



**Evaluación de los procesos erosivos en la Sierra
Nevada de Santa Marta: una aproximación desde
los SIG**

Luisa Fernanda Fawcett Diaz

Universidad del Norte
Departamento de Física y Geociencias
Programa de Geología
2020

Evaluación de los procesos erosivos en la Sierra Nevada de Santa Marta: una aproximación desde las SIG.

Autor:

Luisa Fernanda Fawcett Diaz.

Trabajo de grado para optar por el título de:

Geólogo.

Director:

PhD. Camilo Montes.

Programa de Geología.

Departamento de Física y Geociencias

Universidad del Norte

Barranquilla

2020

*A Dios, mi roca y mi sustento.
A mi familia, por acompañarme siempre,
incondicionalmente.*

AGRADECIMIENTOS.

Gracias a Dios por permitirme realizar este proyecto y por darme la fortaleza para seguir incluso cuando sentí no poder más. A mi familia quienes nunca dejaron de apoyar mis sueños, gracias por siempre tener fe en mí y apoyarme en mis metas personales y motivarme a seguir adelante a pesar de las dificultades. A mi director de proyecto de grado, Camilo Montes, por su paciencia y esmero en brindarme acompañamiento continuo, sobre todo durante este trabajo, gracias por siempre guiarme a la excelencia y nunca desistir, usted es un ejemplo a seguir. A Natalia Hoyos, por enseñarme SIG con todo el amor y exigencia que se necesitaba, por enamorarme de esta rama de las geociencias y haberme animado a seguir este camino. A Felipe Lamus por nunca perder la fe en mí y en mi potencial, gracias por sus consejos y ánimos que siempre me dio. A Carolina Martínez por sus consejos, regaños y ayudas. Gracias por haber sido un pilar a lo largo de mi pregrado y siempre estar cuando lo necesité. A Jessy Lambis, mi compañera de trasnochos que me brindó su amistad incondicional durante mi carrera y que me llevaba a ser mejor cada día. A Julián Garrido por haber sido de apoyo durante las campañas de campo realizadas durante la carrera y haberme motivado a realizar este trabajo aún en la distancia. A todos ustedes, gracias.

RESUMEN.

La evolución geológica en los sistemas montañosos se ven afectadas por múltiples factores a lo largo de la historia tales como elevaciones de superficie, procesos geomorfológicos y el clima. Datar estos procesos no solo nos contextualizan históricamente, sino que nos ayuda a conectar sucesos ocurridos en esos mismos periodos que pudieron influir en su estado actual y visualizar un panorama más regional. La Sierra Nevada de Santa Marta, no solo tuvo una elevación de superficie abrupta generada por fallas, sino que posee un basculamiento de 16° en dirección SE debido a la colisión intraplaca ocurrida en el Paleoceno entre la placa Caribe y la Suramericana. Ante un levantamiento no uniforme, las cuencas hídricas presentes en el macizo se acoplarán al nuevo arreglo geomorfológico por lo que los datos conocidos en una de sus cuencas pueden ser extrapolados linealmente a las demás. Para conocer los procesos erosivos en la Sierra Nevada y cuánto tiempo lleva expuesta a erosión, debemos contemplar su historia evolutiva y seguir un modelo tectónico donde se pueda datar ese periodo de tiempo. La información obtenida desde los sistemas de información geográfica (SIG) nos puede acercar a una primera aproximación de este periodo. Para lograr ese objetivo, en este proyecto cálculo el volumen erosionado en la Sierra Nevada de Santa Marta a partir de imágenes satelitales (MDE) como primera aproximación a su historia evolutiva y evaluaré su compatibilidad con tasas de transporte de sedimentos en suspensión actuales.

ABSTRACT.

The tectonic evolution of mountain systems is affected by multiple factors along the history such as surface lifting, geomorphological processes, and climate. Dating this process does not bring us context information but events that happened in those periods that could have influenced the current setting and helped us to visualize a bigger window. The Sierra Nevada de Santa Marta, not only had a rapid lifting generated by faults, also has a 16° tipping in SE direction resulting from the Paleocene intraplate collision between Caribbean and South America plate. As a result in front of a non-uniform survey, the watersheds present in the massif will be coupled to the new geomorphological arrangement, so that the known data in one of its watersheds can be linearly extrapolated to the other ones. For understanding the erosive processes in the Sierra Nevada and how long it has been exposed to erosion, I must contemplate its evolutionary history following a tectonic model where that period is already dated. The information obtained from geographic information system (GIS) can bring us closer to a first approximation of this erosive period. To achieve this goal, in this project I calculate the volume eroded in the Sierra Nevada de Santa Marta from satellite images (DEM) as a first approximation to its evolutionary history and I will evaluate its compatibility with current transport rates of suspended sediments.

INTRODUCCIÓN.

Aspectos como la elevación de la superficie, procesos geomorfológicos y el clima son claves para comprender la evolución de los sistemas montañosos a lo largo del tiempo geológico. Estudios realizados en el Himalaya confirman una relación espacial directa entre rápidos levantamientos de la corteza, condiciones climatológicas como lo son precipitaciones intensas y la tasa de erosión (Clift et al., 2008). La cuantificación de la magnitud de la elevación y el momento en que ocurre se vuelven desafíos a superar. Cada método aplicado posee diferentes limitaciones. Por ejemplo, el método de isótopos posee una resolución pobre de aproximadamente 1 km (Rowley y Garzione, 2007) y las reconstrucciones de levantamientos a partir de perfiles de río requieren la simplificación de muchos procesos como la erosión, que terminan resultando en datos poco aproximados a lo que realmente está sucediendo (Adams et al., 2017).

En un escenario donde la corteza se báscula debido a un levantamiento no uniforme, el sistema de drenaje evolucionaría simultáneamente como respuesta a este cambio (Braun et al., 2014). Un modelo tectónico en el que la Sierra Nevada se bascula hacia el SE (Bayona, 2011), producto de una colisión en el Paleoceno, habría causado un proceso erosivo reflejado en las cuencas hidrográficas y en el mapa geológico. Dado que el proceso de basculamiento es común y simultáneo para todas las cuencas hidrográficas de la Sierra Nevada, las tasas que se midan en una deberían ser válidas para todas. El mapa geológico refleja una geometría consistente con un proceso de basculamiento hacia el SE, con secuencias jóvenes y someras (Cretácico Tardío) al SE y antiguas y profundas al NW

(Granulitas de los Mangos) al NW (Tschanz, 1974).

En este trabajo calculé el volumen mínimo, intermedio y máximo erosionado de la Sierra Nevada de Santa Marta para realizar una primera aproximación a esta historia evolutiva y estimar un periodo de tiempo erosivo de este macizo rocoso. Además, evaluaré si estos resultados son compatibles con las tasas de transporte de sedimentos en la cuenca del río Palomino, descrito por Restrepo et al (2015).

TABLA DE CONTENIDO.

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTOS

RESUMEN 1

ABSTRACT 2

.INTRODUCCIÓN 3

1. OBJETIVOS. 5

 1.1 OBJETIVOS GENERALES 5

 1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS 6

2. 77

 2.1. CONTEXTO GEOLÓGICO

 2.2. EVOLUCIÓN GEOLÓGICA

3. METODOLOGÍA. 13

4. 147

5. 18

REFERENCIAS 20

ANEXOS. 22

1. OBJETIVOS.

1.1 OBJETIVOS GENERALES

Calcular el volumen erosionado en la Sierra Nevada de Santa Marta usando Sistemas de información geográficas y modelos digitales de elevación para evaluar si estos resultados son compatibles con tasas actuales de transporte de sedimentos en suspensión.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

- Generar 2 superficies de referencia para el cálculo de volumen de erosión promedio y mínimo, a partir de un modelo de elevación digital de la superficie
- Generar una superficie de referencia para el cálculo del volumen máximo de erosión a partir del modelo tectónico presentado por Bayona (2011), donde definimos una capa buzando a 16° en dirección SE y restamos con la topografía actual.
- Calcular el volumen máximo, promedio y mínimo erosionado y su equivalente en masa.
- Comparar estos resultados con las tasas de transporte de sedimentos actuales

2. GEOLOGÍA DE LA SIERRA NEVADA DE SANTA MARTA.

2.1 Marco geológico. La Sierra Nevada de Santa Marta (SNSM) es un macizo rocoso separado de la cadena montañosa central de los Andes y limitado por las cuencas sedimentarias de Plato-San Jorge al W y Cesar-Ranchería al SW. (Montes, et al., 2010). Las subcuencas como el río Palomino y Ranchería se encuentran en la cuenca Cesar-Ranchería, la cual no está fallada y se mantiene en continuidad con la Sierra Nevada. Tectónicamente, se encuentra delimitada por la falla de Oca, la falla de Santa Marta - Bucaramanga y el alineamiento del Cesar (**figura 1**).

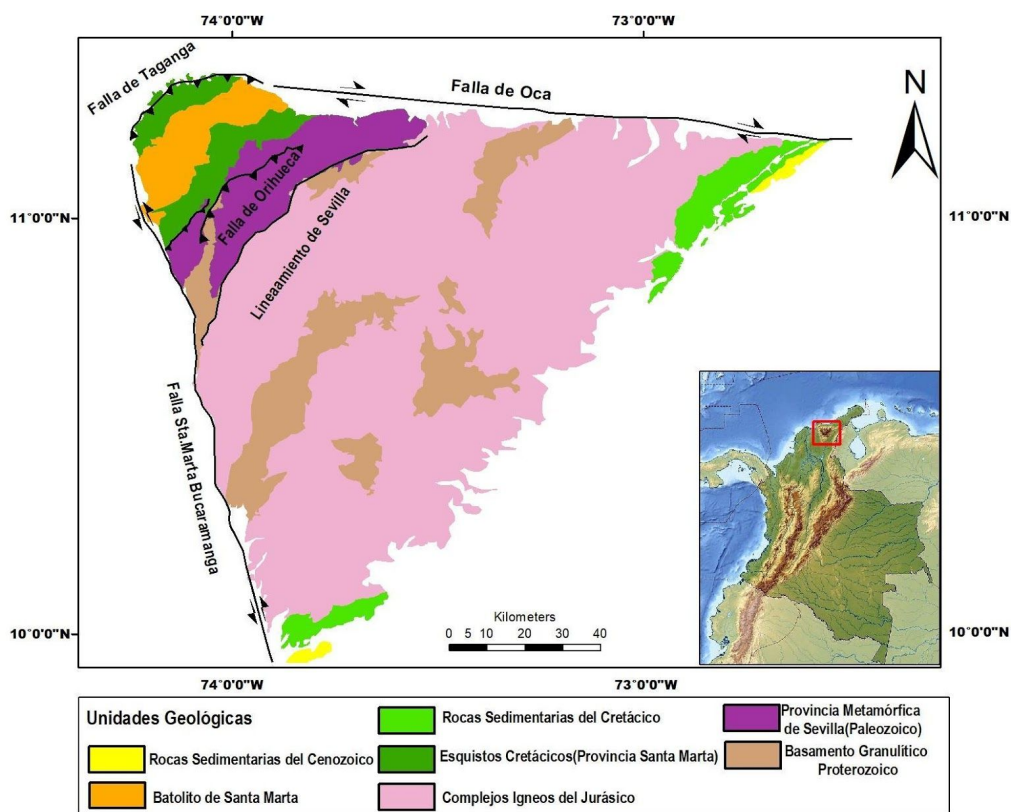


Figura 1. Mapa con límites tectónicos de la Sierra Nevada de Santa Marta (Tomado y modificado de Colmenares, 2009).

Este arreglo tectónico generó movimientos dextrales y sinestrales ocurridos en el cenozoico (65-110 Km) y desencadenaron, como consecuencia, levantamientos hasta alcanzar la topografía actual (Tschanz et al., 1974). La composición litológica de la SNSM es en promedio la siguiente: 22% Esquistos y Mármoles, 17% Batolito de Santa Marta 15%, 23% pórfidos graníticos y granitos leucocrático, 18% Batolitos, cuarzo-dioritas y granodioritas, 15% Neiss y 8% areniscas y arcillas.

2.2 Evolución geológica. La Sierra Nevada posee anomalías gravitacionales inesperadamente altas, de aproximadamente 208 mGal (Kellogg y Bonini, 1982), reflejando ausencia de equilibrio isostático (Case et al., 1990). Además, se han sugerido tasas elevadas de exhumación hace ~60 Ma, etapa inicial donde se produjo levantamiento dentro de la SNSM (Villagomez, 2011). Los picos altos que caracterizan la topografía sobresaliente de la Sierra se debe a que debido al rápido levantamiento no hay suficiente tiempo para erosionar y cambiar la geomorfología de la zona durante el proceso de exhumación y enfriamiento, este último ocurrido hace 16 Ma según pruebas de traza de fisión realizadas en apatitos (Villagomez, 2011).

La ocurrencia de un proceso de basculamiento en la Sierra Nevada concuerda con el problema de isostasia y la topografía sobresaliente anteriormente mencionados. Sin embargo, otro indicio de este proceso evolutivo se observa en la cuenca de Ranchería, delimitada al noroccidente por una homoclina de bajo ángulo que se sumerge al sureste con una cubierta sedimentaria del Eoceno Superior-Cretácico Inferior que suprayace

inconforme sobre las rocas ígneas Jurásicas del Macizo de Santa Marta. La falla Ranchería separa la sucesión sedimentaria del Paleoceno-Eoceno inferior en la cuenca de Ranchería en dos dominios: Al norte con el Anticlinal de Tabaco y fallas menores que dislocan la homoclina y al Sur incluye fallas inversas en el oeste y pliegues sub-paralelos a la falla Ranchería, siendo en el sur una deformación más intensa que en el norte. En esta cuenca, se observa un basculamiento en su límite con la falla de Cerrejón, donde Montes et al (2010) indica a través de un mapeo detallado la curva de la falla con una inclinación de bajo ángulo tal y como lo identifica Kellogg (1984). Al sur la falla de Cerrejón limita los estratos deformados del Eoceno, estos estratos se superponen en fallas y pliegues angulares al noroeste, que involucran unidades del Paleoceno inferior, Cretácico y pre-Cretácico. Estas fallas subsuperficiales y los pliegues relacionados forman el límite noroccidental del Perijá. Este límite incluye un anticlinal con cabeceo hacia el noroeste con un núcleo de rocas jurásicas expuestas por la falla de Cerrejón (Bayona et al., 2011). Este arreglo estructural demuestra el basculamiento que se encuentra en la Sierra Nevada de Santa Marta a un bajo ángulo (16°), pero que se encuentra limitado y configurado por un sistema diverso de fallas y pliegues tanto regionales como internos en las cuencas.

2. METODOLOGÍA.

Para determinar el volumen mínimo erosionado general de toda la Sierra Nevada de Santa Marta utilicé 3 técnicas diferentes. La primera, consiste en hallar el volumen entre un "techo" horizontal a 5775 m.s.n.m y la superficie topográfica actual. la segunda, consiste en hallar el volumen entre una envolvente construida a partir de los puntos más altos del macizo, parecido a una "carpa" o una "sábana" que cubre el macizo, y a la que se le resta la superficie topográfica actual. Por último, generamos una capa con un buzamiento de 16° siguiendo el modelo tectónico desarrollado por Bayona (2011). Esta nueva "tapa" inclinada dará un nuevo resultado de volumen mínimo erosionado al restarle con la topografía de la SNSM. Para llevar a cabo estas medidas, utilicé el programa Qgis versión 3.12.

Los archivos de tipo DEM son una representación de ráster de una superficie continua, que en general hace referencia a la superficie de la tierra y que su precisión se determina principalmente por la distancia entre los puntos de muestra (resolución). El DEM se obtuvo de la página de Earth Explorer (USGS, 2012) con una resolución de 1 arc per second que equivale a un DEM de 30 m, esta fue la resolución que se mantuvo durante todo el proyecto. Los ríos y su ubicación se obtuvieron de la base de datos abierta del Geoportal del Instituto geográfico Agustín Codazzi (IGAC,2017) escala 1:25000. Los límites son los presentes en la figura 1.

Para la primera técnica, en Qgis 3.12 resté el volumen con la herramienta llamada *surface volume*, herramienta que calcula el área y el volumen de la región entre una superficie hasta

los 0 metros. Este plano de referencia se colocó a 5775 msnm para que logre envolver la totalidad de la Sierra Nevada de Santa Marta y seleccioné el modo “restar sólo debajo de esta capa”. El resultado tiene incluido el volumen de la Sierra Nevada de Santa Marta por lo que se lo restamos y así obtenemos el volumen erosionado entre la “tapa” y la superficie de la misma.

Para la técnica de la envolvente se siguen los siguientes pasos en Qgis:

1. Generé una capa de puntos (.shp) en la barra de herramientas con la opción **Layer > create layer > new shapefile layer** con ubicación en las partes altas de la Sierra (cercana a los 5700 msnm) y partes bajas a 0 msnm (**Tabla 1**).
2. Descargué en la opción de **complementos > administrar e instalar complementos** en la barra de herramientas el plugin llamado **Point Sampling Tool** y les agregué los valores de altura del DEM correspondiente a esos puntos siguiendo los siguientes pasos:
 - a. Layer containing sampling points= capa de puntos creada
 - b. Layer with fields / bands to get values from = DEM
3. Con esta capa de puntos generé una superficie utilizando una interpolación de inverso a la distancia (IDW) con los parámetros
 - a. Capa vector: Capa de puntos (Tabla 3)
 - b. Atributo de interpolación: elevación
 - c. Tipo de atributo: lineal
 - d. coeficiente de distancia: 10
 - e. Extensión: capa de puntos.

f. Tamaño Raster: 30 m (las filas y columnas se construyen según este dato)

4. A este raster resultante le resté el volumen en *surface volume* con un nivel de base 0 hasta la topografía.

Por último, realicé un cálculo de volumen teniendo en cuenta las condiciones tectónicas mencionadas por Bayona (2011). En su artículo, como detallé anteriormente, se define un buzamiento de ángulo regional de 16° con una dirección de buzamiento de S45°E (**Figura**

2). Estos datos fueron obtenidos en Qgis con los siguientes pasos:

1. Creé una capa de puntos que cubriera el Lineamiento del Cesar y otra que estuviera tangencial a Santa Marta. Ambos como una misma capa. Al lineamiento del Cesar le asigné una altura de 300 m y calculamos la distancia entre este lineamiento a Santa Marta lo cual nos dio 141.65km. Conociendo el ángulo de 16° usé la relación de ángulos donde $\text{seno } 16^\circ = \text{lado opuesto/hipotenusa}$. La hipotenusa en este caso la tomamos como el valor de 141.65km para saber hasta qué altura llega esa capa. Como resultado, obtuve que esta capa con una longitud de 141 km a un ángulo de 16° logra una altura de 36km.
2. Generé una superficie IDW con los siguientes atributos:
 - a. Capa vector: capa de puntos.
 - b. atributos de interpolación: Elevación.
 - c. tipo de atributo: lineal.
 - d. coeficiente de distancia: 10
 - e. Extensión: capa de puntos.

f. Tamaño Raster: 30 m (las filas y columnas se construyen según este dato)

3. Utilicé nuevamente la herramienta de surface volume para restar desde una altura de 5775 m hasta los 0 metros.

4. Resté ese volumen con el volumen de la Sierra Nevada de Santa Marta.

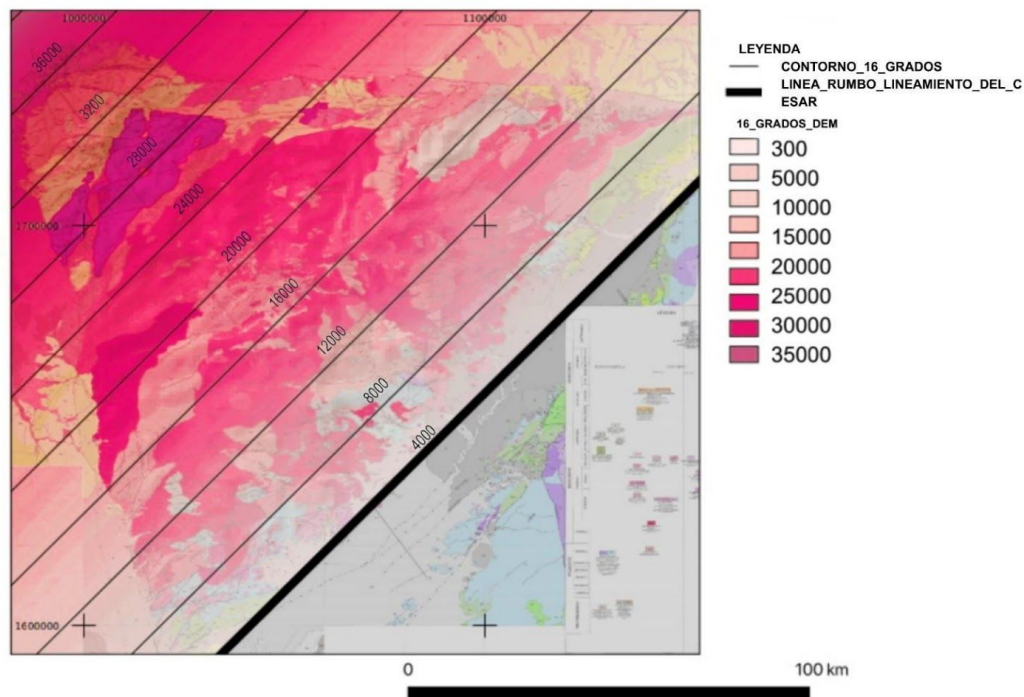


Figura 2. Mapa explicativo de la técnica del basculamiento presente en la Sierra Nevada de Santa Marta, expuesto por Bayona (2011). Mapa base tomado de Colmenares (2009).

Para verificar la metodología realizada generé una topografía sintética de forma cúbica siguiendo los siguientes pasos:

1. Creamos una capa de puntos (.shp) con distancias de cada 1 Km.
2. Le asignamos una altura de 2000 metros.

3. utilizamos la herramienta **Interpolación IDW**. Con un coeficiente P de distancia = 10 y tamaño de píxel de 30 m.

Esto genera un cubo con dimensiones de 20 km x 20km x 2km que tiene como volumen 800 km³. Al restar su volumen con la herramienta **surface volume** debería obtener un valor cercano a 800km³ para confiar en los resultados arrojados por la herramienta.

Además, con la capa de 16° generé una capa de curvas de nivel cada 1000 metros y medí el ángulo entre las curvas de nivel correspondientes a los puntos en Santa Marta y los puntos en el lineamiento del Cesar. Este ángulo debe darme cercano a 16° para verificar la elaboración de esta capa y que cumpla con el buzamiento asignado.

Para el análisis de los resultados, se aplicó la fórmula de $X=V.T$ para calcular el periodo de tiempo. Siendo X el volumen erosionado, V la tasa de erosión y T el periodo de duración. Para calcular entonces la fórmula resultante es $T=X/V$. Además, realizamos la prueba de la herramienta donde el volumen del cubo= $20\text{km} \times 20\text{km} \times 2\text{km} = 800 \text{ km}^3$ calculando este mismo volumen con la herramienta **Surface Volume** y confirmar su margen de error. Obtuvimos como resultado 793km³, siendo el margen de error ~1% por lo que podemos afirmar que los datos arrojados por la herramienta presentan muy poca variabilidad.

4. RESULTADOS Y DISCUSIONES.

Los volúmenes se presentan en la Tabla 2 y cumplen las siguientes funciones: La técnica la *capa inclinada* a 16° representa el volumen máximo erosionado desde el techo del Cretácico hasta la topografía actual el cual fue de 25,856 km³. La resta entre la capa “techo” (5775) representa el volumen desde el punto más alto de la SNSM, siendo en este proyecto el volumen intermedio erosionado el cual fue de 16.301 km³. Por último, la técnica de la *envolvente* corresponde al volumen mínimo erosionado al restar los puntos más altos de la SNSM y su topografía actual (**Tabla 2**).

La información acerca de las tasas de transporte de la literatura se encuentra en toneladas (unidad de masa) y los resultados están en km³ (unidades de volumen). Para solucionar esto aplicamos factores de conversión con la fórmula $\text{Peso} = \text{km}^3 (\text{Volumen calculado}) \times \text{densidad}$ (las unidades de la densidad deben ser t/km³). La densidad tomada es de 2.800.000 t/km³ correspondiente a la descripción litológica de Tschanz (1974) donde abundan las rocas cuarzo-feldespáticas. La prueba con la capa inclinada me dio 16,2° por lo que la capa está bien elaborada y me arroja datos correctos a lo que tectónicamente quise considerar en el modelo.

Estudios de tasas de erosión de algunos ríos de la Sierra Nevada de Santa Marta como el de Restrepo et al (2015) sobre el Río Palomino y Río ranchería proveen datos sobre las tasas de transporte de sedimentos en suspensión, así como datos máximos y mínimos en unidades de toneladas por día (t d⁻¹). Para este análisis utilicé los datos promedios ya que

me limité a mantener un comportamiento constante en los datos del río Palomino y adecuar los resultados de volúmenes a este dato invariable. El área del Río Palomino es de $0,68 \times 10^3$ km² y su tasa de transporte de sedimento promedio es de $0,13 \times 10^3$ t d⁻¹, siendo $47,450 \times 10^9$ t Ma⁻¹. Sin embargo, para cumplir el análisis de cuencas realizado por Braun et al (2914) donde afirma que estas se comportan similarmente entre sí, se debe extrapolar la tasa de transporte de sedimentos al área total de la Sierra Nevada de Santa Marta. Como resultado obtuvimos que la tasa de transporte del río Palomino que es de 130 t d⁻¹ y drenan un área de 680 km², en un área de 9673 km² (área de la SNSM arrojada por la misma herramienta de Surface volume) el transporte de sedimentos en suspensión suponiendo una relación lineal, sería de 674.976.000.000 t Ma⁻¹.

Los resultados de volumen erosionado para cada técnica se convirtieron de km³ a t (Tabla 2). Para la técnica de la *capa inclinada a 16°* con un volumen máximo erosionado de 351.952 km³, corresponde un peso de $9,014684 \times 10^{11}$ t, para la técnica de *surface volume* con un volumen intermedio erosionado igual a 72.891 km³ corresponde un valor de $2,040948 \times 10^{11}$ t y, por último, para la técnica de la *envolvente* cuyo volumen mínimo erosionado es de 18.231 km³ corresponde un peso de $5,10552 \times 10^{10}$ t. Si la Sierra Nevada de Santa Marta se comporta como el río Palomino, al usar la tasa de transporte de sedimentos (TSS) extrapolada de $7,592 \times 10^{11}$ t Ma⁻¹ tuvimos edades de erosión: 1.2 Ma para la capa inclinada a 16°, 0,07 Ma para la técnica de la envolvente y 0,27 Ma para el valor correspondiente la capa horizontal a 5775 m (**Tabla 2**).

Con base a estos resultados, podemos observar que las aproximaciones más acertadas están

en los últimos factores de proporcionalidad realizados a partir de los datos obtenidos de Restrepo et al. (2015). Sin embargo, los datos resultantes de la capa inclinada tienen en cuenta la evolución geológica de la Sierra Nevada de Santa Marta al seguir el modelo realizado por Bayona (2011) del basculamiento originado por la colisión del Paleoceno. Por esto, descarté los datos provenientes de surface volume y de la técnica de la envolvente, ya que no están sustentados geológicamente y no siguen las configuraciones tectónicas regionales.

A pesar de este filtro en los resultados, las edades siguen siendo muy pequeñas en comparación con la historia geológica del macizo y su basculamiento que data del Paleoceno (~60 Ma) donde, siguiendo lo afirmado por Braun et al., (2014), las cuencas debieron empezar a aumentar sus tasas de erosión hasta que el sistema se normalizara. A esto debemos añadirle las tasas de exhumación mencionadas por Villagomez (2011), originadas por la acreción de la placa del Caribe que generó el cambio geomorfológico en la zona alterando las tasas de erosión de las cuencas. Debido a estos datos, podemos afirmar que los resultados correspondientes a la historia geológica no coinciden con las tasas de transportes actuales. Además, debemos añadir que los estudios realizados por Restrepo et al., (2015), contienen solo la tasa de transportes de sedimentos en suspensión. La relación entre los sedimentos en suspensión y los sedimentos de carga en un río varía según diferentes factores, sin embargo, se generaliza que los sedimentos de carga de un río son mayores que los sedimentos en suspensión. Al incluir estos sedimentos de carga, el periodo de tiempo disminuiría aún más. Por esto, la incompatibilidad entre los datos geológicos y las tasas actuales de transporte, al menos las medidas por Restrepo (2015) se harían aún

mayores.

A pesar de no coincidir los datos, debemos aclarar que estos resultados son apenas una primera aproximación a la historia geológica de la Sierra Nevada de Santa Marta y que hay muchos factores que no se tuvieron en cuenta al realizar este estudio tales como: la meteorización física y química de las rocas previas a la erosión, entre otros. Estos procesos generan una disminución en los valores de sedimentos de suspensión si consideramos que se convierten en iones o si, al cambiar a otro mineral como por ejemplo arcilloso, se convierte en sedimento de carga y deja de tenerse en cuenta en los cálculos de sedimentos en suspensión. Para mejorar estos resultados y lograr una mejor aproximación, no solo se debe tener estos factores anteriormente mencionados incluidos en los cálculos de volumen erosionado, sino que se debe conocer las tasas de erosión de otros ríos que cubran otras caras del macizo con condiciones climáticas, de pluviosidad y de cobertura vegetal diferentes. A esto podría agregarle las tasas de transporte de sedimentos tanto de carga como de suspensión, para asegurar que se está abarcando un gran porcentaje de los procesos sedimentológicos que existen en la cuenca y lograr llegar a una extrapolación lineal más acertada sobre estos cálculos. Además, los datos de erosión y transporte deben tenerse como un aproximado a lo que sucedió a lo largo de la historia geológica de la Sierra Nevada y no datos que sigan los comportamientos actuales ya que no se acoplan al modelo evolutivo que estoy trabajando por lo que seguirían siendo incompatibles entre sí.

5. CONCLUSIONES.

En conclusión, la Sierra Nevada de Santa Marta ha tenido una historia evolutiva que la ha llevado a sobresalir como macizo rocoso no solo por su sobresaliente topografía sino las causas de esta. Los movimientos dextrales y sinestrales en la corteza y su geomorfología afectada por la colisión ocurrida en el Paleoceno, el cual provocó el basculamiento del macizo rocoso con un buzamiento de 16° en dirección S45°E, nos deja entrever un proceso evolutivo complejo. En esta evolución, las cuencas hídricas se vieron afectadas por cambios abruptos que modificaron los procesos erosivos y sedimentológicos de las cuencas hidrográficas. Los resultados obtenidos en las diferentes técnicas, donde la edad correspondiente para el volumen mínimo erosionado es de 0,07 Ma, la correspondiente al volumen intermedio erosionado es de 0,27 Ma y el resultado para el volumen máximo erosionado es de 1,2 Ma, muestran el comportamiento de la Sierra Nevada de Santa Marta si se comportara igual que el río Palomino, extrapolando linealmente el área de la Sierra con el valor de tasas de sedimentos en suspensión. Sin embargo, al ser datos muy pequeños y que no coinciden con la evolución geológica que data de procesos ocurridos en el Paleoceno como la colisión intraplaca, se puede determinar que aún realizando la extrapolación lineal y conversión de proporcionalidad, los datos geológicos presentes durante la historia geológica en la Sierra Nevada de Santa Marta no coinciden con los datos actuales de transporte de sedimentos en suspensión. Sin embargo, cabe aclarar que estos resultados son una primera aproximación a la historia evolutiva de la Sierra Nevada y que necesitaría conocer más datos geológicos sobre los procesos erosivos y sedimentológicos de la misma. Además, estos datos no deben ser actuales sino que deben simular lo ocurrido

a lo largo de la historia geológica para así manejar datos compatibles entre sí y lograr una mejor aproximación a los periodos erosivos de este Macizo rocoso.

REFERENCIAS

Adams, B., Whipple, K., Hodges, K., Heimsath, A., 2016. In situ development of high-elevation, low-relief landscapes via duplex deformation in the Eastern Himalayan hinterland, Bhutan. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface* 121, 294–319

Arias, A., and C. J. Morales (1999), Mapa Geológico Generalizado del Departamento del Cesar. Memoria explicativa, 89 pp., Min. de Minas y Energía., Ingeominas, Bogotá

Avouac, J.-P., and Burov, E.B., 1996, Erosion as a driving mechanism of intracontinental mountain growth: *Journal of Geophysical Research*, v. 101, p. 17 747–17 769.

Babiński, Z. (2005). The relationship between suspended and bed load transport in river channels. W: *Sediment Budgets 1*. IAHS Publ.

Bayona, Germán & Montes, Camilo & Cardona, Agustin & Jaramillo, Carlos & Ojeda, Gina & Valencia, Victor & Ayala-Calvo, Carolina. (2010). Intraplate subsidence and basin filling adjacent to an oceanic arc-continent collision: a case from the southern Caribbean-South America plate margin. *Basin Research*. 23. 403 - 422. 10.1111/j.1365-2117.2010.00495.x.

Beaumont, C., Fulsack, P., and Hamilton, J., 1991, Erosional control of active compressional orogens, in McClay, K.R., ed., *Thrust tectonics*: New York, Chapman and Hall, p. 1–18.

Burke, K. (1988), Tectonic evolution of the Caribbean, *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 16, 201 – 230,
doi:10.1146/annurev.ea.16.050188.0012

Case, J. E., E. W. MacDonald, and P. J. Fox (1990), Caribbean crustal provinces; Seismic and gravity evidence, in *The Geology of North America.*, vol H., The Caribbean Region, edited by G. Dengo and J. E. Case, pp. 15–36, Geol. Soc. of Am., Boulder, Colo.

Clift, P. D., Hodges, K., Heslop, D., Hannigan, R., Van Long, H., & Calves, G. (2008). Correlation of Himalayan exhumation rates and Asian monsoon intensity. *Nature Geoscience*, 1(12), 875-880. <https://doi.org/10.1038/ngeo351>

C, M., Robert, D., & Jr.b, H. (2005).

Tectonic reconstruction of the northern andean blocks: Oblique. Bogota .

Hoke, Gregory & Isacks, Bryan & Jordan, Teresa & Blanco, Nicolás & Tomlinson, Andrew & Ramezani, Jahandar. (2007). Geomorphic evidence for post-10 Ma uplift of the western flank of the Central Andes 18°30'-22°S. *Tectonics*. 26. 10.1029/2006TC002082.

IGAC, Instituto Geográfico Agustín Codazzi (2017) Información integrada de cartografía escala 1:25000. Disponible en <https://geoportal.igac.gov.co/contenido/datos-abiertos-cartografia-y-geografia> (Accedido Jan 10,2020)

Kellogg, J., and W. Bonini (1982), Subduction of the Caribbean Plate and basement uplifts in the overriding South American Plate, *Tectonics*, 1, 251–276, doi:10.1029/TC001i003p00251

Montes, Camilo & Guzman, Georgina & Bayona, Germán & Cardona, Agustin & Valencia, Victor & Jaramillo, Carlos & Marta, Santa & Perija, Cerrejon & San, Plato & Geochronology, Jorge. (2010). Clockwise Rotation of the Santa Marta Massif and Simultaneous Paleogene to Neogene Deformation of the Plato-San Jorge and Cesar-Ranchería Basins. *Journal of South American Earth Sciences - J S AMER EARTH SCI*. 29. 10.1016/j.jsames.2009.07.010.

Montes, C., Guzmán, G., Bayona, G., Cardona, A., Valencia, V., Jaramillo, C. 2010. Clockwise rotation of the Santa Marta massif and simultaneous Paleogene to Neogene deformation of the Plato-San Jorge and Cesar-Rancheria basins. *Journal of South American Earth Sciences*. 29: 832- 848.

RESTREPO-LOPEZ, Juan Camilo; ORTIZ-ROYERO, Juan Carlos; OTERO-DIAZ, Luis and OSPINO-ORTIZ, Silvio Raúl. Transporte de sedimentos en suspensión en los principales ríos del Caribe colombiano: magnitud, tendencias y variabilidad. *Rev. acad. colomb. cienc. exact. fis. nat.* [online]. 2015, vol.39, n.153 [cited 2020-03-09],

Rosenkranz, Ruben & Schildgen, Taylor & Wittmann, H. & Spiegel, Cornelia. (2018). Coupling erosion and topographic development in the rainiest place on Earth: Reconstructing the Shillong Plateau uplift history with in-situ cosmogenic ¹⁰Be. *Earth and Planetary Science Letters*. 483. 39-51. 10.1016/j.epsl.2017.11.047.

Rowley, D.B., Garzzone, C.N., 2007. Stable isotope-based paleoaltimetry. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* 35, 463–508.

Tschanz, C. M., R. F. Marvin, J. Cruz B, H. H. Mehnert, and G. T. Cebula (1974),

Geologic evolution of the Sierra Nevada de Santa Marta, northeastern Colombia, *Geol. Soc. Am. Bull.*, 85(2), 273–284, doi:10.1130/0016-7606(1974)85<273:GEOTSN>2.0.CO;2

TSCHANZ, C. M.; MARVIN, R. F.; CRUZ B. Geology of the Sierra Nevada de Santa Marta (Colombia) - Informe 1829. INGEOMINAS, Bogotá. 1969.

U.S. Geological Survey, 2012, Earth Explorer: U.S. Geological Survey database available online at <https://earthexplorer.usgs.gov/> (Accessed Jan 10, 2020)

Villagómez Díaz, Diego & Spikings, Richard. (2014). Villagómez & Spikings 2013 Thermochronology and tectonics of the Central and Western Cordilleras of Colombia- Early Cretaceous–Tertiary evolution of the Northern Andes

Villagómez, D., R. Spikings, A. Mora, G. Guzmán, G. Ojeda, E. Cortés, and R. van der Lelij (2011), Vertical tectonics at a continental crust-oceanic plateau plate boundary zone: Fission track thermochronology of the Sierra Nevada de Santa Marta, Colombia, *Tectonics*, 30, TC4004, doi:10.1029/2010TC002835.

ANEXOS.

X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
-74	11	0	-73	11	253	-74	11	1786
-74	11	0	-74	11	254	-74	11	1844
-74	11	0	-73	11	258	-74	11	1857
-74	11	0	-74	11	258	-74	11	1956
-74	11	0	-74	10	267	-73	11	1966
-73	11	0	-73	11	269	-74	11	2123
-74	11	0	-73	11	274	-74	11	2207
-74	11	0	-74	11	279	-74	11	2288
-74	11	13	-74	10	297	-74	11	2349
-74	11	16	-74	10	303	-73	11	2647
-74	11	20	-74	11	314	-74	11	2656
-73	11	32	-74	11	314	-74	11	2804
-74	11	52	-74	11	321	-74	11	2902
-74	11	53	-73	11	353	-73	11	3010
-74	10	65	-73	11	463	-74	11	3134
-74	10	76	-73	11	464	-74	11	3333
-73	10	88	-74	10	473	-73	11	3388
-73	10	90	-74	11	481	-74	11	3455
-74	10	99	-74	11	513	-74	11	3531
-74	10	101	-74	10	530	-74	11	3689
-74	10	110	-74	11	556	-74	11	3768
-74	10	111	-73	11	617	-74	11	3792
-74	10	117	-74	11	710	-74	11	3802
-74	10	119	-74	11	801	-74	11	3936
-73	11	129	-74	11	878	-74	11	4047
-74	10	133	-73	11	914	-74	11	4213
-73	10	134	-74	10	944	-74	11	4226
-74	10	136	-74	10	958	-74	11	4287
-74	10	138	-73	11	978	-74	11	4300
-74	11	152	-73	11	991	-74	11	4357
-73	10	160	-74	10	1016	-74	11	4520
-74	10	163	-74	10	1069	-74	11	4828

Tabla 1. Puntos utilizados para el método de la envolvente con sus respectivas coordenadas.

RESULTADOS			
Unidades	Surface Volume	Envolvente	Capa a 16° S 45° E
km3	72.891	18.234	351.952
t	204.094.800.000	51.055.200.000	901.468.400.000
Densidad en rocas cuarzo-feldespáticas t/km3	2.800.000		
t/Ma TSS río Palomino	47.450.000		
Periodo de erosión (Ma)	4	1,1	19
Área río Palomino (km2)	680		
Área Sierra Nevada de Santa Marta (km2)	9673		
TSS río Palomino extrapolado al área de la SNSM (t/Ma)	674.976.000.000		
Período erosión TSS extrapolado (Ma)	0,33	0,08	1,33

Tabla 2. Resultados obtenidos de los diferentes métodos empleados para calcular el volumen mínimo erosionado.