Detección remota para el análisis de degradación del suelo por erosión en La Tatacoa, Colombia

Cristhian Mateo Sánchez Ospina

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ciencias

Medellín, Colombia

Año 2024

Detección remota para el análisis de degradación del suelo por erosión en La Tatacoa, Colombia

Cristhian Mateo Sánchez Ospina

Magister en Ciencias – Geomorfología y suelos

Directora Susana Salazar Jaramillo

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ciencias

Medellín, Colombia

Año 2024

A mis gatos: Galileo Galilei y Thomas Alva Edison.

Agradecimientos

Agradezco profundamente a los profesores Kenneth Roy Cabrera y Luis Alberto Arias por enseñarme a identificar márgenes erosivos a partir de los atributos morfométricos del relieve, a Ramiro Ramírez por la conceptualización de desertificación y compactación del suelo, y a Andrés Ochoa por su valioso conocimiento en hidrología y geoestadística que permitió culminar esta investigación con la mayor rigurosidad del caso.

A la empresa Neoil Energy, a Rubén Arismendy, y Chajid Kairuz, por la asesoría en sensores remotos.

A mi pareja, Valentina, por su apoyo emocional.

A mis padres que creyeron siempre en mí y en mi potencial.

A Dios.

Muchas gracias.

.

Resumen

Este proyecto de tesis analiza la erosión del suelo en La Tatacoa, un bosque seco tropical en un ambiente semiárido, utilizando técnicas de teledetección y análisis estadístico. En el Capítulo 1, se procesaron imágenes satelitales del Sentinel-1 y Sentinel-2 para cuantificar la erosión y determinar las áreas más afectadas entre 2018 y 2023 con la técnica *Small Baseline Subset InSAR* (SBAS InSAR). Los resultados indican que las zonas con mayor pendiente y relieve disectado son las más erosionadas, debido a la pérdida de cobertura vegetal, lo que acelera la desertificación. En el Capítulo 2, se correlacionaron los datos de desplazamiento del suelo con los datos de precipitación mensual y semanal del IDEAM, revelando un desfase de 3 a 4 meses entre las lluvias intensas de los meses de octubre y noviembre, y los procesos erosivos. Además, se hipotetizó mediante estadística descriptiva que estos aumentos en la erosión podrían estar influenciados por el fenómeno de La Niña, especialmente entre el 2020 y 2022. La investigación propone el uso de teledetección y análisis temporal como una herramienta clave para gestionar la erosión, prevenir la desertificación y desarrollar estrategias de conservación en La Tatacoa.

Palabras claves: erosión del suelo, teledetección, desertificación, precipitación.

Remote sensing for the analysis of soil degradation due to erosion in La Tatacoa, Colombia

Abstract

This thesis project analyzes soil erosion in La Tatacoa, a dry tropical forest in a semi-arid environment, using remote sensing techniques and statistical analysis. In Chapter 1, Sentinel-1 and Sentinel-2 satellite images were processed to quantify erosion and identify the most affected areas between 2018 and 2023 using the *Small Baseline Subset InSAR* (SBAS InSAR) method. The results indicate that areas with steeper slopes and dissected relief are the most eroded due to vegetation cover loss, which accelerates desertification. In Chapter 2, soil displacement data were correlated with monthly and weekly precipitation data from IDEAM, revealing a 3 to 4-month lag between intense rainfall of of the months of October and November, and erosive processes. Additionally, through descriptive statistics,

it was hypothesized that these increases in erosion may be influenced by the La Niña phenomenon, particularly between 2020 and 2022. The research proposes the use of remote sensing and temporal analysis as a key tool to manage erosion, prevent desertification, and develop conservation strategies in La Tatacoa.

Keywords: soil erosion, remote sensing, desertification, precipitation

Introducción

La importancia del monitoreo de la erosión en ecosistemas vulnerables como el bosque seco tropical de La Tatacoa es crucial para comprender y mitigar los procesos de desertificación que amenazan la sostenibilidad del suelo. En regiones semiáridas, los patrones de precipitación bimodal que contrastan entre estaciones secas y húmedas, junto a una escasa cobertura vegetal, generan condiciones propicias para la erosión hídrica. Esto acelera el desplazamiento vertical del suelo y compromete la capacidad del terreno para retener agua y nutrientes, favoreciendo la desertificación. La desertificación es un proceso progresivo que implica la degradación de la tierra a largo plazo, lo que resulta en la pérdida de productividad del suelo, la alteración del ciclo hidrológico y, finalmente, la incapacidad del ecosistema para sostener tanto la biodiversidad como las actividades humanas.

En este sentido, herramientas avanzadas como la teledetección proporcionan datos sobre el desplazamiento del suelo en el tiempo, permitiendo identificar áreas críticas donde los procesos de erosión son más severos y pueden empeorar. Esto es particularmente relevante en ambientes semiáridos ya que la intensidad de las lluvias estacionales con un patrón bimodal en esta región, pueden tener efectos retardados en la erosión, exacerbando la degradación meses después de los eventos de precipitación.

Al correlacionar datos de desplazamiento del suelo obtenidos con la técnica Small Baseline Subset InSAR (SBAS InSAR), con el análisis de precipitaciones medias mensuales y semanales del IDEAM, a través de correlogramas cruzados, fue posible observar una correlación positiva entre la lluvia y la erosión con un retraso de 3 a 4 meses solo para la lluvia de los meses octubre y noviembre. En contraste, el análisis de la estadística descriptiva no muestra una correlación entre la precipitación semanal y el desplazamiento

del suelo. No obstante, se evidenció un pico de erosión en el 2021, que coincide con el fenómeno de La Niña, lo que sugiere una posible influencia de este evento climático.

Se hipotetizó que la erosión intensa entre 2020 y 2022 está ligada a procesos acumulativos, especialmente durante La Niña. Por lo que invita a pensar, que la acumulación de precipitaciones, más que eventos extremos aislados, es el factor principal en el aumento del desplazamiento, destacando la influencia a largo plazo del agua acumulada en la erosión.

Metodología

La metodología aplicada en el Capítulo 1 se centró en el uso de métodos de teledetección para medir el desplazamiento vertical del suelo (*i.e.,* erosión) y delimitar áreas degradadas por dichos procesos en La Tatacoa, utilizando datos de radar Sentinel-1 e imágenes multiespectrales del Sentinel-2, entre 2018 y 2023, como también la técnica *Small Baseline Subset InSAR* (SBAS InSAR). Esto permitió no solo analizar series temporales de interferogramas y cuantificar las tasas de erosión del suelo, sino también delimitar las áreas más afectadas. Las tasas de erosión se calcularon en las geoformas donde estos procesos morfodinámicos predominan, para los cuál, se utilizó el modelo de elevación digital (DEM) ALOS PALSAR. En el Capítulo 2, se emplearon datos pluviométricos mensuales de ocho estaciones meteorológicas del IDEAM para correlacionar los patrones de precipitación con el desplazamiento del suelo, utilizando correlogramas cruzados. Estos permitieron identificar la relación temporal entre las lluvias y la erosión, aplicando diferentes *lags* (retrasos) para estudiar el retardo entre los eventos de precipitación y el desplazamiento del suelo. En el siguiente esquema se resume la metodología general aplicada en la investigación (Figura 1).

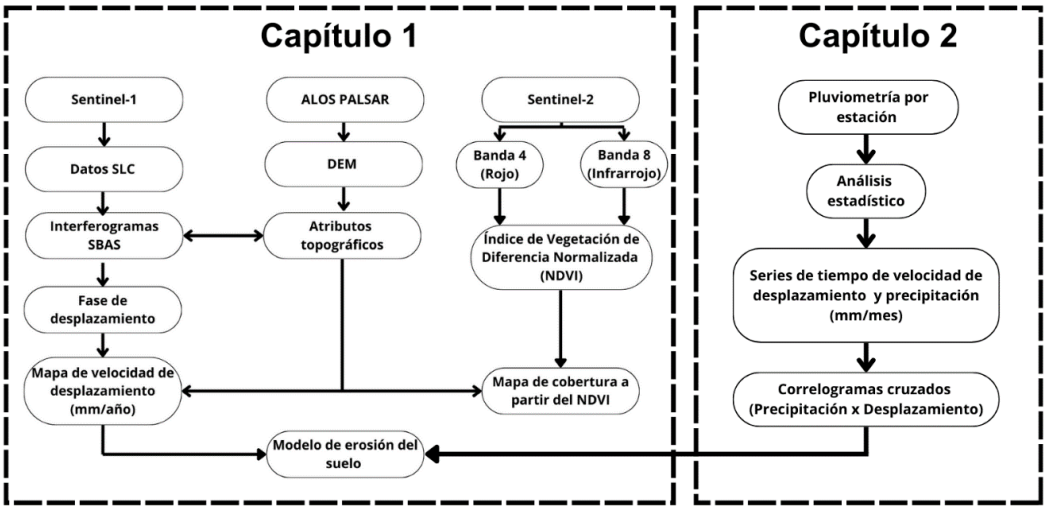


Figura 1. Resumen esquemático de la metodología usada en los capítulos 1 y 2 para la investigación.

Tabla de contenido

CAPÍTULO 1 ..... *1*

Análisis del desplazamiento del suelo por erosión hídrica mediante la técnica SBAS InSAR e imágenes multiespectrales, en La Tatacoa, Colombia **1**

Resumen 1
Abstract 2

2. Introducción **3**

3. Geología del área de estudio **4**

3.1 Ambiente tectónico 5
3.2 Geomorfología 7
3.3 Dinámica fluvial 8

4. Metodología **10**

4.1 Mapa de cobertura terrestre y delimitación de suelos erosionados 10
4.2 Correlación entre desplazamiento vertical y la geomorfología 11
4.3 Modelo de interferometría (InSAR) y desplazamiento vertical 12
4.4 Organización de los productos geoespaciales en un repositorio 15
4.5 Procesamiento geoespacial 16

5. Resultados y discusión **24**

5.1 Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) 24
5.2 Clasificación de la erosión del suelo según NDVI 25
5.3 Análisis de los atributos topográficos 26
5.4 Análisis del desplazamiento vertical del suelo 30

6. Conclusiones **35**

CAPÍTULO 2 ..... *37*

Relación entre la erosión hídrica y la precipitación en La Tatacoa mediante correlogramas cruzados y estadísica descriptiva **37**

Resumen 37
Abstract 38

2. Introducción **39**

3. Métodos **41**

3.1 Obtención y preparación de los datos 41
3.2 Indicadores estadísticos 42
3.3 Correlación entre precipitación y desplazamiento vertical 43
3.4 Estadística descriptiva y procesos acumulados 43

4. Resultados y discusión **44**

4.1 Patrones de precipitación 44
4.2 Correlogramas cruzados de precipitación y desplazamiento vertical 47
4.3 Estadística descriptiva 49
4.4 Precipitación y desplazamiento acumulado 53

5. Conclusiones **56**

Referencias bibliográficas *58*

Anexos *67*

Anexo 1 ..... **67**

Lista de figuras

Figura 1. Resumen esquemático de la metodología usada en los capítulos 1 y 2 para la investigación. ..... *VIII*

Figura 2. Mapa de ubicación del área de interés dentro del bosque seco tropical La Tatacoa *5*

Figura 3. Principales cauces y distribución hidrográfica del bosque seco tropical La Tatacoa *9*

Figura 4. Flujo de trabajo para la extracción del NDVI *11*

Figura 5. Esquema de los parámetros que envuelven dos tomas de señal de radar (t_1 y t_2). *13*

Figura 6. Resumen de los productos geoespaciales derivados del procesamiento de imágenes satelitales. *16*

Figura 7. Gráfica de línea base *19*

Figura 8. Flujo de trabajo para el procesamiento de los interferogramas. ... *20*

Figura 9. Mapa de índice de coherencia, valores por pixel para La Tatacoa. *21*

Figura 10. Mapa del NDVI de La Tatacoa. *24*

Figura 11. Mapa de cobertura a partir del NDVI. *25*

Figura 12. Relieve del foco SW. *27*

Figura 13. Relieve del foco N. *27*

Figura 14. Relieve del foco SE *28*

Figura 15. Mapas de pendientes de La Tatacoa. *29*

Figura 16. Mapa de velocidad de desplazamiento vertical de la subárea A.. *31*

Figura 17. Puntos POI y POIΘ, en cercanía a la quebrada Balsillas. *32*

Figura 18. Serie temporal de desplazamiento del suelo para la subárea A entre los años 2018 y 2023. ..... *33*

Figura 19. Mapa de velocidad de desplazamiento de la subárea B. *33*

Figura 20. Serie temporal de desplazamiento del suelo para la subárea B entre los años 2018 y 2023. ..... *34*

Figura 21. Mapa de ubicación de las estaciones pluviométricas y el POI de margen erosivo *45*

Figura 22. Gráficas de estaciones pluviométricas, las barras representan la precipitación (eje vertical) dada su distribución mensual (eje horizontal).. . 46

Figura 23. Correlogramas cruzados para cada estación pluviométrica..... 48

Figura 24. Gráficas de precipitación total y desplazamiento acumulado por estación pluviométrica.. 51

Figura 25. Gráficas de desplazamiento semanal diferenciado..... 53

Figura 26. Gráficas de precipitación y desplazamiento acumulado. 56

Lista de tablas

Tabla 1. Atributos morfométricos y su relación con la geomorfología en La Tatacoa..... 11

Tabla 2. Estaciones meterológicas dentro del perímetro del bosque seco tropical de La Tatacoa. 41

CAPÍTULO 1

Análisis del desplazamiento del suelo por erosión hídrica mediante la técnica SBAS InSAR e imágenes multiespectrales, en La Tatacoa, Colombia

Resumen

En La Tatacoa, a pesar de la predominancia de los procesos erosivos, no existen estudios recientes que cuantifiquen las tasas de erosión o, en otras palabras, el desplazamiento vertical del suelo. En el presente estudio se propone un análisis de la erosión hídrica en La Tatacoa mediante la técnica *Small Baseline Subset InSAR* (SBAS InSAR), e imágenes multiespectrales. Por un lado, la técnica SBAS InSAR se basó en interferometría diferencial y análisis de series temporales mediante datos obtenidos del Sentinel-1, mientras que las imágenes multiespectrales del Sentinel-2 fueron útiles para delimitar las áreas de suelo erosionado. Mediante el procesamiento geoespacial, se midió la velocidad de desplazamiento (mm/año) y el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), lo que permitió cuantificar con precisión la erosión y diferenciar la cobertura del terreno en el área de interés. Con el propósito de otorgar un sentido geomorfológico, se definieron atributos morfométricos derivados del modelo de elevación digital ALOS PALSAR, como la altura relativa y el ángulo de mayor inclinación. A partir del mapa de velocidad de desplazamiento vertical, se evidenció que el promedio de erosión está en un umbral de 0.43 y 0.54 mm/año, particularmente en zonas con relieve disectado y pendientes entre 9 y 20 grados. Asimismo, se observó que, específicamente en puntos estratégicos con régimen erosivo el desplazamiento se aceleró entre 2021 y 2022, alcanzando valores de 30 mm/año. Estos resultados sugieren un aumento en los procesos de degradación del suelo en los últimos años. Aunque El Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA) no específica los rangos aceptables de pérdida según el tipo de suelo, sugiere que este no debe superar 5 toneladas/hectárea/año (0.93 mm/año) para suelos agrícolas, por lo que se deduce que, en las condiciones climáticas de La Tatacoa, los suelos deben

conservarse sin cultivo y con vegetación forestal. La metodología propuesta en este estudio permite concluir que la combinación de la técnica SBAS InSAR, junto con el análisis de cobertura vegetal y los atributos morfométricos, es muy precisa para cuantificar y monitorear los cambios de desplazamiento vertical (erosión) del suelo en un ambiente semi-árido a lo largo del tiempo.

Palabras clave

Erosión hídrica, SBAS InSAR, desplazamiento del suelo, atributos morfométricos.

Abstract

In La Tatacoa, despite the predominance of erosive processes, there are no recent studies that quantify erosion rates or, in other words, vertical soil displacement. This study proposes an analysis of water erosion in La Tatacoa using the Small Baseline Subset InSAR (SBAS InSAR) technique and multispectral imagery. On one hand, the SBAS InSAR technique relied on differential interferometry and time-series analysis using data obtained from Sentinel-1, while the multispectral images from Sentinel-2 proved useful for delineating eroded soil areas. Through geospatial processing, displacement velocity (mm/year) and the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) were measured, allowing precise quantification of erosion and differentiation of land cover in the area of interest. To provide a geomorphological context, morphometric attributes derived from the ALOS PALSAR digital elevation model were defined, including relative height and maximum slope angle. Based on the vertical displacement velocity map, it was found that the average erosion rate falls within a threshold of 0.43 to 0.54 mm/year, particularly in areas with dissected relief and slopes ranging from 9 to 20 degrees. Additionally, it was observed that in specific strategic points with an erosive regime, displacement accelerated between 2021 and 2022, reaching values of 30 mm/year. These results suggest an increase in soil degradation processes in recent years. Although the United States Department of Agriculture (USDA) does not specify acceptable loss ranges according to soil type, it suggests that soil loss should not exceed 5 tons/hectare/year (0.93 mm/year) for agricultural soils. Therefore, it is inferred that, under the climatic conditions of La Tatacoa, soils should be preserved without cultivation and with forest vegetation. The methodology proposed in this study leads to the conclusion that combining the SBAS InSAR technique with vegetation cover analysis and

morphometric attributes is highly accurate for quantifying and monitoring changes in vertical soil displacement (erosion) in a semi-arid environment over time.

Keywords

Water erosion, SBAS InSAR, soil displacement, morphometric attributes.

2. Introducción

El bosque seco tropical de La Tatacoa, es un ecosistema de clima altamente estacional (la temperatura media anual oscila entre 27 y 28 ºC, la precipitación media anual es de 1169 mm, y el potencial de evapotranspiración media anual es de 1524 mm; Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia IDEAM, 2015). Debido a la lluvia estacional de alta intensidad y las estaciones secas prolongadas (~3 meses consecutivos), este bioma muestra una degradación del suelo acelerada por la erosión hídrica, que está llevando a la desertificación. Mientras que entre los meses de junio y septiembre (primera estación seca) las precipitaciones no superan los 50 mm, entre los meses de diciembre y febrero (segunda estación seca) las precipitaciones llegan hasta los 100 mm. Esta vulnerabilidad a la erosión se refleja en la geomorfología, caracterizada por arroyos y cárcavas, que se convierten en canales de inundaciones durante la temporada de lluvias (Hermelin, 2015).

Situada al noreste de Villavieja, en el Valle Superior del Magdalena (Figura 2), La Tatacoa cuenta con un clima seco y una vegetación adaptada a la baja humedad (Poveda-Coronel *et al*., 2018; Figueroa y Galeano, 2007). En esta región, donde el ciclo hidrológico actúa en un entorno semiárido, de escasa vegetación, y de suelos secos y compactados, la lluvia contribuye directamente al aumento de la erosión del suelo, lo que puede llevar a su rápida degradación (*e.g.,* Pereira *et al.*, 2022).

Siendo los ecosistemas de bosque seco tropical una preocupación frente al cambio climático, el caso de La Tatacoa se suma a una problemática creciente de degradación del suelo en áreas de conservación y bosques de Colombia (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2021). Por consiguiente, la aplicación de métodos de teledetección para cuantificar la erosión y su relación con la desertificación es clave para desarrollar estrategias de conservación y manejo sostenible de los recursos naturales de nuestro país (Rojas-Marín *et al*., 2018; Ortiz-Palma y Mayor-Polania, 2013).

El objetivo principal de este trabajo es proponer una metodología para cuantificar la erosión y monitorearla a lo largo del tiempo. Esto se realiza utilizando la información obtenida de Sentinel-1 y los productos multiespectrales de Sentinel-2 (Sánchez-Ospina y Salazar-Jaramillo, 2024). Se generaron mapas de velocidad de desplazamiento (*i.e.*, SBAS-InSAR) y cobertura vegetal (*i.e.*, NDVI) que, junto con el análisis morfométrico, permitió detectar focos de erosión y depositación. De esta manera, pudo hacerse un análisis temporal de la erosión en cárcavas y perfiles de erosión, donde se encontró que la erosión se da a una tasa de 30 mm/año específicamente para estos regímenes, los cuales son valores muy altos de pérdida de suelo y superan el umbral establecido por la USDA para cualquier uso que no sea conservación (Shojaeezadeh *et al.*, 2024). Los resultados proporcionan una visión regional de las áreas más afectadas por erosión y permiten proyectar cómo puede aumentar la desertificación en esta región. Además, establece de forma cuantitativa los límites tolerables para uso del suelo agrícola.

3. Geología del área de estudio

En el área de interés (Figura 2), ubicada en el Valle Superior del Magdalena, Colombia, afloran rocas del Grupo Honda, una secuencia sedimentaria que se extiende desde el Mioceno temprano hasta el Mioceno medio (Montes *et al.*, 2021). Este grupo está compuesto predominantemente por rocas de ambientes sedimentarios fluviales y lacustres, que incluyen conglomerados, arenitas, lutitas y paleosuelos intercalados (Fields, 1959; Wellman, 1970; Guerrero, 1997; Hermelin, 2015). El Grupo Honda, se compone de dos formaciones: La Victoria y Villavieja. La formación La Victoria consiste principalmente en areniscas, conglomerados y algunas lutitas y limolitas; su parte inferior fue depositada por ríos meándricos, que luego pasaron a ríos trenzados con mayor aporte de sedimentos debido al levantamiento tectónico (Villarroel, 1996; Guerrero, 1997). El conglomerado Cerbatana marca su límite superior. En contraste, los depósitos de llanura de inundación de la Formación Villavieja fueron el resultado de ríos meándricos de menores dimensiones, que fluyeron primero hacia el este y luego hacia el oeste (Guerrero, 1997). La Formación Villavieja se divide en dos miembros, Baraya y Cerro Colorado. Baraya (164 m de espesor) está compuesta por lutitas grises, con algunos paleosuelos de color rojo, intercalados con areniscas altamente fosilíferas (Guerrero, 1997). La estratificación cruzada y la estratificación épsilon también son características comunes de las areniscas subarcosicas

a arcósicas. En contraste, Cerro Colorado (414 m de espesor), menos fosilífera, está compuesta esencialmente por lutitas con paleosuelos de color rojo (Guerrero, 1997). El cambio en el patrón del canal (hacia ríos anastomosados) y la dirección del flujo (hacia el oeste), se atribuyen a las primeras etapas del levantamiento de la Cordillera Oriental (Guerrero, 1997). Las facies deposicionales de la Formación Villavieja se interpretaron como ríos de menor gradiente, mayor sinuosidad, ubicados durante una baja actividad tectónica y/o volcánica en el área de origen (Wellman, 1970).

Además, el Grupo Honda es famoso por su rico contenido de fósiles, especialmente restos de vertebrados, que proporcionan información valiosa sobre la fauna y los ecosistemas de los trópicos del Mioceno medio (Kay *et al*., 1997).

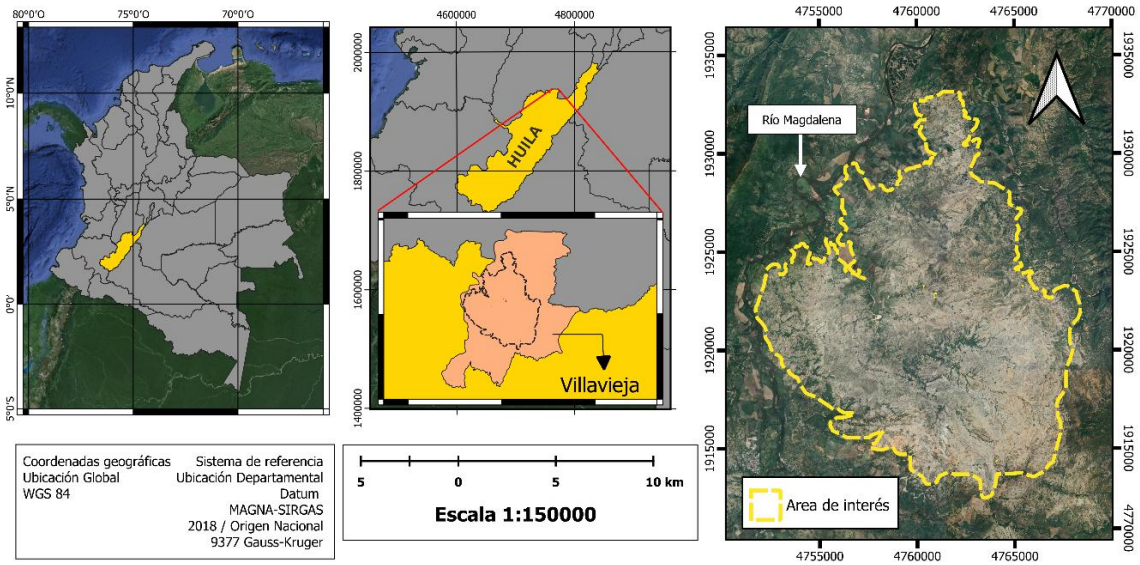


Figura 2. Mapa de ubicación del área de interés dentro del bosque seco tropical La Tatacoa.

3.1 Ambiente tectónico

La evolución tectónica de la Cuenca del Valle Superior del Magdalena (VSM) es un proceso geológico complejo que resulta de la interacción entre la tectónica, la sedimentación y la subsidencia (Mojica y Franco, 1990). Ubicada en la parte central de la Cordillera Oriental, entre las cordilleras Central y Oriental de los Andes Colombianos, la cuenca del VSM se formó durante el Jurásico tardío y el Cretácico temprano, principalmente a través de tectónica extensional asociada con la ruptura de Pangea (Duarte, 2018).

Inicialmente se consideró como una cuenca antepaís (Butler y Schamel, 1988; Cediel *et al.,* 2003), que, durante el Cretácico superior se caracterizó por un margen pasivo. Autores interpretan este margen, como el estiramiento de la corteza que condujo a fallas normales que, a su vez, crearon un espacio de acomodación en dirección sur-norte (Montes *et al.,* 2021).

La orogénesis andina posterior en el Cenozoico, particularmente durante los períodos Paleógeno-Neógeno, impuso un régimen compresivo en la cuenca (Sarmiento-Rojas *et al*., 2006; Mora *et al*., 2010). Este cambio de extensión a compresión condujo a una inversión estructural, donde las fallas normales anteriores se reactivaron como fallas inversas o de empuje (Sarmiento-Rojas, 2002; Mora *et al.*, 2013).

La cuenca se elevó progresivamente como parte del sistema de plegamiento y corrida andina más grande, pero el hundimiento local continuó en ciertas áreas debido a la flexión de la corteza y el fallamiento continuo (Anderson *et al*., 2016; Montes *et al*., 2021). Este hundimiento flexural fue crucial para mantener el espacio de acomodación a pesar del levantamiento más amplio de la región (Londoño *et al*., 2012; Caballero *et al*., 2013).

En contraste con un modelo de cuenca antepaís, otros autores definen el sistema como una cuenca de retro arco (Veloza *et al*., 2008). Esta hipótesis sugiere que, durante el Jurásico tardío y el Cretácico temprano, el VSM formaba parte de un sistema extensional de retro arco relacionado con la subducción de la Placa del Pacífico bajo el margen occidental de Sudamérica.

Mientras que el modelo de cuenca de antepaís explica gran parte de la sedimentación y la compresión tectónica posterior (Sarmiento-Rojas *et al*., 2006), la hipótesis de retro arco proporciona una explicación más completa para la fase extensional temprana y el papel de las dinámicas relacionadas con la subducción en la creación del espacio inicial de acomodación (Montes *et al.*, 2021).

El trabajo de Montes *et al*. (2021) sugiere que la cuenca del VSM experimentó una evolución tectónica compatible tanto con modelos de cuenca de retro arco como de cuenca antepaís, dependiendo del período geológico considerado. Este estudio destaca la evolución dual, enfatizando que, mientras las etapas iniciales de la formación del VSM están vinculadas a procesos de retro arco, la cuenca fue posteriormente influenciada por la tectónica andina, lo que llevó a sus características actuales.

Las complejas variaciones geológicas, estructurales y deposicionales en diferentes áreas del VSM llevaron a la definición de subcuencas, como la subcuenca Neiva, donde se encuentra La Tatacoa (Veloza *et al*., 2008). La división en subcuencas es particularmente útil para los estudios geomorfológicos (Dill *et al*., 2020) que se enfocan en los sistemas de drenaje que han influido en el relleno sedimentario de la cuenca y en su geomorfología.

Trabajos como el de Dill *et al* (2020), que se acogieron al modelo de cuenca retro arco, clasificaron tres accidentes geográficos (geoformas principales) dentro de la subcuenca Neiva. El bloque *hinterland*, que abarca las capas de la formación La Victoria: Cerrogordo y Cerbatana (*sec*. Guerrero, 1997). Las tierras malas o *badlands*, que abarca las capas: Tatacoa y Chunchullo de la formación La Victoria, y las capas de la Venta de la formación Villavieja (*sec.* Guerrero, 1997). Y finalmente el foreland, situado en cercanías al margen del río Magdalena, abarcando los depósitos cuaternarios aluviales de los ríos tributarios que descienden del sureste (referirse a la figura 2b de Dill *et al*., 2020).

3.2 Geomorfología

Según el Servicio Geológico Colombiano (2013) que realizó la cartografía 1:100000, indica que las geoformas que mayor cubrimiento tienen por área son geoformas tipo glacis de acumulación, lomeríos disectados y laderas erosivas. Dicha clasificación, tuvo en cuenta el ambiente morfodinámico actuales de meteorización, erosión, transporte y acumulación, el cual corresponde a un ambiente denudativo. Este ambiente se caracteriza por el desgaste físico del suelo causado por la erosión hídrica. Otros autores han visto un interés intrínseco en estos ambientes debido a que dichas geoformas y procesos denudacionales, son importantes fuentes de sedimentos para los ríos de zonas secas (Poesen *et al.*, 2003); aunque también pueden ser las principales manifestaciones de desertificación (Avni, 2005; Zucca *et al*., 2007; Goudie, 2013).

Según Dill *et al*. (2020), la evolución geomorfológica del 'Desierto' de la Tatacoa está impulsada principalmente por la actividad tectónica y los procesos de erosión. La región ha experimentado varias etapas de transformación del paisaje debido a fallas, inclinación y reorganización del drenaje. Inicialmente, el río Cabrera (Figura 3) y otros afluentes alimentaban la zona, pero más tarde, el levantamiento provocado por fallas, especialmente a lo largo de la Falla de Prado, bloqueó estos ríos, cortando las fuentes de agua y creando

un entorno aislado. La topografía de *badlands*, caracterizada por zonas prominentes de *wadi*, cárcavas y colinas denudadas, se formó debido a la intensa erosión, combinada con una alta evaporación y patrones de lluvia estacionales (referirse a la figura 4 de Dill *et al*., 2020).

A pesar de que La Tatacoa es comúnmente identificada como un 'Desierto', sus condiciones de lluvias y niveles de humedad corresponden a un ecosistema de bosque seco tropical según la clasificación de zonas de vida de Holdridge (Corporación Autónoma Regional del Alto Magdalena, 2015; Hermelin, 2016).

3.3 Dinámica fluvial

La dinámica fluvial desempeña un papel crucial en la evolución geomorfológica del La Tatacoa. Drenajes como el río Cabrera y el río Las Lajas aportaron una cantidad significativa de agua y sedimentos a la zona. Sin embargo, el levantamiento tectónico a lo largo de fallas, eventualmente bloqueó estos ríos (Dill *et al*., 2020).

Con el tiempo, quebradas como Chunchullo, Tres Pasos, Tatacoa y Los Hoyos contribuyeron a la denudación del “Desierto”, donde los flujos intermitentes de agua, combinados con las altas tasas de erosión y la erodabilidad del suelo, profundizaron y extendieron los canales de drenaje, esculpiendo el paisaje en su forma actual. Este tipo de entorno se define como *badlands* (Ortiz-Palma y Mayor-Polanía, 2013; Dill *et al*., 2020).

Estas incisiones están dadas por los diferentes cursos de los principales drenajes. Dentro del área de estudio, el río principal es el Magdalena que se encuentra al oeste con una dirección del cauce de 45º suroeste-noreste. Otros ríos y quebradas importantes, son Los Mangos, Balsillas, Portenzuelas, Cerbatana, La Venta, Cabrera, Tatacoa, Los Hoyos, Chunchullo, Totumo y Tres Pasos (Figura 3).

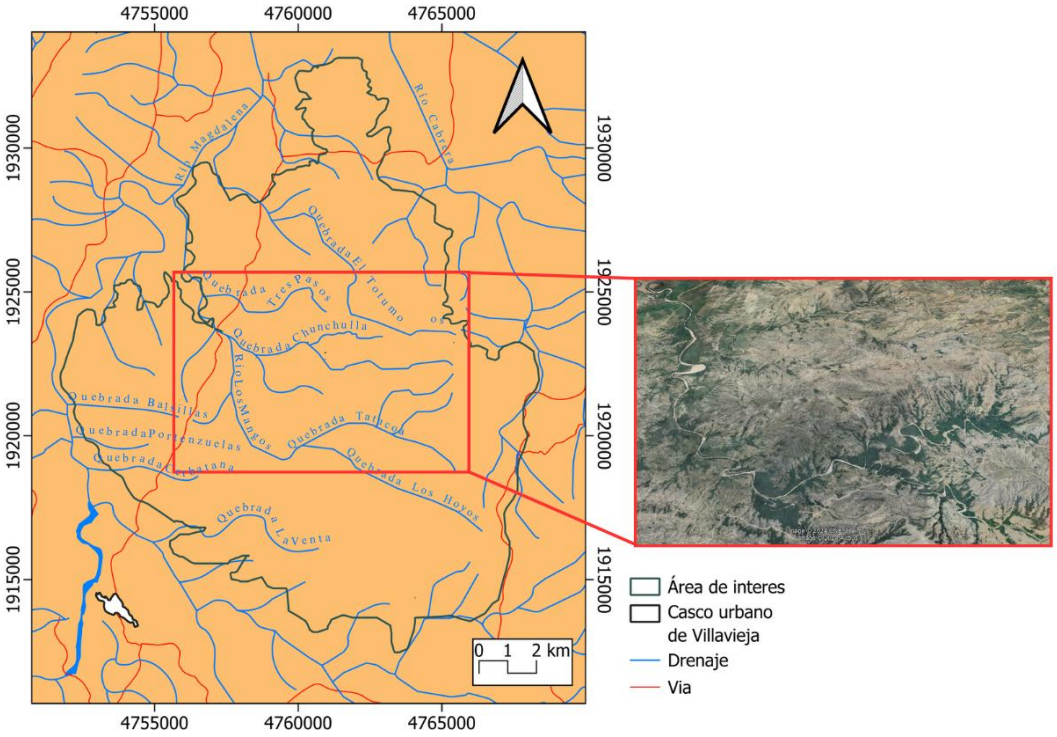


Figura 3. Principales cauces y distribución hidrográfica del bosque seco tropical La Tatacoa.

La red de drenaje, inicialmente con un patrón dendrítico delimitado por las quebradas Tres Pasos, Chunchullo y Los Mangos, muestra un cambio significativo hacia un patrón paralelo en la cuenca alta. Este cambio se refleja en el aumento de la densidad de drenaje, influenciado por la tendencia estructural de las capas del Grupo Honda, que se encuentran dispuestas de manera subhorizontal y con un buzamiento hacia el noroeste (Dill *et al*., 2020).

Un caso particular se observa en los cerros al suroeste del área de estudio (Figura 3), donde las quebradas Balsillas, Portenzuelas, Cerbatana y La Venta siguen el patrón de drenaje paralelo que desciende hacia el valle del río Magdalena, a aproximadamente 2 km de distancia.

En este punto las tierras malas y los cañones estrechos, están controlados fluvialmente por los procesos de erosión y transporte de material que ocurren a lo largo de la quebrada Tatacoa, la cual se origina en la zona geográfica alta y se desvía hacia el norte para confluir con el río Los Mangos. Estos procesos, típicos de un entorno fluvial en una región

semiárida, son los que determinan la morfodinámica del área (*e.g.*, Servicio Geológico Colombiano, 2013).

4. Metodología

El presente estudio investiga la erosión mediante el uso de sensores remotos y procesamiento de imágenes satelitales del Sentinel-1, y Sentinel-2. El análisis integró datos geoespaciales, modelos de elevación y técnicas de interferometría diferencia (*i.e.,* SBAS InSAR) para mapear, medir y comprender los procesos de erosión y desplazamiento del suelo en el área de estudio. Todo esto permitió obtener una visión dinámica del terreno mediante series de tiempo.

A continuación, se presenta la síntesis de cómo se hizo el análisis de erosión y desplazamiento del suelo.

4.1 Mapa de cobertura terrestre y delimitación de suelos erosionados

Para el mapeo de cobertura terrestre y la delimitación de suelos erosionados se emplearon imágenes multiespectrales del satélite Sentinel-2. El análisis se basó en la densidad y estado de la vegetación como indicadores clave (Bewket & Teferi, 2009; Sui *et al*., 2012; Roux *et al*., 2018). A través del cálculo del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), utilizando las bandas espectrales 4 (rojo) y 8 (infrarrojo cercano) del Sentinel-2, se identificó la salud y densidad de la vegetación, permitiendo distinguir las áreas con suelos degradados (Hrysiewicz *et al*., 2023). Esta cartografía enfocada en delimitar las áreas del suelo erosionado, se elaboró mediante el índice de diferencia de vegetación normalizada (NDVI) a partir de la siguiente ecuación.

$$NDVI = \frac{NIR-RED}{NIR+RED} \qquad (1)$$

En la ecuación (1), se observa la operación algebraica elaborada en el procesamiento de las imágenes multiespectrales, donde NIR corresponde a la banda del infrarrojo cercano y RED corresponde a la banda visible del rojo.

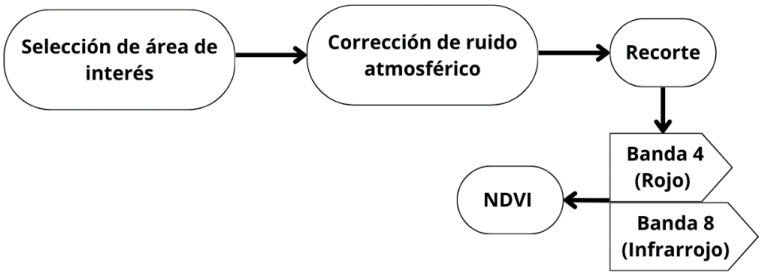


Figura 4. Flujo de trabajo para la extracción del NDVI.

Posterior a la corrección del ruido atmosférico y el recorte del área de interés (Figura 4), se determinó el valor resultante de NDVI que varía entre -1 y 1, donde los valores cercanos a 1 indican vegetación densa y saludable, mientras que los valores cercanos a 0 o negativos reflejan suelos desnudos o escasa cobertura vegetal (Bewket & Teferi, 2009).

4.2 Correlación entre desplazamiento vertical y la geomorfología

Se utilizaron datos topográficos del Modelo Digital de Elevación (DEM) ALOS-PALSAR para identificar zonas donde los procesos erosivos (*i.e.,* desplazamiento vertical) del suelo están activos, correlacionándolos con la geomorfología (Tabla 1). El análisis se centró en atributos morfométricos como la altura relativa y el ángulo de mayor inclinación de la pendiente, indicadores clave para la identificación de focos de erosión (Jiang *et al.*, 2021; Huggett, 2022). Por consiguiente, se delimitaron dichos focos en el área de interés donde predominan procesos erosivos. Los focos se denominaron Foco Norte (N), Foco Sureste (SE), Foco Suroeste (SW). Como resultado, se cartografió la geomorfología basada en las características morfométricas y procesos indicativos de erosión.

Tabla 1. Atributos morfométricos y su relación con la geomorfología en La Tatacoa

Altura relativa	Ángulo de mayor inclinación de la pendiente	Geomorfología asociada
66 a 33 m	34º a 20º pendientes escarpadas	Relieve Colinado
33 a 23 m	20º a 9º pendientes moderadas	Relieve disectado

23 a 0 m	9º a 0º pendientes suaves	Relieve plano y de colinas bajas

4.3 Modelo de interferometría (InSAR) y desplazamiento vertical

La interferometría de radar de apertura sintética (InSAR) se fundamenta en la captura de señales de radar en múltiples momentos y desde distintas posiciones, generando un modelo matemático basado en la fase de la señal registrada (Massonet y Feigl, 1998). Su formulación implica la combinación de varios conceptos en los que se distinguen los elementos geométricos y físicos que afectan a la señal de radar, permitiendo la construcción de interferogramas, que son el insumo principal para revelar la información topográfica y de desplazamiento de la superficie observada en el tiempo (Hanssen, 2001).

El modelo matemático de la interferometría SAR se basa en la diferencia de fase entre dos señales de radar capturadas en tiempos diferentes. Este modelo tiene en cuenta el movimiento relativo de la línea de señal (LOS) de los dispersores (SAR) con respecto a una ubicación de referencia en la imagen que es posible medirse como una fracción de la longitud de onda (Gabriel *et al.,* 1989). Esta fracción se le denomina fase interferométrica y es simbolizada con ϕ en la ecuación (2), se descompone en dos señales de retrodispersión (ψ_1 y ψ_2) para extraer la información sobre el desplazamiento vertical de la superficie en dos tiempos considerados (t_1 y t_2) (Figura 5).

$$\phi = \psi_1 - \psi_2 = -\frac{4\pi\,(R_1 - R_2)}{\lambda} = -\frac{4\pi\,\Delta R}{\lambda} \qquad (2)$$

En la ecuación (2) R_1 y R_2 son las distancias geométricas entre dos tomas de señal de radar (Figura 5), λ es la amplitud de la señal, esto equivale a la resta de las señales de retrodispersión (ψ_1 y ψ_2) que envuelven los parámetros mencionados para cada toma (Hanssen, 2001).

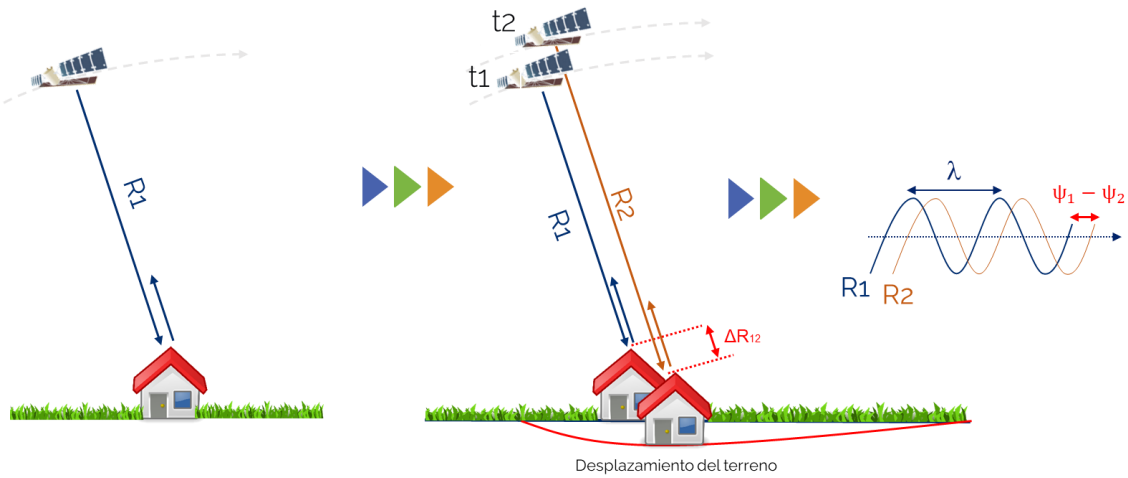


Figura 5. Esquema de los parámetros que envuelven dos tomas de señal de radar (t_1 y t_2).

De cada pixel resultante, la fase interferométrica se deriva parcialmente (ecuación 3) al momento de formarse el interferograma, en este punto se introduce matemáticamente al cambio de fase, el parámetro de ángulo de incidencia (θ):

$$\partial\phi = -\frac{4\pi}{\lambda} B \cos(\theta - \alpha)\, \partial\theta \qquad (3)$$

El cambio de fase y de ángulo de incidencia en la línea de señal (LOS), se puede definir como la diferencia entre la fase medida (desenvuelta) y la fase esperada para el cuerpo de referencia (ϑ) derivada de las distancias geométrica (Hanssen, 2001), por lo tanto, la siguiente ecuación (4) hace referencia a la fase sustraída.

$$\partial\phi = \phi_{def} - \vartheta \qquad (4)$$

Diversos modelos se han definido para vectorizar la fase de desplazamiento ($\partial\phi$) en el sentido de que se pueda expresar en notación de longitud. El modelo de Gauss-Markoff propuesto por Hanssen (2001), es el más común utilizado por su simplificación a matriz de diseño. En este contexto, los datos de fase detectados se representan como un vector estocástico real caracterizado por su primer y segundo momento. Tras un proceso de linealización, la relación entre las observaciones y los parámetros desconocidos se expresa mediante el modelo Gauss-Markoff (5).

$$y = Ax + \varepsilon \qquad (5)$$

Donde la variable *y*, es el vector de la línea de señal (LOS) observada, *A* representa la matriz de diseño (6) que relaciona las observaciones de fase con los parámetros, *x* es un vector de parámetro desconocido (*e.g.,* desplazamiento horizontal), y ε corresponde a los errores de observación (*e.g.,* ruido).

$$A = \left\{ \begin{bmatrix} \partial\phi_1 \\ \partial\phi_2 \\ \vdots \\ \partial\phi_n \end{bmatrix} \right\} = \begin{bmatrix} A_1 & \cdots & A_n \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ A_n & \cdots & A_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \vdots \\ X_n \end{bmatrix} \qquad (6)$$

Para realizar afirmaciones cuantitativas sobre la calidad de un producto interferométrico, es necesario analizar la cadena total desde la adquisición de datos, pasando por el procesamiento de los mismos hasta la interpretación, e identificar las fuentes de error en cada paso. Estas fuentes de error son adicionales a la fase interferométrica y se simbolizan en una ecuación general (7) de la siguiente manera.

$$\phi = \phi\text{deformación} + \phi\text{topo} + \phi\text{atmósfera} + \phi\text{ruido} \qquad (7)$$

La fase topográfica (ϕtopo), representa el error proveniente de la topografía, la fase atmosférica (ϕatmósfera) representa el error la contribución de la atmósfera en la señal de retrodispersión, y la fase de ruido (ϕruido) puede estar influenciada por la decorrelación temporal, geométrica y en algunos casos la alta cobertura vegetal (Massonet y Feigl, 1998). En el apartado de procesamiento geoespacial, se explica a detalle cómo se trabajaron estos errores, que derivan en la coherencia y la calidad de los productos interferométricos que se obtengan.

El modelo de interferometría (InSAR) permite construir un mapa de velocidad de desplazamiento mediante la técnica de SBAS, que genera una serie temporal del desplazamiento al operar interferogramas con pequeñas variaciones espaciales y temporales. Así, se obtiene una estimación precisa de los cambios acumulativos, especialmente útil en la observación de desplazamientos verticales, como los asociados a la erosión hídrica.

A través de la técnica de interferometría diferencial SBAS InSAR, se cartografió el desplazamiento con precisión milimétrica, asignando a cada píxel un valor en mm/año (Hrysiewicz *et al*., 2023; Kou *et al*., 2024). Para validar este modelo se utilizaron los datos referencia del trabajo de Kou *et al.* (2024), el cual trabaja la erosión hídrica en ecosistemas áridos y semiáridos a partir de la técnica SBAS InSAR. Esto permitió identificar un margen de error promedio de 21.51% a partir del rango de velocidad de desplazamiento expuesto en dicha investigación (26 a -23 mm/año) y el obtenido en los productos geoespaciales (Sánchez-Ospina y Salazar-Jaramillo, 2024) para la misma área (30.2 a -30.1 mm/año).

Para calcular este margen de error entre los dos rangos, se consideró el error relativo con respecto a los valores máximos y mínimos de velocidad de desplazamiento anual observados en cada caso (8).

$$Error\ máximo = \frac{|30.2 - 26|}{26} \times 100 \qquad (8)$$

$$Error\ mínimo = \frac{|-30.1 - (-23)|}{|23|} \times 100 \quad (8)$$

Posteriormente se calcularon los promedios de los errores máximos y mínimos para tener una idea general del margen de error entre los dos conjuntos de datos. Se obtuvo que para el valor máximo el error fue de 16.15%, y para el valor mínimo fue de 30.87%, entre estos dos se obtuvo un promedio de error de 23.51%.

4.4 Organización de los productos geoespaciales en un repositorio

Se organizó un repositorio en línea (Sánchez-Ospina y Salazar-Jaramillo, 2024) para centralizar todos los productos geoespaciales generados, con la intención de facilitar su acceso y análisis posterior. Este repositorio incluye imágenes satelitales, interferogramas, mapas de atributos topográficos, cobertura de suelo y velocidad de desplazamiento, como también la validación del modelo de interferometría (InSAR).

A continuación, se muestra un resumen de los productos geoespaciales derivados del procesamiento de imágenes satelitales utilizadas en la investigación (Figura 66).

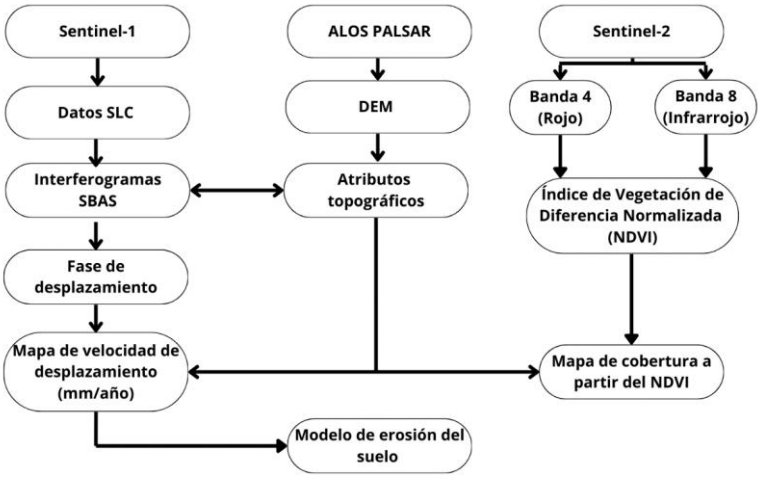


Figura 6. Resumen de los productos geoespaciales derivados del procesamiento de imágenes satelitales.

4.5 Procesamiento geoespacial

4.5.1 Procesamiento de imágenes multiespectrales del Sentinel-2 y extracción del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)

El Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) es una herramienta de teledetección utilizada para detectar y cuantificar la presencia de plantas verdes vivas (Kumar *et al*., 2022; Qi *et al*., 2023; Lu *et al*., 2024). Este índice utiliza la reflectancia de la luz en las bandas del visible y del infrarrojo cercano para distinguir entre áreas vegetadas y no vegetadas. Valores positivos de NDVI indican la presencia de vegetación saludable, y los valores positivos cercanos al 0 sugieren suelos degradados o sin cobertura vegetal, los valores negativos corresponden a cuerpos de agua (Xu *et al*., 2022).

Para el procesamiento fueron indispensables las imágenes multiespectrales que contienen 13 bandas UINT16 e indican la reflectancia lumínica de la superficie terrestre en una resolución de 10m por pixel.

Se obtuvieron de la colección Sentinel-2 nivel 2A (L2A) (ver **Anexo 1**), que proporciona las imágenes con la reflectancia de superficie ortorectificada, fondo de la atmósfera (BOA), y otros parámetros de corrección como clasificación de escenas (incluidas nubes y sombras de nubes), espesor óptico de aerosoles (AOT) y vapor de agua (WV).

A pesar del uso generalizado del NDVI, hay algunas limitaciones importantes a considerar (Montandon y Small, 2008; Xu *et al*., 2022). El NDVI puede verse influenciado por factores como las condiciones atmosféricas y las propiedades dieléctricas del suelo, y puede no ser adecuado para estimar la fracción de especies de vegetación, especialmente en entornos heterogéneos (Jiang *et al*., 2006).

4.5.2 Mapeo del suelo erosionado a partir del NDVI

Utilizando el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), y el modelo de categorización de la degradación del suelo en ambientes áridos y semi áridos (Kumar *et al*., 2022; Chen *et al*., 2023), se elaboró la cartografía de cobertura terrestre. Siguiendo los parámetros establecidos para la identificación de áreas sin vegetación y suelos erosionados (Bewket & Teferi, 2009), se clasificaron los valores de NDVI en cuatro clases: cuerpos de agua, suelo erosionado, suelo débilmente erosionado, y vegetación.

La reclasificación del NDVI, se realizó seleccionando intervalos de clase numéricamente definidos con un color específico para cada clase. Los intervalos se definieron de la siguiente manera: entre 0 y 0.10 sugieren condiciones de sequía y suelo erosionado, entre 0.10 y 0.35 suelos con indicios de erosión incipiente y procesos de degradación, índices mayores a 0.35 áreas con vegetación sana.

4.5.3 Desarrollo del DEM y clasificación de atributos topográficos

Para entender la dinámica erosión-depositación y su relación con el análisis de la fase de desplazamiento, se utilizó la clasificación geomorfológica basada en atributos topográficos y procesos erosivos, como también en el ángulo de mayor inclinación de la pendiente.

Mediante el DEM se pudo clasificar y analizar los atributos topográficos de la zona de interés, así como las características morfométricas. Se empleó el DEM ALOS-PALSAR, con una resolución de 12.50 m por pixel (ver **Anexo 1**).

En este contexto, aquellas alturas relativas al área de interés, están dadas dentro de un marco geomorfológico. Se empleó el término relieve colinado para alturas entre 66 y 33 m. Para aquellas entre 33 y 23 m, relieve disectado, siendo el de mayor interés por los

procesos erosivos. Para las colinas bajas y lugares planos, se utilizó el término relieve plano y de colinas bajas (23 a 0 m).

La pendiente también desempeña un papel clave. En el trabajo de Kou *et al*., (2024), revelan por ejemplo que el 33.53 % de las zonas de erosión dentro de su área de interés, se concentran en rangos de inclinación máxima de 8 a 15 grados (p.6). En este trabajo se emplearon los siguientes rangos para el ángulo de mayor inclinación de la pendiente: Para ángulos en el rango de 34º a 20º, se definieron como pendientes escarpadas, para el rango de 20º a 9º pendientes moderadas y para el rango de 9º a 0º pendientes suaves Esto muestra la correlación entre pendiente y erosión en las vertientes de los lomeríos y mesetas.

4.5.4 Interferometría de apertura de radar sintético Sentinel-1 (InSAR)

La fuente de los datos geoespaciales, fue el portal web Alaska Satellite Facility y los paquetes de imágenes satelitales del Sentinel-1 SLC. El procesamiento se llevó a cabo con el software de código abierto PyGMTSAR. El entorno de Google Colab permitió la creación de cadenas de procesamiento programables en un entorno Jupyter Python compartido (Sánchez-Ospina, y Salazar-Jaramillo, 2024)

El modo de imagen fue el de franja interferométrica ancha (IW), que es particularmente adecuado para aplicaciones InSAR debido a su amplia cobertura y resolución moderada. La banda y la longitud de onda del Sentinel-1 opera en la frecuencia de la banda C, y la longitud de onda es de aproximadamente 5.60 cm. Además, las imágenes se adquirieron en dirección de órbita descendente. La resolución de azimut es de aproximadamente 22 m, y la resolución de alcance es de aproximadamente 5 m. Los datos utilizados estaban en modo de polarización dual VV-VH.

En el procesamiento se seleccionaron 123 imágenes de radar (ver **Anexo 1**), en un espacio temporal entre los años 2018 y 2023. Del total de las imágenes, el 3.20% registraron una línea base perpendicular mayor de 150 m, por lo que se entiende que la mayoría tienen un rango aceptable para ser procesadas (Chen *et al*., 2014). Los mayores diferenciales de línea base perpendicular, se registraron en los pares de imágenes unidos a las tomas de

imágenes SAR de las fechas 2021-10-03 (177 y 191 m), y 2022-09-22 (412, 281 y 325 m). Ambas tomas se muestran en los círculos rojos de la gráfica de línea base (Figura 7).

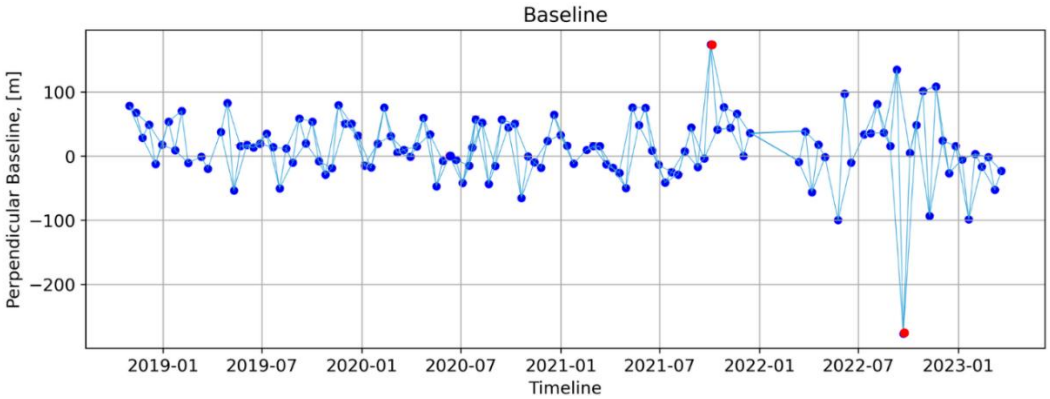


Figura 7. Gráfica de línea base. El eje horizontal representa las fechas de ocurrencia, y el eje vertical la línea base perpendicular en metros. Los puntos azules corresponden a las tomas de imágenes SAR, y los puntos rojos a las tomas que superan el límite de línea base perpendicular.

4.5.5 Fase de desplazamiento

Para obtener los valores de desplazamiento vertical y correlacionarlos con la erosión hídrica se utilizó la técnica Small Baseline Subset InSAR (SBAS InSAR). Esta técnica consiste en un procesamiento multitemporal que mide la fase de desplazamiento vertical de la superficie mediante múltiples pares de imágenes de radar (llamados interferogramas), con líneas base temporales y geométricas cortas (Figura 7). El objetivo es reducir los errores causados por la decorrelación temporal y el ruido atmosférico, que son comunes en líneas base temporales largas o grandes separaciones espaciales entre adquisiciones de imágenes.

La técnica SBAS ha sido ampliamente aplicada en estudios de erosión en regiones áridas y semiáridas (Jiang *et al*., 2021; Lv *at al*., 2023; Wang *et al*., 2023; Kou *et al*., 2024), por lo que se tomaron como referencia las consideraciones dentro del filtrado y correcciones de parámetros.

De esta manera se limitaron tanto la línea base temporal, como geométrica, entre los pares de imágenes (interferogramas), permitiendo optimizar la coherencia de fase y mantener el mayor número posible de píxeles para el análisis de desplazamiento (Cavalié *et al*., 2015).

Para eliminar los efectos de fase topográficos y su contribución al error, se implementó el DEM de la Misión Topográfica del Radar del Transbordador Espacial (SRTM) de 1 segundo (30m por pixel) (Du *et al*., 2020). Se aplicó el filtro adaptativo de fase Multi-looking (Goldstein y Werner, 1998) y el desenvuelto de la fase, para mitigar el error por fase atmosférica. Todos los interferogramas se desenvolvieron mediante el software Snaphu (Chen *et al*., 2022).

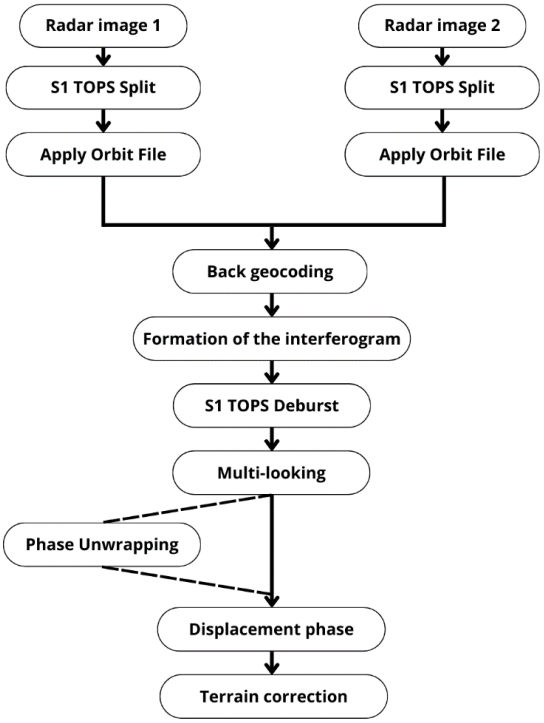


Figura 8. Flujo de trabajo para el procesamiento de los interferogramas.

La coherencia local se calculó entre la imagen de referencia (máster) y la secundaria (esclava) de un interferograma aleatorio dentro del rango aceptable de línea base perpendicular, para evaluar la calidad de los interferogramas en toda la cadena de procesamiento. Esta coherencia local está representada por У, y se determina mediante una medida de correlación cruzada utilizando una ventana de tamaño definido, usualmente de 3 x 3.

La ecuación (9) muestra cómo se calcula esta medida, y sirve como un indicador espacial de la fiabilidad y robustez de los productos derivados de los interferogramas. En esta ecuación, la amplitud de cada píxel está relacionada con las amplitudes de la imagen de

referencia y la secundaria, mientras E representa el valor esperado de una variable aleatoria (Braun, 2021).

$$y = \frac{E[u_1 u_2]}{\sqrt{E[|u_1|^2]}\sqrt{E[|u_2|^2]}} = \frac{E[v]}{I} \; ; \; |y| < 1 \qquad (9)$$

Los valores varían de 0 a 1. Aquellos cercanos a 1 indican una fuerte correlación entre la imagen de referencia y la secundaria, típicamente en áreas urbanas y suelos con poca densidad de cobertura vegetal. Valores cercanos a 0, se observan en áreas de vegetación densa y otras superficies como cuerpos de agua (Figura 9).

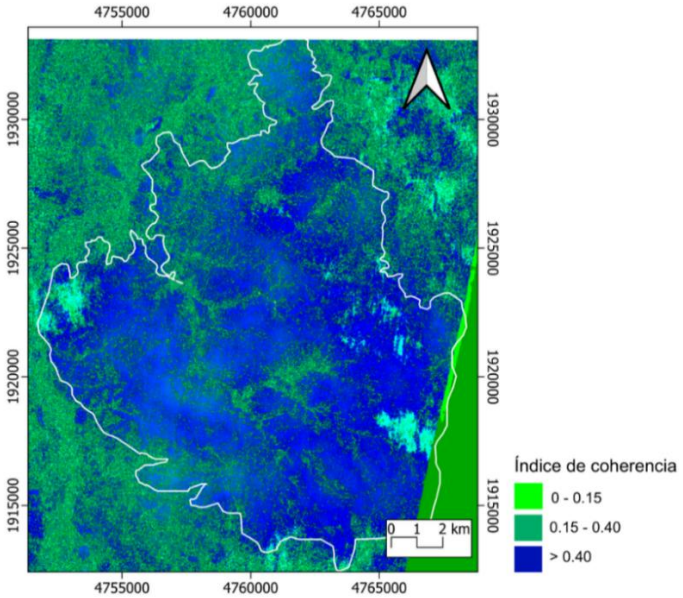


Figura 9. Mapa de índice de coherencia, valores por pixel para La Tatacoa.

4.5.6 Mapeo de velocidad de desplazamiento vertical

El mapa de velocidad de desplazamiento vertical se construyó a partir de los interferogramas, y el modelo de interferometría. Cada punto de color corresponde a un píxel que muestra una coherencia suficientemente alta y una baja incertidumbre de fase durante el período de observación. Es decir, representa la velocidad de desplazamiento vertical en mm por año. El rango de desplazamiento respecto a la escala de colores se estimó entre los máximos y mínimos de desplazamiento vertical. Se ajustó la nube de puntos a dos subáreas (subárea A y B) donde los atributos topográficos y la cobertura evidenciaran espacialmente un margen de erosión.

Consiguiente, se reportaron los desplazamientos utilizando como proxy la línea de señal (LOS), donde los valores negativos indican deformación del terreno alejándose del satélite y los valores positivos indican deformación del terreno hacia el satélite.

En el análisis de desplazamiento, se interpretaron los valores de desplazamiento vertical, de modo que un valor negativo implica erosión y un valor positivo implica depositación (Lv *et al*., 2023; Kou *et al*., 2024). Estos valores están dados por el cociente de desplazamiento total (mm) por pixel, respecto al número de días de orbita por el sensor radar (Li *et al.*, 2022).

4.5.7 Series temporales de desplazamiento vertical del suelo

Para obtener las series temporales de desplazamiento vertical del suelo, se tuvieron en cuenta puntos de interés asociados a márgenes de erosión y de depositación. Los puntos de interés (POI), se establecieron a partir del valor de velocidad de desplazamiento vertical en el mapa, en donde el POI muestra un valor negativo y el POIΘ un valor positivo.

Las gráficas de series temporales evidenciaron la tendencia de desplazamiento vertical a partir de la LOS, producto del análisis SBAS InSAR durante el período 2018-2023. Para ello se utilizó la descomposición estacional y de tendencia usando Loess (STL).

El modelo de descomposición estacional y de tendencia usando Loess (STL), es una técnica de descomposición de series temporales que permite separar los datos en tres componentes: tendencia, estacionalidad y residuo (Bai *et al*., 2022).

Loess (*Locally Estimated Scatterplot Smoothing*), propuesto por Cleveland *et al.* (1990), es un método no paramétrico que usa múltiples regresiones polinomiales dentro de subconjuntos localizados. En este contexto para cada punto (*x*) en el eje horizontal en la serie de tiempo, Loess modela un suavizado *g(x)* ponderando los puntos cercanos según su distancia a (*x*). Este método utiliza una función de peso *W(x)* (10), conocida como la función de peso tricúbico, que determina la influencia de cada punto cercano basado en su proximidad a (*x):*

$$W(x) = (1 - x^3)^3 \; para \; 0 \; \leq x \; < 1 \qquad (10)$$
$$W\;(x) = 0 \; cuando \; x \; \geq 1$$

La proximidad a (x) se define a partir del peso de vecindad $v_i(x)$ (11), donde $\lambda(x)$ es la distancia del q-ésimo (x_i) más alejado de (x).

$$v_i(x) = W\left(\frac{|x_i - x|}{\lambda(x)}\right) \qquad (11)$$

Los puntos más cercanos a (x) obtienen mayores pesos en el cálculo, disminuyendo a medida que la distancia aumenta y eventualmente llegando a cero más allá del *x*-ésimo vecino más lejano.

Finalmente, este método aplica un ajuste polinómico de grado *d* dentro de los vecindarios localizados para capturar tendencias en los datos; en casos de curvatura suave, se usa *d = 1* (lineal), mientras que, para patrones complejos con picos y valles, *d = 2* (cuadrático). Este ajuste se realiza mediante mínimos cuadrados ponderados, suavizando las tendencias y manteniendo las características locales (contribución de ruido local) de la serie temporal. Esta combinación de suavizado local y ponderación robusta permite que STL separe con precisión los componentes estacionales, de tendencia y residual, adaptándose a la variabilidad y las irregularidades de los datos para lograr un análisis de series temporales completo y robusto.

De esta manera, la gráfica de serie de tiempo de desplazamiento vertical se descompone en: la línea continua en rojo y azul, que representa el desplazamiento total para dos puntos de interés (POI y POIΘ), con las unidades en milímetros en el eje vertical, y las fechas de ocurrencia en el eje horizontal.

La línea discontinua en rojo y azul, que representa la tendencia general o patrón a largo plazo de la serie temporal, eliminando las fluctuaciones a corto plazo y el ruido atmosférico. Por último, el componente de estacionalidad (*Seasonality*) que captura los patrones repetitivos o cíclicos que ocurren a intervalos irregulares, que pueden ser debidas a cambios climáticos o factores atmosféricos (Braun, 2021).

5. Resultados y discusión

5.1 Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI)

El procesamiento de la imagen del Sentinel-2 nivel 2A (L2A), muestra que las áreas de suelo degradado son identificables con valores positivos cercanos al cero (Figura 10). Estos valores indican la correlación del NDVI con terrenos sin, o muy poca vegetación. Además, permitieron, de manera precisa, delimitar las áreas susceptibles a la erosión.

El índice NDVI tiene implicaciones para comprender los procesos geomorfológicos y los cambios ambientales en el área de interés, así como un primer acercamiento a la cobertura terrestre desde teledetección.

En el mapa de la Figura 10, se puede apreciar el NDVI del bosque seco tropical La Tatacoa, de acuerdo con el procesamiento de los datos geoespaciales.

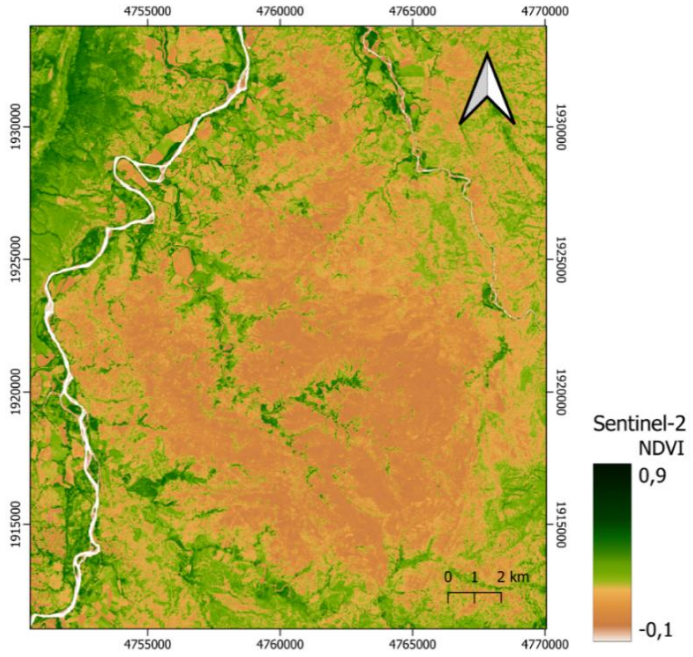


Figura 10. Mapa del NDVI de La Tatacoa.

5.2 Clasificación de la erosión del suelo según NDVI

Los valores del NDVI detectados entre el 0 y 0.10 sugirieron condiciones de sequía y suelo erosionado. Áreas con anomalías entre 0.10 y 0.35, dieron lugar a suelos con indicios de erosión incipiente y procesos de degradación, mientras que aquellas que fueron mayores a 0.35 se clasificaron como áreas con vegetación sana.

Las zonas con niveles más bajos de vegetación, pueden experimentar desertificación como resultado de la falta de cobertura. Otras áreas que se mostraron con índices NDVI negativos, se clasificaron como cuerpos de agua.

Las categorías se dividieron en cuatro clases: cuerpo de agua, suelos erosionados, suelo débilmente erosionado, y cobertura vegetal. En el contexto de ambiente seco, la erosión y la desertificación están interrelacionadas, siendo la desertificación una consecuencia directa de la erosión excesiva.

Dentro del área de interés, la categoría de suelo erosionado fue la que mayor cubrimiento tuvo con 117 km², mientras que los suelos débilmente erosionados abarcaron 64.40 km², y la cobertura vegetal 7.90 km² (Figura 11).

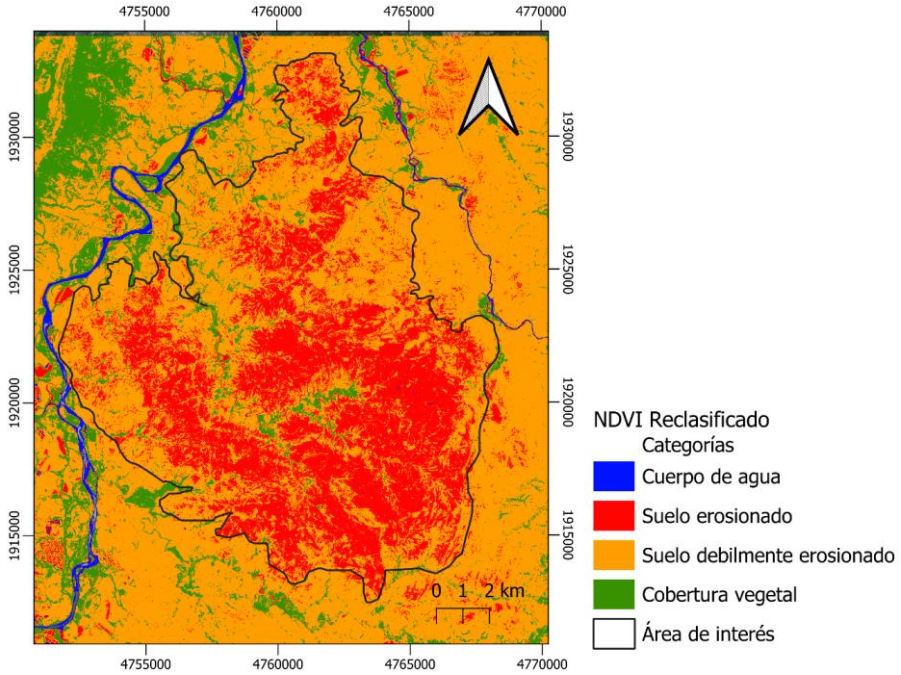


Figura 11. Mapa de cobertura a partir del NDVI.

5.3 Análisis de los atributos topográficos

En términos morfométricos, la erosión tiende a afectar más las áreas de mayor altitud, como las colinas, donde la pendiente es mayor y, por lo tanto, la velocidad de la escorrentía es más alta (Wischmeier y Smith, 1978; Renard *et al*., 1997). Asimismo, las áreas de menor altitud tienden a acumular sedimentos y materiales depositados por las corrientes fluviales. A continuación, se describen las geoformas con base en los parámetros morfométricos.

5.3.1 Clasificación geomorfológica a partir de características morfométricas y procesos erosivos

La geomorfología fue posible clasificarla a partir del DEM ALOS-PALSAR. Características morfométricas como la altura relativa, permitieron clasificar la variabilidad espacial y los atributos topográficos específicos. Se le llama altura relativa debido a que toma como referencia la cota más baja del área de interés, como el cero (0 m) o punto inicial. En cada foco se reclasificaron las alturas en tres categorías: Relieve colinado (66 a 33 m), relieve disectado (33 a 23 m) y relieve plano y de colinas bajas (23 a 0 m) (Figura 12).

Para la clasificación geomorfológica a partir de características morfométricas y procesos erosivos se dividió el área de interés en tres focos: foco suroeste (SW), foco norte (N), y foco sureste (SE).

Para el foco SW (Figura 12), se evidenció que el 72.40 % del área total es relieve plano y de colinas bajas. Este porcentaje corresponde a 54.20 km^2 del área de interés. Mientras que el relieve disectado se presenta en 11.70 % con un área de 8.80 km^2, y el relieve colinado en 15.90% con un área de 11.80 km^2.

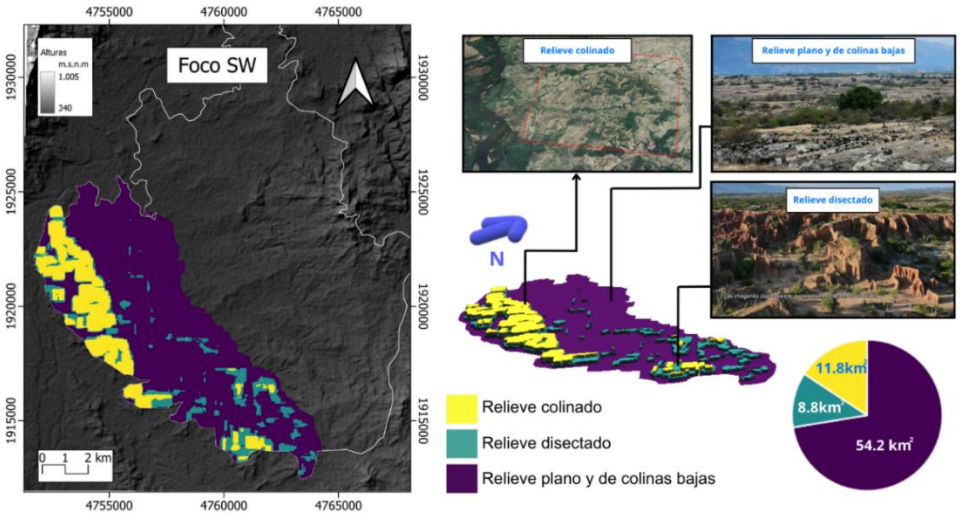


Figura 12. Relieve del foco SW. El relieve colinado en 15.90%, el relieve disectado en 11.70%, y relieve plano y de colinas bajas en 72.40%.

Para el foco N, la distribución porcentual del relieve colinado fue del 6.30% que equivalen a 4.60 km^2, mientras que el relieve disectado fue de 4.10% con 2.90 km^2, siendo la menor proporción respecto el área de interés total (Figura 13).

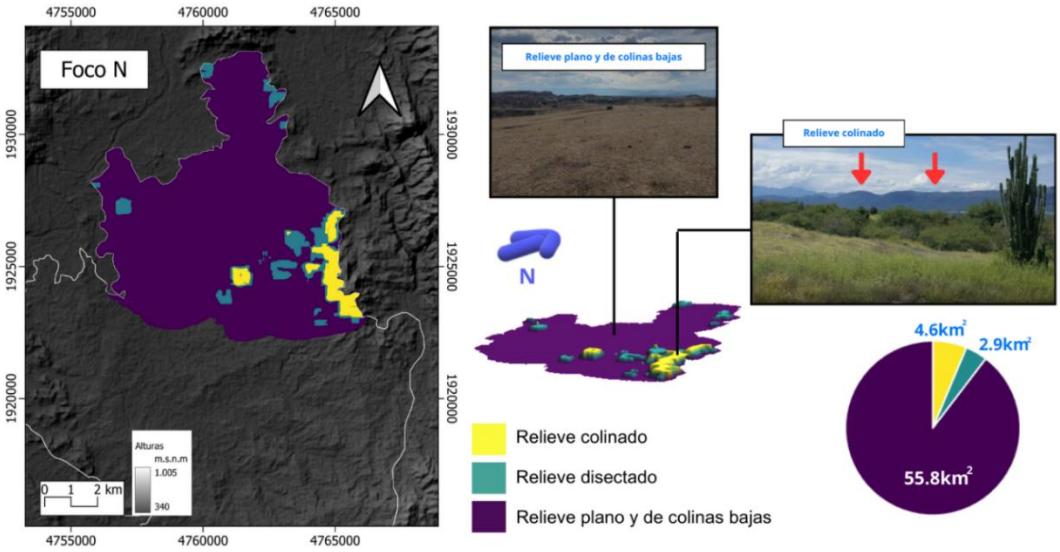


Figura 13. Relieve del foco N. En la gráfica de porcentajes se expresa el relieve colinado en 6.30%, el relieve disectado en 4.10%, y relieve plano y de colinas bajas en 89.60%.

En el foco SE, el relieve disectado tuvo una mayor proporción por área que el foco N, abarcando 5.10 km², pero fue menor respecto al foco SW. Por otro lado, el relieve colinado

se extiende en 1.90 km², y el relieve plano y de colinas bajas, abarcan la mayoría del área con 65.40 km² (Figura 14).

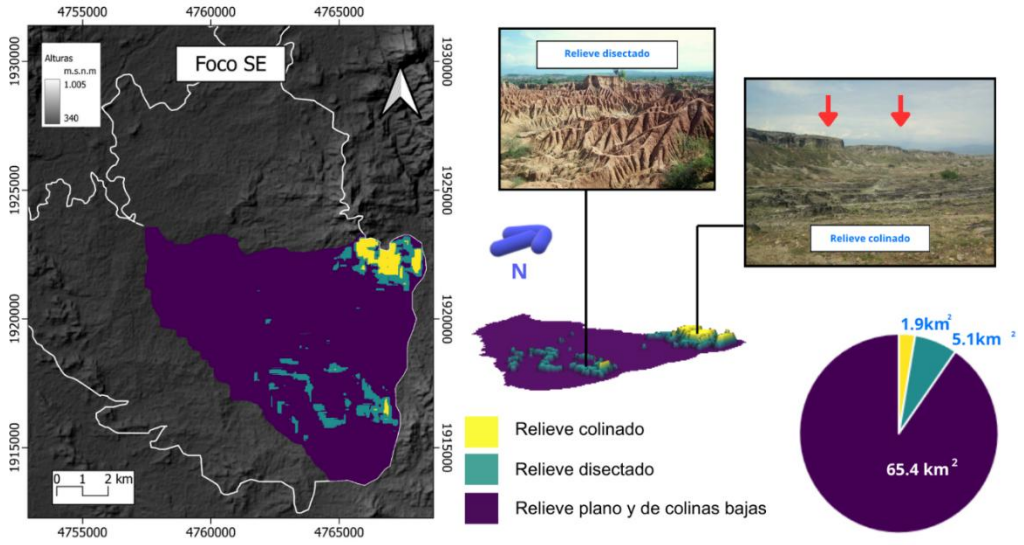


Figura 14.Relieve del foco SE. El relieve colinado en 2.60%, el relieve disectado en 7%, y relieve plano y de colinas bajas en 90.40%.

Los focos proporcionaron una perspectiva más detallada del área de interés en cuanto a la geomorfología y los procesos erosivos. Se dedujo que el foco SW y el foco SE son aquellos que contaron con una mayor densidad de relieve disectado, con 8.80 km² para el foco SW, y 5.10 km² para el foco SE.

5.3.2 Clasificación del ángulo de mayor inclinación de la pendiente

Para la clasificación del ángulo de mayor inclinación, mediante un mapa de pendientes a escala 1:100000, se asignó a cada pixel un valor de magnitud en grados (Figura 15).

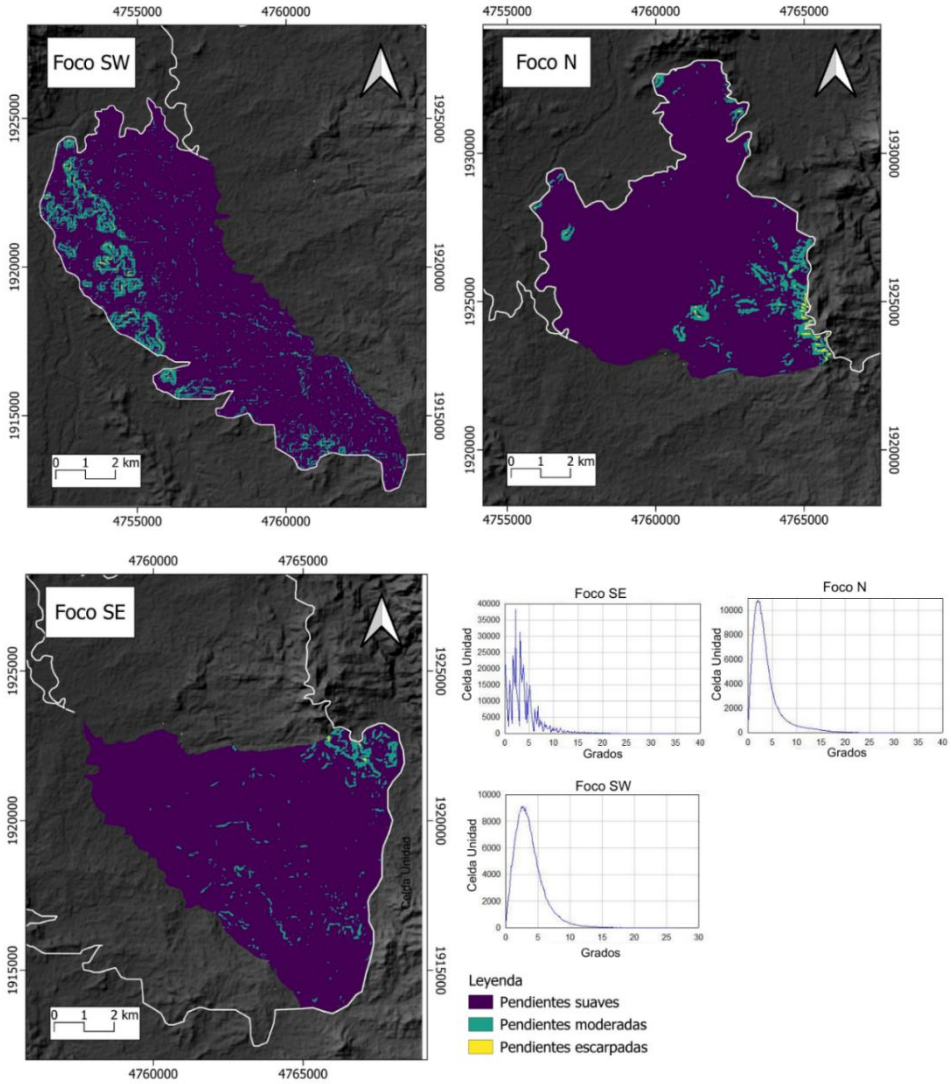


Figura 15. Mapas de pendientes de La Tatacoa. Los histogramas en cada foco se presentan en el eje vertical en celda unidad y en el eje horizontal en grado de inclinación.

Dentro del área total de interés, las zonas con pendiente escarpada no suman más de 0.35 km^2. Sin embargo, se encontró que aproximadamente 12.77 km^2 corresponden a zonas con pendientes moderadas. El foco SW, fue el que mayor cobertura de pendientes moderadas y escarpadas tuvo, abarcando un área de 7.05 km^2 en total. El ángulo de mayor inclinación se correlaciona con la erosión del suelo, ya que, a mayor inclinación, mayor erosión.

A pesar de ello, el análisis estadístico de los histogramas de pendiente máxima para los focos SE, N y SW revela distribuciones consistentemente sesgadas hacia pendientes bajas.

En particular, el foco N presenta la menor dispersión, con una concentración significativa de celdas unidad con pendientes inferiores a 5 grados, mientras que los focos SE y SW muestran una mayor dispersión, pero siguen dominados por pendientes menores a 10 grados.

Las áreas con pendientes ligeramente más pronunciadas, como los focos SE y SW, se mostraron consistentes con la geomorfología y los procesos erosivos. Estos focos se seleccionaron como subáreas de interés, para puntualizar en el análisis de velocidad de desplazamiento.

5.4 Análisis de la denudación mediante InSAR

Se seleccionaron dos subáreas de interés teniendo en cuenta los focos de erosión SE y SW. La subárea A dentro del foco SW (Figura 16), y la subárea B dentro del foco SE (Figura 199). Para cada una se interpretaron los valores de desplazamiento y su dinámica en el tiempo a partir de dos puntos de interés. Los puntos de interés corresponden a un punto donde predomina la erosión (POI) y otro donde el terreno es estable o predomina la depositación (POIΘ). Se comparó el desplazamiento para los dos puntos seleccionados en cada subárea.

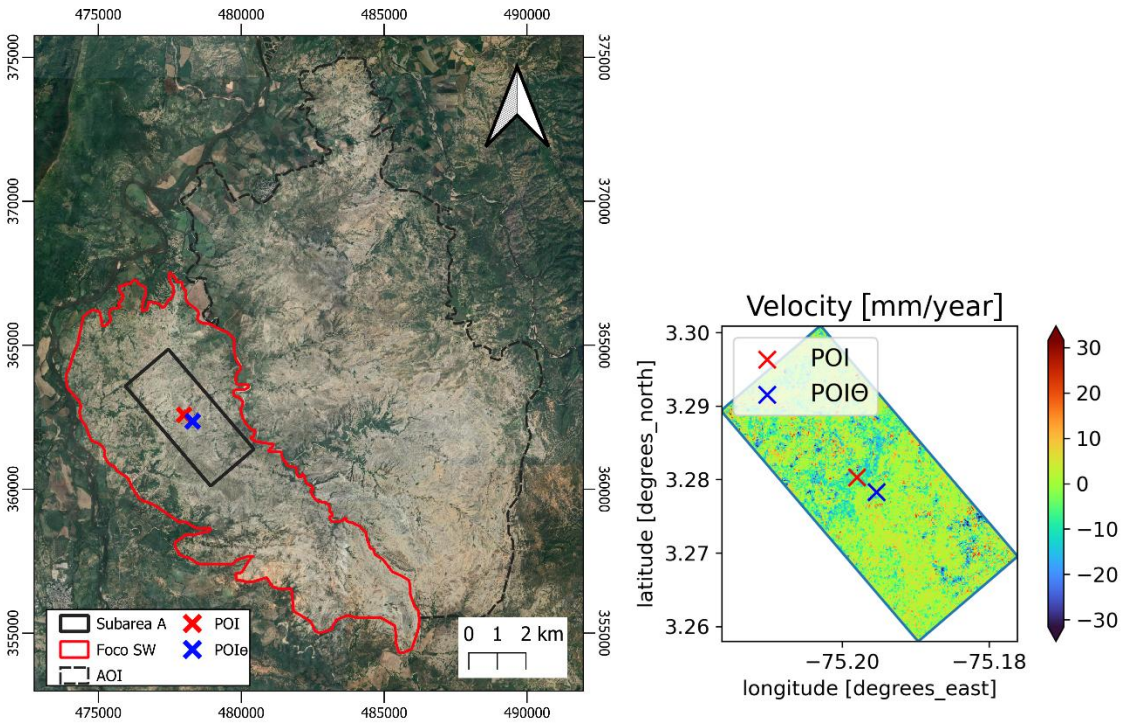


Figura 16. Mapa de velocidad de desplazamiento vertical de la subárea A.

En la subárea A los resultados estadísticos por pixel, revelan una distribución de datos con alta variabilidad y una tendencia general hacia valores negativos interpretados como erosión. Los datos oscilan entre -30 y 30 mm/año, habiendo máximos en puntos específicos como surcos, valles y zonas con una alta densidad de drenaje. El promedio es ligeramente negativo (-0.54 mm/año), indicando una pérdida de suelo anual en el área de estudio, que se interpreta como erosión.

La alta desviación estándar (6.84 mm/año) y el coeficiente de variación (12.55%) reflejan una considerable dispersión y un sesgo en la distribución espacial de estos procesos. Con el propósito de corroborar por medio de imágenes satelitales ópticas, se identificaron patrones de drenaje dendrítico en el POI, en cercanía a la quebrada Balsillas. Mientras que la zona estable marcada por el punto POIΘ, se identificó una carretera (Figura 17).

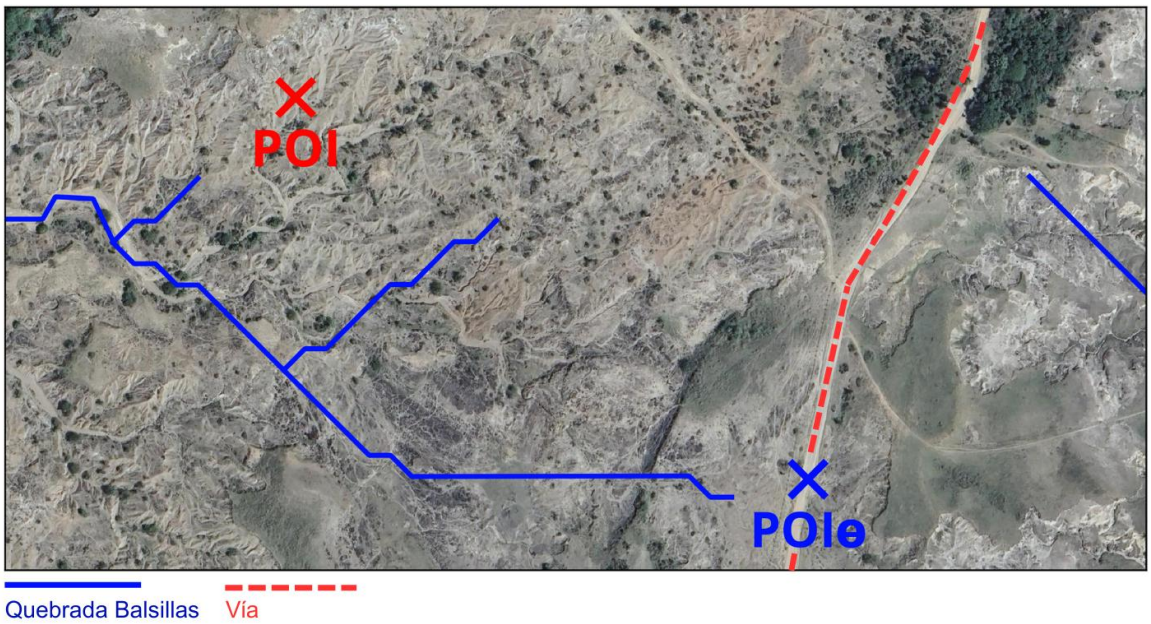


Figura 17. Puntos POI y POIΘ, en cercanía a la quebrada Balsillas. Se observa un patrón de drenaje dendrítico en la ubicación del POI gracias a la resolución óptica de la imagen satelital.

La serie temporal de desplazamiento en la subárea A (Figura 188) presenta patrones diferenciados entre los dos puntos de interés. El POI muestra una tendencia descendente notable desde 2021, lo que indica un proceso continuo de desplazamiento negativo, posiblemente asociado con la erosión y el aumento de la degradación del suelo.

En contraste, el POIΘ exhibe una tendencia más estable, con una ligera depositación de sedimentos hacia el final del período. Estas diferencias en las tendencias de desplazamiento reflejan la variabilidad espacial en los procesos de erosión y depositación. Al ser una región sub árida, posiblemente se encuentren relacionados a la desertificación y la pérdida de suelo.

Se puede observar también que la estacionalidad (*Seasonality*) representada en patrones repetitivos o cíclicos, ocurre en intervalos irregulares. Basándose en el trabajo de Braun (2021), se determinó que estos patrones corresponden a la contribución del error atmosférico en la retrodispersión de la señal radar. Este error atmosférico puede ser debido a cambios climáticos o factores atmosféricos locales como la humedad del suelo o las temporadas de lluvia y sequía (Li *et al*., 2022).

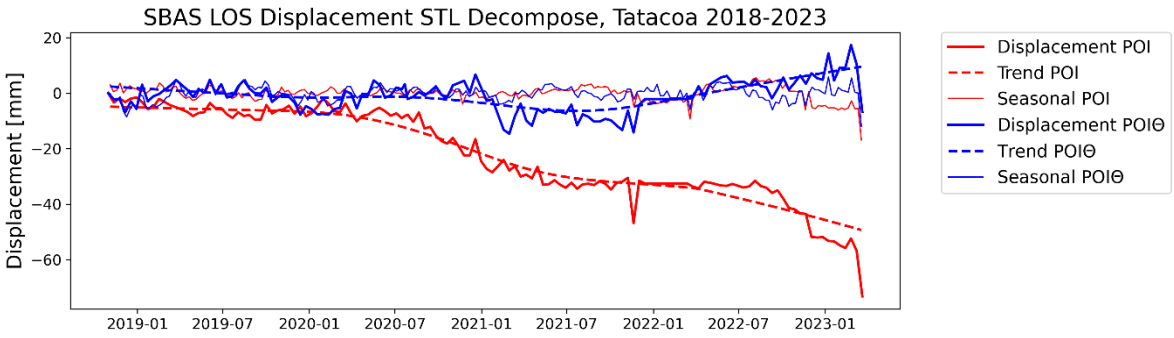


Figura 18. Serie temporal de desplazamiento del suelo para la subárea A entre los años 2018 y 2023.

Por otro lado, en la subárea B, los resultados estadísticos por pixel muestran una variabilidad significativa en los procesos de erosión y depositación (Figura 199). El valor promedio negativo (-0.45 mm/año) indica que, la erosión predomina sobre la depositación en esta zona, sugiriendo al igual que en el caso de la subárea A, una ligera pérdida de suelo.

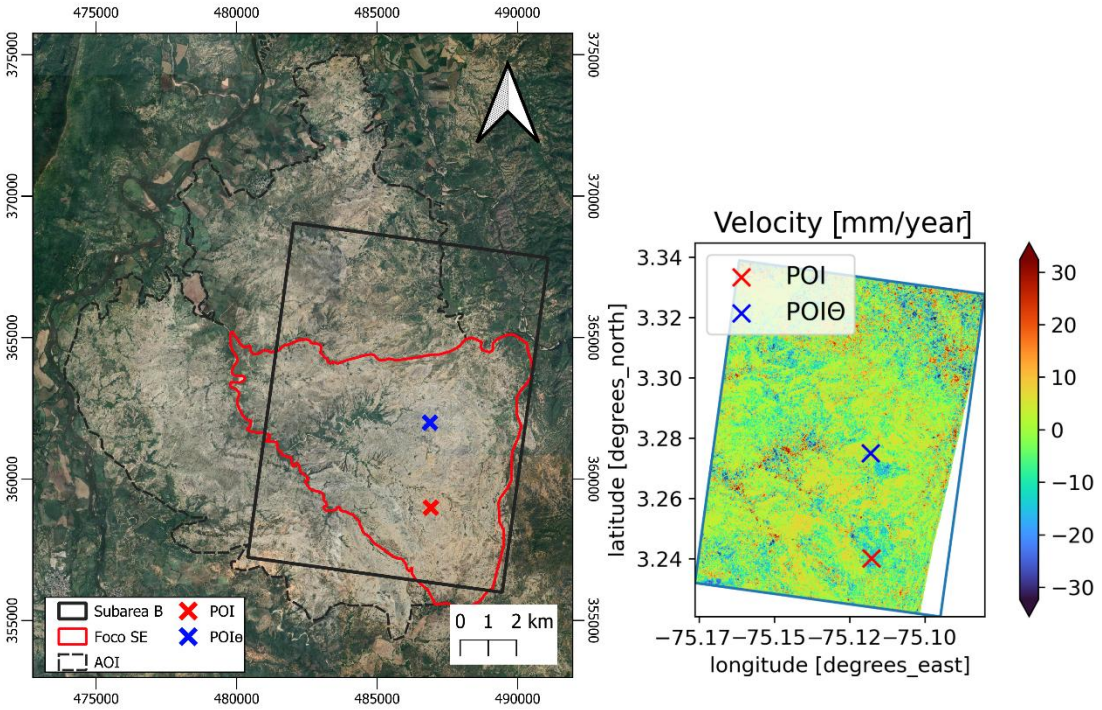


Figura 19. Mapa de velocidad de desplazamiento de la subárea B.

La amplitud del intervalo es -30 y 30 mm/año. Se encontraron pixeles que reflejan la presencia de áreas con alta erosión y otras con indicios de depositación, evidenciando una distribución desigual de los desplazamientos. La mediana (0.47 mm/año) y la desviación estándar (9.04 mm/año) refuerzan esta heterogeneidad, indicando que la dinámica del suelo es variable, con algunas áreas más afectadas por la erosión que otras.

Esto se ve confirmado por el análisis de los cuartiles, donde la mayor parte de los valores se concentran en desplazamientos moderados (tercer cuartil 4.95 mm/año), pero con algunos extremos de erosión intensa (primer cuartil -5.45 mm/año) que contribuyen al avance de la desertificación. Estas áreas críticas con alta erosión son las más vulnerables a la degradación del suelo, acelerando los procesos de desertificación en La Tatacoa y comprometiendo la sostenibilidad del ecosistema.

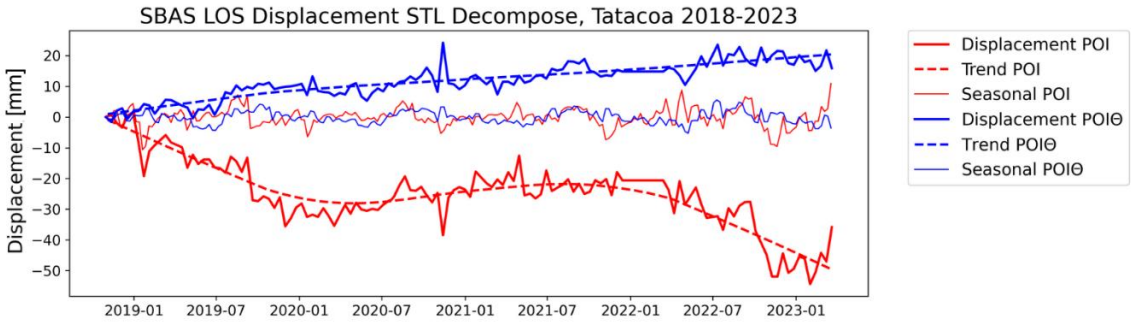


Figura 20. Serie temporal de desplazamiento del suelo para la subárea B entre los años 2018 y 2023.

Como se hizo anteriormente, la gráfica descompone el desplazamiento del suelo en dos puntos de interés (POI y POIΘ) de la subárea B entre 2018 y 2023, mostrando componentes de desplazamiento general, y la tendencia estacional (Figura 20).

En el POI (curvas rojas), se observó una tendencia negativa significativa, con una disminución progresiva de -10 a -30 mm entre los años 2018 y 2020. Seguido de una fluctuación indicando variación en la intensidad de la erosión, hasta el año 2022, donde muestra de nueva una caída de la tendencia. Por otro lado, en el POIΘ (curvas azules), la tendencia general es positiva, con un desplazamiento que varía entre 10 y 15 mm/año, lo que indica un proceso de depositación.

Haciendo una comparativa entre las dos subáreas de interés, se evidencia la variabilidad geomorfológica en La Tatacoa, donde algunos sectores están siendo degradados por la erosión con diferentes temporadas de intensidad. Esto resalta la complejidad de los procesos de erosión, un factor clave en la evolución de la desertificación en la región.

No obstante, ambas series de tiempo tienen en común que la tendencia de desplazamiento negativo en la el segmento del 2022 al 2023 ha sigo progresiva. Para el POI de la subárea A, hubo un descenso de -28 a -40 mm (-12 mm), mientras que para el POI de la subárea B, hubo un descenso de -25 a -50 mm (-25 mm).

6. Conclusiones

El análisis de series temporales de erosión permitió identificar cambios en los patrones erosivos, evidenciando un aumento progresivo de la erosión con un umbral promedio de 0.45 y 0.54 mm/año, particularmente en zonas con relieve disectado y pendientes entre 9 y 20 grados. Esta tasa generalizada para el bosque seco, en un ambiente semiárido tropical, se encuentra en el rango aceptable de tolerancia a la pérdida de suelo establecido por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA) en alrededor de 0.93 mm/año para suelos agrícolas, o aproximadamente 5 toneladas/hectárea/año. No obstante, se observó que, en cárcavas y perfiles de erosión, la erosión se da a una tasa de 30 mm/año (específicamente para estos regímenes), los cuales son valores muy altos de pérdida de suelo y superan el umbral establecido por la USDA para cualquier uso que no sea conservación. Para tipos de suelo propios de ecosistemas sensibles a la desertificación como La Tatacoa, estos resultados indican un factor que propicia la degradación del suelo, a un ritmo que supera los procesos de renovación natural, lo que conduce a un rápido agotamiento del recurso.

Esta metodología proporciona una visión regional y cuantitativa sobre la evolución de la erosión y el desplazamiento del suelo en función de factores como la vegetación, la hidrología y la geomorfología, permitiendo modelar y entender mejor estos procesos. La delimitación precisa de las áreas más vulnerables, como zonas con pendientes pronunciadas y suelos degradados, así como las áreas de depositación, permite priorizar medidas de conservación en las regiones más afectadas. Además, se observó que las zonas con menor cobertura vegetal o vegetación degradada presentan las tasas más altas

de erosión, lo que sugiere que la restauración ecológica podría ser una estrategia eficaz para mitigar la degradación del suelo.

Esto subraya la necesidad de implementar y monitorear estrategias de conservación de forma continua. Si se integran datos climáticos adicionales, como precipitación, esta metodología podría revelar cómo las condiciones meteorológicas afectan los procesos erosivos. Por ejemplo, se podría determinar si el incremento de la erosión coincide con períodos de lluvias intensas o eventos climáticos extremos, lo que facilitaría la adaptación de las estrategias de manejo del suelo de acuerdo con las proyecciones climáticas. Este aspecto será abordado de forma general en el Capítulo 2.

CAPÍTULO 2

Relación entre la erosión hídrica y la precipitación en La Tatacoa mediante correlogramas cruzados y estadística descriptiva

Resumen

En ecosistemas semiáridos, como el bosque seco tropical de La Tatacoa, se espera que la erosión del suelo esté directamente influenciada por las precipitaciones irregulares y la escorrentía superficial. Este estudio analiza series de tiempo de precipitación y desplazamiento del suelo (denudación) en la resolución semanal y mensual para ver, de forma exploratoria, si existe alguna relación. Se utilizaron correlogramas cruzados, con datos pluviométricos de ocho estaciones meteorológicas entre 2018 y 2023, así como desplazamientos detectados con la técnica SBAS InSAR durante el mismo período. Se implementó un análisis estadístico que incluyó el cálculo de promedios, máximos, mínimos, desviación estándar y error estándar, tanto para las precipitaciones como para los desplazamientos del suelo, con el fin de identificar patrones de precipitación episódicos y su impacto en la erosión. Además, fue posible observar mediante correlogramas cruzados una correlación positiva entre la lluvia y la erosión con un retraso (*lags*) de 3 a 4 meses solo para la lluvia de los meses de octubre y noviembre. Este comportamiento sugiere una respuesta retardada del desplazamiento vertical del suelo ante los episodios de precipitación. Por otro lado, los *lags* negativos muestran una correlación negativa del desplazamiento ocurrido en junio, julio y agosto, respecto a la temporada de lluvia de marzo, abril y mayo. Esto representa una paradoja y podría señalar un desacoplamiento entre la estacionalidad de las lluvias y el proceso de erosión. A partir de la estadística descriptiva, se planteó la hipótesis de una posible respuesta retardada del suelo a los eventos de lluvia particularmente relacionados con el fenómeno de La Niña (2020-2022). Es decir, hipotetizar cómo la precipitación acumulada podría influir en el desplazamiento del suelo acumulado en meses posteriores. Aunque se trata de un análisis preliminar, el enfoque, que combina teledetección con análisis de correlación temporal, ofrece una comprensión más amplia de los procesos erosivos al permitir involucrar otras variables de forma cuantitativa. Por ello, se considera una herramienta valiosa para la gestión de suelos

en ecosistemas vulnerables a la erosión, tanto para mitigar los efectos de la desertificación, como para anticipar los impactos del cambio climático en áreas semiáridas como La Tatacoa.

Palabras clave

Precipitación, desplazamiento vertical del suelo, teledetección, erosión, desertificación.

Abstract

In semi-arid ecosystems, such as the tropical dry forest of La Tatacoa, soil erosion is expected to be directly influenced by irregular precipitation and surface runoff. This study analyzes time series of precipitation and vertical soil displacement (runoff-induced erosion) on a weekly and monthly basis to explore any potential relationship. Cross-correlograms were used, utilizing rainfall data from eight meteorological stations between 2018 and 2023, as well as displacement detected with the SBAS InSAR technique over the same period. A statistical analysis was implemented, including the calculation of averages, maxima, minima, standard deviation, and standard error for both precipitation and soil displacement, aiming to identify episodic precipitation patterns and their impact on erosion. Additionally, cross-correlograms showed a positive correlation between rainfall and erosion with a delay (lag) of 3 to 4 months, specifically for rainfall during October and November. This behavior suggests a delayed response in vertical soil displacement following precipitation events. Conversely, negative lags indicate a negative correlation for displacements occurring in June, July, and August, relative to the rainfall season of March, April, and May. This represents a paradox and could indicate a decoupling between rainfall seasonality and the erosion process. Based on descriptive statistics, a hypothesis was proposed suggesting a potential delayed soil response to rainfall events, particularly related to the La Niña phenomenon (2020–2022). This implies hypothesizing how accumulated precipitation might influence soil displacement in the following months. Although this is a preliminary analysis, the approach, which combines remote sensing with temporal correlation analysis, provides a broader understanding of erosive processes by enabling the integration of other variables quantitatively. Therefore, it is considered a valuable tool for soil management in ecosystems vulnerable to erosion, both to mitigate desertification effects and to anticipate climate change impacts in semi-arid areas such as La Tatacoa.

Keywords

Precipitation, soil displacement, remote sensing, erosion, desertification.

2. Introducción

La relación entre la precipitación y el desplazamiento vertical del suelo (erosión) es especialmente relevante en regiones áridas y semiáridas, donde las temporadas de lluvia pueden impactar significativamente la estabilidad ecosistémica y los procesos erosivos (Suescún *et al*., 2016; Beniaich *et al*., 2023). En estos entornos, factores como una vegetación escasa, bajo contenido de materia orgánica y suelos arcillosos intensifican la degradación del suelo, ya que limitan la infiltración y aumentan la escorrentía. Este fenómeno desencadena un ciclo de retroalimentación positiva: la escorrentía y la erosión provocan una mayor pérdida de vegetación, lo que agrava las condiciones que favorecen mayor erosión y escorrentía, acelerando así el proceso de desertificación. En Colombia, por ejemplo, los indicadores de desertificación evidencian un aumento progresivo de la pérdida de suelo por erosión en ecosistemas semiáridos, como el bosque seco tropical de La Tatacoa (Vargas *et al.*, 2019; Pereira, 2022).

Un desbalance en el sistema lluvia-escorrentía también es susceptible a los cambios climáticos, ya que a medida que las lluvias se vuelven más irregulares e intensas, el aumento de la escorrentía y la disminución de la capacidad del suelo para retener humedad degradan aún más el terreno. Sumado a esto, el incremento de las temperaturas acelera la evaporación, exacerbando los efectos de la sequía y disminuyendo la resiliencia de los ecosistemas para recuperarse de la degradación, lo que acelera los procesos de desertificación (Chaturvedi *et al.*, 2021). Diversos modelos basados en teledetección y estudios de campo se utilizan para analizar la erosión y comprender su relación con la precipitación (Wang *et al*., 2023)

El modelo más comúnmente utilizado es la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE) (Wischmeier y Smith, 1978) y sus versiones revisadas (RUSLE) (Renard *et al*., 1997). Este modelo es una ecuación empírica que estima la cantidad de suelo perdido debido a la erosión hídrica, considerando factores como la lluvia, la erodabilidad del suelo, la longitud y la pendiente del terreno, el uso del suelo y las prácticas de conservación. Se

han desarrollado otros modelos para estimar la erosión, incorporando funciones específicas, como el modelo WEPP, que se emplea para estimar la producción de sedimentos en cuencas hidrográficas y ríos (Flanagan *et al.,* 2007). En este trabajo nos encontramos en una etapa previa a la modelación, utilizando el modelo de la erosión de forma conceptual. La ecuación USLE modificada y mejorada, ha servido de base, por ejemplo, a las directrices del USDA que determina la tasa máxima tolerable de pérdida de suelo (*e.g.,* 0.93 mm/año para suelos agrícolas), lo que equivale a 5 toneladas/hectárea/año (Skidmore, 1982). El enfoque de Skidmore (1982) es más amplio que el USLE y tiene como objetivo establecer una tasa sostenible de pérdida de suelo que tenga en cuenta la preservación de los recursos del suelo a largo plazo, más allá de lo que el USLE normalmente proporciona, razón por la cual lo utilizamos ene este trabajo como referencia.

El uso de correlogramas cruzados permite explorar los datos y analizar si existe algún tipo de relación entre la precipitación y la pérdida de suelo, al permitir identificar posibles retrasos en la respuesta de la erosión a los eventos de lluvia. Esto es relevante porque, como veremos en este capítulo, el efecto de una precipitación intensa no es inmediato, y la erosión puede incrementarse meses después, dependiendo de factores como la infiltración y la acumulación de agua en el suelo. Este análisis temporal puede ayudar a ajustar los modelos de pérdida de suelo para que incluyan un retardo entre la lluvia y la erosión, lo que haría las predicciones que se utilicen en la ecuación RUSLE, por ejemplo, más precisas.

El objetivo del presente capítulo es analizar series de tiempo de precipitación y desplazamiento vertical del suelo (erosión por escorrentía) en la resolución semanal y mensual en el área de interés de La Tatacoa mediante correlogramas y estadística descriptiva. Se partió de la hipótesis que los valores máximos de precipitación se correlacionan positivamente con el desplazamiento. Además, de utilizaron los resultados obtenidos en el capítulo anterior a partir de la técnica SBAS InSAR. De esta manera, se evidenció que no hay una correlación (cercana a cero) que sugiera un sistema acoplado entre las precipitaciones por estación y los valores de desplazamiento. Mientras que se observó una correlación positiva, pero con retraso, de las lluvias de junio, julio y agosto la erosión de los meses de octubre, noviembre y diciembre; por otro lado, se evidenció una

correlación negativa entre las lluvias de abril, mayo y junio, y la erosión en enero, febrero y marzo, lo que presenta una paradoja. La aparente contradicción significa que a medida que la precipitación aumenta, la erosión disminuye. Igualmente, la estadística descriptiva no permitió ver ninguna correlación en la escala semanal y mensual de las series de datos. Sin embargo, se pudo detectar una coincidencia entre el desplazamiento vertical acumulado y discretizado con la lluvia acumulada y discretizada entre 2020 y 2022. Esto podría sugerir que a una escala interanual (Fenómeno de La Niña) podría verse la erosión acumulada como un aumento de la precipitación acumulada.

3. Métodos

3.1 Obtención y preparación de los datos

Se obtuvieron datos pluviométricos mensuales de ocho estaciones meteorológicas dentro del área de interés en La Tatacoa. Como fuente, se utilizó el repositorio público del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (2015).

Tabla 2. Estaciones meteorológicas dentro del perímetro del bosque seco tropical de La Tatacoa.

Estación (código)	Latitud	Longitud	Altura	Registro
San Alfonso (21145040)	3.37336111	-75.11011111	440 msnm	Entre 2018 y 2023
San José (21115060)	3.32922222	-75.18405556	400 msnm	
Potosí (21110090)	3.38713889	-75.16925	400 msnm	
Polonia (21110330)	3.187388889	-75.21841667	429 msnm	
La Victoria (21110290)	3.349555556	-75.17030556	400 msnm	
Hacienda Pérez (21130050)	3.243555556	-75.25594444	450 msnm	
Baraya (21110070)	3.150333333	-75.05733333	615 msnm	
El Tomo (21140110)	3.345361111	-75.09744444	444 msnm	

El preprocesamiento incluyó para cada estación, la generación de los promedios mensuales, la desviación estándar, los máximos, los mínimos y el error estándar entre los años 2018 y 2023. De igual manera, los datos de desplazamiento evidenciados con la técnica SBAS InSAR, se reprocesaron para el margen de erosión POI(A) (Figura 21) con los mismos indicadores estadísticos de manera que fueran coherentes con los datos de precipitación.

3.2 Indicadores estadísticos

La influencia de la precipitación en el desplazamiento vertical del suelo puede entenderse a través de su impacto en la escorrentía y el socavamiento del terreno (Hu et al., 2023), empleando medidas estadísticas como el promedio mensual, los valores máximos y mínimos, la desviación estándar y el error estándar. Un aumento en la precipitación media intensifica la escorrentía, incrementando la susceptibilidad del suelo a la erosión y elevando las tasas de desplazamiento. En cambio, durante la temporada seca, la baja precipitación genera condiciones de aridez que favorecen la pérdida de cobertura vegetal, lo que también influye en la erosión del suelo (Han et al., 2023).

Se realizó el análisis estadístico considerando los indicadores promedios mensuales de precipitación y sus valores extremos, junto con la desviación estándar y el error estándar, para identificar patrones episódicos de lluvia y períodos de sequía. Los datos de desplazamiento vertical del suelo fueron evaluados mediante las mismas métricas estadísticas para determinar cómo estos eventos episódicos de precipitación impactan directamente en la erosión, al superponer los datos de ambas. Igualmente, se calcularon los promedios mensuales de desplazamiento y sus extremos, así como la variabilidad reflejada en la desviación estándar. Se graficaron series de tiempo en resolución semanal y mensual, utilizando información de precipitación diaria de los datos del IDEAM. Para ver algún tipo de relación temporal entre dichas variables se empleó el coeficiente de Pearson mediante correlogramas cruzados. A modo de evaluar una posible estacionalidad entre la precipitación y el desplazamiento, se superpusieron los resultados de desplazamiento del Capítulo 1, acumulado y discretizado, con los datos de precipitación.

3.3 Correlación entre precipitación y erosión hídrica (denudación)

La correlación entre la precipitación y el desplazamiento vertical del suelo se realizó mediante correlogramas cruzados por estación meteorológica. Para construir los correlogramas, se tuvieron en cuenta los datos de precipitación por estación y el desplazamiento vertical, asegurando la coherencia y sincronización de los eventos de lluvia y erosión durante el período de observación. Este enfoque facilitó el análisis de cómo las variaciones en la precipitación influían en los desplazamientos del suelo en diferentes momentos.

Se aplicó la correlación cruzada utilizando diferentes rezagos (retrasos temporales o *lags*) para considerar los efectos no inmediatos de la precipitación sobre el desplazamiento del suelo. Cada retraso representa un intervalo en el que las precipitaciones anteriores pueden estar correlacionadas con el desplazamiento del suelo en los meses posteriores. Esta metodología captura el comportamiento de la erosión en un sistema donde las lluvias no solo producen efectos inmediatos, sino también acumulativos o retrasados.

Esto es relevante porque el impacto de la precipitación en la erosión puede no ser inmediato (Skidmore, 1982). Al incluir distintos intervalos de tiempo, se identificaron posibles respuestas retrasadas del suelo a los eventos de lluvia, lo que permitió evaluar cómo la precipitación en un mes influye en el desplazamiento del suelo en los meses siguientes.

En los correlogramas, el eje horizontal representa los rezagos temporales, mientras que el eje vertical muestra el coeficiente de correlación (*i.e.,* Pearson) entre la precipitación y el desplazamiento del suelo. Un coeficiente positivo indica una relación directa, donde un aumento en la precipitación se asocia con un mayor desplazamiento del suelo. Por otro lado, un coeficiente negativo refleja una relación inversa, sugiriendo que las precipitaciones previas podrían estar relacionadas con una disminución en el desplazamiento en meses posteriores.

3.4 Estadística descriptiva y procesos acumulados

Para evaluar la relación entre la precipitación y el desplazamiento del suelo en el período 2018-2023, se generaron gráficas de precipitación acumulada para cada estación

pluviométrica, utilizando dos variables: la precipitación del día más lluvioso en un intervalo de siete días (ΣPmax) y el promedio de precipitación durante los días lluviosos en ese mismo período (Σα). Estas variables se compararon con el desplazamiento total en siete días (Σd). Esto se hizo con el propósito de evaluar la relación no inmediata entre los picos de precipitación y el desplazamiento, analizar si evidentemente existe una correlación en un efecto acumulado, y observar la existencia de posibles rezagos temporales en la respuesta del desplazamiento a las precipitaciones intensas. Las gráficas de estadística descriptiva permitieron observar la dinámica temporal de los procesos erosivos, tanto desplazamiento como precipitación, donde la acumulación de agua prolongada en el tiempo podría estar influenciando la erosión, en lugar de eventos irregulares de lluvia.

4. Resultados y discusión

4.1 Patrones de precipitación

Los patrones de precipitación se establecieron mediante el promedio mensual entre los años 2018 y 2023. Las estaciones pluviométricas se encuentran distribuidas espacialmente como se muestra en el mapa de la Figura 21.

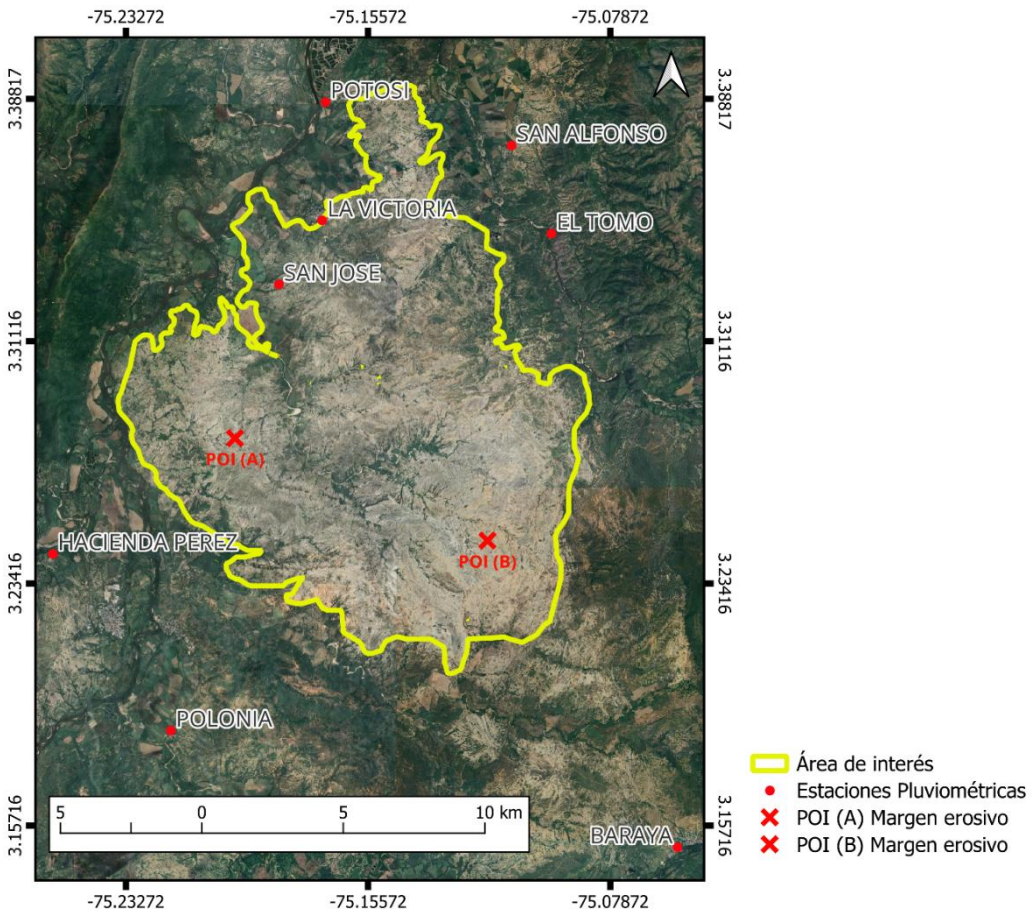


Figura 21. Mapa de ubicación de las estaciones pluviométricas y el POI de margen erosivo

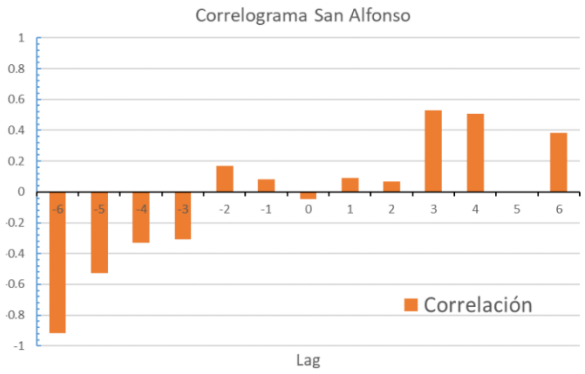
Figura 22. Gráficas de estaciones pluviométricas, las barras representan la precipitación (eje vertical) dada su distribución mensual (eje horizontal). Los puntos de color azul representan el promedio más el error estándar. Los puntos de color rojo representan el promedio menos el error estándar.

En la Figura 22 se observan las gráficas de precipitación en donde la mayoría de las estaciones muestran un aumento en la intensidad durante los meses de octubre y noviembre. Las estaciones San Alfonso, San José, y Hacienda Pérez fueron las que presentaron mayores acumulaciones durante estos meses, con precipitaciones que superan los 200 mm.

Los puntos azules y rojos que representan el error estándar máximo (azul) y mínimo (rojo), sugieren fluctuaciones en las precipitaciones de acuerdo a la temporada. En algunas como El Tomo, los errores estándar son más amplios, lo que indica una mayor inestabilidad en los registros de precipitación con posibles episodios de lluvias extremas y sequías irregulares.

4.2 Correlogramas cruzados de precipitación y desplazamiento vertical

El uso de correlogramas cruzados en el análisis de la erosión del suelo permitió entender la relación temporal entre las precipitaciones y los desplazamientos del suelo, especialmente en el cálculo de autocorrelaciones para los valores en diferentes lapsos de tiempo. Se identificaron patrones que varían para cada estación (Figura 23), revelando cómo los eventos de precipitación influyen de acuerdo a la espacialidad y la temporada del año en que se den. En un ecosistema semiárido como La Tatacoa, donde las lluvias son irregulares y de gran intensidad, los correlogramas cruzados proporcionan una visión clara de cómo las precipitaciones episódicas pueden estabilizar o desestabilizar los procesos de erosión del suelo.



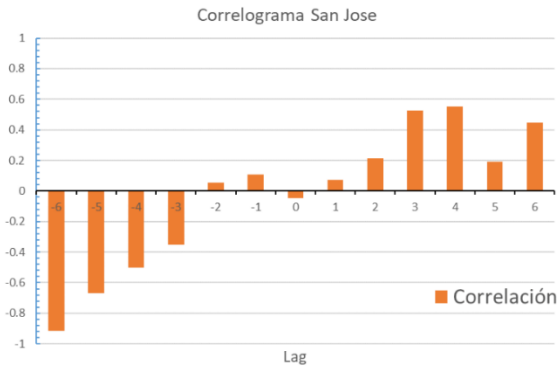


Figura 23. Correlogramas cruzados para cada estación pluviométrica.

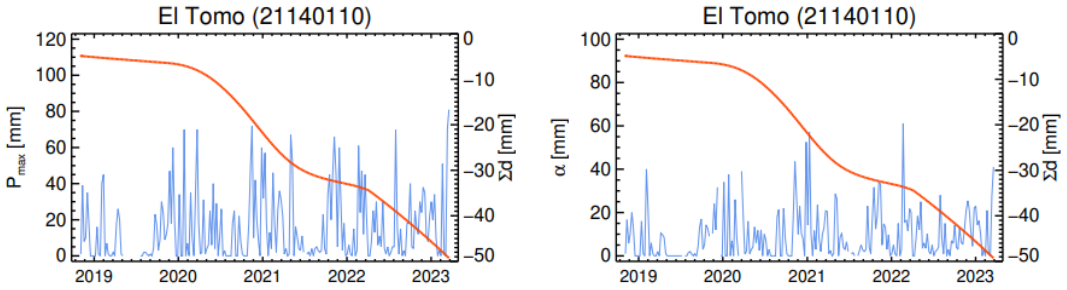
La Figura 23 muestra los nueve correlogramas, en donde el eje vertical expresa la correlación entre los promedios mensuales de precipitación y desplazamiento, mientras que el eje horizontal muestra el retraso (*lags*). Se aplicaron retrasos que van de enero a diciembre. En los retrasos negativos (de enero a junio), la mayoría de las estaciones muestran una tendencia negativa, esto sugiere que las lluvias de marzo, abril y mayo correlacionadas negativamente con los desplazamientos de junio, julio y agosto, sugiriendo

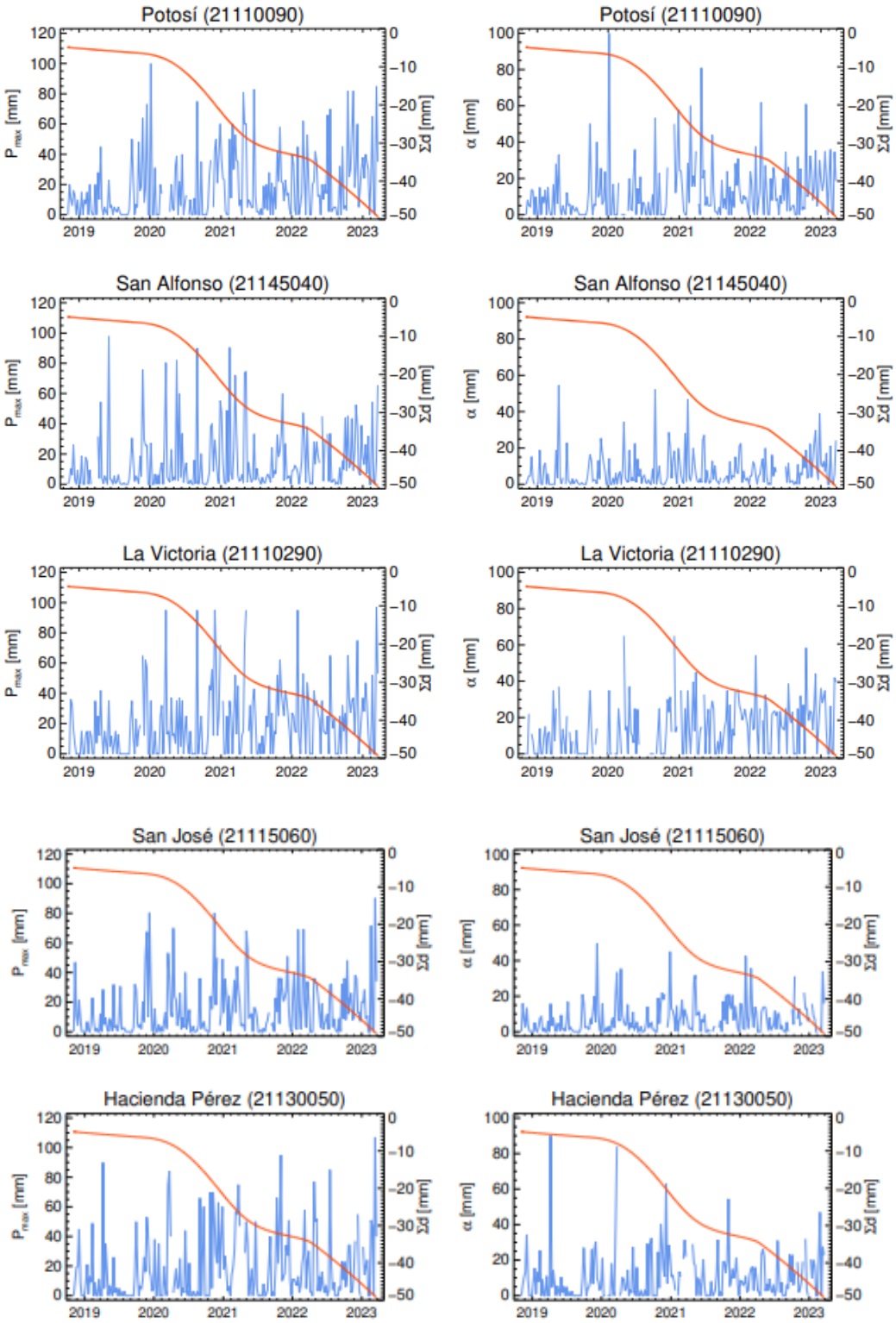
que a medida que la precipitación aumento el desplazamiento disminuye. Cuando no hay retraso, la correlación en todas las estaciones es cercana a cero (no hay correlación), lo que indica una falta o nula relación inmediata entre precipitación y desplazamiento en el mismo mes.

Por otro lado, en los retrasos positivos (de junio a diciembre) se observa un aumento en la correlación especialmente en las lluvias de octubre y noviembre, como por ejemplo en las estaciones San Jose, Hacienda Perez, y El Tomo, lo que sugiere que estos eventos de lluvia intensa provocan desplazamientos del suelo en los meses siguientes (3 a 4 meses). Este patrón es consistente con la dinámica de erosión en zonas semiáridas, donde las lluvias episódicas pueden generar desplazamientos a medida que el suelo se socave (como era de esperarse).

4.3 Estadística descriptiva

En contraste con los resultados obtenidos a partir de los correlogramas, el análisis de la estadística descriptiva no muestra una correlación entre la precipitación y el desplazamiento del suelo acumulado utilizando datos semanales. Es decir, no se detecta una relación clara entre los niveles de precipitación y la erosión entre el 2018 y 2023 (Figura 24). Sin embargo, al observar la curva de desplazamiento semanal discretizada (Figura 25), se puede identificar que el pico de erosión registrado en 2021, que comienza en 2020 y finaliza en 2022, coincide con el fenómeno de La Niña (ver datos en la página The Climate Prediction Center, 2024; https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php).




Potosí (21110090)
Potosí (21110090)
San Alfonso (21145040)
San Alfonso (21145040)
La Victoria (21110290)
La Victoria (21110290)
San José (21115060)
San José (21115060)
Hacienda Pérez (21130050)
Hacienda Pérez (21130050)
P_max [mm]
α [mm]
Σd [mm]
2019
2020
2021
2022
2023

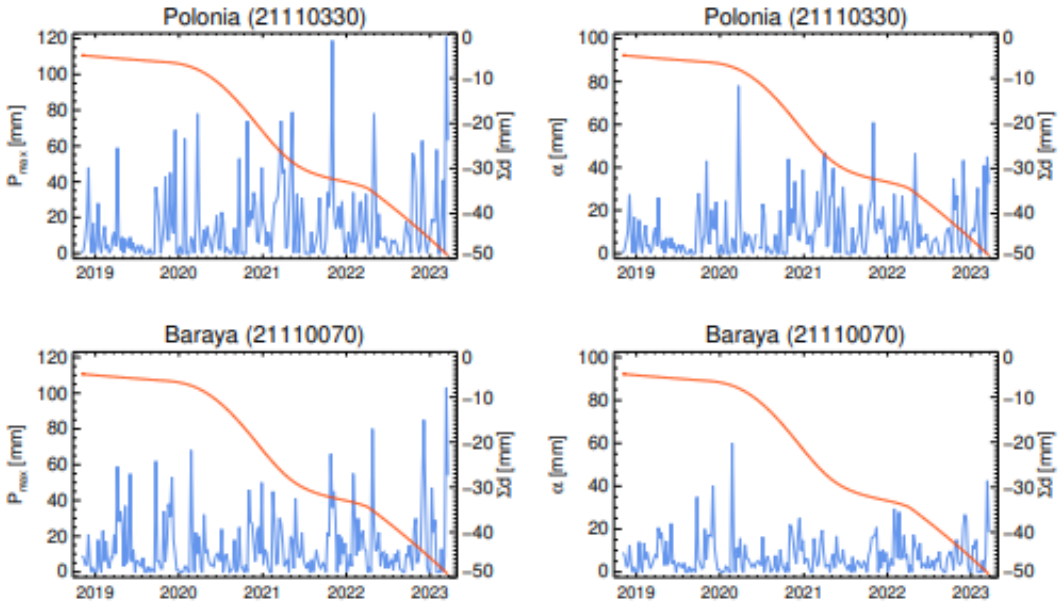
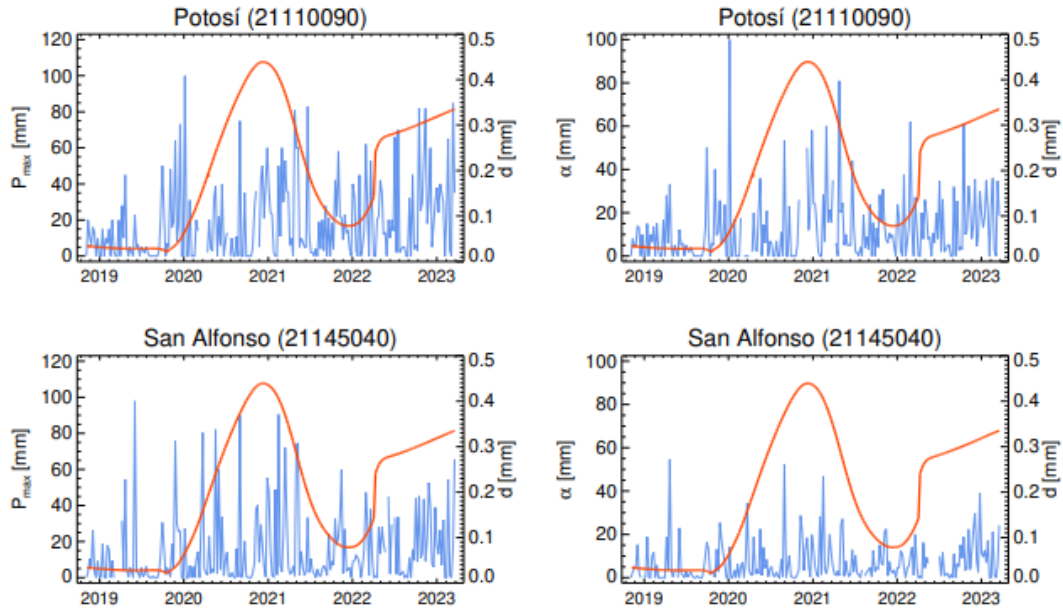
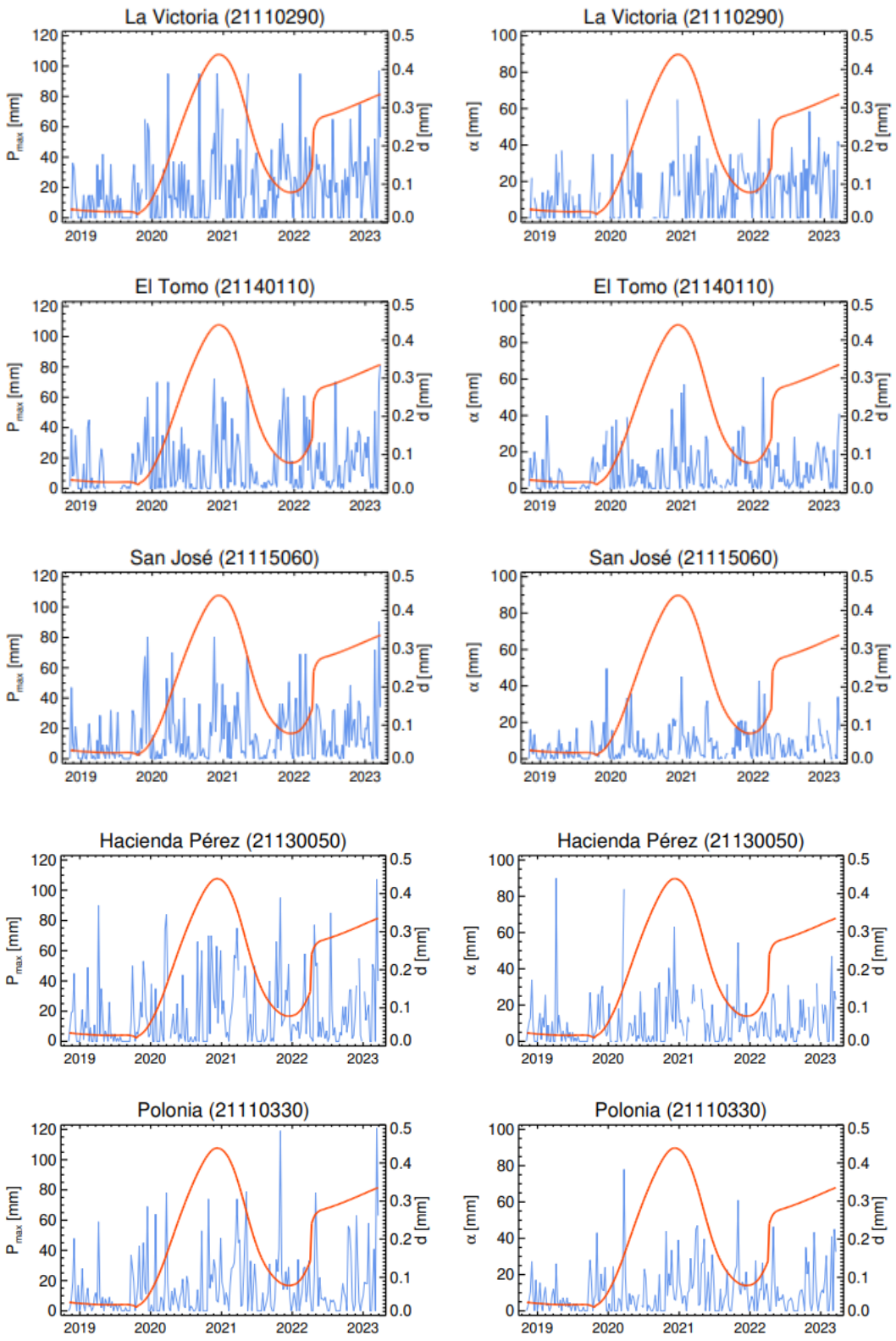


Figura 24. Gráficas de precipitación total y desplazamiento acumulado por estación pluviométrica. Las gráficas de la izquierda corresponden a precipitaciones del día más lluvioso en siete días, mientras que las gráficas de la derecha corresponden a promedios de precipitación de días con lluvia.




La Victoria (21110290)
La Victoria (21110290)
El Tomo (21140110)
El Tomo (21140110)
San José (21115060)
San José (21115060)
Hacienda Pérez (21130050)
Hacienda Pérez (21130050)
Polonia (21110330)
Polonia (21110330)
P_max [mm]
α [mm]
d [mm]
2019
2020
2021
2022
2023

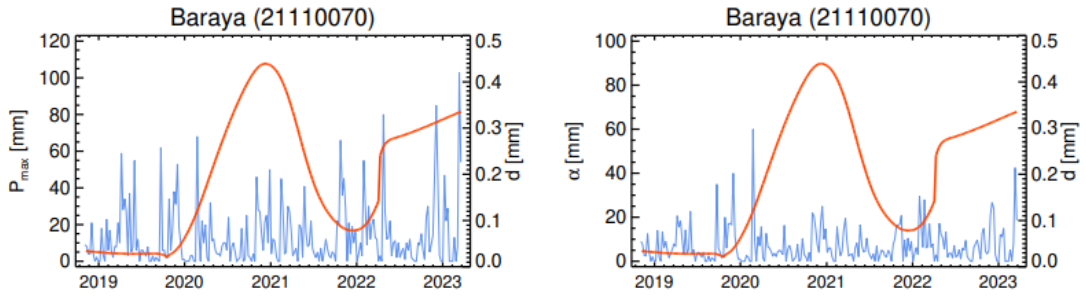


Figura 25. Gráficas de desplazamiento semanal diferenciado.

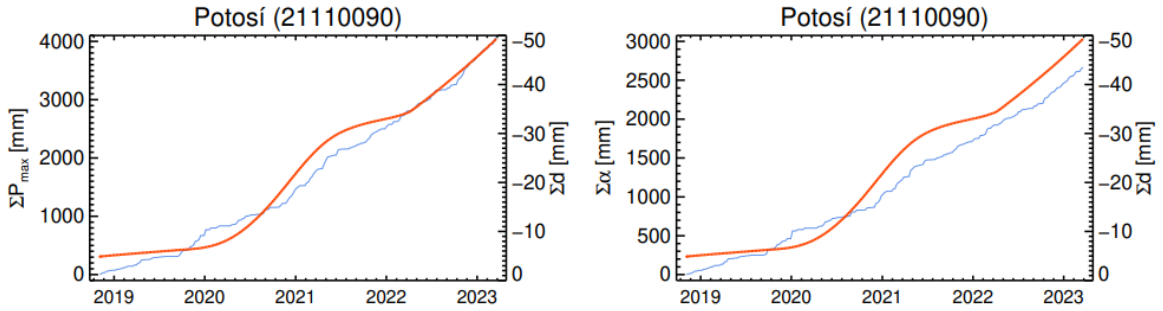
En regiones secas o semiáridas, el fenómeno de La Niña suele estar asociado con un aumento inusual de las lluvias, que, debido a la escasez de vegetación y la baja cohesión de los suelos, puede generar picos de erosión cuando las precipitaciones son intensas y concentradas en cortos períodos de tiempo (*e.g.*, Nicholls, 2004). Aunque este estudio no permite establecer una correlación clara entre precipitación y erosión con datos de resolución semanal, es posible hipotetizar que ambos procesos tienen estacionalidades diferentes y, por consiguiente, no están acoplados. La erosión podría estar más relacionada con fenómenos climáticos interanuales como La Niña, donde el proceso acumulativo de 1-3 años, genera los picos de erosión por efecto de acumulación de agua en suelos poco cohesionados y con poca infiltración. Además, durante la transición de la sequía a la temporada de lluvias, el impacto directo de las gotas sobre el suelo desnudo puede iniciar procesos de erosión laminar o en surcos, particularmente en áreas con pendientes. En estos casos, la escorrentía aumenta su velocidad conforme desciende, acelerando la erosión y transportando grandes cantidades de sedimentos a los cuerpos de agua cercanos, tal como lo describe Dill *et al.* (2020). Por esta razón, la erosión en zonas de surcos podría estar cercana a los 30mm/año, como se discutió en el Capítulo 1.

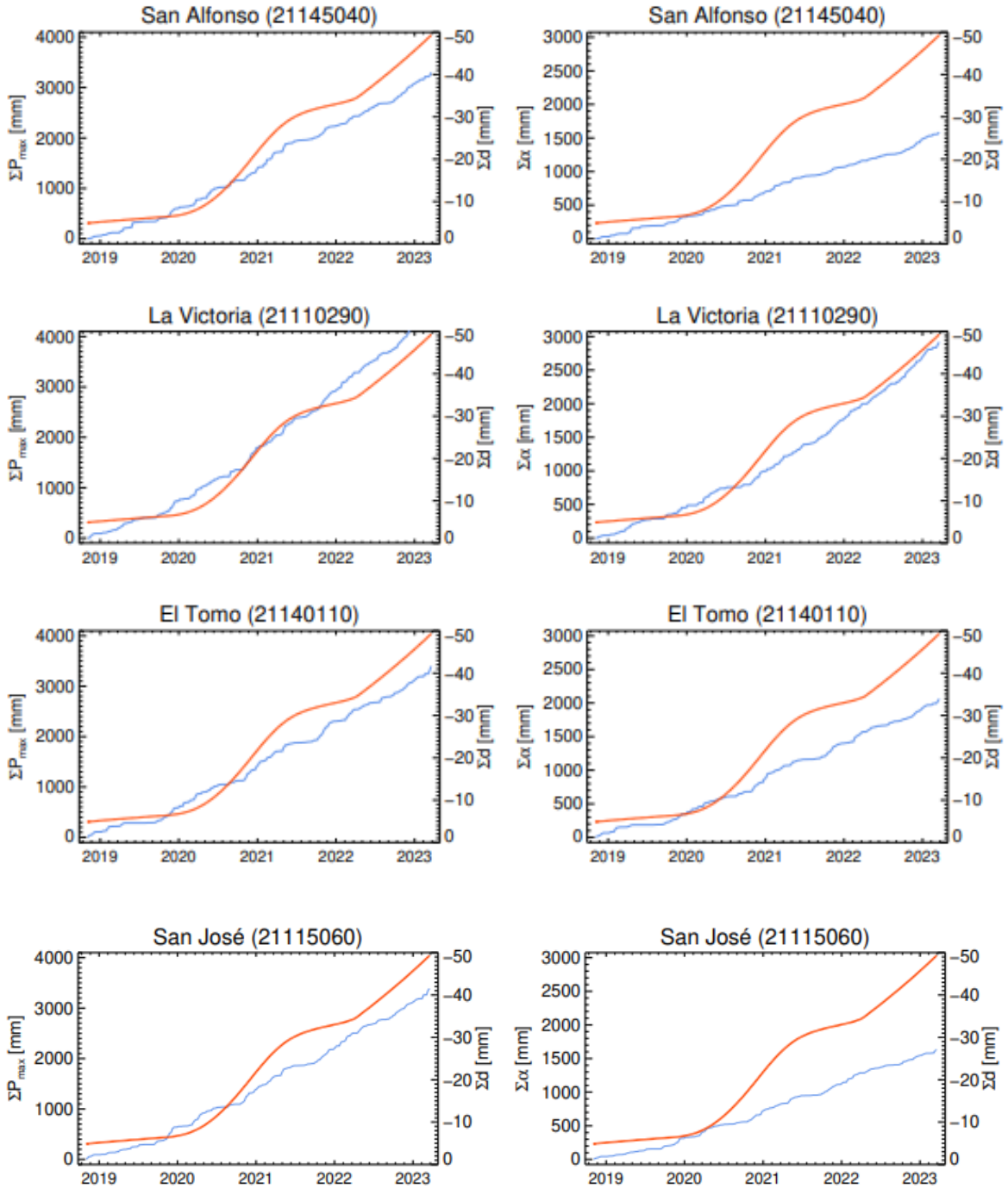
4.4 Precipitación y desplazamiento acumulado

Se obtuvieron gráficas de precipitación acumulada para cada estación pluviométrica, definidas por la precipitación del día más lluvioso en siete días (ΣPmax) y el promedio de precipitación de solo los días lluviosos en siete días (Σα). Ambas variables se compararon con la curva de desplazamiento representada como el desplazamiento total en siete días (Σd) (Figura 26).

La curva de desplazamiento acumulado presenta una pendiente pronunciada entre los años 2020 y 2022, indicando un incremento sostenido en el desplazamiento siguiendo un patrón regular, mientras que la curva de precipitación acumulada (azul) presenta fluctuaciones a escalas más pequeñas entre los meses del año, probablemente debido a la influencia de eventos extremos de lluvia.

A medida que la precipitación se acumula, el desplazamiento también aumenta, aunque la respuesta del desplazamiento parece tener un rezago en relación con los picos de precipitación. En las gráficas de precipitación del día más lluvioso, por ejemplo, los eventos extremos de lluvia no generan un aumento inmediato en el desplazamiento, pero contribuyen a una acumulación. En cambio, en las gráficas de promedio de precipitación, donde las precipitaciones son más suavizadas, el desplazamiento sigue un patrón más consistente, lo que sugiere que el desplazamiento está más influenciado por la precipitación acumulada en el largo plazo que por eventos puntuales.




San Alfonso (21145040)
San Alfonso (21145040)
La Victoria (21110290)
La Victoria (21110290)
El Tomo (21140110)
El Tomo (21140110)
San José (21115060)
San José (21115060)
ΣP_max [mm]
Σα [mm]
Σd [mm]
2019
2020
2021
2022
2023

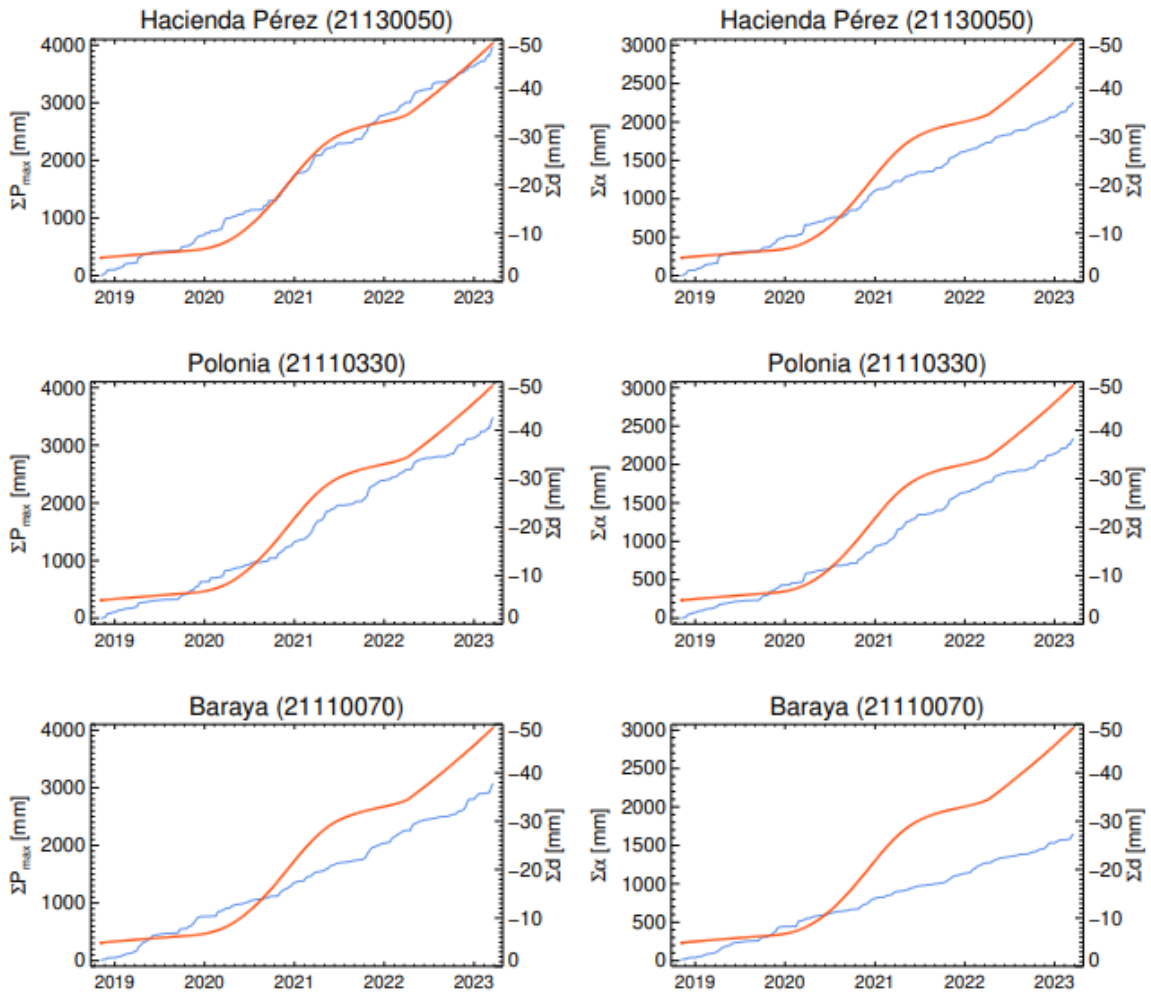


Figura 26. Gráficas de precipitación y desplazamiento acumulado.

Este análisis sugiere que, aunque los eventos de extrema lluvia contribuyen a la acumulación de agua en el suelo, es la precipitación acumulada a lo largo del tiempo la que tiene una mayor influencia en el desplazamiento. Este patrón es particularmente claro en el periodo 2020-2022, cuando la inclinación pronunciada de la curva de desplazamiento refleja el efecto de un umbral crítico de acumulación que desencadena los eventos máxima erosión.

5. Conclusiones

A partir de los correlogramas cruzados se interpretó que no hay correlación (cercana a cero) entre las precipitaciones y los valores de desplazamiento. Sin embargo, al evaluar la

temporalidad mediante retrasos (*lags*) entre estas dos variables, fue posible observar una correlación positiva entre la lluvia y la erosión con un retraso de 3 a 4 meses solo para la lluvia de los meses de octubre y noviembre. Por otro lado, los *lags* negativos muestran una correlación negativa del desplazamiento ocurrido en junio, julio y agosto, respecto a la temporada de lluvia de marzo, abril y mayo. Esto es una paradoja y podría estar indicando un desacoplamiento en la estacionalidad de la lluvia y la erosión. Se podría hipotetizar a partir de la estadística descriptiva, una estacionalidad de erosión más ligada a procesos acumulativos durante el fenómeno de La Niña ocurrido entre el 2020 y 2022. Puesto que el pico de erosión evidenciado en el 2021, pudo darse debido a la escasa infiltración de estos suelos secos, la falta de vegetación protectora, y el impacto acumulativo de lluvias intensas y recurrentes.

Esto nos indica que el análisis de precipitación y desplazamiento acumulado muestra que, aunque los eventos de extrema lluvia no provocan un aumento inmediato en el desplazamiento, la acumulación de precipitaciones, especialmente entre el 2020 y el 2022, es el factor más determinante en los incrementos de desplazamiento. Sugiriendo que los procesos de desplazamiento y erosión están más influenciados por la acumulación prolongada de agua que por eventos de lluvia aislados.

También podría estar mostrando las limitaciones de la metodología, particularmente en relación con el tipo de suelo, cuya permeabilidad y tolerancia a la erosión, pueden influir en la precisión de los resultados y de los correlogramas. Los suelos con diferentes texturas reaccionan de manera diversa frente a las precipitaciones, lo que puede influir en la correlación. Aun así, la integración de la técnica SBAS InSAR con el análisis estadístico de las precipitaciones representa un avance en la investigación de la erosión del suelo, al permitir cuantificar y por consiguiente comparar directamente con variables climáticas.

Referencias bibliográficas

Anderson, V. J., Horton, B. K., Saylor, J. E., Mora, A., Tesón, E., Breecker, D. O., & Ketcham, R. A. (2016). Andean topographic growth and basement uplift in southern Colombia: Implications for the evolution of the Magdalena, Orinoco, and Amazon River systems. *Geosphere* 54(12), (p. 1235-1256). https://doi.org/10.1130/ges01294.1

Beniaich, A., Guimarães, D. V., Avanzi, J. C., Silva, B. M., Acuña-Guzman, S. F., dos Santos, W. P., & Silva, M. L. N. (2023). Spontaneous vegetation as an alternative to cover crops in olive orchards reduces water erosion and improves soil physical properties under tropical conditions. Agricultural Water Management, 279, (p. 108186). https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108186

Bai, Z., Wang, Y., Fang, S., Liu, X., Gao, M., & Zhang, Z. (2022). Detecting seasonal and trend components in PS-InSAR displacement time series. *Geocarto International* 37(27), (p. 16212–16231). httpsdoi.org10.108010106049.2022.2106316

Bewket, W., & Teferi, E. (2009). Assessment of soil erosion hazard and prioritization for treatment at the watershed level: Case study in the Chemoga watershed, Blue Nile basin, Ethiopia. *Land Degradation & Development* 12(20), (p. 609-622).

Braun, A. (2021). Retrieval of digital elevation models from Sentinel-1 radar data – open applications, techniques, and limitations. *Open Geosciences* 2(13), (p. 532-569). https://doi.org/10.1515/geo-2020-0246

Butler, K., & Schamel, S. (1988). Structure along the eastern margin of the central Cordillera, upper Magdalena Valley, Colombia. *Journal of South American Earth Sciences* 23(1), (p. 109-120). https://doi.org/10.1016/0895-9811(88)90019-3

Caballero, V., Parra, M., Mora, A., López, C., Rojas, L. E., & Quintero, I. (2013). Factors controlling selective abandonment and reactivation in thick-skin orogens: a case study in the Magdalena Valley, Colombia. *Geological Society Special Publication* 377(8), (p. 343-367). https://doi.org/10.1144/sp377.4

Cavalié, O., Sladen, A., & Kelner, M. (2015). Detailed quantification of delta subsidence, compaction and interaction with man-made structures: the case of the NCA airport, France. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 15(9), (p. 1973-1984). https://doi.org/10.5194/nhess-15-1973-2015

Cediel, F., Shaw, R. P., & Caceres, C. (2003). Tectonic assembly of the Northern Andean Block. In: C. Bartolini, R. T. Buffler, & J. Blickwede (Eds), The Circum-Gulf of Mexico and the Caribbean: Hydrocarbon habitats, basin formation, and plate tectonics (p. 815–848). Bogotá. AAPG Memoir.

Chaturvedi, R. K., Tripathi, A., Raghubanshi, A. S., & Singh, J. S. (2021). Functional traits indicate a continuum of tree drought strategies across a soil water availability gradient in a tropical dry forest. *Forest Ecology and Management* 482(1), (p. 118740). https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118740

Chen, F., Lin, H., & Hu, X. (2014). Slope superficial displacement monitoring by small baseline SAR interferometry using data from L-band ALOS PALSAR and X-band TerraSAR: A case study of Hong Kong, China. *Remote Sensing* 6(1), (p. 1564-1586). https://doi.org/10.3390/rs6021564

Chen, X., Wang, Y., Chen, Y., Fu, S., & Zhou, N. (2023). NDVI-Based Assessment of Land Degradation Trends in Balochistan, Pakistan, and Analysis of the Drivers. *Remote Sensing* 3(15), (p. 2388).

Cleveland, R. B., Cleveland, W. S., McRae, J. E., & Terpenning, I. (1990). STL: A Seasonal-Trend Decomposition Procedure Based on Loess. *Journal of Official Statistics* 6 (1), (p. 33-73).

Corporación Autónoma Regional del Alto Magdalena - CAM (2015). *Plan de manejo ambiental distrito regional de manejo integrado - DRMI La Tatacoa*. https://www.cam.gov.co/media/filer_public/f8/fa/f8fa3418-e944-49c6-8101-cf277f0c543b/pma_drmi_tatacoa.pdf

Dill, H. G., Andrei, B., Sorin-Ionut, B., Kristian, U., Jorge, G. T., Daniel, B., & Thomas, C. (2020). The “badland trilogy” of the Desierto de la Tatacoa, upper Magdalena Valley,

Colombia, a result of geodynamics and climate: With a review of badland landscapes. *Catena* 194(1), (p. 104696). https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104696

Duarte, E. (2018). Provenance and diagenesis from two stratigraphic sections of the lower cretaceous Caballos formation in the upper Magdalena valley: Geological and reservoir quality implications. *CT&F* 33(8), (p. 5-29). https://doi.org/10.29047/01225383.101

Fields, R.W., 1959. Geology of the La Venta Badlands Colombia, South America. Uni. California. *Pub. Geol. Sci.* 6*,* (p. 405–444).

Figueroa, G., & Galeano, G. (2007). Lista comentada de las plantas vasculares del enclave seco interandino de La Tatacoa (Huila, Colombia). *Caldasia* 29(2*)*, (p. 263-281).

Flanagan D.C., Gilley J.E., Franti T.G. (2007). Water erosion prediction project (WEPP): development history, model capabilities, and future enhancements. *American Society of Agricultural and Biological Engineers* 50(5), (p.1603-1612)

Gabriel, A. K., Goldstein, R. M., & Zebker, H. A. (1989). Mapping Small Elevation Changes Over Large Areas' Differential Radar Interferometry. *Journal of Geophysical Research* 94(3), (p. 9183-9191).

Goldstein, R. M., & Werner, C. L. (1998). Radar interferogram filtering for geophysical applications. *Geophysical Research Letters* 25, (p. 4035-4038). https://doi.org/10.1029/1998gl900033

Goudie, A. S. (2013). *Arid and Semi-Arid Geomorphology*. New York. Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/cbo9780511794261

Guerrero, J. (1997). *Vertebrate Paleontology in the Neotropics: The Miocene Fauna of La Venta, Colombia*. In: Kay, R. F., Madden, R. H., & Cifelli, R. L., Flynn J.J. (Eds), Vertebrate Paleontology in the Neotropics: The Miocene Fauna of La Venta, Colombia. Smithsonian Institution Press. Washington DC. (p. 15-43)

Hanssen, R. F. (2001). *Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis*. Zurich. Kluwer Academic. https://doi.org/10.1007/0-306-47633-9

Hermelin, M. (2016). *Landscapes and landforms of Colombia*. Medellín. Springer International Publishing.

Hrysiewicz, A., Holohan, E. P., Donohue, S., & Cushnan, H. (2023). SAR and InSAR data linked to soil moisture changes on a temperate raised peatland subjected to a wildfire. *Remote Sensing of Environment* 291(4), (p. 113516). https://doi.org/10.1016/j.rse.2023.113516

Huggett, R., & Shuttleworth, E. (2022). *Fundamentals of geomorphology*. Londres. Routledge.

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM (2015). Sistema de Información para la gestión de datos Hidrológicos y Meteorológicos – DHIME [Base de datos]. In *AQUARIUS web portal*. https://ideam.aqsamples.com/login

Jiang, C., Fan, W., Yu, N., & Nan, Y. (2021). A new method to predict gully head erosion in the Loess Plateau of China based on SBAS-InSAR. *Remote Sensing* 3(13), (p. 421). https://doi.org/10.3390/rs13030421

Jiang, Z., Huete, A. R., Chen, J., Chen, Y., Li, J., Yan, G., & Zhang, X. (2006). Analysis of NDVI and scaled difference vegetation index retrievals of vegetation fraction. *Remote Sensing of Environment* 101(25), (p. 366-378). https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.01.003

Kay, R. F., & Madden, R. H. (1997). Mammals and rainfall: paleoecology of the middle Miocene at La Venta (Colombia, South America). *Journal of Human Evolution* 32(3) (p. 161-199). https://doi.org/10.1006/jhev.1996.0104

Kou, P., Xu, Q., Jin, Z., Tao, Y., Yunus, A. P., Feng, J., Pu, C., Yuan, S., & Xia, Y. (2024). Analyzing gully erosion and deposition patterns in loess tableland: Insights from small baseline subset interferometric synthetic aperture radar (SBAS InSAR). *The Science of the Total Environment* 916, (p. 169873). https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.169873

Kumar, B. P., Babu, K. R., Anusha, B. N., & Rajasekhar, M. (2022). Geo-environmental monitoring and assessment of land degradation and desertification in the semi-arid

regions using Landsat 8 OLI / TIRS, LST, and NDVI approach. *Environmental Challenges* 8, (p. 100578). https://doi.org/10.1016/j.envc.2022.100578

Li, S., Xu, W., & Li, Z. (2022). Review of the SBAS InSAR Time-series algorithms, applications, and challenges. *Geodesy and Geodynamics* 13, (p. 114-126). https://doi.org/10.1016/j.geog.2021.09.007

Londono, J., Lorenzo, J. M., & Ramirez, V. (2012). Lithospheric flexure and related base-level stratigraphic cycles in continental foreland basins: An example from the Putumayo Basin, Northern Andes. *Tectonics and sedimentation: Implications for petroleum systems: AAPG Memoir 100* (p. 357 – 375).

Lu, J., Qin, T., Yan, D., Lv, X., Yuan, Z., Wen, J., Xu, S., Yang, Y., Feng, J., & Li, W. (2024). Response of vegetation to drought in the source region of the Yangtze and yellow rivers based on causal analysis. *Remote Sensing* 16(5), (p. 630). https://doi.org/10.3390/rs16040630

Lv, Z., Li, S., Xu, X., Lei, J., & Peng, Z. (2024). Wind erosion caused by the change of Chaiwopu lake on the northern foothill of Tianshan Mountain, based on SBAS-InSAR. *Catena* 234(3), (p. 107575). https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107575

Massonnet, D., & Feigl, K. L. (1998). Radar interferometry and its application to changes in the Earth's surface. *Reviews of Geophysics* 36(4), (p.441–500). https://doi.org/10.1029/97rg03139

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2021). *Programa Nacional para la Conservación y Restauración del Bosque Seco Tropical en Colombia*. https://www.minambiente.gov.co/direccion-de-bosques-biodiversidad-y-servicios-ecosistemicos/bosque-seco-tropical/

Mojica, J. & Franco, R. (1990): Estructura y Evolución Tectónica del Valle Medio y Superior del Magdalena. *Geología Colombiana* 17(6), (p. 41-64).

Montandon, L., & Small, E. (2008). The impact of soil reflectance on the quantification of the green vegetation fraction from NDVI. *Remote Sensing of Environment* 112, (p. 1835-1845). https://doi.org/10.1016/j.rse.2007.09.007

Montes, C., Silva, C. A., Bayona, G. A., Villamil, R., Stiles, E., Rodriguez-Corcho, A. F., Beltran-Triviño, A., Lamus, F., Muñoz-Granados, M. D., Pérez-Angel, L. C., Hoyos, N., Gomez, S., Galeano, J. J., Romero, E., Baquero, M., Cardenas-Rozo, A. L., & von Quadt, A. (2021). A middle to late Miocene trans-Andean portal: Geologic record in the Tatacoa Desert. *Frontiers in Earth Science* 8. https://doi.org/10.3389/feart.2020.587022

Mora, A., Reyes-Harker, A., Rodriguez, G., Tesón, E., Ramirez-Arias, J. C., Parra, M., Caballero, V., Mora, J. P., Quintero, I., Valencia, V., Ibañez, M., Horton, B. K., & Stockli, D. F. (2013). Inversion tectonics under increasing rates of shortening and sedimentation: Cenozoic example from the Eastern Cordillera of Colombia. *Geological Society Special Publication* 377, (p. 411-442). https://doi.org/10.1144/sp377.6

Nicholls, N. (2004). The changing nature of Australian droughts. *Climatic Change* 63(3), (p. 323-336). https://doi.org/10.1023/b:clim.0000018515.46344.6d

Ortiz-Palma, N. H., & Mayor-Polania, R. (2013). Identificación y descripción del avance del proceso de desertificación en el ecosistema estratégico desierto de La Tatacoa. Periodo: 1975 a 1993. *Ingeniería y Región* 10(3), (p.149-158).

Pereira, P., Muñoz-Rojas, M., Bogunovic, I., & Zhao, W. (Eds.). (2023). *Impact of agriculture on soil degradation I: Perspectives from Africa, Asia, America and Oceania* (1st ed.). Cham. Springer International Publishing.

Poveda-Coronel, C. A., Riaño-Jiménez, D., & Cure, J. R. (2018). Diversity and phenology of wild bees in a highly disturbed tropical dry forest “desierto de la Tatacoa”, huila-Colombia. *Neotropical Entomology* 47(8), (p. 786-790). https://doi.org/10.1007/s13744-017-0578-z

Qi, L., Shi, P., Dvorakova, K., Van Oost, K., Sun, Q., Yu, H., & van Wesemael, B. (2023). Detection of Soil Erosion Hotspots in the Croplands of a Typical Black Soil Region in Northeast China: Insights from Sentinel-2 Multispectral Remote Sensing. *Remote Sens* 15(1), (p. 1402).

Renard K.G., Foster, G.A., Weesies, D.K., McCool D.C. (1997) Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). *Agriculture Hand-book* 19 (p.3).

Rodrigues, V. S., do Valle Júnior, R. F., Sanches Fernandes, L. F., & Pacheco, F. A. L. (2019). The assessment of water erosion using Partial Least Squares-Path Modeling: A study in a legally protected area with environmental land use conflicts. *The Science of the Total Environment* 691(1), (p. 1225-1241). https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.07.216

Rojas-Marín, C. A., Pérez-Gómez, U., & Fernández-Méndez, F. (2019). Dinámica espaciotemporal de los procesos de desertificación y revegetalización natural en el enclave seco de La Tatacoa, Colombia. *Cuadernos de Geografía Revista Colombiana de Geografía* 28(1), (p. 134-151). https://doi.org/10.15446/rcdg.v28n1.63130

Sánchez-Ospina, C.M., Salazar-Jaramillo, S. (2024). Geospatial repository. Figshare. Journal Contribution. https://doi.org/10.6084/m9.figshare.27161865.v1

Sarmiento-Rojas, L. F., Van Wess, J. D., & Cloetingh, S. (2006). Mesozoic transtensional basin history of the Eastern Cordillera, Colombian Andes: Inferences from tectonic models. *Journal of South American Earth Sciences* 4(21), (p. 383-411). https://doi.org/10.1016/j.jsames.2006.07.003

Sarmiento Rojas, L. F. (2002). Mesozoic rifting and Cenozoic basin inversion - History of the Eastern Cordilelra, Combian Andes. Inferences from tectonic models. [PhD-Thesis - Research and graduation internal, Vrije Universiteit Amsterdam]. Netherlands Research School of Sedimentary Geology (NSG).

Servicio Geológico Colombiano (2013). *Memoria explicativa del mapa geomorfológico aplicado a movimientos en masa escala 1:100.000 plancha 323 – Neiva, departamento de Huila*. https://catalogo.sgc.gov.co/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=73612.

Shojaeezadeh, S. A., Al-Wardy, M., Nikoo, M. R., Mooselu, M. G., Alizadeh, M. R., Adamowski, J. F., Moradkhani, H., Alamdari, N., & Gandomi, A. H. (2024). Soil erosion in the United States: Present and future (2020–2050). *Catena* 242(2), (p.108074). https://doi.org/10.1016/j.catena.2024.108074

Skidmore, E. L. (1982). Soil Loss Tolerence. In Schmidt B. L., Allmaras R. R., Mannering J. V., Papendick R. I. (Eds.), *Determinants of Soil Loss Tolerance*. Madison. ASA Special Publications.

Suescún, D., Villegas, J. C., León, J. D., Flórez, C. P., García-Leoz, V., & Correa-Londoño, G. A. (2017). Vegetation cover and rainfall seasonality impact nutrient loss via runoff and erosion in the Colombian Andes. *Regional Environmental Change* 17*,* (p. 827-839). https://doi.org/10.1007/s10113-016-1071-7

Sui, X., Lin, C., & Zhou, S. (2012). Spatial Decision Analysis on Soil Erosion Control Measures Research Based on GIS [Conference paper]. *Third World Congress on Software Engineering*. Nanjing, China. DOI: 10.1109/WCSE.2012.29

The Climate Prediction Center - CPC (2024). Cold & Warm Episodes by Season [Base de datos]. In National Weather Service web portal. https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php

Vargas, G., León, N., Hernández, Y. (2019). Agricultural Socio-economic Effects in Colombia due to Degradation of Soils. In: Meena, R., Kumar, S., Bohra, J., Jat, M. (Eds), *Sustainable Management of Soil and Environment*. Singapore. Springer. https://doi.org10.1007978-981-13-8832-3

Veloza, G. E., Mora, A., De Freitas, M., & Mantilla, M. (2008). Dislocación de facies en el tope de la secuencia Cretácica de la subcuenca de Neiva, Valle Superior del Magdalena y sus implicaciones en el modelo estratigráfico secuencial colombiano. *Boletín de Geología* 30(1). http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=349632019003

Villaroel, C., Brieva, J., & Cadena, A. (1996). La Fauna de Mamíferos Fósiles del Pleistoceno de Jutua, Municipio de Soata (Boyaca, Colombia). *Geología Colombiana* 21, (p. 81-87).

Wang, J., Zhen, J., Hu, W., Chen, S., Lizaga, I., Zeraatpisheh, M., & Yang, X. (2023). Remote sensing of soil degradation: Progress and perspective. *International Soil and Water Conservation Research* 87(11), (p.429-454). https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2023.03.002

Wellman, S.S., 1970. Stratigraphy and Petrology of the Nonmarine Honda Group (Miocene), Upper Magdalena Valley, Colombia. *GSA Bull* 7(81), (p.2353–2374).

Wischmeier, W. H., & Smith, D.D. (1978). Predicting rainfall erosion losses, a guide to conservation planning. New York. *U.S. Department of Agriculture, Agriculture Handbook*.

Xu, J., Tang, Y., Xu, J., Chen, J., Bai, K., Shu, S., Yu, B., Wu, J., & Huang, Y. (2022). Evaluation of vegetation indexes and green-up date extraction methods on the Tibetan Plateau. *Remote Sensing* 125(14), (p. 3160). https://doi.org/10.3390/rs14133160

Zucca, C., Canu, A., & Della Peruta, R. (2007). *Gully Erosion, Landuse and Landscape. Spatial Distribution and Morphological Features of Gullies in an Agropastoral Area*. Università di Sassari.

Anexos

Anexo 1

Sensor	Fecha de adquisición (día/mes/año)	Modo de imagen	Resolución (m) (Range × Azimuth)	Polarización
Sentinel-1	31/10/2018 12/11/2018 24/11/2018 6/12/2018 18/12/2018 30/12/2018 11/01/2019 23/01/2019 4/02/2019 16/02/2019 12/03/2019 24/03/2019 17/04/2019 29/04/2019 11/05/2019 23/05/2019 4/06/2019 16/06/2019 28/06/2019 10/07/2019 22/07/2019 3/08/2019 15/08/2019 27/08/2019 8/09/2019 20/09/2019 2/10/2019 14/10/2019 26/10/2019 7/11/2019 19/11/2019 1/12/2019 13/12/2019 25/12/2019 6/01/2020 18/01/2020 30/01/2020 11/02/2020	IW (Interferometric wide swath)	2.3 × 14	VH + VV

23/02/2020
6/03/2020
18/03/2020
30/03/2020
11/04/2020
23/04/2020
5/05/2020
17/05/2020
29/05/2020
10/06/2020
22/06/2020
4/07/2020
16/07/2020
22/07/2020
28/07/2020
9/08/2020
21/08/2020
2/09/2020
14/09/2020
26/09/2020
8/10/2020
20/10/2020
1/11/2020
13/11/2020
25/11/2020
7/12/2020
19/12/2020
31/12/2020
12/01/2021
24/01/2021
17/02/2021
1/03/2021
13/03/2021
25/03/2021
6/04/2021
18/04/2021
30/04/2021
12/05/2021
24/05/2021
5/06/2021
17/06/2021
29/06/2021
11/07/2021
23/07/2021
4/08/2021
16/08/2021
28/08/2021

	9/09/2021 21/09/2021 3/10/2021 15/10/2021 27/10/2021 8/11/2021 20/11/2021 2/12/2021 14/12/2021 14/03/2022 26/03/2022 7/04/2022 19/04/2022 1/05/2022 25/05/2022 6/06/2022 18/06/2022 12/07/2022 24/07/2022 5/08/2022 17/08/2022 29/08/2022 10/09/2022 22/09/2022 4/10/2022 16/10/2022 28/10/2022 9/11/2022 21/11/2022 3/12/2022 15/12/2022 27/12/2022 8/01/2023 20/01/2023 1/02/2023 13/02/2023 25/02/2023 9/03/2023 21/03/2023			
ALOS PALSAR	21/04/2011	Stripmap	12.5 × 12.5	-
Sentinel-2	31/12/2023	MSI (Multispectral instrument)	10 × 10	-