

Anexos

Anexos Actividad 12: Estrategias de teledetección para la detección y monitoreo de movimientos en masa en el Valle de Aburrá

Resumen

Los movimientos en masa pueden resultar en numerosas pérdidas de vidas y grandes pérdidas económicas en regiones montañosas. El área metropolitana de la ciudad de Medellín se encuentra en un valle interandino conocido como el Valle de Aburrá, el cual acoge el segundo centro urbano más poblado en Colombia. Sin embargo, gran parte de su perímetro urbano y los suburbios aledaños, se encuentran en zonas de ladera de mediana y alta pendiente, susceptibles a la ocurrencia de movimientos en masa. La rápida y no planeada ocupación de las zonas susceptibles del valle, ha resultado en la pérdida de vidas humanas y la evacuación de barrios enteros.

Con el objetivo de analizar el riesgo asociado a los movimientos en masa, se evalúa el uso de técnicas de teledetección con imágenes satelitales para el monitoreo de movimientos en masa en el marco del Sistema de Alertas Tempranas de Medellín y el Valle de Aburrá (SIATA) como proyecto estratégico del Área Metropolitana del Valle de Aburrá (AMVA). Se plantearon diferentes estrategias de detección y monitoreo de movimientos en masa, todas con imágenes de uso libre y procesadas en softwares y plataformas gratuitas. Las estrategias se dirigieron en dos líneas de trabajo; Interferometría de radar de apertura sintética o InSAR e índices espectrales. La primera estrategia utiliza imágenes de radar, mientras que la segunda utiliza imágenes multiespectrales o imágenes ópticas.

InSAR es una técnica que calcula desplazamientos del terreno a partir de la diferencia de fase entre dos imágenes interferométricas registradas desde una plataforma satelital en diferentes momentos. Esta técnica es de especial interés por su capacidad de medir desplazamientos del terreno en áreas extensas, convirtiéndola en una poderosa herramienta para el monitoreo de grandes movimientos en masa donde los sensores en tierra presentan limitaciones.

Las estrategias con índices espectrales permitieron realizar análisis espacio-temporales donde se tuvo como objetivo identificar los cambios de cobertura derivados de los movimientos en masa por pérdida de cobertura vegetal, la deposición de material movilizado y la degradación del suelo. Estas estrategias utilizan índices espectrales, los cuales se calculan a partir de operaciones matemáticas entre las imágenes multiespectrales. Estos índices han probado ser de gran utilidad para identificar características y cambios en el suelo y la vegetación.

Ambas estrategias fueron probadas en el Valle de Aburrá, con registros temporales desde el año 2016 de las plataformas Sentinel 1 (imágenes de radar) y Sentinel 2 (imágenes multiespectrales) de la Agencia Espacial Europea. En el análisis InSAR se identificaron siete anomalías de deformación del terreno, cuatro de las cuales fueron validadas con visitas en campo como movimientos en masa, otras dos deformaciones están asociadas a llenos antrópicos y canteras a cielo abierto, mientras que una zona de deformación de

ladera no ha sido validada.

Los análisis con índices espectrales se han aplicado en diferentes zonas y movimientos en masa en el Valle de Aburrá. Estos han mostrado valiosos alcances a la hora de identificar la fecha en la cual ocurrieron los procesos con pérdida de cobertura vegetal, el historial de actividad, la extensión espacial, la recuperación de la cobertura vegetal y la actividad de procesos erosivos que imposibilitan o retardan la recuperación de la cobertura vegetal.

Teniendo en cuenta estos resultados, se concluye que estas estrategias son valiosas y deben ser incorporadas al proyecto SIATA, teniendo como objetivo mayor, establecer un sistema de alertas tempranas por movimientos en masa a escala regional. Sin embargo, se debe continuar con la investigación en estas estrategias, mejorar su aplicación y evaluar el uso de imágenes de otras misiones satelitales, con diferentes capacidades.

Introducción

Los movimientos en masa son una de las amenazas naturales más destructivas, las cuales resultan en numerosas pérdidas de vidas y grandes pérdidas económicas en regiones montañosas al redor del mundo (Aristizábal and Sánchez, 2020; Dilley, 2005; Sepúlveda and Petley, 2015). El área metropolitana de la ciudad de Medellín se encuentra en un valle interandino conocido como el Valle de Aburrá, la cual acoge al segundo centro urbano más poblado en Colombia. Sin embargo, gran parte de su perímetro urbano y los suburbios aledaños, se encuentran en zonas de ladera de mediana y alta pendiente, susceptibles a la ocurrencia de movimientos en masa (Hermelin, 2007). La rápida y no planeada ocupación de las zonas susceptibles del valle, ha resultado en la pérdida de miles de vidas humanas y la evacuación de barrios enteros debido a esta amenaza (Aristizábal and Gómez, 2007).

Existen dos estrategias para la reducción del riesgo por movimientos en masa, estrategias estructurales y no estructurales. La primera implica la construcción de elementos físicos y obras ingenieriles, mientras que las no estructurales agrupan políticas, campañas educativas, planes de reacción que mitigan el riesgo (Pecoraro et al., 2019). Entre las estrategias no estructurales se encuentran los sistemas de alertas tempranas (SAT), los cuales son referenciados como una estrategia eficaz para reducir el riesgo, comúnmente, con menores inversiones económicas en comparación de obras ingenieriles convencionales (Intrieri et al., 2012).

Es por esta razón que el Sistema de Alertas Tempranas de Medellín y el Valle de Aburrá (SIATA), como proyecto estratégico del Área Metropolitana del Valle de Aburrá (AMVA), se ha interesado en implementar estrategias de monitoreo de movimientos en masa en el valle, teniendo como objetivo implementar un sistema de alertas tempranas por movimiento en masa a escala regional.

Algunas técnicas de monitoreo de movimientos en masa usadas por SIATA se basan en el uso de instrumentación geotécnica. Estos esquemas de monitoreo consisten en la instalación de sensores en tierra, los cuales miden diversas variables como desplazamientos en superficie, deformaciones en profundidad y variables hidrometeorológicas. Sin embargo, el monitoreo geotécnico puede ser costoso y logísticamente complejo (Marr, 2007), por tales razones, son herramientas útiles en el monitoreo a escala de talud, pero tienen fuertes limitaciones en el monitoreo de áreas extensas, así como un registro temporal limitado (Marr, 2007; Segalini et al., 2017).

Debido a las dificultades y limitaciones del monitoreo geotécnico, se han planteado estrategias de monitoreo mediante técnicas teledetección o sensores remotos con imágenes aéreas y satelitales, las cuales utilizan diferentes tipos de sensores para identificar procesos morfodinámicos en la superficie terrestre (Pellicani et al., 2019; Scaioni et al., 2014; Zhao and Lu, 2018).

Algunas técnicas de sensores remotos utilizan sensores de radar de apertura sintética (o SAR por sus siglas en inglés), los cuales se instalan comúnmente en satélites de misiones de observación terrestre. Uno de los grupos de las técnicas SAR es la interferometría de radar de apertura sintética (InSAR), la cual permite medir deformaciones de la superficie terrestre entre dos imágenes satelitales (Mondini et al., 2021; Moreira et al., 2013).

Otras técnicas de sensores remotos utilizan imágenes multiespectrales, las cuales registran la energía reflejada por la superficie terrestre en diferentes intervalos o bandas del espectro electromagnético. A partir de relaciones matemáticas con estas bandas, se calculan índices espectrales, los cuales permiten resaltar diferentes tipos de coberturas en la superficie terrestre. En el caso de los movimientos en masa, estas estrategias buscan identificar zonas afectadas por movimientos en masa que han derivado en cambios en la cobertura, principalmente útil, en zonas con cobertura vegetal (Qu et al., 2021; Mondini et al., 2011).

En este documento se presentan las estrategias de teledetección con imágenes satelitales para la detección y monitoreo de movimientos en masa aplicadas y desarrolladas por SIATA. En la primera parte se presentan las metodologías usadas, algunas de estas, desarrolladas en las actividades de investigación del proyecto; posteriormente, se presentan los resultados obtenidos en estas. Finalmente, se presentan las conclusiones y las líneas de investigación abiertas.

Datos y metodologías

Las estrategias se dividieron en dos grupos según el tipo de imágenes, imágenes de radar (InSAR) e imágenes multiespectrales (índices espectrales). Por esta razón, se presentarán como dos líneas de trabajo, las cuales tendrán diferentes alcances y limitaciones en la detección y monitoreo de movimientos en masa en el Valle de Aburrá.

InSAR

La interferometría de radar de apertura sintética, o simplemente InSAR, calcula desplazamientos de escala milimétrica del terreno, a partir de la diferencia de fase de onda entre dos imágenes interferométricas registradas desde una plataforma satelital en diferentes momentos (Moreira et al., 2013; Rosen et al., 2000). A partir de múltiples imágenes interferométricas, es posible realizar series de tiempo y mapas de desplazamientos del terreno, permitiendo análisis espacio-temporales a escala regional (Mondini et al., 2021; Yunjun et al., 2019).

Para realizar los análisis InSAR se siguió la metodología propuesta por Yi et al. (2023), presentada en la Figura 1. La metodología inicia con la construcción de pares interferométricos del área de interés, compuestos por pares imágenes interferométricas de banda C de la misión Sentinel 1, registradas en diferentes momentos. Estas imágenes son de uso libre y pueden ser adquiridas a través de diferentes servicios en línea.

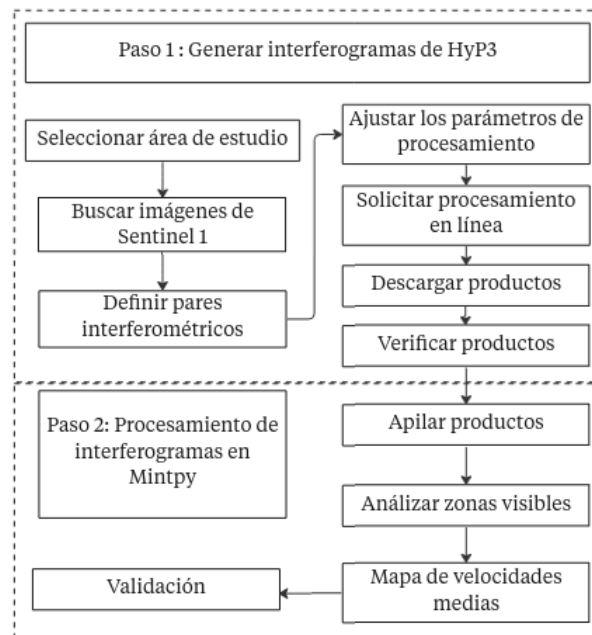


Figura 1: Línea de trabajo usada por Yi et al. (2023), donde se usan imágenes de Sentinel 1 procesadas por el software GAMMA en la plataforma en línea HyP3, luego se descargan los productos en un servidor local (paso 1) y se procesan con el software Mintpy para su posterior validación (paso 2).

Los pares se seleccionan de acuerdo al periodo de tiempo en el cual se desea realizar el análisis mediante la técnica SBAS (*small baseline subset* o pequeñas líneas bases). Esta técnica requiere formar una red de pares interferométricos en el periodo de análisis, con poca separación espacial y temporal entre sus registros, lo cual busca obtener una gran similitud o coherencia entre las imágenes interferométricas (Li et al., 2022).

Definidos los pares interferométricos, se solicita el procesamiento en línea, en la plataforma de uso libre especializada en el manejo de gran cantidad de datos SAR, conocida como *Alaska Satellite Facility's Hybrid Pluggable Processing Pipeline* (ASF HyP3). El resultado de este procesamiento son los interferogramas de los pares interferométricos seleccionados. Los interferogramas contienen la información de la diferencia de fase entre las dos imágenes interferométricas (Ferretti et al., 2007).

Estos interferogramas deben ser desenrollados o transformados a términos de desplazamientos longitudinales del terreno; sin embargo, este proceso debe ser realizado mediante algoritmos especializados que superen ciertas consideraciones (Moreira et al., 2013; Yunjun et al., 2019). Para esto, se descargan los interferogramas a un servidor local y se preparan para el procesamiento en el software de uso libre *Mintpy*, basado en lenguaje *python*. Este es un software especializado en la construcción de series de tiempo y mapas de deformación con InSAR (Yunjun et al., 2019). Finalmente, se validan los resultados a partir de recorridos de campo, imágenes ópticas satelitales o aéreas, inventarios e información técnica existente.

La descarga de los datos, la preparación y el procesamiento en el software *Mintpy* se realizó a partir de la modificación de los códigos en lenguaje Python de Alex Lewandowski de la University of Alaska Fairbanks "*Preparing a HyP3 InSAR Stack for MintPy*" y "*InSAR Time Series Analysis using MintPy and HyP3 products*" del programa OpenSarLab de ASF. Se desarrolló una aplicación en lenguaje Python

para graficar las series de tiempo de los desplazamientos del terreno, lo cual permite realizar análisis temporales de los resultados.

Índices espectrales

Otro grupo de estrategias de detección y monitoreo de movimientos en masa aplicadas en SIATA utilizan imágenes multiespectrales, o también llamadas, imágenes ópticas, pues entre su espectro electromagnético de operación se encuentra el intervalo del espectro visible para la visión humana. Por esta razón, las imágenes multiespectrales pueden componer una visión en “color real” de la superficie terrestre. Sin embargo, estas imágenes tienen fuertes limitaciones para la detección de cambios en la superficie terrestre, pues son afectadas por las condiciones atmosféricas como lo son la nubosidad, la polución. Las condiciones de luz en las cuales fueron adquiridas, dependientes de la posición del sol o la sombras de nubes, también pueden afectar las imágenes (Khorram et al., 2012).

El sensor multiespectral registra la energía solar reflejada por la superficie terrestre en varias bandas asociadas a intervalos del espectro electromagnético. Las características de cada material o elemento en la superficie terrestre reflejan diferentes niveles de energía electromagnética en cada banda, lo que permite diferenciar elementos o características imperceptibles en el espectro visible o el rango de visión humana (Montero et al., 2023).

Existen técnicas basadas en operaciones matemáticas entre estas bandas que resultan en índices espectrales, los cuales han probado ser de gran utilidad para identificar características y cambios en el suelo y la vegetación, razón por lo cual, estas imágenes son de gran utilidad para estudios ambientales y agrológicos (Montero et al., 2023; Sonali et al., 2021).

A partir de la identificación de cambios en la cobertura del terreno mediante estos índices, es posible identificar cambios en la vegetación asociados a movimientos en masa. Esto debido a la pérdida de cobertura vegetal, la deposición de material movilizado y la degradación del suelo (Scaioni et al., 2014).

Se desarrollaron estrategias de monitoreo con análisis temporales, en donde se identificó el momento en el que se presentaron cambios de coberturas asociadas a la ocurrencia de movimientos en masa; análisis espaciales, en donde se identificaron en dónde ocurrieron movimientos en masa. Adicionalmente, se plantearon estrategias de análisis espacio-temporal con el fin de realizar análisis integrales de un área de interés.

Los análisis se realizaron con imágenes de uso libre de la misión Sentinel 2 con resolución espacial de 10 m. Los análisis se realizaron en la plataforma de uso libre Google Earth Engine, la cual permite realizar análisis en la nube con gran cantidad de información de imágenes satelitales de manera rápida y sin requerir una capacidad computacional elevada. Esta plataforma también almacena las colecciones de imágenes satelitales de la misión Sentinel 2, razón por la cual, no se requiere almacenar estas imágenes en un servidor local. En la Figura 5 se muestra la estructura de la línea de trabajo con índices espectrales.

Se probaron diversos índices multiespectrales referenciados por Montero et al. (2023) como el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), Índice de Vegetación de Diferencia de Clorofila (NDCI), Índice de Estrés de Humedad (SSI), entre otros; sin embargo, se realizaron los desarrollos y aplicaciones con el índice NDVI. Este índice destacó mejor los cambios de pérdida de vegetación por movimientos

en masa que otros índices evaluados. El NDVI se calcula con la diferencia normalizada entre la banda Infrarrojo cercano (NIR) y la banda rojo de la siguiente manera:

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red} \quad (1)$$

Donde:

NIR representa la reflectancia en la región del infrarrojo cercano,
Red representa la reflectancia en la región del rojo.

A continuación, se muestra el detalle de las estrategias con índices espectrales presentados en la Figura 5.



Figura 2: Estructura de las estrategias de detección y monitoreo de movimientos en masa con índices espectrales.

Análisis temporal

El análisis temporal consistió en generar una serie de tiempo del índice NDVI, para un punto donde se haya presentado un movimiento en masa con pérdida de cobertura vegetal o dónde se desee conocer si ha ocurrido un movimiento en masa. Este análisis se realiza de la siguiente manera:

- I. Definición del periodo de búsqueda: fechas en las cuales se desea analizar la cobertura vegetal.
- II. Ingresar punto o coordenada de análisis.

- III. Buscar todas las imágenes de la misión Sentinel 2 que cubren ese punto.
- IV. Mediante algoritmos e información propia de las imágenes, retirar las imágenes que tengan en el punto de análisis, nubes o sombra de nubes.
- v. Calcular el índice NDVI en cada imagen que cubra el punto de análisis y no tenga nubes o sombra de nubes.
- VI. Extraer el valor de NDVI de cada imagen del pixel donde se encuentra el punto de interés.
- VII. Construir la serie de tiempo.

Análisis espacial

El análisis consiste en calcular el índice NDVI en una fecha previa a la ocurrencia de movimientos en masa en un área de interés; la cual puede ser una ladera inestable, una microcuenca o un movimiento en masa que se haya reactivado. Luego se calcula el NDVI para una imagen multiespectral, registrada en fecha posterior a la ocurrencia de movimientos en masa en el área de interés. Finalmente, se calcula la diferencia entre el NDVI de la segunda imagen y el NDVI de la primera imagen multiespectral (ver Figura 3).

$$\text{Diferencia de NDVI} = \text{NDVI 2} - \text{NDVI 1} \quad (2)$$

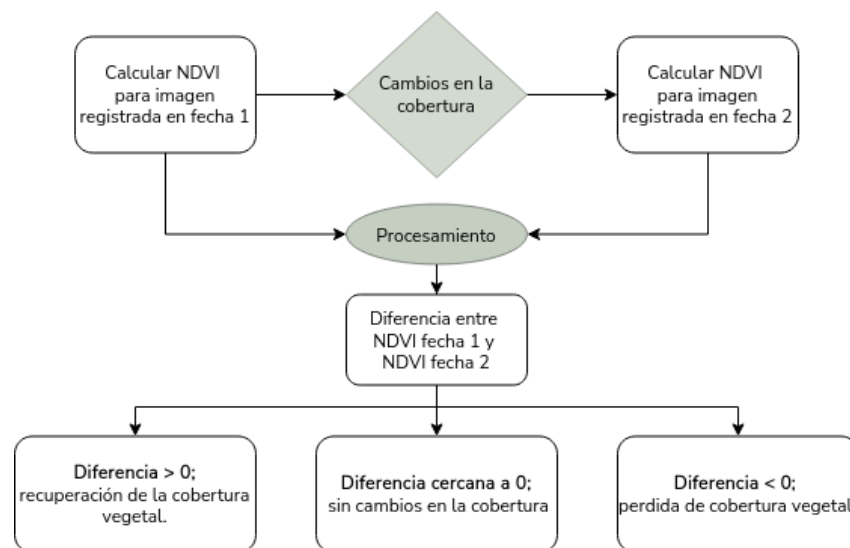


Figura 3: Esquema metodológico para el monitoreo espacio-temporal de movimientos en masa, laderas susceptibles a movimientos en masa o microcuencas con amenaza por avenidas torrenciales

El resultado es una imagen o raster del área de interés, en la cual, los valores resultantes positivos indicarán una recuperación de la vegetación asociada a la ocurrencia de movimientos en masa entre las fechas de las imágenes multiespectrales. Los valores cercanos a 0 indican que no hubo cambios en la cobertura del terreno; mientras que los valores negativos, indicaran la una pérdida de la cobertura vegetal en zonas que tenían una nula o pobre cobertura vegetal, posiblemente, asociada a la ocurrencia de movimientos

en masa. Esta metodología es similar al análisis realizado por Mondini et al. (2011); sin embargo, en ese trabajo, la diferencia en el NDVI entre dos imágenes es usado como insumo para un proceso de clasificación posterior.

Análisis espacio-temporales

Análisis de composición de índices espectrales:

El análisis de composición de índices espectrales multitemporal comienza con la definición de un área de interés susceptible a la ocurrencia de movimientos en masa. Se debe evaluar si en la zona ocurrieron cambios en la cobertura vegetal asociada a procesos morfodinámicos, ocupación de las laderas, deforestación, etc. Una herramienta útil para evaluar estos cambios es el análisis temporal de series de tiempo de índices espectrales; sin embargo, esta herramienta solo analiza la información de un punto en el área de interés. Conociendo cuando ocurrieron los cambios, se seleccionan tres periodos, se proponen los siguientes: uno antes del cambio en la cobertura, uno posterior a la ocurrencia de este cambio y otro en el que posiblemente se haya recuperado la cobertura vegetal.

A partir de múltiples imágenes registradas para el área de interés en un periodo de tiempo, se construye una imagen multispectral que no tenga nubes y represente el promedio en la cobertura vegetal en ese periodo (todo este proceso mediante algoritmos en la plataforma Google Earth Engine). A cada imagen generada para cada periodo seleccionado se le calcula el índice NDVI, el cual refleja el estado de la cobertura vegetal. NDVI valores altos o cercanos a 1 representa áreas con vegetación densa y saludable; mientras que valores cercanos a 0 para áreas que representan suelo desnudo o coberturas antrópicas. Hasta este punto del análisis se tienen tres imágenes que representan el índice NDVI en los periodos o “fechas” 1, 2 y 3. Estas imágenes se integran en una composición RGB (ver Figura 4). Esta metodología de integración de tres imágenes NDVI multitemporales fue realizada en el trabajo de Qu et al. (2021).

Una composición RGB se refiere a una representación de color que se crea combinando tres componentes de color primario: rojo (R), verde (G) y azul (B). Cada componente de color se representa mediante un valor numérico, por ejemplo, en un rango de 0 a 1, donde 0 significa ausencia total del componente (nula vegetación) y 1 significa la máxima intensidad del componente (vegetación densa y saludable).

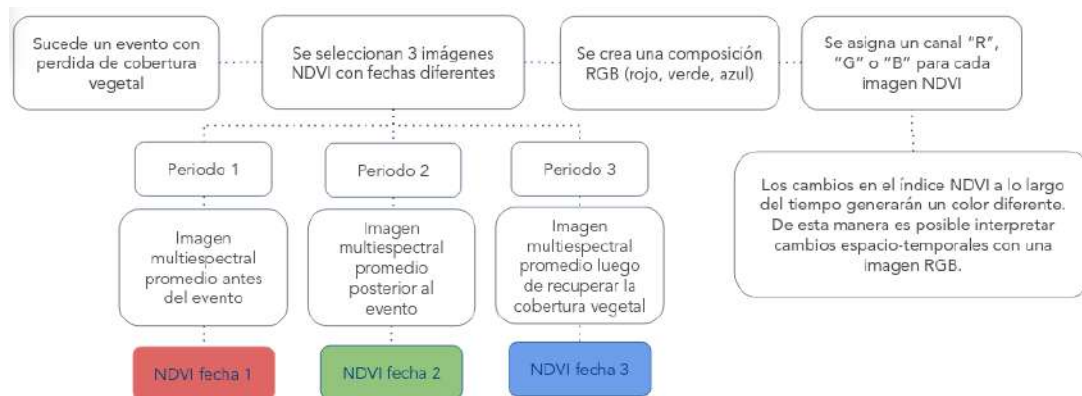


Figura 4: Esquema metodológico del análisis de composición de índices espectrales multitemporal.

En una composición RGB, se utilizan estos tres componentes de color para crear una amplia gama de colores al mezclarlos en diferentes proporciones. La mayoría de las imágenes digitales y pantallas de computadora utilizan el modelo de color RGB para representar y mostrar colores. En el análisis de coberturas que se plantea se asigna cada componente de color primario a cada imagen de NDVI, siendo el componente rojo (R) la imagen NDVI de fecha 1, el verde (G) la imagen de fecha 2 y el azul (B) la imagen con fecha 3.

La forma en que se combinan los componentes RGB para formar un color específico es conocida como síntesis aditiva (Figura 4). A continuación se describen las tonalidades que representan las composiciones resultantes:

- Cuando todos los componentes están en su valor mínimo (0, 0, 0), se obtiene el color negro. Este caso representa nula vegetación o cuerpos de agua.
- Cuando todos los componentes están en su valor máximo (1, 1, 1), se obtiene el color blanco. Este caso representa las áreas en las que siempre se encontró vegetación; sin embargo, la intensidad del blanco puede variar en función de la salud de esta.
- Al ajustar los valores de los componentes en diferentes proporciones, se crean una amplia variedad de colores. Por Ejemplo:
 - Si tienes $R=1$, $G=0$, $B=0$, obtienes el color rojo puro. Solo hubo vegetación en la fecha 1.
 - Si tienes $R=0$, $G=1$, $B=0$, obtienes el color verde puro. Solo hubo vegetación en la fecha 2.
 - Si tienes $R=0$, $G=0$, $B=1$, obtienes el color azul puro. Solo hubo vegetación en la fecha 3.

Combinando diferentes valores de R, G y B en proporciones específicas, puedes crear todos los demás colores en el espectro visible; sin embargo, destacan los siguientes colores:

- Si tienes $R=0$, $G>0$, $B>0$, se obtiene colores turquesa. No había vegetación en fecha 1, pero sí en fechas 2 y 3.
- Si tienes $R>0$, $G=0$, $B>0$, se obtiene el color púrpura. Había vegetación en fecha 1, hubo pérdida de vegetación en fecha 2 y se recuperó la cobertura vegetal en la fecha 3.
- Si tienes $R>0$, $G>0$, $B=0$, se obtiene el color amarillo. Había vegetación en las fechas 1 y 2, pero hubo pérdida de la cobertura vegetal en la fecha 3.

Series de tiempo multipunto:

Este análisis inicia con la definición de un área de interés. Posteriormente, se realiza una malla de puntos separados entre sí a una distancia modificable, la mínima distancia es la resolución de la imagen multiespectral (10 m en el caso de Sentinel 2). La distancia entre los puntos depende de la densidad de puntos que se quiera tener; sin embargo, una alta densidad de puntos podría generar un exceso de ruido.

Posteriormente, se realiza una gráfica que contiene una serie de tiempo de índice NDVI para cada punto (ver sección de análisis temporal). Con el fin de asociar cada serie de tiempo a su ubicación espacial, se propone clasificar estos puntos en función de su ubicación relativa en el polígono de interés. Esta variable podría ser la latitud, la longitud, su altura o su cercanía con algún objeto de referencia. El resultado será asignar un color a la ubicación relativa del punto en el polígono de interés (ver Figura 5).

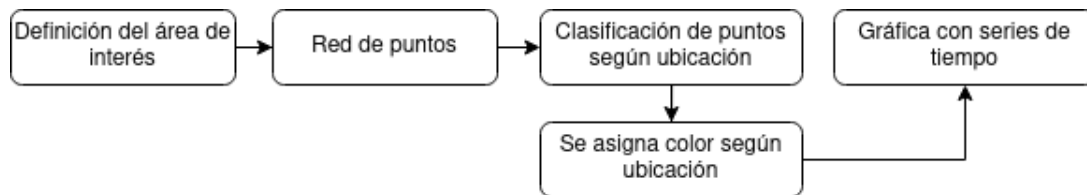


Figura 5: Esquema metodológico de la estrategia de análisis espacio-temporal con series de tiempo multipunto.

Resultados

InSAR en el Valle de Aburrá

Se utilizaron 186 imágenes de la plataforma Sentinel 1 de trayectoria descendente registradas entre octubre de 2016 y mayo de 2023 para realizar análisis InSAR en el Valle de Aburrá. En este análisis se identificaron siete anomalías de deformación del relieve. La ubicación de estas zonas de deformación se muestra en la Figura 6. Los cuadros naranjados corresponden a movimientos en masa que fueron validados en campo, el cuadro rojo corresponde a la deformación de un lleno antrópico a orilla de río Medellín. El cuadro azul corresponde a deformaciones de una ladera que está siendo minada por una cantera a cielo abierto, mientras que el cuadro negro corresponde a una deformación en una ladera; sin embargo, estas zonas de deformación no han sido validadas en campo.

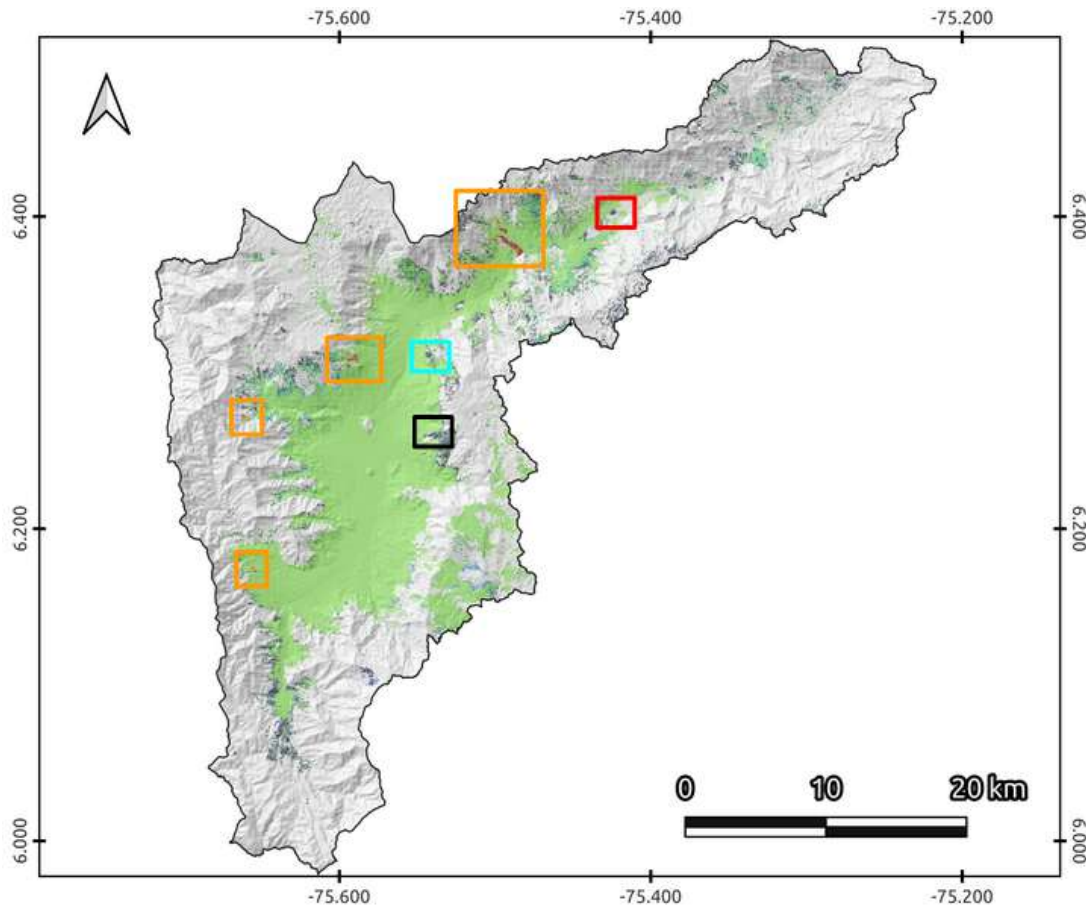


Figura 6: Análisis InSAR en el Valle de Aburrá. Ubicación de las anomalías de deformación en el Valle de Aburrá.

A continuación, se muestra en detalle los resultados en el cuadro naranjado más al norte en la Figura 6. Este sector es conocido como El Zarzal o Ancón Norte en el municipio de Copacabana. Esta zona tenía como antecedentes la deformación y posterior colapso del barrio Ancón Norte desde el año 2018, con deformaciones del terreno a profundidades superiores a 25 m, según ensayos geotécnicos. La velocidad del movimiento es lenta, por lo cual, la actividad se presenta de manera continua hasta la actualidad. Esta zona con deformaciones se encuentra en la parte baja de la zona con anomalía de deformación InSAR (ver polígono amarillo en la Figura 7); sin embargo, la extensión del movimiento en masa había estado en debate, pues no es claro establecer sus límites.

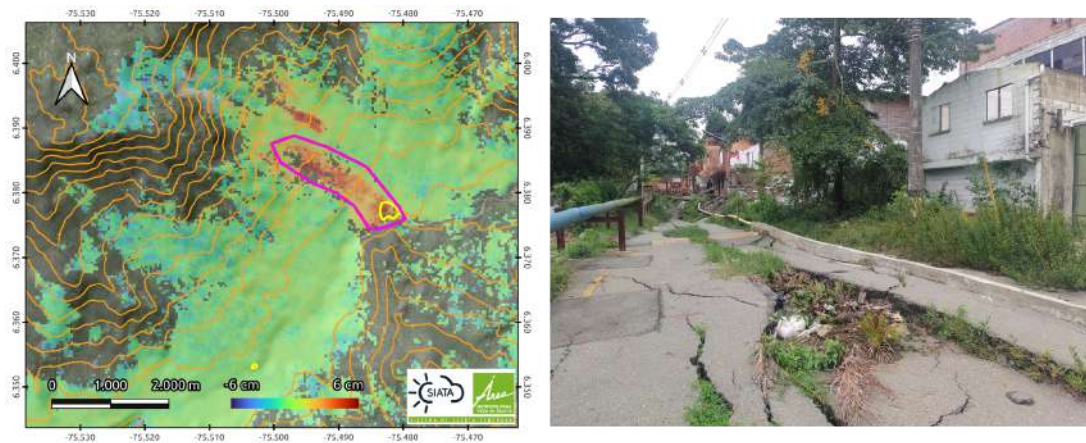


Figura 7: Imagen izquierda: desplazamientos InSAR en el sector El Zarzal - Ancón Norte, los desplazamientos se registran en dirección al satélite ubicado aproximadamente a 40° al este. El polígono amarillo representa los límites definidos inicialmente por el movimiento en masa que afectó al barrio Ancón Norte. Imagen derecha: fotografía de deformaciones en el barrio Ancón Norte

El detalle de los desplazamientos registrados por InSAR para la zona de deformación El Zarzal - Ancón Norte se presenta en la Figura 8. Esta serie de tiempo representa el desplazamiento en dirección al satélite de todos los píxeles al interior del polígono púrpura de la Figura 6. Como se observa en la gráfica, a finales del año 2018 inicia la tendencia de desplazamientos positivos, los cuales tienen un aumento en la velocidad de desplazamiento desde el año 2022.

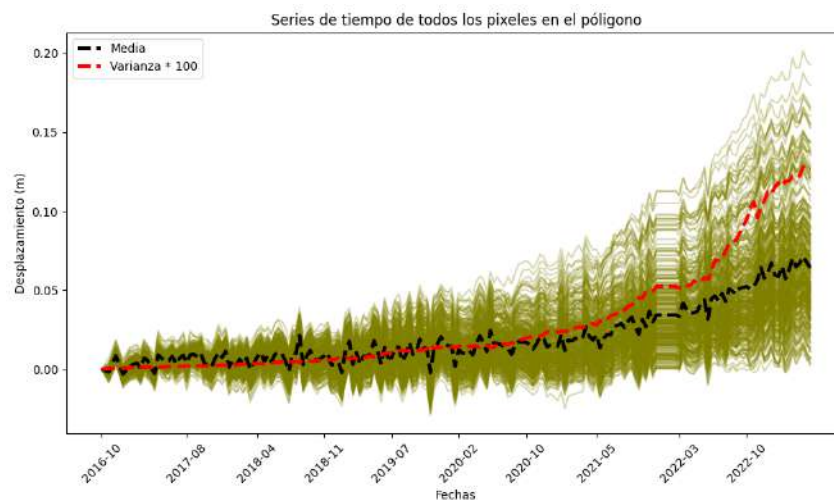


Figura 8: Serie de tiempo de desplazamientos al interior de la zona de deformación InSAR El Zarzal - Ancón Norte (Figura 7).

Este análisis permitió dimensionar la extensión real del proceso morfodinámico en esta ladera, en donde en la parte alta de la vereda El Zarzal, se han reportado afectaciones en edificaciones residenciales por movimientos en masa. Además, se identifica una tendencia de aumento en la velocidad de desplazamiento en los años 2022 y 2023.

Índices espectrales

El 13 de julio de 2022 se presentó el movimiento en masa en el sector Las Playas en el suroccidente del municipio de Medellín. Este movimiento en masa provocó la pérdida de cobertura vegetal de aproximadamente 55000 m² en la ladera y en la orilla de la quebrada Doña María. En este caso de estudio se presentarán los diferentes análisis desarrollados e implementados en SIATA.

La Figura 9 muestra la ubicación del movimiento en masa Las Playas, el punto rojo señala el punto con el que se realizó el análisis temporal. La serie de tiempo muestra el cambio en el índice NDVI en este punto. Se observa la caída en el índice de vegetación luego del evento; posteriormente, se observa la recuperación de la cobertura vegetal.

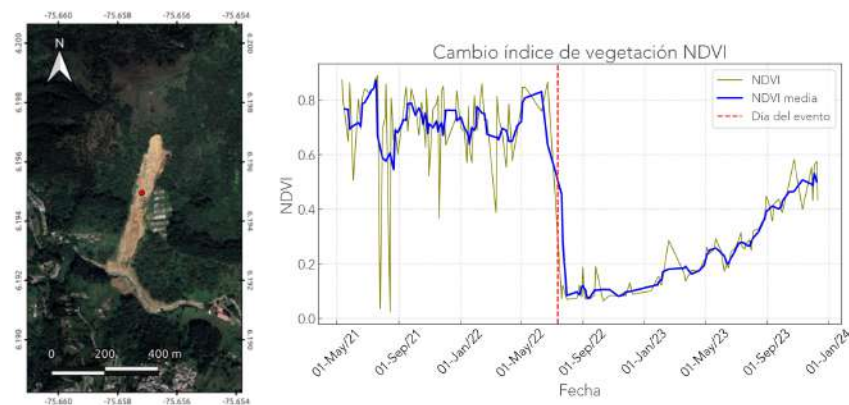


Figura 9: Imagen izquierda: movimiento en masa Las Playas. Imagen derecha: serie de tiempo de NDVI en el punto rojo de la imagen izquierda.

Teniendo interés en continuar el monitoreo de este movimiento en masa, se realizó el análisis espacial con el fin de evaluar la recuperación de la cobertura vegetal y la actividad de procesos erosivos en el cuerpo del proceso morfodinámico. La Figura 10 muestra la recuperación de la de la cobertura vegetal en la parte baja y media del cuerpo del movimiento en masa. En la parte alta, los procesos erosivos continúan activos. Esta interpretación de los resultados fue validada en campo y con información de sobrevuelos con drones.

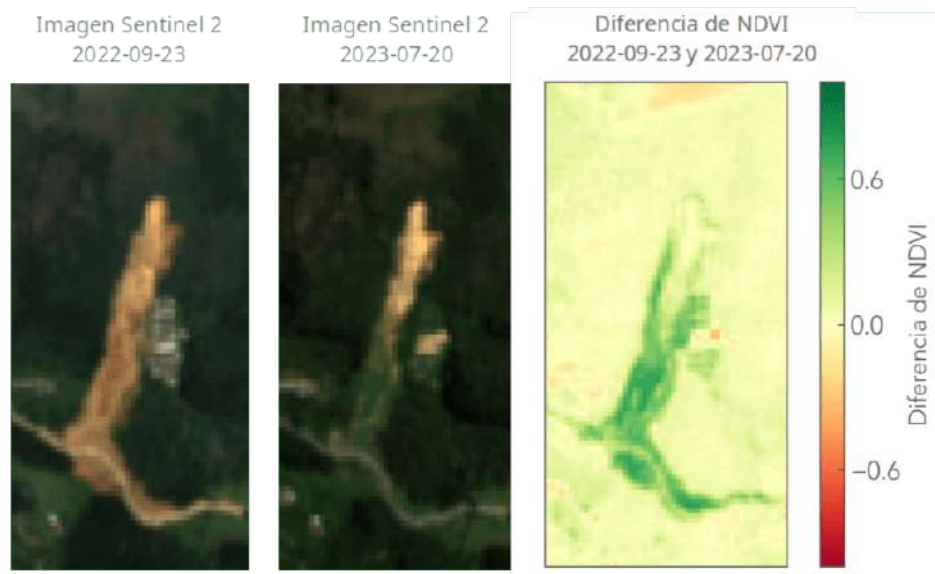


Figura 10: Cambios espaciales de la cobertura vegetal entre las imágenes el 23 de septiembre de 2022 y el 20 de julio de 2023.

El análisis de composición de índices espectrales multitemporal representó los cambios espacial y temporalmente, para estos se seleccionaron tres periodos de tiempo. 1) enero a julio de 2022 2) julio 14 a octubre 1 de 2022 (luego del movimiento en masa) 3) junio a octubre de 2023. Se calculó el NDVI medio para cada periodo. Posteriormente, se realizó la composición entre los tres NDVI de los periodos de estudio (Figura 11).

En la Figura 11 se observa que en la parte alta del movimiento en masa se encuentran los colores rojos, lo que quiere decir que solo tuvo vegetación antes de la primera fecha. Las tonalidades púrpuras indican que tuvo vegetación antes del evento y en el último periodo de tiempo, representan las zonas donde se recuperó la cobertura vegetal. La mancha azul indica las zonas en donde se encontraba una estructura antrópica que fue demolida luego del movimiento en masa, el color azul representa el crecimiento de cobertura vegetal en el último periodo de análisis. En la parte alta del movimiento en masa se encuentran unos píxeles amarillos, los cuales indican que perdió cobertura vegetal en el último periodo, lo cual quiere decir que la corona del movimiento en masa se encuentra retrocediendo y/o se está erosionando.

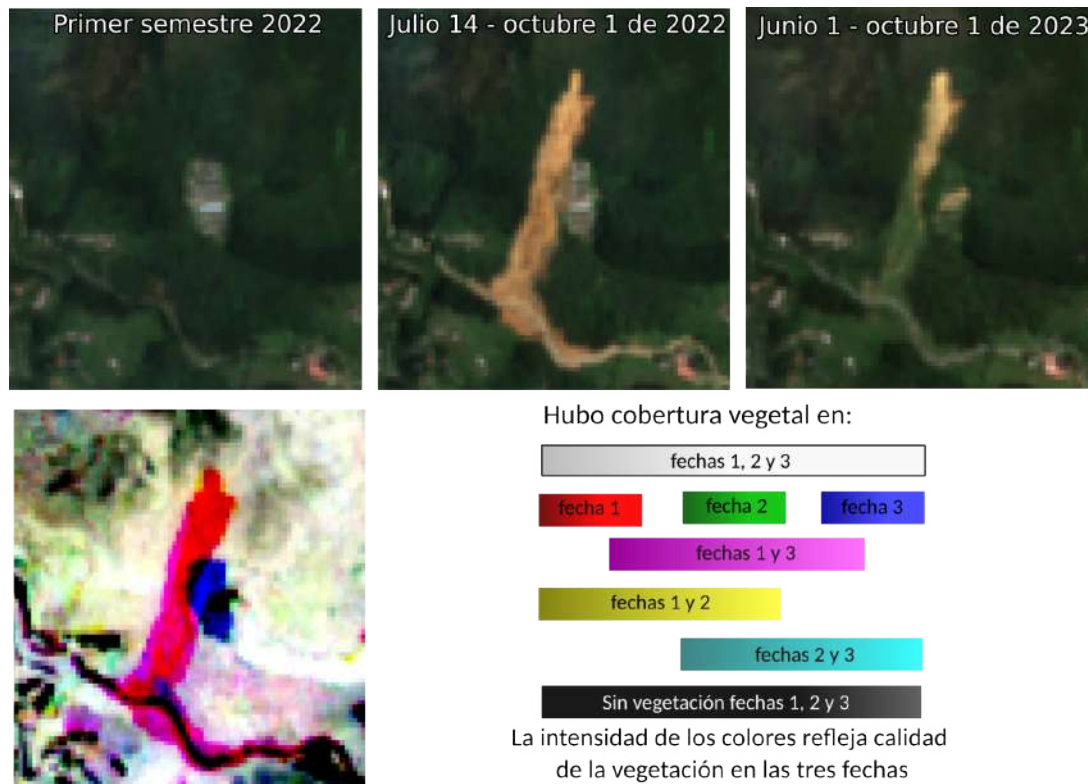


Figura 11: Análisis de composición de índices espectrales multitemporal en el movimiento en masa Las Playas.

El análisis de series de tiempo multipunto se realizó en el movimiento en masa Las Playas. En el interior de este movimiento en masa se generó una red de puntos separados 50 m entre sí (ver Figura 12). A estos puntos se les clasificó respecto a su posición N-S (latitud), y posteriormente, se realizó el análisis temporal. En la Figura 12 se muestra las series de tiempo, en la cual se destaca que los puntos en la parte baja (color púrpura) recuperaron más rápidamente su cobertura vegetal, llegando a niveles de NDVI anteriores al movimiento en masa. Se observa que la parte media del movimiento en masa (colores azules) la cobertura vegetal continúa recuperándose, mientras que en la parte alta (colores verdes y amarillos) la cobertura vegetal no se ha recuperado notablemente.

Esta hipótesis se valida con los demás análisis espacio-temporales y registros de sobrevuelos con drones realizados al movimiento en masa. Los puntos que no perdieron NDVI en la fecha del movimiento en masa corresponden a los puntos que se encuentran en los bordes del polígono.

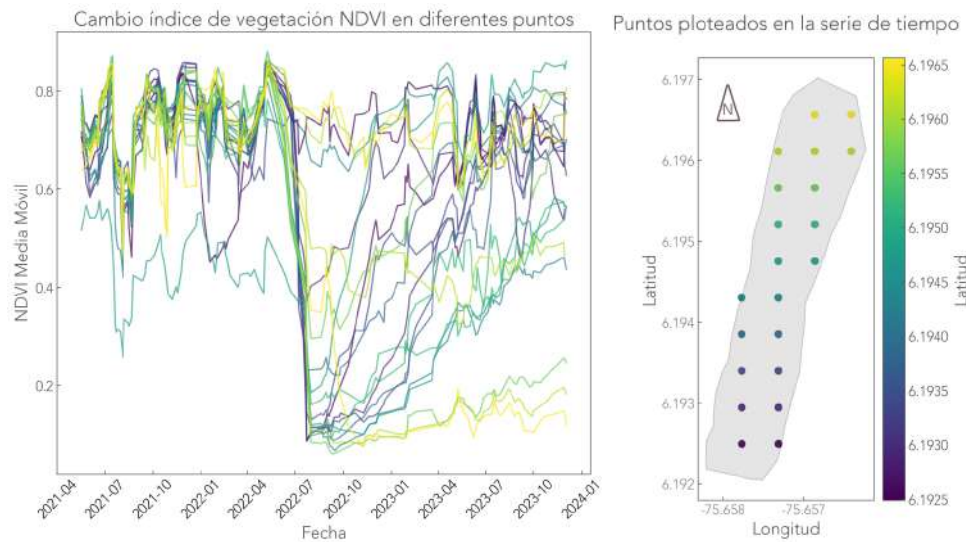


Figura 12: Análisis de series de tiempo multipunto en una red separación entre puntos de 50 m al movimiento en masa Las Playas.

Discusión Las técnicas InSAR son herramientas poderosas que permiten monitorear grandes extensiones en un periodo de tiempo extenso. En el caso del movimiento en masa El Zarzal - Ancón Norte en el municipio de Copacabana, esta herramienta permite aproximar la extensión real del proceso morfo-dinámico, lo cual no ha sido posible mediante instrumentación geotécnica y sobrevuelos con drones. A partir de estos resultados, se podrían establecer vínculos entre afectaciones presentadas en la parte baja (barrio Ancón Norte) y en la parte alta de la ladera.

A pesar de la validación en campo de los resultados InSAR, de esta zona de deformación y de las otras identificadas en el Valle de Aburrá, se deben validar los desplazamientos mediante instrumentación geotécnica o sensores de geoposicionamiento satelital (GNSS). También se debe tener en cuenta que la técnica InSAR tiene importantes limitaciones ambientales y en el tipo de movimientos en masa que pueden ser detectados, por lo cual es posible que existan otras zonas con deformaciones del terreno en el Valle de Aburrá. Las zonas con vegetación densa tienen una baja coherencia, un parámetro que indica la similitud necesaria entre dos imágenes interferométricas (Liang et al., 2022), por esta razón, no se tienen mediciones en grandes zonas rurales del Valle de Aburrá. Adicionalmente, la resolución espacial del mapa de deformación (40 m) limita el tamaño de movimientos en masa detectables a grandes procesos de deformación, además, solo es posible detectar movimientos en masa lentos que conserven alta coherencia (Mondini et al., 2021).

Respecto a los análisis espectrales, si bien al movimiento en masa Las Playas se le conocía su fecha de materialización, el análisis temporal se realizó en zonas donde se desconocía la fecha de ocurrencia, en estas zonas incluso se pudieron inventariar periodos de reactivación, lo cual es valioso, pues permite analizar el historial de actividad de un movimiento en masa. Además, es una buena estrategia para evaluar la recuperación de la cobertura vegetal y los procesos erosivos que podrían afectar al cuerpo de un movimiento en masa.

El análisis espacial permitió identificar cambios en la cobertura vegetal entre dos fechas; a pesar de esto,

escoger las fechas de análisis puede ser un limitante a la hora de detectar movimientos en masa en un área de interés donde no se han inventariado procesos morfodinámicos. El análisis espacio-temporal con composición RGB podría reducir este limitante; sin embargo, en ambientes tropicales como el Valle de Aburrá, la vegetación tiende a recuperarse rápidamente, lo que podría generar que los periodos de tiempo analizados no hayan incluido periodos en los que el cuerpo del movimiento en masa no había recuperado su cobertura vegetal.

Para estas dos estrategias, resulta beneficioso integrar análisis temporales en puntos que se consideren que la cobertura vegetal podría haber sido afectada por movimientos en masa. A partir de estos resultados, se podrían mejorar las composiciones RGB y los mapas de diferencia de NDVI. Las series de tiempo multipunto podrían solventar estas limitaciones; sin embargo, este podría ser de utilidad en pequeñas áreas, ya que la red de puntos a igual distancia podría no identificar zonas con movimientos en masa en áreas mayores. Aumentar la densidad de puntos podría generar ruido en la gráfica de series de tiempo de grandes áreas.

Conclusiones

Se considera que las estrategias de monitoreo y detección con imágenes satelitales por movimientos en masa son útiles y necesarias, pues permiten usar imágenes de escala regional con un muy buen registro temporal. Estas estrategias son de gran utilidad a la hora de caracterizar procesos morfodinámicos específicos, monitorear movimientos en masa, crear inventarios y evaluar la recuperación de la cobertura vegetal en estas áreas.

InSAR es una poderosa herramienta, la cual permite identificar grandes deformaciones del relieve, en las cuales, las estrategias de monitoreo tradicionales, como instrumentación geotécnica o sobrevuelos con drones, no son capaces de apreciar estos procesos morfodinámicos. InSAR también permite monitorear el comportamiento de deformación de estas zonas, por lo cual, se considera una adecuada estrategia de monitoreo para movimientos en masa a escala regional. Es necesario integrar estrategias de monitoreo tradicional para validar estos resultados, buscando como finalidad emitir alertas a partir de los análisis realizados.

Las estrategias de monitoreo y detección con índices espectrales tienen poderosas capacidades que permiten diversas aplicaciones. Sin embargo, se considera que integrar los análisis temporales y espaciales, resulta en análisis más robustos, que permitan identificar la extensión espacial de los movimientos en masa, recopilar su historial de actividad, monitorear la recuperación de la cobertura vegetal y/o la continuidad de procesos erosivos. Al igual que InSAR, se recomienda integrar estrategias de monitoreo tradicional a su aplicación.

También se identificó la capacidad de las estrategias con índices espectrales para el monitoreo de otros procesos socio-naturales que resultan en cambios en la cobertura vegetal. Entre estos procesos se encuentra la ocupación de zonas susceptibles a la ocurrencia de movimientos en masa, para lo cual, el monitoreo de estas zonas podría derivar en acciones que reduzcan el riesgo de estas poblaciones. Otros procesos que podrían ser analizados con estas estrategias son los incendios de cobertura vegetal, los procesos de erosión de orillas de ríos y quebradas.

Se considera necesario evaluar otras metodologías e imágenes SAR para la aplicación de técnicas InSAR

en el Valle de Aburrá. Esto con el fin de detallar la capacidad de detección y monitoreo con imágenes de otras bandas, que posiblemente, superen los limitantes asociados a la vegetación y/o refinen la resolución espacial de los análisis. Finalmente, se recomienda continuar la investigación en los análisis espacio-temporales con índices espectrales, especialmente, buscando generar estrategias que permitan visualizar de mejor manera estos cambios de coberturas.

Referencias

- Aristizábal, E. and Gómez, J. (2007). Inventario de emergencias y desastres en el valle de aburrá. originados por fenómenos naturales y antrópicos en el período 1880-2007. *Gestión y ambiente*, 10(2):17–30.
- Aristizábal, E. and Sánchez, O. (2020). Spatial and temporal patterns and the socioeconomic impacts of landslides in the tropical and mountainous colombian andes. *Disasters*, 44(3):596–618.
- Dilley, M. (2005). *Natural disaster hotspots: a global risk analysis*, volume 5. World Bank Publications.
- Ferretti, A., Monti-Guarnieri, A., Prati, C., Rocca, F., and Massonet, D. (2007). *InSAR principles-guidelines for SAR interferometry processing and interpretation*, volume 19.
- Hermelin, M. (2007). Valle de aburrá:¿ quo vadis? *Gestión y ambiente*, 10(2):07–16.
- Intrieri, E., Gigli, G., Mugnai, F., Fanti, R., and Casagli, N. (2012). Design and implementation of a landslide early warning system. *Engineering Geology*, 147:124–136.
- Khorram, S., Koch, F. H., Van der Wiele, C. F., and Nelson, S. A. (2012). *Remote sensing*. Springer Science & Business Media.
- Li, S., Xu, W., and Li, Z. (2022). Review of the sbas insar time-series algorithms, applications, and challenges. *Geodesy and Geodynamics*, 13(2):114–126.
- Liang, J., Dong, J., Zhang, S., Zhao, C., Liu, B., Yang, L., Yan, S., and Ma, X. (2022). Discussion on insar identification effectivity of potential landslides and factors that influence the effectivity. *Remote Sensing*, 14(8):1952.
- Marr, W. A. (2007). Why monitor performance? In *FMGM 2007: Seventh International Symposium Field Measurements in Geomechanics*, pages 1–27.
- Mondini, A. C., Chang, K.-T., and Yin, H.-Y. (2011). Combining multiple change detection indices for mapping landslides triggered by typhoons. *Geomorphology*, 134(3-4):440–451.
- Mondini, A. C., Guzzetti, F., Chang, K.-T., Monserrat, O., Martha, T. R., and Manconi, A. (2021). Landslide failures detection and mapping using synthetic aperture radar: Past, present and future. *Earth-Science Reviews*, 216:103574.
- Montero, D., Aybar, C., Mahecha, M. D., Martinuzzi, F., Söchting, M., and Wieneke, S. (2023). A standardized catalogue of spectral indices to advance the use of remote sensing in earth system research. *Scientific Data*, 10(1):197.
- Moreira, A., Prats-Iraola, P., Younis, M., Krieger, G., Hajnsek, I., and Papathanassiou, K. P. (2013). A tutorial on synthetic aperture radar. *IEEE Geoscience and remote sensing magazine*, 1(1):6–43.
- Pecoraro, G., Calvella, M., and Piciullo, L. (2019). Monitoring strategies for local landslide early warning systems. *Landslides*, 16:213–231.
- Pellicani, R., Argentiero, I., Manzari, P., Spilotro, G., Marzo, C., Ermini, R., and Apollonio, C. (2019). Uav and airborne lidar data for interpreting kinematic evolution of landslide movements: The case study of the montescaglioso landslide (southern italy). *Geosciences*, 9(6).

- Qu, F., Qiu, H., Sun, H., and Tang, M. (2021). Post-failure landslide change detection and analysis using optical satellite sentinel-2 images. *Landslides*, 18:447–455.
- Rosen, P. A., Hensley, S., Joughin, I. R., Li, F. K., Madsen, S. N., Rodriguez, E., and Goldstein, R. M. (2000). Synthetic aperture radar interferometry. *Proceedings of the IEEE*, 88(3):333–382.
- Scaioni, M., Longoni, L., Melillo, V., and Papini, M. (2014). Remote sensing for landslide investigations: An overview of recent achievements and perspectives. *Remote Sensing*, 6(10):9600–9652.
- Segalini, A., Carri, A., and Savi, R. (2017). Role of geotechnical monitoring: state of the art and new perspectives. *Geotechnical Society of Bosnia and Herzegovina GEO-EXPO*.
- Sepúlveda, S. A. and Petley, D. N. (2015). Regional trends and controlling factors of fatal landslides in latin america and the caribbean. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 15(8):1821–1833.
- Sonali, P. U., Prasanna, J., Atre, A., Pande, C., and Gorantiwar, S. (2021). Application of ndvi in vegetation monitoring using sentinel-2 data for shrirampur region of maharashtra. *Journal homepage: <http://www.ijcmas.com>*, 10(01):2021.
- Yi, Y., Xu, X., Xu, G., and Gao, H. (2023). Rapid mapping of slow-moving landslides using an automated sar processing platform (hyp3) and stacking-insar method. *Remote Sensing*, 15(6):1611.
- Yunjun, Z., Fattahi, H., and Amelung, F. (2019). Small baseline insar time series analysis: Unwrapping error correction and noise reduction. *Computers & Geosciences*, 133:104331.
- Zhao, C. and Lu, Z. (2018). Remote sensing of landslides—a review. *Remote Sensing*, 10(2):279.