



Vigilada Mineducación

**Comparación de enfoques metodológicos para la estimación de la geodiversidad.
Caso de estudio: Cuenca del río Churimo, San Rafael, Antioquia**

VANESSA NAVARRO JARAMILLO

Proyecto de grado

Asesor

Nicolás Montoya Londoño

UNIVERSIDAD EAFIT
ESCUELA DE CIENCIAS APLICADAS A INGENIERIA
GEOLOGÍA

Tabla de contenido

Agradecimientos	4
Resumen	5
Abstract	5
1 Introducción	7
1.1. Generalidades	8
1.2. Zona de estudio	9
2 Metodología	11
2.1 Conformación de bases de datos	11
2.2 Estimación y evaluación de Geodiversidad y diversidad de índices morfométricos	12
2.2.1 Método Valentín	12
2.2.2 Diversidad de índices Morfométricos	13
2.3 Propuesta de modificación al método de Valentín	15
2.4 Estrategia de comparación para identificar la varianza de los métodos	15
2.5 Trabajo de campo para cuenca de la zona de estudio	15
3 Resultados	16
3.1 Conformación base de datos	16
3.2 Estimación y evaluación de geodiversidad e índices morfométricos	17
3.2.1 Método Valentín (2021)	17
3.2.2 Diversidad de índices morfométricos Argiryou et al. (2016) modificado	18
3.3 Unión de mapa geodiversidad Valentín y diversidad de índices morfométricos	19
3.4 Inventario de Lugares de Interés Geológico (LIG's)	20
3.5 Comparación de métodos	24
4 Discusión	25
Metodología Valentín (2021)	25
4.1 Geodiversidad modificada con Argirious (2016) modificado	27
4.2 Comparación de métodos	28
5 Conclusiones y recomendaciones	28
6 Referencias	31

Tabla de figuras

Figura 1. Localización zona de estudio. Elaboración propia.....	10
Figura 2. 2a) Mapa geodiversidad método Valentín (2021), 2b) Mapa geodiversidad método Valentín (2021) representado a partir de Kriging 2c) Porcentajes para rangos definidos de 1 a 5 de geodiversidad. Sistema de coordenadas: Magna Origen Nacional. Fuente: Elaboración propia.....	18
Figura 3. 3a) Mapa de diversidad de Índices morfométricos modificado tomado de Argyriou et al., (2016). 3b) distribución porcentual de la diversidad de índices morfométricos. Sistema de coordenadas: Magna Origen Nacional. Fuente: Elaboración propia.....	19
Figura 4. 4a) Mapa de geodiversidad de Valentín (2021) unificado con índices morfométricos Argyriou (2016) modificado (Valentín modificado) 4b) Porcentajes para rangos definidos de 1 a 5 de geodiversidad. Sistema de coordenadas: Magna Origen Nacional. Fuente: Elaboración propia.....	20
Figura 5. 5a) Puntos tomados en campo de lugares de interés e información secundaria 5b) Puntos superpuestos sobre metodología Valentín (2021) y Valentín (2021) modificada. Elaboración propia.....	22
Figura 6. Fotografías tomadas salida de campo para identificación de Lugares de Interés Geológica A) perfil meteorización B) Cascada los Simios C) Cascada Peña Lisa D) Organales E) Zona minería Antigua F) Zona de playas y confluencia Río Guatpé y Churimo G) Río Churimo H, I) visualización panorámica. Elaboración propia.	23
Figura 7. Mapa de análisis distribuido de la varianza para método Valentín (2021 y método Valentín (2021) modificado con Argyriou (2016) modificado. Elaboración propia.	24

Lista de tablas

Tabla 1. Tabla de metodologías de estimación de geodiversidad mediante métodos cuantitativos, adaptada de Valentín (2021).....	8
Tabla 2. Conjunto de datos recopilados para variables temáticas y desarrollo de comparación	16
Tabla 3. Clasificación de Lugares de Interés Geológico de la zona.....	21

Agradecimientos

Inicialmente quisiera agradecerle a mi familia (Magnolia Jaramillo Restrepo, José De Jesús Navarro Acosta, María José Navarro Jaramillo) por estar siempre presentes en cada paso que doy en la vida, por no dejarme caer y darme aliento y fuerza en toda adversidad, sin el apoyo constante de ellos y la forma en cómo me enseñaron a ver la vida, el iniciar y terminar este trabajo de grado no hubiese sido posible. Además, por haberme dado la posibilidad de estudiar una carrera y hacer todo el esfuerzo del mundo porque fuera la que me gusta. A Jorge Mario Mesa Almanza porque siempre me dio mucha calma y me impulsó a seguir adelante, acompañándome desde el día 0 en que comencé este trabajo.

Quiero agradecerle a los profesores de planta y cátedra que estuvieron presentes en mi proceso de formación y que aportaron a mis conocimientos, a María Isabel Marín Cerón por abrirme un espacio para el proceso y desarrollo de este trabajo de grado, a Camilo Bustamante Londoño por su aporte en el proceso de escritura, redacción y disposición constante tanto en este trabajo como en general, pero sobre todo quiero agradecerle a mi asesor Nicolás Montoya Londoño, por su gran disposición, por su apoyo, por su profesionalismo, conocimiento y porque sin él no hubiera sido posible realizar este trabajo.

Finalmente quiero agradecerles a mis compañeros y quienes estuvieron presentes dando apoyo constante durante este trabajo. En especial a Marinela Sánchez Pino porque desde el principio y en medio de muchas adversidades siempre estuvo para mí, a Esteban De Vargas e Iván Barrientos porque me acompañaron en el proceso y realización de este trabajo, Camila Yepes y Camila Botero que siempre sacaron muchas sonrisas.

Gracias a la Universidad EAFIT por brindarme la oportunidad de adquirir conocimiento, de brindarme compañeros, profesores, colegas y un lugar para construirme profesionalmente y de manera humana. Y me doy gracias por nunca dejarme caer y superar todos los obstáculos que se me presentaron en el camino.

Resumen

La geodiversidad es un término general para definir la diversidad geológica de un territorio y se entiende como la variedad de rasgos geológicos presentes en un lugar que se identifican considerando su frecuencia, distribución y la evolución geológica que ilustra. Se han identificado diferentes metodologías para su estimación, donde para efectos de este trabajo, el objetivo general es comparar y caracterizar dos metodologías utilizadas en el Semillero de Geología Regional y Geoconservación de EAFIT con el fin de realizar un aporte a la selección de una metodología con menor subjetividad e incertidumbre. La comparación se realiza entre el Método Valentín (2021) y el método Valentín (2021) modificado con índices morfométricos de Argyriu et al., (2016).

La zona de estudio corresponde a la Cuenca del Río Churimo, en San Rafael, Antioquia, donde a partir de un análisis de varianza entre las superficies normalizadas obtenidas de ambos métodos, se identificaron las zonas de mayor importancia asociado a la evolución del paisaje granítico del oriente Antioqueño, teniendo en cuenta puntos de validación recolectados en campo. Como resultado más relevante, se obtiene una propuesta de categorización en base a la normalización estadística, donde las zonas de más alta geodiversidad se asocian con puntos de alto interés turístico alrededor de las vertientes del Río Churimo y sus afluentes principales. Finalmente, se desatacan las limitaciones de cada una de las metodologías para continuar incentivando el conocimiento de geodiversidad, y el óptimo procesamiento de la información que permita una aproximación cada vez acertada con la expresión real dentro de un territorio.

Palabras clave: Geodiversidad, varianza, índices morfométricos, método Valentín.

Abstract

Geodiversity is a general term to define the geological diversity of a territory and is understood as the variety of geological features present in a place that are identified considering their frequency, distribution and the geological evolution they illustrate. Different methodologies have been identified for its estimation, where for the purposes of this work, the general objective is to compare and characterize two methodologies used in the Regional Geology and Geoconservation Workshop of EAFIT to make a contribution to the selection of a methodology with less subjectivity and uncertainty. The comparison is made between the Valentin Method (2021) and the Valentin Method (2021) modified with morphometric indices of Argyriu et al., (2016).

The study area corresponds to the Churimo River Basin, in San Rafael, Antioquia, where from an analysis of variance between the normalized surfaces obtained from both methods, the most important areas associated with the evolution of the granitic landscape of eastern Antioquia were identified considering validation points collected in the field. As the most relevant result, a categorization proposal is obtained based on statistical normalization, where the zones with the highest geodiversity are associated with points of high tourist interest around the Churimo River and its main tributaries. Finally, the limitations of each of the methodologies are highlighted to continue promoting the knowledge of geodiversity, and the optimal processing of the information that allows an increasingly accurate approximation with the real expression within a territory.

Key words: Geodiversity, Variance, morphometric indices, Valentin method.

Comparación de enfoques metodológicos para la estimación de la geodiversidad.

Caso de estudio: Cuenca del río Churimo, San Rafael, Antioquia

1 Introducción

La geodiversidad se define como la variedad de características geológicas (rocas, minerales, fósiles), geomorfológicas (formas del terreno, topografía, procesos físicos), pedológicas e hidrológicas que posee un territorio, incluyendo estructuras, sistemas y contribuciones a los paisajes (Gray, 2013).

La elección de un método específico para estimar la geodiversidad y la selección adecuada de los criterios de evaluación dependen de muchos factores. Entre los más importantes se destacan (1) el propósito de la evaluación; (2) el tipo de paisaje de la zona de estudio y su dimensión espacial; (3) la disponibilidad de datos espaciales a una escala adecuada. De manera general, los métodos de evaluación pueden clasificarse en función de dos criterios, según la fuente de datos, en métodos directos e indirectos y según el procedimiento, en métodos cualitativos, cuantitativos y cualitativos-cuantitativos (Zwoliński *et al.*, 2018).

Existen una cantidad importante de metodologías para la estimación de geodiversidad a partir de métodos cuantitativos como la de Serrano & Ruiz-Flaño (2007) sobre conteo de unidades geomorfológicas; Pereira *et al.*, (2013) que es un conteo en malla, entre otras (Tabla 1), los cuales involucran diferentes tipos de variables y escalas de evaluación, pero a su vez implican un reto a la hora de aplicarlos correctamente. Es común encontrar en ellos vacíos que impiden un resultado final más preciso que concuerde con la realidad de un territorio específico, y supone grandes limitantes en cuanto a los criterios que se pretenden valorar, estos vacíos se encuentran relacionados con la subjetividad del método, falta de actualización en la información, acceso limitado a información cartográfica, cantidad de índices utilizados para el cálculo de diferentes variables, entre otras.

Este trabajo, busca evaluar y contrastar dos metodologías de estimación de geodiversidad: El método “Geodiversidad” que consiste en la estimación de un índice de elementos abióticos relevantes por unidad de área, propuesto por Valentín (2021) y la metodología de Valentín unida a índices morfométricos (Valentín modificado) que radica en la generación de una serie de variables morfométricas extraídas del modelo de elevación digital (Argyriou *et al.*, 2016), con objetivo de

disminuir la subjetividad. El objetivo principal es identificar las características que influyen en la selección de la metodología óptima y coherente para representar la geodiversidad de un sitio en específico, y correlacionarlas con lugares de real interés geológico, en este caso para la Cuenca del Río Churimo.

Tabla 1. Tabla de metodologías de estimación de geodiversidad mediante métodos cuantitativos, adaptada de Valentín (2021)

	AUTOR	AÑO	TIPO DE METODOLOGÍA	ESCALA	TÉCNICA GIS
1	Xavier-da-Silva et al.	2001	Cuantitativa	1000000	Conteo, unidades geomorfológicas
2	Nieto	2001	---	---	---
3	Serrano & Ruiz-Flaño	2007	Cuantitativa	Unidades geomorfológicas	Conteo, unidades geomorfológicas
5	Benito-Calvo et al.	2009	Cuantitativa	1000000 (82m/píxel)	---
6	Zwollnsky	2009	Cuantitativa	500000	Reclasificación y análisis de clusters
7	Hjort & Luoto	2010	Cuantitativa		Conteo en malla
8	Pellitero	2012	Cuantitativa	10000	
9	Pereira et al.	2013	Cuantitativa	650000	Conteo en malla
10	Silva et al.	2013	Cuantitativa	3000000	Conteo en malla
11	Forte	2014	Cuantitativa	25000	Kernel density
12	de Paula Silva et al	2014	Cuantitativa	3000000	Conteo en malla
13	Manosso & Nóbrega	2015	Cuantitativa	6000000	Unidades geomorfológicas
14	Argriou et al.	2016	Cuantitativa	50000	Overlay union
15	Najwer	2016	Cuantitativa	---	---
16	Kaskela & Kotllainen	2017	Cuantitativa	2000000	índices
17	Steplnk & Trenchhovska	2017	Cuantitativa	25000	Conteo en malla

1.1. Generalidades

Pregunta de investigación: ¿Cuál de los enfoques metodológicos para la evaluación de la geodiversidad proporciona una representación más precisa y completa de un territorio específico y qué factores influyen en la selección de la metodología óptima para diferentes contextos?

Hipótesis

La metodología óptima para la estimación de geodiversidad en la Cuenca del río Churimo es la propuesta por Valentín (2021) unida a la metodología de Argriou et al., (2016) modificada a sólo

índices morfométricos. La selección de la metodología se realiza con base en la identificación de diferencias de precisión en la representación de la geodiversidad propuesta en el enfoque metodológico de Valentín (2021) modificado; a partir de un análisis distribuido y controles de campo.

Objetivo general

1. Identificar cuál de los enfoques metodológicos para la evaluación de la geodiversidad proporciona una representación más precisa y completa de un territorio en específico, teniendo en cuenta los factores involucrados en cada metodología y las evidencias del trabajo de campo.

Objetivos específicos

1. Construir una base de datos de la Cuenca del río Churimo utilizando diferentes fuentes de información de cartografía base, cartografía temática y resultados propios del estudio.
2. Estimar y evaluar la geodiversidad de la Cuenca del río Churimo utilizando metodología de Valentín (2021), adicionalmente estimar diversidad de índices morfométricos Argyriu et al., (2016) modificado.
3. Elaborar un mapa que realice unión de metodología Valentín y diversidad de índices morfométricos
4. Aplicar una estrategia de comparación distribuida para identificar la precisión de cada método (Valentín (2021) con Valentín modificado.
5. Realizar trabajo de campo en la Cuenca del río Churimo como elemento de control a la superficie estimada de geodiversidad.

1.2. Zona de estudio.

La cuenca del río Churimo (Figura 1) está ubicada en la jurisdicción del municipio de San Rafael, al oriente del departamento de Antioquia. Corresponde a una cuenca de aproximadamente 22 km² de extensión cuyo cauce principal desemboca en el río Guatapé a la altura de 1030 msnm Subzona Hidrográfica Río Nare, Unidad Hidrográfica Nivel III Río Churimo. Esta no contiene Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca Hidrográfica (POMCA), el atractivo turístico de la región gira en torno a las diferentes cascadas, balnearios y actividades al aire libre asociadas a la hidrografía de

la cuenca del río Guatapé, además de ser una región que se caracteriza por la presencia encooteles en diferentes zonas de reserva forestal.

La unidad geológica reconocida dentro de la zona de estudio es el Batolito Antioqueño representando un paisaje granítico que ha sido modelado por los factores climáticos y tectónicos.

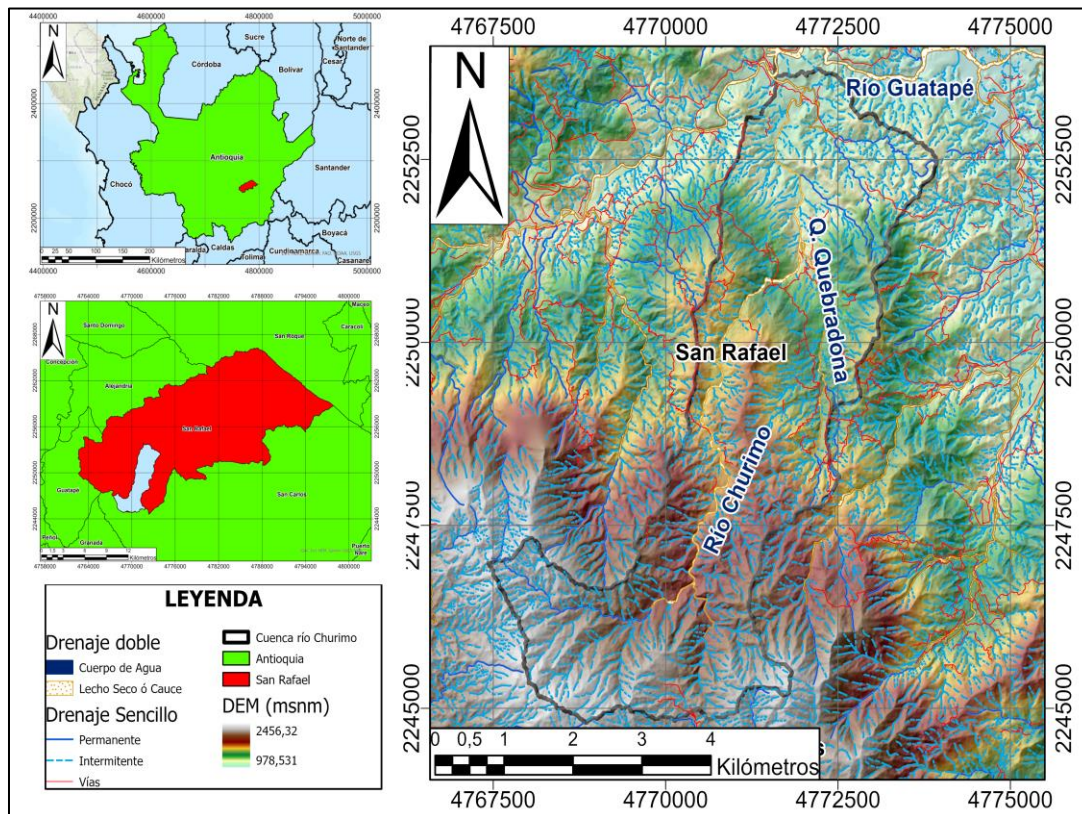


Figura 1. Localización zona de estudio. Elaboración propia

El Batolito Antioqueño es un cuerpo granitoide de más de 7000 km² de extensión, emplazado en la zona central de Antioquia. La composición del batolito se caracteriza por la homogeneidad en más del 97% de su área expuesta de edad Cretácico Superior (K/Ar), entre 67-49 Ma (Cediél & Shaw, 2019), en este predominan la facies granodiorítica, tonalítica y cuazodiorítica.

Localmente para esta unidad se puede observar facies de cuarzodiorita y cuarzodiorita félsica. La facie litológica más común en el batolito es una roca masiva, hipidiomórfica equigranular de grano medio a grueso, que está compuesta por cuarzo, plagioclasa, feldespato potásico, hornblenda, biotita y minerales accesorios (Ordóñez *et al.*, 2001). En los cauces de los ríos, se observan las

unidades de depósito de aluvión, que a su vez incluyen también coluvión. Encontrando de esta manera zonas con enriquecimiento de minerales metálicos, propiciando desarrollo de explotación y extracción minera (SGC, 2014). Gran parte del área presenta un perfil de meteorización compuesto por un suelo arcilloso y saprolito arenoso. Los rasgos estructurales de la zona de estudio se encuentran relacionados con el Sistema de Fallas El Bizcocho y sus respectivos lineamientos satelitales.

2 Metodología

Para la comparación de los métodos de geodiversidad y la elección de una estimación óptima en la cuenca del río Churimo, se realizó inicialmente la conformación de una base de datos de la cuenca, dentro de la que se incluyen la cartografía básica y temática, y además los resultados asociados a la estimación de la geodiversidad. A partir de las variables de entrada se obtienen los índices de las metodologías de estimación de geodiversidad (método de Valentín y método de Valentín modificado), la superficie de comparación final, y los lugares de interés geológico gracias a la comprobación en campo con el fin de añadir mayor valor a la investigación. A continuación, se detalla cada objetivo y su desarrollo metodológico.

2.1 Conformación de bases de datos

En esta primera fase se recopiló y procesó la cartografía base y temática de la cuenca del Río Churimo. Como insumo, se obtuvo un Modelo de Elevación Digital (DEM) a partir de la cartografía básica 1:10.000 del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) (Plancha 148IC1, 148IC2, 148IC3, 148IC4, 148IIIA1, 148IIIA2). Para el caso de geología y geomorfología se utilizó información de la plancha 148 – San Carlos a escala 1:100.000 del Servicio Geológico Colombiano (SGC, 2014). El clima y tipo de suelos se obtuvo a partir de los mapas propuestos por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM, 2017) a escala 1:100.000, las ocurrencias minerales se extrajeron del portal de Anna minería (títulos y solicitudes mineras). Adicionalmente, se recopiló información temática básica de la Pequeña Centran Hidroeléctrica Churimo (PCH Churimo) a una escala de levantamiento 1:6.000, para posteriormente obtener Lugares de Interés Geológico-Geomorfológico (LIG's) a partir documentación bibliográfica y

controles en campo. La información temática fue complementada con la identificación de lineamientos automáticos dentro del Software Geomática - Catalyst.

Se integra dentro de la conformación de las bases de datos las estimaciones encontradas en método Valentín (2021), y los índices estimados de Argyriou et al. (2016) modificado. Toda la información queda contenida dentro de una geodatabase (GDB).

2.2 Estimación y evaluación de Geodiversidad y diversidad de índices morfométricos

2.2.1 Método Valentín

Valentín (2021) identifica lugares de alta geodiversidad según la cantidad de elementos abióticos presentes en una zona. La metodología propone la división de un territorio en una cuadrícula definida por el usuario en este caso con celdas de 100 x 100 m, donde se tienen en cuenta 8 variables abióticas que soportan el cálculo del índice de geodiversidad. Se tienen en cuenta los mapas realizados a partir del objetivo uno (geología, geomorfología, hidrología, clima, tipo de suelos y ocurrencias minerales) y para cada variable se define un subíndice de diversidad utilizando la herramienta “Geodiversidad” de Valentín (2021), tal como se describe a continuación:

Diversidad geológica: Número de unidades litológicas representadas en el mapa geológico por unidad de área.

Diversidad geomorfológica: Número de unidades geomorfológicas (o subunidades dependiendo la metodología de clasificación geomorfológica) presentes en el territorio por unidad de área.

Diversidad paleontológica: Corresponde a el número de unidades geológicas con presencia de fósiles por unidad de área, representadas en el mapa paleontológica

Diversidad de geología estructural: Se realizaron lineamientos correspondientes a la zona a partir de 6 modelos de sombras tomados del Modelo de Elevación Digital (DEM) usando la metodología adaptada de Mark (1992), encontrando de esta manera y por medio de Catalyst los lineamientos de la zona de estudio.

Diversidad pedológica: El cálculo de este índice se realiza mediante el conteo de las unidades pedológicas obtenidas del mapa de suelos, por unidad de área.

Diversidad climática: El subíndice de diversidad climática se tomó como lo planteó Argyriou et al., (2016), generando zonas climáticas a partir del análisis de la temperatura y precipitación medias mensuales. Estas zonas climáticas se contabilizan generando una cantidad de elementos abióticos por unidad de área.

Diversidad hidrográfica: se calcula dividiendo el mayor orden o jerarquía de los cauces presentes en cada unidad de área, entre dos, y aproximándolo al mayor entero más cercano en caso de que sea un número decimal.

Diversidad de ocurrencias minerales: Se define como el conteo de la ocurrencia de diferentes minerales industriales, piedras preciosas, metales y recursos energéticos. Esta variable se obtiene del geoportal de Anna minería.

Una vez obtenidos los 8 subíndices, se realizó el cálculo del índice de geodiversidad mediante la sumatoria de los elementos abióticos para cada unidad de área definida en la investigación, esto mediante herramienta “Geodiversidad” propuesta por Valentín (2021) dentro del software ArcMap. Esta sumatoria presenta un peso igual para cada variable, debido a que todas se consideran de igual importancia en el cálculo. Finalmente se obtiene mapa de geodiversidad.

2.2.2 Diversidad de índices Morfométricos

Argyriou et al. (2016), proponen el uso de 3 variables para el cálculo de la geodiversidad: geomorfometría, geología y clima, que se evalúan mediante diversos algoritmos incorporados en los Sistemas de Información Geográfica (SIG).

Para la clasificación geomorfométrica se utilizaron índices basados en variables extraídas del Modelo Digital de Elevación (DEM) generado en el software ArcGIS Pro, y corregido con la herramienta “Fill” para evitar imperfecciones en los datos, rellenando hendiduras en su superficie ráster. De este modelo se obtienen los datos de elevación, pendientes, curvatura, rugosidad, entre otras, que permiten clasificar el relieve en 9 categorías diferentes según las características de cada sector en el área de estudio (Argyriou et al., 2016). En el desarrollo de este trabajo se utilizaron 6

índices realizando una modificación en la metodología para evitar subjetividad en el método y ser agregados al método de Valentín modificado:

Amplitud del relieve (Ar): Es la diferencia máxima de elevación dentro de la unidad de superficie. Para el cálculo de Ar se utiliza el Fill DEM, se aplica la herramienta “Fishnet” a partir de este, luego “Zonal statistics as table” que se utiliza para realizar un “Join table” al fishnet. Esto con el objetivo de obtener puntos sobre los que se realiza una interpolación “IDW”.

Frecuencia de cauce (Fu): Evalúa el número total de segmentos de cauces en relación con el área de la cuenca. Los valores de Fu indican el grado de inclinación de la pendiente, la permeabilidad de las rocas y la escorrentía superficial. Para su cálculo, al Fill DEM se le aplica un “Flow Direction” y a partir de este, un “Flow Accumulation”, se aplica un “Stream Order” seleccionando el método de Strahler, se hace un “Stream to feature” para aplicar finalmente “Kernell density” (Fu).

Densidad de drenaje (Dd): Determina la longitud total de la corriente, en relación con el área de la cuenca. La variable proporciona información sobre el potencial de escorrentía superficial, y permite evaluar el grado de disección del paisaje, la permeabilidad de las rocas y la resistencia a la erosión. Para el cálculo, inicialmente al Fill DEM se le aplica un “Flow Direction”, a partir de este se genera “Flow Accumulation” (FA), continuo a esto un “Stream to feature” para finalmente aplicar “Line density” seleccionando Grid Code.

Índice de humedad topográfica (TWI): Evalúa la humedad del suelo y la saturación de la superficie que se ve influida por los cambios de pendiente posición, como laderas de vertido o de recepción. Para el cálculo de este índice, al Fill DEM se le aplica un “Flow Direction” y a partir de este un “Flow Accumulation”, se utiliza la herramienta “Slope”, en “Raster calculator” se multiplican las diferentes variables mencionadas para encontrar este índice.

Gradiente de pendiente (Sg): El gradiente de pendiente (Sg) muestra el cambio que se produce en la elevación entre cada celda y sus vecinas. Se calculó mediante la herramienta “Slope”, y se reclasifica para asignarle un número a intervalos de valores de la pendiente en grados (°). 0-3=1, 3-6=2, 6-12=3, 12-30=4, 35-45=5, > 45=6.

Índice de disección (Di): El índice de disección (Di) es la relación entre relieve absoluto y relieve relativo, que indica el grado de disección o erosión vertical. Se calculó mediante “Raster Calculator” la división del mapa obtenido a partir del Ar y el DEM Fill.

Todos los índices anteriormente mencionados se normalizaron y finalmente en “Raster Calculator” se realizó una suma de estos índices normalizados para generar el mapa de diversidad morfométrica. Para evitar subjetividad en el método no se le aplicó ni geología ni clima ya que esto implica la valoración de expertos y por lo tanto se convierte en un método Heurístico.

2.3 Propuesta de modificación al método de Valentín

Con las superficies obtenidas a partir del desarrollo de la metodología de geodiversidad Valentín (2021) y los resultados de la diversidad de índices morfométricos, se propone una nueva metodología que consiste en la sumatoria de ambas superficies. El procesamiento tiene en cuenta los resultados normalizados de ambas metodologías, en un tamaño de pixel de 5 x 5 metros, que son sumados en Raster Calculator, para la obtención de la superficie final.

2.4 Estrategia de comparación para identificar la varianza de los métodos.

La estrategia comparativa se realiza mediante un análisis distribuido de la varianza, en donde en función de los resultados obtenidos de geodiversidad en cada metodología, se asigna a una celda definida la variación de cada valor de geodiversidad respecto a la media general de los datos. La técnica de análisis de varianza (ANOVA) es ampliamente conocida en la estadística de datos como análisis factorial, y constituye la herramienta básica para el estudio del efecto de uno o más factores sobre la media de una variable continua. En este caso, es importante mencionar que ambas superficies de geodiversidad fueron normalizadas en valores iguales para ser procesadas posteriormente en una única superficie por medio de la herramienta de “Análisis estadísticos de Celda” del software Qgis (24.1.9. *Análisis Raster — Documentación de QGIS Documentation* -, s. f.)

2.5 Trabajo de campo para cuenca de la zona de estudio

Para el trabajo de campo de la cuenca del río Churimo se tienen en cuenta los resultados obtenidos de los numerales 2.2.1 y 2.2.2, y con base en ellos se realizó una ruta con una duración de 1 día, en la que se identifican los Lugares de Interés Geológico (LIG's), permitiendo hacer un contraste apropiado de cada una de estas metodologías mencionadas. Consiste en registro fotográfico y

puntos de control GPS, que permitieron realizar una comparación de ambas metodologías en relación con el objetivo general.

3 Resultados

A continuación, se identifican los resultados propuestos para cada una de las metodologías mencionadas, como respuesta a los objetivos específicos propuestos para el proyecto

3.1 Conformación base de datos.

Como resultado del primer objetivo se presentan las fuentes cartográficas base, utilizadas como insumo para los procesamientos (Tabla 2), los cuales como se mencionó anteriormente en la metodología, se almacenaron y procesaron en el sistema de información geográfico.

Tabla 2. Conjunto de datos recopilados para variables temáticas y desarrollo de comparación

Información	Escala	Fuente	Descripción	Producto
DEM 5X5 (parámetros morfométricos)	Curvas de Nivel 1:10.000	IGAC	Modelo digital de elevación como entrada de generación de índices	Mapa de pendientes, mapa de sombras, (índices morfométricos)
Mapa geológico	1:100.000 (reescaladas)	Datos nativos (Servicio Geológico Colombiano), (Antioquia en suelos)	Unidades litológicas dentro del área de estudio reescaladas	Extensión de unidades y propiedades. (Input método Valentín)
Mapa geomorfológico	1:100.000 (reescaladas)	Datos nativos (Servicio Geológico Colombiano)	Unidades geomorfológicas asociadas al área de estudio reescaladas	Unidades, (Input método Valentín)
Mapa estructural	1:100.000 (reescaladas)	Lineamientos extraídos cataly, (Servicio Geológico Colombiano)	Cartografía fallas regionales y análisis de lineamientos automáticos	Análisis de estructuras en e área de estudio y de fallas regionales (Input método Valentín)
Mapa suelos	1:100.000 (reescaladas)	IDEAM	Clasificación de suelos área de estudio	Distribución de suelos (Input método Valentín)
Mapa climático	1:100.000 (reescaladas)	IDEAM	Clasificación clima para área de estudio	Distribución de clima (Input método Valentín)
Mapa LIG'S		Datos tomados en campo y RUNAP	RUNAP:	Identificación zonas de interés geológico para comparación metodologías

Información	Escala	Fuente	Descripción	Producto
Mapa títulos y solicitudes mineras activos	1:100.000 (reescaladas)	Agencia Nacional de Minería	Clasificación de ocurrencia minerales dentro de la zona de estudio	Delimitación zonas de ocurrencias minerales

3.2 Estimación y evaluación de geodiversidad e índices morfométricos

3.2.1 Método Valentín (2021)

La representación de geodiversidad por este método se encuentra categorizada por la cantidad de Elementos Abióticos (EA) por unidad de área, con celdas de 100 x 100 m. La herramienta automatizada en ArcGIS arroja subíndices de cada uno de los inputs mencionados en la metodología, sobre los cuales se realiza la interpolación de tipo Kriging para obtener el mapa de geodiversidad. Estos índices son analizados en detalle en el (anexo 1). Los valores de EA obtenidos oscilan en un rango de 1 a 5, donde a mayor cantidad de EA, se puede encontrar mayor diversidad. Como se puede observar en la Figura 2, las áreas con valores altos y muy altos de EA (4 y 5), se encuentran ubicados sobre el cauce principal de la Cuenca del Río Churimo, asociadas a geoformas del ambiente fluvial, abarcan un área de aproximadamente 9km² equivalente a una distribución espacial del 41% de la cuenca. Las categorías de EA media (3) se pueden observar distribuidas a lo largo de toda la cuenca, en mayor proporción en la Quebrada Quebradona y en la parte sur de la cuenca, y en menor proporción en la zona occidental, esta categoría abarca un área de 8km² equivalente al 37% de distribución espacial de la cuenca. Finalmente, los valores bajos y muy bajos de EA (1, 2) se encuentran en su mayoría distribuidos sobre las zonas altas de la cuenca, con un área de 5km² equivalente a una distribución espacial del 22%.

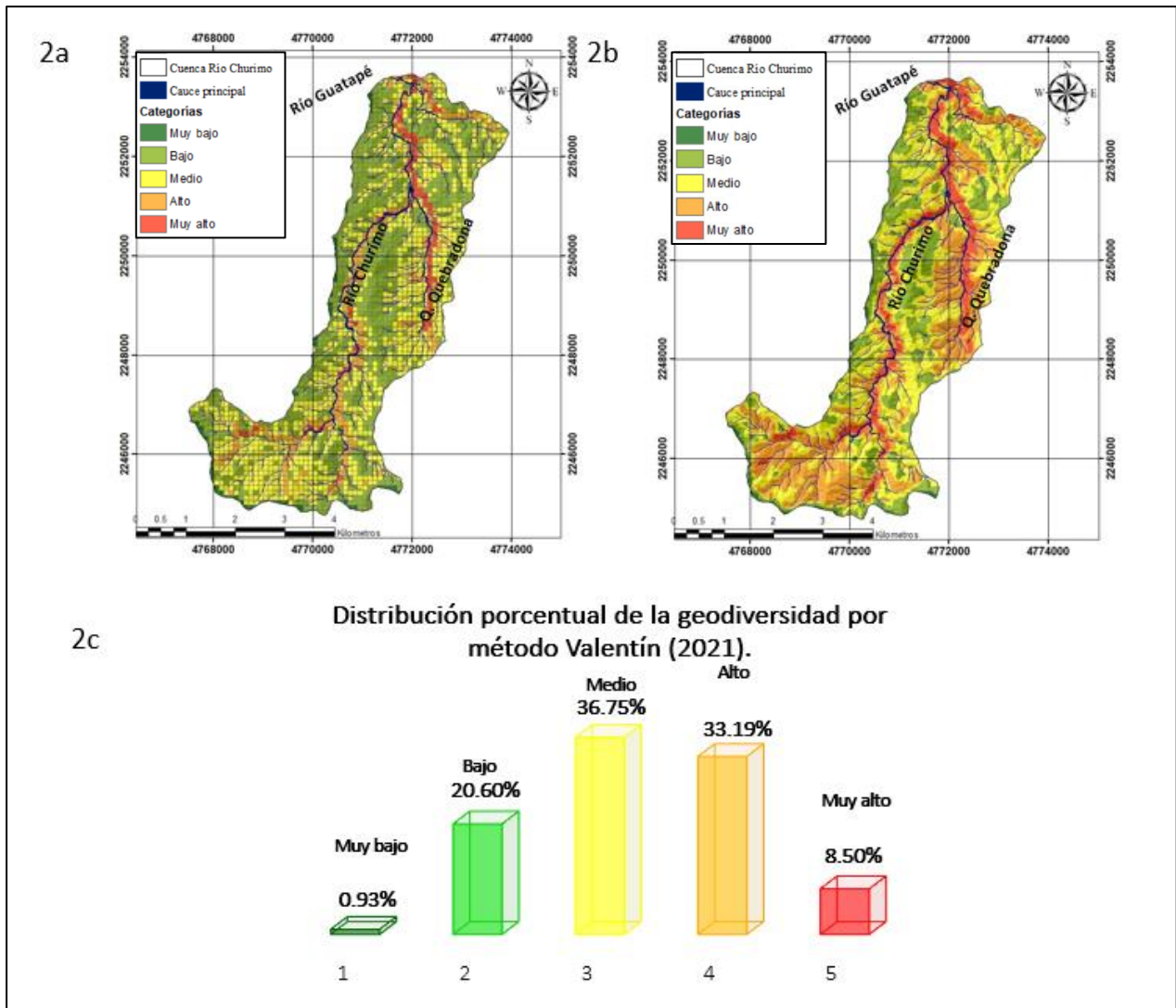


Figura 2. 2a) Mapa geodiversidad método Valentín (2021), 2b) Mapa geodiversidad método Valentín (2021) representado a partir de Kriging 2c) Porcentajes para rangos definidos de 1 a 5 de geodiversidad. Sistema de coordenadas: Magna Origen Nacional. Fuente: Elaboración propia.

3.2.2 Diversidad de índices morfométricos Argiryou et al. (2016) modificado.

La estimación de la diversidad por este método se relaciona con la información a partir del DEM, donde se calculan 6 índices morfométricos que son normalizados y sumados para la obtención del resultado final. Los resultados encontrados a partir de los índices se analizan detalladamente en el anexo 2.

En la Figura 3 se observa que los valores altos y muy altos de diversidad se encuentran estrechamente relacionados con el cauce principal y sus principales tributarios. Estas zonas altas

representan una distribución espacial de la cuenca del 43%, abarcando así un área de 10km². Las zonas con media diversidad se pueden observar distribuidas en un 40% a lo largo de toda la cuenca y alrededor de cauces principales y drenajes, abarcando un área de 8km². Por último, los valores de diversidad bajos y muy bajos se encuentran ubicados en las partes altas de la cuenca, más específicamente en la zona sur, y parte de la zona central con una distribución espacial del 17% y un área de 4km².

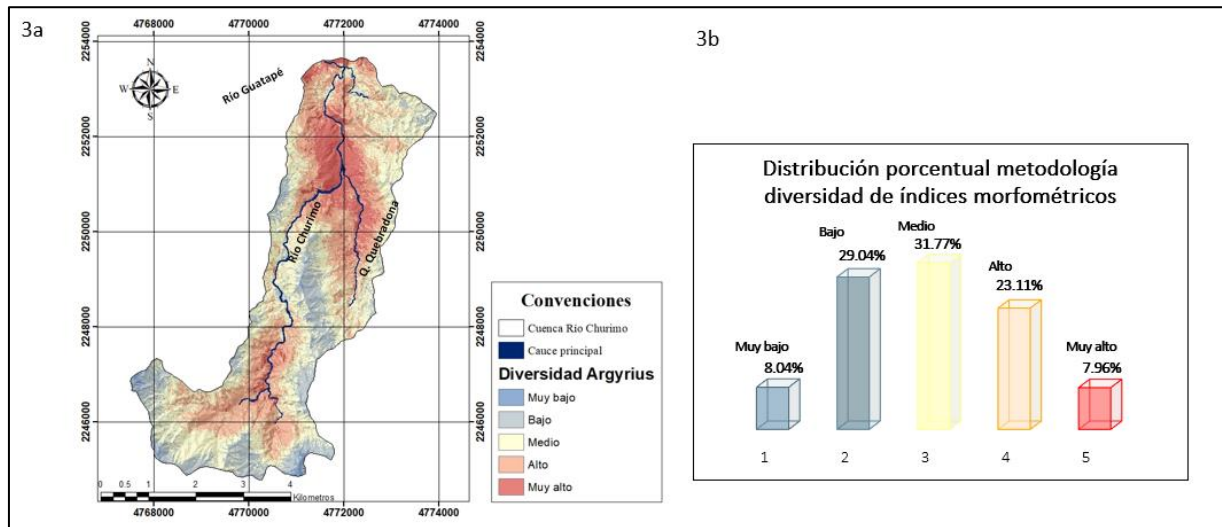


Figura 3. 3a) Mapa de diversidad de Índices morfométricos modificado tomado de Argyriou et al., (2016). 3b) distribución porcentual de la diversidad de índices morfométricos. Sistema de coordenadas: Magna Origin Nacional. Fuente: Elaboración propia.

3.3 Unión de mapa geodiversidad Valentín y diversidad de índices morfométricos

La representación de geodiversidad por este método se encuentra determinada por la sumatoria de superficies normalizadas del método de geodiversidad Valentín (2021), y de Argyriou et al. (2016) modificado.

Como se puede observar en la Figura 4, las áreas con valores altos y muy altos de EA (4 y 5), se encuentran ubicados sobre el cauce principal de la Cuenca del Río Churimo, asociadas a geofomas del ambiente fluvial, abarcan un área de aproximadamente 7km² equivalente a una distribución espacial del 31% de la cuenca. Las categorías de EA media (3) se pueden observar distribuidas a lo largo de toda la cuenca, específicamente rodeando el cauce principal, esta categoría abarca un área de 7km² equivalente al 32% de distribución espacial de la cuenca. Finalmente, los valores

bajos y muy bajos de EA (1, 2) se encuentran en su mayoría distribuidos sobre las zonas altas de la cuenca, con un área de 8km² equivalente a una distribución espacial del 37%.

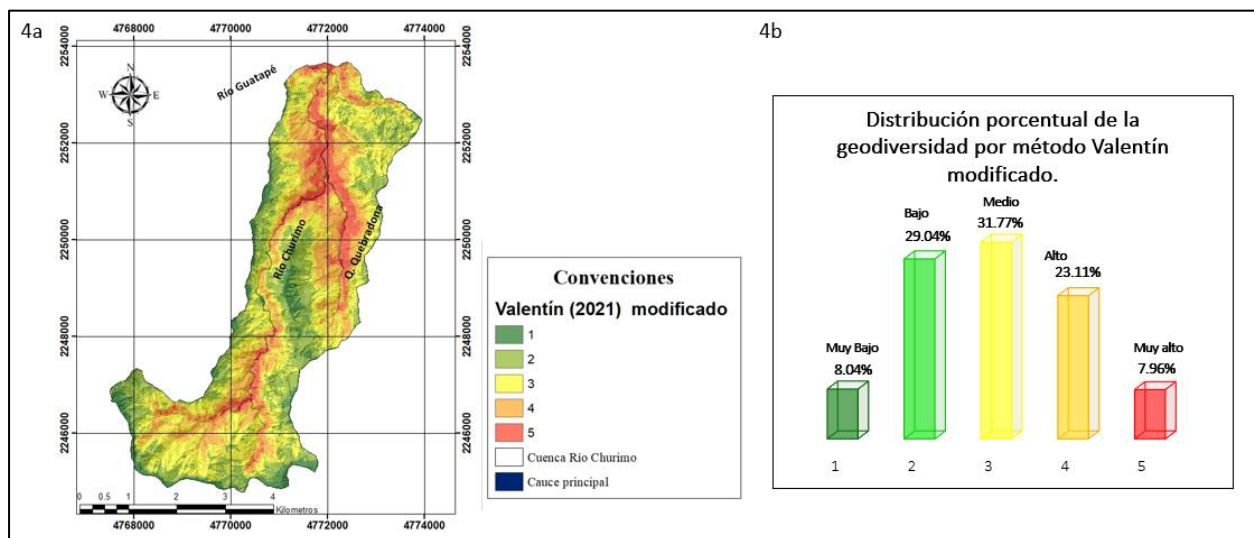


Figura 4. 4a) Mapa de geodiversidad de Valentín (2021) unificado con índices morfométricos Argyriu (2016) modificado (Valentín modificado) 4b) Porcentajes para rangos definidos de 1 a 5 de geodiversidad. Sistema de coordenadas: Magna Origen Nacional. Fuente: Elaboración propia.

3.4 Inventario de Lugares de Interés Geológico (LIG's)

El inventario de LIG's (tabla 3), se basó en la verificación de lugares visitados en el trabajo de campo ejecutado el 9 de octubre de 2023. Este permitió identificar un total de 15 LIG's (Figura 5), los cuales corresponden a cascadas (3), roca fresca (1), perfiles típicos de meteorización de rocas graníticas (1) organales (2), zona de minería de oro antigua (1), la zona de confluencia del río Churimo y río Guatapé donde se encuentra un lugar turístico de San Rafael, además del lugar de ubicación de una Pequeña Central Hidroeléctrica (PCH) sobre el río Churimo. Adicionalmente, a partir de información secundaria y con el fin de desarrollar la metodología de comparación, se recolectaron puntos de importancia, ejemplo de esto las Reservas Naturales de la Sociedad Civil (Lejanías A) y los Distritos Regionales de Manejo Integrado, adicionales puntos de ruta turística propiciados por una persona encargada de la zona.

Tabla 3. Clasificación de Lugares de Interés Geológico de la zona.

Clasificación	Lugares de interés geológico	Estación	Imagen
Turístico	Cascada Los Simios	V1	B
Turístico	Cascada Peña Lisa	V2	C
Turístico	Cascada Churimo	V3	
Turístico	Playas del Río Arenal	V5	F
Geológico	Roca fresca	V6	
Geológico	Perfil meteorización	V7	A
Geológico	Organales	V8	D
Reserva Natural de la sociedad civil	Lejanías A	V9	Mapa puntos fig. 5
Distritos regionales de Manejo Integrado	Camelias	V10	Mapa puntos fig. 5
Distritos regionales de Manejo Integrado	Embalse el peñol y río Guatapé	V11	Mapa puntos fig. 5
Geomorfológico	Vista panorámica	V12	H
Hidrológico	Río Churimo	V13	G
Geomorfológico	Construcción PCH Churimo	V14	Mapa puntos
Minería	Minería Antigua de Oro	V15	E

Estos puntos se ubican principalmente sobre la zona central y aguas abajo de la cuenca. Es necesario precisar que es una zona que no es de fácil acceso, y donde es posible identificar que los lugares de interés geológico se encuentran ubicados sobre el cauce del río, tales como las cascadas, los organales, la minería de oro, la roca expuesta, entre otros, los puntos muestran diferente precisión respecto a cada método, para el método de Valentín (2021) se puede determinar que se encuentra muy delimitado al cauce, mientras que para el método de Valentín modificado hay una mayor ampliación teniendo en cuenta la llanura de inundación y las características de procesos generados por la corriente. Las imágenes de todos los lugares mencionados anteriormente se pueden observar en la figura 6.

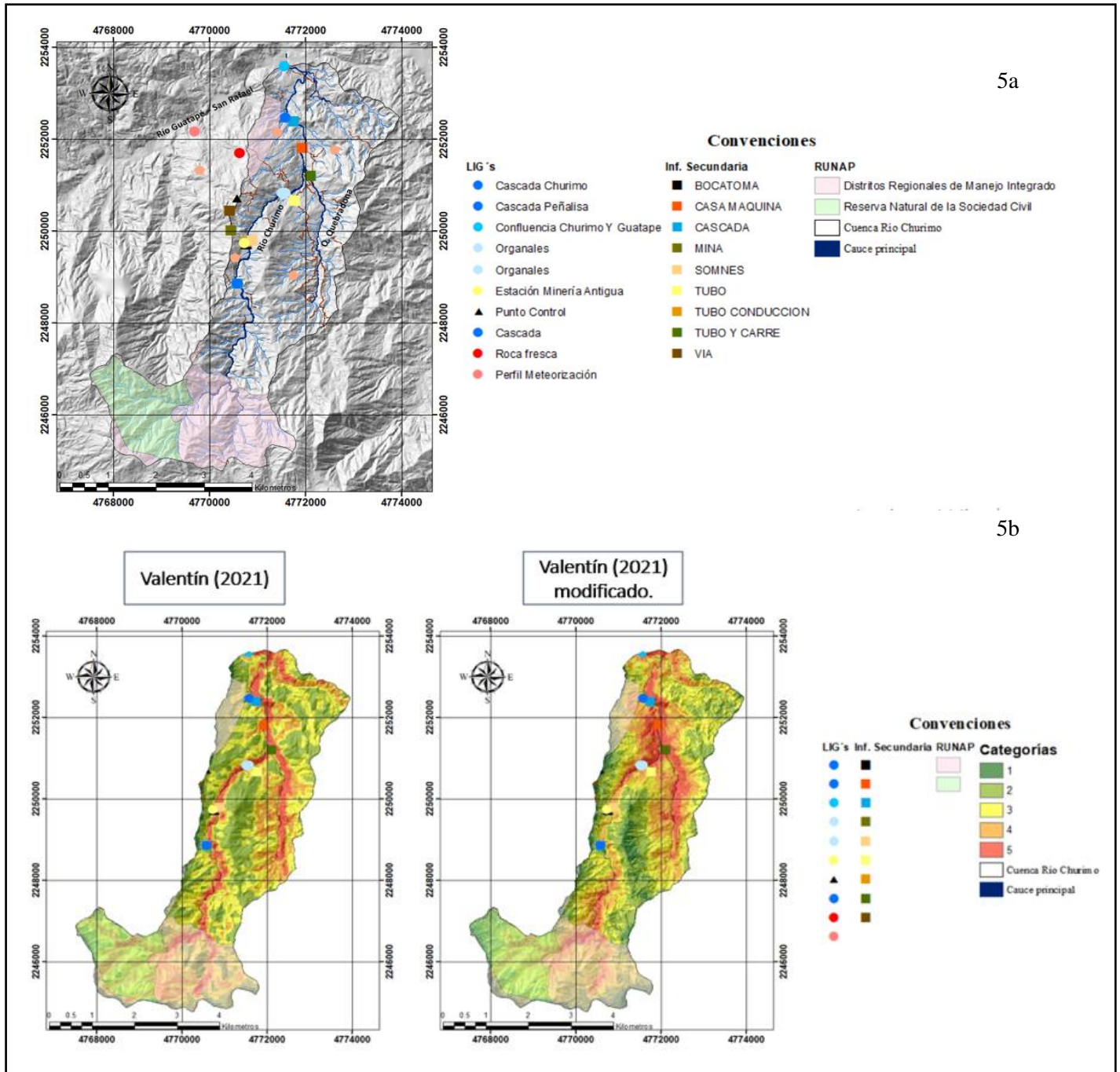


Figura 5. 5a) Puntos tomados en campo de lugares de interés e información secundaria 5b) Puntos superpuestos sobre metodología Valentín (2021) y Valentín (2021) modificada. Elaboración propia.

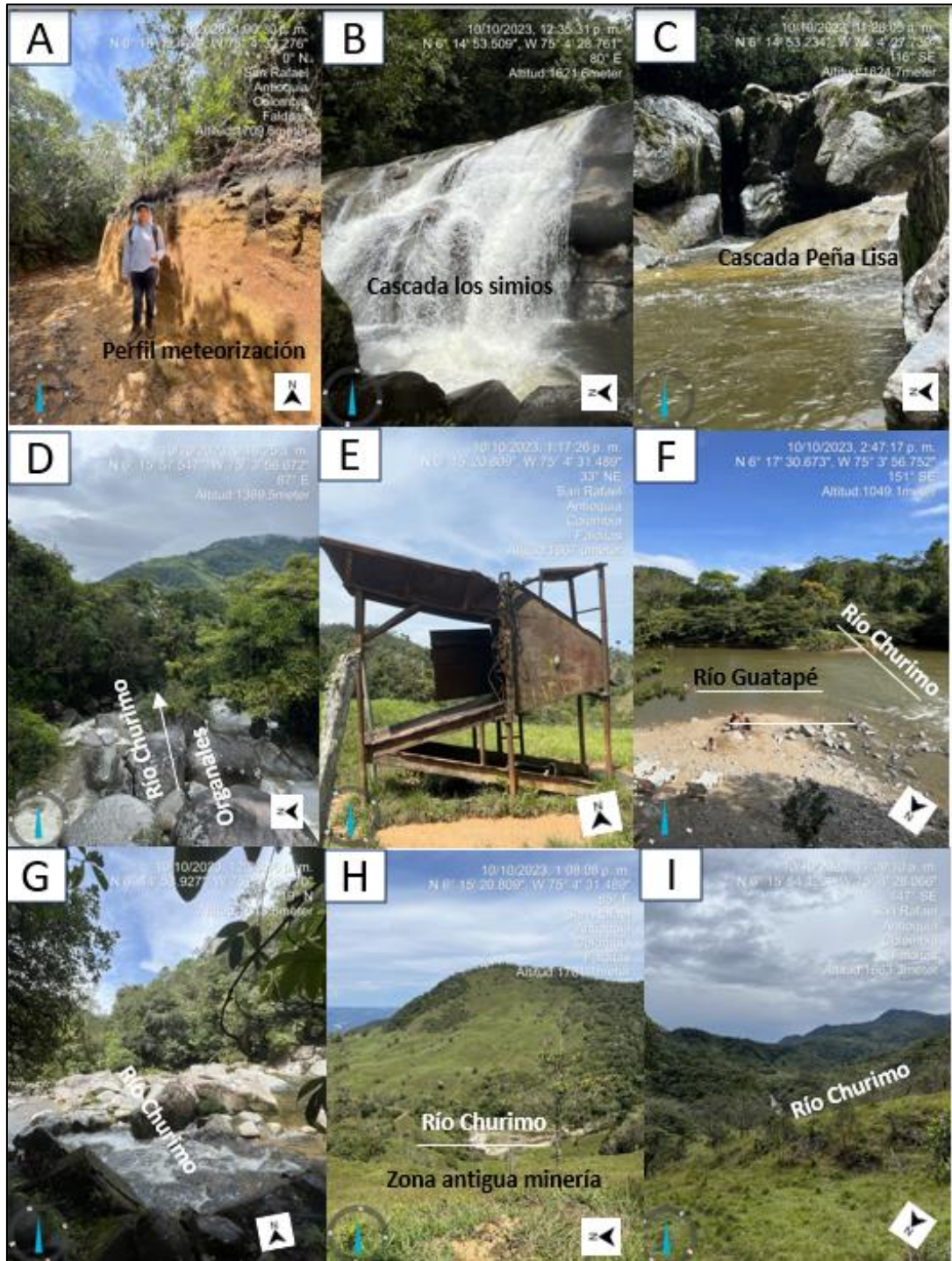


Figura 6. Fotografías tomadas salida de campo para identificación de Lugares de Interés Geológica A) perfil meteorización B) Cascada los Simios C) Cascada Peña Lisa D) Organales E) Zona minería Antigua F) Zona de playas y confluencia Río Guatapé y Churimo G) Río Churimo H, I) visualización panorámica. *Elaboración propia.*

3.5 Comparación de métodos

A partir los mapas obtenidos de geodiversidad por las dos metodologías Valentín (2021) y Valentín modificada, se realizó un análisis distribuido de la varianza (figura 6), la cual muestra, variaciones máximas del 25%, asociadas a zonas donde se presenta una sobreestimación de metodología respecto a la otra. Estas variaciones están relacionadas con los valores donde se da la más alta geodiversidad en ambos métodos, correspondientes a las zonas a lo largo del cauce del río, sugiriendo un mayor detalle con la integración de ambas metodologías. La diferencia se debe a que hay una modificación a partir de diversidad de índices morfométricos en una de las metodologías.

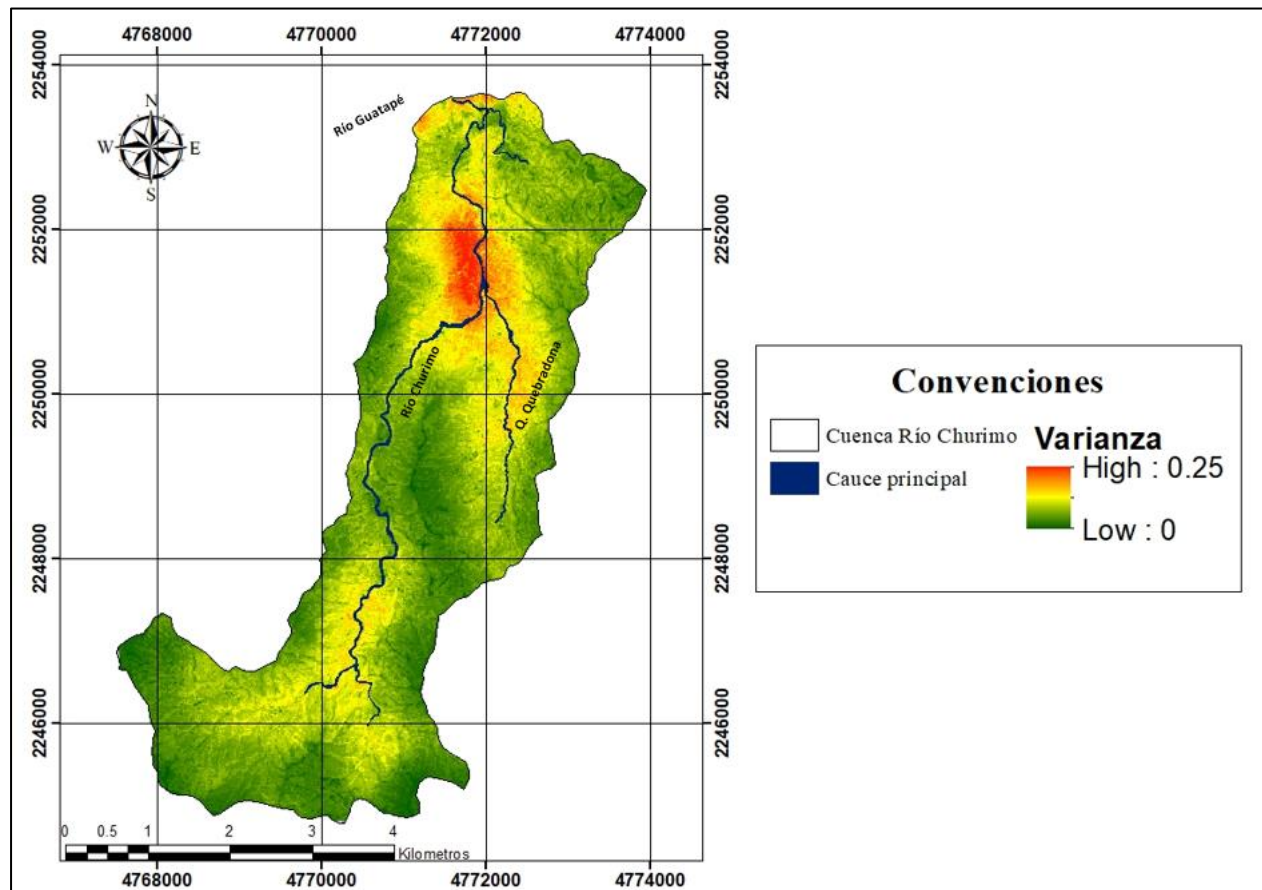


Figura 7. Mapa de análisis distribuido de la varianza para método Valentín (2021) y método Valentín (2021) modificado con Argryiu (2016) modificado. *Elaboración propia.*

4 Discusión

Tal como lo expresa Williams et al. (2020), la obtención de un mapa de geodiversidad permite cuantificar la diversidad del paisaje y otros índices de patrones espaciales. Estos índices evalúan la riqueza, la uniformidad, la fragmentación y la forma de los tipos de agrupaciones del paisaje. Teniendo en cuenta que los enfoques directos implican la ejecución de trabajos de campo para determinar el valor de la geodiversidad en relación con componentes específicos del entorno natural como suelos, rocas, características del relieve, etc. Es importante utilizar métodos de aproximación que conlleven a la obtención de resultados más precisos y la aplicación de cálculos más simples (Pellitero et al., 2014; Williams et al., 2020).

Como se ha mencionado a lo largo del documento, el proceso de evaluación de la geodiversidad puede agruparse en tres categorías de métodos: (1) cualitativos, (2) cuantitativos y (3) cualitativos-cuantitativos. En ese sentido, Williams et al. (2020) menciona que esta clasificación puede generar ciertas confusiones, ya que con frecuencia se superponen técnicas en cada una de estas categorías. Para efectos de este trabajo, se realizó la comparación de dos metodologías cuantitativas para identificar el aporte al conocimiento, las limitaciones, y dificultades de estas. Dada la complejidad de esta clasificación, y la necesidad de abordar los resultados obtenidos en los diversos métodos y técnicas por separado, se presentan las siguientes observaciones:

Metodología Valentín (2021)

Esta metodología se limita a un conteo de EA, cuyos resultados dependen a su vez de la disponibilidad de variables involucradas en el mismo. Al cuantificar el número de EA de la cuenca del río Churimo, las zonas de más baja geodiversidad ubicadas en las zonas altas de la cuenca son el resultado de que hay baja densidad de drenajes, una única unidad geológica-geomorfológica, entre otros. Lo que hace que la diversidad de estas áreas se comporte de esta manera. En cuanto a las zonas de diversidad media, se puede analizar que corresponde a zonas que van disminuyendo en pendiente y que se encuentran alrededor de los drenajes, en donde empiezan a tener mayor relación entre ocurrencias minerales, unidades geológicas, geomorfológicas, unidades pedológicas,

entre otras. Es evidente que para las zonas de alta geodiversidad el cauce principal y la red de drenaje juega un papel sumamente importante, ya que imprime un alto potencial de geoconservación a la riqueza hídrica de la región y que además se comporta de manera general como un elemento importante en el contexto turístico. A partir de esta metodología se pudo identificar que la zona de diversidad media es aquella que contiene mayor cantidad de información y esto puede deberse a que como se mencionó anteriormente, esta zona suele tener presencia de diversidad de unidades. Sin embargo, no cuenta con la presencia directa del cauce principal que da mayor valor a la geodiversidad de la zona.

Es importante mencionar que la principal limitante identificada para este método se asocia con la escala de la información básica y temática, ya que se dificulta para cuencas pequeñas obtener información con una resolución detallada, problematizando la definición de la unidad mínima de análisis sobre la que se realiza el conteo. Es importante tener en cuenta que esta metodología se comporta de manera subjetiva y para obtener un mayor potencial debe ser complementada con información más precisa que permita potenciar la toma de decisiones en un contexto general, y debería funcionar como complemento para estudios específicos, ya sean de geoconservación de una zona, realización de rutas turísticas, identificación de lugares de interés geológico, entre otros, más no como único recurso de estimación final.

Teniendo en cuenta el trabajo de grado realizado para la cuenca Arenales por Baron & Bermudez (2021), la metodología de Valentín (2021) se recomienda únicamente con miras hacia una identificación preliminar de una zona, haciendo hincapié en que un uso óptimo se acota a escalas regionales 1:100.000 a 1:25:000 (como un método rápido y de bajo costo computacional). Bajo esta premisa, la metodología seleccionada para una estimación más precisa de geodiversidad en su trabajo es la de (Najwer et. al, 2016) tratándose del cálculo basado en el modelo multicapa *Natural Breaks*, que agrupa datos para determinar el valor y peso de cada variable, utilizando valores cuantitativos y cualitativos para determinar la geodiversidad.

Cabe añadir que a lo largo de los trabajos realizados dentro del “Semillero de Geología Regional y Geoconservación” se ha podido identificar que existe una necesidad de encontrar una metodología que permita iluminar de manera más detallada la geodiversidad de una zona, con el fin de obtener información más objetiva y relevante de un área.

4.1 Geodiversidad modificada con Argirious (2016) modificado

La metodología implementada corresponde a una modificación del método Valentín con el uso de la caracterización morfométrica de un sector específico, e involucra índices netamente derivados de dicha respuesta. Los factores con mayor relevancia en el método son aquellos que están relacionados con la corriente principal, red drenaje y pendiente (Fu, Dd, Di Sg), obteniendo un resultado final a partir de una sumatoria normalizada de índices, donde los valores más altos de diversidad se encuentran relacionados directamente con la corriente principal y zonas con la que esta tiene relación. Las zonas de alta pendiente y donde no hay mucha influencia de la red de drenaje se muestran con baja diversidad, puesto que son zonas que presentan menor influencia en cuanto a estos índices morfométricos. En general, predominan zonas de diversidad media asociadas a índices con mayor relación con la evolución del paisaje (brindada además por el cauce principal), la erosión, y el comportamiento de la corriente principal.

Este método modificado tiene la finalidad de brindar menor subjetividad al método de estimación de Geodiversidad de Valentín (2021), añadiendo un valor de evolución del paisaje y haciendo de este un método más preciso que no tenga una dependencia única a la información cartográfica, puesto que como se pudo observar en los resultados, la diversidad de estos índices tiene gran relación con la geodiversidad que se puede analizar y observar de una zona.

Entre las limitaciones que se pueden identificar en el método de unificación está la determinación de los índices que se deben calcular para realizar el mapa final, considerando que hay gran variedad de índices que corresponden a información morfométrica de un terreno en específico y que determinan además la evolución del paisaje. Procedimientos de omisión de algunos de ellos podrían conllevar a información incompleta que no delimite apropiadamente las zonas que deberían ser consideradas. En la metodología utilizada se excluyeron 3 índices teniendo en cuenta la metodología utilizada dentro del Semillero de geología Regional y Geoconservación, y por ende se debe tener en cuenta las limitaciones mencionadas anteriormente.

4.2 Comparación de métodos

A raíz de los resultados obtenidos a partir del análisis distribuido de la varianza y los lugares de interés geológico superpuestos sobre cada método, es posible identificar la precisión de un método respecto a otro, con tendencias relativamente homogéneas en términos de la varianza, que permiten proponer que la metodología apropiada es en la cual se implementen ambos procesamientos.

Estadísticamente se corrobora que ambas metodologías al tener una varianza relativamente alta, puede hacerse uso del método que detalle e ilumine de manera más detallada una superficie, en este caso la Cuenca del río Churimo, y que estas diferencias es posible identificarlas en las gráficas de barras obtenidas a partir de las categorías de cada uno de los métodos.

Teniendo en cuenta el trabajo realizado por Ramírez, B. A., & Rodríguez, V. (2017), donde se realiza una comparación de métodos heurísticos y estadístico bivariado para zonificar susceptibilidades por deslizamientos, es posible afirmar que existen diferentes maneras de realizar una comparación entre metodologías, y que aplicar varias de ellas podría acotar un resultado acertado. Lo realizado en este trabajo corresponde a una visión preliminar hacía la unión de la metodología de Valentín (2021) con la de índices morfométricos de Argyriou et. al (2016) modificado, abriendo la posibilidad de cambios futuros con miras a mayor precisión del método.

5 Conclusiones y recomendaciones

La conformación de una base de datos cartográfica corresponde a un elemento de procesamiento fundamental que permita el control de la información que se encuentre disponible y las restricciones dadas a la misma, se hace necesario para llevar a cabo los métodos, realizar una reescalación de variables para lograr un buen resultado.

El método de Valentín teniendo en cuenta las restricciones cartográficas, debería usarse principalmente para una escala regional. En el caso de la cuenca de zona de estudio, esta metodología debería ser utilizada a miras de un primer acercamiento de la geodiversidad, pero no constituye un elemento para la toma de decisiones, ni la eficiente gestión del territorio.

El método de índices morfométricos brinda una aproximación menos subjetiva de una zona en específico en relación con la respuesta propia del terreno a eventos evolutivos. Sin embargo, se encuentra limitada a la escala de píxel de un DEM. Además, es importante determinar de manera apropiada los índices que se van a utilizar y el objetivo con el cuál se busca implementar, dejando claro de esa manera cuales son los que determinan la diversidad relacionada con la evolución del relieve.

El método Valentín desde su concepción hace necesario el uso de índices morfométricos para dar un resultado más acertado a la geodiversidad de una zona. Junto con el análisis distribuido de la varianza, y el hecho de que ambos métodos pueden brindar información más completa en términos de elementos abióticos y la geodiversidad relacionada con la evolución del paisaje, las limitantes radican principalmente en la subjetividad y la sobreestimación de índices sobre las superficies ráster, cuyo grado de incertidumbre puede bajar al analizar adecuadamente los valores estadísticos, en pro del complemento de ambas metodologías, y a su vez en la sugerencia de una superficie de geodiversidad en 5 categorías de mayor entendimiento para la toma de decisiones.

La zona de estudio exhibe mayor geodiversidad a lo largo al cauce principal del río Churimo en las dos metodologías utilizadas, y el resultado conjunto es altamente correlacionable con los puntos de control y lugares de interés identificados en la cuenca.

Al mostrar un resultado de geodiversidad en términos de distribución espacial, es importante complementar la información con la historia geológica no solo superficial, sino también de los procesos internos que delimitan el paisaje observado, en este caso en relación con la evolución del paisaje granítico del oriente antioqueño, para así generar una delimitación de lugar de interés geológico.

Lo que busca este trabajo es promover la implementación de metodologías que puedan disminuir el factor de error e iluminar y detallar de mejor manera la geodiversidad. Se recomienda utilizar otros métodos de comparación estadística, que puedan profundizar en la selección del mismo, y pueda agregar mayor valor al estudio presente.

Se recomienda realizar un análisis estadístico que permita identificar mayor precisión de puntos de lugares de interés geológico con las superficies halladas de geodiversidad y que por alcance de este trabajo no se realizó. Además se recomienda para la zona de estudio realizar un trabajo de

campo mucho más detallado que permita mejorar las variables de entrada, y delimitar cada lugar en terminos científicos, turísticos y didácticos.

Finalmente es importante mencionar que el calculo de la geodiversidad y seguir incursionando en esta metodología es importante ya que brinda una herramienta de integración con la cuál se propone prodría llevar a cabo un complemento hacia: Plan de Ordenamiento Territorial (POT), Planes de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas (POMCA) y este enfoque además podría posibilitar una aproximación a la delimitación de modelación de amenazas, vulnerabilidad y riesgos. Facilitando además datos cruciales para asignar recursos económicos y determinar prioridades en áreas de mitigación y prevención de desastres. Aspectos de regulación climática, hídrica, suministro de agua para energía, entre otras.

6 Referencias

- 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.
<https://doi.org/10.1016/j.jag.2016.04.006>
- Baron, M., Bermudez, A. (2021). Caracterización de la geodiversidad en la cuenca del río Arenal, San Rafael, Antioquia, como herramienta para la gestión integral del territorio.
<https://repository.eafit.edu.co/handle/10784/30598>
- Carcavilla, L., Durán, J. J., & López-Martínez, J. (2008). Geodiversidad: concepto y relación con el patrimonio geológico. *VII Congreso Geológico de España*, 10, 1299–1303.
http://aguas.igme.es/patrimonio/descargas/concepto_Geodiversidad.pdf
- Cediel, F., & Shaw, R. P. (2019). *Geology and Tectonics of Northwestern South America* (F. Cediel & R. P. Shaw (eds.)). Springer Nature Switzerland. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-76132-9>
- Gray, M., Gordon, J.E., Brown, E.J., 2013. Geodiversity and the ecosystem approach: the contribution of geoscience in delivering integrated environmental management. *Proc. Geol. Assoc.* 124, 659673.
- IDEAM. (2010). *LEYENDA NACIONAL DE COBERTURAS DE LA TERRA. Metodología CORINE Land Cover Adaptada para Colombia Escala 1:100.000*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.
- Mark, R. (1992). Multidirectional, oblique-weighted, shaded-relief image of the Island. U.S. Geological Survey.
- Najwer, Al, Borysiak, J, Gudowicz, J, Mazurek, M, Zwolinski, Z., (2016). Geodiversity and Biodiversity of the Postglacial Landscape (Dębnica River Catchment, Poland). *Quaestiones Geographicae*. 35. 5-28. 10.1515/quageo-2016-0001
- Ordóñez Carmona, O., Martins Pimentel, M., & Angel Cárdenas, P. (2001). CONSIDERACIONES GEOCRONOLÓGICAS E ISOTÓPICAS PRELIMINARES DEL MAGMATISMO CRETACEO-PALEOCENO EN EL NORTE DE LA CORDILLERA CENTRAL. *VIII Congreso Colombiano de Geología, Manizales – Colombia*.
<https://doi.org/10.13140/2.1.3537.6643>
- Pellitero, R. (2012). *Geomorfología, paleoambiente cuaternario y geodiversidad en el macizo de Fuentes Carrionas-Montaña Palentina*. <http://cerro.cpd.uva.es/handle/10324/2495>
- Ramirez, B. A., & Rodríguez, V. (2017). *Comparación métodos heurísticos y estadístico bivariado para zonificar susceptibilidades por deslizamientos, subzona hidrográfica río Tapias y aferentes al Cauca*. Universidad de Manizales.
- Serrano, Enrique & Ruiz-Flaño, P.. (2007). Geodiversidad: concepto, evaluación y aplicación territorial. El caso de Tiermes Caracena (Soria). *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, ISSN 0212-9426, N°. 45, 2007, pags. 79-98.

Servicio Geológico Colombiano (SGC), & Universidad Pedagógica y Tecnológica. (2014). Anexo A - Geología. In CONVENIO INTERADMINISTRATIVO No. 031 DE 2012 (Ed.), *MEMORIA EXPLICATIVA DE LA ZONIFICACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD Y LA AMENAZA RELATIVA POR MOVIMIENTOS EN MASA ESCALA 1:100.000 PLANCHA 148 – SAN CARLOS* (Issue 031, pp. 1–31). Servicio Geológico Colombiano.

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.

Williams, M.A., McHenry, M.T. & Boothroyd, A. (2020). Geoconservation and Geotourism: Challenges and Unifying Themes. *Geoheritage* **12**, 63 <https://doi.org/10.1007/s12371-020-00492-1>

Zwoliński, Z., Najwer, A., & Giardino, M. (2018). METHODS FOR ASSESSING GEODIVERSITY. In E. Reynard & O. Brilha (Eds.), *Geoheritage Assessment, Protection, and Management* (pp. 27–52). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809531-7.00002-2>

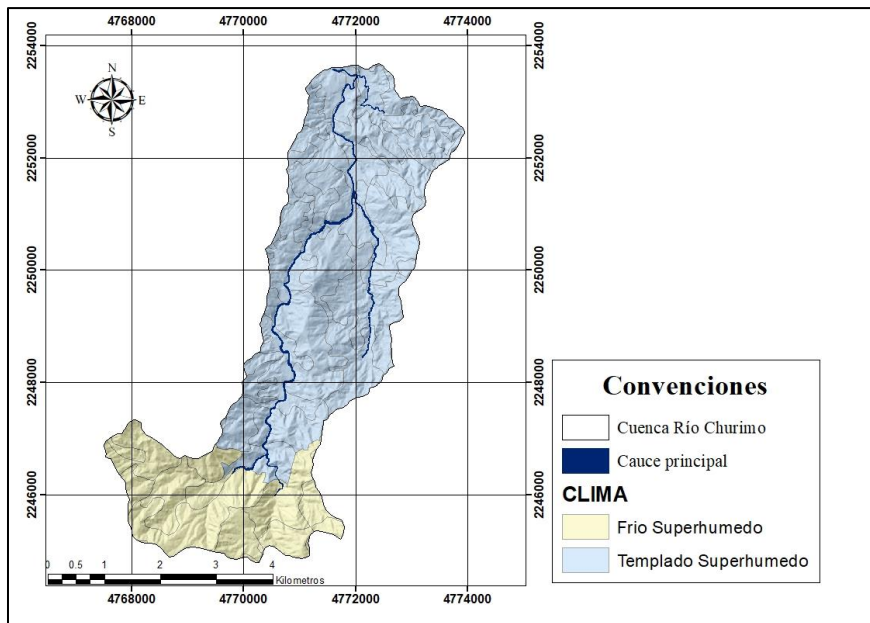
24.1.9. *Análisis Raster — Documentación de QGIS Documentation* -. (s. f.).

https://docs.qgis.org/3.16/es/docs/user_manual/processing_algs/qgis/rasteranalysis.html

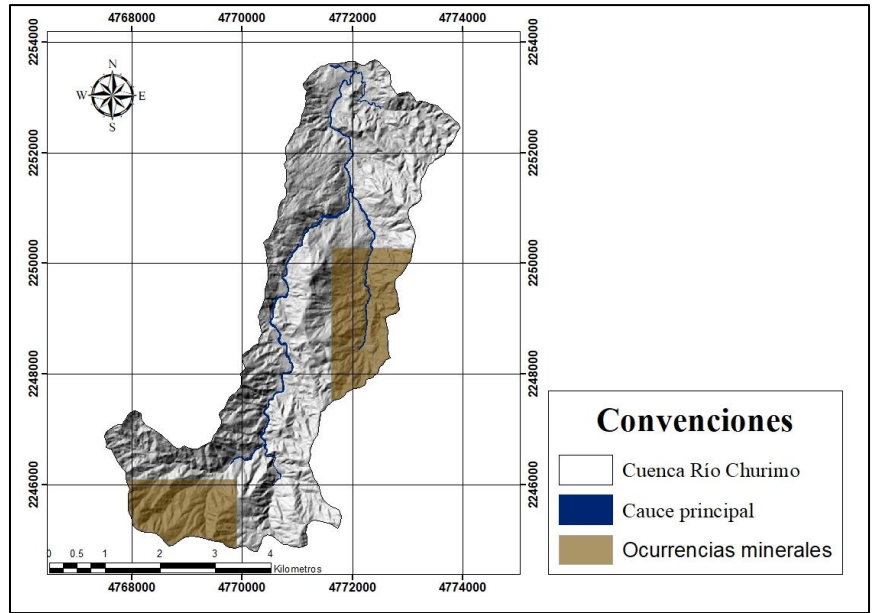
Anexos

Para realizar el procedimiento de Valentín (2021) se hace necesario generar inputs que permitan procesar la herramienta, estos son: geología representada por el batolito Antiqueño en facies de cuarzodiorita en su mayoría y cuarzodiorita félsica en algunas zonas, además de depósitos aluviales y coluvioaluviales. También se encuentra el clima dividido en frío super húmedo y templado súper húmedo, las ocurrencias minerales que se pueden observar en la zona sur de la cuenca y hacia el este en la parte central, pedología, red de drenaje, la falla bizcocho y los lineamientos tomados a partir del procedimiento de Mark (1992), la geomorfología reescalada que se encuentra delimitada por un ambiente estructural, denudacional y fluvial.

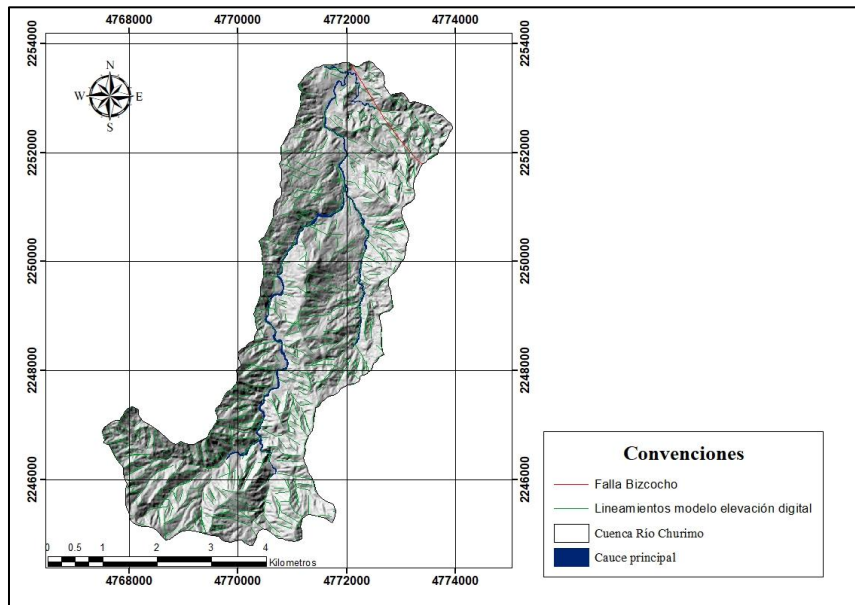
(Inputs anexo 1)



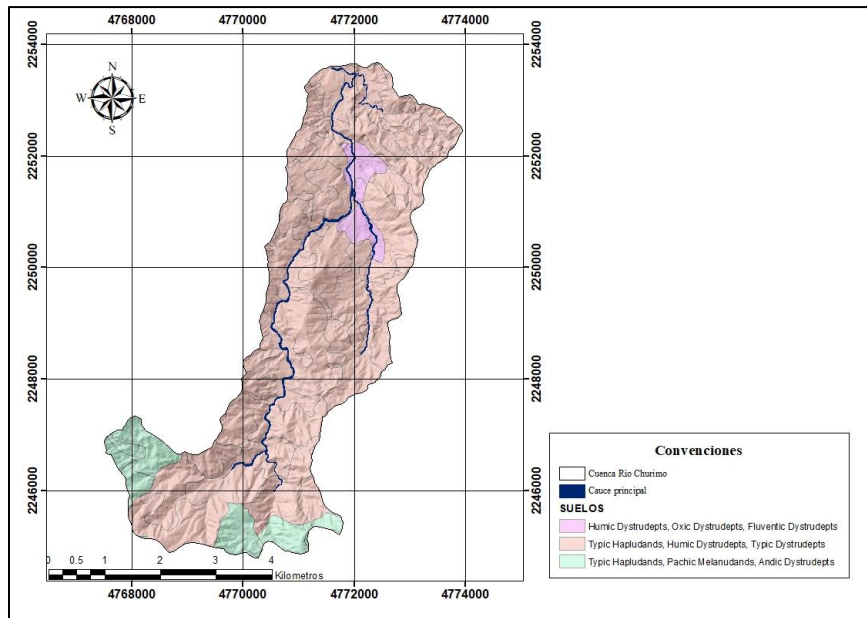
Anexo. Clima de la zona de estudio. Fuente: IDEAM (2017)



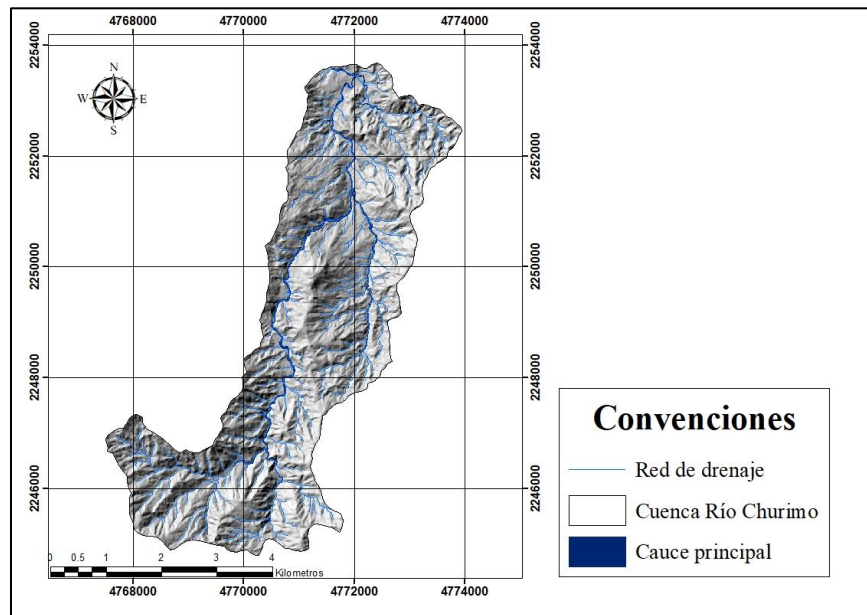
Anexo. Mapa de ocurrencias minerales. Tomado de geoportal de Anna minería



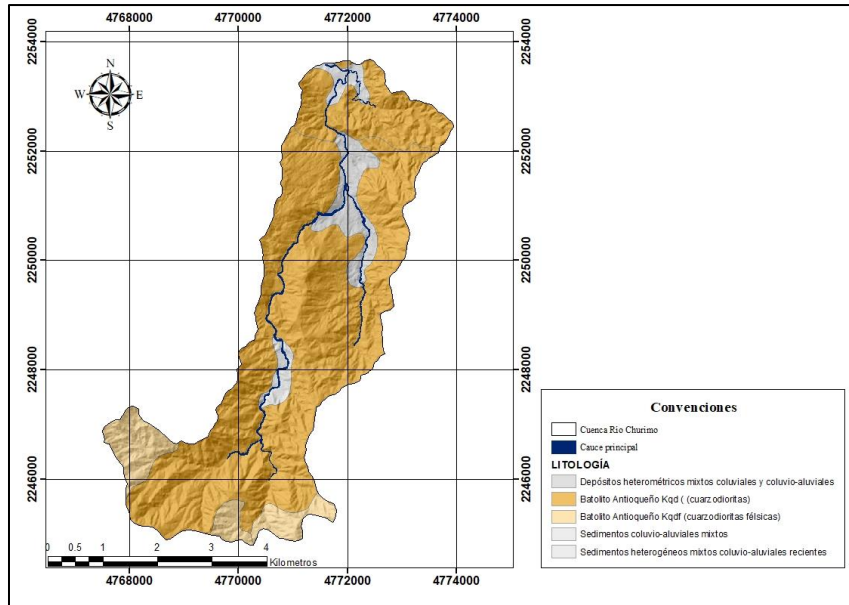
Anexo. Mapa de falla y lineamientos automáticos. Tomado de SGC (2014) y Catalyst



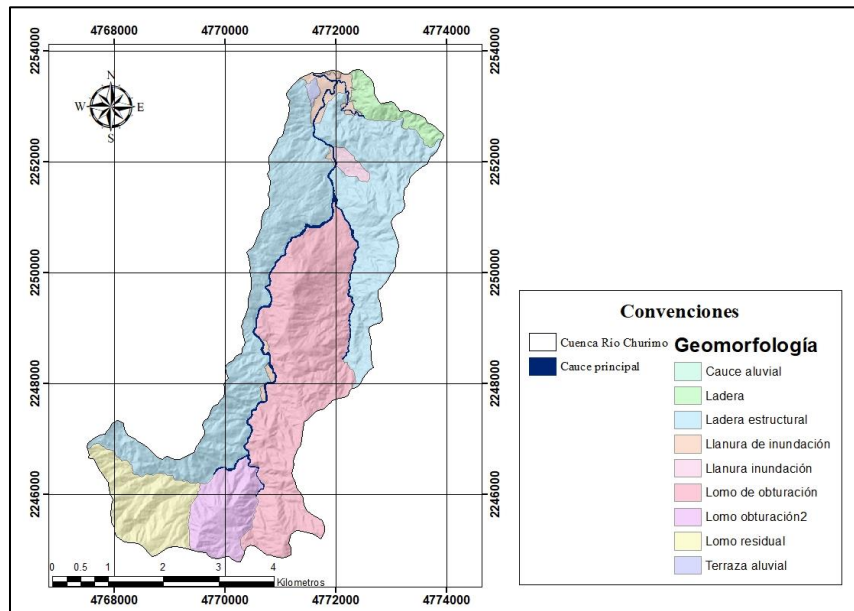
Anexo. Mapa de suelos. Tomado de IDEAM (2017)



Anexo. Mapa de hidrología. Elaboración propia.



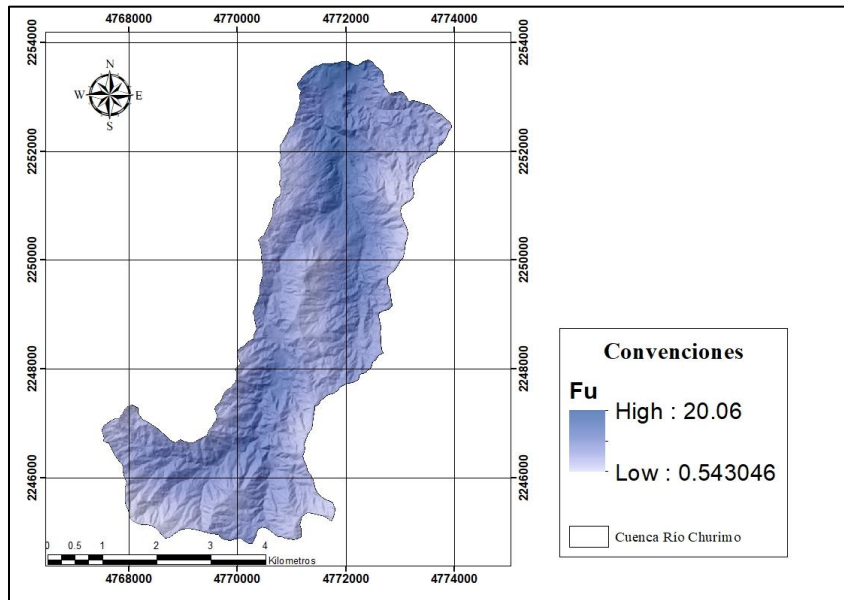
Anexo. Mapa de geología. SGC (2014)



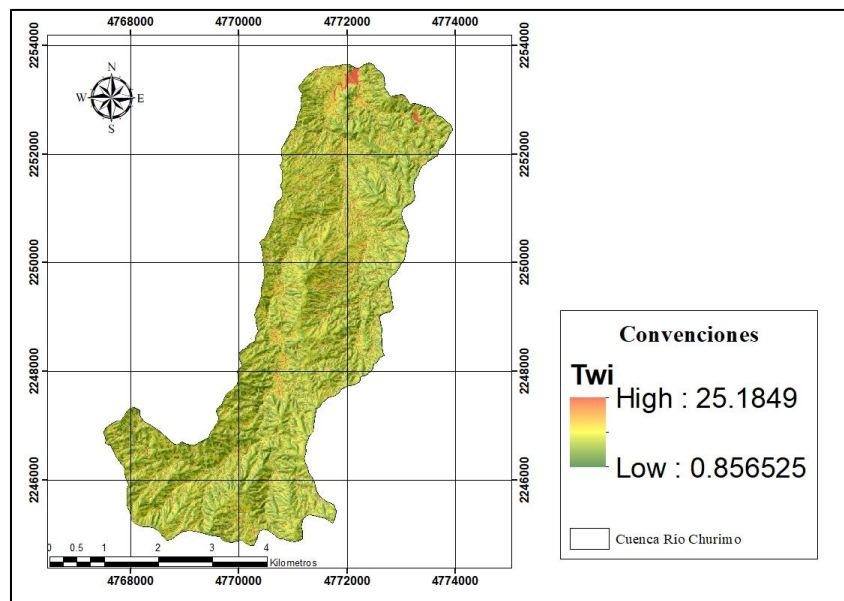
Anexo. Mapa de geomorfología. SGC (2014)

Para la metodología de Argyriou, realizando los pasos a seguir propuestos, los resultados por separado obtenidos son los mostrados en el anexo 2, donde cada uno de estos se normaliza y se realiza una suma para encontrar un mapa final, el F_u dio en un rango de 0.5 y 21, el T_w 0.8 y 26, el D_d 0.33 y 24, el D_i 0.007 y 0.3, el S_g representado mediante 1 y 6, y el A_r entre 5.8 y 511.

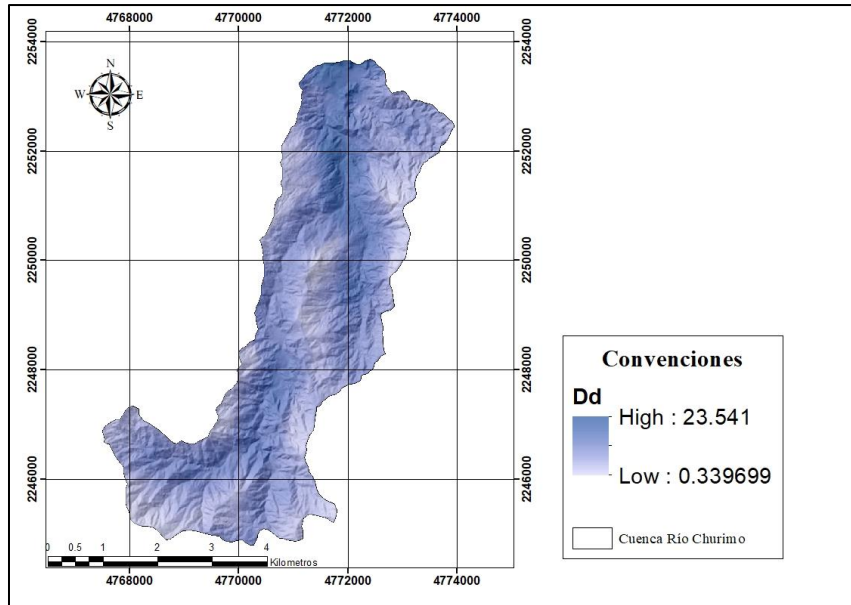
(Inputs anexo 2)



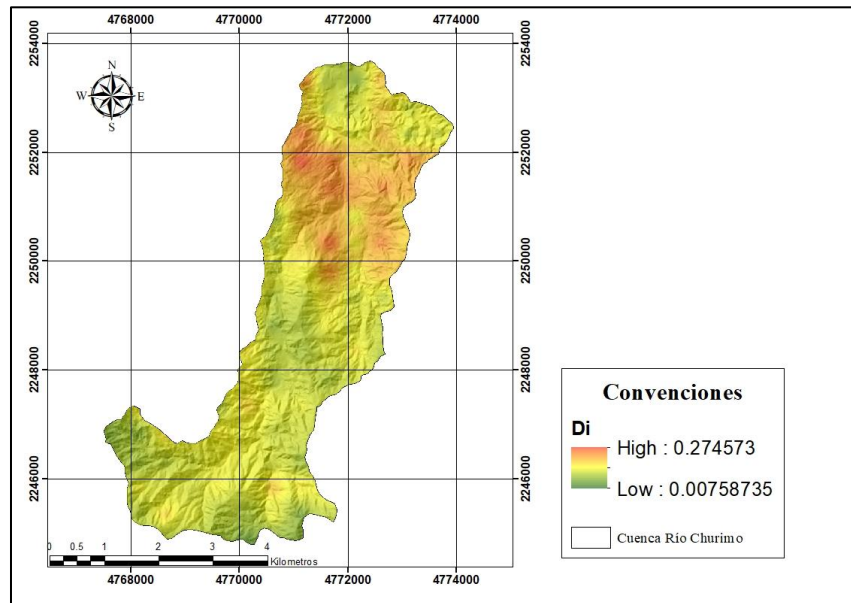
Anexo. Frecuencia del drenaje. DEM. Elaboración propia



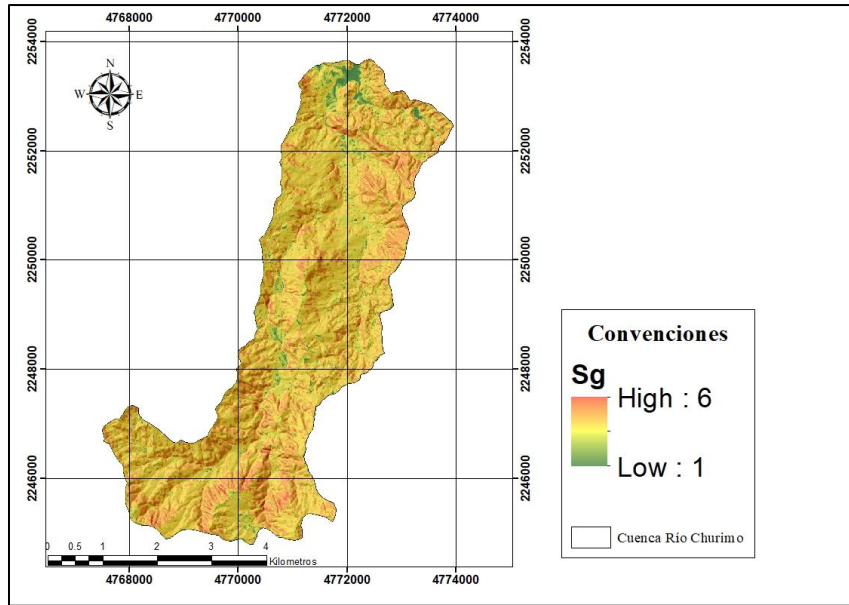
Anexo. Índice de humedad topografía. DEM. Elaboración propia



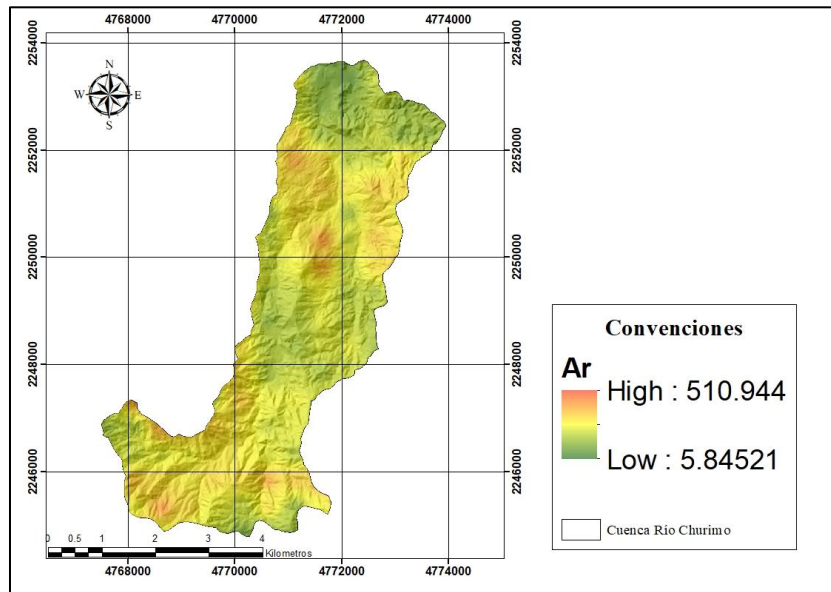
Anexo. Densidad de drenaje. DEM. Elaboración propia



Anexo. Índice de disección. DEM. Elaboración propia



Anexo. Índice de pendiente. DEM. Elaboración propia



Anexo. Amplitud del relieve. DEM. Elaboración propia