

**Procesamiento digital de imágenes satelitales Sentinel para la detección de zonas
de amenaza por remoción en masa mediante la implementación de índices
espectrales en el periodo comprendido entre los años 2018 y 2023 en los
municipios de Jericó, Socotá y Chitá, del departamento de Boyacá**

Estefania Vasquez Agudelo

Natalia del Pilar Tocasuche Castro

Informe final de trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de
Especialista en Sistemas de información Geográfica

Análisis y Modelamiento Espacial

Grupo de Investigación y Desarrollo en Informática y Telecomunicaciones

Universidad de Manizales

Facultad de Ciencias e Ingeniería

Especialización en Sistemas de Información Geográfica

Manizales, Año 2023

Resumen

El propósito de esta tesis es la identificación, delimitación y análisis de las áreas de amenaza por remoción en masa en los municipios de Jericó, Socotá y Chitá, ubicados en el departamento de Boyacá. Para llevar a cabo este estudio, se realizó un inventario de deslizamientos en la zona de interés durante el período comprendido entre los años 2018 y 2023.

Posteriormente, se procedió a la selección, descarga y procesamiento de imágenes satelitales Sentinel, este proceso incluyó la corrección atmosférica, el recorte de la zona de interés y su remuestreo. Luego, se calculó el índice espectral NBR y la diferencia del mismo utilizando pares de imágenes, lo que permitió la detección de posibles áreas propensas a deslizamientos. Al comparar la información obtenida con el inventario, fue factible localizar las áreas donde ocurrieron estos eventos, y se procedió a tomar una muestra representativa con el fin de crear una firma espectral característica de este tipo de fenómeno.

Finalmente, se generó la cartografía temática que relaciona las zonas de amenaza por deslizamiento y de su análisis se evidencia que las mayores concentraciones de estas áreas de riesgo se presentan en inmediaciones de los municipios de Jericó, Sativanorte y Susacón, así como en las cercanías de Jericó y Chitá. Asimismo, algunas de estas concentraciones se encuentran en cercanía a las zonas urbanas, lo que plantea la posibilidad de que actividades humanas puedan estar ejerciendo una influencia en este fenómeno.

Palabras clave: Teledetección, deslizamientos de tierra, SIG, firma espectral, índice espectral.

Abstract

The purpose of this thesis is to identify, delineate, and analyze areas at risk of mass movement in the municipalities of Jericó, Socotá, and Chitá, located in the department of Boyacá. To carry out this study, an inventory of landslides in the area of interest was conducted during the period from 2018 to 2023.

Subsequently, the selection, downloading, and processing of Sentinel satellite images were carried out. This process included atmospheric correction, the cropping of the area of interest, and resampling. Then, the Normalized Burn Ratio (NBR) spectral index was calculated, along with the difference between pairs of images, which allowed for the detection of potential landslide-prone areas. By comparing the obtained information with the inventory, it was possible to pinpoint the areas where these events occurred, and a representative sample was taken to create a spectral signature characteristic of this type of phenomenon.

Finally, thematic mapping was generated that relates to landslide hazard areas, and its analysis reveals that the highest concentrations of these risk areas are located near the municipalities of Jericó, Sativanorte, and Susacón, as well as in the vicinity of Jericó and Chitá. Additionally, some of these concentrations are in close proximity to urban areas, suggesting the possibility of human activities influencing this phenomenon.

Keywords: Remote sensing, landslides, GIS, spectral signature, spectral index.

Contenido

Pág.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	14
1.1 DESCRIPCIÓN DEL ÁREA PROBLEMÁTICA	15
1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	20
1.3 JUSTIFICACIÓN.....	20
2. OBJETIVOS.....	22
2.1 OBJETIVO GENERAL	22
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	22
3. ANTECEDENTES.....	23
4. REFERENTE NORMATIVO Y LEGAL.....	32
5. REFERENTE TEÓRICO	35
5.1 INTRODUCCIÓN A LA TELEDETECCIÓN	35
5.2 SENSOR ACTIVO	36
5.3 SENSOR PASIVO.....	36
5.4 PROGRAMA Y MISIÓN	38
5.4.1 PROGRAMA COPERNICUS	38
5.4.2 SENTINEL 2	40
5.5 MOVIMIENTOS EN MASA	45
5.5.1 CAÍDAS, RODAMIENTOS Y BLOQUES ERODADOS.....	46
5.5.2 VOLCAMIENTOS	46
5.5.3 DESLIZAMIENTOS.....	46
5.5.4 FLUJOS.....	48
5.5.5 CREEP (REPTACIÓN).....	49
5.6 CARACTERÍSTICAS DE LA RADIACIÓN ELECTROMAGNÉTICA	51
5.6.1 ÍNDICE ESPECTRAL.....	52
5.6.2 ÍNDICE ESPECTRAL NBR	53
5.6.3 DIFERENCIA NBR (DNBR).....	54
5.6.4 FIRMA ESPECTRAL	55
5.7 SENTINEL APPLICATION PLATFORM- SNAP	57
6. METODOLOGÍA	58
6.1 ENFOQUE METODOLÓGICO	58
6.2 TIPO DE ESTUDIO.....	58
6.3 PROCEDIMIENTO	59
7. RESULTADOS	81
7.1 INVENTARIO E IDENTIFICACIÓN DE DESLIZAMIENTOS	81
7.2 ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE LA DIFERENCIA DNBR	86
7.3 FIRMA ESPECTRAL	90
7.4 ZONAS DE AMENAZA DE DESLIZAMIENTO	91

7.5	CARTOGRAFÍA TEMÁTICA	93
8.	CONCLUSIONES	96
9.	RECOMENDACIONES.....	98
10.	REFERENCIAS	100

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1. Localización General de la zona de estudio	19
Figura 2. Diferencia DNBR 2022-2023	74
Figura 3. Cantidad de deslizamientos por vereda	76
Figura 4. Firma espectral de deslizamientos	78
Figura 5. Porcentaje de deslizamientos por municipio	82
Figura 6. Mapa temático del inventario de deslizamientos investigados.....	83
Figura 7. Mapa temático de los deslizamientos identificados con DNBR.....	84
Figura 8. Deslizamientos investigados vs deslizamientos identificados DNBR.....	85
Figura 9. Mapa Temático inventario deslizamientos investigados vs deslizamientos identificados DNBR	86
Figura 10. Diferencia DNBR 2019-2020.....	88
Figura 11. Diferencia DNBR 2018-2019	89
Figura 12. Firmas espectrales depuradas deslizamientos 2020.....	90
Figura 13. Mapa Temático zonas de amenaza de deslizamiento	94

Listas de tablas

	Pág.
Tabla 1. Bandas de los satélites Sentinel 2	42
Tabla 2. Deslizamientos rotacionales en Colombia	47
Tabla 3. Niveles de severidad en incendios obtenidos a partir del dNBR, propuesto por USGS.....	55
Tabla 4. Tabla de selección de imágenes	62
Tabla 5. Comparación del metadata de imágenes satelitales en Level 1-C vs metadata con aplicación del SEN2COR	65
Tabla 6. Eventos de deslizamientos identificados por vereda con el DNBR	75
Tabla 7. Inventario de deslizamientos investigados por vereda	81

Lista de ilustraciones

Ilustración 1. Elementos de teledetección ambiental, elaboración propia Fuente: Chuvieco (1995).....	35
Ilustración 2. Sensor Pasivo Fuente: NASA Applied Remote Sensing Training Program.....	37
Ilustración 3. Configuración orbital del satélite gemelo SENTINEL-2. Fuente (ESA, n.d.-b)	41
Ilustración 4. Niveles de procesamiento desde el nivel 0 hasta el nivel 1C. Fuente (Ministerio de transportes del Gobierno de España, 2018).	44
Ilustración 5. Relación entre flujo incidente y reflejado. Fuente. (Chuvieco, 1995)	52
Ilustración 6. Comparación de la respuesta espectral de vegetación saludable y áreas quemadas. Fuente: U.S. Forest Service.	53
Ilustración 7. Signaturas espectrales típicas de distintas cubiertas. Fuente. (Chuvieco, 1995).....	56
Ilustración 8. Metodología del Proyecto	59
Ilustración 9. Instalación del complemento SEN2COR.....	64
Ilustración 10. Ejecución del proceso L2A process	64
Ilustración 11. Modelo de recorte y remuestreo de las imágenes seleccionadas	68
Ilustración 12.Definición del área de recorte mediante coordenadas de pixel.....	69
Ilustración 13. Definición de parámetros del resampleo.....	69
Ilustración 14. Imágenes resultantes luego del proceso de recorte y remuestreo	70
Ilustración 15.Modelo para el cálculo de NBR en las imágenes.....	71
Ilustración 16.Expresión matemática para el cálculo del NBR en SNAP.....	71
Ilustración 17.Modelo para el cálculo de dNBR entre las imágenes	72
Ilustración 18.Expresión matemática para el cálculo del dNBR en SNAP.....	72
Ilustración 19.Imágenes resultantes luego del cálculo del dNBR.....	73
Ilustración 20. Mascara de deslizamientos PIN 40 (Muestra 1)	79
Ilustración 21. Mascara de deslizamientos PIN 40 (Muestra 2)	80
Ilustración 22. Mascara obtenida de la muestra de la firma espectral.....	92
Ilustración 23. Depuración de valores atípicos a la máscara obtenida de la muestra de la firma espectral	93

Lista de Anexos

- A.** Anexo: Inventario de deslizamientos
- B.** Anexo: Metadatos de las imágenes sentinel
- C.** Anexo: Análisis multitemporal de la diferencia DNBR
- D.** Anexo: Geodatabase
- E.** Anexo: Mapas Temáticos

Glosario

Altimetría: Consiste en la medición de las alturas en diferentes puntos de la tierra, respecto a un sistema de referencia, que usualmente es el mar.

Amenaza: Posibilidad de ocurrencia de un deslizamiento de tierra.

Bandas espectrales: Regiones o intervalos en los que se divide el espectro electromagnético, usualmente se mide en nanómetros o micrómetros.

Cartografía temática: Rama de la cartografía que se encarga de plasmar en un mapa un tema o datos específicos, de manera amigable con el usuario final.

Corrección atmosférica: Procesamiento digital de una imagen que permite reducir o eliminar los efectos de la atmósfera para obtener una representación más precisa de la tierra.

Espectro electromagnético: Es el rango de frecuencias de la radiación electromagnética.

Espectro visible: Región del espectro electromagnético que es visible a los humanos.

Falla geológica: Es una ruptura en la corteza terrestre, debido al movimiento en direcciones opuestas de bloques de la litosfera.

Fenómeno de La Niña: Este evento climático se caracteriza por el fortalecimiento de los vientos alisios procedentes del oeste, marcando el comienzo de una temporada fría acompañada de precipitaciones abundantes.

Geología: Ciencia que estudia composición, estructura, procesos e historia de la tierra.

Geomorfología: Es una rama de la geología que estudia las formas de la superficie terrestre.

Gestión de desastres: Se refiere a las acciones y planes enfocadas en reducir el impacto de los desastres naturales.

IKONOS: Satélite de observación de la tierra que en la actualidad pertenece a DigitalGlobe.

Imágenes multiespectrales: Imagen que se compone de varias bandas que capturan información en diferentes longitudes de onda del espectro electromagnético.

Imágenes ópticas: Es una representación visual de la realidad, capturada mediante una cámara que registra la luz visible reflejada.

Imágenes satelitales: Representación visual de la tierra u otro objeto en el espacio capturada desde una plataforma satelital.

Índice pluvial: Medida que permite cuantificar la cantidad de lluvia que cae en una zona específica.

Índice espectral: Es un valor calculado a partir de las bandas de una imagen que proporciona información sobre un fenómeno o característica específica de la superficie terrestre u otro objeto de estudio.

Inventario de deslizamientos: Recopilación de información de eventos de deslizamientos de forma sistematizada, en una zona de interés en un intervalo de tiempo.

Modelo digital de terreno: Es una representación tridimensional de la topografía de la superficie terrestre para una zona específica.

Órbita heliosincrónica: Es una órbita que está sincronizada con el sol, por lo cual cuando el satélite captura información de la tierra lo hace siempre en presencia de la luz del sol.

Órbita polar: Esta órbita hace referencia al recorrido que realizan los satélites artificiales pasando cerca de los polos de la tierra.

Ordenamiento Territorial: Es el proceso por el cual se planifica la gestión del territorio a nivel nacional o regional.

Ortoimágenes: Es una imagen aérea o satelital que ha sido corregida geométricamente para poder realizar mediciones sobre esta.

Peligro: Capacidad de un deslizamiento de tierra de causar daños en términos de vidas humanas, medio ambiente y propiedades físicas.

Perturbaciones antropogénicas: Cambio en el entorno natural a causa de la intervención del hombre.

Píxel: Es la unidad más pequeña de información en una imagen satelital y representa un punto específico en la superficie terrestre, que ha sido observado de manera remota.

POT: Es el instrumento por el cual se planifica y regula el territorio a nivel local.

Procesamiento digital de imágenes: Consiste en la aplicación de algoritmos que permiten mejorar la calidad de las imágenes y extraer información de relevancia para comprender un fenómeno en particular.

Reflectancia: Es la cantidad de energía electromagnética reflejada por una superficie en relación a la cantidad de energía recibida.

Reflectividad: Hace referencia a la capacidad de una superficie de reflejar la radiación electromagnética recibida a hacia un sensor remoto.

Remoción en masa: Es un proceso geodinámico en el cual se produce el desplazamiento de rocas, sedimentos y suelo desde su ubicación original a otra área.

Resolución espacial: Se refiere a la capacidad de un sensor remoto para capturar objetos pequeños y distinguir detalles en una imagen o escena a grandes distancias sin que la imagen pierda nitidez o claridad

Riesgo geológico: Es la posibilidad de que ocurra un evento geológico que pueda causar daño a las personas, medio ambiente o bienes.

Sensores remotos: Es el instrumento con el cual se captura información de un objeto o zona de interés sin tener contacto directo con él.

Sistemas de información geográfica: Es un software que permite recopilar, almacenar, analizar y representar datos geográficos capturados de la superficie terrestre, asociados a un sistema de referencia.

Talud: Hace referencia a la inclinación de un terreno.

Teledetección: Corresponde a la captura de información de la superficie terrestre sin tener contacto directo.

Topografía: Ciencia que se encarga de medir y representar la forma de una extensión de terreno, generando planos topográficos.

Vehículo aéreo no tripulado: Es una aeronave que se maneja de manera remota o con un plan de vuelo autónomo.

1. Planteamiento del problema de investigación y su justificación

El objetivo principal de este estudio es llevar a cabo la detección de zonas de amenaza por remoción en masa en los municipios de Jericó, Socotá y Chitá, ubicados en el departamento de Boyacá. Esta área de estudio se caracteriza por la presencia de fallas geológicas, el uso inadecuado del suelo, altos índices de precipitación pluvial y sistemas inadecuados de conducción de agua. Estos factores, combinados con las características físicas de la zona, como la topografía, el tipo de suelo, la geología y la geomorfología, la convierten en una región altamente susceptible a movimientos en masa.

Aunado a lo anterior, se evidencia que las metodologías utilizadas por las entidades gubernamentales locales requieren de insumos adicionales, que permita hacer un seguimiento periódico de las amenazas por deslizamientos en grandes extensiones de terreno.

Como solución a dicha problemática se plantea la alternativa de utilizar insumos derivados de la implementación de tecnologías de la información, lo cual ofrecería una relación costo-beneficio más favorable en comparación con otras metodologías previamente utilizadas.

1.1 Descripción del área problemática

La falta de una planificación adecuada en el uso de tierras propensas a deslizamientos, combinada con políticas deficientes para mitigar la amenaza a las poblaciones afectadas por este fenómeno natural, ha llevado a consecuencias a nivel mundial. Estas consecuencias incluyen la pérdida de innumerables vidas humanas y enormes pérdidas económicas que alcanzan miles de millones de dólares. Según el informe "Pérdidas económicas, pobreza y desastres 1998-2017" de la Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres, el 77% de las pérdidas por desastres ocurridas entre 1998 y 2017 son atribuibles a factores climáticos, alcanzando un total de 2.245.000 millones de dólares. Específicamente, las pérdidas económicas registradas por derrumbes, actividad volcánica y deslizamientos ascienden a 8.000 millones de dólares en el mismo periodo. Estos eventos afectaron a 4.8 millones de personas, cobrándose la vida de 18.414 personas debido a los deslizamientos de tierra (UNDRR, 2017).

Según el artículo "Gestión de Desastres" del Banco Mundial (2022), los países afectados por fragilidad, conflicto y violencia (FCV) enfrentan mayor riesgo de desastres, dado que, cuanto más pobre es una comunidad, más vulnerable es a los peligros asociados a fenómenos naturales. Es por esta razón, que los países de bajos ingresos (países en vías de desarrollo) sufren las mayores pérdidas económicas debido a la ocurrencia de estos eventos. Dicha vulnerabilidad se encuentra asociada a factores como la falta de planeación basada en la prevención soportada en el mantenimiento de registros geográficos e indicadores estandarizados asociados a bases de datos. En consecuencia con la ausencia de dicha base de datos, los países de ingresos bajos no reportan suficientes datos de forma sistemática , por lo que los esfuerzos internacionales como

nacionales para mitigar los daños y reducir los riesgos podría dar origen a sesgos en las instancias decisorias.

De acuerdo con lo expuesto anteriormente y según el informe "Pérdidas económicas, pobreza y desastres 1998-2017", el número de personas afectadas y víctimas de desastres está estrechamente relacionado con la desigualdad social, por lo que eventos hidrológicos y geofísicos suelen ocurrir en áreas con una importante intervención humana, altos niveles de pobreza, ausencia de ecosistemas protectores y una capacidad institucional débil para prevenir y responder a dichos eventos. El informe destaca que los países con ingresos bajos son los más afectados, registrando un promedio de 130 personas por millón como pérdidas humanas, en contraste con los países de ingresos altos que presentaron un promedio de 18 personas por millón. Además, se observa una diferencia significativa en la probabilidad de sufrir lesiones debido a un desastre, siendo del 7.8% en países de ingresos bajos y del 1.3% en países de ingresos altos (UNDRR, 2017).

En conformidad con lo mencionado, los países de Latinoamérica exhiben cifras relevantes en cuanto a distintos tipos de desastres geofísicos y climáticos. Un ejemplo claro de esto son las inundaciones y los deslizamientos de tierra, los cuales están estrechamente relacionados con las intensas precipitaciones en las regiones. Según la ONU (2020), Brasil, Colombia, Panamá, Costa Rica, Venezuela, Perú, Bolivia, Uruguay y Argentina se encuentran entre los países del mundo con la mayor cantidad de población expuesta a inundaciones. Adicionalmente, desde el año 2000, América Latina y el Caribe han experimentado 66 deslizamientos de tierra que han resultado en por lo menos 3000 muertes. En los últimos años, destacan dos eventos de deslizamientos de tierra particularmente destructivos en la región: el

alud en Guatemala en 2015, que causó la muerte de 350 personas, y el ocurrido en Colombia en 2017, que resultó en 349 muertes y afectó a más de 45,000 personas (ONU, 2020).

Colombia por su lado, sobresale como el país con el mayor índice pluvial del mundo, alcanzando una precipitación anual de 3.240 mm. En consecuencia, el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam) emite anualmente comunicados de predicción de lluvias en el país, mediante el "Comunicado especial N° 198 sobre la predicción de lluvias en el país y seguimiento de las condiciones del fenómeno de La Niña" se destaca que las precipitaciones en el territorio colombiano se extenderán desde finales del año 2022 hasta el primer trimestre del año 2023, lo que conlleva a un aumento en el proceso de saturación de los suelos inestables, incrementando la amenaza por deslizamientos; se genera la alerta con probabilidad alta por deslizamientos en los departamentos de Antioquia, Boyacá, Casanare, Cauca, Cesar, Cundinamarca, La Guajira, Meta, Nariño, Norte de Santander, Santander, Quindío y Risaralda. Para el departamento de Boyacá se sugiere prestar especial atención por crecientes súbitas e inundaciones para los municipios de Chita, Pisba y Socotá (IDEAM, 2022).

El aumento de las precipitaciones en el país durante períodos prolongados de tiempo ocasionan frecuentemente movimientos en masa, lo anterior también relacionado con la transformación antrópica de las coberturas de la tierra por actividades como la ganadería intensiva, deforestación , extracción de materiales para la minería, entre otros. Estas actividades provocan la desestabilización del terreno, principalmente debido a fenómenos como la erosión. Como resultado, las zonas que presentan estas características en el país se vuelven altamente susceptibles a la ocurrencia de movimientos en masa.

De acuerdo con la actualización del Mapa Nacional de Amenaza relativa por Movimientos en Masa a escala 1:100.000 del Servicio Geológico Colombiano (SGC) en el año 2015, se categorizó el 20% y el 4 % del territorio nacional respectivamente, en amenaza alta y muy alta por movimientos en masa. Conforme a lo anterior y a los resultados del Censo Nacional de Población y Vivienda del Departamento Nacional de Estadística (DANE) obtenidos en el año 2018, se estableció que 40.344.927 de personas, es decir el 83,06% de la población colombiana se encuentra expuesta a amenaza alta y muy alta por movimientos en masa, así mismo, acorde a cifras de la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres (UNGRD), en los últimos 100 años en Colombia se han registrado más de 11.800 eventos asociados a este fenómeno, donde aproximadamente 7.590 personas han perdido la vida.

Teniendo en cuenta la alta probabilidad de deslizamientos en el departamento de Boyacá y la desactualización de los planes de ordenamiento territorial de los municipios de esta región, se ha definido como zona de estudio los municipios de Jericó, Socotá y Chitá (ver Figura 1). Toda vez que en el plan de desarrollo del municipio de Jericó se destaca la importancia de llevar a cabo una identificación de las áreas propensas a deslizamientos ya que en el pasado, se han registrado desastres que han impactado aproximadamente a 1900 personas y sus hogares. Esta situación genera una gran preocupación debido a la falta de opciones para el sustento de las familias rurales en la región, que como resultado, se han visto obligadas a volver a utilizar estas tierras para actividades agrícolas y reconstruir las viviendas que anteriormente fueron afectadas por este fenómeno (Alcaldía municipal de Jericó, 2020).

Conforme al esquema de ordenamiento territorial del municipio de Chitá el 40.91% del suelo rural se encuentra zonificado en la categoría de amenaza alta por movimientos en masa, el

8.07% en categoría media y el 51.02% en categoría baja, considerándose que la categoría alta ocupa un área representativa del suelo rural con 27625.30 ha (Alcaldía municipio de Chita, 2021). Por otro lado, en los últimos años, el municipio de Socotá ha experimentado varios eventos de deslizamientos en áreas mineras, los cuales han resultado en la pérdida de vidas de varios trabajadores. Actualmente, el municipio cuenta con 45 títulos mineros vigentes, de los cuales 41 corresponden a la explotación de carbón, cabe destacar que estos títulos mineros abarcan un área total de 7714,1542 hectáreas, lo que equivale al 12,781% de superposición en el municipio (Agencia Nacional de Minería, 2021).

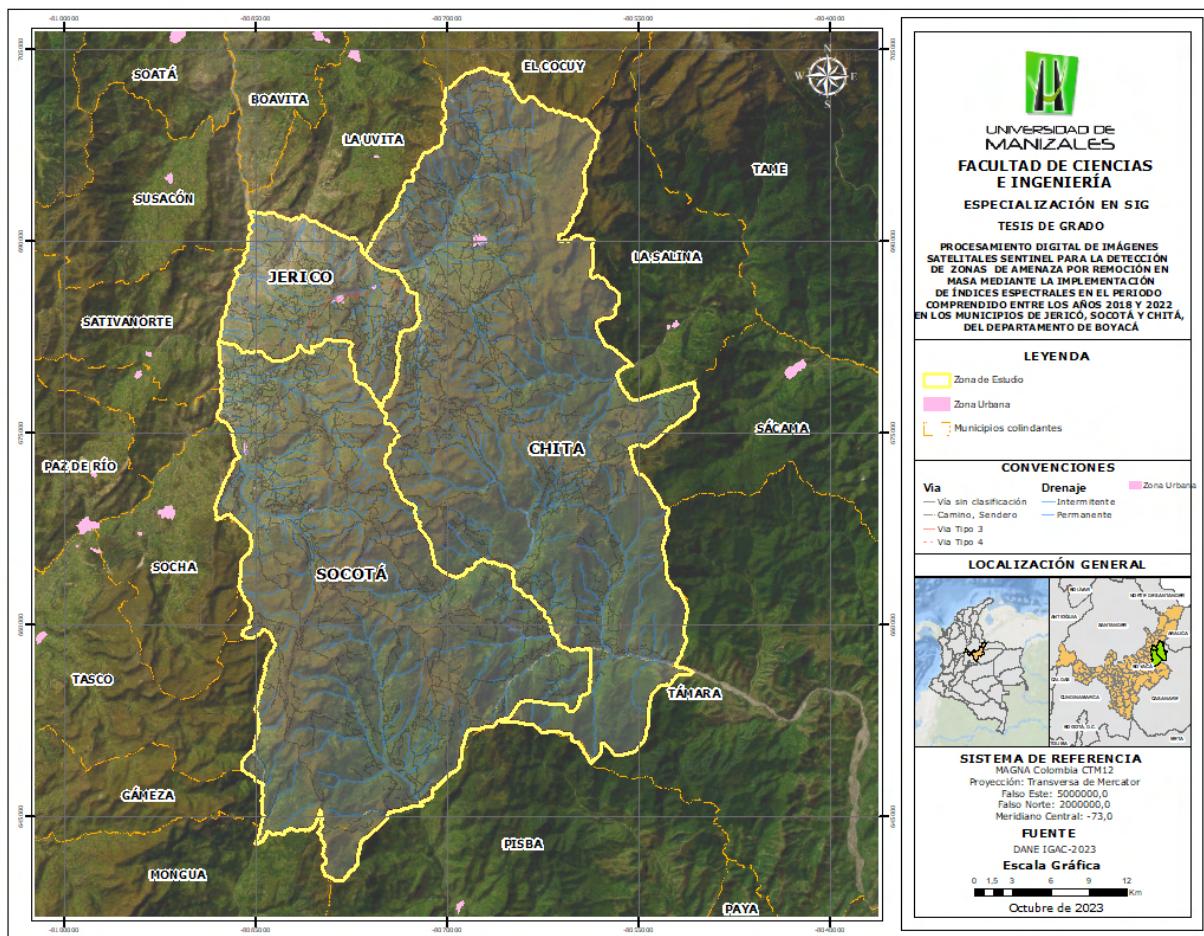


Figura 1. Localización General de la zona de estudio

1.2 Formulación del problema

Ante el avance global de las tecnologías de la información en la identificación y delimitación de áreas de desastre, surge el cuestionamiento sobre si las metodologías actualmente utilizadas por las entidades gubernamentales locales podrían complementarse para la elaboración de planes de gestión del riesgo y prevención de desastres. Por lo tanto, resulta relevante evaluar la aplicación de insumos y herramientas que permitan la detección de posibles zonas de amenaza por remoción en masa, esto mediante la estructuración de un registro histórico asociado a la ubicación geográfica de los desastres ocurridos previamente, el procesamiento digital de las imágenes satelitales en diferentes épocas y la implementación de un índice que permita definir la firma espectral de los deslizamientos de tierra.

1.3 Justificación

La detección de zonas de amenaza por remoción en masa mediante el procesamiento digital de imágenes satelitales en los municipios de Jericó, Socotá y Chitá, del departamento de Boyacá, es relevante porque actualmente dichos municipios no cuentan con un sistema de monitoreo o requieren complementación en los inventarios con los que actualmente cuentan, caso puntual del municipio de Chitá, por lo que se plantea generar un registro histórico asociado a la ubicación geográfica de los desastres ocurridos previamente y la periodicidad de los mismos, que permita actualizar constantemente la cartografía temática asociada a zonas de amenaza.

Los municipios en cuestión cuentan con la presencia de condiciones geológicas, geomorfológicas y topográficas que los hacen susceptibles a fenómenos de remoción en masa, por lo que se requiere realizar el seguimiento, monitoreo y evaluación periódica de zonas de amenaza para la prevención y atención de desastres.

Es de utilidad la implementación de los sistemas de información geográfica (SIG) en la gestión del riesgo y prevención de desastres asociado a movimientos de remoción en masa, puesto que permite mediante herramientas geoespaciales compilar información de diferentes fuentes, contrastar datos y posteriormente procesar y analizar.

2. Objetivos

2.1 Objetivo general

Identificar, delimitar y analizar zonas de amenaza por remoción en masa mediante el procesamiento digital de imágenes satelitales Sentinel en los límites municipales de Jericó, Socotá y Chitá, del departamento de Boyacá entre los años 2018 y 2022, utilizando índices espectrales con el fin de apoyar la gestión del riesgo y prevención de desastres de dichos municipios.

2.2. Objetivos específicos

- Recopilar, depurar y seleccionar información geoespacial de la zona de estudio en el periodo comprendido entre los años 2018 y 2023.
- Identificar zonas de amenaza por remoción en masa mediante la implementación de índices espectrales.
- Evaluar la viabilidad de utilizar valores de píxel obtenidos mediante índices espectrales para identificar una firma espectral específica asociada a deslizamientos.
- Generar cartografía temática para la toma de decisiones.

3. Antecedentes

Durante las últimas décadas, la teledetección a nivel mundial ha experimentado una notable diversificación, esto se ha logrado mediante el lanzamiento de numerosas misiones satelitales y la implementación de tecnologías multiplataforma, que han abierto la puerta a la aplicación de diversos métodos para la evaluación y prevención de deslizamientos de tierra. Sin embargo, es importante tener en cuenta que la elección y aplicación de métodos específicos en una zona de estudio concreta depende de diversos factores. Como señalan Lissak, Bartsch y De Michele (2020), es importante considerar la idoneidad de cada método en relación con el tipo de deslizamiento que se está estudiando. Esto implica tener en cuenta las limitaciones de acceso al área de estudio, el tipo de cobertura vegetal presente, la extensión del fenómeno natural y las características morfológicas y geográficas del terreno. Estos factores desempeñan un papel fundamental para asegurar la efectividad de los métodos utilizados y garantizar la obtención de resultados precisos y confiables en el estudio de los deslizamientos de terreno. En algunos casos, puede ser necesario combinar múltiples técnicas de teledetección para obtener una visión más completa y sólida de la situación.

Es por esto que durante años se han estudiado métodos en diferentes zonas de estudios que contribuyan a la predicción de deslizamientos de tierra y el análisis de riesgos, los cuales desempeñan un papel fundamental en la minimización de las pérdidas económicas y de vidas humanas. Para lograr esto, se ha utilizado comúnmente una metodología que implica la identificación de un inventario de deslizamientos, el análisis de la susceptibilidad de dichas áreas y la generación de alertas tempranas de amenazas. Sin embargo, esta metodología puede llegar a ser infructuosa cuando no se logra llevar a cabo un mapeo representativo de los deslizamientos,

dado que tradicionalmente han acogido prácticas de identificación en campo, las cuales no permiten tener una visión global del fenómeno. Por lo tanto, resulta fundamental adoptar nuevas tecnologías, como la teledetección con imágenes satelitales, dadas sus amplias ventajas para la identificación de deslizamientos, apoyando y validando los resultados obtenidos mediante incursiones en campo (Alimohammadlou et al., 2021).

En relación a lo mencionado anteriormente, la recopilación de información puntual de registros históricos sobre movimientos en masa y su compilación en una base de datos no siempre resulta factible debido a la falta de disponibilidad o actualización de dicha información, especialmente en países en desarrollo donde no se reportan suficientes datos de manera sistemática sobre los eventos ocurridos en esas regiones. Esta situación dificulta la aplicación de las metodologías tradicionales, es por esto que Danneels, Pirard & Havenith (2007) propusieron en su artículo de investigación el desarrollo de un procedimiento automatizado para la detección de deslizamientos en Kirguistán (Asia Central) utilizando imágenes de teledetección multi-espectrales. Este enfoque busca crear un mapa de inventario de deslizamientos de tierra sin requerir la interpretación manual de las imágenes, aunque se reconoce la importancia de validar la información obtenida con los eventos definidos manualmente y mediante información secundaria.

Las limitaciones en la generación de cartografía de deslizamientos con metodologías convencionales, como las ya descritas, pueden ser fácilmente superables mediante el procesamiento de imágenes satelitales de alta resolución, las cuales aportan información multiespectral que permite identificar características particulares de estos fenómenos naturales en

diferentes coberturas, esto se evidencia en el artículo Application of remote sensing data to landslide mapping in Hong Kong de Vohora & Donoghue (2004), en el que se busca establecer la correlación entre deslizamientos y perturbaciones antropogénicas de la vegetación, mediante la implementación de una metodología basada en técnicas de teledetección que utiliza imágenes Landsat TM para el cálculo de índices espectrales e IKONOS para la detección de deslizamientos de tierra poco profundos. Como conclusión principal de la metodología propuesta, se ha encontrado una correlación positiva entre la presencia de vegetación perturbada, la existencia de colinas desnudas y deslizamientos de tierra poco profundos. Esta información resulta de gran utilidad para complementar el programa de mapeo de deslizamientos de terreno natural GEO, ya que permite identificar de manera más precisa las zonas propensas a sufrir deslizamientos

Las metodologías utilizadas para estudiar los movimientos en masa, en concordancia con los estudios citados, requieren datos preexistentes como mapas geológicos, geomorfológicos y estudios in situ, entre otros, los cuales son fundamentales tanto para caracterizar estos eventos como para identificar áreas susceptibles a los mismos. En este sentido, se han realizado investigaciones con el objetivo de obtener de manera automatizada y eficiente datos sobre estos eventos. Un ejemplo de ello es el estudio realizado por Tejada y Parrot (2007) en la Sierra Norte de Puebla, México, utilizando imágenes de satélite IKONOS, en este estudio se desarrolló un algoritmo que permite extraer de forma automática las trazas de los movimientos en masa utilizando como parámetros suficientes dos índices de reflectancia y el valor de la pendiente calculado a partir del Modelo Digital de Terreno (MDT). Como resultado principal, se demostró

que se requieren pocos insumos para llevar a cabo la extracción de las trazas de los movimientos en masa, logrando una coincidencia del 75% con la ubicación de los movimientos de ladera registrados poco después del evento, lo que evidencia la eficacia de la metodología utilizada.

El uso de técnicas de teledetección asociadas a índices espectrales ha demostrado su efectividad en la identificación de zonas susceptibles a deslizamientos en estudios realizados en diferentes regiones del mundo, lo cual ha contribuido a la gestión de desastres logrando cartografiar datos multiespectrales asociados a suelos, coberturas y geología estructural. En Kenia, se han llevado a cabo varios estudios debido a la presencia frecuente de deslizamientos, siendo las precipitaciones y la erosión del suelo la principal causa de este fenómeno.

Por ejemplo, Mwaniki, Möller & Schellmann (2015) utilizaron una metodología que involucró composición de colores falsos, análisis de Componentes Principales e independientes e índices espectrales de diferencia normalizada para mapear áreas afectadas por deslizamientos de tierra, evidenciando que del 62% al 66 % coincidieron con deslizamientos mapeados mediante ubicaciones GPS tomadas en campo. Así mismo, Mwaniki et al. (2015) emplearon dos índices espectrales normalizados, análisis textural y clasificación digital para identificar características de deslizamientos o áreas movilizadas lo que ayuda a explicar cómo el uso de la tierra y las precipitaciones contribuyen como causas principales de los deslizamientos en la zona. Ambos estudios concluyeron, que las malas prácticas agrícolas contribuyeron significativamente al aumento de los deslizamientos, lo que demuestra que los de datos de teledetección y los estudios geofísicos son las herramientas y técnicas más comúnmente utilizadas en la detección y cartografía de la degradación del suelo (El Baroudy, 2011).

La automatización de los procesos de detección de deslizamientos de tierra ofrece numerosas ventajas, incluida la optimización del tiempo y la obtención de datos precisos para la construcción de inventarios. Sin embargo, es importante tener en cuenta que la exactitud de los datos puede variar según los insumos disponibles. Esto ha sido señalado por Piralilou, Shahabi & Pazur (2021), quienes llevaron a cabo una comparación de los resultados obtenidos de la implementación del método de observación de la tierra, producto de la identificación de deslizamientos repentinos (SLIP) propuesto por Fayne, Ahamed, Roberts, Rumsey & Kirschbaum (2019), en Eastern Iburi-Japón, para lo cual aplicaron dicha metodología con imágenes satelitales Landsat 8 y el modelo digital de elevación (DEM) del radiómetro ASTER, con lo que se obtuvo una precisión en la detección de deslizamientos de tierra del 58%. Posteriormente, se implementó una versión mejorada que incorporó imágenes Sentinel 2 y el modelo digital de elevación del satélite ALOS, logrando una precisión del 72%, esta mejora representa un aumento significativo del 16% en la exactitud de los resultados.

Como se mencionó previamente, al enfocarse en el estudio puntual de un fenómeno de deslizamiento, los resultados obtenidos pueden variar en función de la tecnología empleada para dicha observación. En la actualidad, se encuentran disponibles una gran variedad de sensores con características específicas, tales como resolución espacial y temporal, longitud de onda, forma de procesamiento, costo, entre otros. Esta amplia diversidad de opciones puede complicar la selección de la tecnología más adecuada para el fenómeno que se está estudiando, así como

determinar cuál ofrece una relación costo-beneficio más favorable (Fernández Chacón et al., 2015).

Rivera González (2020) propone una alternativa a las imágenes satelitales de alta resolución y a los vuelos fotogramétricos tripulados al sugerir el uso de vehículos aéreos no tripulados (UAV), destacando las ventajas de construir un modelo de prevención de deslizamientos para la gestión del riesgo basado en imágenes capturadas por drones. Por otro lado, Becerra Baeza & De Rurange Espinoza (2021) resaltan la eficacia de combinar métodos UAV y LIDAR en estudios multitemporales para la detección de deslizamientos rotacionales, logrando identificar movimientos superficiales por remoción en masa mayores a 1 m, brindando apoyo a la gestión territorial.

No obstante, Rivera González (2020) también destaca las posibles limitaciones asociadas a la implementación de estas tecnologías. En primer lugar, el uso de UAV puede resultar costoso, ya que se requiere disponer de un dron profesional equipado con sensores de alta resolución. Además, se necesita contar con equipos de cómputo robustos que cuenten con un sistema operativo capaz de procesar grandes volúmenes de información y almacenarla de manera adecuada. Asimismo, se deben considerar los costos asociados a la capacitación del personal involucrado en su operación y análisis.

Ante los elevados costos asociados a la implementación de la tecnología UAV, se vuelve crucial adoptar metodologías alternativas basadas en software y datos libres para evaluar la susceptibilidad a deslizamientos de tierra. Una opción destacada es la propuesta presentada por Acosta Águila et al. (2013), quienes realizan un estudio de riesgos geológicos utilizando una

combinación de variables ponderadas y técnicas de evaluación multicriterios. Esta metodología se apoya en la plataforma ILWIS 3.0 para procesar la información proveniente de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) de entidades gubernamentales, además de realizar la digitalización de imágenes satelitales Landsat TM. De esta manera, se logra obtener resultados precisos y coste-eficientes en la evaluación de la susceptibilidad a deslizamientos de tierra a escalas intermedias (1:25.000 y 1:50.000).

Otra propuesta importante es la realizada por Romero, Ramos, Vazquez, Arrogante & Sanchez (2019), quienes automatizaron la detección de eventos de deslizamientos, utilizando como insumo imágenes satelitales ASTER con una resolución de 15 metros y un inventario de deslizamientos, que estructuraron a partir de la identificación de los mismos en Google Earth. Se generó un mapa de cambios a partir del cálculo de la diferencia de los componentes principales de la imágenes, para posteriormente aplicar el método de umbralización de la secante, con el cual se categoriza la imagen en deslizamiento/No-deslizamiento, como criterios adicionales, se tuvieron en cuenta la eliminación de nubes y las pendientes mayores a 5°. Finalmente, se evaluó la precisión obtenida mediante la implementación de una matriz de confusión, concluyendo la eficacia de la implementación de técnicas de percepción remota para la detección de deslizamientos.

Existen diferentes metodologías y técnicas para evaluar el riesgo por movimientos en masa, las cuales han sido utilizados en Colombia por las entidades estatales, obteniendo estudios como la "Zonificación de la Susceptibilidad General del Terreno a los Deslizamientos de Tierra a

escala 1:500.000" presentado por el IDEAM en 2010 y Mapa Nacional de Amenaza relativa por Movimientos en Masa a escala 1:100.000 del Servicio Geológico Colombiano (SGC) actualizado en 2015. De acuerdo con el documento "Caja de herramientas para orientar la incorporación del análisis de riesgo de desastres y la adaptación al cambio climático en los proyectos de inversión pública (DNP, MinAmbiente, MinHacienda, UNGRD y GIZ 2019), dichas metodologías consisten en estudios basados en métodos estadísticos bivariados denominado "Pesos de Evidencia" (WofE, por sus siglas en inglés), métodos heurísticos o geomorfológicos, correlación con umbrales de lluvia, Modelo geológico-geotécnico para suelos y rocas y la utilización de insumos cartográficos como modelos digitales de terreno, sensores remotos (técnicas de teledetección) y cartografía básica.

No obstante, con el fin de contribuir a la planificación de los territorios locales por medio de la identificación de riesgos por movimientos en masa, se han desarrollado diferentes estudios académicos utilizando técnicas de teledetección y sistemas de información geográfica, uno de los estudios realizados en Colombia fue el desarrollado por (Peñaloza & Tocasuche, 2018), denominado "Detección y análisis de deslizamientos utilizando interferometría diferencial (D-Insar) entre los años 2015 y 2017 en las provincias Norte y Valderrama del departamento de Boyacá", el cual permitió la identificación de zonas de deslizamientos donde se determinaron valores y patrones de desplazamiento relevantes asociados a las coberturas de tierra, cuerpos de agua y fallas geológicas presentes en la zona de estudio.

Estudios como el mencionado anteriormente, permiten la utilización de nuevas técnicas para la identificación de riesgos, por lo tanto, la complementación de este tipo de estudios, dan

paso a definir metodologías diferentes que puedan ser utilizadas por los municipios en los planes de ordenamiento territorial, puesto que conforme a cifras del Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio para año 2020, el 88% de los municipios de Colombia tenían el POT desactualizado, por lo que los estudios de amenaza, riesgo y susceptibilidad a escala local por fenómenos como los movimientos en masa se encuentran obsoletos o en el peor de los casos, los municipios no cuentan con dichos estudios, por lo que la definición de programas y políticas en gestión del riesgo y prevención de desastres son poco efectivas.

4. Referente normativo y legal

La Constitución Política Colombiana, a través de su artículo 151, establece que el Congreso es responsable de promulgar las leyes orgánicas, las cuales tienen como uno de sus objetivos principales asignar competencias normativas a las Entidades Territoriales, tales como los Departamentos y los municipios. En este sentido, el artículo 288 de la Constitución establece que la ley orgánica de ordenamiento territorial será la encargada de determinar la distribución de competencias entre la Nación y las entidades territoriales bajo los principios de coordinación, concurrencia y subsidiariedad.

El ordenamiento territorial es el instrumento de planificación y de gestión de las entidades territoriales, que de manera descentralizada favorece el desarrollo institucional, cultural y económico, respetando y potenciando los factores sociales, ambientales, físicos y geográficos. Mediante la ley 1454 de fecha 28 de junio de 2011, se dictan las normas orgánicas relacionadas al ordenamiento territorial, estableciendo las competencias de los diferentes actores territoriales, los principios, el marco institucional y las herramientas para realizar de manera efectiva y eficiente la organización político administrativa del territorio.

Además de la Ley Orgánica de Ordenamiento Territorial (LOOT), es importante mencionar la Ley 388 de 1997, que complementa y precede a esta normativa. Su objetivo fundamental es fomentar el desarrollo y la planificación de los territorios, con el fin de asegurar una utilización armoniosa del suelo, los recursos naturales y la sostenibilidad ecológica. Es por esto que la gestión del riesgo de desastres se establece como uno de los pilares de esta ley, con el

fin de identificar y delimitar las zonas de alto riesgo y ejecutar programas con una visión preventiva hacia cualquier tipo de amenaza.

Adicionalmente, con la Ley 1523 de 2012 se adopta la política nacional de gestión del riesgo de desastres y se establece el sistema nacional de gestión del riesgo, definiendo las responsabilidades, principios y objetivos de la misma. Dicha ley define la gestión del riesgo de desastres como un proceso social que se enfoca en el conocimiento, reducción del riesgo y la atención de desastres, mediante la formulación e implementación de políticas que permitan apoyar el desarrollo sostenible de la población.

Los planes de ordenamiento territorial desempeñan un papel fundamental en la planeación , y de acuerdo con la Ley 388 de 1997, se establecen tres tipos de planes de ordenamiento en función del número de habitantes en cada territorio. El Esquema Básico de Ordenamiento Territorial (EOT) se aplica a poblaciones de menos de 30.000 habitantes, el Plan Básico de Ordenamiento Territorial (PBOT) se aplica a poblaciones entre 30.000 y 100.000 habitantes, y el Plan de Ordenamiento Territorial (POT) se aplica a poblaciones de más de 100.000 habitantes (CONGRESO DE COLOMBIA, 1997).

En los municipios de Chita, Jericó y Socotá se ha determinado que los instrumentos de ordenamiento territorial aplicables son los Esquemas Básicos de Ordenamiento Territorial (EOT), los cuales han sido adoptados mediante acuerdos municipales específicos emitidos por las alcaldías municipales. En el caso de Jericó, se adoptó a través del Acuerdo 02 del 17 de julio

de 2010; en Socotá, se estableció mediante el Acuerdo 03 de 2005; y en Chita, se encuentra regulado por el Acuerdo municipal 045 del 2000.

5. Referente teórico

5.1 Introducción a la teledetección

La teledetección es una técnica que permite adquirir imágenes de la superficie terrestre desde sensores instalados en plataformas espaciales (Chuvieco, 1995), y supone basado en lo anterior que “entre la Tierra y el sensor existe una interacción energética, ya sea por reflexión de la energía solar o de un haz energético artificial, ya por emisión propia” (p. 27).

Según la obra de Chuvieco (1995), los elementos clave de la composición de la teledetección espacial incluyen fuentes de energía, cubierta terrestre, sistema sensor, sistema de recepción- comercialización, intérprete y usuario final como se evidencia en la siguiente ilustración:



Ilustración 1. Elementos de teledetección ambiental, elaboración propia Fuente: Chuvieco (1995)

Como se mencionó anteriormente, según la fuente de energía utilizada, se pueden distinguir dos tipos de teledetección: pasiva y activa.

5.2 Sensor activo

Los sensores activos son generadores de su propia luz y por tanto cuentan con ventajas importantes como controlar las condiciones de adquisición, el ángulo de inclinación, la distancia al objeto, la orientación, la polarización, etc. (Chuvieco, 1995, p. 72), es así que sensores como LIDAR o RADAR analizan características del terreno, como la rugosidad, geometría, altitudes y topografía. Esto se debe a que operan en el rango de microondas en el espectro electromagnético, lo que les permite superar la falta de información causada por la nubosidad, es por esto que para estos sensores, la atmósfera no representa un obstáculo en la adquisición de datos.

5.3 Sensor pasivo

Los sensores pasivos se distinguen de los sensores activos debido a que no emiten su propia energía, sino que dependen de una fuente externa de energía, en este caso, la energía natural reflejada por los objetos terrestres. Estos sensores no pueden captar luz durante la noche, ya que necesitan la presencia de luz solar como fuente de energía para su funcionamiento, lo que resulta en una falta de captura de información durante este período.

Los sensores pasivos se clasifican como ópticos debido al rango del espectro electromagnético en el que operan. Esto conlleva ventajas, como la capacidad para interpretar y analizar diversos patrones del terreno gracias a la disponibilidad de múltiples bandas, detectar cambios en la cobertura terrestre, analizar firmas espectrales, llevar a cabo seguimientos y proporcionar cobertura global. Por esta razón, la teledetección pasiva emplea sensores multiespectrales e hiperespectrales, ya que están diseñados para capturar información en diferentes bandas dentro y fuera del espectro visible, incluyendo el NIR, IR y TIR.

No obstante, también presentan desventajas, como la pérdida de información debido a la presencia de nubosidad y la interrupción en la captura de información durante horas nocturnas.

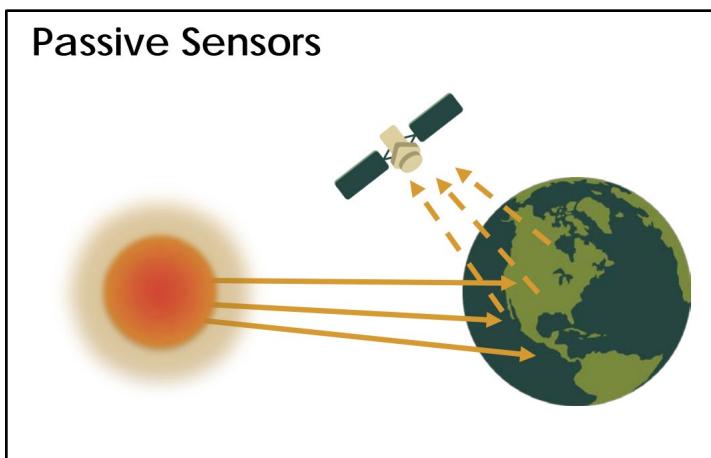


Ilustración 2. Sensor Pasivo Fuente: NASA Applied Remote Sensing Training Program

5.4 Programa y misión

5.4.1 Programa Copernicus

La unión europea cuenta con el programa de observación de la tierra denominado Copernicus, este ofrece servicios de información de acceso gratuito y abierto, basados en los datos capturados de la observación de la tierra con plataformas satelitales, sistemas de medición terrestres, aéreos y marítimos, con el fin de suministrar información a diferentes organizaciones en beneficio de la ciudadanía europea. La gestión y coordinación del programa lo hace la comisión europea, en colaboración con los Estados miembros, la Agencia Espacial Europea (ESA), la Organización Europea para la Explotación de Satélites Meteorológicos (Eumetsat), el Centro Europeo de Previsiones Meteorológicas a Medio Plazo, las agencias de la Unión Europea y la empresa Mercator Océan (Copernicus, n.d.)

El programa Copernicus tiene dos grupos de misiones satelitales que suministran información para los servicios ofrecidos, el primero “The Sentinels” que son los satélites desarrollados específicamente para satisfacer las necesidades del programa; de estos, los sentinel 1, 2, 3, 6 y 5P son satélites propios, mientras que los sentinel 4 y 5 son instrumentos a bordo de los satélites de la Organización Europea para la Explotación de Satélites Meteorológicos. El segundo grupo es el de las misiones contribuyentes de organizaciones nacionales, europeas o internacionales y la información obtenida por la treintena de satélites que integran dichas misiones es coordinada y suministrada por la ESA y Eumetsat (Copernicus, n.d.)

Las características principales de las misiones sentinel son las siguientes:

- **Sentinel-1:** Esta misión proporciona imágenes de radar de apertura sintética en banda C, capturando información de día y noche, consta de una constelación de dos satélites en órbita polar los Sentinel-1A y Sentinel-1B (Copernicus, n.d.)
- **Sentinel-2:** Esta misión proporciona imágenes ópticas de alta resolución, de utilidad para la identificación de cambios en la superficie terrestre, en coberturas como vegetación, suelo, agua, vías y zonas costeras; consta de una constelación de dos satélites el Sentinel-2A y Sentinel-2B, en órbita polar colocados en la misma órbita heliosincrónica, en fase a 180° entre sí (Copernicus, n.d.)
- **Sentinel-3:** Esta misión es operada en conjunto por la ESA y EUMETSAT, proporciona datos ópticos, de radar y de altimetría de alta precisión, sus principales objetivos son medir la topografía de la superficie del mar, la temperatura de la superficie del mar y la tierra, y el color de la superficie del océano y la tierra. Consta de una constelación de dos satélites el Sentinel-3A y Sentinel-3B (Copernicus, n.d.).
- **Sentinel-4:** Esta misión se compone por el espectrómetro Ultravioleta Visible Infrarrojo Cercano (UVN) y datos de la Sonda Infrarroja (IRS), los cuales están instalados en el satélite MTG-Sounder (MTG-S). El principal objetivo de esta misión es identificar la calidad del aire y la composición atmosférica (La Organización Europea para la Explotación de Satélites Meteorológicos [EUMETSAT], n.d.)
- **Sentinel-5:** Su objetivo principal es el seguimiento de la composición atmosférica, es transportado por el satélite Metop-SG-A de Eumetsat (Copernicus, n.d.).

- **Sentinel-5P:** Su objetivo es realizar mediciones atmosféricas, que permitan determinar la calidad del aire, el ozono y la radiación ultravioleta; fue el primero del programa copernicus en monitorear la atmósfera, cerrando la brecha de disponibilidad de recursos hasta el lanzamiento de las misiones sentinel 4 y 5 (Agencia Espacial Europea [ESA], n.d.-a).
- **Sentinel-6:** Esta misión es resultado de la cooperación entre Europa y Estados Unidos. La información que captura corresponde a altimetría de alta precisión para medir la altura global de la superficie del mar y se utiliza principalmente para oceanografía y estudios climáticos (Copernicus, n.d.).

5.4.2 Sentinel 2

La misión Sentinel -2 tiene como propósito brindar imágenes multiespectrales de alta resolución y con una frecuencia de revisita alta, cada cinco días en la región ecuatorial, para esto ha puesto en funcionamiento dos satélites gemelos que vuelan alrededor de la tierra en una órbita heliosíncrona, lo que permite que el ángulo de luz solar sobre la tierra sea aproximadamente constante, están desfasados 180 grados pero compartiendo la misma trayectoria.

Esta iniciativa tiene un propósito aún más significativo, ya que busca enriquecer el programa Copernicus con información crucial. En particular, se espera que las imágenes capturadas contribuyan de manera valiosa a los esfuerzos de análisis del cambio climático, monitoreo terrestre, gestión de emergencias y seguridad. Esta misión no solo tiene como objetivo

satisfacer las necesidades actuales, sino también garantizar la continuidad de la información recopilada por los satélites SPOT y el instrumento USGS LANDSAT Thematic Mapper, proporcionando una perspectiva continua y evolutiva de nuestro entorno (ESA, n.d.-b).

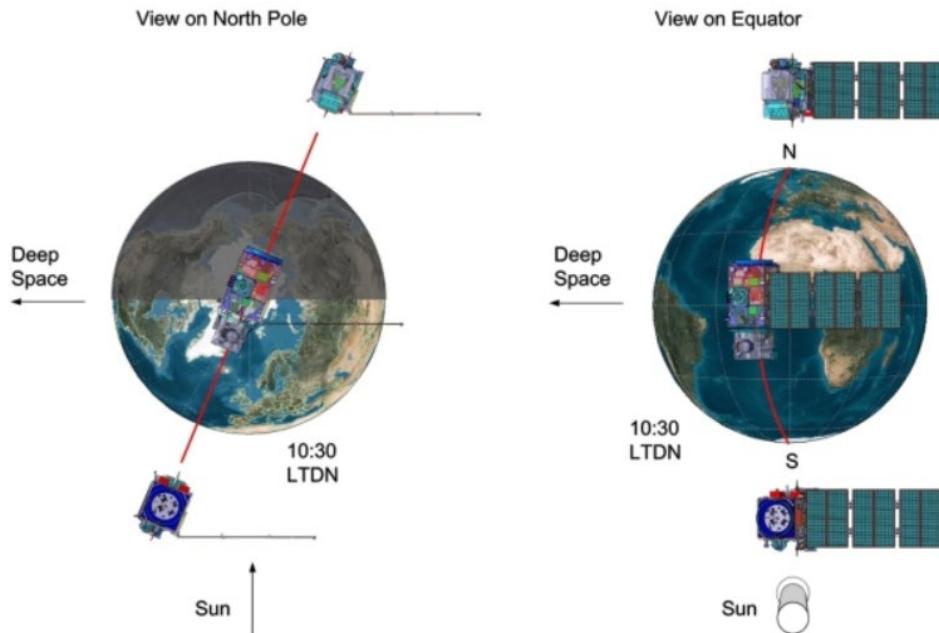


Ilustración 3. Configuración orbital del satélite gemelo SENTINEL-2. Fuente (ESA, n.d.-b)

La misión se compone de dos satélites: SENTINEL-2A y SENTINEL-2B, diseñados para una vida útil de 7,25 años y con un tiempo estimado de operación extendido de 12 años. La estabilidad orbital de cada satélite se mantiene gracias a un sistema de propulsión, mientras que su posición se verifica meticulosamente mediante un receptor de doble frecuencia del Sistema Global de Navegación por Satélite (ESA, n.d.-b).

En el corazón de esta misión se encuentra el Instrumento Multiespectral (MSI), un sensor pasivo de barrido, este dispositivo capta la energía electromagnética reflejada por la superficie

terrestre y la descompone en dos conjuntos distintos. Uno de ellos abarca las bandas visibles e infrarrojo cercano (VNIR), mientras que el otro se concentra en las bandas de infrarrojos de onda corta (SWIR) (ESA, n.d.-b).

La misión adquiere una amplia gama de datos en 13 bandas espectrales distintas, estos parámetros están gráficamente representados en la Tabla 1, que exhibe de manera clara y concisa las especificaciones de cada una. Estas bandas se desglosan en tres categorías según su resolución espacial, en primer lugar, se encuentran cuatro bandas, a saber, B2, B3, B4 y B8, que capturan información a una resolución de 10 metros, continuando, seis bandas, identificadas como B5, B6, B7, B8A, B11 y B12, entregan detalles a una resolución espacial de 20 metros y por último, tres bandas, denominadas B1, B9 y B10, capturan datos a una resolución de 60 metros (Ministerio de transportes del Gobierno de España, 2018).

Tabla 1. Bandas de los satélites Sentinel 2

Banda	Longitud de onda central (μm)	Resolución espacial (m)
Banda 1 – coastal aerosol	0.443	60
Banda 2 - azul	0.490	10
Banda 3 – verde	0.560	10
Banda 4 – rojo	0.665	10
Banda 5 – Vegetation Red Edge	0.705	20
Banda 6 – Vegetation Red Edge	0.740	20

Banda	Longitud de onda central (μm)	Resolución espacial (m)
Banda 7 – Vegetation Red Edge	0.783	20
Banda 8 – NIR	0.842	10
Banda 8A – Vegetation Red Edge	0.865	20
Banda 9 – Vapor de agua	0.945	60
Banda 10 – SWIR – cirros	1.375	60
Banda 11 – SWIR	1.610	20
Banda 12 - SWIR	2.190	20

Fuente: Adaptada (Ministerio de transportes del Gobierno de España, 2018).

Los productos de la misión sentinel 2 tienen cinco niveles de procesamiento como se relaciona en la ilustración 4. Sin embargo, sólo los productos Nivel-1C y Nivel-2A están disponibles para los usuarios finales en el centro de acceso abierto de copernicus, es por esto que se hará especial énfasis en estos dos tipos de productos (Ministerio de transportes del Gobierno de España, 2018).

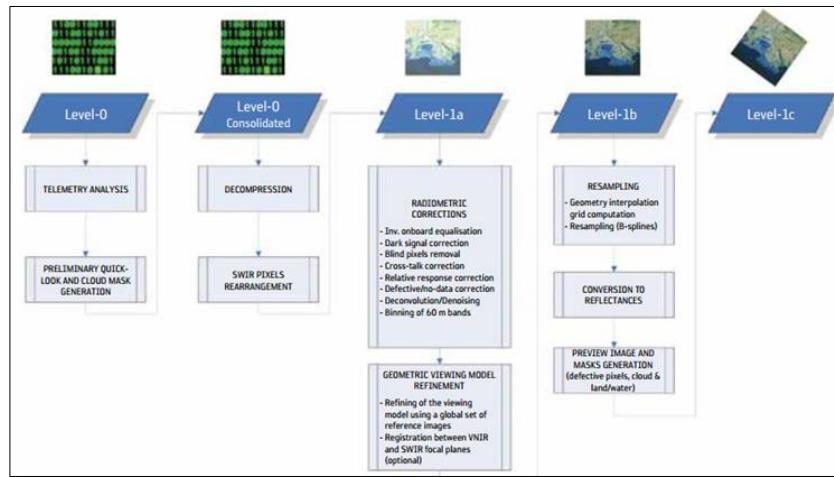


Ilustración 4. Niveles de procesamiento desde el nivel 0 hasta el nivel 1C. Fuente (Ministerio de transportes del Gobierno de España, 2018).

El producto de nivel-1C entrega ortoimágenes en el sistema geodésico de coordenadas geográficas WGS84, presentando niveles digitales de reflectancia aparente a tope de la atmósfera. Aunque esta información ofrece una visión inicial, no refleja con precisión la verdadera condición de la superficie terrestre, esto se debe a que no considera las interacciones del espectro electromagnético con la atmósfera, lo que indica la necesidad imperativa de aplicar la corrección atmosférica a estos datos (Ministerio de transportes del Gobierno de España, 2018).

El nivel de procesamiento -2A se distingue del nivel 1C al incluir correcciones atmosféricas. En consecuencia, las ortoimágenes descargadas presentan niveles expresados en valores reales de reflectancia a nivel de la superficie terrestre. Esta característica singular hace que este tipo de producto sea una elección excepcional para una variada gama de usuarios, ya que proporciona información más precisa y directamente utilizable (Ministerio de transportes del Gobierno de España, 2018).

5.5 Movimientos en masa

Los movimientos en masa ocurren como deformaciones del terreno, movimientos de tipo viscoso y otros desplazamientos de masas en cualquier parte de la tierra. En Colombia, este fenómeno suele manifestarse predominantemente durante la temporada de lluvias, causando impactos significativos en la población, la infraestructura vial y varios proyectos en curso. Esta situación se agrava aún más debido al fenómeno de La Niña, que en los años 2010 y 2011 alcanzó niveles de afectación sin precedentes (Servicio Geológico Colombiano, 2017).

Los movimientos en masa hacen referencia a cualquier tipo de desplazamiento de material litológico hacia abajo, causado por la influencia de la gravedad (Cuervo, 2000). Según el libro titulado 'Movimientos en Masa en la Región Andina: Una Guía para la Evaluación de Amenazas', estos fenómenos se dividen en siete categorías, denominadas caídas, volcamiento, deslizamiento de roca, propagación lateral, flujo, reptación y deformación gravitacional profunda.

No obstante, de acuerdo con la publicación del Servicio Geológico Colombiano titulada 'Clasificación de Movimientos en Masa y su Distribución en Terrenos Geológicos de Colombia', para dicho país se han identificado los tipos y subtipos de movimientos en masa de más frecuente ocurrencia y se clasifican de la siguiente manera:

5.5.1 Caídas, rodamientos y bloques erodados

Estos fenómenos se manifiestan principalmente en pendientes pronunciadas y en áreas de roca que están expuestas a procesos de meteorización, socavación o excavación. En un inicio, suelen producirse fisuras o grietas en la superficie, las cuales, con el tiempo, conducen al desprendimiento de suelo o rocas (Servicio Geológico Colombiano, 2017).

5.5.2 Volcamientos

Pueden ser activados por la fuerza de gravedad ejercida por el material situado en la parte superior del talud, arriba de la masa desplazada y otras veces por el agua o hielo que ejercen efecto de cuña en las grietas de las masas rocosas o del suelo. Los tipos de volcamiento se pueden clasificar en tres categorías principales: el volcamiento de bloques de roca, que involucra la liberación de bloques delimitados por discontinuidades preexistentes, ya sea de forma única o múltiple; el volcamiento de bloques de roca aislados; y el volcamiento de detritos (Servicio Geológico Colombiano, 2017).

5.5.3 Deslizamientos

Los deslizamientos se dividen en tres categorías: rotacional, translacional y compuesto. Estos son producto del incremento en los esfuerzos o la reducción de la resistencia de los materiales involucrados de tal manera que se supere el umbral de falla, lo cual ocurre cuando las

fuerzas desestabilizantes igualan a las que se oponen al movimiento. (Servicio Geológico Colombiano, 2017).

- **Deslizamientos rotacionales o hundimientos (slump)**

Este tipo de deslizamientos es común en rellenos hechos por el hombre sobre suelos blandos y en laderas con las características que se describen en la tabla 2.

Tabla 2. Deslizamientos rotacionales en Colombia

Ubicación	Composición de las laderas
Cordillera Oriental de los Andes	<ul style="list-style-type: none">● Capas gruesas de coluvión arcilloso, principalmente cuando estos depósitos superyacen shales cizallados.● Macizos de arcillolitas, lodolitas, margas y otras rocas blandas dispuestos en varios sitios de los Andes.
Oriente y Centro-occidente de los Andes	<ul style="list-style-type: none">● Capas gruesas de cenizas volcánicas y otros piroclastos en la zona cafetera.
Cordillera Central	<ul style="list-style-type: none">● Taludes de rocas cristalinas meteorizadas (saprolitos), provenientes de basaltos, diabásas, andesitas y otras rocas volcánicas básicas e intermedias.

Fuente: Adaptada (Servicio Geológico Colombiano, 2017).

- **Deslizamientos translacionales planares y de cuñas de roca**

De acuerdo con el Servicio Geológico Colombiano, este tipo de deslizamientos suele ocurrir con regularidad en el país especialmente en “(...) ambientes sedimentarios de la cordillera Oriental, en rocas de diferente edad y litología asociados a planos de estratificación y en ambientes ígneo-metamórficos (oriente y centro-occidente) asociados a planos de foliación, estos últimos menos frecuentes” (Servicio Geológico Colombiano, 2017, p.90).

- **Deslizamientos compuestos**

En Colombia los deslizamientos compuestos que más se presentan son los progresivos, esta situación es especialmente notable en las zonas de rocas lodosas de la cordillera oriental del país, un ejemplo de esto, ocurre en el sitio de El Cune municipio de Villeta Cundinamarca, que se caracteriza por “(...) presentar una superficie de falla externa de tipo graben, con un mecanismo de falla progresivo distintivo, que comprende una falla rotacional en la corona seguida de una extensa falla translacional de la masa restante, con ligera terminación ascendente en el pie” (Servicio Geológico Colombiano, 2017, p.90).

5.5.4 Flujos

Este tipo de deslizamiento se refiere a las masas que se desprenden desde la cima de las laderas y a medida que avanzan, incorporan una mayor cantidad de material a lo largo de su trayectoria, esta masa avanza en forma viscosa. Estos deslizamientos suelen recorrer distancias significativas, ya sea de manera canalizada o extendida.

En Colombia este tipo de deslizamiento es muy frecuente, se presenta principalmente en época de lluvias. “(...) En el dominio de la cordillera Central, en toda la extensión de la zona cafetera los flujos de detritos y tierras y en menor proporción los flujos de lodos involucran principalmente las laderas de filitas y esquistos del Paleozoico a lo largo de la foliación, las cenizas volcánicas y los suelos residuales. En la cordillera Oriental afectan el mismo tipo de secuencias metamórficas antes citadas, que conforman macizos antiguos y algunas laderas que exponen secuencias sedimentarias arcillosas del Cretáceo y más antiguas o los coluviones asociados.” (Servicio Geológico Colombiano, 2017, p.91).

Dos tipos importantes de flujos que se han presentado en Colombia son el de detritos a causa de descongelamiento de conos volcánicos como el del Nevado del Ruíz en 1985 y las descargas torrenciales, como la que destruyó el puente de Chirajara, en la carretera Bogotá-Villavicencio en 1991.

5.5.5 Creep (reptación)

Las causas de este fenómeno son diversas y pueden atribuirse a una serie de factores, que van desde la falta de consolidación en la capa superior del suelo hasta la intervención humana en la zona, ejemplo de esto es la deforestación, el cambio en el uso y manejo del suelo que producen altas concentraciones de humedad. Los suelos afectados por dicho fenómeno se caracterizan por su rugosidad acompañada de humedad, usualmente, se presenta en grandes extensiones de terreno y se evidencian características como troncos curvados de los árboles, desplazamiento de

cercas, inclinación de postes, agrietamiento de edificaciones. (Servicio Geológico Colombiano, 2017).

El creep se divide en dos subtipos de movimiento conocidos como Creep estacional y Creep continuo.

- **Creep estacional:** Este fenómeno ocurre en la capa superficial del suelo, la cual suele ser poco consolidada y es altamente susceptible a los cambios estacionales de temperatura y humedad. Los efectos de este tipo de creep se consideran intermitentes y superficiales, se observan principalmente en las laderas coluviales de la cordillera Oriental, o en laderas de suelos volcánicos, suelos residuales de rocas graníticas y de rocas metamórficas de la zona cafetera en el centro-occidente (Servicio Geológico Colombiano, 2017).
- **Creep profundo o continuo:** Este tipo de Creep provoca una afectación significativa dado que tiene lugar en la capa profunda del suelo, impactando en varios metros de espesor y abarcando una extensa área. El movimiento del suelo a diferencia del creep estacional se presenta a una tasa constante producto de la incidencia de la fuerza gravidad en las laderas reptantes, los daños ocasionados se pueden considerar importantes en carreteras y otros proyectos (Servicio Geológico Colombiano, 2017).

5.6 Características de la radiación electromagnética

Para comprender la interacción entre las diversas coberturas terrestres y la energía electromagnética, es esencial tener en cuenta que una de las principales fuentes de energía para nuestro planeta es el sol, el cual posee una temperatura radiante cercana a los 6.000 K y su punto de máxima emitancia se encuentra en el espectro visible, específicamente entre los 0,3 y 2 μm . Este intervalo es de gran relevancia en el estudio de las coberturas terrestres, ya que proporciona una cantidad significativa de información, no obstante, es importante tener en cuenta que en este rango espectral, se pueden presentar interferencias causadas por la atmósfera en ciertos puntos (Chuvieco, 1995).

La energía que incide sobre un objeto en la superficie terrestre se puede descomponer en tres categorías distintas: la energía reflejada, la transmitida y la absorbida, conforme se muestra en la ilustración 5. La proporción entre estas tres categorías depende en gran medida de las características específicas del objeto observado. Además, es importante destacar que esta proporción puede variar significativamente en función de la longitud de onda de la energía incidente (Chuvieco, 1995).

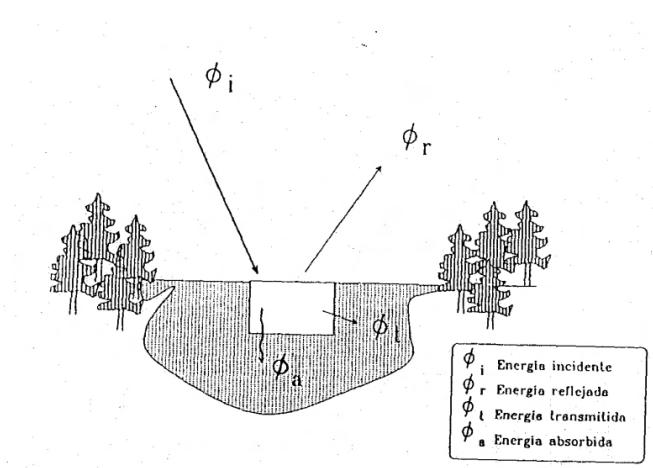


Ilustración 5. Relación entre flujo incidente y reflejado. Fuente. (Chuvieco, 1995)

Las variaciones en la energía reflejada, transmitida y absorbida de un objeto en el espectro visible es lo que definimos como colores. El color atribuido a un objeto corresponderá entonces a la banda del espectro en la que se refleje la mayor proporción de energía (Chuvieco, 1995).

5.6.1 Índice espectral

Los índices espectrales realizan una división píxel a píxel entre los niveles digitales almacenados en dos o más bandas de una misma imagen, como señala Chuvieco 1995. Por lo tanto, estos índices indican una transformación de las bandas, generalmente dividiéndolas en categorías orientadas y no orientadas.

Las transformaciones orientadas se distinguen por tener un objetivo específico previo al momento del cálculo. Un ejemplo de estas transformaciones incluye los índices de vegetación y

la transformación Tasseled Cap . En contraste, las transformaciones no orientadas no tienen un resultado predefinido, como es el caso del análisis de componentes principales.

De acuerdo con Chuvieco (1995), el empleo de los índices espectrales, se justifica por dos situaciones: 1) Para mejorar la discriminación entre coberturas 2) para reducir el efecto de relieve en la caracterizaciónpectral de las diferentes cubiertas.

5.6.2 Índice espectral NBR

El índice de quema normalizado (NBR, por sus siglas en inglés) fue diseñado para resaltar las áreas quemadas y estimar la gravedad del incendio, se calcula aplicando la siguiente ecuación (ESA,2018) :

$$NBR = \frac{(NIR - SWIR)}{(NIR + SWIR)} = \frac{B8 - B12}{B8 + B12} \Rightarrow \text{Bandas de Sentinel}$$

Ecuación 1. Formula índice NBR

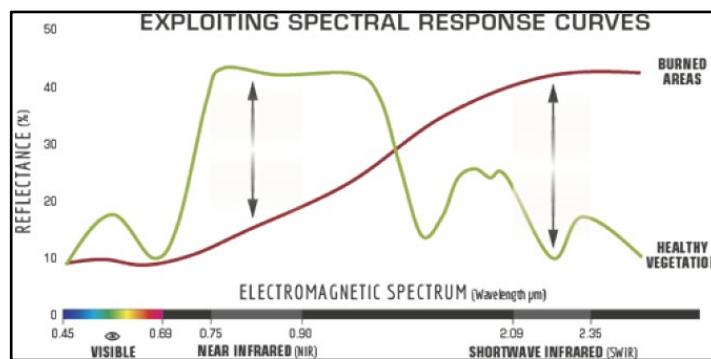


Ilustración 6. Comparación de la respuesta espectral de vegetación saludable y áreas quemadas. Fuente: U.S. Forest Service.

De acuerdo con la ESA (2018), la vegetación sana antes del evento tiene una reflectancia muy alta en el infrarrojo cercano (NIR) y una reflectancia baja en la porción infrarroja de onda corta del espectro (SWIR) . Por otro lado, las áreas recientemente quemadas tienen una reflectancia relativamente baja en el infrarrojo cercano y una alta reflectancia en la banda infrarroja de onda corta, por lo tanto, un valor alto de NBR generalmente indica vegetación saludable, mientras que un valor bajo indica suelo desnudo y áreas recientemente quemadas.

Dadas las características del índice y la similitud entre las áreas afectadas por incendios forestales y deslizamientos, que involucran la pérdida de vegetación o la combinación de coberturas terrestres como suelo y vegetación durante ambos eventos, se plantea la posibilidad de utilizar este índice en la detección de eventos de movimientos en masa.

5.6.3 Diferencia NBR (dNBR)

La diferencia entre el NBR previo y posterior al incendio obtenido de las imágenes se usa para calcular el diferencial NBR (dNBR o Δ NBR), que luego se puede usar para estimar la severidad del evento. Un valor más alto de dNBR indica un daño más severo, mientras que las áreas con valores negativos de dNBR pueden indicar un nuevo crecimiento de vegetación después de un evento (UN-SPIDER, n.d.). La fórmula utilizada para calcular dNBR se ilustra a continuación:

$$\Delta DNBR = NBR(\text{PREVIO AL EVENTO}) - NBR(\text{POSTERIOR AL EVENTO})$$

Ecuación 2. Formula índice DNBR

Aunque este índice se utiliza principalmente para calcular la severidad de incendios en el suelo, también se aplica en la evaluación de la probabilidad de futuros impactos, incluyendo deslizamientos de tierra, erosión del suelo y avalanchas, en diversas escalas.

Tabla 3. Niveles de severidad en incendios obtenidos a partir del dNBR, propuesto por USGS.

Severity Level	dNBR Range (scaled by 10^3)	dNBR Range (not scaled)
Enhanced Regrowth, high (post-fire)	-500 to -251	-0.500 to -0.251
Enhanced Regrowth, low (post-fire)	-250 to -101	-0.250 to -0.101
Unburned	-100 to +99	-0.100 to +0.99
Low Severity	+100 to +269	+0.100 to +0.269
Moderate-low Severity	+270 to +439	+0.270 to +0.439
Moderate-high Severity	+440 to +659	+0.440 to +0.659
High Severity	+660 to +1300	+0.660 to +1.300

5.6.4 Firma espectral

La firma espectral hace referencia a la caracterización de una superficie en función de la cantidad de energía que refleja o emite para diferentes longitudes de onda. El comportamiento espectral de diversas coberturas terrestres ha sido objeto de estudio en entornos controlados de laboratorio, lo que ha permitido identificar su respuesta bajo condiciones ideales, tal como se muestra en la ilustración 7 (Chuvieco, 1995).

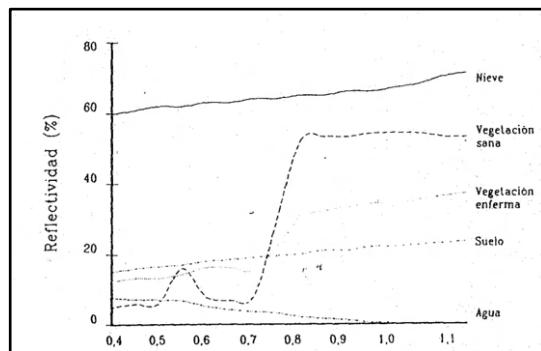


Ilustración 7. Signaturas espectrales típicas de distintas cubiertas. Fuente. (Chuvieco, 1995)

Sin embargo, en circunstancias reales el flujo de energía que recibe el sensor se ve afectado por el ángulo de iluminación solar, las condiciones atmosféricas, la ubicación de la cobertura a estudiar y su relación con el entorno natural en el que se encuentra, además de la geometría de la observación. Por lo tanto, a pesar de contar con una firmapectral característica para cada superficie, cada cubierta exhibe una variabilidad espectral que complica su identificación respecto a otras superficies (Chuvieco, 1995).

5.6.5 Firma espectral del suelo

Las características fundamentales que influyen en la firma espectral del suelo son su composición, estructura y contenido de humedad. En el caso de suelos sin cobertura vegetal, la firma espectral tiende a ser relativamente uniforme, con una curva plana y valores crecientes, como se muestra en la ilustración 4. Además, el color del suelo ofrece pistas sobre su comportamiento espectral, por ejemplo, los suelos de origen calcáreo suelen ser de color blanco, lo que indica una alta reflectividad en el espectro visible, mientras que, los suelos de color rojo,

como las arcillas, reflejan más energía en esta parte del espectro debido a su contenido de óxido de hierro.

Como se mencionó previamente, la cantidad de humedad presente en el suelo juega un papel crucial en su capacidad de reflejar la radiación, en particular en las bandas del infrarrojo cercano y medio. Esto se traduce en una relación inversa, donde un mayor contenido de humedad resulta en una menor reflectividad, y viceversa. Un ejemplo destacado son los suelos arcillosos, los cuales, debido a su alto contenido de humedad, sólida estructura y fina textura, exhiben una reflectividad limitada. Por otro lado, los suelos arenosos, caracterizados por su reducido contenido de humedad y estructura menos compacta, presentan una mayor reflectividad.

5.7 Sentinel Application Platform- SNAP

Este programa, desarrollado por SEOM de la ESA, es una plataforma de código abierto diseñada para utilizar herramientas de Sentinel 1, Sentinel 2 y Sentinel 3, así como imágenes de ENVISAT, Radarsat, SPOT, Modis y otras. Está construido con una arquitectura modular en lenguajes de programación Java y Python. La arquitectura consta de dos subsistemas: SNAP Desktop, que es una interfaz de usuario con funciones avanzadas de análisis y visualización, y SNAP Engine, que es la base del código central y ofrece operaciones comunes como proyección, geo-codificación y filtros de imágenes

6. Metodología

6.1 Enfoque metodológico

El enfoque metodológico del proyecto es predominantemente cuantitativo, ya que en el desarrollo de este se identificaron, delimitaron y analizaron las zonas de amenaza por remoción en masa para el área de interés, mediante el procesamiento de imágenes satelitales y el cálculo de índices espectrales, lo que permitió generar los mapas temáticos detallados para dicho fenómeno.

6.2 Tipo de estudio

El tipo de estudio es descriptivo ya que su propósito principal es precisar las características particulares de un fenómeno, para este caso, la identificación de los rasgos espectrales específicos de los deslizamientos de tierra en la zona de estudio. Para lograr este objetivo, se recopiló información histórica de eventos de este tipo en la zona de interés, para posteriormente realizar el cálculo de índices espectrales y un análisis multitemporal, lo que permitió identificar el comportamientopectral de las zonas de amenaza por remoción en masa y validar los resultados obtenidos en el inventario de eventos históricos, generando mapas temáticos con la información obtenida.

6.3 Procedimiento

Con el fin de cumplir con los objetivos del proyecto, se han establecido cuatro (4) fases definidas las cuales a su vez se componen de diferentes actividades, las cuales se plasman en el diagrama metodológico del proyecto (Ver ilustración 8). A continuación se describe a detalle cada una de ellas;

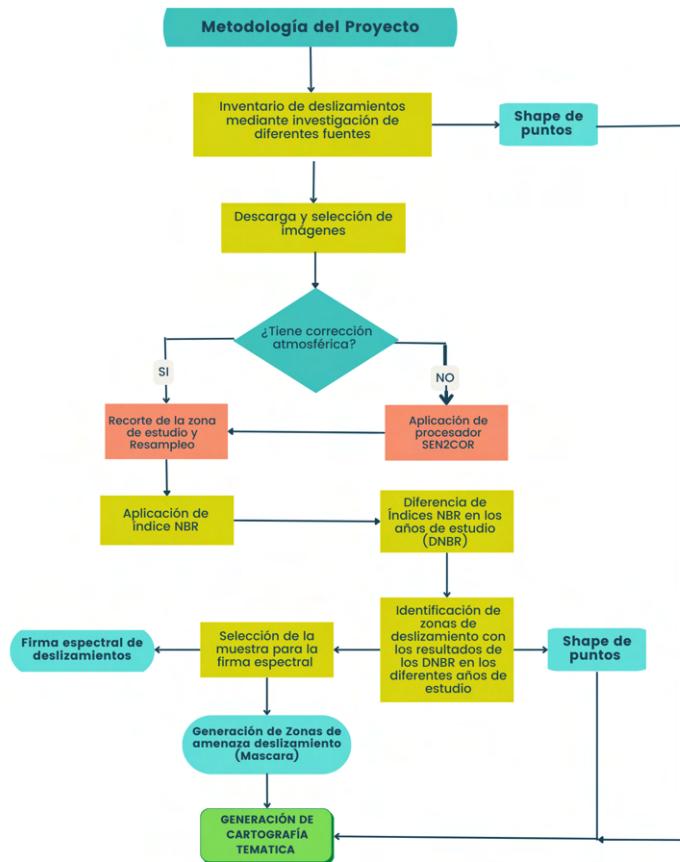


Ilustración 8. Metodología del Proyecto

FASE 1: Recopilar, depurar y seleccionar información geoespacial de la zona de estudio en el periodo comprendido entre los años 2018 y 2023 mediante la consulta de diferentes fuentes de información.

Actividad 1: Inventariar deslizamientos ocurridos en la zona de estudio

Esta actividad se definió como la fase inicial para identificar eventos de deslizamientos en áreas geográficas específicas dentro del área de estudio, con el propósito de llevar a cabo una evaluación preliminar de las zonas de amenaza debido a la posible ocurrencia de estos eventos. La actividad fue posible realizarla mediante la búsqueda de noticias en sitios web de medios de comunicación locales, regionales y nacionales, así como la exploración de redes sociales como Facebook, donde la comunidad reporta eventos ocurridos en sus localidades que afectan sus intereses individuales y colectivos.

Además, se consultaron fuentes oficiales, como los documentos de ordenamiento territorial y los planes de desarrollo previos y actuales de los municipios de interés. Esto permitió obtener un conocimiento detallado de las principales causas de los deslizamientos y de las características de la zona donde ocurren. También, un recurso valioso fue el inventario nacional de movimientos en masa, el cual está registrado y almacenado en el sistema de información SIMMA, permitiendo realizar consultas detalladas sobre los eventos según su tipo (caída, deslizamiento, propagación lateral, volcamiento, deformaciones gravitacionales, flujo y reptación) y fecha del evento. Sin embargo, es importante mencionar que este recurso tiene

limitaciones temporales, ya que las fechas de reporte no superan el año 2015, convirtiéndolo en el archivo histórico más antiguo disponible.

Actividad 2: Seleccionar imágenes insumo

En esta actividad, se procedió a realizar una selección preliminar de las imágenes que podrían ser útiles para investigar el fenómeno de los deslizamientos. Para llevar a cabo esta tarea, se empleó la plataforma Copernicus, donde se ingresaron los criterios de búsqueda correspondientes, estos criterios incluyeron la selección de la misión de interés, que en este caso fue Sentinel 2, y la especificación del porcentaje de cobertura de nubes deseado. Es importante destacar que, para el estudio de este fenómeno, no fue necesario distinguir entre las dos plataformas satelitales disponibles, ya sea S2A o S2B. Además, se consideró la posibilidad de aplicar corrección atmosférica utilizando el complemento Sen2cor.

De acuerdo con estos parámetros, se llevó a cabo la descarga de un total de once imágenes satelitales que abarcaban la zona de estudio. No obstante, posteriormente se realizó una selección y depuración de las imágenes descargadas. Esta selección se basó en varios criterios, que incluyeron la consideración del inventario de deslizamientos, la viabilidad de aplicar la corrección atmosférica y la elección de una única imagen por año, asegurándose de que ésta permitiera la identificación precisa del fenómeno objeto de estudio.

Debido a lo mencionado anteriormente, se excluyó la imagen correspondiente al año 2016, ya que no fue posible procesarla utilizando el complemento Sen2cor. En cuanto a las imágenes del año 2017, la investigación no reveló un número significativo de eventos de deslizamientos para esa fecha. Para los años 2021 y 2022, se contaba con dos opciones de imágenes disponibles para cada uno. En este caso, se optó por seleccionar las imágenes S2B_MSIL2A_20210105 y S2B_MSIL2A_20221226.

Tabla 4. Tabla de selección de imágenes

Imagen descargada	Imagen seleccionada
S2A_MSIL1C_20160605T151712_N020 2_R125_T18NYM_20160605T151748	NO
S2A_MSIL1C_20170819T151711_N020 5_R125_T18NYM_20200824T084632	NO
S2A_MSIL1C_20171217T151701_N020 6_R125_T18NYM_20171217T165757	NO
S2A_MSIL1C_20180317T151701_N020 6_R125_T18NYM_20180317T184033	SI
S2B_MSIL1C_20190225T151659_N020 7_R125_T18NYM_20190225T215739	SI
S2A_MSIL2A_20200922T151711_N021 4_R125_T18NYM_20200922T193311	SI
S2B_MSIL2A_20210105T151709_N021 4_R125_T18NYM_20210105T174358	SI
S2B_MSIL2A_20210115T151709_N021 4_R125_T18NYM_20210115T174459	NO
S2A_MSIL2A_20220105T151711_N030 1_R125_T18NYM_20220105T174633	NO
S2B_MSIL2A_20221226T151709_N050	SI

9_R125_T18NYM_20221226T19111	
S2B_MSIL2A_20230823T151709_N050 9_R125_T18NYM_20230823T192329	SI

Actividad 3: Realizar corrección atmosférica

Se debe destacar que las imágenes de los años 2018 y 2019 se encuentran en un nivel de procesamiento 1C, lo que implica que aunque están ortorectificadas los niveles de reflectancia se encuentran por encima de la atmósfera (TOA), mientras que las demás imágenes seleccionadas se encuentran en el nivel de procesamiento 2A, lo que implica que han sido corregidas atmosféricamente y que los datos medidos de reflectancia sobre estas se aproximan más a la realidad. Es por esto que se requiere realizar el procesamiento de las imágenes de los años 2018 y 2019 mediante el uso del complemento Sen2cor para llevarlas del nivel 1C al 2A, con el fin de que las imágenes sean comparables entre sí y facilite la realización de un análisis multitemporal.

Para llevar a cabo la corrección atmosférica de las imágenes, se procedió a descargar e instalar el complemento Sen2Cor_v2_10. La ejecución de este complemento se realiza desde la ventana del símbolo del sistema del ordenador, para lo cual se debe especificar la ruta en la que se ha almacenado dicho complemento y realizar una conexión con el mismo.

```

Símbolo del sistema Microsoft Windows [Versión 10.0.22621.2283]
(c) Microsoft Corporation. Todos los derechos reservados.

C:\Users\ESTEFANIA>cd C:\Users\ESTEFANIA\Documents\Sen2Cor-02.10.01-win64\Sen2Cor-02.10.01-win64

C:\Users\ESTEFANIA\Documents\Sen2Cor-02.10.01-win64\Sen2Cor-02.10.01-win64>dir
El volumen de la unidad C es OS
El número de serie del volumen es: FC7E-4755

Directorio de C:\Users\ESTEFANIA\Documents\Sen2Cor-02.10.01-win64\Sen2Cor-02.10.01-win64

28/11/2022 11:00 p. m. <DIR> .
28/11/2022 11:00 p. m. <DIR> ..
16/12/2021 03:42 a. m. <DIR> bin
16/12/2021 03:42 a. m. <DIR> copyright
16/12/2021 03:41 a. m. <DIR> DLLs
16/12/2021 03:37 a. m. 969 L2A_Process.bat
16/12/2021 03:41 a. m. <DIR> Lib
07/10/2021 08:43 a. m. 11,959 LICENSE.txt
07/10/2021 08:43 a. m. 1,441 README.md
16/12/2021 03:41 a. m. <DIR> share
    3 archivos 14,369 bytes
    7 dirs 33,106,960,384 bytes libres

```

Ilustración 9. Instalación del complemento SEN2COR

Posteriormente, se ejecuta el comando L2A_Process.bat sobre la imagen, especificando la ruta de almacenamiento de la misma, con lo que el sistema operativo inicia su ejecución, corrección y almacenamiento en un nuevo archivo.

```

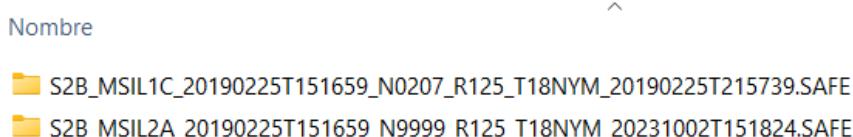
Símbolo del sistema Microsoft Windows [Versión 10.0.22621.2283]
(c) Microsoft Corporation. Todos los derechos reservados.

C:\Users\ESTEFANIA\Documents\Sen2Cor-02.10.01-win64\Sen2Cor-02.10.01-win64>L2A_Process.bat C:\Users\ESTEFANIA\Documents\data\S2B_MSIL1C_20190225T151659_N0207_R125_T18NYW_20190225T215739.SAFE
Sen2Cor. Version: 02.10.01, created: 2021.12.13, supporting Level-1C product version 14.2 - 14.9 started ...
Product version: 14.6
Operation mode: TOOLBOX
Processing baseline: 99.99
Progress[%]: 0.09 : Generating datastrip metadata
L2A datastrip successfully generated
No resolution specified, will process 20 and 10 m resolution
20 m resolution will be downsampled to 60 m
Progress[%]: 0.06 : PID-26156 L2A_Process file: processing with resolution 20 m, elapsed time[s]: 1.156, total: 0:00:05.170000
Progress[%]: 0.06 : PID-26156 L2A_Process file: start of pre processing, elapsed time[s]: 0.000, total: 0:00:05.170000
Progress[%]: 0.06 : PID-26156 L2A.Tables: start import, elapsed time[s]: 0.094, total: 0:00:05.264000
Progress[%]: 0.07 : PID-26156 L2A.Tables: band B01 imported, elapsed time[s]: 0.250, total: 0:00:05.514000
Progress[%]: 0.26 : PID-26156 L2A.Tables: band B02 imported, elapsed time[s]: 3.625, total: 0:00:09.139000
Progress[%]: 0.46 : PID-26156 L2A.Tables: band B03 imported, elapsed time[s]: 4.000, total: 0:00:13.139000
Progress[%]: 0.72 : PID-26156 L2A.Tables: band B04 imported, elapsed time[s]: 5.343, total: 0:00:18.482000
Progress[%]: 0.89 : PID-26156 L2A.Tables: band B05 imported, elapsed time[s]: 1.625, total: 0:00:20.177000
Progress[%]: 0.89 : PID-26156 L2A.Tables: band B06 imported, elapsed time[s]: 1.662, total: 0:00:21.779000
Progress[%]: 0.96 : PID-26156 L2A.Tables: band B07 imported, elapsed time[s]: 1.453, total: 0:00:23.232000
Progress[%]: 1.04 : PID-26156 L2A.Tables: band B08 imported, elapsed time[s]: 1.537, total: 0:00:24.769000
Progress[%]: 1.05 : PID-26156 L2A.Tables: band B09 imported, elapsed time[s]: 0.303, total: 0:00:25.072000
Progress[%]: 1.07 : PID-26156 L2A.Tables: band B10 imported, elapsed time[s]: 0.410, total: 0:00:25.482000
Progress[%]: 1.15 : PID-26156 L2A.Tables: band B11 imported, elapsed time[s]: 1.521, total: 0:00:27.003000
Progress[%]: 1.25 : PID-26156 L2A.Tables: band B12 imported, elapsed time[s]: 1.959, total: 0:00:28.962000
Progress[%]: 1.25 : PID-26156 L2A.Tables: AUX_CAMS* file not found, elapsed time[s]: 0.027, total: 0:00:28.995000
Progress[%]: 1.25 : PID-26156 L2A.Tables: No L1C AUX_DATA for aerosol optical thickness @ 559nm information, elapsed time[s]: 0.003, total: 0:00:28.998000
Progress[%]: 1.25 : PID-26156 L2A.Tables: CAMS specific file: not present, elapsed time[s]: 0.010, total: 0:00:29.088000
Progress[%]: 1.25 : PID-26156 L2A.Process file: start of Scene Classification, elapsed time[s]: 0.007, total: 0:00:29.015000
Progress[%]: 1.29 : PID-26156 L2A.Tables: band B02 must be resampled, elapsed time[s]: 0.771, total: 0:00:29.786000
Progress[%]: 1.37 : PID-26156 Pre process, elapsed time[s]: 1.750, total: 0:00:31.536000
Progress[%]: 1.37 : PID-26156 L2A.Tables: band B01 must be resampled, elapsed time[s]: 0.017, total: 0:00:31.553000
Progress[%]: 1.61 : PID-26156 L2A.Tables: band B03 must be resampled, elapsed time[s]: 4.748, total: 0:00:36.293000
Progress[%]: 1.70 : PID-26156 L2A.Tables: band B04 must be resampled, elapsed time[s]: 1.783, total: 0:00:38.076000
Progress[%]: 1.82 : PID-26156 L2A.Tables: band B09 must be resampled, elapsed time[s]: 2.472, total: 0:00:40.548000
Progress[%]: 2.00 : PID-26156 L2A.Tables: band B10 must be resampled, elapsed time[s]: 3.558, total: 0:00:44.106000
Progress[%]: 2.16 : PID-26156 L2A.SC init , elapsed time[s]: 3.188, total: 0:00:47.294000
Progress[%]: 2.20 : PID-26156 L2A.CSND_1_1 , elapsed time[s]: 0.895, total: 0:00:48.189000
Progress[%]: 2.25 : PID-26156 L2A.CSND_1_2 , elapsed time[s]: 0.852, total: 0:00:49.041000
Progress[%]: 2.27 : PID-26156, L2A_CSND_2_0 , elapsed time[s]: 0.363, total: 0:00:49.404000

```

Ilustración 10. Ejecución del proceso L2A process

Después de ejecutar el proceso L2A_Process.bat, se observan dos archivos en la carpeta de origen. Uno corresponde a la imagen original descargada de la plataforma Copernicus con la designación MSIL1C, y el otro es la nueva imagen que ha sido corregida atmosféricamente y ha sido renombrada como MSIL2A.



Adicionalmente, se llevó a cabo una comparación entre los metadatos de la imagen S2B_MSIL1C_20190225T151659_N0207_R125_T18NYM_20190225T215739 en sus niveles 1C y 2A. Esto permitió identificar que el nivel 2A contenía información adicional relacionada con el contenido de la imagen, como el porcentaje de píxeles sin datos, píxeles defectuosos, áreas con nubes, vegetación, agua, píxeles sin clasificar, entre otros.

Tabla 5. Comparación del metadata de imágenes satelitales en Level 1-C vs metadata con aplicación del SEN2COR

Metadatos Nivel 1C	Metadatos Nivel 2A
<pre><Quality_Control_Checks> <Quality_Inspections> <quality_check checkType="FORMAT_CORRECTNESS"> PASSED</quality_check> <quality_check checkType="GENERAL_QUALITY"> PASSED</quality_check> <quality_check checkType="GEOMETRIC_QUALITY"> PASSED</quality_check> <quality_check checkType="RADIOMETRIC_QUALITY"></pre>	<pre><Quality_Control_Checks> <Quality_Inspections> <quality_check checkType="FORMAT_CORRECTNESS"> PASSED</quality_check> <quality_check checkType="GENERAL_QUALITY"> PASSED</quality_check> <quality_check checkType="GEOMETRIC_QUALITY"> PASSED</quality_check> <quality_check checkType="RADIOMETRIC_QUALITY"></pre>

<pre> PASSED</quality_check> <quality_check checkType="SENSOR_QUALITY">PASSE D</quality_check> </Quality_Inspections> <Failed_Inspections/> </Quality_Control_Checks> </n1:Quality_Indicators_Info> </n1:Level-1C_User_Product> </pre>	<pre> PASSED</quality_check> <quality_check checkType="SENSOR_QUALITY">PASSE D</quality_check> </Quality_Inspections> <Failed_Inspections/> </Quality_Control_Checks> <Image_Content_QI> <NODATA_PIXEL_PERCENTAGE>0.00013 6</NODATA_PIXEL_PERCENTAGE> <SATURATED_DEFECTIVE_PIXEL_PERC ENTAGE>0.000000</SATURATED_DEFEC TIVE_PIXEL_PERCENTAGE> <DARK_FEATURES_PERCENTAGE>0.8244 51</DARK_FEATURES_PERCENTAGE> <CLOUD_SHADOW_PERCENTAGE>0.2660 51</CLOUD_SHADOW_PERCENTAGE> <VEGETATION_PERCENTAGE>66.251147 </VEGETATION_PERCENTAGE> <NOT_VEGETATED_PERCENTAGE>17.22 5102</NOT_VEGETATED_PERCENTAGE> <WATER_PERCENTAGE>0.476897</WATE R_PERCENTAGE> <UNCLASSIFIED_PERCENTAGE>0.342703 </UNCLASSIFIED_PERCENTAGE> <MEDIUM_PROBA_CLOUDS_PERCENTA GE>0.580682</MEDIUM_PROBA_CLOUDS _PERCENTAGE> <HIGH_PROBA_CLOUDS_PERCENTAGE> 2.460951</HIGH_PROBA_CLOUDS_PERCE NTAGE> <THIN_CIRRUS_PERCENTAGE>11.572014 </THIN_CIRRUS_PERCENTAGE> <SNOW_ICE_PERCENTAGE>0.000000</SN OW_ICE_PERCENTAGE> <RADIATIVE_TRANSFER_ACCURACY>0. 0</RADIATIVE_TRANSFER_ACCURACY> <WATER_VAPOUR_RETRIEVAL_ACCUR ACY>0.0</WATER_VAPOUR_RETRIEVAL _ACCURACY> <AOT_RETRIEVAL_ACCURACY>0.0</AO T_RETRIEVAL_ACCURACY> </Image_Content_QI> </n1:Quality_Indicators_Info> </n1:Level-2A_User_Product> </pre>
--	--

FASE 2: Identificar zonas de amenaza por remoción en masa mediante el procesamiento de imágenes satelitales Sentinel y la implementación de índices espectrales.

Actividad 1: Recortar y resamplear las imágenes satelitales ajustándose a la zona de estudio.

Esta actividad consiste en como primera medida definir el área geográfica de la zona de estudio para poder realizar el recorte de las diferentes imágenes satelitales seleccionadas y así hacer más óptimos los posteriores procesamientos digitales. En el software SNAP se realiza este proceso mediante la herramienta SUBSET, la cual se puede definir mediante coordenadas geográficas o coordenadas de pixel.

Después de recortar las imágenes satelitales, se lleva a cabo el remuestreo, un proceso que implica cambiar el tamaño de píxel con el fin de mejorar la resolución espacial de las bandas de imagen que tienen una resolución más baja. Este procedimiento es fundamental, ya que es necesario que todas las bandas tengan el mismo tamaño de píxel para poder realizar combinaciones entre ellas o calcular índices espectrales de manera precisa y así mismo se mejora la calidad de las diferentes bandas para obtener mejores resultados, en el software SNAP se realiza mediante la herramienta RESAMPLE.

Con el objetivo de mejorar la eficiencia del proceso de recorte y remuestreo de las seis (6) imágenes seleccionadas, se desarrolló un graph builder que combina ambos procesos de forma independiente para cada imagen, como se presenta a continuación:

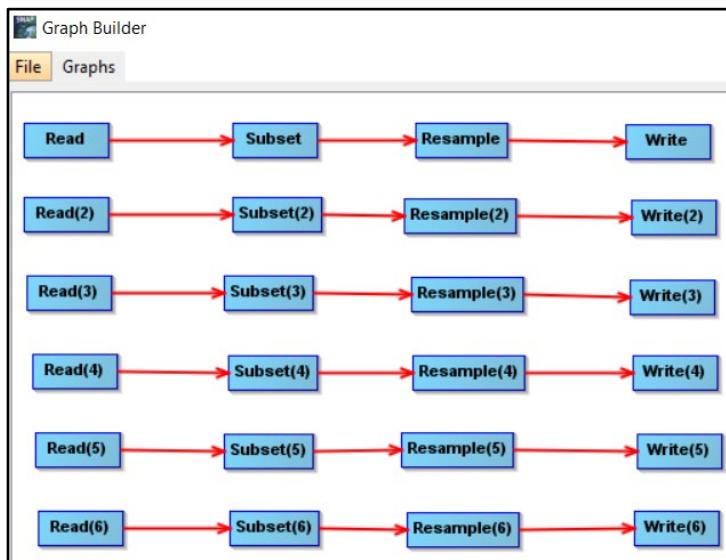


Ilustración 11. Modelo de recorte y remuestreo de las imágenes seleccionadas

El proceso de recorte se efectuó utilizando coordenadas de píxeles, tomando la banda dos (2) como referencia. Para el remuestreo, también se utilizó la banda dos de referencia, ya que tiene una resolución espacial de 10 m, lo que posibilitó que las nueve (9) bandas de la imagen satelital, que originalmente tenían resoluciones mayores, pudieran ajustarse a un resolución remuestreada de 10 m.

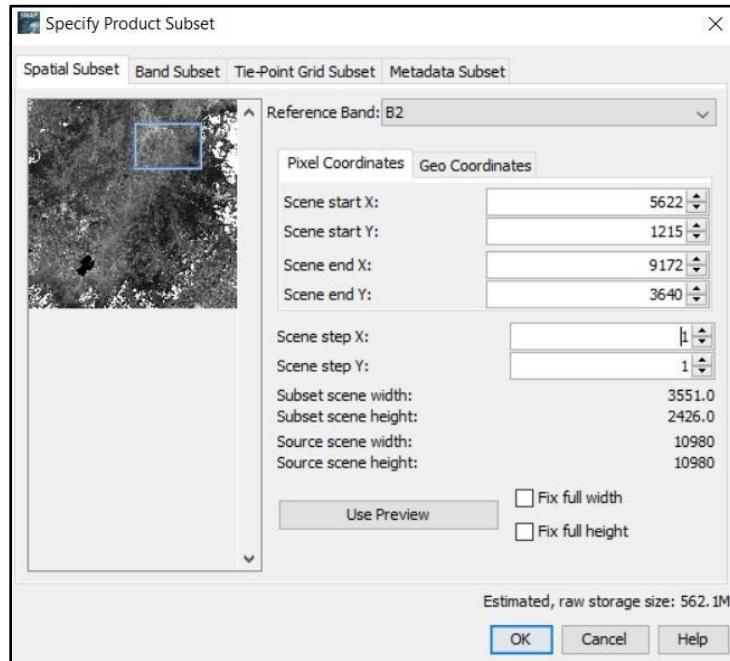


Ilustración 12. Definición del área de recorte mediante coordenadas de pixel

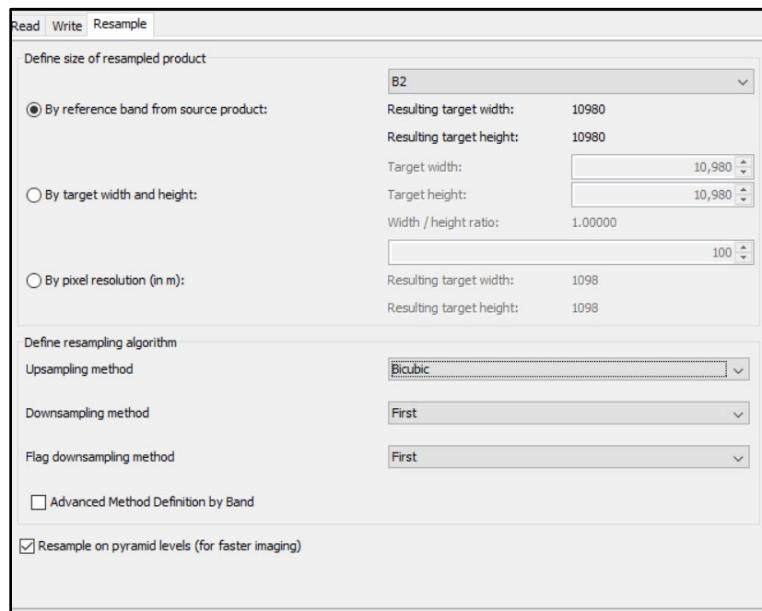


Ilustración 13. Definición de parámetros del resampling

En el proceso de remuestreo implementado, se incrementa el número de filas y columnas en la imagen multiespectral en un factor de cuatro (upsampling). Uno de los parámetros a establecer es el método de upsampling, que determina cuántos píxeles cercanos se tendrán en cuenta para calcular la media ponderada y asignar un valor al píxel resultante. Entre los métodos más comunes se encuentran el del vecino más cercano, el bilineal y la convolución cúbica (Geo innova, n.d.).

En este proyecto, se empleó el método de upsampling bicúbico, el cual, según se describe en el manual de usuario de SNAP, calcula el nuevo valor del píxel teniendo en cuenta la ponderación de los 16 píxeles circundantes.

El resultado del graph builder ejecutado para cada una de las imágenes , es el siguiente:

Product Explorer	Pixel Info
[+]	[1] subset_S2A_MSIL2A_20180317T151701_N9999_R125_T18NYM_20220915T052647_resampled
[+]	[2] subset_S2B_MSIL2A_20190225T151659_N9999_R125_T18NYM_20220916T014851_resampled
[+]	[3] subset_S2A_MSIL2A_20200922T151711_N0214_R125_T18NYM_20200922T193311_resampled
[+]	[4] subset_S2B_MSIL2A_20210105T151709_N0214_R125_T18NYM_20210105T174358_resampled
[+]	[5] subset_S2B_MSIL2A_20230823T151709_N0509_R125_T18NYM_20230823T192329_resampled
[+]	[6] subset_S2B_MSIL2A_20221226T151709_N0509_R125_T18NYM_20221226T191112_resampled

Ilustración 14. Imágenes resultantes luego del proceso de recorte y remuestreo

Actividad 2: Calcular índice NBR a las imágenes satelitales de distintos años

El cálculo del índice NBR para las seis imágenes recortadas y re muestreadas se

llevó a cabo mediante la creación de un graph builder utilizando la herramienta band maths que permitió calcular el índice utilizando las bandas involucradas B8 y B12 en las diferentes imágenes:

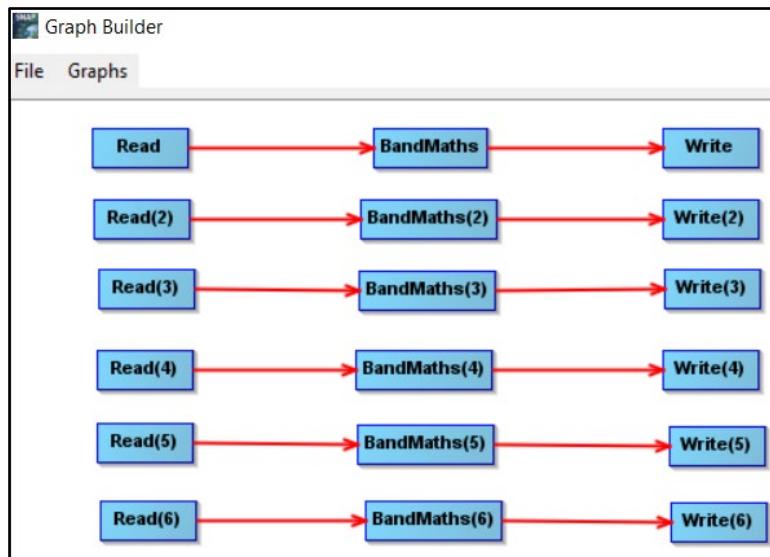


Ilustración 15. Modelo para el cálculo de NBR en las imágenes

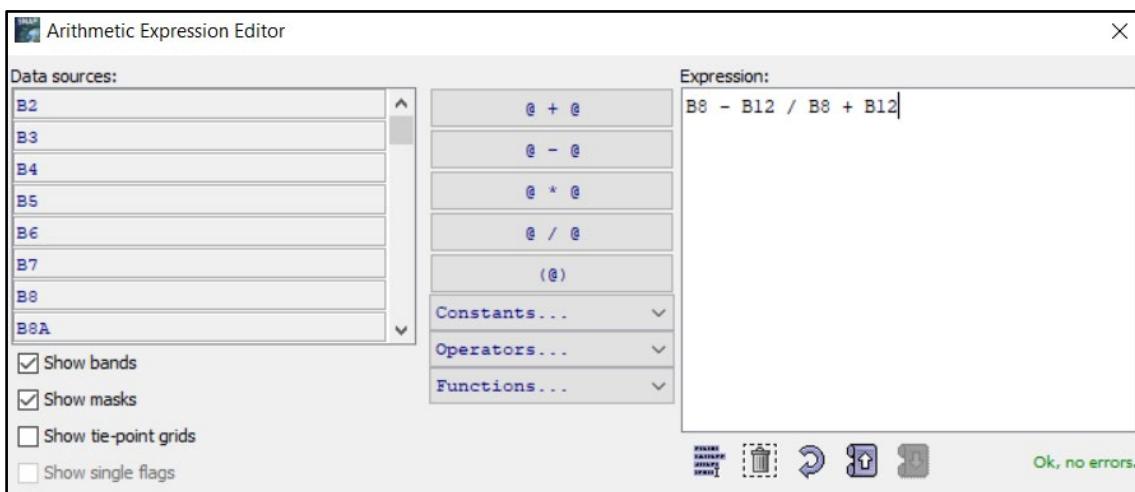


Ilustración 16. Expresión matemática para el cálculo del NBR en SNAP

Actividad 3: Calcular la diferencia en los resultados obtenidos al aplicar el índice NBR a las imágenes satelitales de distintos años

La diferencia del NBR entre los diferentes años de estudio se calculó a través de la construcción de un graph builder que permitirá optimizar el tiempo de procesamiento y compilar los resultados en un único archivo de salida, el modelo construido fue el siguiente:

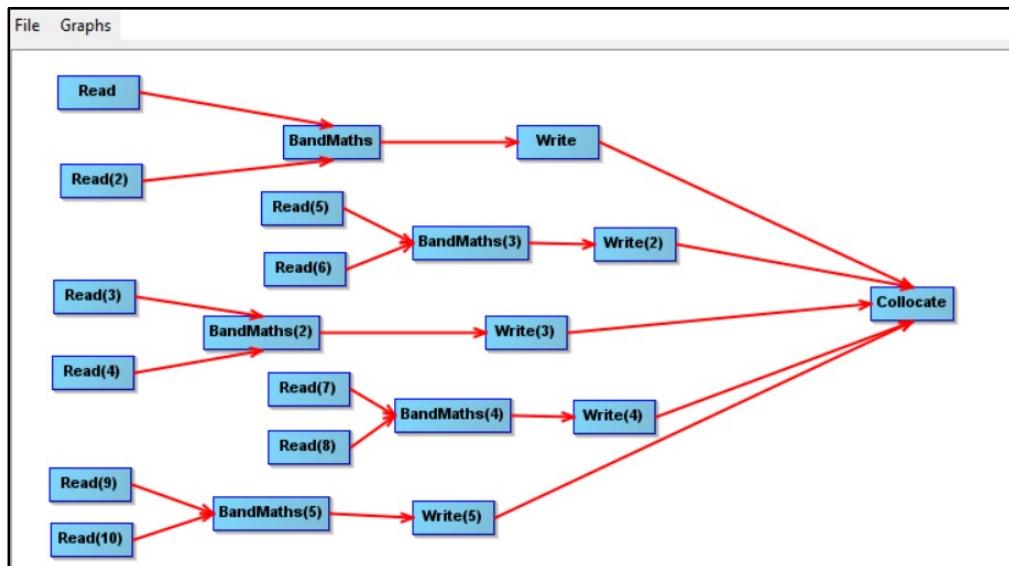


Ilustración 17. Modelo para el cálculo de dNBR entre las imágenes

BandMaths	Read(3)	Read(4)	BandMaths(2)	Read(5)	Read(6)	BandMaths(3)	Read(7)	Read(8)	BandMaths(4)	Re...
Target Band:	DNBR_2019_2020									
Target Band Type:	float32									
Band Unit:										
No-Data Value:	0.0									
Expression:	\$1.NBR_2019 - \$2.NBR_2020									
<input type="button" value="Edit Expression..."/>										

Ilustración 18. Expresión matemática para el cálculo del dNBR en SNAP

El resultado del graph builder se compiló en un único archivo de salida. Es importante destacar que la elección de la imagen designada como 'previa' y 'posterior' al evento se basó en un análisis interpretativo, considerando el inventario de deslizamientos previamente realizado. En este sentido, se observa que, en los pares de imágenes correspondientes a los años 2020-2021 y 2022-2023, se seleccionó el año más antiguo como imagen previa y el más reciente como imagen posterior, dado que en los años 2021 y 2023 se registraron un mayor número de eventos en comparación con sus respectivas contrapartes.

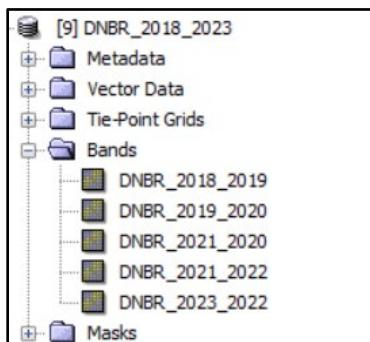


Ilustración 19. Imágenes resultantes luego del cálculo del dNBR

Actividad 4: Identificar zonas de deslizamiento con los resultados de los DNBR en los diferentes años de estudio

Utilizando los cinco DNBR calculados para los años 2018-2019, 2019-2020, 2020-2021, 2021-2022 y 2022-2023, se llevó a cabo la identificación de posibles deslizamientos en la zona de estudio. En la imagen resultante del DNBR, los cambios son claramente distinguibles ya que

se presentan en un tono de color blanco en contraste con las áreas que no experimentaron cambios, las cuales se muestran en diversas tonalidades de gris y negro.

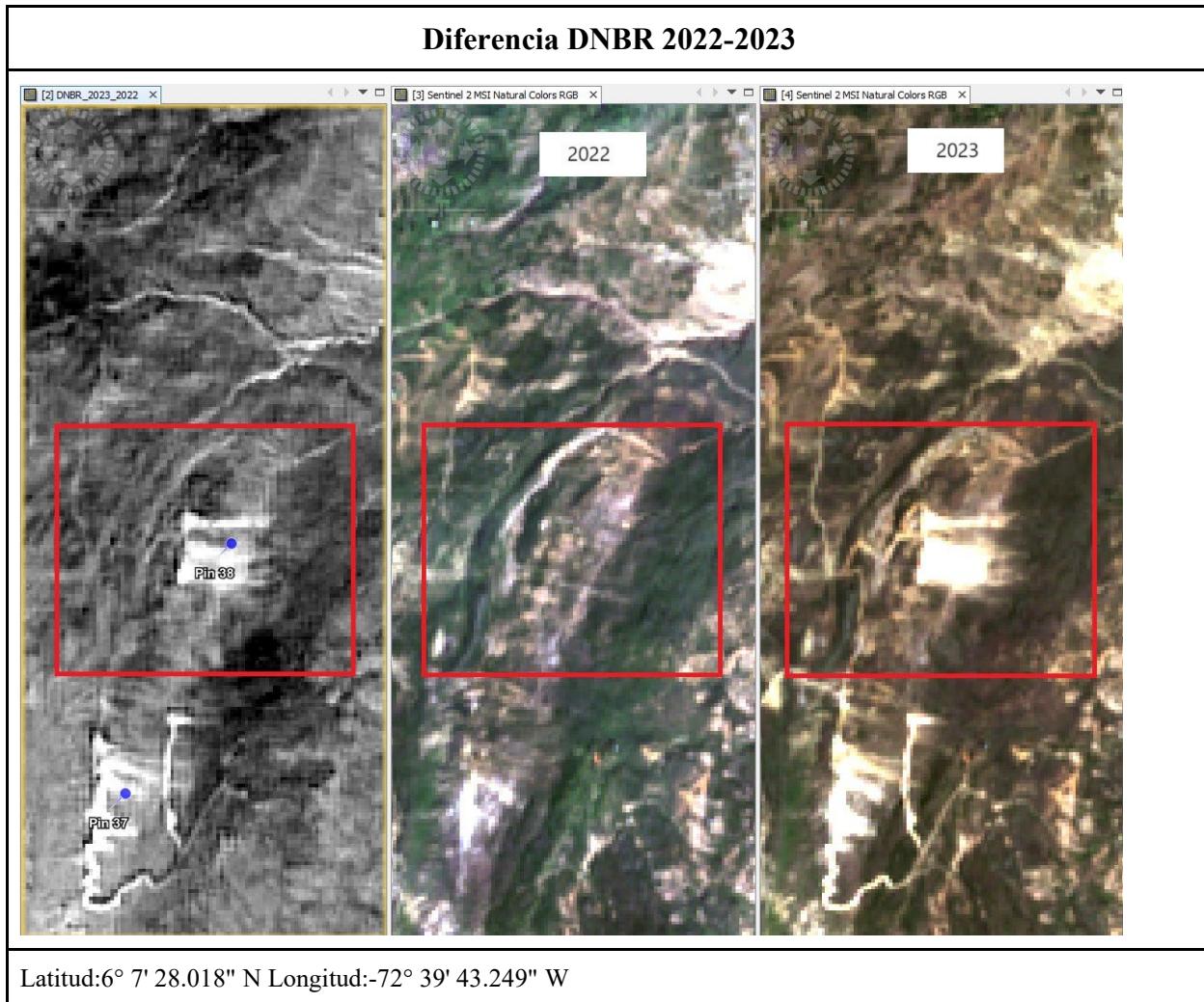


Figura 2. Diferencia DNBR 2022-2023

En un primer análisis, se llevó a cabo la fotointerpretación de los DNBR, lo que permitió identificar un total de 45 áreas en las que se considera que es posible que hayan ocurrido eventos de deslizamientos de tierra. Estas áreas se encuentran distribuidas en varios municipios, incluyendo Chita, Jericó, La Salina, Sativanorte, Socha, Socotá y Susacón.

Tabla 6. Eventos de deslizamientos identificados por vereda con el DNB
R

UBICACIÓN	CANTIDAD
CHITA	19
Chipaviejo	4
Monserrate	1
Canoas	3
Cuco	3
El Moral	3
Laureal	4
Zona Urbana	1
JERICÓ	5
Centro Urbano	1
Cocubal	1
Pueblo Viejo	1
Tintoba	2
LA SALINA	1
Chinvaque	1
SATIVANORTE	3
Estancia	2
Hato	1
SOCHA	5
Alto	5
SOCOTÁ	11
Chipaviejo	1
Comaita	1
El Cardon	2
Guita	2
La Manga	2
Mausa	1
Motavita	1
Peñablanca	1
SUSACÓN	1
Tochupa	1
TOTAL GENERAL	45

De los 45 posibles eventos de deslizamiento identificados, es importante resaltar que la mayoría de ellos se localizan principalmente en el municipio de Chita, seguido por Socotá y Jericó. Se observan algunos posibles deslizamientos identificados en municipios aledaños; no

obstante, estos representan porcentajes pequeños en comparación con las zonas principales de estudio.

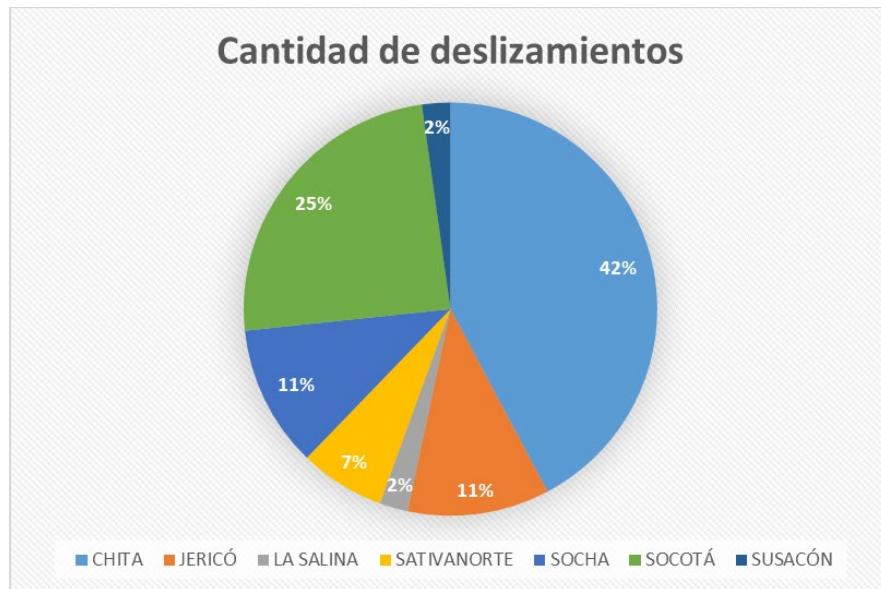


Figura 3. Cantidad de deslizamientos por vereda

Asimismo, se llevó a cabo un proceso de depuración de los posibles eventos, mediante una comparación con el modelo digital de elevación. Esto permitió reducir la cantidad de eventos identificados, eliminando aquellos que se relacionaban con cambios de cobertura o que no proporcionaban conclusiones concluyentes.

FASE 3: Evaluar la viabilidad de utilizar valores de píxel obtenidos mediante índices espectrales para identificar una firma espectral específica asociada a deslizamientos.

Actividad 1: Seleccionar muestra para generar la firma espectral

Para generar una firma espectral típica de un deslizamiento de tierra, se procedió a seleccionar un evento identificado a partir de los resultados obtenidos al analizar la diferencia en el Índice Espectral NBR (Normalized Burn Ratio) para los diferentes años de estudio. Además, se realizó una verificación rigurosa para asegurarse de que dicho punto correspondiera inequívocamente a un deslizamiento, contrastándolo con la información obtenida del inventario de deslizamientos. De esta manera, se eligió el "pin 40" como caso de estudio, el cual fue identificado durante el análisis multitemporal de los años 2019 y 2020 y se encuentra catalogado como el primer ítem en el inventario de deslizamientos.

Se extrajeron los valores de píxel de un segmento del evento conocido como 'Pin 40', lo que permitió la generación de seis firmas espectrales que ilustran el posible comportamiento espectral de este tipo de evento durante el año 2020, como se ilustra a continuación.

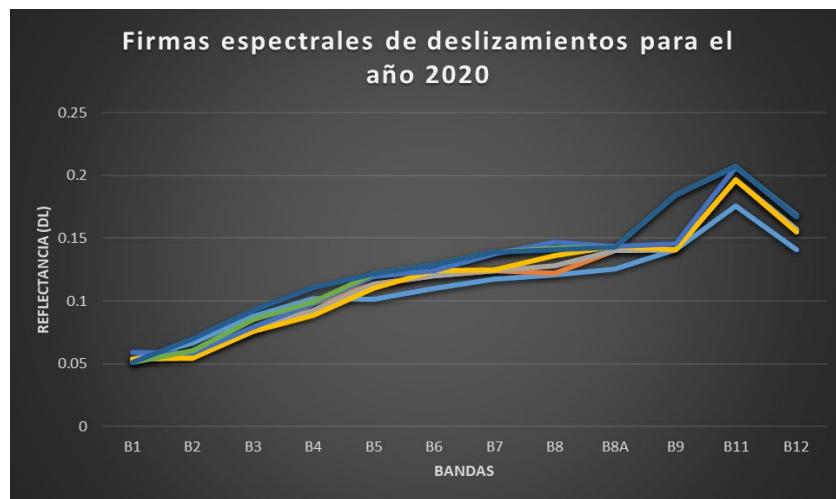


Figura 4. Firma espectral de deslizamientos

No obstante, es importante tener en cuenta que esto representa una primera aproximación a la firma espectral de las coberturas afectadas por este fenómeno. En la sección de resultados, se proporciona una descripción detallada de la firma que se considera más cercana al comportamiento típico de este fenómeno.

FASE 4: Generar cartografía temática para la toma de decisiones de acuerdo con los resultados obtenidos.

Actividad 1: Obtener máscara de deslizamientos

Conforme se mencionó en el punto anterior para la generación de la máscara de deslizamientos se extrajeron los valores de DNBR del segmento del evento denominado 'Pin 40', lo que permitió establecer el rango espectral en el que posiblemente se distribuyen los valores, identificando un valor máximo de 0.63 y un valor mínimo de 0.42 para los píxeles asociados a un

deslizamiento. Con estos resultados en mano, se procedió a generar una máscara para el DNBR de los años 2019 y 2020, como se muestra a continuación.

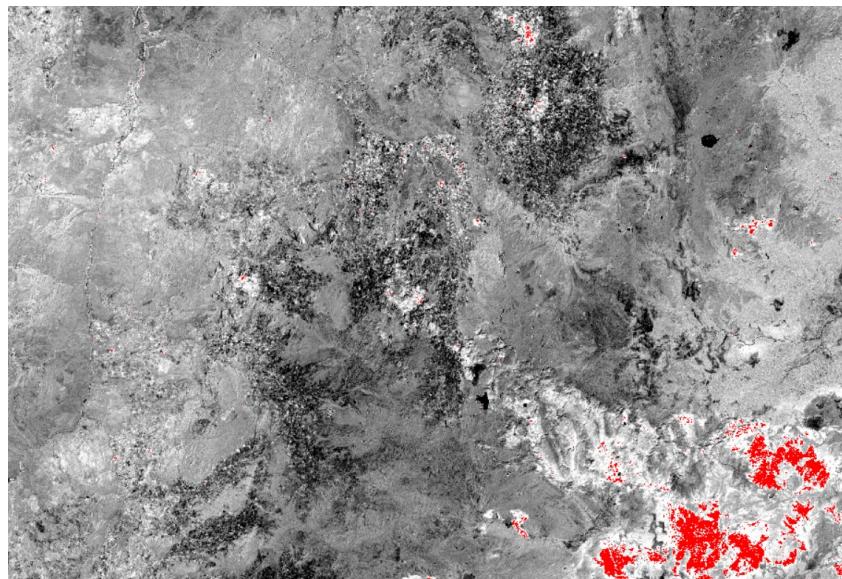


Ilustración 20. Mascara de deslizamientos PIN 40 (Muestra 1)

Sin embargo, es fundamental resaltar que este rango de valores es notablemente elevado y se superpone principalmente en áreas con presencia de nubes. Por este motivo, se optó por seleccionar un segmento más corto y representativo dentro del evento denominado 'Pin 40' y su resultado se presenta en la siguiente imagen. Esta elección posibilitó la estimación de una firma espectral más depurada para la cobertura, en la cual se identificaron tanto el valor máximo como el valor mínimo asociados a los deslizamientos, tal como se describe detalladamente en la sección de resultados.

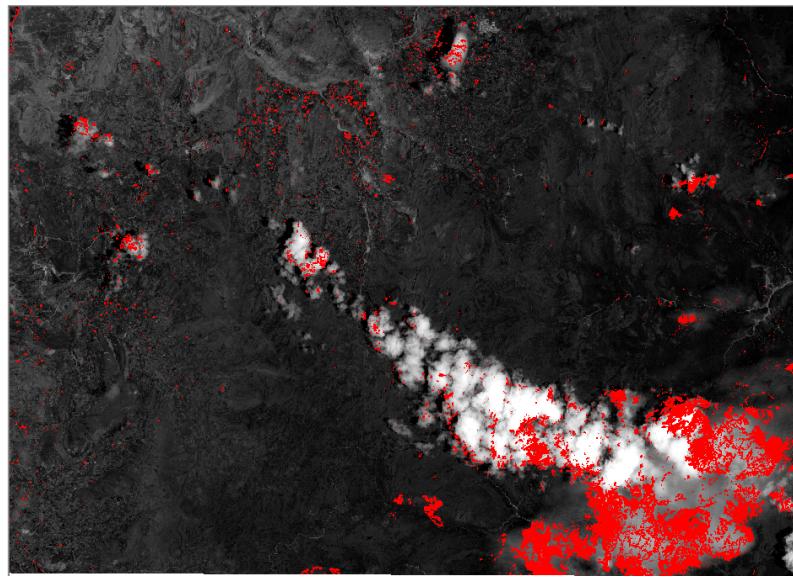


Ilustración 21. Mascara de deslizamientos PIN 40 (Muestra 2)

Utilizando la máscara seleccionada, se llevó a cabo un proceso de depuración de valores, excluyendo aquellos que se encuentran fuera del contexto del fenómeno de estudio, como las áreas correspondientes a nubes presentes en el momento de la captura de la imagen.

Actividad 2: Generar salidas gráficas producto de los resultados obtenidos.

7. Resultados

7.1 Inventario e identificación de deslizamientos

Según el inventario de deslizamientos realizado, se pudo identificar que la mayoría de los deslizamientos en la zona de estudio ocurrieron en el municipio de Chita, seguido del municipio de Jericó. Dentro de estos municipios, las veredas de Canoas y El Chilcal registraron la mayor ocurrencia de eventos. Las situaciones atribuidas a la ocurrencia de los deslizamientos se relaciona en el ANEXO 1.

Tabla 7. *Inventario de deslizamientos investigados por vereda*

UBICACIÓN	CANTIDAD
CHITA	14
Canoas	3
Chipa Centro	2
Cuco	1
El Moral	2
La Cal	1
Laureal	1
Quichona	2
Vichacuca	2
JERICÓ	13
Centro Urbano	1
Chilcal	3
Cocubal	2
La Estancia	2
Pueblo Viejo	2
Tintoba	3
SOCHA	1
Alto	1
SOCOTÁ	8
Comaita	1
Coscativa Jordan	1
Guarca	1

Guatatamo	1
Hato Parpa	1
La Estancia	1
Motavita	1
Peña Blanca	1
TOTAL GENERAL	36

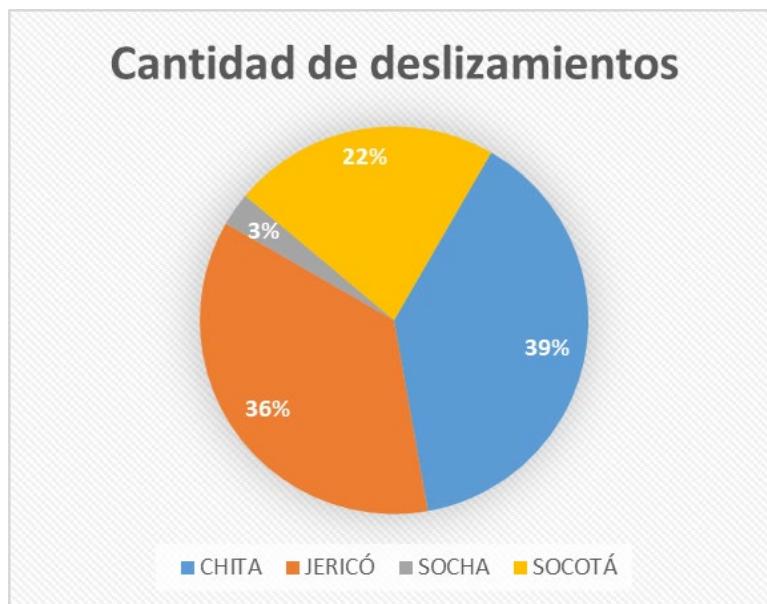


Figura 5. Porcentaje de deslizamientos por municipio

Según el mapa temático del inventario de deslizamientos investigados, se observa una concentración de eventos cercanos a las áreas urbanas de cada municipio y en las proximidades de los límites municipales. Esta concentración se relaciona con la presencia predominante de vías, drenajes y topografía escarpada en esas zonas.

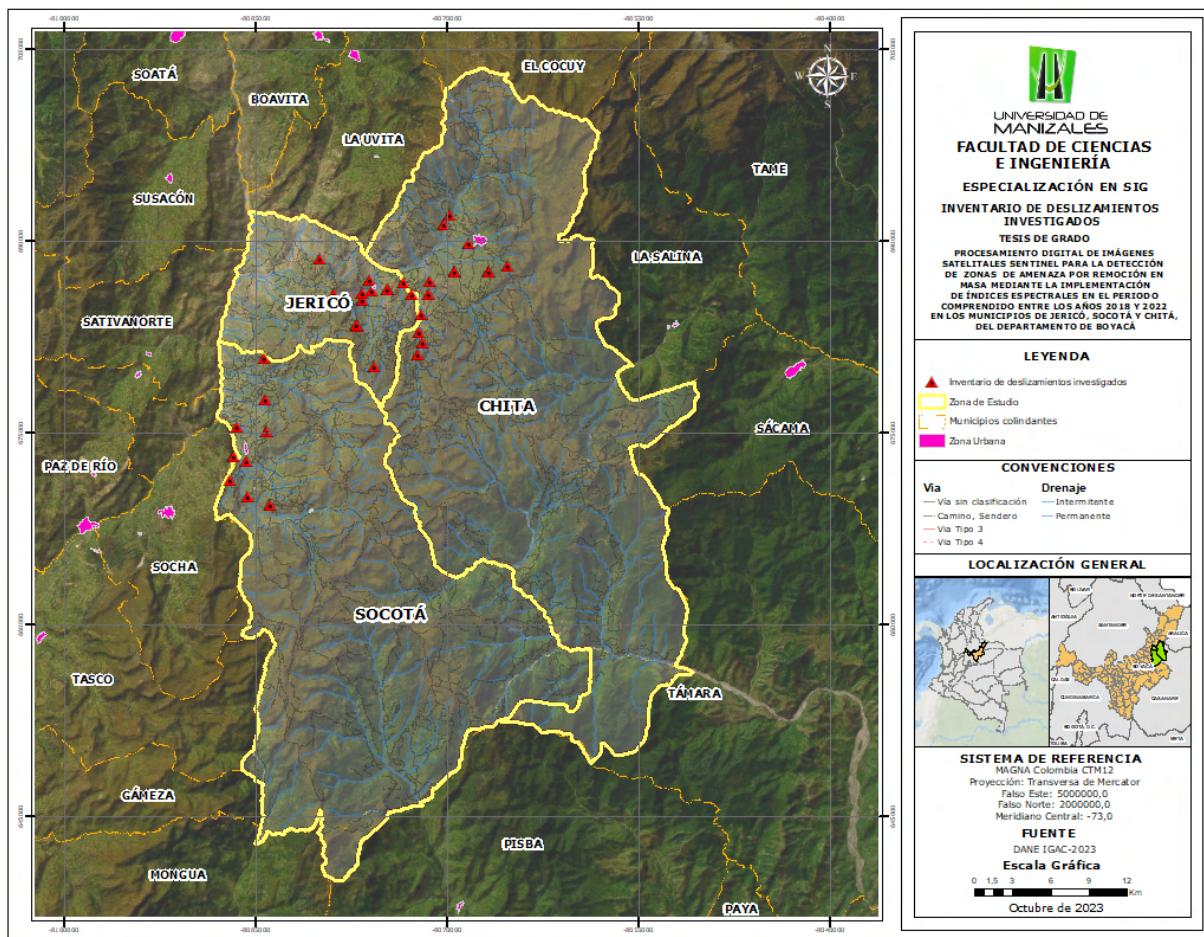


Figura 6. Mapa temático del inventario de deslizamientos investigados

En relación al Mapa temático de los deslizamientos identificados con DNBR, se observa una distribución proporcional en la parte central de la zona de estudio. Sin embargo, se destaca una concentración significativa de eventos cerca de las áreas urbanas de cada municipio y en las inmediaciones de los límites municipales, donde la actividad humana tiene un impacto relevante.

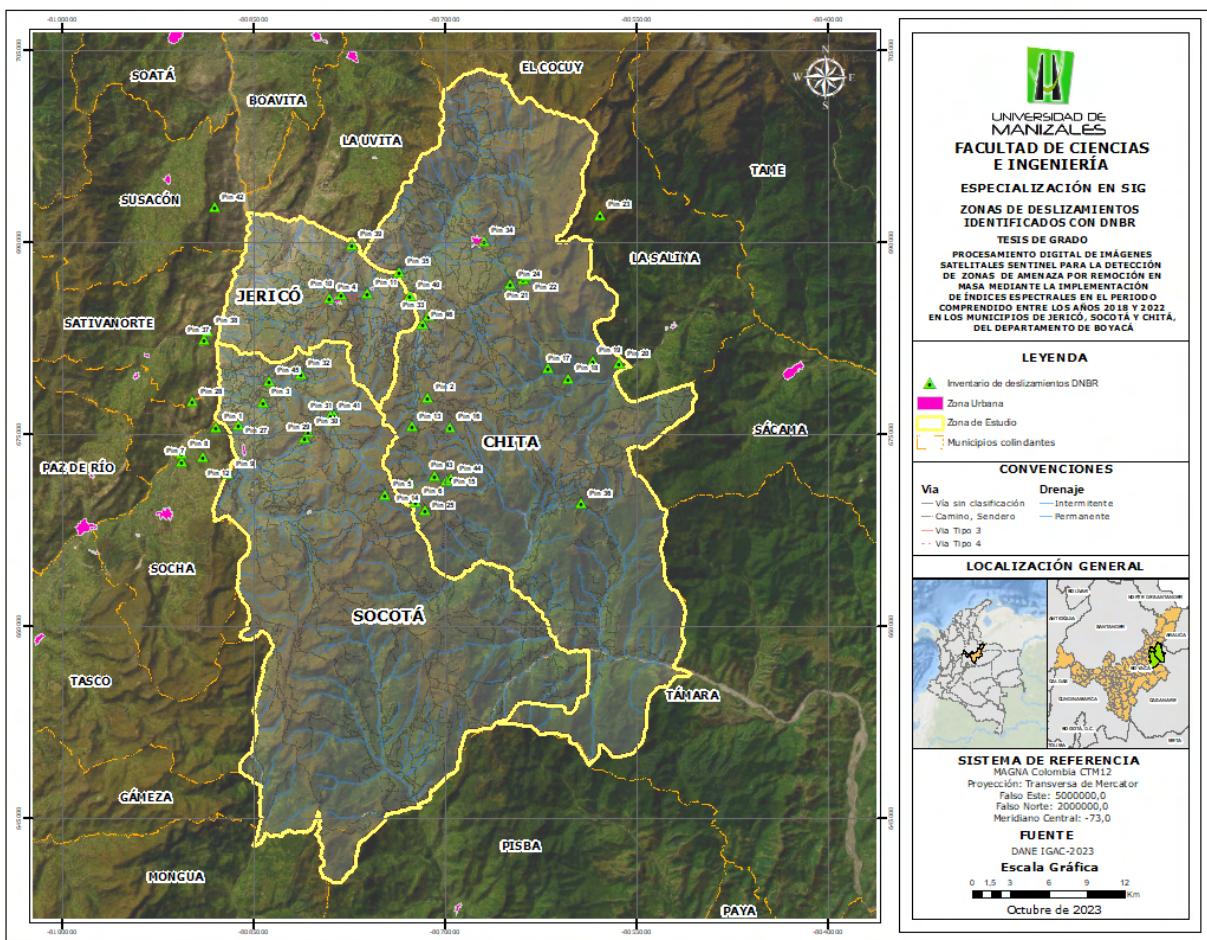


Figura 7. Mapa temático de los deslizamientos identificados con DNBR

La comparación entre el inventario de deslizamientos investigados y los deslizamientos identificados a través del DNBR revela que el municipio de Chita presenta el mayor número de eventos ocurridos. En cambio, Socotá ocupa el segundo lugar en cuanto a eventos identificados con DNBR. Esta disparidad se explica por la presencia de empresas mineras en los límites de Socotá con municipios como Sativa norte y Sativa sur, donde la actividad minera es la causa principal de estos eventos. Sin embargo, es importante destacar que la mayoría de estos eventos no se reportan ni se registran, lo que resulta en un número limitado de eventos registrados en el

inventario de deslizamientos investigados en el municipio de Socotá en comparación con el DNB.R.

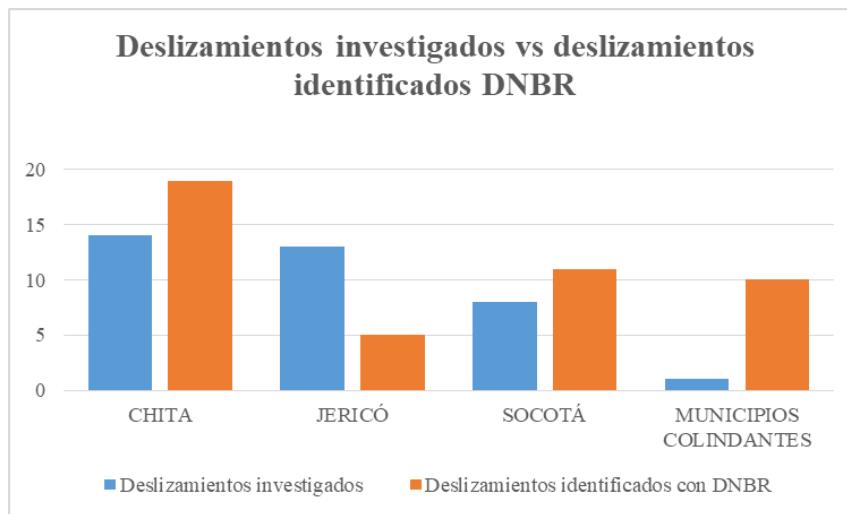


Figura 8. Deslizamientos investigados vs deslizamientos identificados DNBR

En un análisis adicional relacionado con la información espacial, se destaca la coincidencia de varios eventos tanto en el inventario de deslizamientos investigados como en los deslizamientos identificados mediante el uso del DNB.R. Esta coincidencia resalta la efectividad de la aplicación del DNB.R como una herramienta valiosa en la identificación de deslizamientos. Esta eficacia es especialmente relevante para llevar a cabo un diagnóstico más completo de los eventos que han ocurrido en los municipios, lo que a su vez proporciona una base sólida para la toma de decisiones informadas en relación a la gestión de riesgos y la planificación territorial.

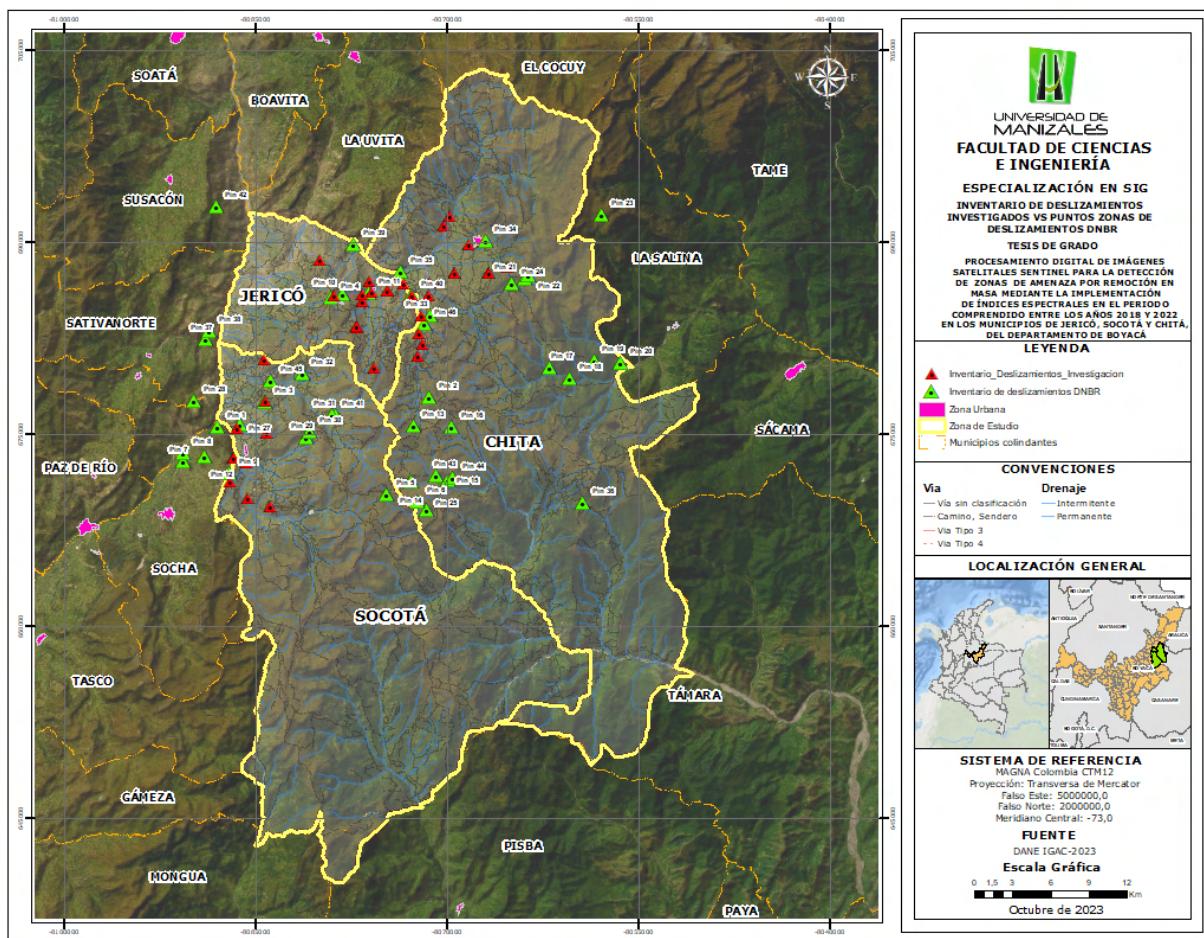


Figura 9. Mapa Temático inventario deslizamientos investigados vs deslizamientos identificados DNBR

7.2 Análisis multitemporal de la diferencia DNBR

Mediante el cálculo de la diferencia en el Índice Espectral NBR (Normalized Burn Ratio) para los años 2018, 2019, 2020, 2021, 2022 y 2023, se logró identificar áreas donde se sospecha que se han producido eventos posiblemente relacionados con deslizamientos de tierra. Conforme se relaciona en el Anexo C de este informe, se llevó a cabo la estimación de las diferencias entre

pares de años y se identificaron regiones donde el cambio drástico en la cobertura del terreno ha conferido características similares, tales como su respuesta espectral. En este caso, estas áreas son fácilmente distinguibles, ya que se presentan en color blanco en los valores calculados de DNBR (Diferencia Normalizada del Índice Espectral NBR) y su contexto permite asociarlas al fenómeno en estudio.

A continuación, se presentan dos de los casos más representativos identificados en el Anexo C. El primero corresponde a un deslizamiento detectado en la vereda de Pueblo Viejo, en el municipio de Jericó, para los años 2019 y 2020, en la imagen de la izquierda se muestra la zona de interés para el año 2019, en la que se aprecia una cobertura vegetal uniforme en armonía con su entorno. En la imagen central se presenta la misma zona para el año 2020, donde se evidencia un cambio drástico en la cobertura y un comportamiento atípico en comparación con su entorno. Finalmente, en la imagen de la derecha se muestra la diferencia en el Índice Espectral NBR entre el año 2019 y el año 2020, resultando en un polígono de color blanco que se destaca en la imagen debido a su tamaño y ubicación. Este deslizamiento se cotejó con el inventario de deslizamientos mencionado en el punto anterior, y se determinó que este evento corresponde al ítem número uno del inventario.

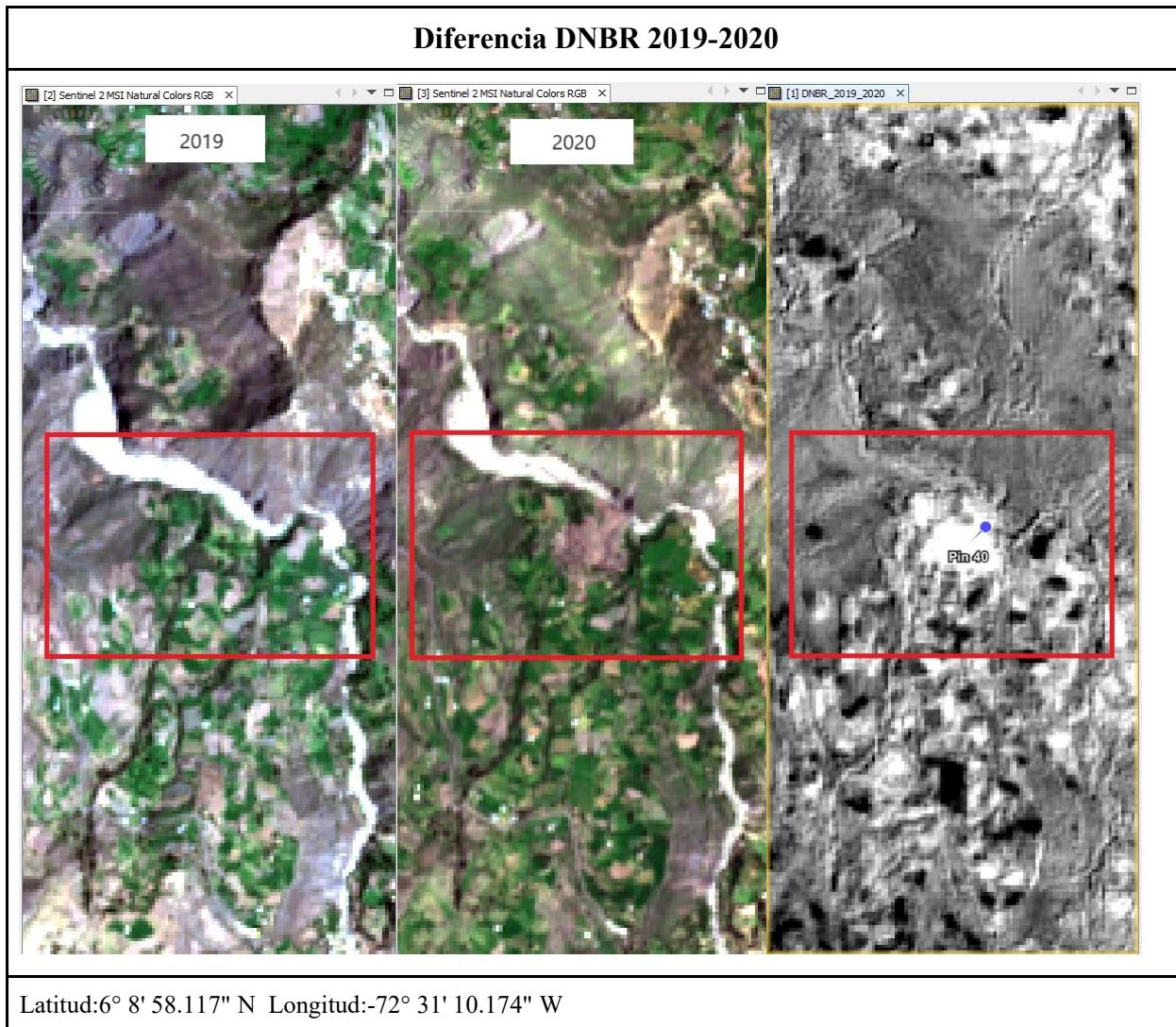


Figura 10. Diferencia DNBR 2019-2020

El segundo caso se refiere a un suceso detectado en los límites entre los municipios de Socha y Socotá durante los años 2018 y 2019. En la imagen de la izquierda se presenta la zona de interés para el año 2018, donde se aprecia una cobertura vegetal uniforme que se encuentra junto a una carretera, en perfecta armonía con su entorno. La imagen central muestra la misma zona para el año 2019, en la que se evidencia un cambio drástico en la cobertura y un

comportamiento atípico en comparación con su entorno circundante. Finalmente, en la imagen de la derecha se exhibe la diferencia en el Índice Espectral NBR entre el año 2018 y el año 2019, lo que resulta en un polígono de color blanco que resalta en la imagen debido a su tamaño y ubicación. Por su contexto, este polígono se asocia a un posible deslizamiento o a una intervención minera, en virtud de su cercanía con la empresa Coexccol, que se dedica a la minería de carbón. Además, el DNBR permite identificar un cambio significativo en la cobertura en el polígono adyacente identificado como "pin 1", así como la culminación de una carretera que conecta los municipios de Socotá y Socha.

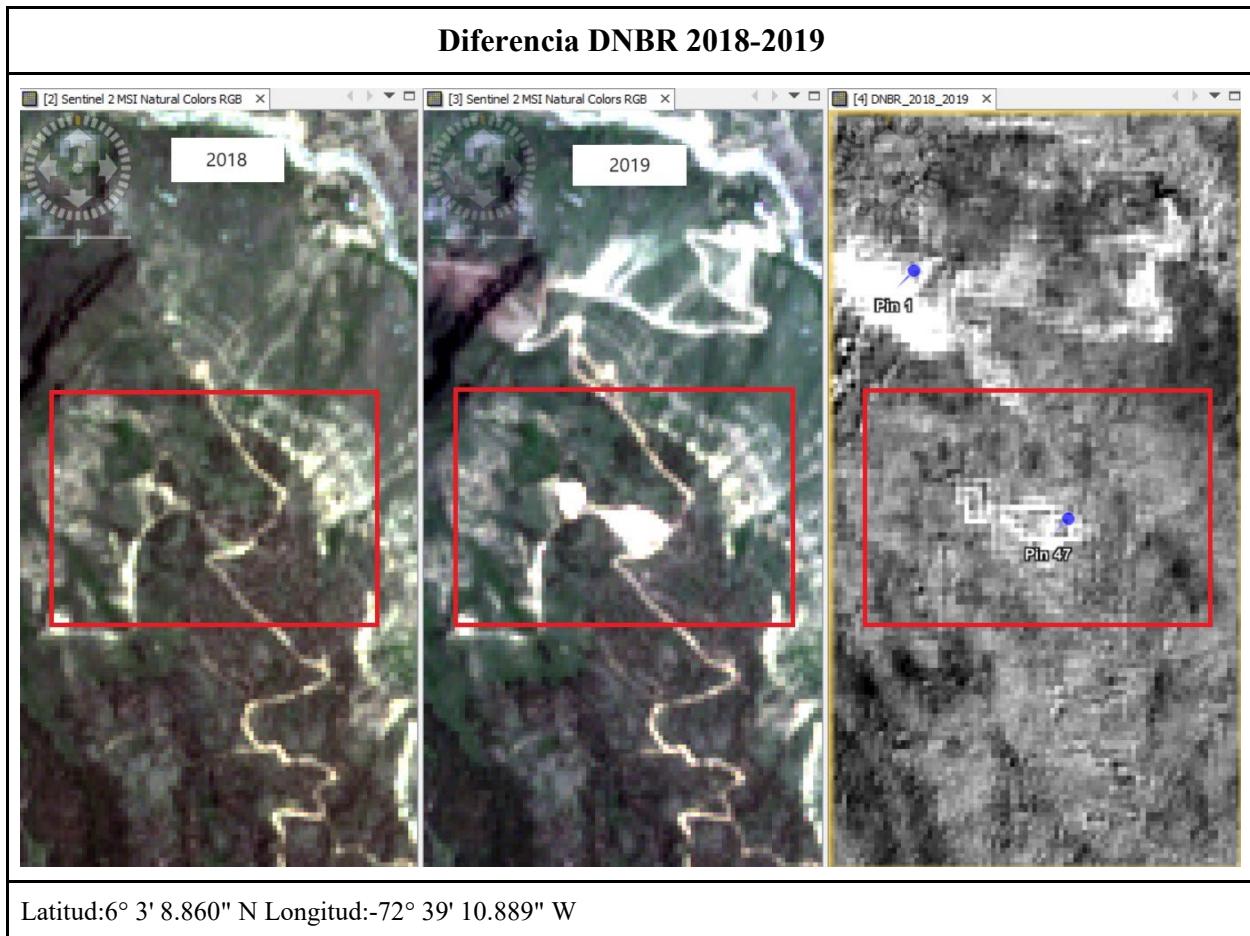


Figura 11. Diferencia DNBR 2018-2019

7.3 Firma espectral

Conforme a la depuración del segmento tomado sobre el evento denominado con el “pin 40” se generaron cuatro firmas espectrales que demuestran el comportamiento espectral típico para este tipo de evento en el año 2020, como se muestra en la siguiente imagen. Es de resaltar que las firmas generadas tienen un comportamiento similar al de la firma espectral estándar del suelo, al ser una curva relativamente plana y ascendente.

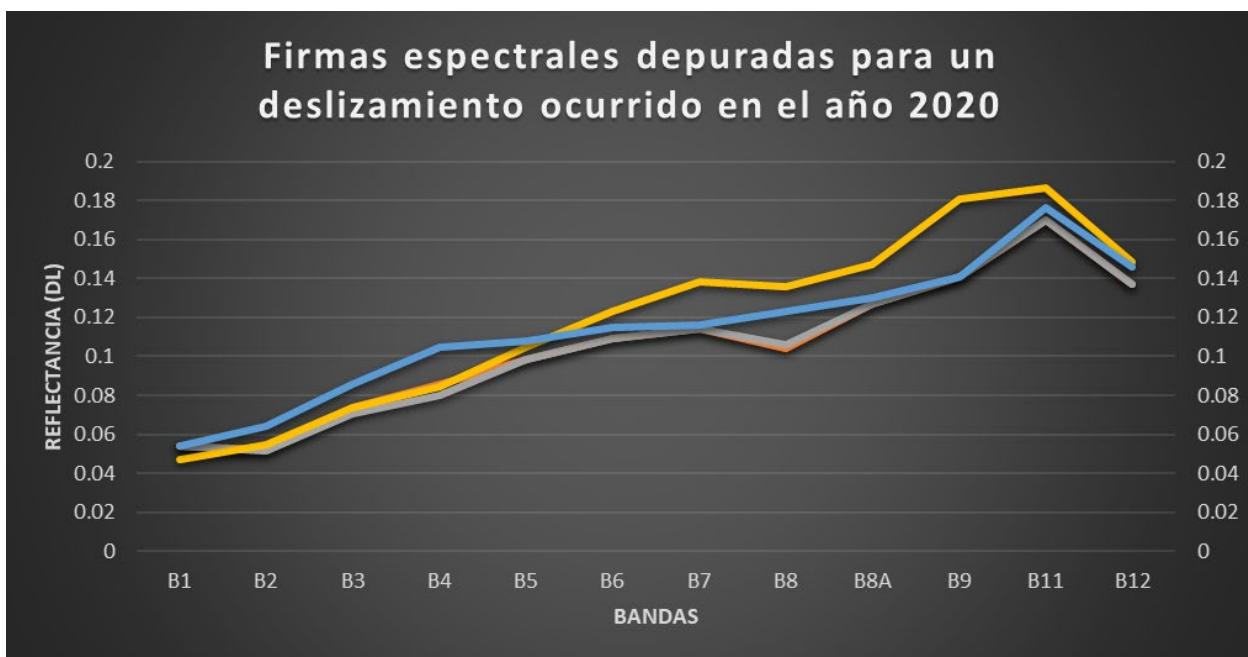


Figura 12. Firmas espectrales depuradas deslizamientos 2020

No obstante, es factible identificar características distintivas en la firma espectral depurada. Se observa que este tipo de suelo presenta un contenido de humedad notablemente alto, dado que los valores de reflectancia obtenidos son bajos, manteniéndose por debajo de 0.2

dl. Sin embargo, se aprecia un aumento en la reflectancia en las longitudes de onda más largas, destacando los picos que se presentan en la firma espectral en las bandas B4, B7, B9 y B11.

La banda 4 se asocia al color rojo en el espectro visible y aunque dicho pico no es muy pronunciado puede denotar que el suelo es arcilloso. Además, se observa otro pico en la banda 7, que corresponde al 'red edge 3', esta banda es especialmente útil en la detección de cambios en la cubierta vegetal, lo que sugiere una posible mezcla de vegetación en la zona de estudio. Por otro lado, la banda 9 se relaciona con la absorción de vapor de agua en la atmósfera ('water vapor'), y la banda 11 corresponde al infrarrojo de onda corta o SWIR 1, que para la firma del suelo estándar esta es una de las zonas donde presenta mayores valores de reflectancia.

7.4 Zonas de amenaza de deslizamiento

Para la identificación de áreas con riesgo de deslizamiento, se generó una máscara utilizando los valores mínimos y máximos del DNBR correspondientes a los años 2019 y 2020. Estos valores se derivaron del segmento seleccionado en el área designada como 'pin 40', con un valor mínimo de 0.28 y un valor máximo de 0.48, respectivamente. Inicialmente, se obtuvo la siguiente máscara, que, aunque describe adecuadamente la cobertura objeto de estudio, presenta cierta superposición con áreas de nubes, cómo se puede apreciar en la imagen siguiente.

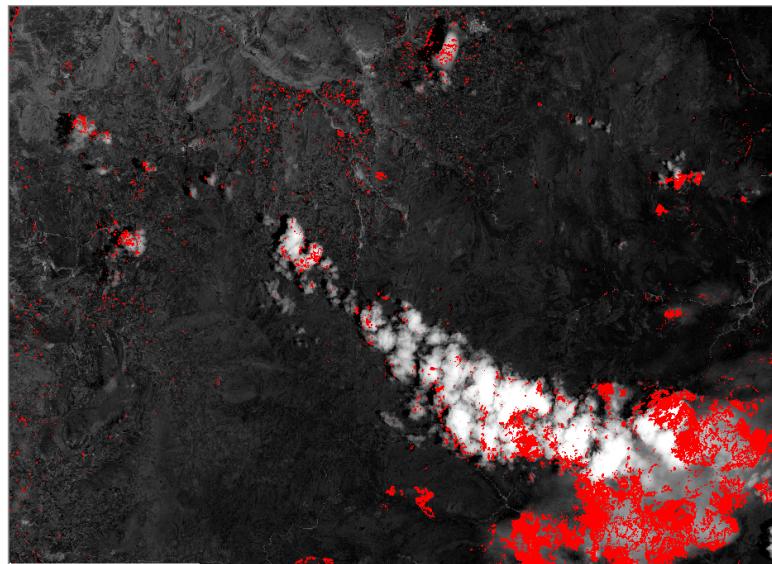


Ilustración 22. Mascara obtenida de la muestra de la firma espectral

Basándonos en lo descrito anteriormente, se llevó a cabo un proceso de depuración de los resultados obtenidos, eliminando el ruido generado, principalmente, este ruido corresponde a la presencia de nubes. Dado el contexto general de la cobertura de estudio, que en este caso se refiere a deslizamientos de tierra, resulta relativamente sencillo identificar y eliminar las áreas nubosas del producto final. Esto nos conduce a los resultados siguientes.

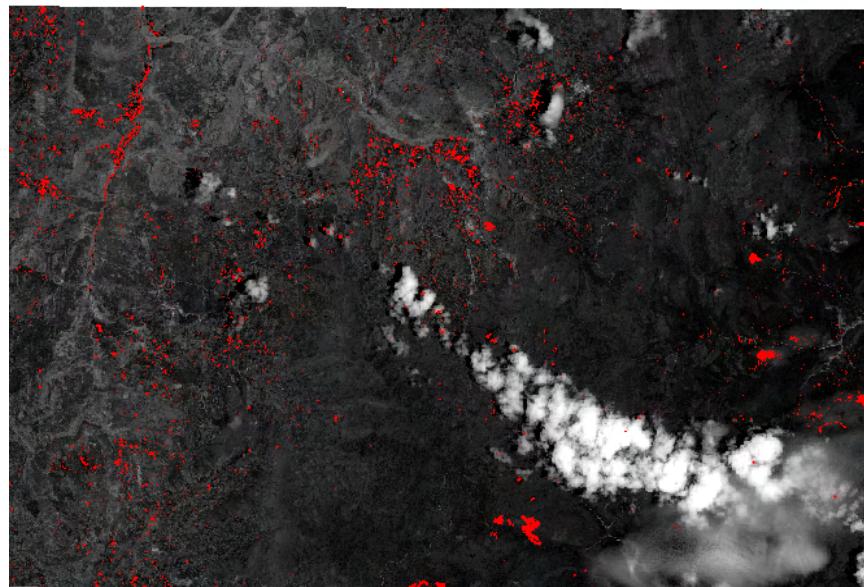


Ilustración 23. Depuración de valores atípicos a la máscara obtenida de la muestra de la firma espectral

Este resultado es el producto de la selección de valores de muestra del DNBR correspondientes a los años 2019 y 2020, seguido de un proceso de depuración para eliminar la presencia de nubes. En términos generales, se observa una clasificación precisa, aunque en algunas áreas se superpone con otros tipos de cobertura. No obstante, su identificación es sencilla si se analiza el contexto del fenómeno estudiado.

7.5 Cartografía temática

Finalmente, se procede a la elaboración de la cartografía temática utilizando la máscara previamente generada para el DNBR, tras someterla a un proceso de depuración destinado a eliminar la influencia de nubes, se presentan los resultados de este proceso en el siguiente mapa.

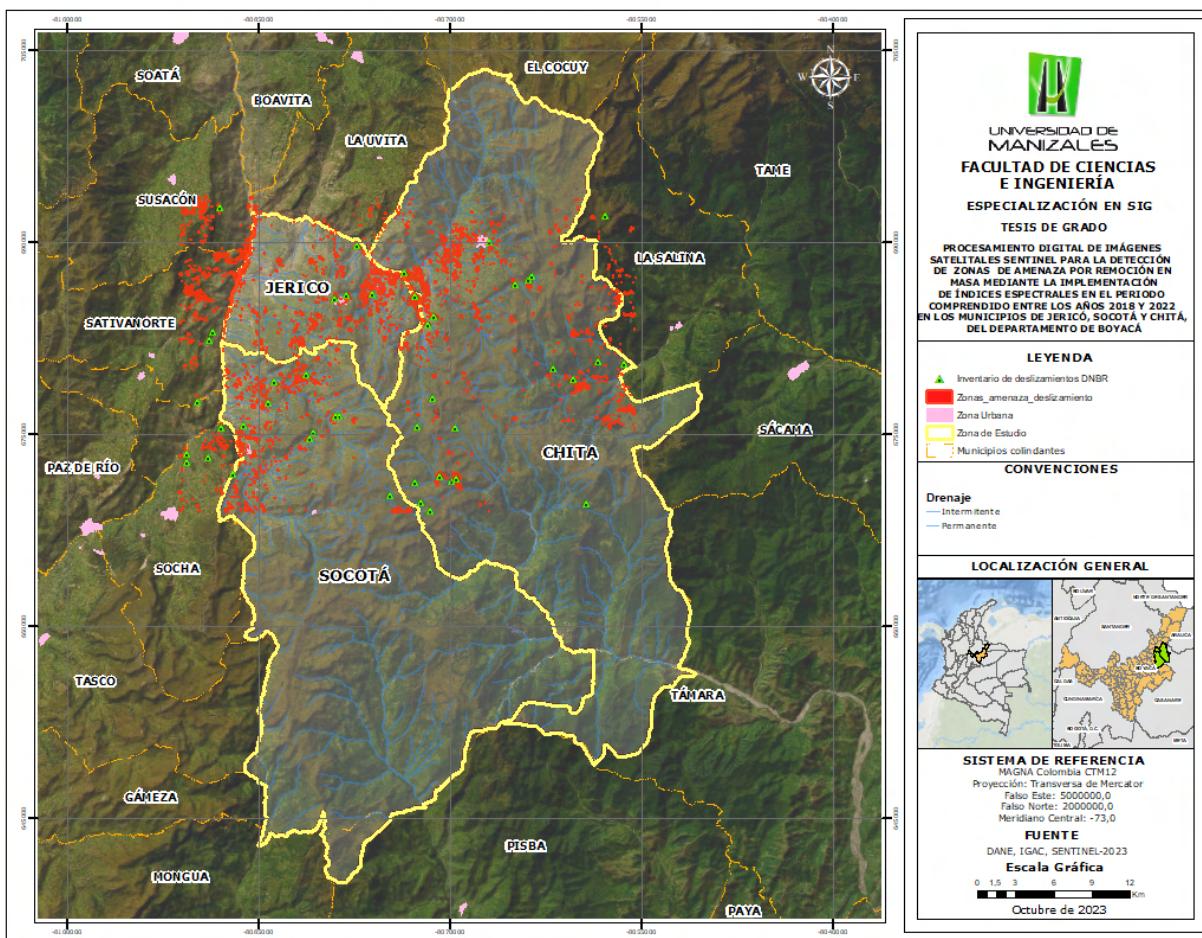


Figura 13. Mapa Temático zonas de amenaza de deslizamiento

En el mapa, se pueden apreciar las concentraciones más notables de puntos en las áreas fronterizas de los municipios de Jericó, Sativanorte y Susacón, así como en las cercanías de Jericó y Chitá. Estas concentraciones se ubican en zonas de pendientes pronunciadas del terreno, donde convergen vías de comunicación intermunicipal y se evidencia la presencia de cuerpos de agua que dividen estos municipios.

Adicionalmente, es posible identificar en el mapa concentraciones que sugieren zonas propensas a deslizamientos en las inmediaciones de las zonas urbanas, esta tendencia se hace especialmente evidente en los municipios de Jericó, Chita y Socotá. Dinámica que parece estar relacionada con la influencia de la actividad humana en estas áreas, como es el caso de Jericó, donde se pueden notar tales eventos cerca de las zonas de cultivo de alfalfa, mientras que en Socotá, en parte, podría estar relacionada con la presencia de diversas empresas mineras.

8. Conclusiones

El propósito de esta tesis fue llevar a cabo la identificación, delimitación y análisis de áreas con riesgo de remoción en masa mediante el procesamiento de imágenes satelitales Sentinel en los límites de los municipios de Jericó, Socotá y Chitá, ubicados en el departamento de Boyacá, durante el período comprendido entre los años 2018 y 2022. Para llevar a cabo este proceso, fue necesario realizar la recopilación, depuración y selección de datos relacionados con este tipo de fenómeno en la zona de investigación. Sin embargo, es importante destacar que no se encontró una única fuente de información que proporcione acceso a datos actualizados y precisos sobre estos eventos. Además, muchas de las fuentes disponibles resultaron estar desactualizadas o carecían de información detallada sobre la ubicación de los eventos.

Al calcular la diferencia de los NBR estimados para las imágenes de los años 2018, 2019, 2020, 2021, 2022 y 2023, se logró identificar, de manera general, las áreas en las que se produjo un cambio significativo en la cobertura. Aunque este proceso preliminar permitió la identificación inicial de posibles deslizamientos de color blanco, es fundamental subrayar que esta información debe ser corroborada a través de un contraste con el modelo digital de terreno y el inventario de deslizamientos para garantizar que las zonas identificadas efectivamente correspondan al fenómeno en estudio.

De igual forma con los valores NBR, se ha logrado identificar áreas en las que se observó un cambio de cobertura significativo, representado en color negro en las imágenes. Sin embargo, es importante destacar que este cambio no necesariamente se relaciona con deslizamientos de

tierra, sino más bien sugiere un proceso de restauración de la cobertura vegetal en zonas donde previamente podría haber ocurrido un deslizamiento.

Como uno de los resultados del proyecto, se logró generar una máscara utilizando los valores máximos y mínimos obtenidos de un deslizamiento de tierra seleccionado como muestra para los años 2018 y 2019. Sin embargo, es fundamental destacar que esta máscara es específica para ese par de imágenes y no puede aplicarse de manera universal. Las variaciones en las condiciones de adquisición de imágenes, como la iluminación y la atmósfera, tienen un impacto significativo en los valores de reflectancia de una misma cobertura en diferentes momentos. Por lo tanto, es crucial considerar estas variaciones al utilizar la máscara en otras imágenes DNBR, ya que los resultados pueden diferir. La generación de máscaras más precisas requerirá un análisis y ajuste cuidadoso de los valores umbral para cada conjunto de datos específico.

En este estudio se ha logrado realizar una primera aproximación a la obtención de una firma espectral típica asociada a un fenómeno de deslizamiento de tierra. Los resultados obtenidos hasta el momento revelan que esta firma espectral comparte similitudes con la firma estándar de un suelo, pero se distingue por un marcado alto contenido de humedad, evidenciado por los bajos valores de reflectancia. Este hallazgo podría ser de suma relevancia en la detección y caracterización de áreas propensas a deslizamientos. Estos hallazgos representan un paso inicial en el análisis de zonas de amenaza por remoción en masa.

9. Recomendaciones

Se recomienda a las entidades gubernamentales locales tomen medidas para implementar un inventario de deslizamientos de tierra que incluya información detallada sobre cada evento, como la fecha, la ubicación geográfica y fotografías del suceso. Este inventario debe ser de naturaleza dinámica y estar sujeto a actualizaciones periódicas. Además, se sugiere que las entidades gubernamentales consideren la posibilidad de permitir la participación activa de la ciudadanía en la recopilación de información, aprovechando las nuevas tecnologías de la información y la comunicación, esto permitirá una gestión más efectiva del riesgo y una mejor preparación para posibles desastres en el futuro.

En cuanto a la selección y descarga de imágenes satelitales, es importante destacar que Sentinel ofrece dos tipos de productos: el 2A y el 1C. El producto 2A se refiere a imágenes que han sido ortorectificadas y corregidas atmosféricamente, lo que las hace ideales para su análisis. Por otro lado, el producto 1C se trata de imágenes ortorectificadas pero con niveles de reflectancia que no tienen en cuenta la influencia de la atmósfera (TOA). En la medida de lo posible, se recomienda la selección de imágenes del nivel 2A, ya que esto no solo facilita el proceso, sino que también ahorra tiempo y esfuerzo en el análisis. No obstante, es importante destacar que en situaciones donde solo se cuente con productos 1C o cuando el fenómeno a estudiar solo pueda ser verificado utilizando imágenes del nivel 1C, es completamente factible llevar a cabo su procesamiento empleando el complemento Sen2Cor. De esta manera, se pueden obtener resultados más confiables y valiosos para la investigación y análisis.

Referente al procesamiento se recomienda llevar a cabo un proceso de depuración de los datos resultantes de la máscara utilizada sobre la diferencia del Índice Espectral NBR (Normalized Burn Ratio), con el fin de eliminar el ruido causado por la presencia de nubes. Esta depuración es esencial para garantizar la calidad y la confiabilidad de los productos finales.

10. Referencias

Acosta Águila, F. L., Olivera Acosta, J., Campos Dueñas, M., & Gutiérrez Pérez, B. (2013). Estudio de riesgo geológico sobre plataforma sig. análisis de susceptibilidad a deslizamientos de tierra en la provincia artemisa, Cuba. XI Congreso Cubano de Informatica y Geociencias.

Agencia Espacial Europea. (n.d.-a). SENTINEL-2 MISSION GUIDE. Retrieved August 26, 2023, from <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-2>

Agencia Espacial Europea. (n.d.-b). Sentinel-5P. Retrieved August 26, 2023, from <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-5p>

Alcaldía municipio de Chita. (2021). Revisión general Esquema de ordenamiento territorial EOT. Corporación Planeación Del Desarrollo Regional.

Alimohammadlou, Y., Tanyu, B. F., Abbaspour, A., & Delamater, P. L. (2021). Automated landslide detection model to delineate the extent of existing landslides. Natural Hazards, 107(2). <https://doi.org/10.1007/s11069-021-04650-8>

Becerra Baeza, C., & De Rurange Espinoza, J. A. (2021). Análisis de deslizamiento mediante técnicas UAV y LIDAR en Ruta 115 CH, Paso Pehuenche, sector Monjes Blancos, Región del Maule, Chile. Investigaciones Geográficas, 61. <https://doi.org/10.5354/0719-5370.2021.59646>

Copernicus. (n.d.-a). Descripción general de la infraestructura. Retrieved August 26, 2023, from <https://www.copernicus.eu/en/about-copernicus/infrastructure-overview>

Copernicus. (n.d.-b). Descubre nuestros satélites. Retrieved August 26, 2023, from <https://www.copernicus.eu/en/about-copernicus/infrastructure-overview/discover-our-satellites>

Cuervo, V. (2000). Criterios para la clasificación y descripción de movimientos en masa. Boletín de Geología, 22(37).

Danneels, G., Pirard, E., & Havenith, H. B. (2007). Automatic landslide detection from remote sensing images using supervised classification methods. International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 3014–3017.

<https://doi.org/10.1109/IGARSS.2007.4423479>

Emilio Chuvieco. (1995). Fundamentos de Teledetección. In Ediciones Rialp, S.A.

El Baroudy, A. A. (2011). Monitoring land degradation using remote sensing and GIS techniques in an area of the middle Nile Delta, Egypt. CATENA, 87(2), 201–208.

<https://doi.org/10.1016/J.CATENA.2011.05.023>

Fayne, J. V., Ahamed, A., Roberts-Pierel, J., Rumsey, A. C., & Kirschbaum, D. (2019). Automated satellite-based landslide identification product for nepal. Earth Interactions, 23(3). <https://doi.org/10.1175/EI-D-17-0022.1>

Fernández Chacón, F., Notti, D., Galve, J. P., Pérez, J. V., Azañón, J. M., Mateos, R. M., Lamas-Fernández, F., Monserrat, O., Roldán, F. J., Pérez, J. L., Colomo, C. M., & Gómez-López, J. M. (2015). TÉCNICAS REMOTAS PARA EL ANÁLISIS MULTIESCALA Y MULTITEMPORAL DE FENÓMENOS SUPERFICIALES. XIV Reunión Nacional de Cuaternario.

Geo innova. (n.d.). Pansharpening en SNAP. Blog. Retrieved October 3, 2023, from <https://geoinnova.org/blog-territorio/pansharpening/>

Gu, U. (2014). Movimientos en masa en la región Andina: Una guía para la evaluación de amenazas. 2007. Revista Geográfica Venezolana, 55(2).

IDEAM. (2022). Predicción de lluvias en el país y seguimiento condiciones fenómeno la niña. Comunicado Especial No. 198.

La Organización Europea para la Explotación de Satélites Meteorológicos. (n.d.). Sentinel-4. Retrieved August 26, 2023, from <https://www.eumetsat.int/sentinel-4>

Lissak, C., Bartsch, A., De Michele, M., Gomez, C., Maquaire, O., Raucoules, D., & Roulland, T. (2020). Remote Sensing for Assessing Landslides and Associated Hazards. In Surveys in Geophysics (Vol. 41, Issue 6). <https://doi.org/10.1007/s10712-020-09609-1>

Mwaniki, M. W., Agutu, N. O., Mbaka, J. G., Ngigi, T. G., & Waithaka, E. H. (2015). Landslide scar/soil erodibility mapping using Landsat TM/ETM+ bands 7 and 3

Normalised Difference Index: A case study of central region of Kenya. Applied Geography, 64, 108–120. <https://doi.org/10.1016/J.APGEOG.2015.09.009>

Ministerio de transportes del Gobierno de España. (2018). El programa Copernicus aplicado a la producción y gestión de la información geoespacial.

Municipio de Jericó. (2020). PLAN DE DESARROLLO MUNICIPIO DE JERICÓ BOYACÁ.

Peñaloza Molina, L. K. & Tocasuche Castro, N. d. (2018). Detección y análisis de deslizamientos utilizando interferometría diferencial (D-Insar) entre los años 2015 y 2017 en las provincias norte y valderrama del departamento de Boyacá Colombia. Recuperado de: <http://hdl.handle.net/11349/13777>.

Piralilou, S. T., Shahabi, H., & Pazur, R. (2021). Automatic landslide detection using Bi-Temporal Sentinel 2 Imagery. GI_Forum, 9(1).
https://doi.org/10.1553/GISCIENCE2021_01_S39

Rivera González, O. D. (2020). Fotogrametría de Drones para la Prevención de Deslizamientos de Tierra en la Ciudad de México. Revista de Estudios Latinoamericanos Sobre Reducción Del Riesgo de Desastres REDER, 4(2).
<https://doi.org/10.55467/reder.v4i2.52>

Romero Rojas, M. I. W., Ramos Bernal, R. N., Vázquez Jiménez, R., Arrogante Funes, P., & Sánchez Tizapa, S. (2019). IDENTIFICACIÓN DE DESLIZAMIENTOS DE LADERAS POR DIFERENCIA DE IMÁGENES ASTER. Conference: IDENTIFICACIÓN DE DESLIZAMIENTOS DE LADERAS POR DIFERENCIA DE IMÁGENES ASTER.

Servicio Geológico Colombiano. (2017). Clasificación de movimiento en masa y su distribución en terrenos geológicos de Colombia. In Clasificación de movimiento en masa y su distribución en terrenos geológicos de Colombia.

<https://doi.org/10.32685/9789585978218>

Tejeda, V., & Parrot, J. (2007). Extracción automática de trazas de deslizamientos utilizando un modelo digital de terreno e imágenes de satélite de alta resolución IKONOS. Ejemplo en la Sierra Norte de Puebla, México. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas. <http://rmcg.geociencias.unam.mx/index.php/rmcg/article/view/89>

UNDRR. (2017). Perdidas economicas pobreza y desastres 1998-2017. Centre for Research on the Epidemiology of Disasters (CRED), 9(5).

UN-SPIDER, U. (n.d.). Índice Normalizado de Área Quemada (NBR). Retrieved October 3, 2023, from <https://un-spider.org/es/node/10959>

Vohora, V. K., & Donoghue, S. L. (2004). Application of Remote Sensing Data to Landslide Mapping in Hong Kong. International Society for Photogrammetry and Remote Sensing.

A. Anexo: Inventario de deslizamientos

B. Anexo: Metadatos de la imágenes sentinel

C. Anexo: Análisis multitemporal de la diferencia DNBR

D. Anexo: Geodatabase

E. Anexo: Mapas Temáticos

