dos áreas con alto índice de geodiversidad en el sureste y suroeste de la cuenca (correspondientes a la zona del Páramo de las Baldías, y el Cerro Quitasol). A partir de este proceso, se identificó que la geodiversidad del paisaje analizado está delimitado por la tectónica, el clima y procesos fluviales y depositacionales asociados a la inestabilidad de las laderas y avenidas torrenciales generados en el drenaje principal de la quebrada La García. Al compararse con la cuenca aledaña hacia el Sur (Iguaná y El Hato), se establecen características similares, y por ende estrategias compartidas al interior del Bosque Modelo del Valle de Aburrá, como pilotos hacia el futuro de Aulas Vivas que permitan la gestión del riesgo asociado a las avenidas torrenciales, las cuales deberán ser articuladas por las universidades Nacional y San Buenaventura, asentadas en este territorio. En este caso, se propone un primer borrador de infográfico, para la divulgación, como herramienta para la Apropiación Social del Conocimiento Geocientífico (ASCG), con el fin de que en el futuro cercano, se pueda aportar en la transferencia del conocimiento a las comunidades.

Palabras clave: Riesgo, divulgación científica, avenidas torrenciales, índices morfométricos, geoestadística.

Abstract

In this project, the geodiversity of the García stream basin (Bello) is estimated. The methods of Valentín (geostatistics) are used, modified with the diversity of morphometric indices (sensu Argyryus), validated with a preliminary inventory of Geological Interest Sites (GIS's). The final map identified two areas with a high geodiversity index in the southeast and southwest of the basin (corresponding to the Páramo de las Baldías and Cerro Quitasol areas). This process identified that the geodiversity of the landscape analyzed is limited by tectonics, climate, and fluvial and depositional processes associated with slope instability and flash floods generated in the main drainage of the García stream. When compared to the adjacent basin to the south (Iguaná and El Hato), similar characteristics are established, and therefore shared strategies within the Bosque Modelo del Valle de Aburrá, as pilots for the future of Living Classrooms that allow the management of risk associated with flash floods, which must be articulated by the National and

San Buenaventura universities, located in this territory. In this case, a first draft of an infographic is proposed for dissemination as a tool for the Social Appropriation of Geoscientific Knowledge (SAGK), with the aim of contributing to the transfer of knowledge to communities in the near future.

Key words: Risk, scientific dissemination, flash floods, morphometric indexes, geostatistics.

1. Introducción

La geodiversidad es un término utilizado desde la década de los noventa del siglo XX (Gray, 2004, p. 4), empleado para describir la variedad de elementos geológicos presentes en el planeta, incluyendo componentes como rocas, minerales, paisajes geomorfológicos, estructuras y fósiles (Stanley, 2000). La geodiversidad posibilita la evaluación del estado de los elementos abióticos vinculados a los procesos que afectan un ecosistema. Este factor puede desempeñar un papel crucial en el análisis ecológico y territorial, por lo que debe integrarse a la acción profesional de la geología a través de la planificación, gestión y conocimiento del territorio (Serrano & Ruiz, 2007).

El conocimiento del territorio está intrínsecamente vinculado con la comprensión del riesgo, un concepto definido en Colombia por la Ley 1523 del 2012, artículo 4, como “el proceso social orientado a la formulación, ejecución, seguimiento y evaluación de políticas, estrategias, planes, programas, regulaciones, instrumentos, medidas y acciones permanentes para el conocimiento, la reducción del riesgo y manejo de desastres”. En este contexto, la estimación de la geodiversidad emerge como una herramienta que contribuye a la comprensión de la geología de un territorio y, por consiguiente, a la identificación de las amenazas asociadas a este, como lo son las avenidas torrenciales. A través de estrategias de divulgación y análisis, la geodiversidad enriquece la percepción y conocimiento del entorno, facilitando así la toma de decisiones informadas relacionadas con la gestión del riesgo.

Este proyecto busca estimar la geodiversidad de la cuenca de la quebrada La García, situada en el municipio de Bello, Antioquia, como apoyo al conocimiento para la gestión del territorio, ya que la zona presenta un alto riesgo debido a amenazas hidrológicas, entre las que se encuentran las avenidas torrenciales, como se establece en el Plan de Ordenamiento Territorial del municipio de Bello (2009). Este riesgo se origina por una combinación de factores naturales y antropogénicos, como eventos de precipitaciones intensas (natural) y ocupación ilegal del lecho de la quebrada y sus áreas de retiro (antrópicas).

El enfoque principal de este trabajo es analizar cómo la estimación de la geodiversidad en la cuenca La García, en el contexto del proyecto de Bosque Modelo del Valle de Aburrá (BMVA) como figura de planificación territorial, puede convertirse en un recurso valioso para mejorar la planificación, gestión y comprensión de la cuenca. Este enfoque se materializa a través de la creación de un espacio de aprendizaje interactivo en la Universidad San Buenaventura y la Universidad Nacional de Colombia. Este espacio funcionará como un aula viva donde todos los miembros de la sociedad podrán comprender las avenidas torrenciales andinas.

Este proyecto sugiere que la incorporación de la geodiversidad, incluidos los aspectos geológicos, geomorfológicos, hidrológicos, estructurales, evolución del paisaje (índices morfométricos), en el desarrollo de laboratorios vivos, o entornos de prueba del mundo real para estrategias innovadoras de gestión de riesgos, puede conducir a soluciones más sólidas y específicas del contexto para mitigar y responder a la gestión del riesgo asociado a avenidas torrenciales. Este enfoque podría potencialmente mejorar el éxito general y el impacto de las estrategias de gestión de riesgos dentro de diversos entornos geográficos y geológicos.

2. Generalidades

2.1 Pregunta de investigación

¿Qué estrategias pueden integrar a la geodiversidad en la planificación y gestión territorial de la cuenca La García?

2.2 Hipótesis

La aplicación de la geodiversidad en la gestión territorial de la cuenca La García podría lograrse mediante la implementación de estrategias de Apropiación Social del Conocimiento Geocientífico como insumo para las aulas vivas que se proyectan en la iniciativa del Bosque Modelo del Valle de Aburrá.

2.3 Objetivo general

Estimar la geodiversidad de la cuenca de la Quebrada la García (Bello) por métodos estadísticos (sensu Valentín 2022), mejorados con la metodología de diversidad Morfométrica (sensu Argyrius, 2016), y usarlo como herramienta para la visualización preliminar de un aula viva que permita la conformación de un piloto de gestión integral del paisaje del Bosque Modelo del Valle de Aburrá hacia la gestión del riesgo por avenidas torrenciales.

2.4 Objetivos específicos

Generar una geodatabase (GDB) que permita caracterizar la cuenca en términos de su diversidad (geológica, geomorfológica, estructural, hidrológica, mineral, climática y morfométrica).

Realizar el inventario de Lugares de Interés Geológico (LIG's) como método de validación del mapa de geodiversidad obtenido.

Analizar los resultados obtenidos, en función de la conformación de un aula viva que integre los resultados desde la quebrada La Iguaná, El Hato (Cano, 2023) con los obtenidos en este trabajo, como piloto para la gestión integral del patrimonio geológico hacia la gestión del riesgo por avenidas torrenciales.

3. Caracterización de la Zona de estudio

3.1 Localización

La cuenca de la quebrada La García se sitúa en la Cordillera Central de Colombia, en la margen occidental del Valle de Aburrá, bajo la jurisdicción del municipio de Bello, en el departamento de Antioquia. Cubre un área de aproximadamente 83,74 km² y presenta una variación altitudinal que va desde los 3150 msnm, en el sector del Cerro Las Baldías, hasta los 1414 msnm en su desembocadura en el río Medellín-Aburrá. La cuenca está delimitada al sur por la cuenca de la quebrada El Hato y el río Medellín-Aburrá, y al oriente por las cuencas de las quebradas La Señorita y La Seca. En el norte y en el occidente limita con el municipio de San Pedro de los Milagros (ver figura 1) (Área Metropolitana del Valle de Aburrá [AMVA], 2008). La García, junto a la cuenca de la quebrada Santa Elena y Piedras Blancas, es una de las pocas cuencas del Valle de Aburrá que nace en los altiplanos contiguos (Caballero, 2011, p. 46).

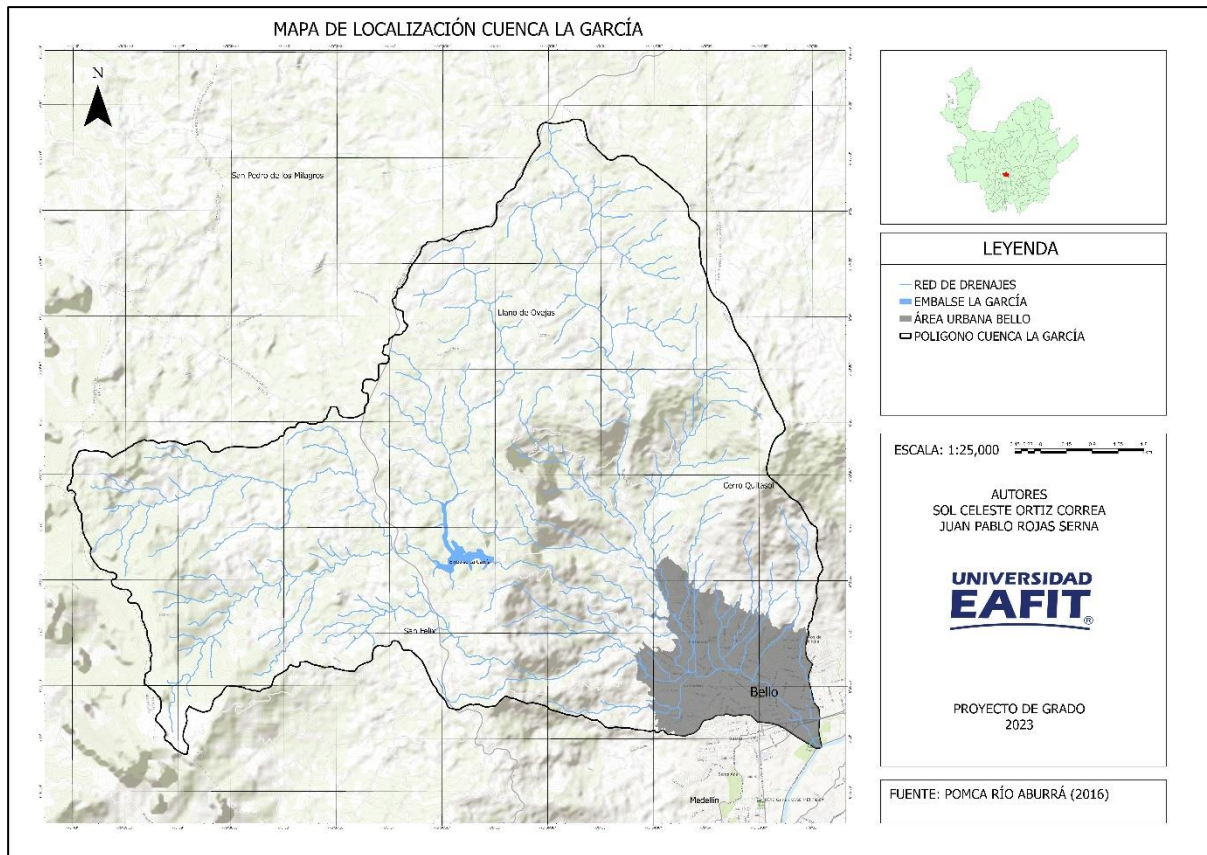


Figura 1. Mapa de localización de la cuenca La García. Autoría propia.

La corriente principal, que se extiende por 19,3 km, fluye en dirección de oeste a este (Área Metropolitana del Valle de Aburrá, 2018). A lo largo de este curso de agua se construyó en 1951 un embalse homónimo por la empresa Fabricato S.A. Este embalse fue creado con la finalidad de generar energía y proveer agua a las instalaciones de la empresa, que se encuentra en la zona urbana de Bello (Ochoa, 2012, p. 19).

3.2 Geología

En la cuenca La García se encuentran diversas unidades geológicas (ver figura 2), siendo notables las rocas metamórficas del Complejo Cajamarca, que comprenden el Grupo El Retiro, compuesto por las Anfibolitas de Medellín (TRaM) y los Esquistos Anfibólicos de Baldías (PReaB). Esta última unidad metamórfica aflora en el corregimiento de San Félix y en el Cerro de la Baldías y se encuentra conformada por esquistos anfibólicos, gneises y anfibolitas, los cuales presentan interclases en paquetes de amplia variabilidad con un metamorfismo de medio a alto grado (Correa y Martens 2000). Los Esquistos Anfibólicos de Baldías poseen un contacto de tipo intrusivo con el Stock de Ovejas (KtO), la unidad más extensa de la cuenca, cuya área comprende 165 km² entre

los municipios de Bello y Sopetrán. Este batolito (Stock de Ovejas) se constituye por rocas como granodioritas, cuarzodioritas, casodioritas y gabros (López et al., 1991).

En la zona oriental de la cuenca afloran unidades del Complejo Ofiolítico de Aburrá, que incluye la unidad de la Dunita de Medellín (JKuM) y las Metabasitas del Picacho (JKmbP). La dunita se compone de esquistos actinolíticos, cloríticos y talcosos, se encuentra parcialmente serpentizada y presenta una estratificación primaria, resultante de actividad mantélica, foliación metamórfica y plegamiento polifásico. Presenta un contacto fallado con las Metabasitas del Picacho las cuales se componen de una secuencia metamorfizada regionalmente en facies anfibolita con granate y muestra una foliación metamórfica doblada y cizallada (Ortiz et al., 2009, p. 1).

En la zona baja de la cuenca, en las laderas del Valle de Aburrá y en las zonas planas del Llano de Ovejas se encuentran depósitos cuaternarios, como Flujos de Escombros y Lodos (NQFII), sobre un basamento ígneo y metamórfico. Estos depósitos se componen de bloques rocosos y flujos de lodos. Asimismo, la región presenta Depósitos Aluviales (Qal) y Aluviotorrenciales (QaT), acumulados por la actividad fluvial y durante avenidas de diversas magnitudes, en épocas de alta pluviosidad. Estos depósitos varían desde bloques rocosos de diferentes tamaños hasta arenas, limos y arcillas, lo que demuestra la diversidad de materiales transportados por las corrientes fluviales en la zona (Giraldo y Sánchez, 2004).

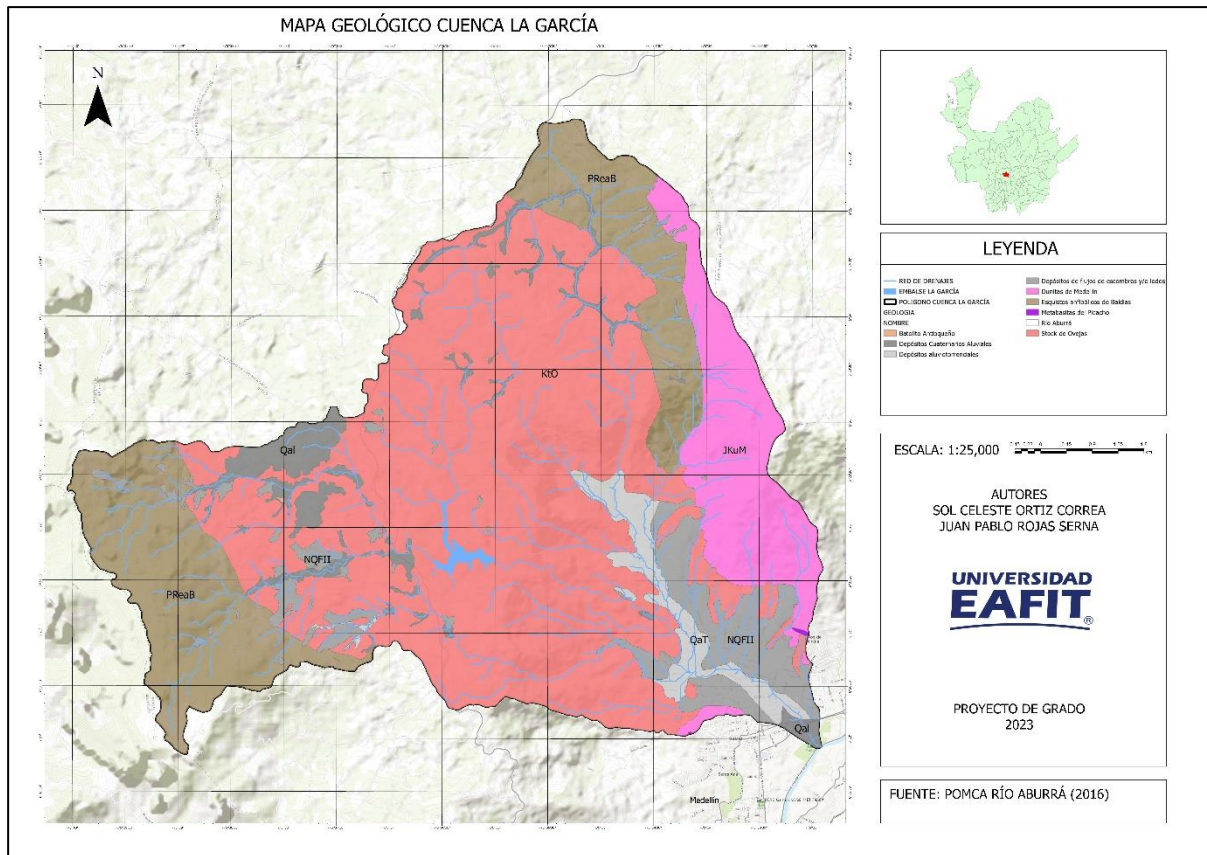


Figura 2. Mapa geológico cuenca La García.

3.3 Geomorfología

La geomorfología de la cuenca de la quebrada La García (ver **figura 3**) está enmarcada por dos unidades de paisajes geomorfológicos: el Sistema de Altiplanos en lo que se conoce como el Altiplano del Norte de Antioquia, localmente llamado el Llano de Ovejas, en la parte alta de la cuenca, y la unidad del paisaje del Valle de Aburrá Medio en la zona baja (Área Metropolitana del Valle de Aburrá, 2008).

En la zona alta de la cuenca se encuentran las unidades geomorfológicas de Lomos de Falla Bajos en la zona del Cerro de las Baldías y Lomos de Falla Disectados en la zona del Llano de Ovejas, caracterizado por ser un relieve de colinas bajas cuyas cimas son redondeadas, cuyo origen consta de procesos denudacionales con pendientes que varían entre altas y bajas. Asociados a la superficie de erosión Santa Rosa – Santa Elena – La Unión y Belmira – San Miguel – Sonsón (Servicio Geológico Colombiano, 2015).

Mientras en las zonas de laderas del Valle de Aburrá se encuentran las unidades geomorfológicas de Escarpe de Meseta, Cerro Estructural y Laderas fuertemente inclinadas. El Escarpe de Meseta

se caracteriza por tener una pendiente escarpada a muy escarpada y valles generados con forma de “V” de origen estructural y denudacional mientras que, el Cerro Estructural se refiere a una saliente orográfica de origen tectónico con abruptas pendientes, en este caso corresponde al área del Cerro Quitasol, a su vez las Laderas Fuertemente Inclinadas son unidades con elongadas longitudes y pendientes muy pronunciadas asociadas a bordes de altiplano (Servicio Geológico Colombiano, 2015).

La zona baja de la cuenca se caracteriza por contener unidades geomorfológicas de origen fluvial como Llanuras de Inundación y Abanicos Fluviales, directamente relacionados a la dinámica de la quebrada La García, sus afluentes y el río Aburrá – Medellín, sobre estas áreas se asienta la cabecera municipal de Bello (Servicio Geológico Colombiano, 2015).

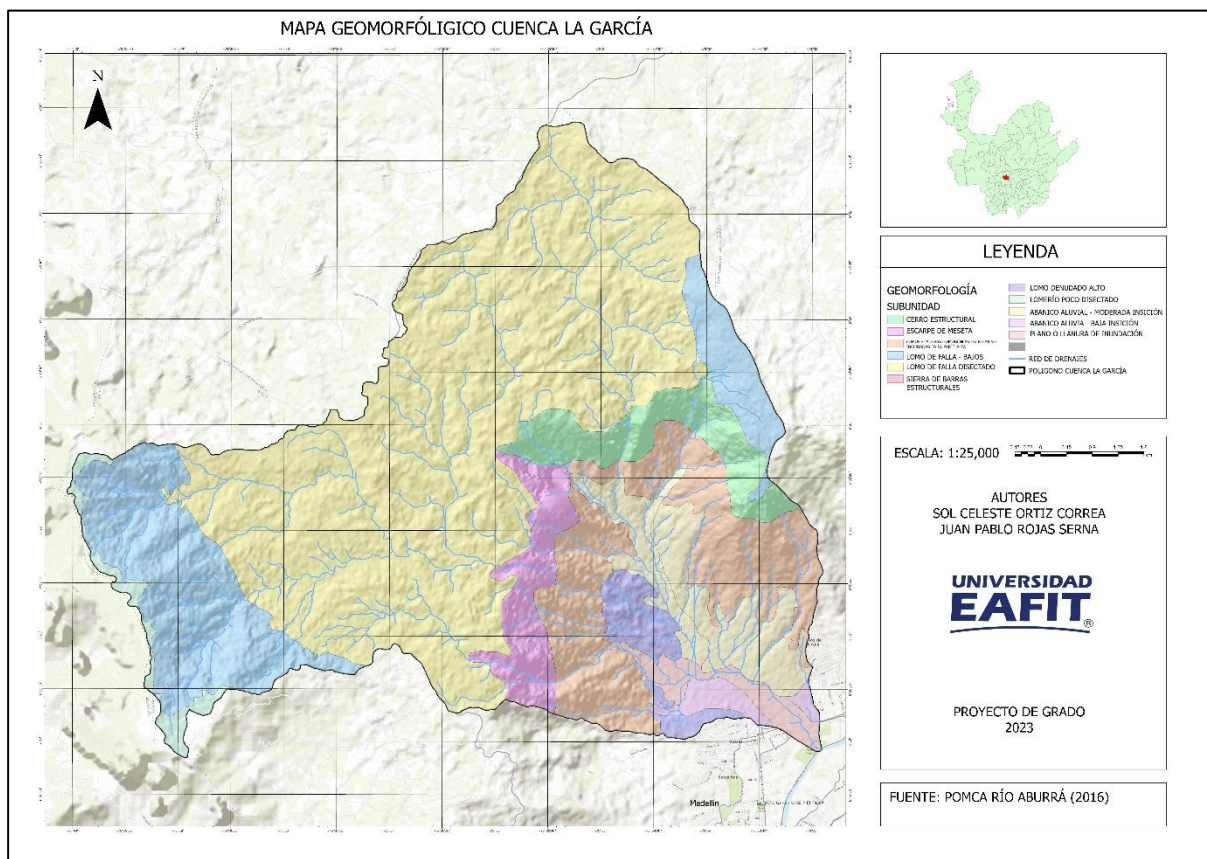


Figura 3. Mapa geomorfológico cuenca La García.

4. Metodología

En esta sección, se detalla la metodología utilizada para estimar la geodiversidad en la Cuenca La García empleando las técnicas propuestas por Valentín (2021) y complementando con la estimación de índices morfométricos propuesta por Argyriou (2016). Además, se describe el proceso para la creación del mapa de geodiversidad total, así como los detalles para la identificación de Lugares de Interés Geológico (LIG's), usados para la validación de los métodos y como material de mediación para la propuesta de creación del aula viva.

4.1 Conformación de base de datos

Para llevar a cabo la estimación de la geodiversidad en una cuenca determinada, es esencial recopilar una base de datos sobre los componentes abióticos presentes en esa área específica (Valentín, 2021). En este contexto, se realizó la delimitación del área de trabajo, definiendo una escala local 1:25.000 y se ha recurrido a la información proporcionada por las autoridades ambientales de la cuenca del río Aburrá - Medellín, incluyendo el Área Metropolitana del Valle de Aburrá, Corantioquia y Cornare. Estas entidades han elaborado el Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca del Río Aburrá – Medellín (POMCA), el cual emplea información relacionada con la geología y geomorfología del Servicio Geológico Colombiano (SGC). En esta investigación el POMCA ha sido aplicado a la cuenca de la quebrada La García, proporcionando la base necesaria para llevar a cabo una evaluación de la geodiversidad en esta área específica. Las capas obtenidas del POMCA: a. Red de drenajes b. Unidades geológicas (ver figura 2) c. Unidades geomorfológicas (ver figura 3), d. Zonificación climática (ver anexo 1), e. Títulos mineros (ANM) (ver anexo 2), f. Lineamientos y estructuras (ver anexo 3), g. Pedología (ver anexo 4).

4.2 Método de estimación de geodiversidad (sensu Valentín, 2001)

En este proyecto de grado, la estimación cuantitativa de la geodiversidad se basa en la metodología desarrollada por Valentín (2021). Esta metodología busca automatizar el cálculo de la geodiversidad en un área específica, al cuantificar diversos elementos abióticos de manera sistemática. Una vez obtenida la GDB con los elementos abióticos esenciales, como geología, geomorfología, hidrología, clima, geología estructural, pedología y ocurrencias minerales/títulos mineros, se utiliza el software ArcMap para ejecutar el código Python desarrollado por Valentín (2021). Este código permite establecer los parámetros de recuento, utilizando una cuadrícula de 100 m², como se implementa en este trabajo.

Finalmente, se empleó la metodología de malla, técnica de muestreo espacial que divide un área en unidades discretas, llamadas cuadrantes. El índice de geodiversidad se calcula para cada

cuadrante y se utiliza para identificar las áreas con la mayor diversidad geológica (Najwer et al., 2016; Pereira et al., 2013; Silva et al., 2013, 2014; Stepišnik & Trenchovska, 2017).

4.3 Diversidad morfométrica (Argyryus, 2016)

Para calcular los índices morfométricos se emplea un enfoque centrado en las variables morfométricas a través de un modelo digital de elevación (DEM). Esto permite obtener diversas variables, incluyendo el índice topográfico de humedad, el gradiente de pendientes, el índice de frecuencia de drenaje, la densidad de drenaje, el índice de disección y el relieve relativo (Calvo et al., 2009; Forte, 2014; Manosso & de Nóbrega, 2015; Z. Zwoliński, 2009).

Las primeras aproximaciones a la cuantificación de la geodiversidad por medio de un índice fueron hechas por Nichols et al. (1998). En este proyecto, a través de técnicas geoestadísticas, se realizó el cálculo y posterior normalización de los siguientes parámetros morfométricos: relieve relativo, índice de disección, gradiente de pendiente e índice de humedad topográfica (ver figura 4).

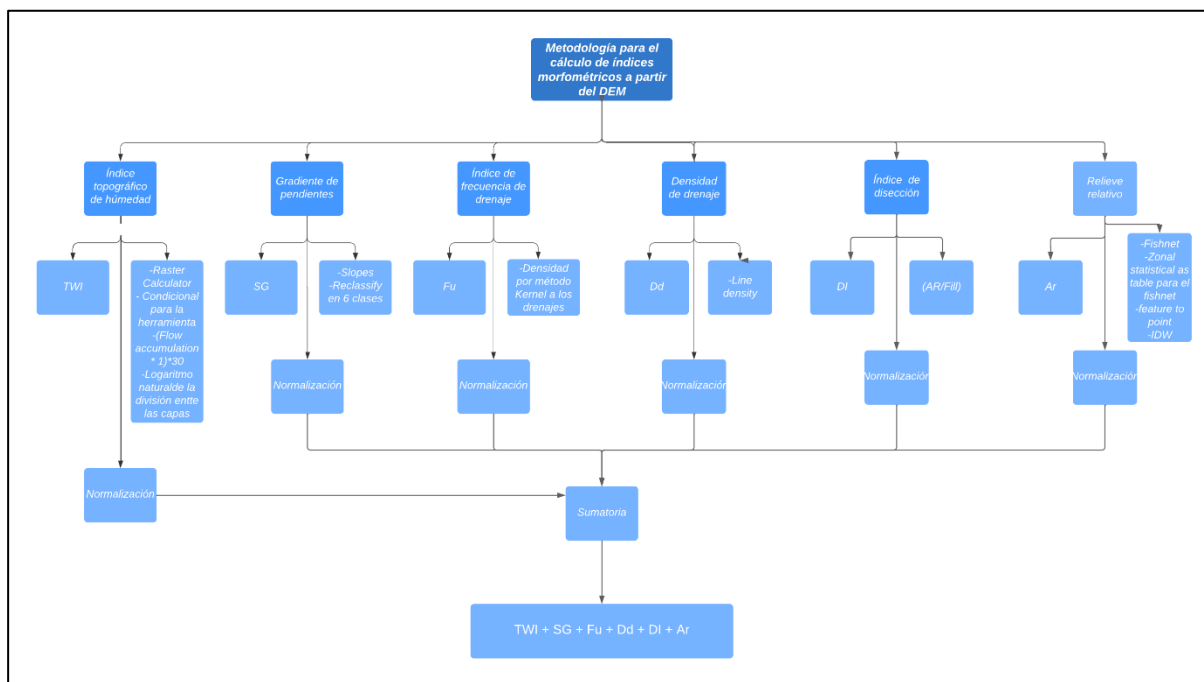


Figura 4. Flujograma metodológico para el cálculo de índices morfométricos a partir del DEM.

4.4 Estimación de la geodiversidad estadística (sensu Valentín modificada con Argyriou)

Después de completar el proceso de cálculo para obtener la geodiversidad de la cuenca por el método Valentín (2021) y Argyriou (2016), se suman las capas normalizadas resultantes. La operación se realiza con la calculadora de ráster en el software ArcGIS Pro, para generar un mapa

integral de geodiversidad. Este mapa fusiona la información obtenida a través de ambas metodologías, permitiendo una comprensión completa y detallada de la diversidad geológica de la zona.

4.5 Inventario de LIG's

Se realizó un recorrido en zonas estratégicas de la cuenca La García para la identificación de LIG's en función de su valor científico, didáctico y cultural o turístico. Esta herramienta se utilizó para la validación del mapa de geodiversidad y como insumo, para la generación de un infográfico (ver anexo 25) preliminar presentado a la Gerencia del Bosque Modelo del Valle de Aburrá (BMVA) y la Universidad San Buenaventura, ubicada en la zona de influencia directa de la cuenca, como una herramienta para la construcción de aula viva piloto en el BMVA, articulado con las cuencas aledañas de La Iguaná y El Hato.

5. Resultados

En esta sección, se presentan los resultados obtenidos después de aplicar las metodologías previamente descritas.

5.1 Estimación mediante el método geoestadístico (Valentín, 2021)

A través del método de Valentín (Valentín, 2021), se desarrolló un modelo geoestadístico que relaciona datos geológicos y espaciales para estimar la geodiversidad de la cuenca (ver figura 5). Este enfoque permite identificar la concentración de aspectos geológicos en diferentes zonas de la cuenca, dividiéndolas en 7 rangos, desde muy alta hasta muy baja geodiversidad, clasificadas según el número de elementos abióticos (EA) por celda con una resolución de 100 m. Las áreas de muy alta geodiversidad se representan en tonalidades rojizas, mientras que las de muy baja geodiversidad se presentan en tonalidades. Las áreas de alta geodiversidad siguen el patrón de los drenajes de la cuenca.

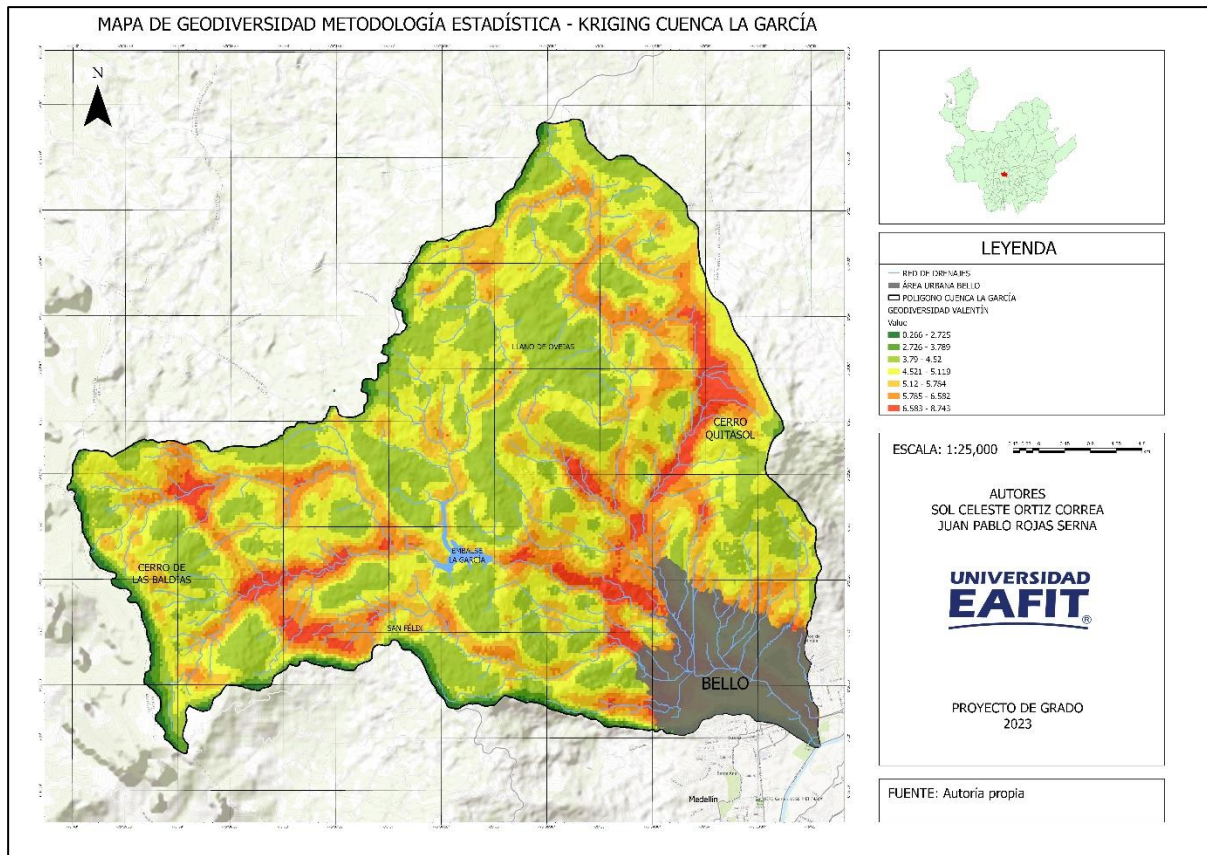


Figura 5. Mapa de geodiversidad metodología estadística.

Se obtuvo el subíndice de geodiversidad para cada variable utilizada en el método, que se sintetizan, en la figura 5 de forma esquemática, pero se presentan en detalle en los anexos (ver anexos 5 – 11). En general se observa un paisaje donde la geodiversidad se encuentra dominada por la variabilidad litológica hacia la parte baja de cuenca (p.e. rocas ultrabásicas y metamórficas, suprayacidas por depósitos de vertientes y aluvioterrenciales); un ambiente geomorfológico estructural y denudacional, con cambios en los pendientes macados por las fallas y los ambientes depositacionales (depósitos de vertientes y aluvio-torrenciales). Esta relación de materiales con el clima define una gran variabilidad pedológica. Finalmente, es importante mencionar que la zona está modelada por la hidrología.

5.2 Estimación de índices morfométricos **(Argyriou, 2016)**

En este apartado se obtiene un mapa tipo ráster que contiene los índices morfométricos (ver figura 6). Esto permite un análisis detallado de las características del terreno de la cuenca, incluyendo aspectos relevantes como el relieve relativo, la densidad de drenaje, el índice de disección, la gradiente de pendiente y el índice de humedad topográfica. Las zonas resaltadas en rojo indican

áreas con una gran variabilidad morfológica, mientras que las zonas en verde se relacionan con áreas de baja variabilidad morfológica. Estos índices van desde 0,495 hasta 16,813. Los lugares donde los índices son mayores coinciden específicamente con las zonas de variabilidad topográfica de la cuenca, siendo el caso del Cerro de las Baldías y los escarpes y laderas del Valle de Aburrá.

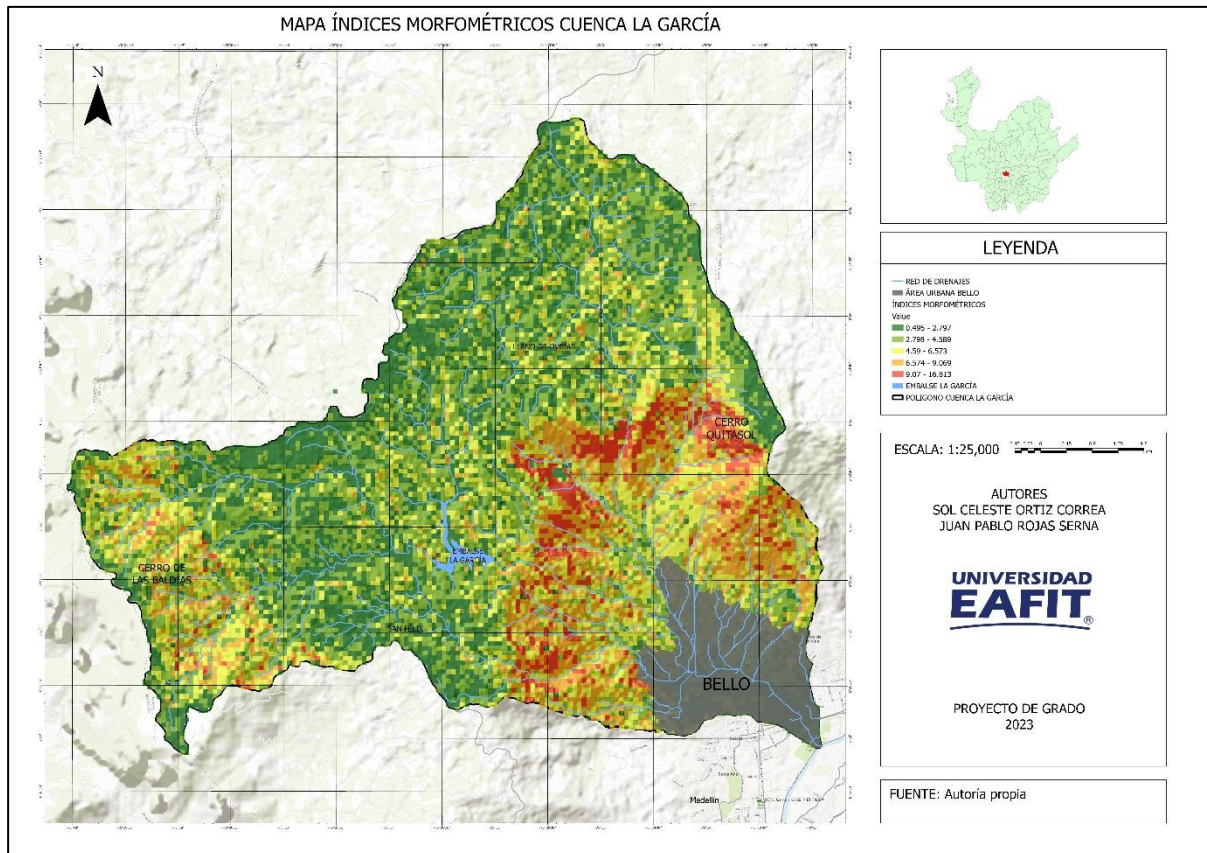


Figura 6. Mapa de índices morfométricos de la cuenca La García

Para interpretar la morfometría de la zona, se generan mapas individuales para cada índice morfométrico. En este caso, se obtuvieron los mapas presentados en el anexo (ver anexos 12 – 17), llamados: (a) Índice de densidad de drenaje (Dd); (b) Índice de disección (Di); (c) Índice de frecuencia de drenaje (Fu); (d) Gradiente de pendiente (SG); (e) Humedad topográfica (TWI); (f) Índice de relieve relativo (Ar).

Los índices marcan variaciones importantes hacia la cuenca media y baja, donde el cambio en las pendientes desde el altiplano hacia el Valle del río Medellín marcan procesos de fuerte incisión y control tectónico.

5.3 Estimación de geodiversidad total y LIG

Para obtener un análisis integral de la geodiversidad en la cuenca, se genera un mapa que resume la información de los ráster obtenidos de la morfometría y la geodiversidad del método Valentín. Este mapa resultante se denomina "Mapa de geodiversidad total" (ver figura 7) y refleja la suma de parámetros hidrológicos y morfométricos de la cuenca. Este enfoque se considera esencial, ya que las estimaciones de estos parámetros se basaron en un conjunto completo de datos cartográficos (Ramírez, 2022).

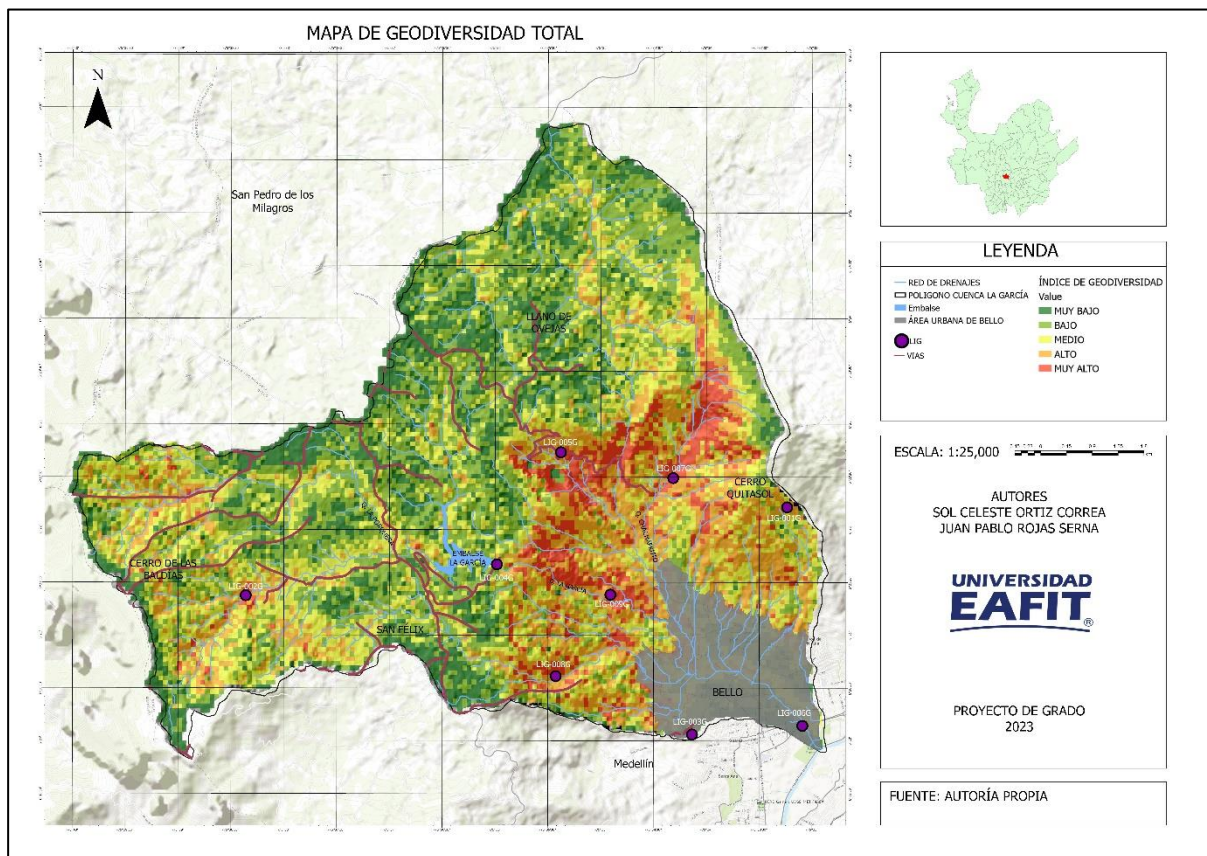


Figura 7. Mapa de geodiversidad total.

Los resultados cartografiados revelan que el 57 % de la cuenca exhibe índices de geodiversidad de entre medios y altos, concentrándose principalmente en sureste y suroeste. En contraste, en la zona norte de la cuenca (altiplano), los índices de geodiversidad son significativamente menores en comparación con el resto del área (ver tabla 1).

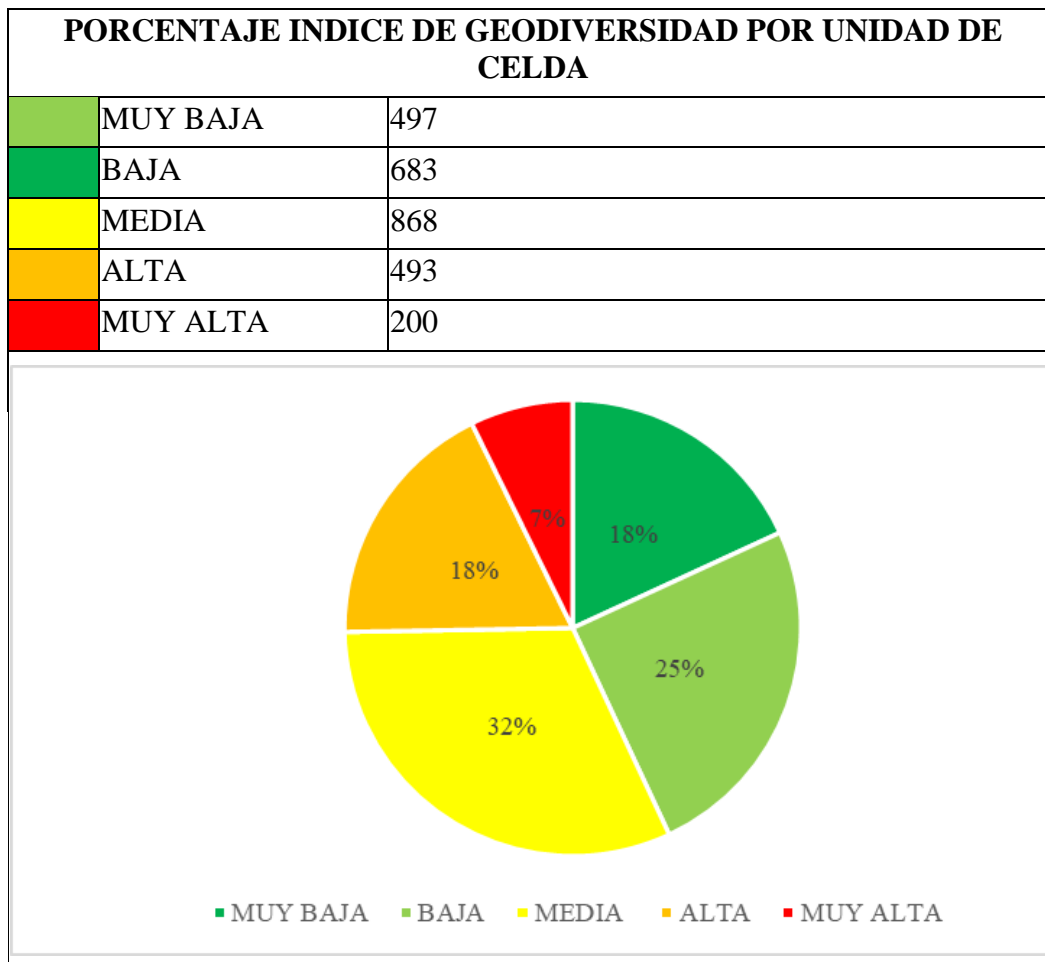


Tabla 1. Porcentaje índice de geodiversidad por unidad de celda.

Los LIG's (ver tabla 2) casi en su totalidad, concuerdan con las zonas de muy alta, alta y media geodiversidad, como se observa en la figura 7.

LUGARES DE INTERÉS GEOLÓGICO (LIG'S)	
CODIGO	NOMBRE
LIG-001G	Cerro Quitasol
LIG-002G	Cerro de las Baldías
LIG-003G	La Meseta
LIG-004G	Embalse La García
LIG-005G	Afloramientos Vía Bello-San Pedro
LIG-006G	Depósitos Aluviales de la zona urbana
LIG-007G	Microcuenca quebrada Chachafrito
LIG-008G	Microcuenca quebrada El Barro
LIG-009G	Zona de canteras

Tabla 2. Listado de lugares de interés geológico.

6. Discusión

6.1 Interpretación de resultados finales

El mapa de geodiversidad total de la cuenca La García revela dos áreas que se consideran de interés debido a que concentran una alta y muy alta geodiversidad. En primer lugar, en la zona sureste de la cuenca se identifica un área aproximada de 22.3 km² con altas concentraciones de elementos abióticos (EA). Esta región coincide con el área natural protegida del Cerro Quitasol - La Holanda y las laderas del Valle de Aburrá (ver anexo 18). La alta geodiversidad de estos sitios se atribuye a la presencia de seis unidades geológicas y distintas, la aglutinación de títulos mineros, la diversidad geomorfológica, con siete subunidades, y la concentración de estructuras geológicas (p.e. fallas). También se destaca por tener los índices morfométricos más altos, como pendientes pronunciadas, alta densidad de drenaje y un marcado grado de disección del terreno.

La segunda zona de interés, ubicada al suroeste de la cuenca, tiene un área aproximada de 8.74 km². La alta diversidad de EA en esta área se debe a una alta variabilidad en los tipos de suelo (cuatro diferentes) y diversa zonificación climática que incluye Frío Húmedo, Frío Superhúmedo y Páramo Bajo Superhúmedo. Esta zona concuerda con el área natural protegida Cerro de las Baldías (ver anexo 18).

Haciendo una visualización de la cuenca en el contexto compartido con las cuencas de las quebradas La Iguaná y El Hato (ver anexo 19), ubicadas al sur del área de estudio, esta región del Bosque Modelo se puede subdividir en subzonas:

Corredor Cerro del Padre Amaya - Páramo de la Baldías, la gestión de esta zona se encuentra alineada con el servicio geo-ecosistémico de regulación climática (vegetación de páramo) y de aprovisionamiento (hídrico). Actualmente, el uso del suelo, aunque está restringido por ser una zona de reserva, presenta usos compartidos con ganadería y agricultura, generando presiones para que los suelos poco controlados desde el punto de vista ecosistémico se extiendan.

Sector Llanos de Ovejas, central hidroeléctrica La García; la gestión de esta zona se deberá enfocar hacia la conservación de las condiciones óptimas para el aprovisionamiento hidrológico y energético, como misión principal de la central hidroeléctrica, para la Industria Textil (Fabricato) y local (EPM). Por sus características de bajas pendientes, litología y geomorfología monótonas (rocas graníticas y su modelado colinado en la zona de altiplano), esta zona recobra importancia ya que es una fuente de suministro de agua y energía para la región, por eso acciones enfocadas en la

restauración del paisaje, deberá ser su prioridad, considerando a los actores del sector como Fabricato y EPM, en conjunto con la comunidad.

Corredor ecológico Cerro El Volador y Quitasol, estas zonas, delimitadas como zonas de alta geodiversidad, cumplen un papel muy importante en la prestación de múltiples servicios, son lugares donde por su misión como áreas de reserva, son aliados en los procesos de desarrollo ecoturístico, educativo y cultural. En su entorno se llevan a cabo proceso de protección de la vegetación y de gestión patrimonial del registro arqueológico del Valle de Aburrá.

Zona de influencia urbana en los cauces de La Iguaná, El Hato y La García, en términos de servicios geosistémicos de regulación hidráulica, estos lugares deberán cumplir hacia futuro un papel muy importante en la gestión social hacia a gestión del riesgo por avenidas torrenciales. Para ellos se propone articular a las universidades Nacional y San Buenaventura al interior del BMVA, en la conformación de geoportales que permitan el monitoreo, instrumentalización y gestión social del conocimiento, hacia modelos de alerta temprana multinivel, articulados con la misión del SIATA.

6.2 Geodiversidad dirigida a la Apropiación Social del Conocimiento Geocientífico (ASCG) por avenidas torrenciales

Las avenidas torrenciales son un fenómeno en el cual grandes cantidades de agua y sedimentos se desplazan rápidamente y de forma repentina a lo largo del cauce de una cuenca hidrográfica (Aristizábal et al., 2020; Koutroulis y Tsanis, 2010). El Valle de Aburrá, en donde se encuentra la cuenca La García, presenta una situación de alta vulnerabilidad a este tipo de eventos, debido a sus condiciones geomorfológicas y a la rápida expansión urbana.

En el marco del POMCA del Río Aburrá se ha llevado a cabo una zonificación del riesgo asociado a las avenidas torrenciales a lo largo de esta cuenca (ver anexo 20). Los resultados de este análisis han revelado la presencia de amenazas de nivel medio y alto en varios afluentes y en el curso principal de la cuenca. En concreto, se han identificado dos áreas críticas en cuanto a riesgo por avenidas torrenciales: el suroeste y el suroriental de la cuenca. La primera abarca la parte alta de la cuenca, específicamente en el área del Llano de Ovejas. La segunda zona incluye las laderas y áreas bajas con pendientes más suaves en el Valle de Aburrá.

La divulgación de los resultados obtenidos en este proyecto debe darse por medio técnicas de Apropiación Social del Conocimiento Geocientífico (ASCG), que juega un papel crucial en la gestión efectiva del riesgo de desastres. Para asegurar el éxito en este ámbito, es fundamental que las personas que residen en áreas de riesgo estén familiarizadas con su propio territorio (Cortes y

Castaño, 2023). La geodiversidad se convierte así en una herramienta clave para difundir el conocimiento sobre el territorio en el que habitan, promoviendo el dominio del tema y la preparación ante los riesgos naturales. En el presente estudio, se comenzó con una etapa inicial de presentación de los resultados a la gerencia del Bosque Modelo del Valle de Aburrá y a una delegación de la Universidad San Buenaventura; los datos preliminares, también serán presentados por la profesora María Isabel Marín, en el Workshop liderado por la Universidad Nacional y el Tecnológico de Berlín (noviembre de 2023), hacia la gestión del Riesgo en el Valle de Aburrá. Se espera en el futuro cercano implementar la propuesta de aula viva o Living Labs (especificada en el siguiente numeral) para la gestión social.

El análisis de la geodiversidad puede ser fundamental en la gestión del riesgo de diversas maneras. Primero, puede ayudar a identificar las áreas más susceptibles a ciertos peligros naturales, como las avenidas torrenciales. Este conocimiento permite que las autoridades y los planificadores se enfoquen en la mitigación de riesgos en esas zonas específicas. Por otro lado, el entendimiento de la diversidad geológica puede influir en las decisiones de planificación del uso del suelo, dando mayores insumos para la conservación y/o restricción de usos, que permitan la restauración de usos pertinentes (vocación de uso forestal para protección).

6.3 Propuesta aula viva y Lugares de Interés Geológico (LIG)

A partir de diferentes workshops realizado con el grupo gestor del BMVA y siguiendo los lineamientos propuestos por el Grupo de Investigación en Geología Ambiental y Tectónica (GAT), en su línea de investigación en Geoconservación, compilados por Marin-Cerón (2023) en su propuesta de ascenso para profesora Titular de la Universidad EAFIT, se dio inicio a la ruta de aprendizaje de la geodiversidad. Con los siguientes ciclos. 1. Conceptualización básica sobre Geodiversidad (noviembre 2022); 2. Estimación 2D de la Geodiversidad (octubre de 2023); 3. Identificación de estrategias en función de los servicios geosistémicos (p.e. Inventario de LIG's, diseño de georuta).

El workshop de este año se realizó con la gerencia del BMVA y directivas de la Universidad San Buenaventura. Se hizo inicialmente una socialización de los insumos obtenidos en el presente estudio, para proceder a la validación del inventario de LIG's, mediante un recorrido por la cuenca (ver anexos 21- 24). A partir de esta información, se procedió a generar la siguiente propuesta de aula viva, tomando como modelo la propuesta liderada por la Universidad EAFIT en la cuenca de

La Volcana, como experiencia piloto en la gestión del paisaje. El espacio de aprendizaje propuesto incluye:

Divulgación sobre la geodiversidad sobre tres ejes temáticos: (1) De la geoconservación a la construcción de paz en territorios urbano-rurales; (2) Acciones por el clima y resiliencia al cambio climático; (3) Patrimonio Geológico y gestión del riesgo;

De la geoconservación a la construcción de paz: En este sentido la herramienta gráfica construida permita identificar los servicios geo-ecosistémicos que presta la cuenca a la sociedad, para enfocar con esto, las líneas de acción. Como se observa el aula viva en la cuenca alta, media y baja, deberá enfocar parte de sus acciones a construir la paz en la zona rural hacia el altiplano de ovejas, zona donde el conflicto armado ha generado desplazamientos masivos reflejados en bosques y páramos de Antioquia. El relato dice: “Estos territorios unas empinadas cuestas y cañones profundos que llegan hasta el río Cauca y Magdalena. Corresponde a zonas olvidada en los mapas de Antioquia por casi 100 años. El progreso de un país que necesitaba madera para construir los ferrocarriles y los leves asomos de una colonización antioqueña, fueron los detonantes para la llegada de los primeros campesinos” (Podcast geografía de la guerra: Resistencia en los Cañones (https://open.spotify.com/episode/6KFeQvjQIpAwaFz11wsAtx?si=iwDA9_5jQL-zKhMG_wwnNw) y con ello la expansión de la frontera agrícola y ganadera en las zonas altas. De igual forma la conexión de corredores ecológicos que comuniquen los cerros Quitasol y Volador con la parte alta de la cuenca, para la consolidación de espacios de esparcimiento urbano-rural, que permitan la recreación sana y pacífica en zonas ecoturística amigables y lideradas por los entes territoriales.

Acciones por el clima, la implementación de las estrategias de conservación y restauración, en las zonas de páramo y circundantes, las rondas de los ríos, la vegetación urbana, se ha convertido en una bandera del AMVA y Corantioquia, con su programa BanCO2, se ha logrado incluir comunidades campesinas del páramo de las Baldías y el altiplano de Ovejas.

Patrimonio geológico y gestión del riesgo. El mapa de geodiversidad final (sensu Valentín modificado con Argyrius) claramente resalta, aquellas zonas donde el territorio es susceptible a la generación de deslizamientos (hacia la zona de transición del Llano de Ovejas con el Valle de Aburrá); debido a la inestabilidad morfotectónica, ampliamente resaltada por el análisis de los índices morfométricos. Dicha inestabilidad, sumado a eventos extremos de lluvia, han detonado

eventos de avenidas torrenciales (como el registrado el 6 de octubre del año 2005), afectando más de 10 familias y dejando un saldo de 40 personas fallecidas, daños de infraestructura (11) y afectaciones en locales comerciales, viviendas y a las instalaciones de la Universidad San Buenaventura. Este hecho, ha llamado la atención de la Universidad EAFIT, para la conformación de georutas que iniciarían en los campus universitarios, visitando LIG's pedagógicos, donde se tienen el registro fotográfico multitemporal de la dinámica de las quebradas La Iguaná, El Hato y la García. Seguidamente se propone la visita in-situ de cada punto crítico para exponer las acciones que se vienen implementando en su restauración. Una tercera parte de la ruta se puede realizar usando la línea B del Metro de Medellín, hasta llegar a la Estación la Aurora del metro Cable, cuyo trayecto permite visualizar en la cuenca fenómenos como: urbanización informal, inadecuado manejo de aguas residuales y aguas lluvias e incisión del cauce de las quebradas. Esta estación adicionalmente, permite contextualizar al público (experto o no) sobre las teorías de formación del Valle de Aburrá y la identificación de antiguos deslizamientos ya urbanizados en las comunas orientales. Posteriormente, se toma la vía a San Félix y luego la que conduce al municipio de Bello, pasando por los depósitos de vertiente y aluvio-torrenciales (los cuales están en vía de ser datados por medio del método de isotopía cosmogénica (Marín-Cerón, comunicación personal). Se espera que, al terminar la ruta en el campus de la Universidad San Buenaventura, se finalice con un taller que permita cerrar el proceso de iniciación al conocimiento de la historia geológica de las cuencas (La Iguaná, El Hato y La García), para la formación de líderes ambientales sensibles y resilientes para la gestión del riesgo.

7. Conclusiones

Los insumos entregados a la Universidad San Buenaventura y Universidad Nacional, para crear un aula viva que integre las cuencas La Iguaná y El Hato, aportan a la gestión integral del paisaje del Bosque Modelo del Valle de Aburrá.

Se identificó que el método de geodiversidad estadístico (sensu Valentín, modificado con la metodología de diversidad morfométrica sensu Argyrius) se valida en más de un 90% con los inventarios de LIG's aportados por el trabajo de Cano (2023) y el presente trabajo.

El mapa de geodiversidad resultante, permite identificar zonas de importancia para la prestación de los servicios geo-ecosistémicos de aprovisionamiento, regulación, soporte, conocimiento y cultura, los cuales pueden ser gestionados con la conformación de un aula viva conjunta promovida como una de las iniciativas piloto del BMVA, priorizando acciones por el clima hacia la parte alta,

construcción de paz hacia los cerros tutelares y las universidades, y la gestión del riesgo en la zona urbana tomando como epicentro de la ciencia y la divulgación las universidades.

Finalmente, se concluye que Apropiación Social del Conocimiento Geocientífico sobre la geodiversidad y los riesgos naturales asociados a las cuencas mencionadas, permite desarrollar herramientas y modelos de gestión integral del paisaje.

8. Bibliografía

Alcaldía de Bello. (2009). Acuerdo 033 de 2009. Plan de Ordenamiento Territorial de Bello. Bello, Colombia.

Área Metropolitana del Valle de Aburrá. (2008). Formulación del Plan de Ordenación y Manejo de la Microcuenca de la Quebrada La García, Municipio de Bello. Medellín, Colombia.

Aristizabal, E., Arango-Carmona, M., Garcia-Lopez, I. (2020). Definition and Classification of Torrential Avenues and Their Impact in the Colombian Andes.

Argyriou, A. V., Sarris, A., & Teeuw, R. M. (2016). Using geoinformatics and geomorphometrics to quantify the geodiversity of Crete, Greece. *International journal of applied earth observation and geoinformation*, 51, 47-59.

Benito Calvo, A., Pérez González, A., Magri, O., & Meza, P. (2009). Assessing regional geodiversity: the Iberian Peninsula. *Earth Surface Processes and Landforms*, 34(March), 613–628. <https://doi.org/10.1002/esp>

Caballero Acosta, J. (2011). Las avenidas torrenciales una amenaza potencial en el Valle de Aburrá.

Cano Rincón, M. (2023). Estimación de la geodiversidad de las cuencas La Iguana y El Hato, Bosque Modelo del Valle de Aburrá. Universidad EAFIT, Medellín.

Consortio Microzonificación Sísmica (2006). Microzonificación sísmica de la ciudad de Medellín. Medellín, Colombia.

Correa A.M., U. Martens, J. J. Restrepo, O. Ordóñez-Carmona & M. Martins. (2000). Subdivisión de las metamorfitas básicas de los alrededores de Medellín – Cordillera Central de Colombia. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.* 29 (112): 325-344.

Forte, J. P. (2014). Avaliação quantitativa da geodiversidade: desenvolvimento de instrumentos metodológicos com aplicação ao ordenamento do território.

Giraldo, M.I. y Sánchez, D.P. (2004). Cartografía geológica del contacto del cuerpo sur de la dunita de Medellín con sus rocas asociadas. Tesis de grado, Univ. Nacional, Fac. Minas, Medellín, pp 1-70.

Gray, M. (2004). *Geodiversity: Valuing and conserving abiotic nature*. John Wiley & Sons.

Koutroulis, A., Ioannis, K. (2010). A Method for Estimating Flash Flood Peak Discharge in a Poorly Gauged Basin: Case Study for the 13-14 January 1994.

Lopez, G.I., Hermelin, M., García, C., Sierra, G.M., Toro, G.E. and Rink, W.J. (1991). Sometido. Evaluation of the Evolution of a High Elevation Plateau in the Northern Central Cordillera of the Andes, Colombia, South America: First Optical Ages and Preliminary Results. *Geomorphology*.

Manosso, F. C., & de Nóbrega, M. T. (2015). Calculation of Geodiversity from Landscape Units of the Cadeado Range Region in Paraná, Brazil. *Geoheritage*, 8(3), 189–199. <https://doi.org/10.1007/s12371-015-0152-1>

MINAMBIENTE, Fondo, A., MINHACIENDA, CORNARE, CORANTIOQUIA, Área Metropolitana, V. de A., & S.A.S, I. C. (2018). Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca del Río Aburrá.

Najwer, A., Borysiak, J., Gudowicz, J., Mazurek, M., & Zwoliński, Z. (2016). Geodiversity and Biodiversity of the Postglacial Landscape (Dębnica River Catchment, Poland).

Nichols WF, Killingbeck KT, August PV. (1998) The influence of geomorphological heterogeneity on biodiversity II. A landscape perspective. *Conserv Biol* 12:371–379

Ochoa Villa, S. (2012). Modelación de la erosión hídrica a escala de cuenca en la zona alta de la quebrada La García, Municipio de Bello, Antioquia. Universidad Nacional de Colombia, Medellín.

Pereira, D. I., Pereira, P., Brilha, J., & Santos, L. (2013). Geodiversity assessment of Paraná State (Brazil): An innovative approach. *Environmental Management*, 52(3), 541–552. <https://doi.org/10.1007/s00267-013-0100-2>

Ramírez, M. (2022). Índices morfométricos. Medellín, Antioquia, Colombia.

Silva, J. P., Pereira, D. I., Aguiar, A. M., & Rodrigues, C. (2013). Geodiversity assessment of the Xingu drainage basin. *Journal of Maps*, 9(2), 254–262. <https://doi.org/10.1080/17445647.2013.775085>

Silva, J. P., Rodrigues, C., & Pereira, D. I. (2014). Mapping and Analysis of Geodiversity Indices in the Xingu River Basin, Amazonia, Brazil. *Geoheritage*, 7(4), 337–350. <https://doi.org/10.1007/s12371-014-0134-8>

Serrano Cañadas, E., & Ruiz Flaño, P. (1). Geodiversidad: concepto, evaluación y aplicación territorial. El caso de Tiermes Caracena (Soria). *Boletín De La Asociación De Geógrafos Españoles*, (45). Recuperado a partir de <https://bage.age-geografia.es/ojs/index.php/bage/article/view/640>

Servicio Geológico Colombiano. (2015). Memoria explicativa de zonificación de la susceptibilidad y la amenaza relativa por movimientos en masa, escala 1:100 000, plancha 146 Medellín Occidental. Bogotá D.C.: Servicio Geológico Colombiano.

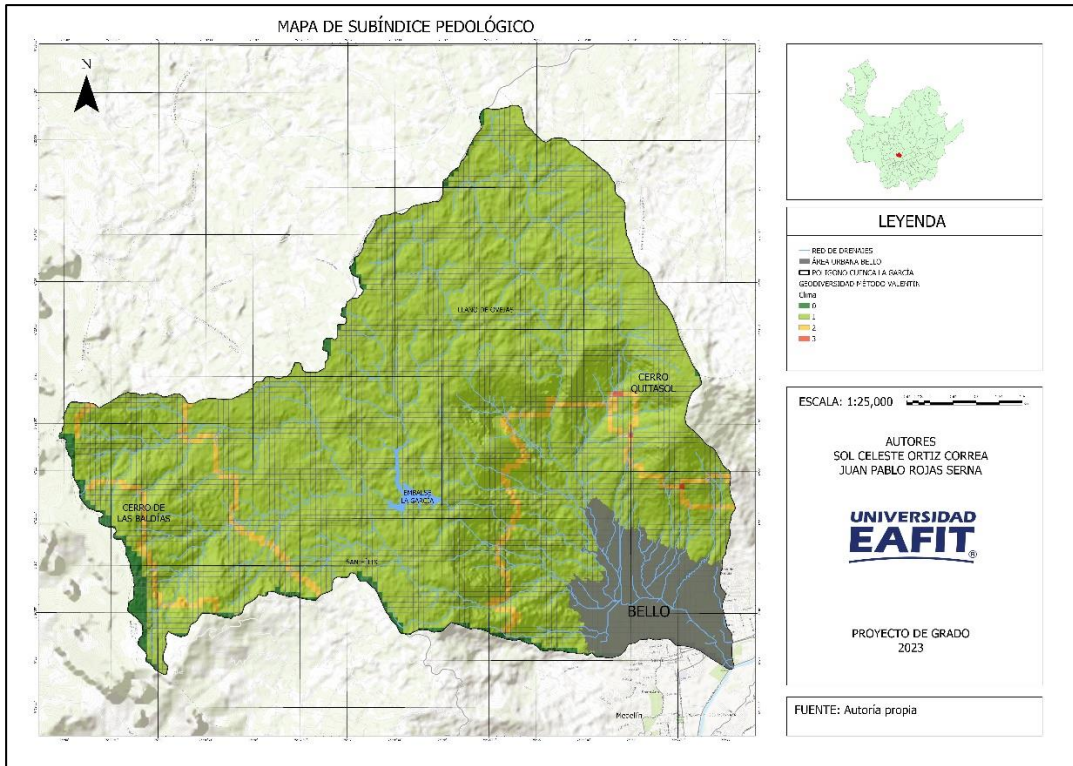
Silva, J. P., Rodrigues, C., & Pereira, D. I. (2014). Mapping and Analysis of Geodiversity Indices in the Xingu River Basin, Amazonia, Brazil. *Geoheritage*, 7(4), 337–350. <https://doi.org/10.1007/s12371-014-0134-8>

Stanley, M. (2000). Geodiversity. *Earth Heritage*, 14, 15-18.

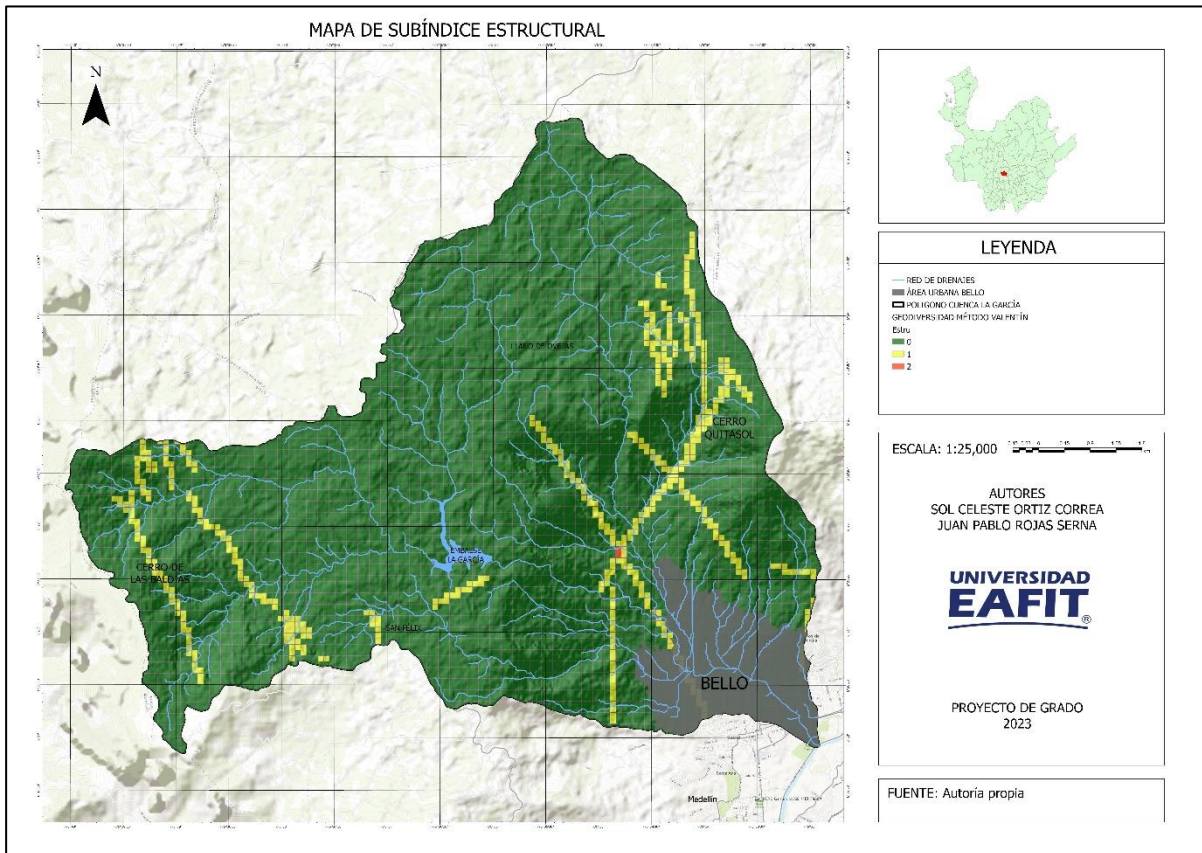
Stepišnik, U., & Trenchovska, A. (2017). A New Quantitative Model for Comprehensive Geodiversity Evaluation: the Škocjan Caves Regional Park, Slovenia. *Geoheritage*, 10(1), 39–48. <https://doi.org/10.1007/s12371-017-0216-5>

Valentín Ramirez, 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.

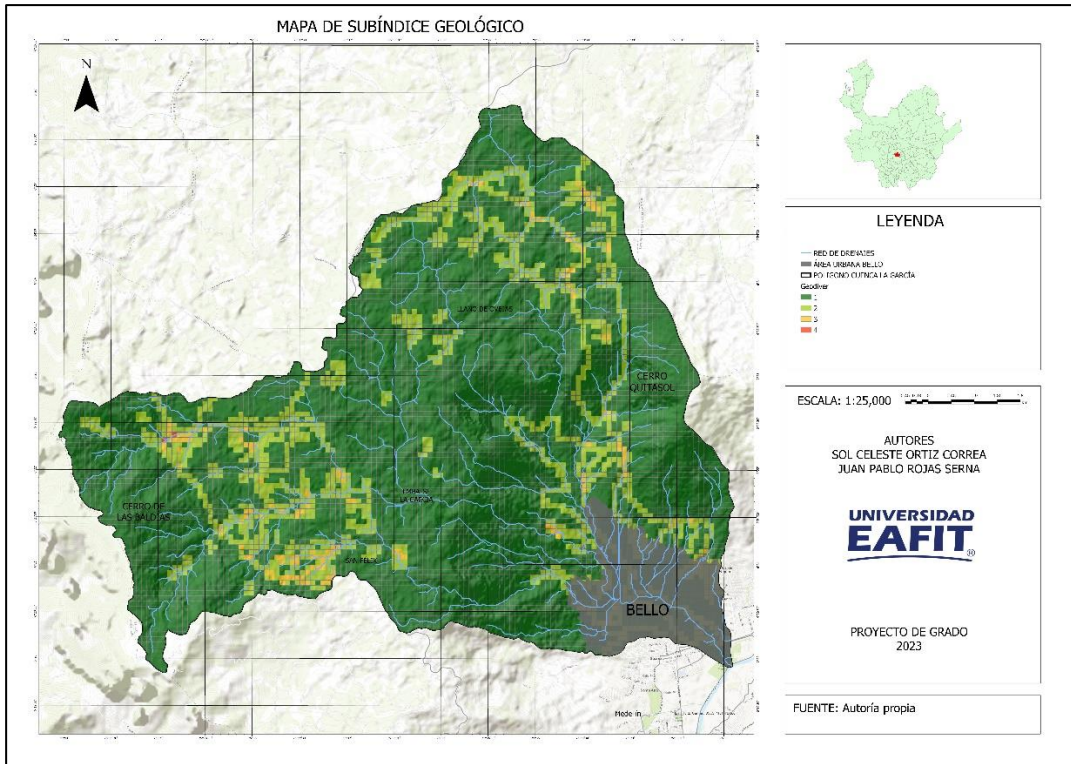
Zwoliński, Z. (2009). The routine of landform geodiversity map design for the Polish Carpathian Mts. *Landform Analysis*, 11, 77–85.



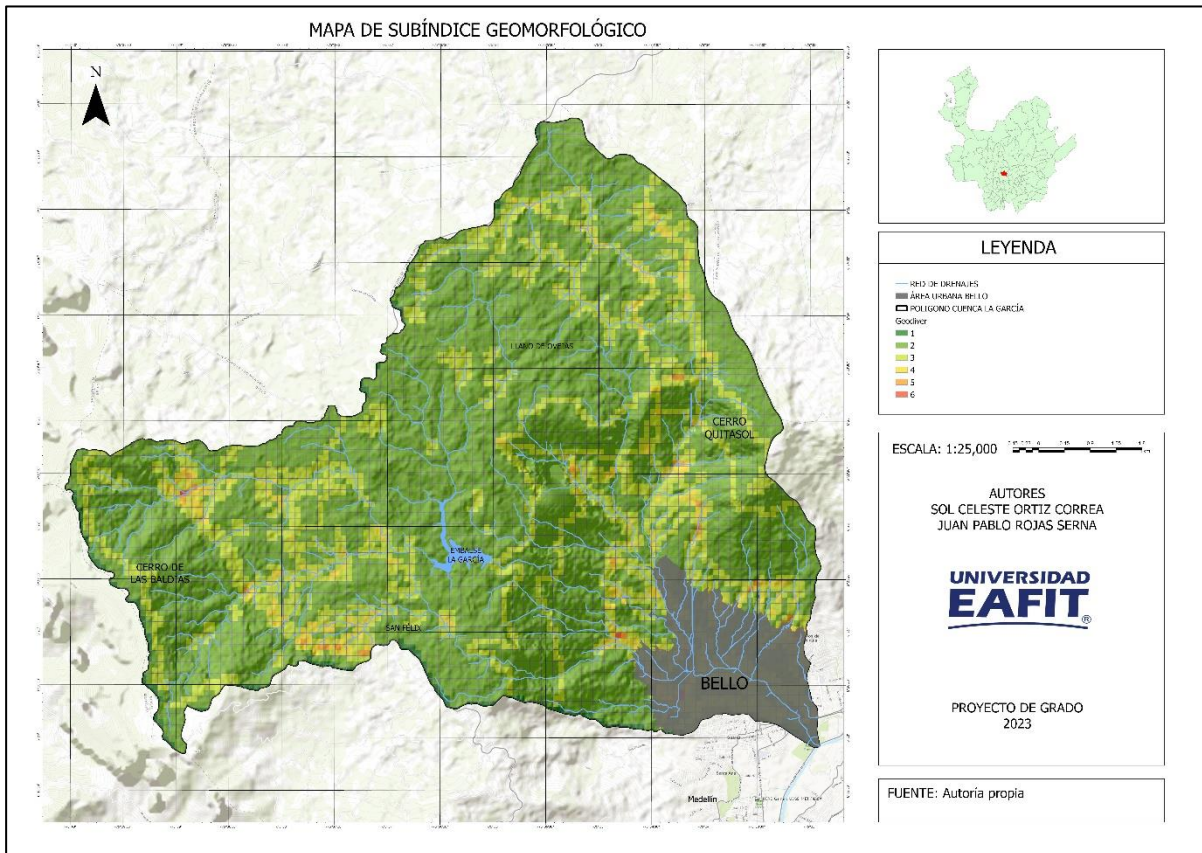
Anexo 5. Subíndice climático



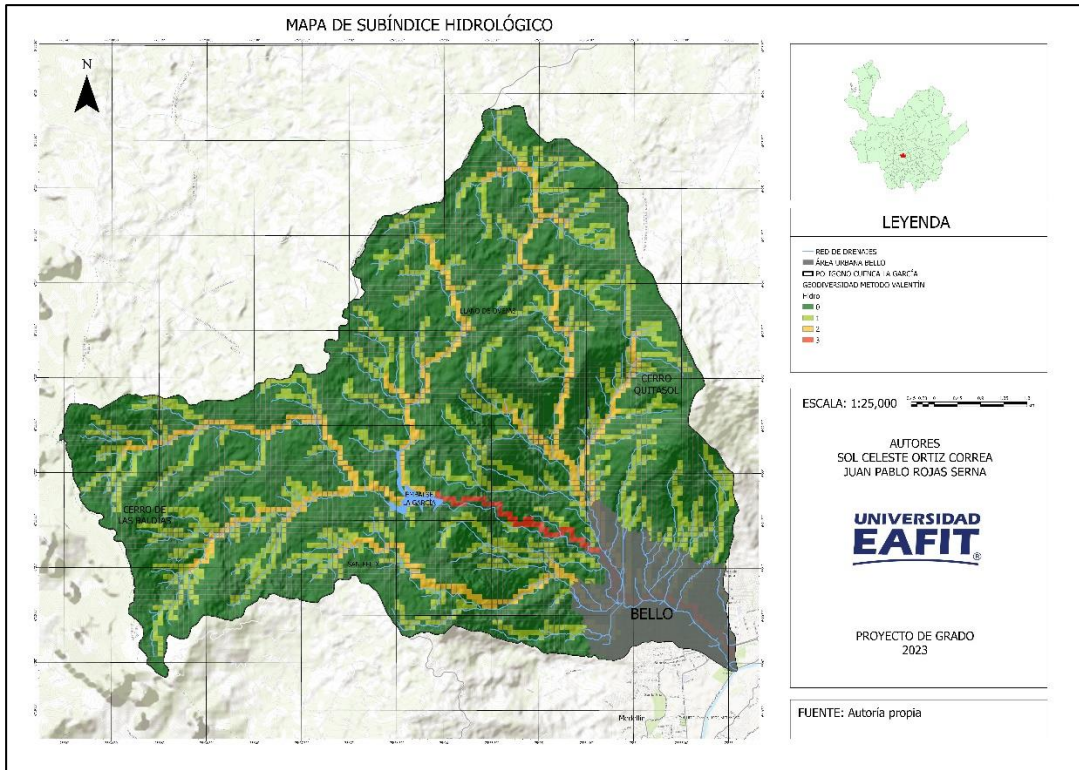
Anexo 6. Subíndice estructural



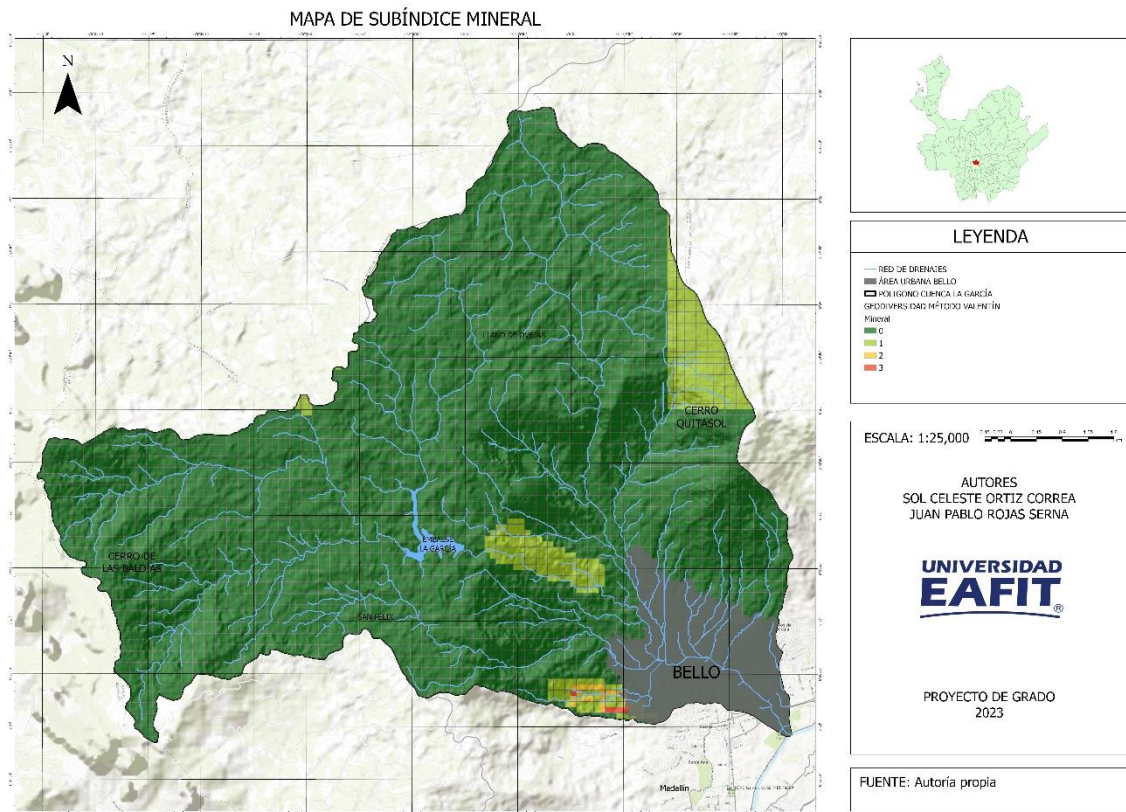
Anexo 7. Subíndice geológico



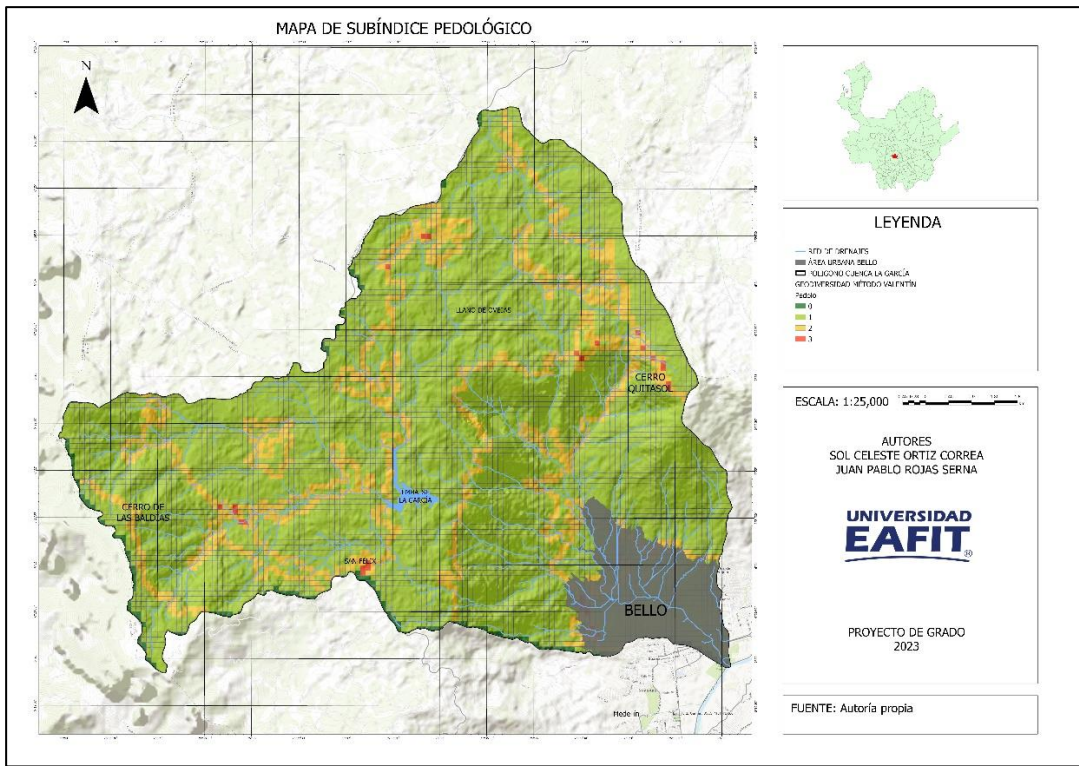
Anexo 8. Subíndice geomorfológico



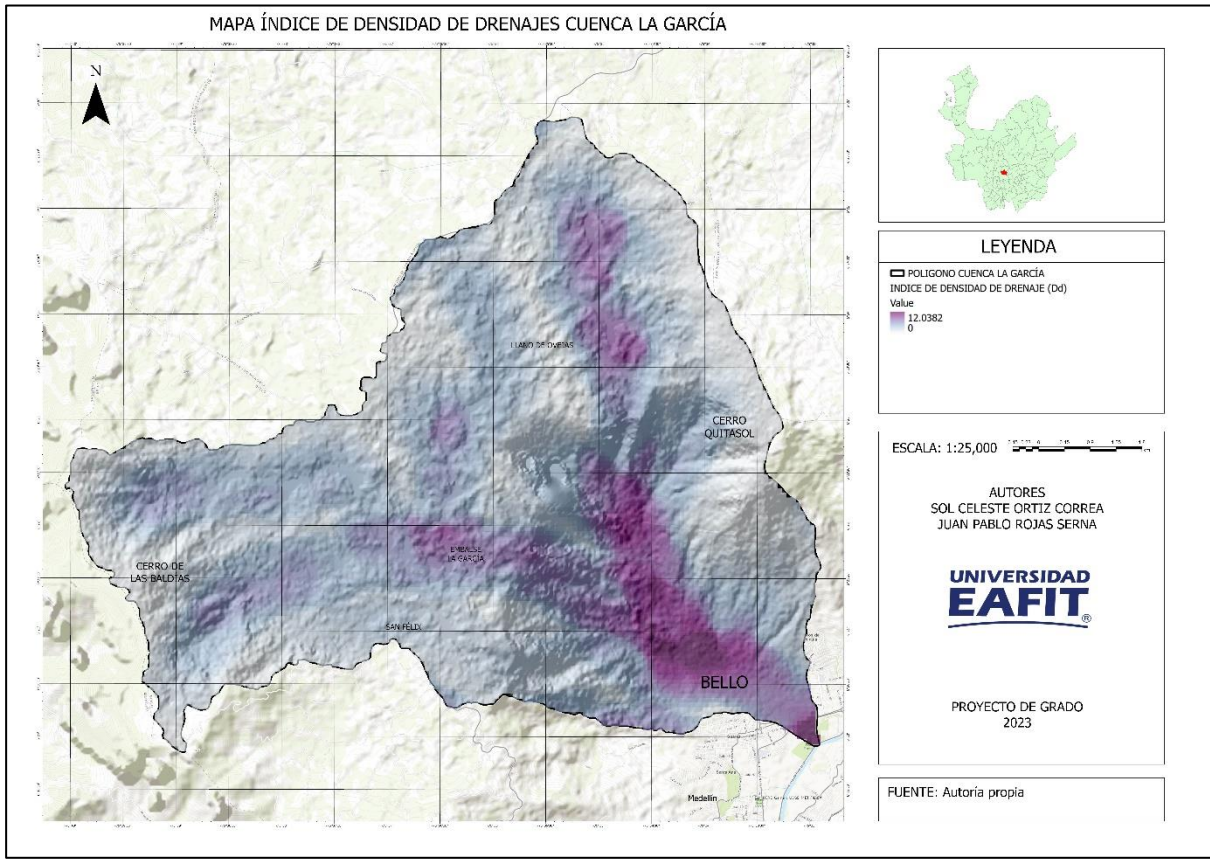
Anexo 9. Subíndice Hidrológico



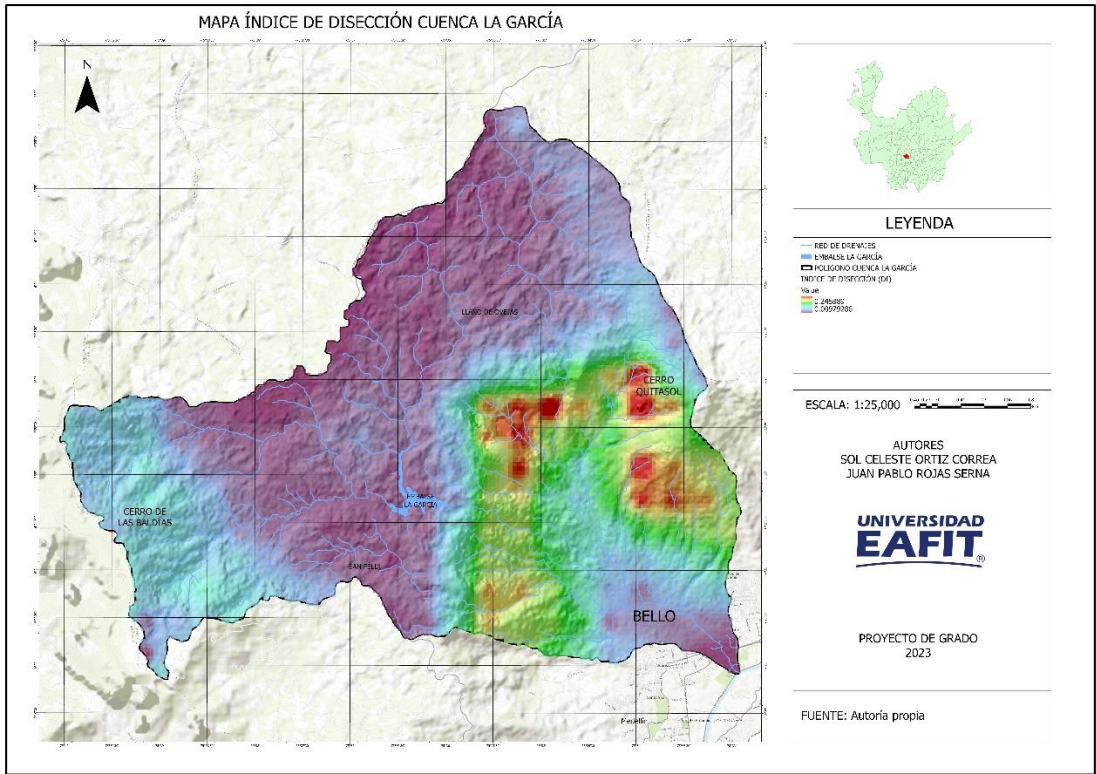
Anexo 10. Subíndice de títulos mineros.



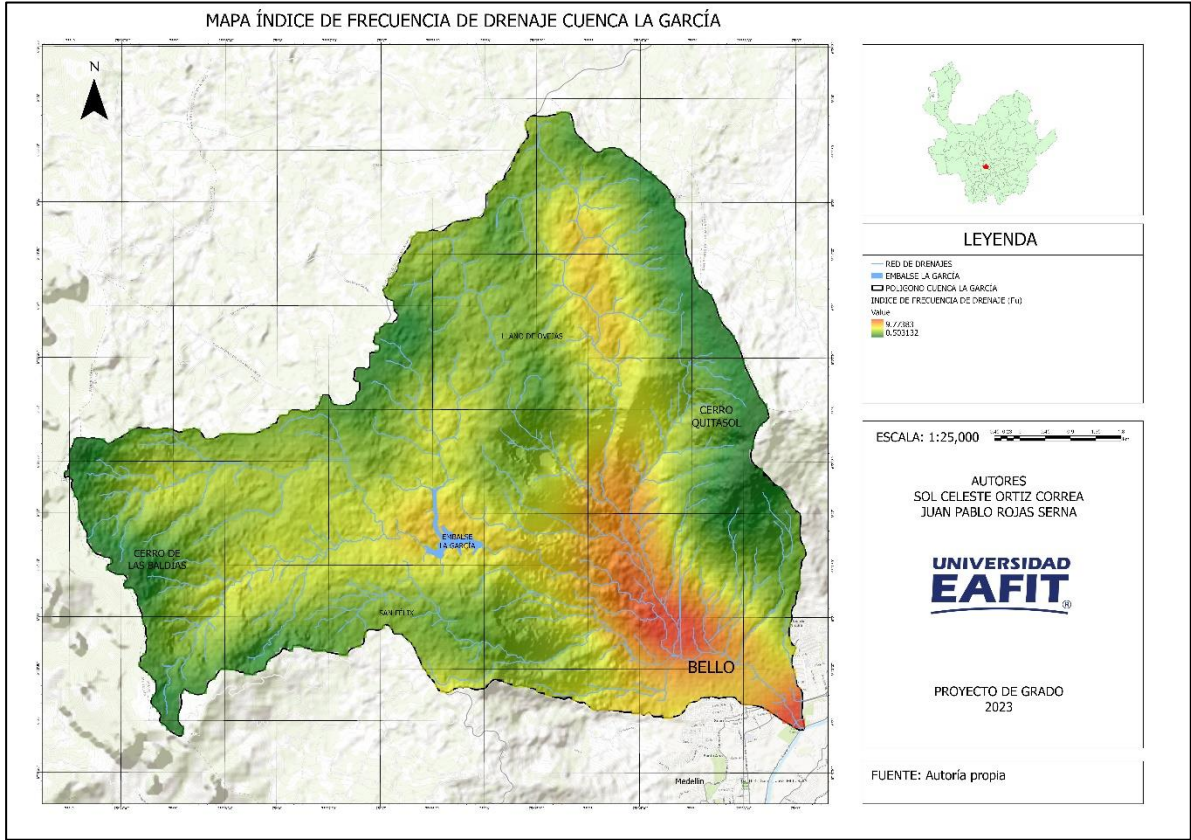
Anexo 11. Subíndice pedológico.



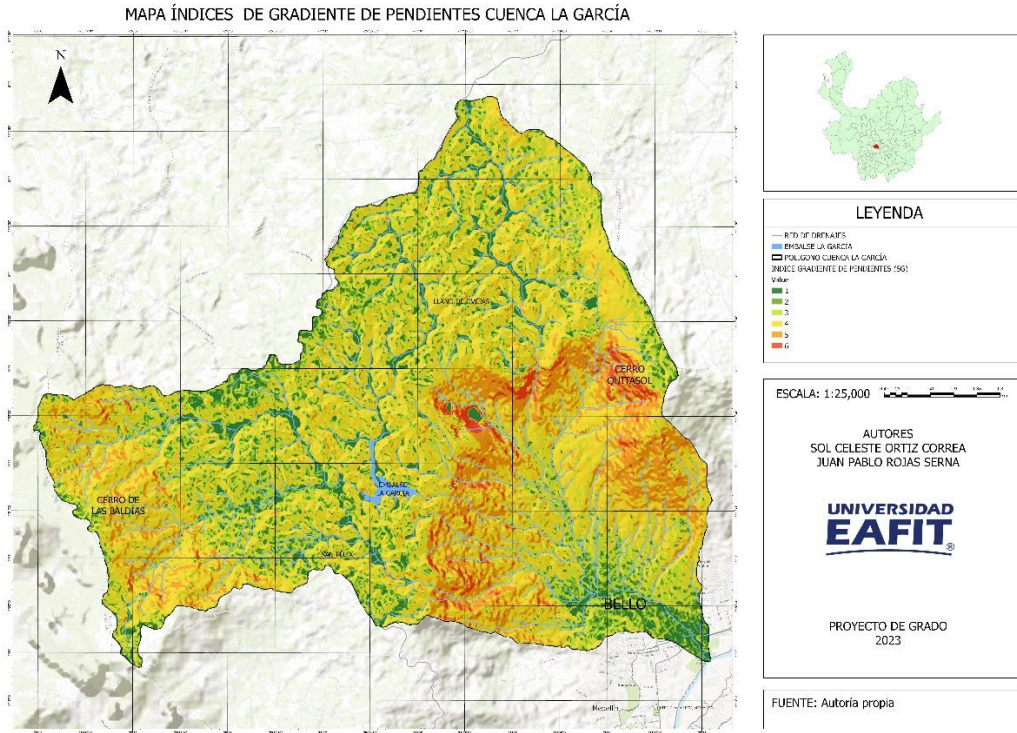
Anexo 12. Índice Densidad de drenaje (Dd).



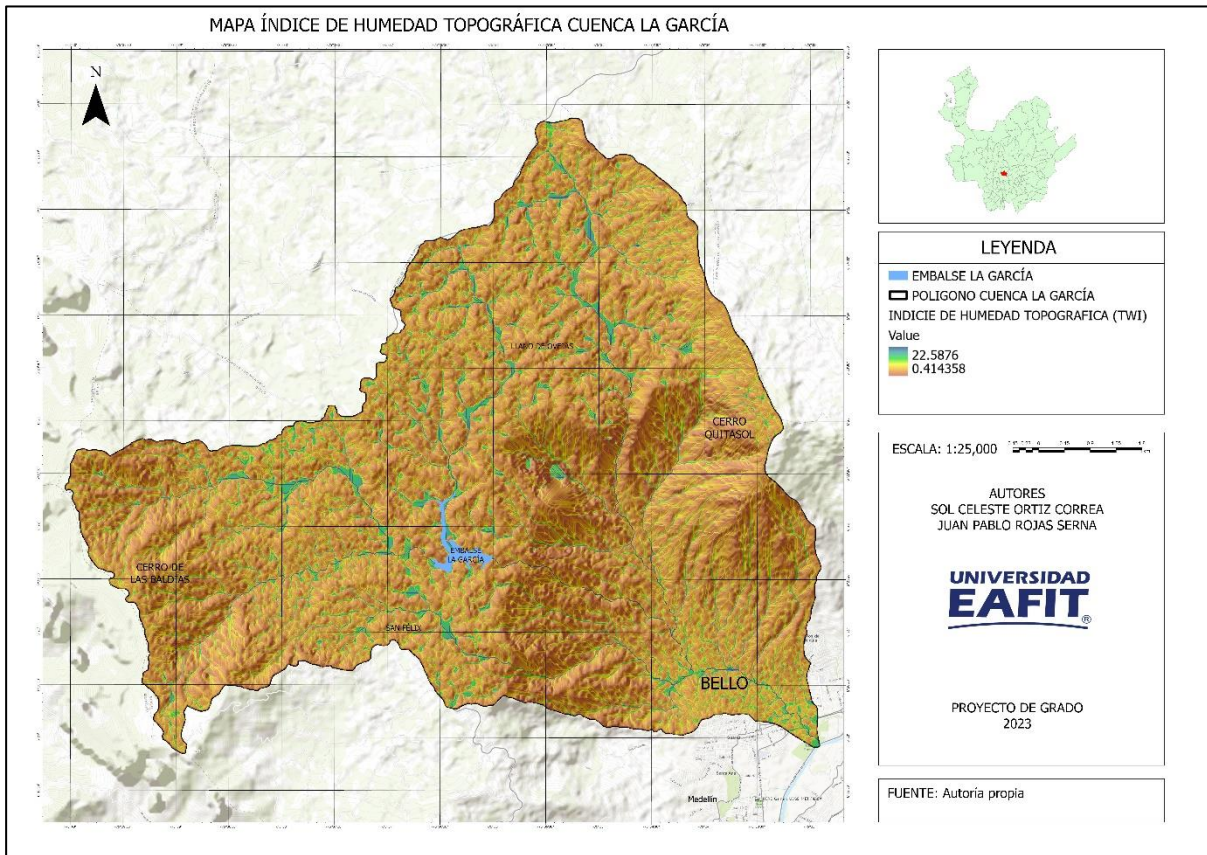
Anexo 13. Índice de disección (Di).



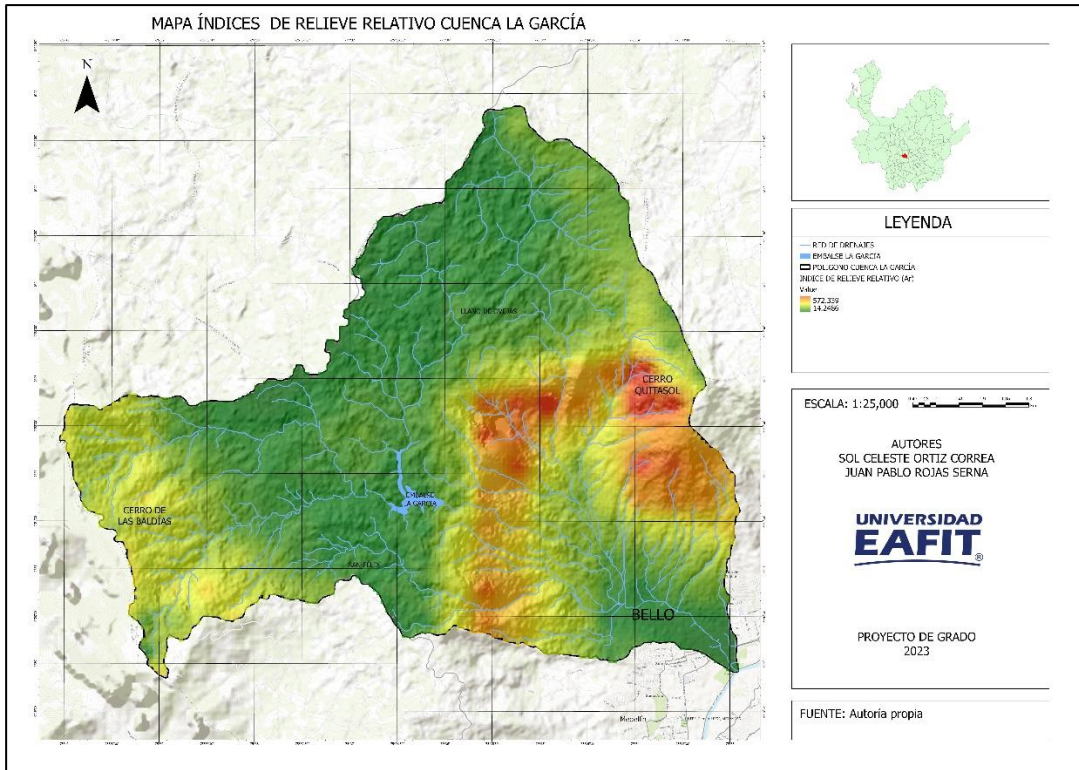
Anexo 14. Índice de frecuencia de drenaje (Fu).



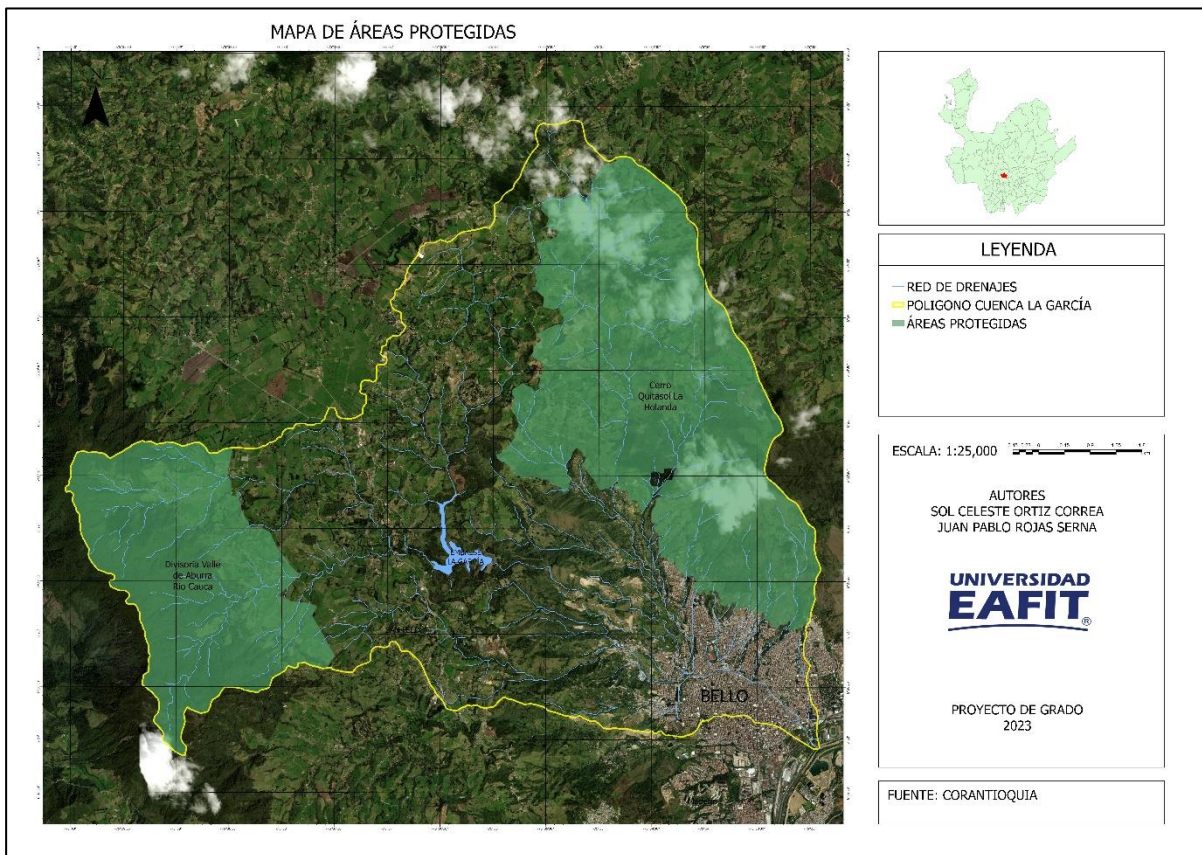
Anexo 15. Índice de gradiente de pendiente (SG)



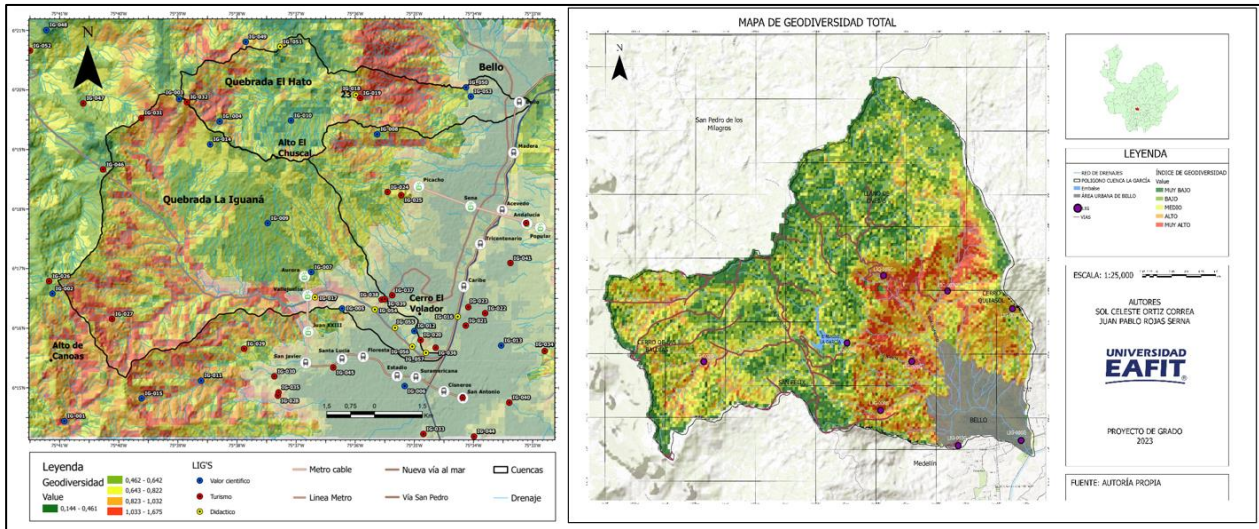
Anexo 16. Índice de humedad topográfica (TWI)



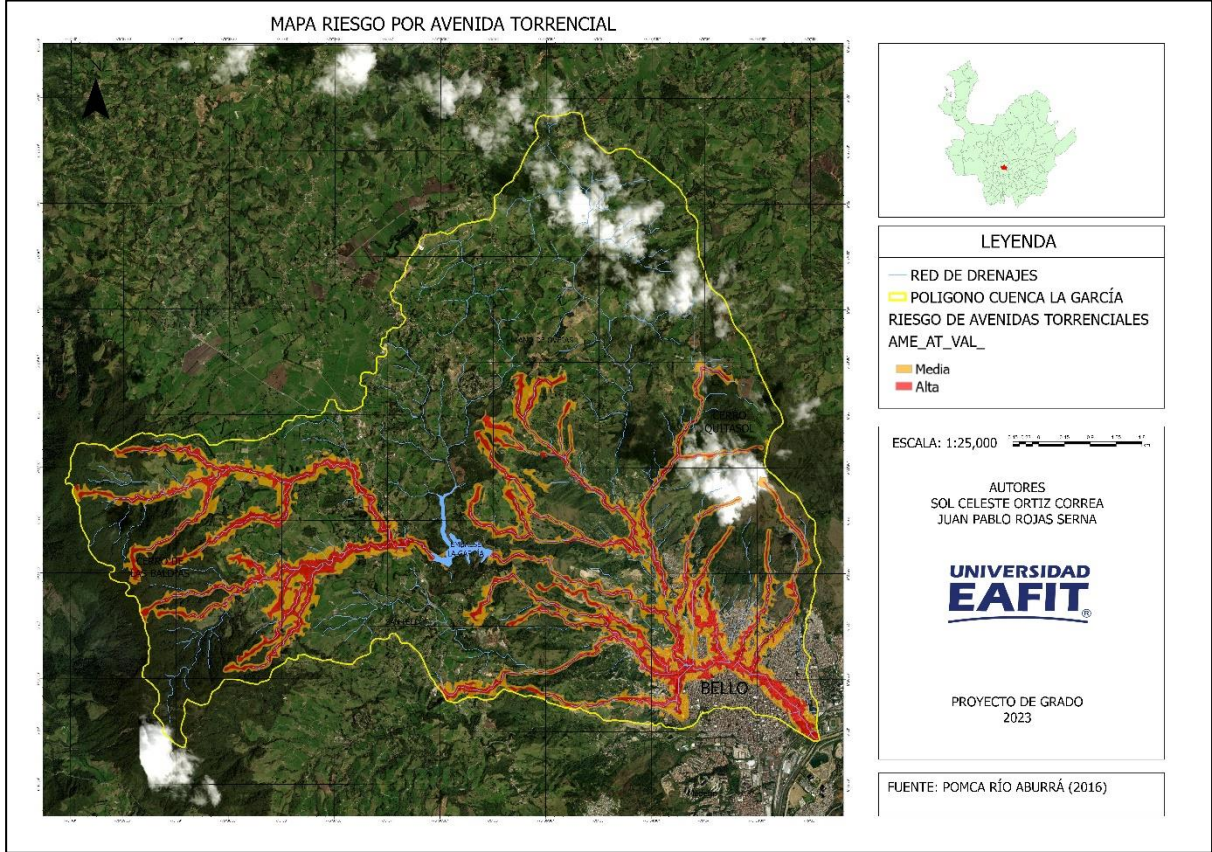
Anexo 17. Índice de relieve relativo (Ar)



Anexo 18. Zonas Protegidas



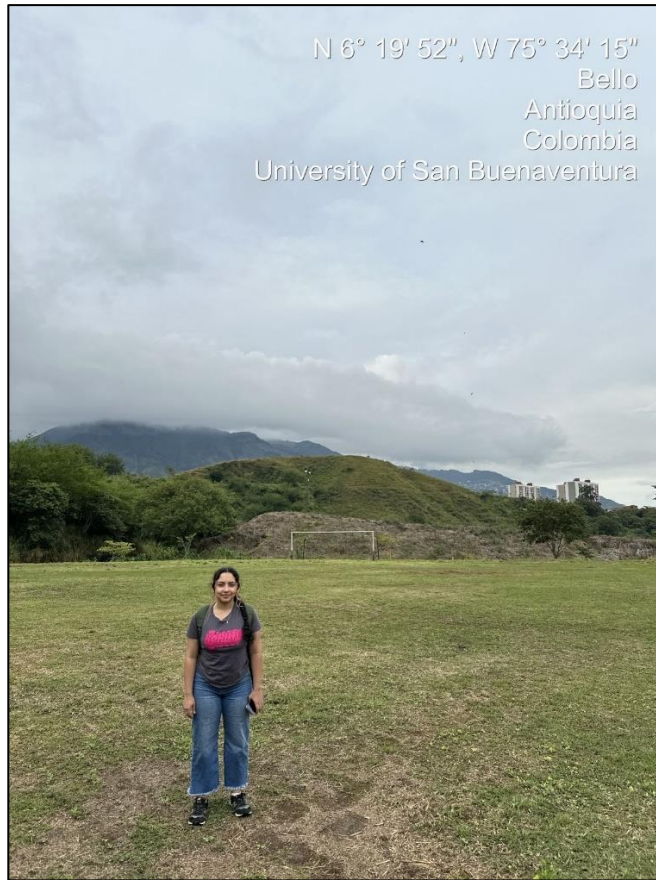
Anexo 19. Cuenca El Hato y La Iguaná (Cano,2023) y La García.



Anexo 20. Mapa riesgo por avenidas torrenciales



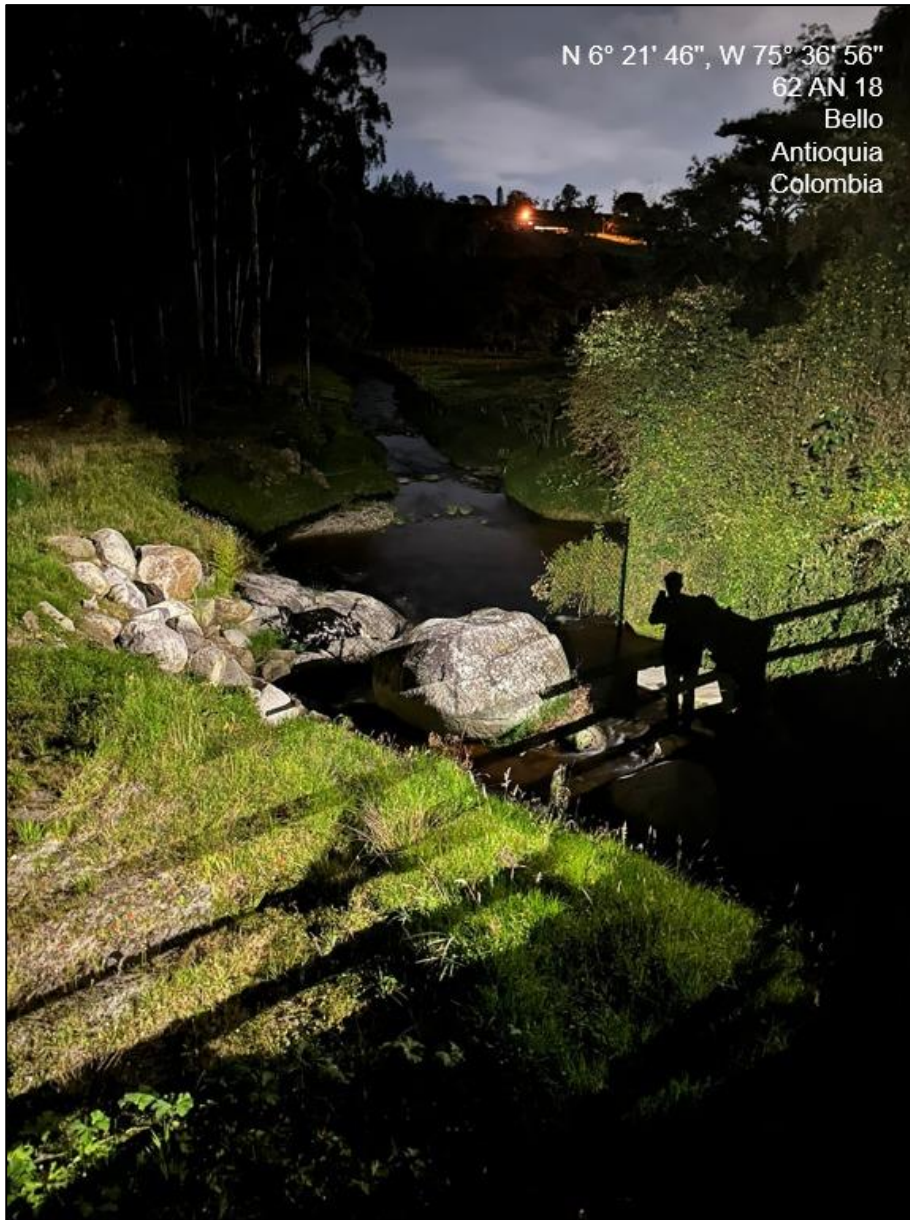
Anexo 21. Fotografía Depósitos Aluviales de la zona urbana.



Anexo 22. La Meseta, relicto de las Metabasitas del Picacho.

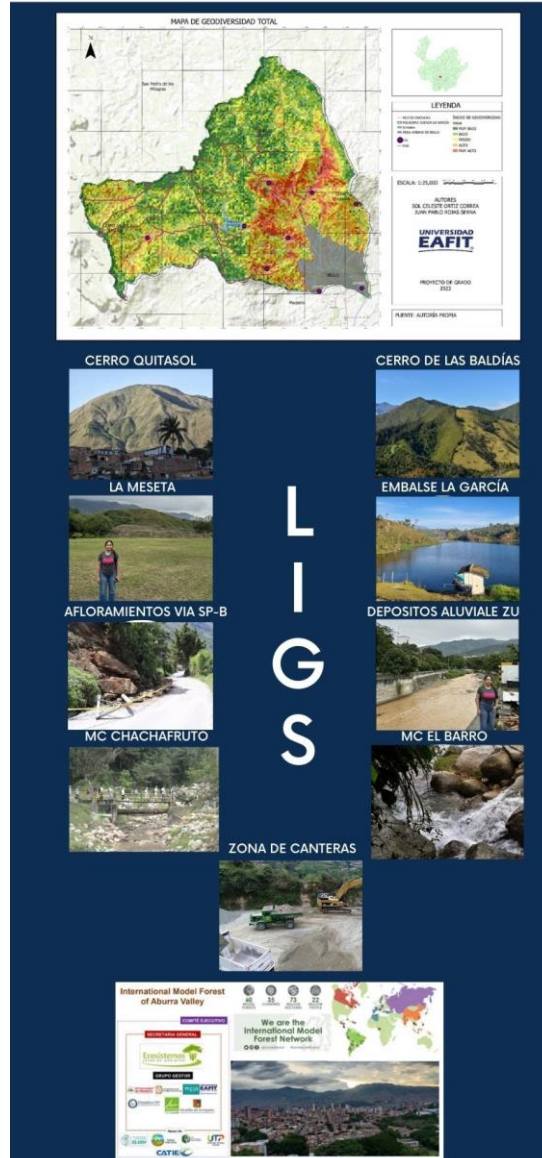


Anexo 23. Embalse La García.



Anexo 24. Quebrada La García en la zona del Llano de Ovejas.

**GEODIVERSIDAD EN LA
CUENCA LA GARCÍA
COMO APORTE A LA
GESTIÓN TERRITORIAL EN
EL BOSQUE MODELO DEL
VALLE DE ABURRÁ**



Anexo 25. Infograma cuenca La García en el Bosque Modelo del Valle de Aburrá.