



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Detección de movimientos en masa a escala regional empleando imágenes del sensor MODIS

Obed Andres Moncada Rojas

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Minas, Departamento de Geociencias y Medio Ambiente

Medellín, Colombia

2014

Detección de movimientos en masa a escala regional empleando imágenes del sensor MODIS

Obed Andres Moncada Rojas
Ingeniero Forestal

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:
Magíster en Medio Ambiente y Desarrollo

Director (a):

Verónica Botero Fernández
Ingeniera Civil, MSc. PhD.

Codirector (a):

Andrés Ochoa Jaramillo
Ingeniera Civil, MSc. PhD

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Minas, Departamento de Geociencias y Medio Ambiente
Medellín, Colombia

2014

*En donde salía el derrumbe,
En la gran herida de la tierra,
Quedaba olor a sangre;
Es la sangre regada por la naturaleza,
Así como una mujer riega la sangre al dar a luz a un niño.*

MITOS DE ORIGEN
GUÁMBIANOS

Agradecimientos

A mi familia por el apoyo incondicional.

A Elizabeth por su inquebrantable paciencia e incondicional compañía.

A los profesores Verónica Botero y Andrés Ochoa; por su paciencia, tiempo y energía.

A la gobernación de Antioquia por el apoyo económico. Programa de generación de conocimiento.

A CORNARE por la información facilitada.

A mis compañeros de maestría las incontables sugerencias, el apoyo y todas las alegrías.

A los Profesores Luis Jairo Toro y Humberto Caballero por sus valiosos aportes.

A Chalo, Adrián y John por su amistad y enseñanzas.

Resumen

La intención de este trabajo es valorar una metodología para la detección de superficies afectadas por movimientos en masa a escala regional, soportada en el Índice de Vegetación Normalizada (NDVI) del SENSOR MODIS. Esta investigación avanzó en un método semi-automatizado para el monitoreo de la superficie terrestre a una escala de tiempo anual, a partir de la identificación de características espectrales de la cobertura vegetal y cambios en diferentes momentos asociables con movimientos en masa. El procedimiento se basó en la excedencia de un valor umbral entre imágenes pre y post NDVI-MODIS, condición considerada como un candidato a movimiento en masa.

El rendimiento para la detección de cambios por deslizamiento, presenta un rendimiento limitado con una fiabilidad del 22%, debido a falsas identificaciones relacionadas con actividades antrópicas o fenómenos naturales, en la región del oriente Antioqueño. Zona piloto de estudio. Por otro lado, el método es útil para clasificaciones automáticas de variaciones temporales y espaciales de la cobertura superficial (procesos erosivos, cortes y movimientos en masa) con una fiabilidad global de 67,59%.

Palabras claves: NDVI-MODIS, Movimientos en masa, series de tiempo.

Abstract

We define a methodology for the detection of areas affected by movements in mass at regional level supported on the Normalized Vegetation Index (NDVI) from MODIS SENSOR. This research advanced into an automated method for monitoring the overland's surface to an annual time scale from the identification of spectral characteristics of vegetal coverage and changes in different times associated with landslides. The procedure was based on the exceedance of a threshold value between images pre and post NDVI-MODIS, condition considered as a candidate to movement in mass.

The method is useful for automatic classifications of temporal and spatial variations of the superficial coverage (erosion processes, cuts and movements in mass) with a global reliability of 67.59%. This condition limited the yield for the change detection by movements in mass, a reliability of 22%, by false identifications due to areas affected by anthropics processes or other natural phenomena.

Keywords: NDVI-MODIS, Landslides, series de tiempo, time series.

Contenido

	Pág.
Lista de figuras	8
Lista de tablas.....	9
Introducción.....	10
Planteamiento del problema	10
Justificación.....	11
Objetivos.....	13
Objetivos específicos.....	13
1. Marco teórico.....	14
1.1 Teledetección y movimientos en masa	14
1.2 Identificación de movimientos en masa	14
1.3 Fenología	17
1.4 Propiedades espectrales de la vegetación.....	18
1.5 Imágenes satelitales e índices de vegetación (IVs)	20
1.6 Características del sensor MODIS.....	21
1.7 Niveles de procesamiento Índices de vegetación (IVs-MODIS)	22
1.7.1 Índices de vegetación IVs-MODIS disponibles	22
1.7.2 Formato de archivo del índice de vegetación NDVI-MODIS.	23
1.7.3 Calidad de datos.....	24
1.7.4 Procesamiento de los índices de vegetación IV (NDVI-MODIS).....	25
1.8 Series de tiempo a partir de imágenes remotas.....	28
1.9 Escala y resolución espacial	28
1.9.1 Implicaciones de la escala del producto MODIS-NDVI en la identificación de movimientos en masa.....	29
2. Antecedentes.....	30
2.1 Uso de Sensores remotos para la identificación de movimientos en masa.....	30
2.1.1 Simulación de la susceptibilidad del terreno a movimientos en masa usando Modelos Digitales del Terreno (MDT).....	31
2.1.2 Detección de movimientos en masa usando fotografías aéreas.....	31
2.1.3 Detección de movimientos en masa usando imágenes satelitales e índices de vegetación (IVs).....	32
2.1.4 Potencialidades del sensor MODIS.....	32
2.2 Inventarios de movimientos en masa en la gestión del riesgo	34
2.2.1 Inventarios de movimientos en masa.....	34
2.2.2 Identificación de movimientos en masa en el territorio Colombiano.....	35
2.3 Validación de resultados.....	36
3. Metodología.....	37
3.1 Diagrama de actividades.....	37
3.2 Definición del área de estudio.....	38
3.2.1 Contexto nacional y regional	38

3.3	Geografía física de la zona de estudio.....	40
3.3.1	Hidrología	40
3.3.2	Geomorfología.....	40
3.3.3	Usos del suelo.....	42
3.4	Adquisición de Datos.....	43
3.5	Procesamiento de los índices de vegetación NDVI-MODIS	44
3.5.1	Valoración de calidad (Quality Assessment, QA).....	44
3.5.2	Serie de tiempo a partir de índices de vegetación NDVI-MODIS.....	45
3.6	Identificación de cambios en la cobertura superficial e información de referencia.....	48
3.7	Correlación de movimientos en masa con la pendiente.....	50
3.8	Validación de resultados.....	51
4.	Resultados y discusión	53
4.1	Procesamiento de la información	53
4.1.1	Mascara de calidad (Quality Assessment, QA)	53
4.1.2	Máscara por pendiente.....	56
4.2	Análisis de series de tiempo NDVI-MODIS.....	58
4.3	Detección de cambios en la cobertura	61
4.3.1	Cambio de cobertura para el año 2010. Periodo de calibración.....	61
4.3.2	Cambio de cobertura para los años 2003-2013 con series de tiempo NDVI- MODIS	72
5.	Conclusiones	76
6.	Bibliografía.....	78
	Anexo A. Programación para la sustraer los bits de calidad (LDOPE) 2. Algoritmo para la identificación de candidatos de movimientos en masa (IDL)	85

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1 Deslizamientos en ecosistemas naturales y antrópicos en el oriente Antioqueño	15
Figura 2. A Banda dos del sensor MODIS TERRA Infrarojo Cercano (NIR). (B) Banda cinco del sensor Landsat 8.....	17
Figura 3. Reflectancia típica de una hoja en diferentes porciones del espectro con las principales características espectrales. (Adaptado de (Arango et al., 2005).....	19
Figura 4. Flujo de datos del algoritmo MODIS VI (Solano <i>et al.</i> , 2010).....	26
Figura 5 Flujo de actividades.....	37
Figura 6 Área de estudio, localización general.....	39
Figura 7 Coberturas de referencia.....	46
Figura 8 Aplicación de media móvil a series de tiempo para las coberturas de referencia.....	47
Figura 9 Histograma para ilustrar la distribución de los valores de Δ NDVI.....	49
Figura 10 Comportamiento de la serie de tiempo por el registro de un movimiento en masa en la región de análisis.....	50
Figura 11 Datos empleados para la validación de los resultados.....	52
Figura 12 Visualización estructura de los datos antes y después (<i>software</i> IDL).....	53
Figura 13 Comparación de imágenes MODIS-NDVI. A. imagen original B. imagen después de aplicar las máscaras de calidad (Los píxeles por fuera del criterio de selección son pintados de color negro).....	54
Figura 14 Mascara de pendiente.....	57
Figura 15 Series de tiempo para las coberturas de referencia. 2000-2013.....	59
Figura 16. Series de tiempo para las coberturas de referencia. 2010-2011.....	60
Figura 17 Candidatos a movimiento en masa en la región de estudio.....	61
Figura 18 Píxeles del sensor MODIS validados con imágenes de mayor resolución.....	62
Figura 19. Condiciones detectadas como cambio de cobertura por el índice NDVI-MODIS.....	64
Figura 20 Cambio de cobertura y casos de omisión – comisión series NDVI-MODIS.....	67
Figura 21 Distribución de la variación anual de la cubierta vegetal asociada con candidatos a movimientos en masa en la zona de estudio.....	74
Figura 22. Valores de precipitación promedio anuales para los años del 2000 al 2010.....	75

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1. Descripción de la Valoración de Calidad de Datos Científicos (QA SDS).	27
Tabla 2 Información cartográfica empleada.....	43
Tabla 3 Parámetros empleados en la valoración de calidad para los datos de NDVI.....	45
Tabla 4 Píxeles detectados como movimiento en masa para cada factor umbral. Año 2010.	65
Tabla 5. Matriz de error para los factores umbrales de detección de movimientos en masa.....	66
Tabla 6 Cobertura presente en las zonas que fueron clasificadas como comisión	69
Tabla 7 Píxeles detectados como cambio de cobertura para cada factor umbral. Año 2010.....	72
Tabla 8 Número de píxeles detectados como posibles movimientos en masa	73

Introducción

Colombia está expuesta a eventos climáticos y geológicos de extraordinaria energía con la capacidad de detonar procesos sucesivos de remoción en masa. A pesar de esto no existe una fuente de información continua y completa sobre la recurrencia y localización de este fenómeno geológico, lo que limita las estrategias para proteger la población, actividades productivas e infraestructura.

El objetivo general de esta investigación es definir una metodología para la detección de superficies afectadas por movimientos en masa a escala regional, soportada en el Índice de Vegetación Normalizado (NDVI) del sensor MODIS. Este producto garantiza un intervalo temporal de 8 días para los años 2003-2014, siendo éste el periodo de análisis para la presente investigación. Este trabajo presenta un método semi-automatizado para el monitoreo de la superficie terrestre a escala anual, a partir de la identificación de características espectrales de la cobertura vegetal y cambios en la misma, asociables a movimientos en masa.

En el presente numeral se muestra el planteamiento del problema, la justificación y objetivos que del presente proyecto. En El marco teórico se desarrollan los conceptos y procesos asociados con deslizamientos y teledetección, además de los productos y aplicaciones del sensor MODIS. En el numeral tercero se explica la metodología usada para la realización de la presente investigación. Los resultados son abordados en tres partes, el Procesamiento de la información, análisis de las series de tiempo y detección de cambios en la cobertura, los pasos anteriores con la finalidad de dar cuenta de los objetivos planteados. En el último capítulo se encuentra la discusión las conclusiones.

Planteamiento del problema

Los registros de movimientos en masa en muchos lugares están restringidos a reportes realizados por entidades oficiales o directamente por la población afectada. Esto limita la información sobre eventos ocurridos en regiones de difícil acceso, lo que configura una limitante para la caracterización cartográfica de las zonas afectadas (Martha *et al.* 2010; Metternicht *et al.* 2005). En Colombia los deslizamientos son reportados por las autoridades competentes y descritos en publicaciones locales, pero rara vez son objeto de cuidadosa evaluación (Hermelin y Hoyos, 2010). Otros autores plantean que, algunos eventos son invisibles a nivel nacional, al considerarse de poca trascendencia ya que sus efectos no son

relevantes. Sin embargo, la frecuencia y el efecto acumulado tienen consecuencias económicas, ambientales y sociales que deben ser atendidas (IDEA, 2005; Marulanda *et al.*, 2010). En este sentido, para muchas regiones de Colombia la ausencia de registros de movimientos en masa se configura en una limitante para la caracterización del relieve, por lo tanto en la implementación de políticas acertadas dirigidas a la protección de los recursos naturales, sociales y físicos (Huggel *et al.*, 2009).

Los movimientos en masa hacen parte de los procesos denudativos modeladores del relieve. Los niveles de susceptibilidad a este fenómeno se asocian con la diversidad de procesos geológicos, hidrometeorológicos, químicos y mecánicos que actúan sobre el paisaje (Sidle and Ochiai, 2006). Estos procesos morfodinámicos, favorecidos por el clima y geología locales, están presentes en las geoformas actuales del paisaje Antioqueño. En ocasiones formas cóncavas y convexas son remanentes característicos que testifican este tipo de eventos (Arias, 2011). Como detonantes de fenómenos de remoción en masa se reportan procesos naturales y antrópicos. Para el caso de Colombia específicamente el oriente antioqueño como región de estudio, la precipitación como fenómeno natural es de relevancia dado las condiciones de lluvia tropical y la fuerte relación con el relieve, lo que hace que la mayor precipitación ocurra sobre las vertientes con respecto a una llanura basal o un valle. Este comportamiento se denomina óptimo pluviométrico (Mejía *et al.*, 1999).

Dada la recurrencia por fenómenos de remoción en masa que presenta la región Andina (Allan *et al.*, 2006; Mantilla *et al.*, 2001), la recolección sistemática y continua de registros sobre estos procesos morfodinámicos, permite identificar y caracterizar las dinámicas intrínsecas del relieve, haciendo perceptibles relaciones espaciales con elementos como la geología, el clima y la vegetación. El desconocimiento de éstos limita una visión integral del fenómeno, además de configurar una mayor vulnerabilidad para los elementos allí presentes.

Justificación

La intención de este trabajo es determinar con el uso de imágenes satelitales del sensor MODIS, un método que permita recolectar información sobre movimientos en masa a escala regional, basado en el registro de alteraciones ambientales. De esta manera aportar a la comprensión de la morfodinámica regional del relieve y contribuir a la comprensión de aspectos como la

amenaza por deslizamientos, elemento necesario en la formulación de estrategias regionales de gestión del riesgo. Adicional a esto, se tiene como ventajas operativas del método, el fácil acceso de los datos y la continuidad de los análisis en el tiempo.

Los movimientos en masa son uno de los fenómenos geológicos que más afectaciones genera sobre la población, el medio ambiente y la infraestructura. Deslizamientos con efectos catastróficos a menudo son detonados por sismos y precipitaciones extremas, muchos de éstos con impactos significativos en países en vía de desarrollo (Lacasse y Nadim, 2009). Para el caso de Colombia las regiones Pacífica, Andina y Caribe reportan la mayor recurrencia por deslizamientos (Allan *et al.*, 2006; Mantilla *et al.*, 2001).

Latinoamérica en las últimas tres décadas, ha sido afectada por movimientos en masa detonados por eventos climáticos extremos como el ENSO (Magrin *et al.*, 2007). Para el caso de Colombia Hermelin y Hoyos (2010) reportan la ocurrencia con relativa regularidad de procesos de remoción en masa desencadenados por eventos extremos “convulsivos” con la capacidad de generar impactos a escala regional, sin llegar a ser considerados catastróficos (Martínez *et al.*, 2001; Sánchez *et al.*, 2006) hacen un recuento de los procesos de remoción en masa reportados en las vertientes del sistema montañoso andino y concluyen que, la mayoría se originan por lluvias intensas y/o persistentes, cuya afectación se hace crítica en zonas con poblaciones con predisposición a ser afectadas.

El concepto de zonificación de amenaza por movimientos en masa es un insumo que permite disminuir la incertidumbre en el desarrollo de programas de prevención y la implementación de políticas dirigidas a la gestión del riesgo por fenómenos geológicos. Para este planteamiento numerosas investigaciones concluyen que, los inventarios regionales de movimientos en masa permiten caracterizar el relieve; al aportar a la comprensión de la morfodinámica regional y definir la amenaza; al construir modelos de recurrencia (Galli *et al.*, 2008; Lacasse y Nadim, 2009; Marcelino *et al.*, 2009; Guzzetti *et al.*, 2012). De ello resultan las pretensiones de esta investigación, definir una metodología de alcance regional para la recolección sistemática y continua de registros indicativos de procesos de remoción en masa, con el empleo de imágenes de sensores remotos con alta resolución temporal y gratuidad. El método puede ser una herramienta útil para el estudio y comprensión de la morfodinámica tropical a escala regional, para de esta manera contribuir a la comprensión del relieve y aportar elementos para la construcción de conceptos como la amenaza por movimientos en masa.

Objetivos

Definir una metodología para la detección de superficies afectadas por movimientos en masa en la región del oriente Antioqueño, basada en uso del índice de vegetación normalizada (NDVI) del sensor MODIS.

Objetivos específicos

Realizar clasificaciones automáticas de las variaciones temporales y espaciales de los índices de vegetación, para emplearlos en la detección de movimientos en masa a escala regional.

Analizar el comportamiento de las series temporales, para determinar los umbrales de cambio en las coberturas.

Generar bases de datos anuales de movimientos en masa a partir del análisis automático de series de tiempo del sensor MODIS.

1. Marco teórico

1.1 Teledetección y movimientos en masa

El interés por monitorear la superficie terrestre, el seguimiento a largo plazo del medio ambiente, además del efecto del hombre sobre éste, lleva de manera natural al uso de sensores remotos (Schowengerdt, 2006). A partir del procesamiento e interpretación de imágenes satelitales se pueden obtener características de la superficie terrestre asociada con la ocurrencia de movimientos en masa. Esto hace posible la identificación, almacenamiento y la visualización de deslizamientos en inventarios para uso posterior.

Para la identificación y creación de inventarios de movimientos en masa se han empleado imágenes satelitales en países como Italia, Suecia, España además de china, Pakistán entre otros (Beguiría, 2006; Galli *et al.*, 2008; Guzzetti *et al.*, 2012; Hervás y Bobrowsky, 2009; Peduzzi, 2010) y en Colombia han usado métodos similares (Chorowicz *et al.*, 1998; Cuervo, 1994; Nossin, 2000). Todos los autores coinciden en que la teledetección es promisoría en la identificación de procesos de remoción en masa a escala regional.

Con el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG), los inventarios de movimientos en masa pueden ser incorporados en análisis espaciales basados en modelos deterministas, estadísticos o heurísticos. A partir de esta información es posible evaluar la amenaza por deslizamientos en zonas donde el relieve presenta características similares a los registros de referencia (Metternicht *et al.* 2005).

1.2 Identificación de movimientos en masa

La diversidad de interacciones entre los elementos que constituyen el relieve terrestre, hacen de éste un sistema complejo con diversos estados y respuestas (Arias, 2011). Así pues Dhakal *et al.* (2000) concluyen que es posible valorar en la ocurrencia de movimientos en masa, la incidencia de variables como la geología, la topografía y la vegetación, al igual que las condiciones climáticas e hidrológicas, las primeras como inductoras y las segundas como detonantes (Aristizábal *et al.*, 2010). Para estos casos la identificación y el registro de procesos de remoción en masa son una medida directa de la dinámica del relieve, lo que permite una apreciación más

completa de su morfodinámica (Fell *et al.* 2008; Lacasse & Nadim 2009; Singhroy 2009; Zhou *et al.* 2002).



Figura 1 Deslizamientos en ecosistemas naturales y antrópicos en el oriente Antioqueño

En la Figura 1 se muestran imágenes de tipos de movimientos en masa, se agrupan en filas de acuerdo con la clasificación de (Varnes, 1978) (A) flujos de escombros y lodos en pasturas destinadas a la crianza de ganado. Municipio de El retiro (X: 846.758 Y: 1°160.034 magna sirgas origen Bogotá) (B). Deslizamiento planar en zonas con cobertura vegetal arbustiva. Municipio de Abejorral (X: 848.898 Y:1°127.223 magna sirgas origen Bogotá) (C)

Flujo de escombros en bosque natural. El Retiro (X: 828.103 Y: 1'165.403 magna sirgas origen Bogotá). (D) Desprendimiento en talud superior de vía. Municipio de la Ceja. (X: 847.915 Y:1'149.014 magna sirgas origen Bogotá) (E) Deslizamiento planar en un mosaico de cultivos y vegetación arbustiva. Municipio de Abejorral (X:844.852 Y: 1'139.196 magna sirgas origen Bogotá). (F) Flujo de escombros en cultivo de café. Municipio de Nariño (X:876.515 Y: 1'104.627 magna sirgas origen Bogotá).

Los movimientos en masa pueden ser clasificados por características morfológicas y las condiciones que los detonan. Ahora bien, un deslizamiento se distingue por la existencia de un plano en el que se produce, por efecto de la gravedad, el movimiento de una masa de roca, escombros o suelo en dirección de la pendiente. Entonces, a fin de ser identificados y analizados pueden ser catalogados en función de las condiciones que los inducen o detonan en: flujos, caídas, volcamientos, propagaciones y deslizamientos. Según la clasificación propuesta por (Varnes, 1978). En síntesis, esta clasificación emplea como criterio principal el tipo de movimiento y en segundo lugar el tipo de material (GEMMA, 2007). Por los alcances de la presente investigación, se asumen las diferentes clasificaciones como un término genérico.

Para la detección de movimientos en masa con imágenes satelitales Mantovani *et al* (1996) desglosan en términos semánticos la palabra detección en dos aspectos: clasificar y detectar. Para esto argumentan que, la primera solo es posible para datos que permitan aproximaciones morfométricas del evento; escarpe, depósito, área de remoción, entre otros, alcances que son propios de imágenes con alta resolución espacial.

Por otro lado, la detección, es favorecida por el contraste del área removida con la superficie adyacente, lo que hace posible detectar deslizamientos con diferentes formas y características espectrales. Esta condición se da para imágenes satelitales con baja resolución espacial. Como complemento del concepto anterior Schowengerdt (2006) afirma que una superficie detectable por el contraste con la superficie adyacente no necesariamente es clasificable, excepto por el contexto general de la imagen. Aunque para la presente investigación la identificación de superficies afectadas por procesos de remoción en masa radica en variaciones temporales del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (*Normalized Difference Vegetation Index*, NDVI) para un mismo pixel, es necesario entonces comprender en términos espaciales como podría incidir un evento en la respuesta espectral captada por el dispositivo, si su superficie total es inferior a la resolución espacial del sensor. Para escenas de NDVI-MODIS esta condición puede estar dada, por ejemplo, por la detección de un elemento con un ancho aproximado de 90m (la tercera parte un pixel MODIS). Situación que se representa gráficamente en la Figura 2, donde la imagen representa la desembocadura del río La Miel en el río de La Magdalena. El río

La Miel (margen izquierda) en este punto tiene un ancho de 90 metros (tres píxeles Landsat 8) visible en un píxel de 250 metros del sensor MODIS debido al alto contraste entre la vegetación y el agua.

Por lo tanto la resolución espacial de las escenas de NDVI-MODIS, solo permitiría como alcance máximo, la detección de superficies afectadas por movimientos en masa.

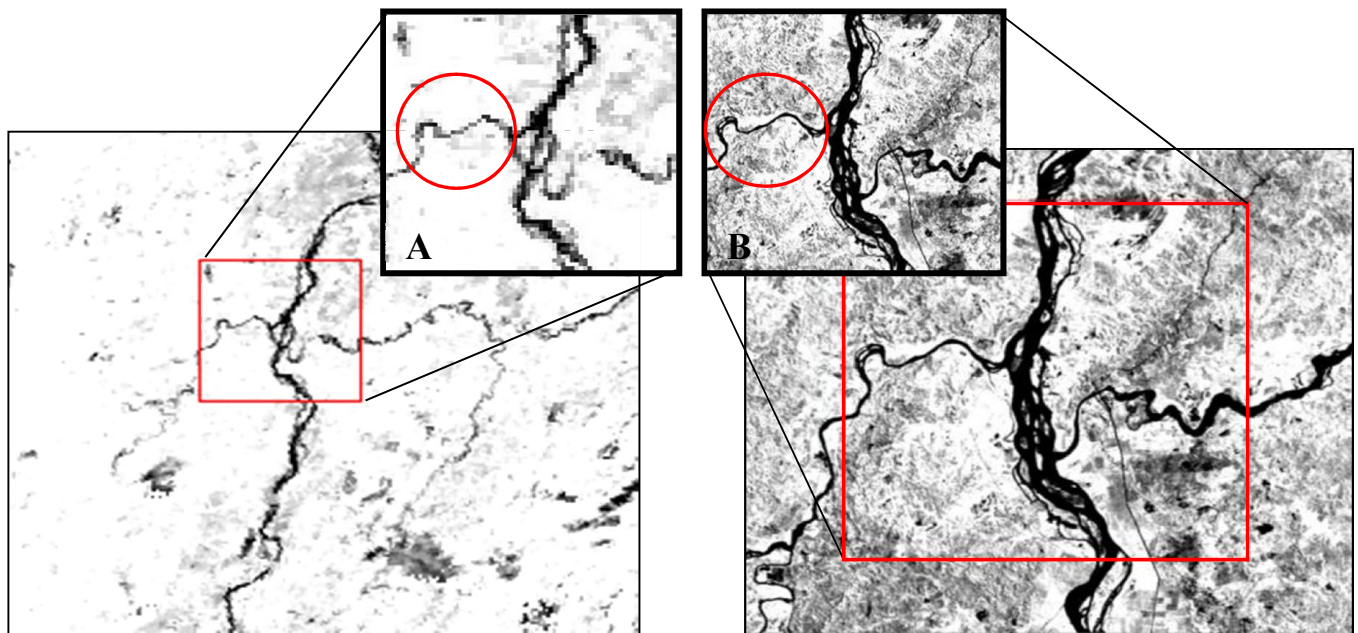


Figura 2. A Banda dos del sensor MODIS TERRA Infrarojo Cercano (NIR). (B) Banda cinco del sensor Landsat 8.

1.3 Fenología

La fenología como ciencia que estudia la influencia del entorno o el medio ambiente sobre la vegetación, es valiosa en investigaciones como el ciclo del carbono, la producción primaria neta (PPN) y la circulación biogeoquímica. Así mismo la vegetación además de representar morfológicamente estos procesos, también provee registros asociables con patrones climáticos, alteraciones del relieve, incendios forestales y producción agrícola. Para registrar estos fenómenos, se plantea como herramienta de gran utilidad la teledetección, ya que tiene la capacidad de capturar de manera remota la respuesta espectral de los ecosistemas terrestres y ofrecer una visión integradora de los procesos regionales que modifican el paisaje (Disabato, 2010).

Para el desarrollo de esta investigación es necesario comprender la relación entre factores climáticos y el ciclo de los seres vivos, específicamente la influencia sobre la vegetación;

floración, maduración de cultivos, plagas, senescencia, entre otros. Por lo anterior es necesario al momento de precisar un valor umbral asociado con cambios o alteraciones en la superficie terrestre, se deberá definir cuales obedecen a procesos fenológicos y cuales a la remoción de la capa vegetal.

Estos elementos hacen que la firma espectral de la vegetación sea quizás la más variable en la naturaleza, puesto que durante el ciclo de vida puede presentar numerosas variaciones (Schowengerdt, 2006). Así mismo, la identificación de cambios del suelo basados en la respuesta espectral de ecosistemas terrestres, ha tenido un rendimiento limitado debido a errores inducidos por la fenología (Lunetta *et al.*, 2006).

Por lo ya mencionado, los sensores remotos pueden ser empleados para medir los cambios espectrales de la superficie terrestre asociados con movimientos en masa, sin embargo, las variaciones no son inequívocas, por lo que la detección de deslizamientos con imágenes satelitales se convierten en un desafío constante, en el que es necesario incluir el mayor número de elementos como garantía y control de los resultados (Martha *et al.*, 2010)

1.4 Propiedades espectrales de la vegetación.

La interacción entre la radiación solar y la vegetación; el flujo de energía incidente es reflejado, absorbido o transmitido por las hojas; la intensidad y los patrones de reflexión dependen de dos condiciones, la respuesta espectral y la estructura del dosel. La respuesta espectral está definida por la baja reflectancia de las hojas en longitudes de onda del azul al rojo, resultado de la alta absorción de energía de los pigmentos principalmente la clorofila, con una menor incidencia de los carotenos y las xantofilas. La estructura del dosel condiciona la variabilidad de la reflectancia debido a la arquitectura de las plantas, el área de las hojas, el estado vegetativo, además, la uniformidad de la radiación incidente, la reflectividad del sotobosque y el suelo (Dash *et al.*, 2008; Knipling, 1970).

Estas dos condiciones, la absorción y la estructura, son integradas en

Figura 3, la cual representa la respuesta espectral típica de la vegetación sana. La curva muestra el porcentaje de la energía reflejada sobre las hojas como función del espectro electromagnético entre 0.4 a 2.7 μm . Esta firma espectral puede ser dividida en tres partes. La fuerte absorción solar entre 0.4 a 0.7 μm conocida como la radiación fotosintéticamente activa con un máximo de reflectancia en 0,55 μm , causante del color verde en las plantas. La segunda parte es el

incremento de la reflectancia en el infrarrojo cercano (IRC) corresponde al intervalo de 0.7 al 1.3 μm . Debido a de que los pigmentos son poco absorbentes y la estructura de la hoja presenta una alta transparencia a la radiación. Por último, más allá de 1.3 μm la radiación disminuye de manera gradual hasta su valor más bajo cercano a 2.7 μm por una mayor absorción de las hojas debido al contenido de agua.

La respuesta espectral de la vegetación entre el visible y el infrarrojo cercano (0.4 a 1.3 μm) da como resultado un fuerte contraste en la longitud de onda entre 0.65-0.85 μm . Este contraste deriva en una relación empírica conocida como Índice de vegetación (IV). Relación entre la reflectancia del rojo y el infrarrojo cercano ($\frac{\text{Rojo}}{\text{IRC}}$). (Knipling, 1970; Laake and Sanchez, 2005; Myneni and Hall, 1995).

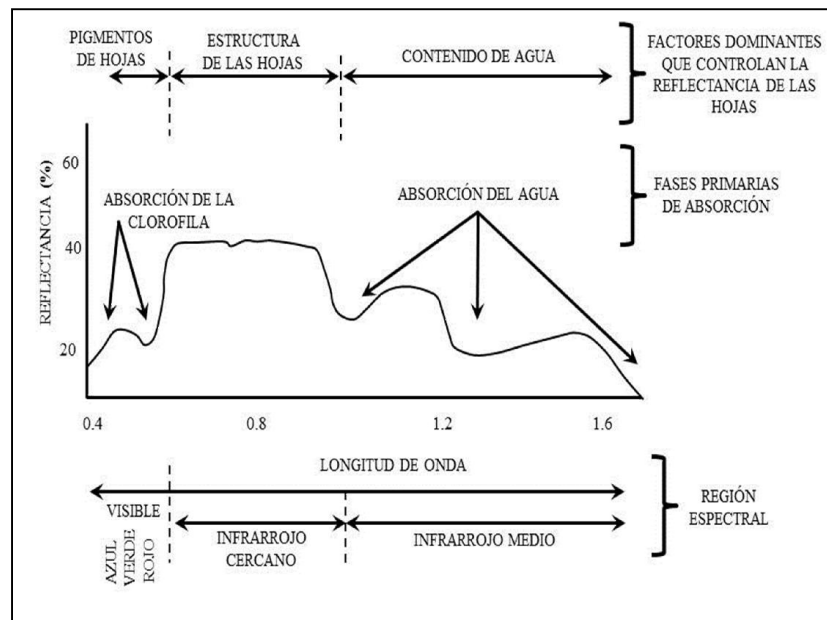


Figura 3. Reflectancia típica de una hoja en diferentes porciones del espectro con las principales características espectrales. (Adaptado de (Arango et al., 2005)

Para la curva descrita, cualquier alteración en la vegetación afecta la reflectividad de las distintas longitudes de onda. En síntesis, los pigmentos de la hoja se relacionan principalmente con la porción visible del espectro. La estructura celular incide en el IRC, mientras que el contenido en agua se caracteriza en el intervalo del infrarrojo medio (IRm).

1.5 Imágenes satelitales e índices de vegetación (IVs)

La vegetación presenta diversos estados fenológicos a lo largo de la vida, lo que significa numerosos comportamientos y respuestas al espectro electromagnético. Por ejemplo, el desarrollo de plantas con hojas sanas disminuye la energía reflejada en la porción del infrarrojo cercano (IRC), por otro lado, la maduración y senescencia de la planta incrementa la reflexión en la longitud del rojo a través de procesos de dispersión (reflexión y transmisión) ya que la clorofila presenta menor absorción (Huete *et al.*, 1999).

Los IVs son favorables para el análisis de la fenología y las alteraciones de la cobertura vegetal al recoger la señal fotosintéticamente activa, los valores de área foliar, las características estructurales de las plantas y el contenido de clorofila, lo que permite comparaciones consistentes de la variabilidad espacial y temporal de la vegetación. (Huete *et al.*, 2002, 1999; Xiang *et al.*, 2003).

A continuación se realiza una breve descripción de los IVs de interés para la presente investigación.

El Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) es el índice de vegetación más conocido y utilizado en el campo de la teledetección, se define como.

$$NDVI = \frac{\rho_{IRC} - \rho_R}{\rho_{IRC} + \rho_R} \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde,

R: Reflectividad en la banda del Rojo.

IRC: Reflectividad en la banda del Infrarrojo Cercano

Huete *et al.* (1999) Diseñaron un índice específico para imágenes del sensor MODIS. Se trata del EVI “*Enhanced Vegetation Index*” que además de incluir las bandas del IRC y del rojo, contiene un registro en la porción del azul, cuya finalidad es reducir los efectos atmosféricos y una serie de parámetros que limitan las contribuciones del suelo. Éste se define en la siguiente ecuación.

$$EVI = (G) \frac{\rho_{IRC} - \rho_R}{\rho_{IRC} + C_1 * \rho_R - C_2 * \rho_{Azul} + L} \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde,

R: Reflectividad en la banda del Rojo.

IRC: Reflectividad en la banda del Infrarrojo Cercano

$C_1 = 6.0$, Coeficiente de resistencia atmosférica

$C_2 = 7.5$, Coeficiente de resistencia atmosférica

$G = 2.5$, Factor de ganancia

$L = 1$, Factor de corrección

1.6 Características del sensor MODIS

El MODIS “*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*” es un sensor remoto para la medición de procesos físicos y biológicos. Hace parte del sistema de observación de la Tierra (EOS). Este instrumento proporciona observaciones simultáneas y congruentes de la atmósfera (aerosoles, vapor de agua, propiedades de las nubes y perfiles de temperatura), el océano (temperatura superficial del mar y clorofila) y características de la superficie terrestre (cobertura del suelo, cambios de temperatura y propiedades de la vegetación) que permiten una mejor comprensión de la Tierra como un sistema integrado. Existen dos sensores MODIS casi idénticos a bordo de los satélites “*EOS-Terra y EOS-Aqua*” con frecuencia temporal de 1 a 2 días, es decir, presenta un periodo de revisita de 1 a 2 registros diarios en la región de estudio, de tal forma que el primer satélite *EOS-Terra*, cruza la línea ecuatorial a las 10:30 am (hora local ecuatorial) descendiendo hacia el sur en órbita polar. De manera similar El *EOS-Aqua* a las 13:30 cruza la línea ecuatorial ascendiendo hacia el norte en órbita polar (Justice *et al.*, 2002).

Las imágenes obtenidas por el sensor MODIS presentan alta resolución radiométrica (12 bits) en 36 bandas espectrales que van desde 0,412 hasta 14,235 μm cubriendo desde el espectro visible hasta el infrarrojo. La resolución espacial depende de la banda empleada. Las bandas (1-2) presentan una resolución espacial de 250 metros, las bandas (3-7) de 500 metros, y el resto de bandas (8-36) de 1000 m. (Wolfe *et al.*, 2002; Xiong *et al.*, 2011). La producción de IVs del sensor MODIS se hace a partir de superficies cuadradas de aproximadamente 1200 km x 1200 km (4800 filas x 4800 columnas), con proyección sinusoidal (SIN). La captura de datos en las diferentes porciones del espectro electromagnético permite la construcción de numerosos productos empleados en la detección de incendios, cambios en la cobertura del suelo y la medición de la temperatura de la superficie de la Tierra (Justice *et al.*, 2002). Para la presente investigación se emplean los productos MOD13Q1 y MYD13Q1 los cuales contienen DATOS de índices de vegetación y calidad de datos, información necesaria para el desarrollo del presente estudio.

1.7 Niveles de procesamiento Índices de vegetación (IVs-MODIS)

El procesamiento de los datos del sensor MODIS se desarrolla en cuatro niveles enlazados, este sigue en función del grado de procesamiento una cadena de criterios preestablecidos. Para la presente investigación solo será descrito el nivel 3 de procesamiento, al cual corresponde los productos enfocados al estudio de la superficie terrestre (MODIS *Land*), este último es ampliamente documentado por (Solano *et al.*, 2010). Detalles de los niveles restantes pueden ser consultados en (Mas, 2011) “*Aplicaciones del sensor MODIS para el monitoreo del territorio*”. A continuación se describe el tercer nivel de procesamiento.

Nivel 3: Son productos de valor agregado derivados de variables geofísicas ya mapeadas. Para algunos productos se realiza un remuestreo a una menor resolución espacial que las presentadas por las bandas originales y se elabora compuestos de intervalos de tiempo preestablecidos para el producto a generar (1, 8, 16 y 30 días). Entre los productos del nivel tres se encuentran los índices de vegetación IVs (MOD13) materia prima de la presente investigación.

1.7.1 Índices de vegetación IVs-MODIS disponibles

Los productos del sensor MODIS disponen de dos formas empíricas de IVs. La primera es el Índice de Vegetación Normalizada (NDVI) cuya particularidad es la alta sensibilidad a la clorofila y la principal limitante es la saturación de los registros para zonas boscosas. La segunda es el índice de Vegetación Mejorada (EVI), el cual ha sido desarrollado para obtener mejores registros espectrales. Éste se enfoca en las variaciones estructurales de la vegetación, fisonomía y área foliar, esto hace posible la recolección acertada de la respuesta espectral del dosel. (Huete *et al.*, 2002).

Para el sensor MODIS la resolución espacial en la banda del azul (459-479 μm) es de 500 m, mientras que las bandas empleadas en la composición del NDVI (Ecuación 1) presentan una resolución de 250 m. Por esta razón, aunque el EVI (Ecuación 2) presenta una mejora significativa, la resolución espacial de las bandas que usa es insuficiente para esta investigación, por lo tanto se adopta el NDVI-MODIS con una resolución de 250 m para la detección de cambios en la cobertura vegetal. Cabe mencionar que el NDVI es altamente sensible a la clorofila es decir, para una cubierta vegetal densa, éste tiende a saturarse perdiendo sensibilidad en los registros espectrales, como es el caso de masas boscosas con un dosel denso y continuo. No obstante, por la estabilidad de sus registros, es una medida acertada para representar el

comportamiento de la cobertura vegetal, lo que permite el análisis de cambios estacionales e interanuales en la actividad y crecimiento de la vegetación (Huete *et al.*, 2002; Xiang *et al.*, 2003). Además para zonas con carencia o poca vegetación, el NDVI tiene la capacidad de relacionar estas variaciones espectrales con valores ligeramente por encima de cero (Huete *et al.*, 1999).

1.7.2 Formato de archivo del índice de vegetación NDVI-MODIS.

En el ámbito científico se emplean numerosos formatos digitales para la captura, procesamiento y análisis de información científica. Para el NDVI-MODIS corresponde el “*Hierarchical Data Format-Earth Observing System* (HDF-EOS). Esta forma de almacenamiento soporta múltiples formatos y estructuras de datos científicos. Para el caso de los IVs existen dos estructuras separadas:

1. El conjunto de datos científicos (SDS). Corresponde a la información almacenada en formato matricial (2-D y 3-D).
2. Metadatos.
 - Estructurales. Describen el contenido del archivo.
 - Centrales. Describen la proyección.
 - De almacenamiento. Describen La fecha y estadísticas sobre la calidad de los datos.

En síntesis, los primeros corresponden a las 12 capas, entre las que se encuentran el MOD13 y MYD13, requeridas en esta investigación. El MOD13 Y El MYD13 corresponde a los de NDVI y a los valores de calidad asociados. Para los metadatos existen dos tipos de atributos. Los primeros son genéricos a todos los productos del sensor MODIS, los segundos son caracteres específicos que aportan particularidades acerca de los archivos (SDS) (Solano *et al.*, 2010). La estructura de estos datos se puede entender mejor en la Figura 12, en la cual se presentan los caracteres referidos.

Existen diversas formas de acceder a los datos contenidos en un archivo HDF-EOS. A través de aplicaciones que soporten este formato o a nivel binario conociendo la estructura del archivo. Para esta investigación se usan ambas opciones, para el primer caso se emplean programas como ARCGIS y ENVI, y en el segundo caso el *software* IDL y LDOPE. Para ambas situaciones los programas incluyen módulos de importación/exportación, lo que permite la extracción y empaquetamiento de los datos en formato HDF-EOS.

1.7.3 Calidad de datos

La incertidumbre en los datos del sensor MODIS puede ser de tipo físico o teórica. Los primeros se derivan de registros que representan la realidad del terreno debido al efecto de diversas condiciones atmosféricas y terrestres (dispersión y reflexión) además de las estimaciones en función de la escala. La incertidumbre teórica puede ser introducida por numerosas causas que incluyen: errores del instrumento, transmisión incompleta, geolocalización, cálculo de algoritmos, además de errores introducidos en los procesos de producción, archivo y distribución (Roy *et al.*, 2002). En síntesis, la incertidumbre de tipo físico o teórica que presentan los datos del sensor NDVI-MODIS, implica que la generación de datos homogéneos para el periodo de procesamiento del algoritmo, 16 días, es un gran reto. Por esta razón, para cada píxel se debe seleccionar el dato de una serie de tiempo que cumpla con los requisitos que se definan para la investigación (Anaya, 2009).

1.7.3.1 Valoración de calidad (*Quality Assessment, QA*) para el producto NDVI-MODIS

Los productos MOD13Q1 y MYD13Q1 contienen capas adicionales, entre estas, el índice de valoración de calidad (*Quality Assessment, QA*) cuyo objetivo es estimar y documentar la calidad científica de los datos con respecto a la calidad esperada. Este índice almacena información de las condiciones bajo las cuales se toma el registro: tipo de píxel, tierra o agua; la confiabilidad del parámetro representado, además de la presencia de nubes, aerosoles, vapor de agua y ozono. Esta variabilidad temporal es usualmente causada por la influencia de fenómenos climáticos (Roy *et al.*, 2002). Otras variaciones en la calidad de los datos pueden ser atribuidas a cambios en el ángulo de captura (“*nadir-offnadir*”), ángulo solar y al sensor. Para un correcto análisis de largo plazo, en virtud de las dinámicas de la superficie terrestre y las características del sensor, es necesario discriminar las variaciones de los registros descartando los que no corresponden con los objetivos del análisis (Roy *et al.*, 2002; Solano *et al.*, 2010). Los registros están codificados en valores binarios de 16 bits. Cada conjunto de bits aporta información sobre calidad específica de los píxeles que conforman los “*Scientific Data Sets*” (SDS) o la escena.

Con lo anterior se obtiene una serie tiempo de NDVI con los registros útiles para el contexto de trabajo. De acuerdo con los ajustes de calidad pueden variar temporal y espacialmente debido a los parámetros de calidad definidos. Por lo que, al momento de definir el criterio de calidad se debe considerar los parámetros mínimos que deben cumplir los datos, ya que existe

un equilibrio crítico entre la calidad de los datos y la cantidad suficiente para la adecuada caracterización de la serie (Colditz *et al.*, 2006, 2008).

1.7.4 Procesamiento de los índices de vegetación IV (NDVI-MODIS)

Los registros del sensor MODIS están en constante evolución en la medida que se corrigen o afinan algoritmos de procesamiento y elaboración. En el tiempo, esta evolución permite disponer de colecciones mejoradas, esto incluye los registros de versiones anteriores los cuales son actualizados. Por tal razón, escenas que pertenecen a una colección reciente brindan un mejor desempeño. En la actualidad la mayoría de productos pertenecen a la versión 5, incluidos el IV (NDVI-MODIS). En comparación con las colecciones anteriores la versión cinco mejora la corrección de zonas de costa, la composición o máscara de nubes y sombras; incluyendo una valoración de calidad para los píxeles adyacentes. Así mismo se optimizan las capas sobre la calidad de datos, la corrección atmosférica y se incrementa la armonía entre los productos de diferentes niveles de resolución espacial. En muchos casos, se eliminan capas de información poco útil o se incorporaron nuevas (Mas, 2011; Solano *et al.*, 2010). Para esta investigación se emplean las capas de NDVI compuestas para un periodo de 16 días a partir de cálculos diarios de reflectancia. Mayores detalles de los cambios introducidos son dados en (Didan and Huete, 2006).

El procesamiento de los IVs contenidos en el producto MOD13Q1 y MYD13Q1, específicamente la composición del NDVI, opera un algoritmo de análisis a escala de píxel que corresponde a un máximo de 64 registros a lo largo de un ciclo de 16 días, sin embargo, debido a la cobertura del sensor y la presencia de nubes, este número oscila entre 0 a 64 con menores observaciones cerca a latitudes ecuatoriales. Para la composición se emplea la metodología representada en la Figura 4. El objetivo de esta es seleccionar a partir de un criterio píxel por píxel, los registros de mejor calidad. Escenas sin nubes con un mínimo de aerosoles atmosféricos y capturas en “nadir” (Huete *et al.*, 2002).

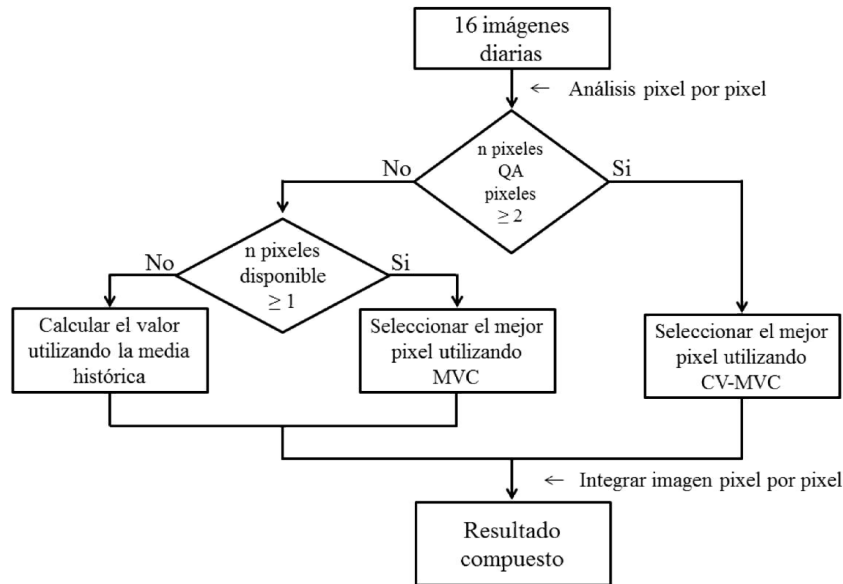


Figura 4. Flujo de datos del algoritmo MODIS VI (Solano *et al.*, 2010)

CV-MVC: Ángulo de máximo valor compuesto (se comparan los valores más altos de NDVI y se selecciona la observación con el ángulo más cerrado “*nadir*”)

MVC: Máximo valor compuesto (Cuando ningún registro cumple, se toma el mayor valor de NDVI)

La técnica empleada depende del número y calidad de las observaciones. Como se muestra en la FIGURA 4 Si hay más de dos valores aceptables, entonces el módulo del CV-MVC es empleado. Si sólo hay una observación se emplea el método MVC.

1.7.4.1 Máscara de calidad de datos

La calidad de los registros se documenta a nivel de pixel lo que hace posible filtrar datos que no corresponden con el análisis, de esta manera se define los criterios de procesamiento. Lo anterior favorece la discriminación entre productos requeridos y la contaminación de estos. Este proceso es realizado por el programa “*MOD land*” para el procesamiento de la información terrestre del sensor MODIS, responsable del control de calidad y validación de los productos (Fang *et al.*, 2013; Roy *et al.*, 2002). Los valores de QA para las escenas MOD13 se muestran en la Tabla 1.

La sustracción de los niveles de QA que define el usuario, son aplicados a todos los píxeles que componen una imagen y en el caso de análisis temporales, a la longitud de la serie. Los datos de QA deben ser extraídos con la herramienta “*Land Data Operational Product Evaluation*” (LDOPE)

con los comandos para el conjunto de datos científicos (*Science Data Sets*, SDS), que consta de 35 parámetros de ejecución a través de comandos de líneas “*scripts*” (Barona *et al.*, 2006). En el aparte 3.5.1 se reseña el desarrollo de esta herramienta.

Bits	Parámetro	Valor	Descripción
0 – 1	Índice de Calidad (MODLAND QA Bits)	00	VI producido con buena calidad
		01	VI producido, pero comprobar con otros QA
		10	Pixel producido, pero probablemente nube
		11	Pixel no producido por otras razones
2 – 5	Índice de Utilidad	0000	Más alta calidad
		0001	Menos calidad
		0010	Disminución de calidad
		0100	Disminución de calidad
		1000	Disminución de calidad
		1001	Disminución de calidad
		1010	Disminución de calidad
		1100	Menos calidad
		1101	Calidad tan baja que no es útil
		1110	L1B datos erróneos
1111	No es útil cualquier otra razón / no procesada		
6 – 7	Cantidad de aerosoles	00	Climático
		01	Bajo
		10	Intermedio
		11	Alto
8	Nube Adyacente	0	No
		1	Si
9	Atmosfera BRDF Corrección	0	No
		1	Si
10	Mezcla de nubosidad	0	No
		1	Si
11 – 13	Mascara Tierra / Agua	000	Océano poco profundo
		001	Tierra
		010	Costas y lagos
		011	Aguas continentales poco profundas
		100	Aguas efímeras
		101	Aguas continentales profundas
		110	Aguas oceánicas continentales
		111	Océano profundo
14	Nieve o hielo	0	No
		1	Si
15	Sombra	0	No
		1	Si

Tabla 1. Descripción de la Valoración de Calidad de Datos Científicos (QA SDS).

1.8 Series de tiempo a partir de imágenes remotas.

El análisis de series tiempo a partir de imágenes satelitales es cada vez más popular ya que facilita la observación de los procesos terrestres y su variabilidad. Estos elementos son relevantes para una adecuada vigilancia de los cambios ambientales, la elaboración de modelos de carbono, la modelación de la biodiversidad y la estimación de biomasa. En contraste con el análisis de imágenes mono o bitemporal, las series temporales permiten observaciones con una frecuencia alta y continua. (Colditz *et al.*, 2008). Los autores van Leeuwen *et al* (2006) definen las series de tiempo como un instrumento robusto para conocer de los acontecimientos pasados y supervisar las condiciones actuales, específicamente las series de NDVI como un elemento para la observación de alteraciones sobre los recursos ecológicos.

1.9 Escala y resolución espacial

La escala se refiere a la dimensión espacial en la que se observan y caracterizan procesos, patrones y entidades presentes en la superficie de la tierra. Conceptualmente es la relación matemática que existe entre un mapa y la unidad de análisis, por lo tanto, variaciones en la escala obligan a la consideración de elementos básicos como: el papel de la escala en el modelado de la información, la identificación de patrones y procesos, la caracterización de dominios (invariancia) y umbrales de cambio, además del análisis en múltiples escalas (Marceau y Hay, 1999; Marceau, 1999). En el contexto de la teledetección, la escala corresponde a la resolución espacial para la cual, en una imagen, se representa la unidad mínima de información a partir de registros de radiancia captados por sensores remotos (reflejada y/o emitida) que luego será procesada y representada en Niveles Digitales (ND), Valores que se asignan a los diferentes pixeles que conforman la escena (Schowengerdt, 2006).

Con mayor detalle, la escala para los sensores remotos está en función del campo de visión instantáneo del terreno (IFOV) el cual representa en un momento dado, el área registrada por el sensor. Este recoge dos aspectos, la extensión y el pixel. La primera hace referencia a la continuidad de las entidades detectadas (el área cubierta por una imagen).

El pixel representa la menor unidad de una imagen satelital y se consideran dos tipos, puros o mezclados. Los pixeles puros son los elementos cuya respuesta espectral corresponde a un elemento cuyo tamaño es igual o superior al IFOV. Los pixeles mezclados corresponden a los

objetos cuya dimensión es inferior a la resolución espacial del sensor y su producción integra la reflectancia promedio de todos los objetos captados (Schowengerdt, 2006).

1.9.1 Implicaciones de la escala del producto MODIS-NDVI en la identificación de movimientos en masa.

Algunas investigaciones sugieren que la escala determina los patrones y procesos que pueden ser detectados. De igual manera los alcances definidos en las investigaciones condicionan el nivel de resolución espacial demandado (Marceau and Hay, 1999). Según (Woodcock and Strahler, 1987) la resolución espacial más acertada depende de tres factores principales: la información que se desea obtener de la escena, los métodos empleados para la sustracción de los datos y la estructura espacial que presenta la imagen. En el caso específico de movimientos en masa, Metternicht *et al* (2005) mencionan que el desplazamiento de una ladera se puede detectar si la combinación de tamaño y contraste son suficientes, aunque también agrega que, numerosas investigaciones han llegado a la conclusión que para imágenes satelitales con baja resolución espacial, es reducido el aporte de información cuantitativa y cualitativa, por lo que, las posibilidades de definir las causas y el tipo de evento son limitadas. Alcances que no son pretendidos, por el contrario, en ésta investigación se plantea qué con la escala disponible no es posible identificar y caracterizar los eventos a nivel morfológico ni mucho menos morfométrico.

Así pues, este trabajo propone el uso de datos del sensor MODIS para la detección de superficies alteradas por deslizamientos a escala regional, como punto de partida para análisis de mayor detalle. Lo anterior parte del principio que en el tiempo las coberturas abarcadas por el IFOV del sensor presentan condiciones casi constantes de reflexión, bien sea para un pixel puro o mezclado. Entonces, si se presentase la remoción de la cobertura inicial dando paso a una superficie de mayor reflexión, suelo desnudo, este cambio se vería reflejado en la serie de tiempo como una disminución en los valores de NDVI, por el hecho de que cambios los en la cubierta relacionada, influyen en los niveles digitales de los productos usados en el cálculo del NDVI.

2. Antecedentes

2.1 Uso de Sensores remotos para la identificación de movimientos en masa.

En la actualidad se emplean sistemas de información geográfica y de teledetección para la localización y mapeo de movimientos en masa, estudios que han empleado estos sistemas correlacionan la geología, la topografía y la vegetación con la ocurrencia de movimientos en masa detonados por sismos o precipitaciones extremas (Rau *et al.* 2007; Peduzzi 2010; Rickli & Graf 2009; Guzzetti *et al.* 2012), además de las relaciones inductoras con cambios en la cobertura vegetal (Mugagga *et al.* 2012; Beguería, 2006). Estos métodos presentan ventajas sobre otros procedimientos en términos de costo, efectividad y disponibilidad de información, por lo que presentan gran potencial para el análisis y procesamiento de superficies a escala regional (Bathurst *et al.* 2010; Mugagga *et al.* 2012).

El uso de series temporales de imágenes satelitales es útil para la detección de deslizamientos, pues permiten en el tiempo identificar cambios en la respuesta espectral de la superficie terrestre que puedan estar asociados con la remoción de la cobertura preexistente. Ahora bien, este proceso puede ser más exitoso en el intertrópico y en zonas con coberturas vegetales densas, ya que la respuesta espectral de la vegetación favorece el contraste de la superficie removida con el terreno adyacente (Cheng *et al.*, 2004; Marcelino *et al.*, 2009b; Mondini *et al.*, 2011). Sin embargo, como limitante, la nubosidad que persiste sobre las zonas afectadas, obstaculiza el análisis (Westen *et al.*, 2008). Esta condición se puede reducir con el uso de productos de alta resolución temporal, ya que tienen una mayor probabilidad de coincidir con un momento de baja nubosidad.

Con el objetivo de mostrar una revisión del estado actual de la técnica, la cual no pretende ser exhaustiva ni completa, se mencionan a continuación algunos métodos reportados por la literatura para la identificación de movimientos en masa basados en sistemas de teledetección.

2.1.1 Simulación de la susceptibilidad del terreno a movimientos en masa usando Modelos Digitales del Terreno (MDT).

Los MDT son empleados para representar características o patrones morfométricos del relieve que pueden inducir movimientos en masa como es el caso de la pendiente, la dirección de la ladera y la curvatura (Miliareisis *et al.*, 2005)..

La combinación de inventarios de movimientos en masa con variables derivadas a partir de MDT, se emplean para simular la susceptibilidad del relieve a procesos de remoción en masa a partir de modelos heurísticos o estocásticos, así mismo la identificación de estos procesos con base en correlaciones morfométricas (Metternicht *et al.*, 2005; Walsh *et al.*, 1998). No obstante, existen restricciones debido a los cambios morfométricos para una misma unidad de relieve con MDT de diferentes niveles de resolución espacial (Iwahashi *et al.*, 2012).

Finalmente Iwahashi *et al.* (2012) mencionan que la precisión del modelo para la identificación de deslizamientos depende de la elección de la escala óptima, la cual está en función del tamaño del deslizamiento. Para el caso de deslizamientos superficiales en cinco regiones del Japón, los autores encontraron que los tamaños de ventana representativos son de aproximadamente 30 m; por lo que concluye que, el tamaño de la ventana óptima puede estar relacionada con el tamaño medio de los deslizamientos en cada región.

2.1.2 Detección de movimientos en masa usando fotografías aéreas.

Históricamente las fotografías aéreas son analizadas mediante técnicas de fotointerpretación. Para esto es necesario un analista adiestrado con la capacidad de localizar e identificar las características de interés. El análisis se realiza mediante la interpretación de la imagen con lupa o un estereoscopio (para dos fotografías superpuestas) (Schowengerdt, 2006). El uso de imágenes estereoscópicas en estudios de estabilidad de laderas es relevante, ya que suministra información relacionada con las superficies remanentes propias de los movimientos de masas, tales como escarpes, cubierta vegetal afectada, patrones de humedad del suelo y/o drenajes. Estas se utilizan en conjunción con las características morfológicas observadas (Mantovani *et al.*, 1996).

Para algunas investigaciones cuyo objeto principal es la identificación de movimientos en masa a partir de imágenes satelitales, los autores presentan el análisis de fotografías aéreas como instrumento para la validación de los resultados.

Para la región de estudio la empresa INTEINSA, con motivo de la construcción del túnel de conducción para la Central Hidroeléctrica El Popal y como parte del análisis del efecto de voladuras en la estabilidad de laderas en la vereda, El Popal del municipio de Cocorná, empleó fotografías aéreas para la identificación y caracterización de movimientos en masa en un intervalo de 25 años (Inteinsa, 2013). Para los eventos identificados se obtienen detalles morfométricos y morfológicos, los cuales combinados con la temporalidad de la información, les permitió hacer algunas aproximaciones acerca de la morfodinámica de estos procesos.

2.1.3 Detección de movimientos en masa usando imágenes satelitales e índices de vegetación (IVs)

En numerosas investigaciones la identificación de deslizamientos está basada en el uso de imágenes satelitales, específicamente en el cálculo de Índices de Vegetación (IVs). Para este proceso se emplean las características espectrales de la cobertura vegetal y cambios asociados con daños o pérdidas. Entre los autores que correlacionan esta variación espectral con movimientos en masa se encuentran: (Domenikiotis *et al.*, 2003; Lin *et al.* 2006; Westen *et al.*, 2008; Martha *et al.*, 2010; Mondini *et al.* 2011; Peduzzi, 2010; Wang *et al.*, 2010 y Zhang *et al.* 2010). Estos concluyen que es una herramienta práctica para monitorear las dinámicas del paisaje asociada con procesos de remoción en masa. En algunos casos correlacionan variables regionales como explicación de estos eventos (Chu *et al.* 2009; Lin *et al.* 2004).

2.1.4 Potencialidades del sensor MODIS

Varios productos del sensor MODIS se han empleado en la detección de cambios en la cobertura vegetal a escala regional por Lunetta *et al.* (2006). En el caso específico de movimientos en masa por Yang *et al.* (2013) y Zhang *et al.* (2010). Para ambos casos los autores concluyen que los resultados alcanzados son satisfactorios.

Zhang *et al.* (2010) realizan un análisis de imágenes pre y post evento del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (*Normalized Difference Vegetation Index*, NDVI) del sensor MODIS, con una resolución espacial y temporal de 250 m y 16 días respectivamente. Para la identificación de

deslizamientos detonados por el sismo de Wenchuan ocurrido el 12 de mayo en la franja oriental de China. Aunque la resolución espacial puede limitar el detalle del análisis, el método es eficiente en términos de tiempo y dinero, concluyendo que es útil para identificar zonas de remoción a escala regional, en especial cuando otras observaciones no estén disponibles.

Por otro lado, Yang *et al* (2013), para el mismo evento emplean series de tiempo de NDVI del sensor MODIS del año 2008 con una resolución espacial y temporal de 250 m y 8 días respectivamente. De este análisis concluyen que, a escala regional el método es fácil y rápido de implementar con una precisión aceptable, lo que hace posible evaluar con rapidez la distribución de deslizamientos tras sismos u otras perturbaciones. Además se refieren al análisis de series de tiempo como una herramienta para establecer la dinámica y evolución de los movimientos en masa inducidos por diversos factores, lo que consideran de importancia para la comprensión de los mecanismos involucrados en la ocurrencia de movimientos en masa en regiones montañosas.

En síntesis, por lo referido en los artículos anteriores, el uso de series de tiempo del sensor MODIS es una herramienta con potencial para la identificación de movimientos en masa a escala regional. Este es un método de gran ventaja comparativa, si se tiene en cuenta que las investigaciones dependen de la información disponible, donde la creación de nuevos datos consume tiempo y dinero. Por otro lado, Yang *et al.* (2013) y Zhang *et al.* (2010), plantean como dificultad, la resolución espacial de las imágenes del NDVI, sin embargo por los alcances del método, la consideran información de gran utilidad en la caracterización primaria de superficies afectadas. De este modo los productos del sensor MODIS constituyen un insumo con la capacidad de orientar el empleo de métodos más robustos.

Por otro lado Lunetta *et al* (2006) plantean una metodología cuyo propósito es explorar composiciones de NDVI del sensor (MODIS-TERRA) con una resolución espacial y temporal de 250 m y 16 días respectivamente. La intención de los autores es desarrollar con el uso de un flujo casi continuo de escenas de alta calidad del sensor MODIS, para una escala anual y a una escala regional, un sistema de alerta automático de cambios en la cubierta vegetal. Para este estudio concluyen que, la disponibilidad de datos sin costo MODIS-NDVI y las técnicas de tratamiento automatizado proporcionan series de tiempo continuas y de alta calidad, lo que podría representar un gran avance para la vigilancia de la cubierta vegetal a escala anual. Los investigadores coinciden con los estudios anteriores de Yang *et al.* (2013) y Zhang *et al.* (2010)

en que la resolución espacial (250 m) es la principal limitante del enfoque. En particular, se refieren a eventos que modifiquen una superficie inferior a 1,5 hectáreas, los cuales tienen una baja probabilidad de ser detectados.

2.2 Inventarios de movimientos en masa en la gestión del riesgo

Parte del trabajo de susceptibilidad y riesgo se basa en la suposición que "*el pasado es la clave para el futuro*", donde registros históricos de movimientos en masa y sus relaciones causales pueden ser utilizados para pronosticar eventos futuros. Sin embargo, también se podría seguir la analogía "*los resultados obtenidos en el pasado no son garantía para el futuro*" (Westen *et al.*, 2008) por lo que, condiciones que dominaron en el pasado pudieron cambiar debido a variaciones climáticas, construcciones, uso del suelo e incluso por los mismos deslizamientos (Galli *et al.*, 2008; Hervás y Bobrowsky, 2009). Lo anterior exige a los investigadores precaución con estos supuestos y limitaciones. Una opción es considerar el menor error en función del mayor número de datos disponibles (Fell *et al.*, 2008; Guzzetti *et al.* 2012).

2.2.1 Inventarios de movimientos en masa

Mapas de deslizamientos de tierra pueden representar la ocurrencia de deslizamientos pasados y actuales, principalmente en forma de inventarios. Así mismo para fenómenos geológicos de movimientos en masa, es posible la zonificación espacial de probabilidades de ocurrencia en forma de mapas de susceptibilidad, la zonificación de la probabilidad espacio-temporal en mapas de amenaza y los daños esperados o pérdidas por deslizamientos de tierra como mapas de riesgo (Galli *et al.*, 2008).

DesInventar

Es una base de datos que reporta efectos de desastres, desarrollada en 1994 por la Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina (LA RED). La compone un software que permite sistematizar, organizar y consultar la información en internet (<http://www.desinventar.org>). Estos datos son útiles para análisis que involucren efectos en términos de número de eventos, heridos, pérdidas económicas y daños en infraestructura. Para Colombia la base de datos ha sido administrada por el OSSO (Observatorio Sismológico del Suroccidente) como parte del proyecto DesInventar.

La base de datos contiene información suministrada por periódicos nacionales y regionales; la cual hasta 1994 fue la principal fuente. A partir de esta fecha la información es suministrada por la Dirección de Prevención y Atención de Desastres (DPAD) adscrita al Ministerio del Interior. Marulanda *et al.* (2010) resaltan que la información más completa se encuentra disponible para las poblaciones de más de 100.000 habitantes.

2.2.2 Identificación de movimientos en masa en el territorio Colombiano

Algunos mapas de inventarios de movimientos en masa han sido generados a partir de registros levantados en campo y usando imágenes de sensores remotos (Chorowicz *et al.*, 1998; Nossin, 2000). Sin embargo, son costosos y la información es registrada para un único momento. También son empleadas bases de datos alimentadas por reportes de terceros; entidades gubernamentales, reportes de prensa, ONG, entre otros. Estas bases de datos presentan limitaciones (localización, detalles técnicos del evento y confiabilidad del registro) a causa de los pocos controles que se realiza a la información, además, los datos se restringen a lugares con un compromiso de reporte.

2.2.2.1 Identificación de deslizamientos y registros en bases de datos

Para el caso de Colombia, existen registros recopilados en publicaciones locales como las realizadas por Hermelin (2005); Moreno y Vélez (2006); Aguilar *et al.*, (2008) y/o disponibles en bases de datos en internet (e.j DesInventar, SIMMA, EM-DAT). Así mismo inventarios de deslizamientos alimentados por diferentes entidades: MOPT-UNAL (1986-1989) e INGEOMINAS (1987-2001) los cuales conforman un catálogo de más de 1000 movimientos inventariados en los últimos 20 años.

Muchos de estos registros no presentan continuidad en el tiempo y en algunos casos se limitan a reportes realizados directamente en las bases de datos sin validación en campo, por lo que, la información puede carecer de localización y temporalidad. No obstante, son reportes con una escala temporal en algunos casos de casi un siglo, que permite una aproximación de los impactos generados por procesos de remoción en masa. Estos datos han sido empleados con éxito por Klimeš y Rios Escobar (2010) en la valoración de la susceptibilidad por movimientos en masa para la cuenca de La Iguaá, Medellín – Colombia.

Entre los estudios rastreados, se reporta el uso de técnicas de teledetección para la identificación de movimientos en masa por Nossin (1999) el cual emplea series de tiempo a partir de fotografías aéreas combinadas con imágenes satelitales, para la identificación de amenazas naturales para la ciudad de Villavicencio-Meta, donde concluye que los resultados de la metodología son satisfactorios. Chorowicz *et al.*, (1998) emplean imágenes de radar combinadas con un MDT para detectar movimientos en masa en el valle de Chicamocha-Santander. Los resultados fueron deficientes debido a la incompatibilidad en la resolución espacial de los productos combinados.

Como condicionantes para Colombia, algunos ajenos al fenómeno natural, los inventarios quedan supeditados a políticas locales, la exposición de la población y la diligencia de los medios de comunicación. Si estas condiciones no se combinan estos eventos podrían ser “*anónimos*” para la caracterización del relieve.

2.3 Validación de resultados

Las investigaciones consultadas sobre técnicas para la identificación y registro de movimientos en masa, recurren a diversos métodos para la validación de resultados, en algunos casos se confrontan contra bases de datos generadas a partir de reportes históricos, visitas de campo, inventarios, además de imágenes satelitales y fotografías aéreas (Lin *et al.*, 2006; Galli *et al.*, 2008; Rickli y Graf, 2009; Peduzzi, 2010; Yang y Chen, 2010; Zhang *et al.*, 2010). En algunos se disponen de imágenes satelitales de bajo costo, por ejemplo imágenes del programa *Landsat* e incluso *Google Earth* (van Westen *et al.* 2008; Yang y Liding Chen 2010). Para Colombia la información disponible de registros históricos es reducida, pero es posible obtener para algunas regiones registros en bases de datos como DesInventar (Klimeš y Rios Escobar, 2010) y estudios locales (Cornare y Gobernación de Antioquia, 2012).

3. Metodología

3.1 Diagrama de actividades

La metodología se representa mediante un flujo de actividades (Figura 5) cuya finalidad es detectar a través del tiempo, cambios en la cobertura terrestre con el empleo de imágenes del sensor MODIS. Para este caso, los datos ofrecen ventajas comparativas en términos de resolución temporal, resolución espectral y gratuidad. La información substraída corresponde al Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (*Normalized Difference Vegetation Index*, NDVI) y la capa de calidad (QA). De la escena se sustrae el área de estudio, para luego, pixel por pixel, construir una serie continua de datos cuya finalidad es precisar, por posibles alteraciones en la cobertura vegetal, comportamientos atípicos sostenidos en los valores de NDVI asociados con movimientos en masa.

Los siguientes pasos se llevaron a cabo para lograr los objetivos propuestos: 1. Definición del área de estudio 2. Adquisición de datos, 3. Procesamiento de datos, 4. Identificación de cambios en cobertura superficial, 5. Filtrado por pendiente, 6. Validación de resultados.

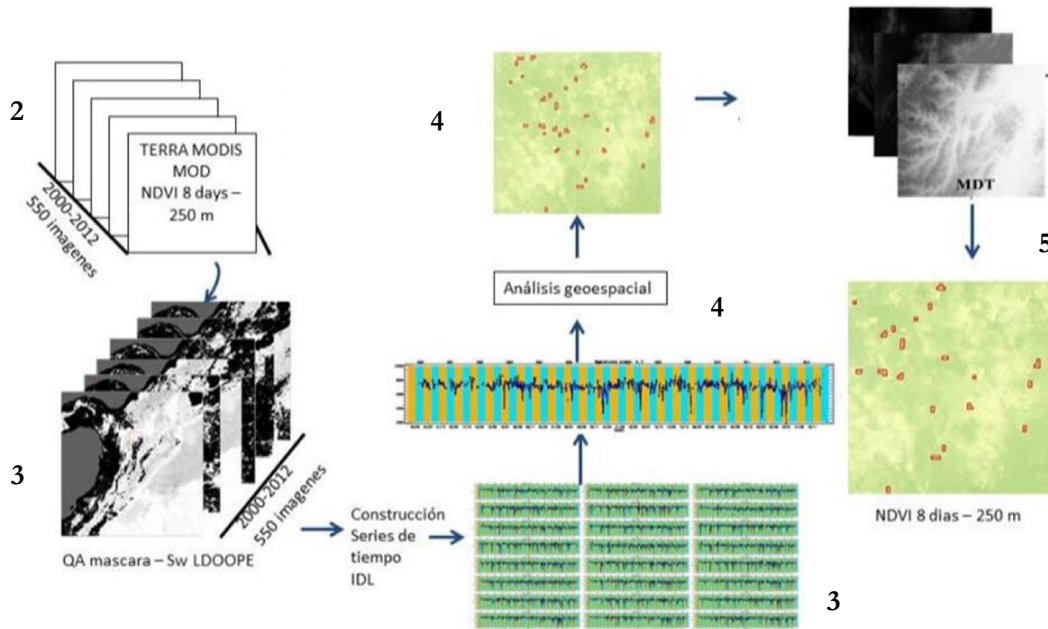


Figura 5 Flujo de actividades

3.2 Definición del área de estudio

El Oriente Antioqueño es una región geográfica estratégica con grandes potencialidades ambientales, económicas y ecosistémicas. en consecuencia, en los últimos años se proyecta como un importante polo de progreso del departamento de Antioquia (CORNARE, 2009).

La importancia económica y social contrasta con cuadros graves referentes a una gestión eficaz del riesgo por fenómenos geológicos (Gallego, 2012). La limitada investigación referente a la gestión del riesgo y la documentación de procesos morfodinámicos en la región descrita, motiva su uso en el presente trabajo como área piloto de análisis, además, como criterio adicional de selección, se consideró la disponibilidad de información la cual incluye imágenes remotas de alta resolución espacial, lo cual favorece el desarrollo de los objetivos planteados.

Esta región corresponde a la jurisdicción de la Corporación Autónoma Regional de los ríos Negro y Nare (CORNARE) y contiene los municipios localizados en el oriente del departamento de Antioquia, extremo Noroccidental de Colombia. Se encuentra entre las coordenadas geográficas 5° 24' 39.77'' N, 75° 34' 58.92'' W y 6° 35' 11.78'' N, 75° 13.58'' W (Figura 6). Presenta un amplio rango altitudinal con mínimos de 200 msnm en la planicies aluviales del río Magdalena y máximas de 3.340 m.s.n.m. en el cerro de Las Palomas en la región conocida como el páramo de Sonsón, Argelia, Nariño y Abejorral (CORNARE, 2009).

El sensor MODIS define ventanas para la ubicación espacial de cualquier unidad dentro de la superficie terrestre. El área de estudio corresponde a la ventana H10V08. Esta ventana contiene gran parte del territorio colombiano y la totalidad de la región de estudio, la cual es acotada en el sistema de proyección sinusoidal por las coordenadas superior izquierda, latitud 730412.4976 y longitud -8367890.9732; e inferior derecha, latitud 730412.4976 y longitud -8237005.1308. Este sistema es el empleado para el procesamiento de los datos.

3.2.1 Contexto nacional y regional

Contexto geográfico como inductor y/o detonante de movimientos en masa. La litología y el ambiente tectónico son factores geológicos que predisponen ciertos terrenos a la ocurrencia de movimientos de masas (Sidle y Ochiai, 2006).

Colombia está localizada en el extremo noroccidental de Suramérica. En esta región convergen las placas tectónicas de Nazca, Caribe y Suramérica y los bloques Andino y Chocó-Panamá. Los procesos de subducción de la placa oceánica Nazca bajo la placa continental Suramérica, configuran un cinturón montañoso que define los Andes colombianos. Esta cordillera se divide

en tres ramales que dan origen a la Cordillera Oriental, Central y Occidental, cada una de ellas separada por los valles interandinos del río Magdalena y Cauca (Restrepo *et al.*, 2009). Así mismo (García *et al.*, 2009) representan la cordillera de los Andes como una masa orográfica emergente, la cual tiene una fuerte incidencia en las condiciones climáticas de la región. Poveda (2004) la describe como una barrera orográfica con marcados gradientes altitudinales que inducen climas locales y regionales de gran complejidad, con patrones de precipitación unimodales y bimodales. Esta dinámica está condicionada por fenómenos locales a escala diaria como el ciclo diurno, hasta fenómenos macro climáticos de escala interanual como el ENSO (Poveda, 2004; Poveda *et al.*, 2006).

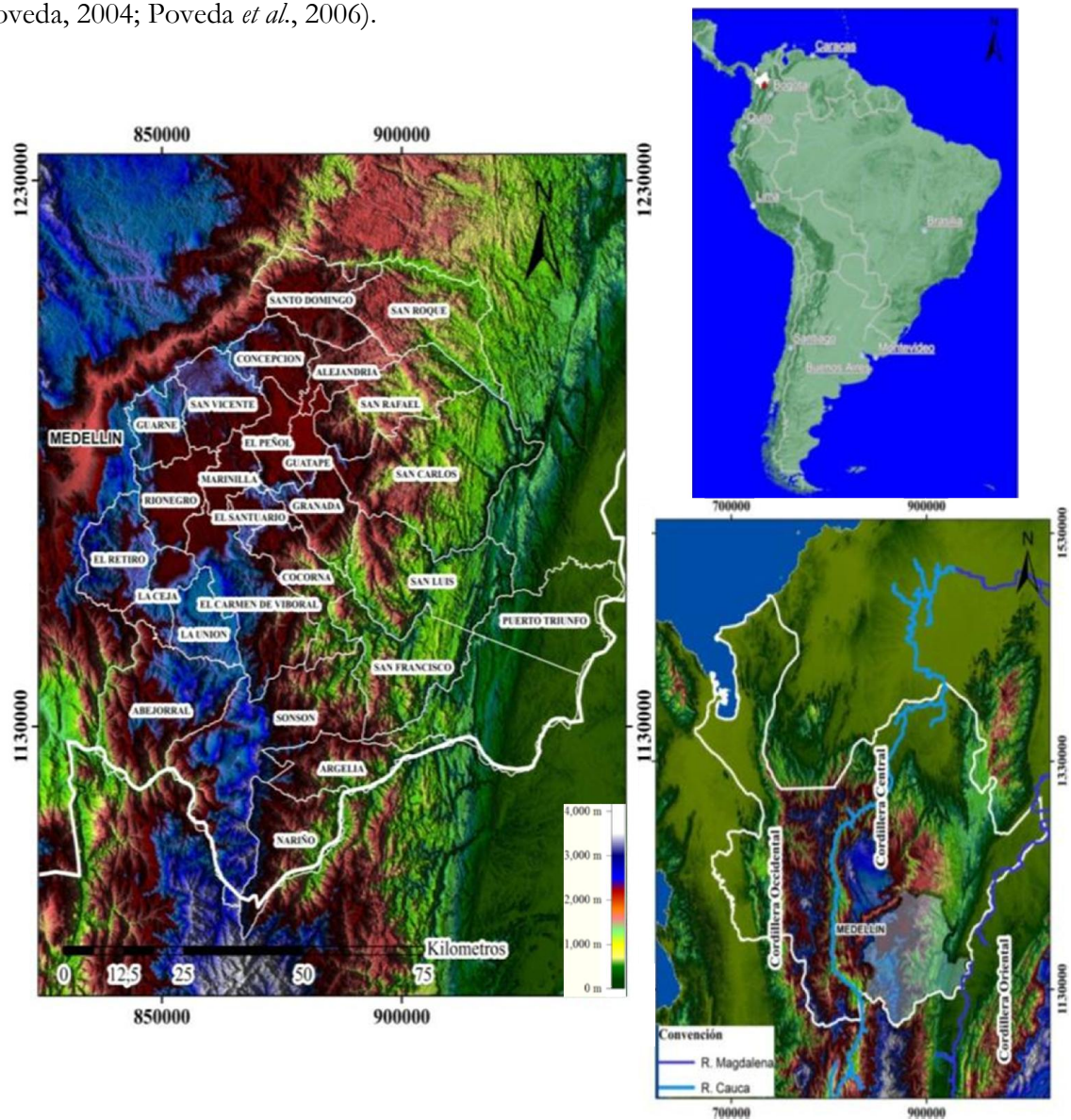


Figura 6 Área de estudio, localización general

En el contexto regional, la zona estudio contiene 26 unidades territoriales, que presentan condiciones climáticas, geológicas y bióticas que interactúan con las condiciones socioeconómicas y físicas, configurando un riesgo alto a deslizamientos (Cornare y Gobernación de Antioquia, 2012). Aunque el objetivo de esta investigación es la identificación de movimientos en masa con imágenes satelitales a escala regional, es relevante definir las particularidades climáticas, ecológicas y geológicas de la región de estudio como contexto de la susceptibilidad del paisaje a los movimientos en masa.

3.3 Geografía física de la zona de estudio

3.3.1 Hidrología

El ciclo anual de la precipitación está dominado por el movimiento de la ZCIT (Zona de Convergencia Intertropical). En esta zona el pulso de precipitación sigue un patrón bimodal con los mayores acumulados de precipitación entre los meses de abril y noviembre y con diferencias poco significativas entre estos meses. Este periodo de lluvias presenta una variación espacial entre los 950 mm/año en la zona occidental y los 4799 mm/año en la zona norte (CORNARE, 2009).

El 62 % de la jurisdicción de CORNARE se encuentra en la cuenca del río Nare. Comprende las cuencas de los ríos Samaná Norte, Nus y río Negro. El clima se define por accidentes hidrográficos y fenómenos convectivos por efecto de la penetración de masas de aire caliente provenientes del río Magdalena. Éstas transitan por los cañones modelados por los afluentes principales y confluyen con masas de aire frío de la altiplanicie (CORNARE, 2009). El calentamiento de la superficie produce un perfil atmosférico inestable, que provoca una fuerte convección y altas precipitaciones en el flanco este de la Cordillera Central.

3.3.2 Geomorfología

Esta región se caracteriza por la combinación de procesos morfoclimáticos y tectónicos con una dinámica diferencial tanto en escala espacial como temporal. Esta condición modela y define la estructura básica del relieve del centro de Antioquia en altiplanos, escarpes regionales y cañones (Arias, 1995), además de superficies aluviales asociadas al río Magdalena conformada por planicies y colinas, las cuales se modelan en antiguos depósitos del río (Hermelin, 2003). Para el presente análisis son de especial interés, los escarpes regionales y los cañones asociados al avance de los frentes de erosión, los cuales están expuestos a condiciones climáticas que

inducen procesos de disección (erosión fluvial), movimientos en masa y procesos erosivos (Arias, 1995). A continuación se describen los tres principales relieves propuestos.

3.3.2.1 Altiplanos

Son superficies planas y/o suavemente onduladas las cuales se forman después de que estas áreas emergen por encima del nivel del mar, luego por procesos tectónicos, se elevan ubicándolos en sus posiciones actuales. Éstos se caracterizan por tener un relieve colinado donde los procesos morfogénicos superficiales están dominados por dinámicas erosivas. A continuación se enumeran los principales altiplanos presentes en la región de estudio (Arias, 1995).

-El altiplano antiguo: altiplano Páramo de Belmira -Páramo de Sonsón.

-El altiplano intermedio: altiplano Santa Rosa de Osos -Rionegro.

-El altiplano inferior: El Peñol.

(Gallego, 2012) propone dentro de las tres etapas de ascenso tectónico de la Cordillera Central, formadores de los altiplanos propuestos por (Arias, 1995), esfuerzos intermedios que permiten sospechar que el ascenso de la Cordillera no fue a través de grandes impulsos de levantamiento, sino por ascensos de menor intensidad e impacto, lo que deja como resultado superficies de erosión intermedias de poca extensión y menor preservación.

En el Oriente cercano a Medellín Gallego (2012) propone que, el altiplano de Rionegro es diferente y no se correlaciona con el de San Rosa de Osos, además que entre el altiplano de Santa Elena y Rionegro, existe una superficie intermedia que denomina como la superficie de erosión de San Ignacio, el cual es un altiplano colinado segmentado en varios remanentes y con un bajo grado de preservación.

3.3.2.2 Escarpes erosivos regionales

Corresponden a franjas alargadas y estrechas de relieve abrupto que marcan el límite entre dos altiplanos sucesivos. La combinación de escarpes y altiplanos le dan al relieve de esta región un aspecto escalonado característico. Para Arias (1995) existen dos escarpes que delimitan los bordes interno y externo del altiplano intermedio. Los principales escarpes son el escarpe

Erosivo Regional San José de La Montaña–Guatapé y el escarpe Erosivo Regional San Pablo-Yarumal.

3.3.2.3 Cañones

En términos cronológicos son relieves jóvenes que avanzan desde los bordes del bloque levantado de la cordillera, consumiendo parte de la extensión original de los altiplanos. Esta condición genera límites nítidos y tajantes entre estas dos generaciones de geoformas, lo que conforma una línea denominada como "Frente activo de erosión". Éste se configura como una red de líneas en el relieve que marcan el avance de la erosión remontante de los ríos Cauca y Magdalena (Arias, 1995, 1996).

En los cañones y las vertientes empinadas la dinámica denudativa es mayor. Un suceso documentado por Hermelin y Hoyos (2010) coincide con esta posición, el 21 de septiembre de 1990 un evento de precipitación de aproximadamente 230 mm en la parte alta de la cuenca del río San Carlos, desencadenó más de 1000 deslizamientos en 10 km² lo que provocó la movilización de grandes cantidades de sedimentos. Además se cita un segundo reporte (Cornare y Gobernación de Antioquia, 2012) donde, en las fuertes precipitaciones de los años 2010-2011 asociadas al fenómeno climático de La Niña, se documentaron más de 1500 eventos entre movimientos en masa, inundaciones, daño de infraestructura y avenidas torrenciales.

3.3.3 Usos del suelo

De acuerdo con el mapa de aptitud de uso de suelo de la región, escala 1:100.000, aproximadamente el 60% del territorio presenta aptitud forestal y según el análisis de coberturas y usos del año 2007, solo el 40 % de la región se encuentra bajo esta cobertura (CORNARE, 2009).

Un buen porcentaje de las tierras incorporadas a actividades agropecuarias son de aptitud forestal y su inadecuado manejo ha generado la pérdida de nutrientes del suelo, erosión y sedimentación en muchas cuencas hidrográficas de la región. La evaluación del cambio de las coberturas boscosas en el periodo 2000-2007 mediante la interpretación de imágenes satélite; Landsat TM para el año 2000 y SPOT para el año 2005, documenta la pérdida de coberturas boscosas en 20.000 hectáreas por año, las cuales son convertidas principalmente en pasturas destinadas a la crianza de ganado. La dinámica socioeconómica de la región ha favorecido

procesos de desarrollo que involucran actividades agropecuarias en regiones planas y agricultura de subsistencia en zonas altas (CORNARE, 2009).

3.4 Adquisición de Datos

Esta puede ser categorizada en una sola fase. Obtener para la superficie de estudio la información disponible a partir del año 2003 hasta el 2013 que corresponde a 506 fechas. Aunque el sensor MODIS-TERRA dispone de datos desde febrero del 2000, solo fue posible disponer de registros anuales completos para el sensor MODIS-AQUA a partir del 2003, lo que permite para cada año disponer de 46 datos. El intervalo de tiempo entre cada imagen está definido por la disponibilidad de información del sensor MODIS para los productos MOD13Q1 y MYD13Q1, al menos una imagen cada 8 días a partir del año 2003 hasta el 2013. Los datos fueron descargados de la dirección <http://ladsweb.nascom.nasa.gov/data/search.html>. El sitio *web* ofrece un buscador que permite explorar y restringir la búsqueda de productos MODIS en función del área, la resolución temporal de los datos, el nivel de procesamiento, la fecha, además de criterios básicos de calidad. La descarga de los datos fue soportada en el software GNU WGET. Ésta es una herramienta gratuita que permite la descarga y almacenamiento de archivos desde el servidor *ladsweb*, gestionado a través de servidores proxy en formatos HTTP, HTTPS y FTP. Además de los datos del sensor MODIS, se emplean ortoimágenes para la validación de los resultados, cartografía temática para delimitar el área de interés y la ubicación cartográfica de movimientos en masa ocurridos en la región (

Tabla 2). Para la cartografía empleada en este trabajo, el sistema de proyección es el *MODIS Sinusoidal grid* (SIN) la intención es usar el sistema original de la capa NDVI-MODIS, evitando así, el remuestreo y en consecuencia la modificación de los niveles digitales, situación inevitable en los métodos la reproyección cartográfica.

Tabla 2 Información cartográfica empleada.

Dato	Dato	Resolución espacial/escala	Proyección
MOD13 Y MID13		250 m	MODIS Sinusoidal grid (SIN)
Ortofotomosaicos		1 m	Magna sirgas*
Cartografía temática		1:25.000	Magna sirgas*
Inventario de movimientos en masa		Punto GPS	Magna sirgas*

* Re proyectado al sistema MODIS Sinusoidal grid (SIN)

3.5 Procesamiento de los índices de vegetación NDVI-MODIS

Los datos corresponden a 506 archivos en formato HDF-EOS, de manera que la información requerida se encuentra empaquetada en capas. Para el caso, es necesario sustraer los SDS que están recogidos en los siguientes productos.

“250 m 8 days NDVI Quality” (A)
“250 m 8 days NDVI” (B)

La capa A fue sustraída mediante el software “*Land Data Operational Product Evaluation*” (LDOPE) para posteriormente ser procesada y almacenada en formato HDF. Con este programa y a partir del producto de valoración de calidad (QA), se construyó un algoritmo para la evaluación de los datos (anexo A). La finalidad del proceso anterior, es descartar los registros indeseables del proceso, entre éstos las nubes, las sombras de nubes y píxeles de mala calidad. Para algunos periodos los datos que se ajustan al criterio de selección son reducidos lo que, configuró una limitante para el análisis.

Para el producto B los datos son sustraídos mediante comandos del software ENVI-IDL. Además como parte del procesamiento, esta herramienta se usa para aplicar a los datos de NDVI, la máscara de calidad obtenida de la capa A. Este proceso consistió en la selección y extracción de datos y la construcción de series de tiempo a un detalle de pixel (filtrado y análisis). De esta manera se obtienen aquellos píxeles cuyos valores de NDVI coinciden con la máscara de calidad.

3.5.1 Valoración de calidad (Quality Assessment, QA)

Se basa en los criterios de calidad que se describen en Tabla 1 Para acceder al rango de bits que corresponde a una calidad aceptable o alta, se emplea el código MASK_sds del software (LDOPE). Como se observa en la Tabla 1, la combinación de bits 0-1 con un valor asociado de 00, son los datos cuya calidad no sufre ninguna afectación. Sin embargo, para este criterio el número de datos útiles es restringido, así que se optó por probar otros parámetros de control (Tabla 3). A los píxeles que no cumplen con el criterio se les asigna un valor arbitrario de -9999 teniendo en cuenta que el menor registro de NDVI-MODIS es de -3000 el cual corresponde a cuerpos de agua. La estructura del algoritmo puede ser consultada en el Anexo A. Luego, en un paso adicional, se definió en el software IDL las coordenadas geográficas y matriciales que acotan el área de estudio, siendo esta última la utilizada para la substracción de los datos.

Tabla 3 Parámetros empleados en la valoración de calidad para los datos de NDVI

Bits	Parámetro	Valor	Descripción
0-1	Índice de Calidad (MODLAND QA Bits)	00	VI producido, dato de Buena calidad
		01	VI producido, verificar otro parámetro
6-7	Cantidad de aerosoles	00	Climático
		01	Bajo
		10	Intermedio
10	Nube Adyacente	0	No
15	Posible sombra	0	No

3.5.2 Serie de tiempo a partir de índices de vegetación NDVI-MODIS

Los registros captados por el sensor MODIS varían en función del entorno y el instrumento. Para este análisis no fue posible obtener una serie continua sin influencia de estos factores, en tal sentido, la importancia de aplicar a las escenas de NDVI-MODIS una máscara de valoración de calidad.

En el software IDL se construye una rutina o algoritmo a partir de los registros de NDVI. Como paso inicial se combinaron los productos semanales del MODIS-Terra y MODIS-Aqua, luego, a cada pixel, se le aplica la máscara de valoración de calidad obtenida en el paso anterior. Los resultados de este procedimiento son composiciones temporales que contienen la información para cada pixel, bien sea un registro nulo para los pixeles que no se ajustaron a los niveles de calidad definidos o el respectivo valor de NDVI para los pixeles que se ajustan. En síntesis, para la nueva imagen las opciones de composición son las siguientes:

- Se produce un pixel nulo al no cumplir con los parámetros de calidad definidos (-9999).
- Se produce un pixel con los valores de NDVI (entre 0 - 10000).
- No hay ninguna información sobre el píxel (-9999).

Para identificar el comportamiento espectral de los datos y apoyar los criterios para la implementación y ajuste del protocolo de procesamiento de los registros MODIS-NDVI, se probó para las coberturas más frecuentes en la zona de estudio, un análisis cualitativo de los perfiles temporales, lo que permitió en el tiempo, verificar el comportamiento de las firmas espectrales producto de la dinámica fenológica de las coberturas. Se emplearon coberturas

identificadas en color verdadero con validación en campo entre los años 2010 y 2013 además de corroborar en cartografía temática para los años 2000 y 2007. La intención era tener certeza de que la firma en el tiempo corresponde a dicha cobertura (Figura 7).

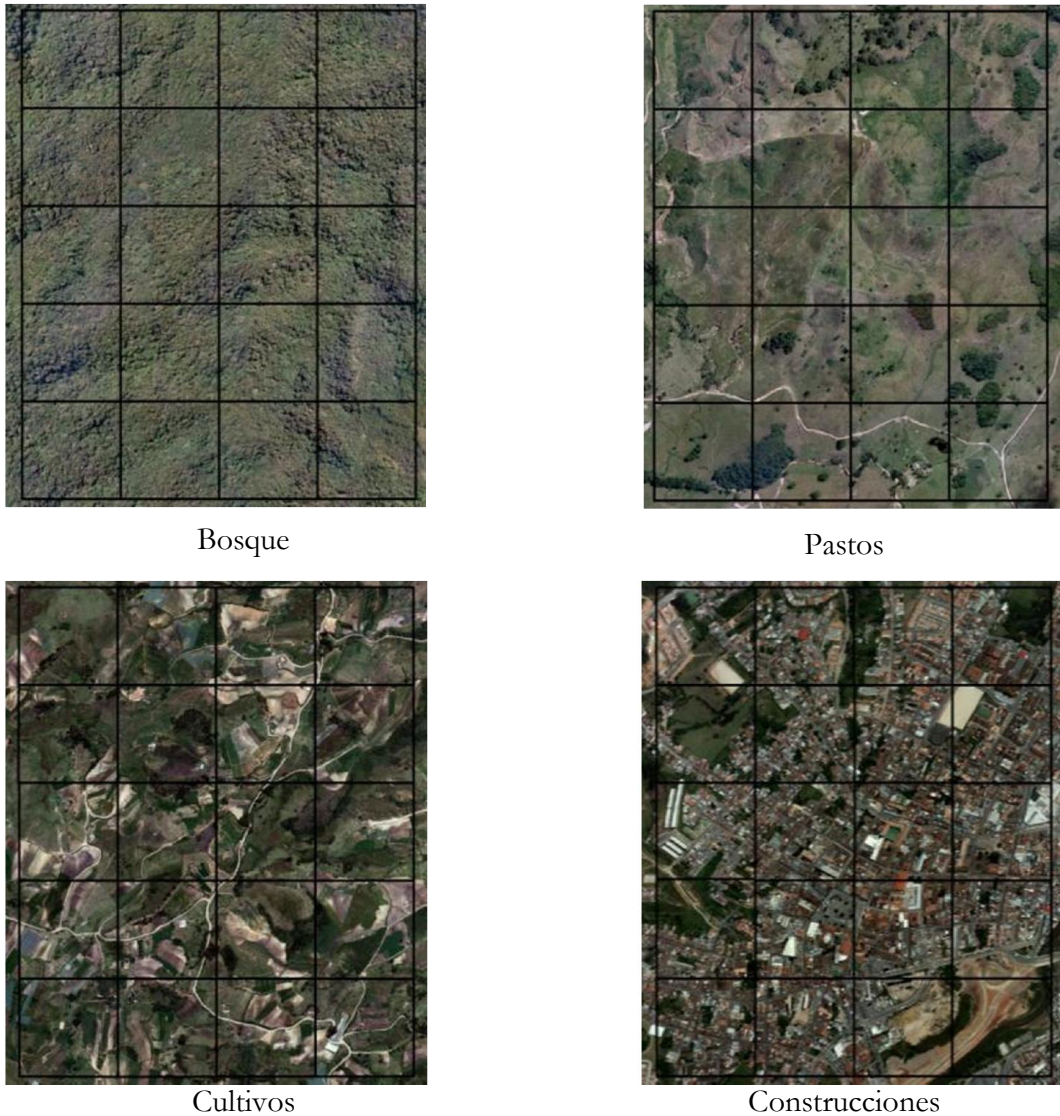


Figura 7 Coberturas de referencia

Luego de aplicar los filtros a las coberturas definidas, se reduce el ruido en los datos, sin embargo permanecen pixeles con un algún grado de contaminación. En estos casos se implementan procedimientos adicionales como el filtrado sobre las series de tiempo, cuyo objeto es reemplazar los pixeles en los que después de aplicar los parámetros de calidad persiste el error. Algunos autores plantean estimados de calidad como convoluciones o medias móviles basadas en el análisis de pixeles vecinos en el tiempo o espacio (Anaya *et al.*, 2009).

Este trabajo explora la media móvil de series temporales como una forma de preservar el contraste en los valores de NDVI por la remoción de cobertura y anular el patrón en “diente de sierra” el cual persistió aun después de aplicado los filtros de calidad. Este comportamiento en los datos de NDVI-MODIS es reportado por algunos autores los cuales mencionan que, después de aplicar los filtros de calidad persisten datos con algún grado de contaminación (Lunetta *et al.*, 2006; Xiao *et al.*, 2005), en especial cuando se trata de zonas lluviosas, debido a la presencia de nubes lo cual incrementa la presencia de datos nulos en una escena (Tzitziki Janik *et al.*, 2011). En el desarrollo de esta metodología se tiene que para la media móvil los datos útiles se reducen, lo que impide la caracterización en periodos de tiempo extensos (Figura 8).

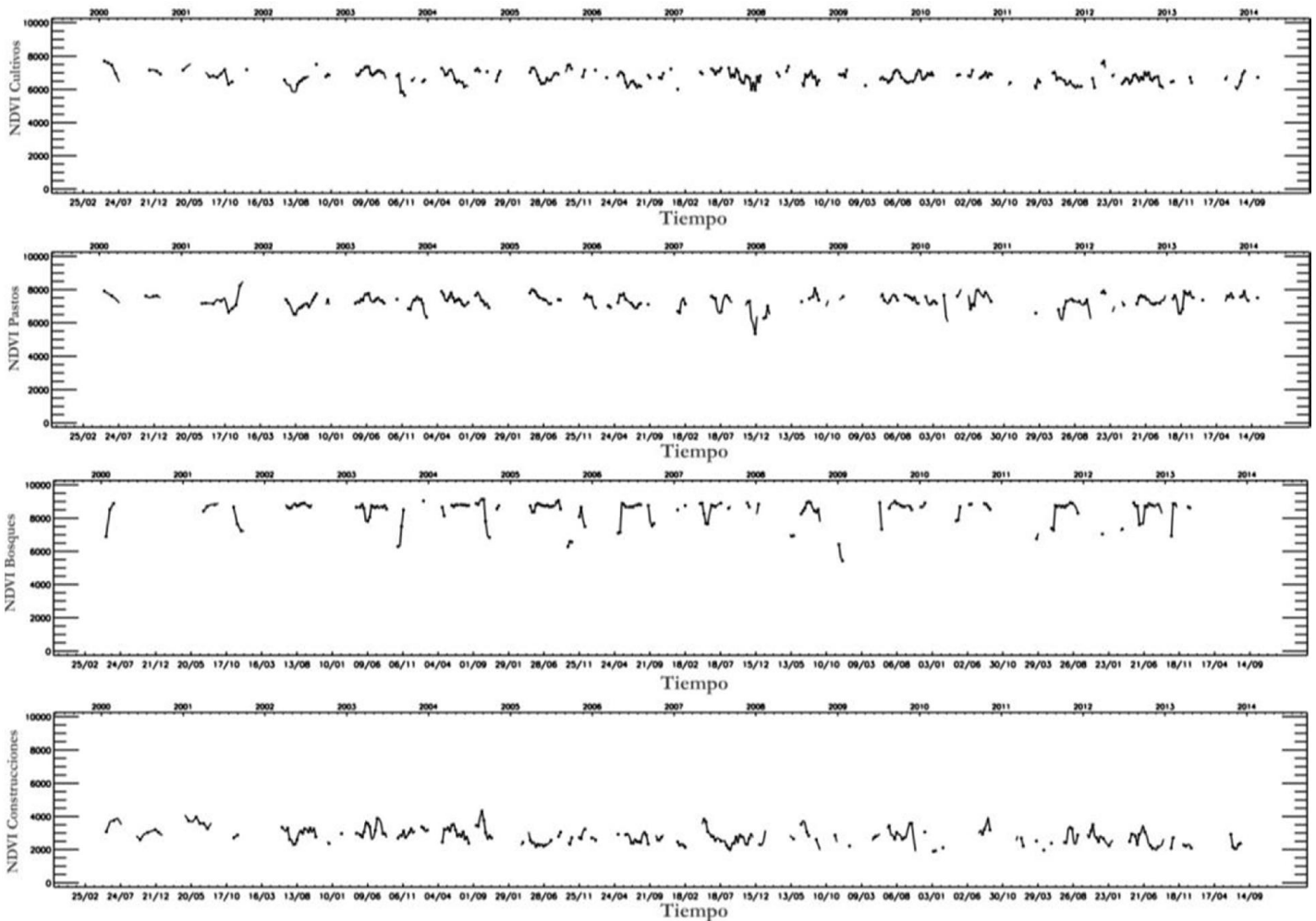


Figura 8 Aplicación de media móvil a series de tiempo para las coberturas de referencia.

Como alternativa se explora un criterio adicional, el cual consiste en que los valores mayores al valor umbral que se defina, deben presentar una continuidad mínima de dos fechas. Con el uso de este criterio se evita la pérdida de un mayor número de datos. Además como criterio adicional al filtro de calidad, con la intención de corregir lo reportado por Xiao *et al* (2005) datos que persisten con algún nivel de contaminación por nubes, se les aplica lo propuesto por este mismo autor: el empleo de la banda azul del sensor MODIS para descartar los píxeles con niveles digitales superiores a 2000 (Anexo A).

3.6 Identificación de cambios en la cobertura superficial e información de referencia

El procedimiento se basa en la diferencia entre valores pre y post de NDVI-MODIS. Por lo que se hace necesario identificar el valor residual para el cual se asocian posibles cambios en la cobertura vegetal. La intención de este planteamiento es definir un umbral de cambio para cada píxel, donde la excedencia de dicha cifra, se considera como un candidato a movimiento en masa. El valor umbral de ΔNDVI será logrado con el uso de la siguiente ecuación:

$$\Delta\text{NDVI}: \text{NDVI}_i - \text{NDVI}_{i-1}$$

Para explorar el valor umbral se adopta lo planteado por Lunetta *et al.*, (2006) para valores de NDVI que presentan una distribución normal. Éste plantea, como una estimación apropiada para la identificación de cambios en la cobertura vegetal, cuatro niveles de desviación estándar (2.0, 2.5, 3.0, 3.5). En el presente análisis se optó por un criterio de selección discreto en el que se consideran, para el ΔNDVI , una distribución de probabilidad positiva de 0.15%, 0.35% y 0.5% (Figura 9) de donde se obtienen el número de desviaciones estándar asociada a deslizamientos además de los valores contenidos. Es decir, el ΔNDVI superior al valor umbral puede ser el resultado de cambios en la cobertura vegetal y los demás valores, refieren las condiciones normales.

Los valores de ΔNDVI presentan una distribución normal lo que significa que, en condiciones constantes de vegetación, el ΔNDVI anual tendrá valores cercanos a cero al no presentar cambios significativos entre T_1 y T_2 . Los valores que se alejen de $X=0$ estarán asociados con variaciones fenológicas entre NDVI_i y NDVI_{i-1} y cambios de la cobertura terrestre, donde esta última representa la remoción de la cobertura vegetal por movimientos en masa u otros

procesos, los cuales se pretende evitar con el empleo de variables lógicas. Dinámica de interés para la presente investigación.

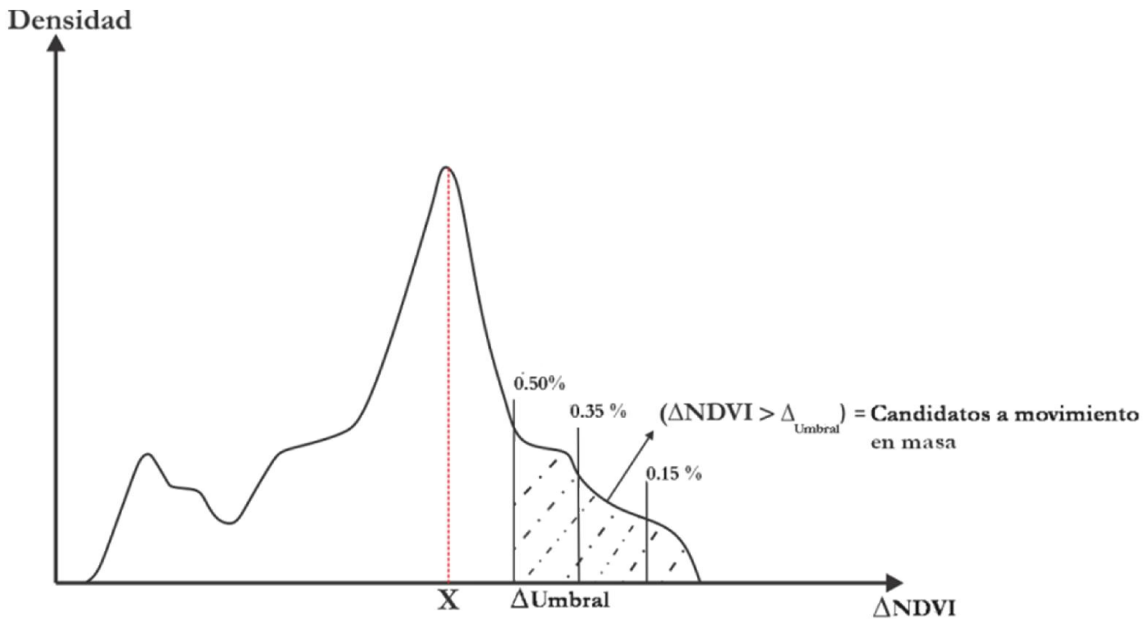


Figura 9 Histograma para ilustrar la distribución de los valores de ΔNDVI

Luego de definir los valores umbrales a partir de la distribución de probabilidad del ΔNDVI para cada pixel (Figura 9), se tiene que valores superiores al valor umbral que cumpla con una continuidad mínima de dos fechas, serán considerados como posibles movimientos en masa. Los demás pueden estar asociados con variaciones del NDVI ajenas a la remoción de la cobertura.

El proceso de calibración para identificar el Δ_{Umbral} , se realizó para el año 2010 ya que para este periodo se disponía de información para la validación de los resultados, permitiendo definir el Δ_{Umbral} que responde a movimientos en masa. Por otro lado, se planteó un criterio adicional el cual consistió en que los valores de ΔNDVI deben mantenerse superiores al valor umbral por más de dos fechas continuas, para evitar una falsa identificación asociada con el comportamiento de diente de sierra de los datos (Tzitziki Janik *et al.*, 2011). En la Figura 10 se presenta el comportamiento de la serie temporal de NDVI-MODIS, correspondiente a un movimiento en masa y posibles variaciones por condiciones climáticas.

Las especificaciones de los datos y el método desarrollado se detalla en el aparte **“3.8 validación de resultados”**. Para este proceso se empleó el software IDL y se ejecutó la rutina que se relaciona en el Anexo A.

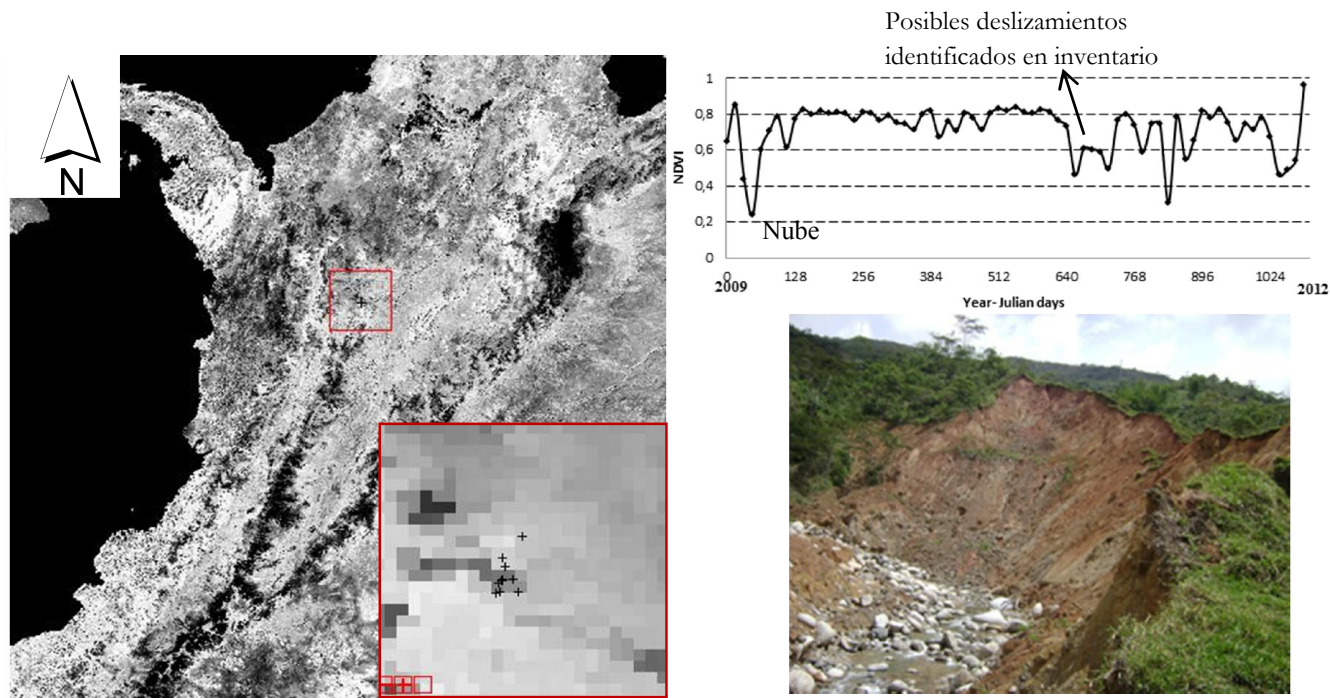


Figura 10 Comportamiento de la serie de tiempo por el registro de un movimiento en masa en la región de análisis.

3.7 Correlación de movimientos en masa con la pendiente

Con el ángulo de la pendiente se construye un segundo filtro basado en las características del terreno y la susceptibilidad de éste a movimientos en masa, para de esta manera refinar los pixeles candidatos a movimientos en masa, a causa de disminuciones en el NDVI, pero que no cumplen con el valor de pendiente adoptado. Para precisar el valor se recurre a estudios en los que se definen, para pendientes calculadas con MDE, condiciones críticas de susceptibilidad a movimientos en masa. Ángulos mayores o iguales a 15° para el occidente de Grecia Miliariesis *et al.* (2005) y valores mayores o iguales a 30° para eventos detonados por lluvias en cinco regiones del Japón (Iwahashi *et al.*, 2012). Adicionalmente (Fell 2008) Plantea que pendientes superiores a 20° , tienen el potencial de desplazar en el sentido de la pendiente los materiales que conforman una ladera. Asimismo Asuncion *et al.* (1995) encontró en ámbitos alpinos y subalpinos del Pirineo Central español, la ocurrencia de movimientos en masa lentos en pendientes de hasta 8° . Por lo variable de los resultados se adopta como criterio el menor valor de pendiente que reportan los autores mencionados, 8° , recogiendo así rasgos geomorfológicos con la capacidad de inducir deslizamientos de diferentes características. Esta rutina se repite para las 506 imágenes de NDVI-MODIS.

Para este proceso se recurre al modelo digital de elevación ASTER 30 m corregido con el modelo SRTM 90. Luego en el software ARCGIS 10 se emplea la extensión “*resample*” y la técnica del vecino más cercano para remuestrear el MDE con una resolución espacial de 30 m a una celda de salida de 250 m. La finalidad es homogenizar con respecto a la resolución espacial de los datos de NDVI, la escala del modelo de elevación. La ampliación del pixel implica un cambio en el sistema de coordenadas y los atributos geométricos utilizados para representar las entidades geográficas (Marceau, 1999) en este caso la pendiente. La cual fue calculada en grados dando uso del mismo *software* y para este proceso, la extensión “*slope*”.

3.8 Validación de resultados

El método más común para evaluar la confiabilidad de los mapas obtenidos del sensor MODIS, es la comparación contra clasificaciones obtenidas de datos con una mejor resolución espacial (Friedl *et al.* 2002, Latifovic *et al.* 2004) citado por (Tzitziki Janik *et al.*, 2011). Sin embargo la disponibilidad de información detallada para este tipo de eventos en una limitante en la región de estudio, por lo que en este caso se ajustaron los análisis a la información disponible.

En este caso existe un inventario de movimientos en masa para toda la región de estudio. El desarrollo de esta actividad se dio en el marco del proyecto evaluación y zonificación de riesgos por avenida torrencial, inundación y movimiento en masa para la región CORNARE entre los años 2011-2012 e incluyó como parte del proceso, el levantamiento de información asociada con la ocurrencia de fenómenos geológicos en numerosas campañas de campo (CORNARE, 2012). Para la presente investigación los datos fueron procesados para luego filtrar los eventos que no correspondían a movimientos en masa, obteniendo así los datos de interés. Sin embargo, en muchos de los registros, no fue posible establecer la fecha del evento, el área afectada, ni el proceso morfodinámico al que corresponde. Información necesaria para la validación del método. No obstante algunos de los registros fueron empleados como información secundaria de validación (180 datos). Como insumo primario se usó los mosaicos del sensor *Vexcel Ultracam* con una resolución espacial de 1 m.

La validación de resultados consiste en la comparación de los deslizamientos identificados en ciertas áreas por el producto NDVI-MODIS y las condiciones reales para la misma zona, generando así matrices de confusión. Tzitziki Janik *et al.*, (2011) plantean que los índices más utilizados para validar las clasificaciones del sensor MODIS, son el de fiabilidad global y el

coeficiente de kappa. Teniendo en cuenta la información disponible, es posible determinar el parámetro fiabilidad global (píxeles correctamente clasificados respecto del total de píxeles verificados).

Para este caso la valoración de mayor confiabilidad estaría dada por los registros antes y después del evento, ello permitiría corroborar con imágenes de alta resolución espacial, los cambios detectados con el NDVI-MODIS. En este caso la validación de cambios se restringió al año 2010, periodo para el cual se contaba con ortofotomosaicos *Vexcel Ultracam D*, cuyas escenas fueron capturadas entre el año 2010 y comienzos del 2011. Además en algunos casos fue posible emplear información de *Google Earth* disponible para los años 2011-2012. La información *Vexcel Ultracam D* fue suministrada por CORNARE y se limitó a una porción del territorio (Figura 11). Para su uso se emplea una combinación en falso color 432, correspondiente a las bandas disponibles para las porciones infrarrojo, rojo y verde.

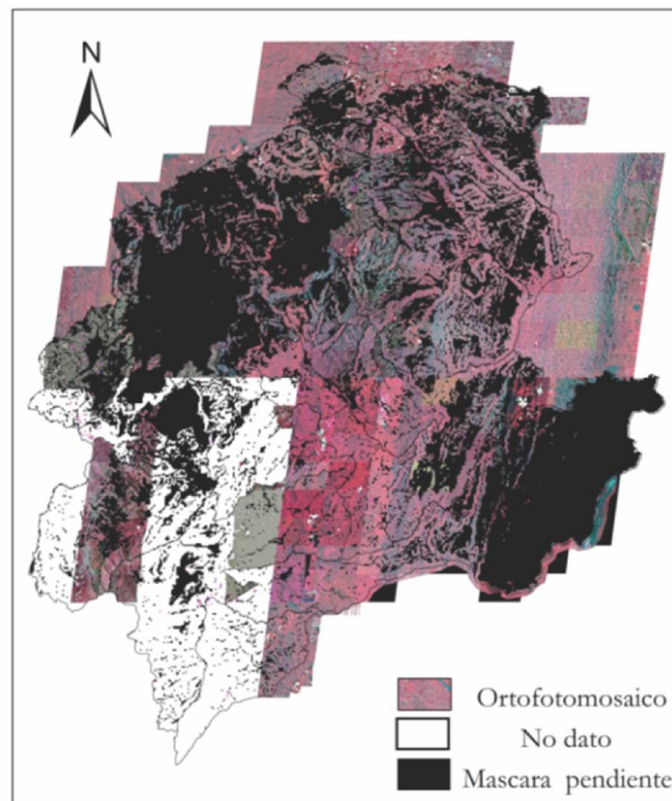


Figura 11 Datos empleados para la validación de los resultados

4. Resultados y discusión

4.1 Procesamiento de la información

4.1.1 Mascara de calidad (Quality Assessment, QA)

De este proceso el número de registros obtenido es igual al número inicial de escenas, 506, así mismo la estructura y el nombre de origen. La diferencia entre el archivo de salida y el inicial, es el número de variables que contiene el producto, ya que a diferencia de las doce variables del archivo original, solo se almacena la máscara del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (*Normalized Difference Vegetation Index*, NDVI). Los 506 registros de salida son empaquetados en formato HDF. La Figura 12 representa de manera análoga los metadatos antes y después de la máscara, y la Figura 13 muestra las escenas.

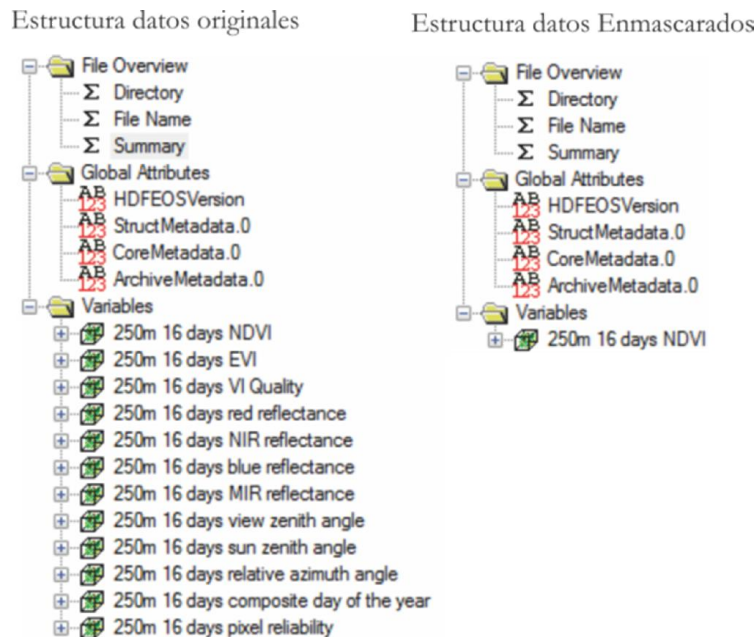


Figura 12 Visualización estructura de los datos antes y después (*software IDL*)

En la primera fila de la Figura 13 se aprecia que los mapas presentan superficies de color blanco las cuales predominan al sur del área de análisis, estas superficies están asociadas con valores de NDVI cercanos a cero, comportamiento corresponde a franjas de nubes para las cuales los valores de reflectancia son similares en la porción del R e IRC. Para esta clase de cobertura, el dividendo presenta valores cercanos a cero (Ecuación 1) lo que resulta en valores

bajos para el cociente, que corresponde al valor del NDVI. En la segunda fila de la figura 13, se aprecian las imágenes con las zonas enmascaradas, al aplicar la máscara de calidad por píxel (los píxeles con características inferiores, presencia de nubes, sombras y alto contenido de aerosoles). Para estas condiciones el dato de salida tiene asignado un marcador de -9999, los valores restantes, los útiles, presentan valores entre 0 y 10000. Este rango se debe a que el índice de vegetación normalizado está escalado por un valor de 10000, ya que el del índice solo puede presentar valores de 0 a 1. En la figura 13 se observa una marcada reducción de los píxeles que conforman la escena de salida, incluso aquellas porciones que no se inferían como nubes, pero no se ajustaron a los criterios de calidad restantes. Aun así, al final del procesamiento se aportan datos útiles para el análisis, estos corresponden a las superficies cuyo color es diferente al negro. Este proceso se repite para las imágenes restantes, de manera que los datos que se emplearon en la construcción de la serie se restringen a los valores que se ajustan al criterio de calidad.

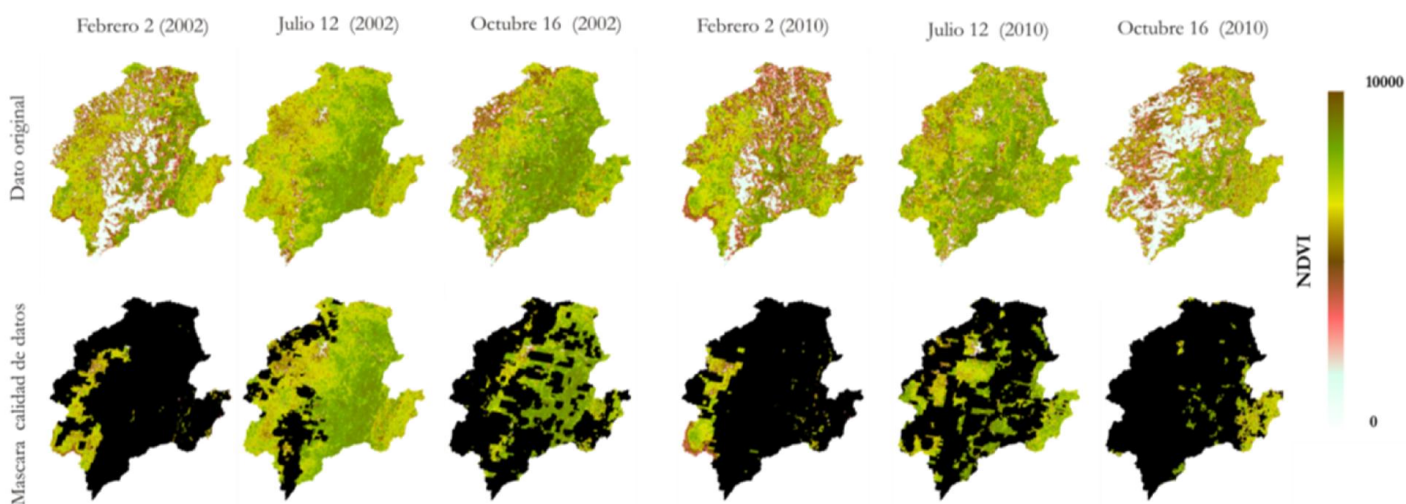


Figura 13 Comparación de imágenes MODIS-NDVI. A. imagen original B. imagen después de aplicar las máscaras de calidad (Los píxeles por fuera del criterio de selección son pintados de color negro).

En las imágenes utilizadas como ejemplo, la fecha de captura se relaciona con contrastes de alta nubosidad asociada con periodos de pluviosidad en la región de estudio, esto debido a la oscilación meridional de la zona de convergencia intertropical (ZCIT) lo cual hace de éste el mecanismo físico de mayor importancia para explicar el ciclo anual de la precipitación, por ende la presencia de nubes sobre la región de estudio, la cual, a lo largo del año representa dos temporadas lluviosas (abril-mayo - octubre y diciembre) y dos temporadas secas(diciembre-

febrero y junio y agosto) como resultado del doble paso de la ZCIT sobre el territorio (Poveda, 2004).

Dada la influencia de las nubes en el número de imágenes útiles, la ocurrencia de fenómenos climáticos con formación de éstas hace que para dichos periodos la cantidad de datos útiles sea reducida. Esta situación se evidencia en la Figura 13, donde los mayores vacíos se presentan en los periodos de alta nubosidad. Para esta condición Colditz *et al.* (2006) mencionan que la variabilidad temporal de los datos es generalmente causada por influencias estacionales, como la cobertura de nubes o el alto contenido de aerosoles, además de influencias anexas a la calidad de los datos por variación en los ángulos de iluminación solar; anisotropía; todo lo anterior influye en la consistencia temporal de la serie de tiempo.

Para la región de estudio la variedad de interacciones suelo-atmosfera inducen climas locales y regionales de gran complejidad (Poveda *et al.*, 2006) estas circunstancias configuran la mayor limitante para análisis temporales a partir de imágenes satelitales al tener en cuenta que el principal detonante para los movimientos en masa es la precipitación. Aun así, el producto NDVI-MODIS ofrece ventajas que se desprenden de la alta resolución temporal, registros diarios, lo que puede reducir la cantidad de nubes al momento del registro, así mismo el disponer de información multitemporal consistente que permita clasificar la cubierta vegetal, información limitada para Colombia (Sánchez-Cuervo *et al.*, 2012). Además de otras ventajas como la disponibilidad de datos de manera rápida y sin costo.

Las exigencias de algunos estudios demandan datos sin ninguna afectación por nubes y otros elementos como es el caso de Anaya *et al.* (2009) los cuales emplean filtros QA para excluir todos los datos de baja calidad. Otros autores contrastan en la rigurosidad de los filtros al limitar los criterios de la máscara a la presencia de nubes (Grigera *et al.*, 2007) con lo que se omiten otros criterios para el control de los datos. Otros emplean filtros para seleccionar datos de calidad media y alta (Huete *et al.*, 2011), criterio de clasificación empleado en el sentido de conseguir una aproximación a lo planteado por Colditz *et al.* (2006, 2008) obtener el máximo número de registros con una calidad aceptable para la caracterización adecuada de la serie de tiempo. Esta decisión permite perfiles con mayor continuidad. También es notorio que después de aplicados los filtros de calidad persistieron datos indeseados en algunas porciones de la serie. Esta afirmación se soporta en el comportamiento de *dientes de sierra*, lo que coincide con lo encontrado por Lunetta *et al.*, (2006) y Tzitziki Janik *et al.*, (2011).

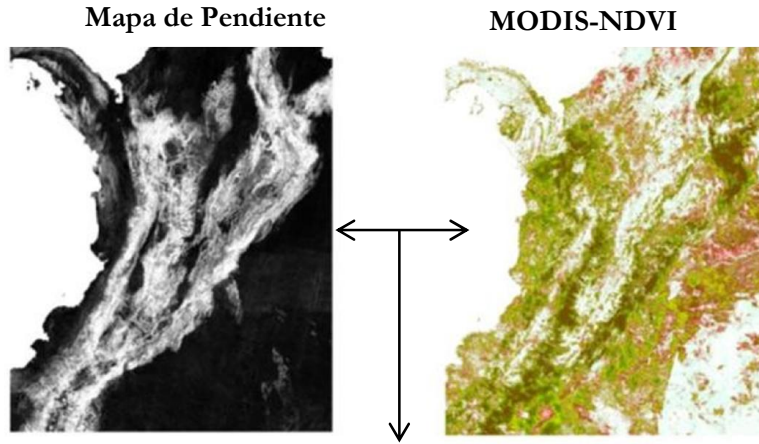
En general, los resultados muestran que diferentes niveles de calidad en los valores de NDVI que conforman la serie de tiempo, podrían inducir mayores variaciones en los datos (Huete *et al.*, 2002). Esto puede ser crítico en análisis fenológicos Colditz *et al.* (2006, 2008). Estos autores aseguran que los píxeles de buena calidad generan perfiles estacionales ajustados, los cuales facilitan la identificación de sucesos como periodos de floración, temporada de crecimiento, picos de crecimiento y senescencia. Por tal razón, para investigaciones basadas en comportamientos fenológicos, la inadecuada selección de píxeles "útiles" podría resultar en una mayor variabilidad en los IVs y por ende se podrían encubrir algunos comportamientos e introducir errores para estudios a escalas de tiempo variable. Para cambios en la vegetación la variación en el NDVI-MODIS es mayor que la que ocurre por estímulos fisiológicos. Coincidiendo con Lunetta *et al.*, (2006), en que, para análisis que exploren la remoción de la cobertura vegetal se puede trabajar con niveles de exigencia intermedios, validando así, el filtro de calidad para los datos NDVI-MODIS definidos en el presente trabajo.

4.1.2 Máscara por pendiente

En este caso el filtro es aplicado a las 506 fechas, y como se detalla en la metodología (*Correlación de movimientos en masa con la pendiente 3.7*), el criterio de filtrado corresponde con un valor de pendiente superior a 8°. Aunque el ángulo de la pendiente es importante en la iniciación de fenómenos de remoción en masa, existen otros factores ambientales que también ejercen gran influencia; geomorfología, hidrología, geología y pedología (Sidle y Ochiai, 2006). Sin embargo como parte de la metodología para la detección de movimientos en masa a partir de series de tiempo NDVI-MODIS solo se empleó un criterio, la pendiente, la cual es empleada como una variable lógica (Martha *et al.*, 2010; Zhang *et al.*, 2010) cuya finalidad es representar las unidades geomorfológicas de primer orden y el ángulo de pendiente, para los cuales, soportado en la literatura, se asocia una alta susceptibilidad al inicio de movimientos en masa.

En la Figura 14 se observa como el criterio de pendiente, permite en buena medida delimitar los elementos morfológicos detallados por Arias (1995) como estructuras básicas del relieve en la zona central del departamento de Antioquia. Superficies de erosión, escarpes regionales y frentes erosivos, además de las superficies aluviales asociadas al río Magdalena (Hermelin, 2003) y la Formación Mesa. La importancia de identificar estas unidades por el filtro de pendiente, radica en el nivel de susceptibilidad de algunas de estas formaciones a fenómenos

denudativos, donde las de menor susceptibilidad se representan en la escena de salida, como bloques o superficies de color negro. El primer bloque se ubica en el cuadrante noroccidental, y corresponde a las superficies de erosión y remanentes de esta unidad geomorfológica. Éstas se observan en el mapa como una secuencia de superficies separadas por franjas alargadas que no fueron recogidas por la máscara de pendiente, las cuales corresponden a escarpes erosivos regionales.



Resultado máscara de pendiente para el área de estudio. Procesamiento IDL

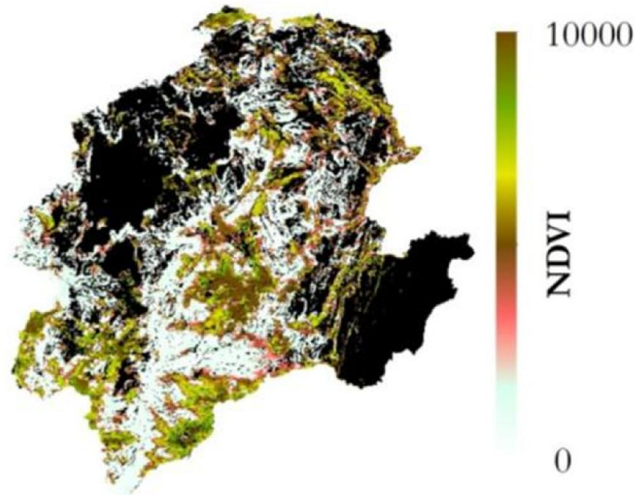


Figura 14 Mascara de pendiente

El segundo bloque se localiza hacia suroeste y corresponde a las superficies aluviales del Magdalena y la Formación Honda. La zona que no fue enmascarada son los cañones asociados a los frentes activos de erosión del Cauca y Magdalena.

Continuando con la clasificación del relieve propuesta por Arias (1995) y la forma como son representadas por la máscara de pendiente, se observa una limitada caracterización para las

unidades de segundo orden, lo que se manifiesta en pocas máscaras lineales asociadas a los Cañones modelados por los mayores drenajes de la región. Para las unidades geomorfológicas de tercer orden, la caracterización es nula.

Sin embargo retomando la finalidad de este filtro. Las unidades de mayor sensibilidad a procesos denudativos planteadas por Arias (1995) y soportado en la literatura, los valores de pendiente susceptibles a movimientos en masa. Se puede decir que, el mapa de salida se ajusta a los criterios morfométricos y geomorfológicos planteados en la literatura, por lo que al recoger las superficies de alta susceptibilidad a estos procesos y descartar las demás, se facilita el procesamiento de la información y la identificación de movimientos en masa.

4.2 Análisis de series de tiempo NDVI-MODIS

Para los usos del suelo más representativos, se diferencia entre los datos filtrados y no filtrados y se calculan la media y desviación estándar de los datos. Esta se basó en la valoración cualitativa publicada por Lunetta *et al.*, (2006).

En la Figura 15 para los datos de origen (línea negra) existe un fuerte comportamiento en diente de sierra a lo largo de los trece años de registros. Esta condición es observada en el total de las superficies representadas. Esto ofrece algunas aproximaciones del ruido inherente al índice de vegetación (NDVI-MODIS), así mismo evidenciado en los datos filtrados por el índice de calidad (línea roja), donde los vacíos en la serie de tiempo, se deben a los registros no ajustados al criterio de selección. En este caso la fuerte influencia de las nubes sobre la región de estudio (Sánchez-Cuervo *et al.*, 2012) determina el nivel de ruido y el número de datos útiles, según el criterio de calidad definido en la Tabla 3. La Figura 15 permite afirmar que, a causa de la cantidad de datos y la presencia de ruido, el pre procesamiento del producto NDVI es definitivo para un análisis confiable. En la literatura se encuentran numerosas estrategias para el procesamiento de los índices de vegetación NDVI-MODIS, donde muchas investigaciones emplean como punto de partida la capa de valoración de calidad (QA) y en algunos casos se complementa con la selección y extracción de datos. En esta investigación, se exploró la media móvil como una forma complementaria, sin embargo, por la reducción de los datos (Figura 8), el método fue descartado ya que la información resultante no era suficiente para los alcances planteados en esta investigación. Adicional a esto se observa en la Figura 15 que en la totalidad de los datos con filtro de calidad (QA), persisten algunos valores muy bajos que se presentan aislados, lo que coincide con lo planteado por Xiao (2005) donde afirma que el filtro

de valoración de calidad no es totalmente confiable para descartar los pixeles que presentan ruido.

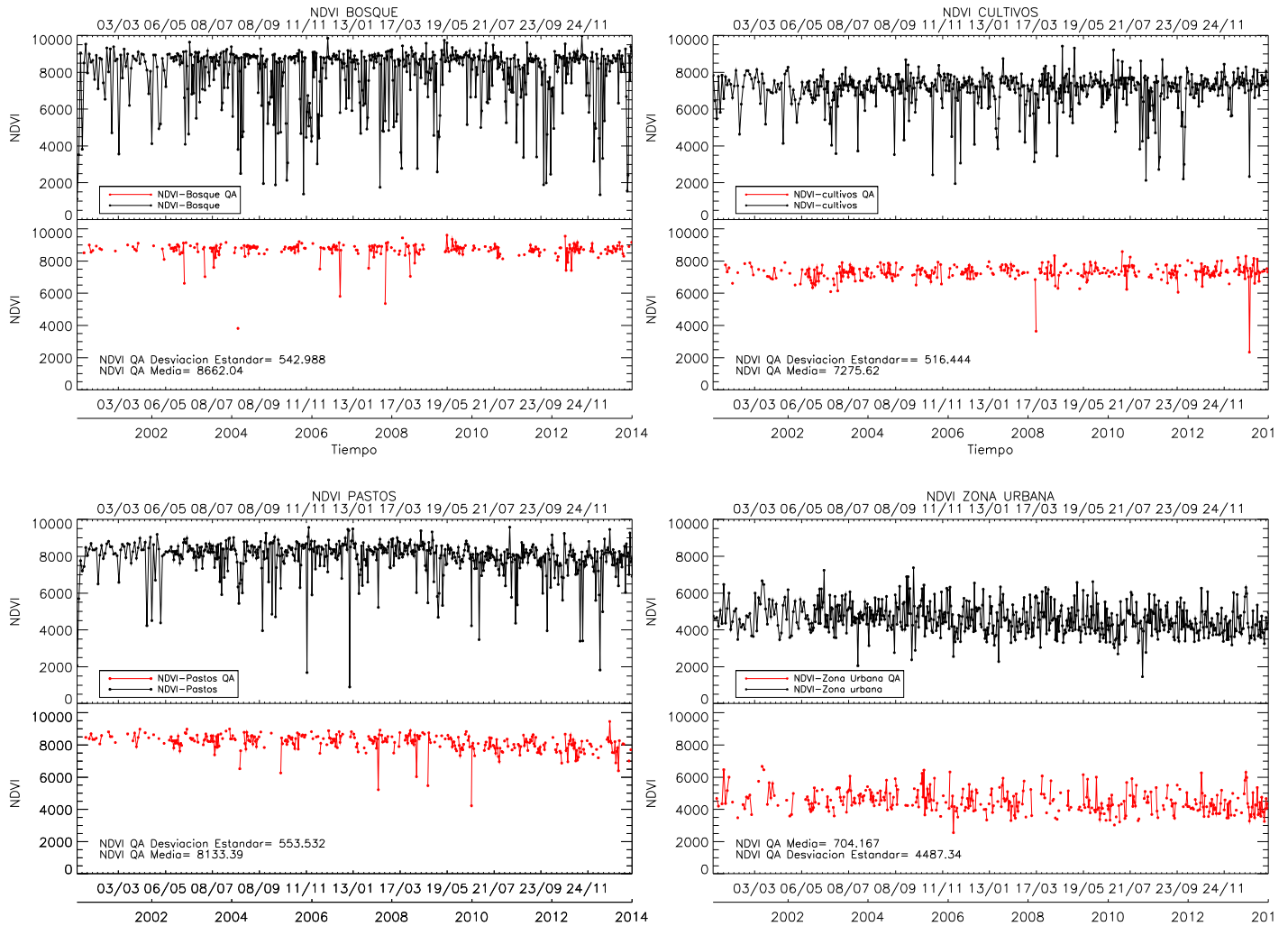


Figura 15 Series de tiempo para las coberturas de referencia. 2000-2013

En el caso de la cobertura vegetal, los valores promedio son consistentes con el comportamiento fotosintético de cada cobertura, siendo ligeramente superior en bosque en comparación con pastos, esto puede ser debido a la saturación del NDVI (Huete *et al.*, 2002). En el caso de las construcciones los valores que presenta el NDVI son relativamente bajos (Figura 7, Construcciones) debido a la alta cubierta de superficies no fotosintéticas, como tejados y calles. Así mismo las series no presentan variaciones debido a comportamientos fenológicos prolongados con actividad fotosintética contrastada (letargo o senescencia). Este comportamiento se valora para una serie de tiempo de menor escala, 2010- 2011 (Figura 16). La intención es definir un periodo climático en el que se recoja, en totalidad, una época de lluvias y

una época seca y detectar variaciones en el NDVI asociados con comportamientos fenológicos. En este caso los valores presentan un comportamiento similar al descrito para la serie de 13 años, sin embargo en el caso de las coberturas boscosas la desviación estándar es la menor, 280.06, esta condición influye al momento de definir el valor umbral, ya que una menor desviación estándar, incrementa el contraste del NDVI asociado con un cambio de cobertura.

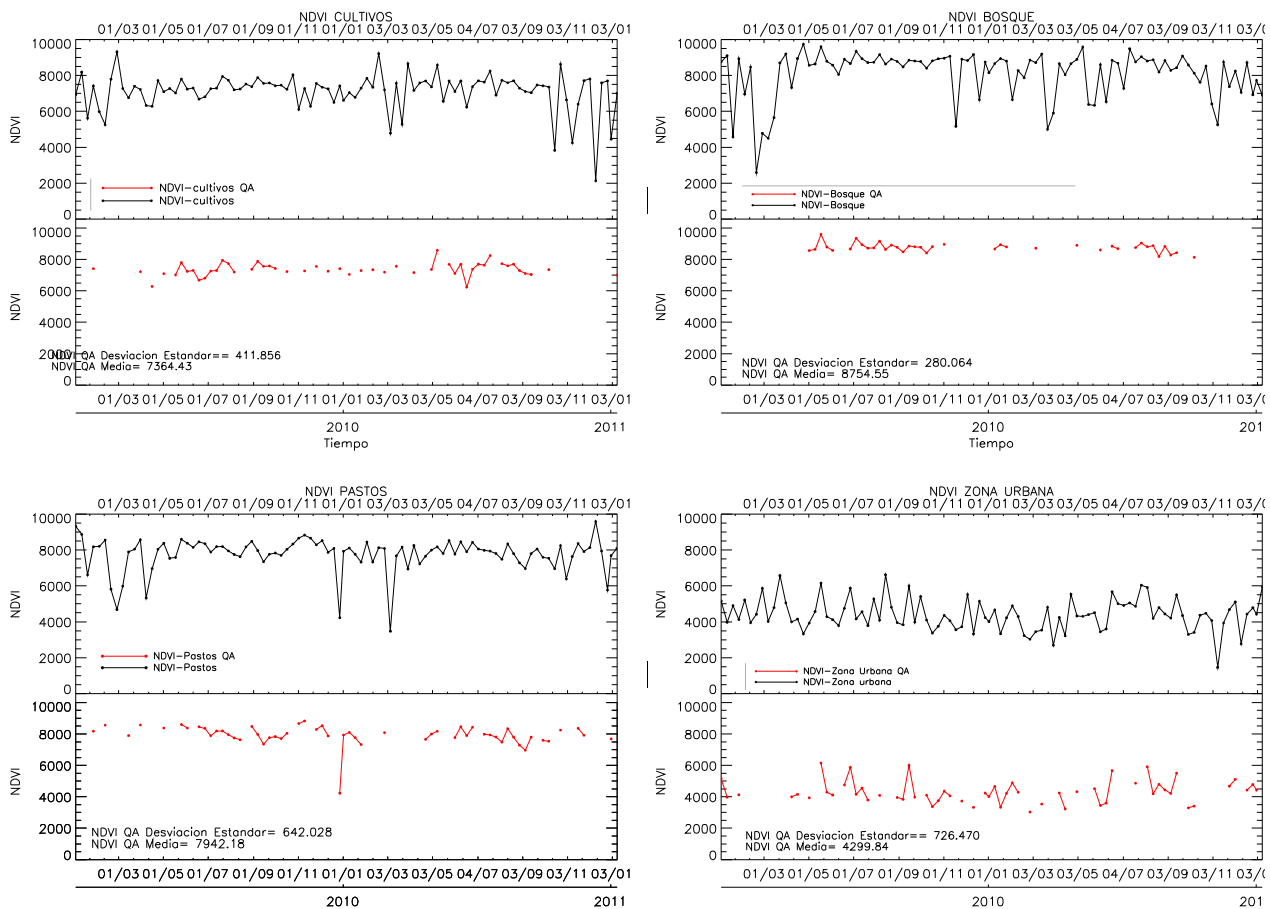


Figura 16. Series de tiempo para las coberturas de referencia. 2010-2011

Un comportamiento contrario presentan las series temporales graficadas por Clark *et al.*, (2010) y Lunetta *et al.*, (2006) los cuales recogen el comportamiento de la vegetación en regiones estacionales. El análisis cualitativo de los perfiles temporales correspondientes a los *endmembers* fenológicos, aportan elementos que son de utilidad en el procesamiento los resultados y el análisis del protocolo automatizado MODIS-NDVI.

4.3 Detección de cambios en la cobertura

4.3.1 Cambio de cobertura para el año 2010. Periodo de calibración

A partir del análisis de la serie temporal construida para el año 2010, se obtuvieron los pixeles considerados como posibles movimientos en masa, los cuales están asociados con disminuciones considerables en el NDVI que cumplieron las siguientes condiciones. 1. fueron superiores a los tres factores umbrales definidos y 2. Los bajones son sostenidos durante dos fechas continuas (Figura 15) y (Figura 18).

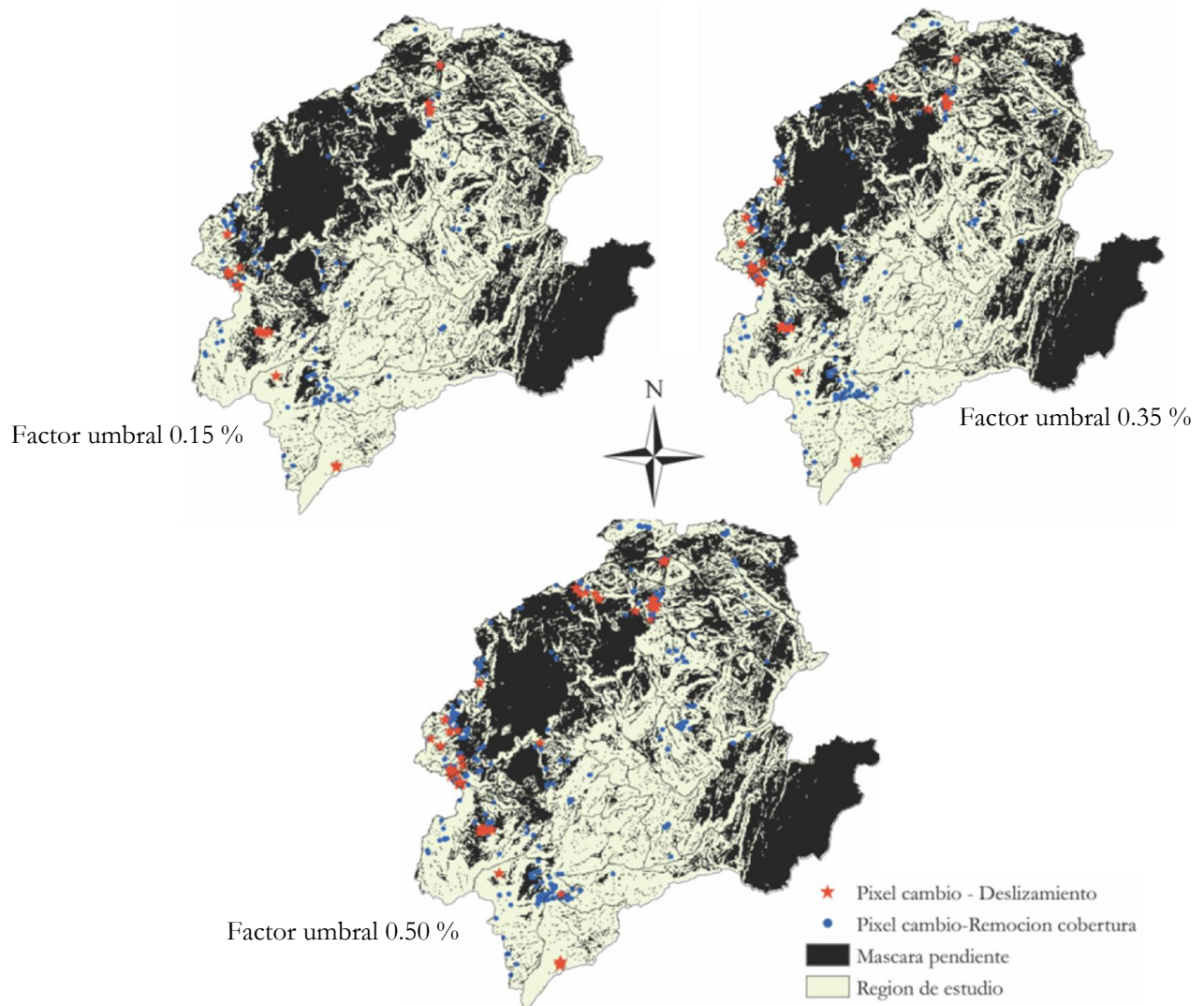


Figura 17 Candidatos a movimiento en masa en la región de estudio

Luego los pixeles asociados a cambios de cobertura se validaron con los ortofotomosaicos “Vexcel Ultracam D” los cuales son convenientes para el presente proceso dado su alta

resolución espacial (1 m). En algunos casos los registros fueron confrontados con información obtenida de *Google Earth* con el fin de asegurar posibles eventos no captados en el ortofotomosaico, ya que las subescenas que lo conforman pudieron ser anteriores a la ocurrencia del evento. Para el mosaico se realizó la combinación en falso color (432) lo que facilitó la identificación de deslizamientos al relacionarlo con variaciones en la cobertura terrestre y exposición del suelo residual, pero también, fueron útiles para validar disminuciones de NDVI en la serie de tiempo de MODIS-NDVI, asociados con otro tipo de eventos que conllevan a la remoción de la superficie terrestre. Condición definida como casos de comisión (Figura 18). Los más frecuentes corresponden a superficies alteradas con tala y quema de ecosistemas boscosos e intervenciones antrópicas y cortes en la ladera con fines constructivos.

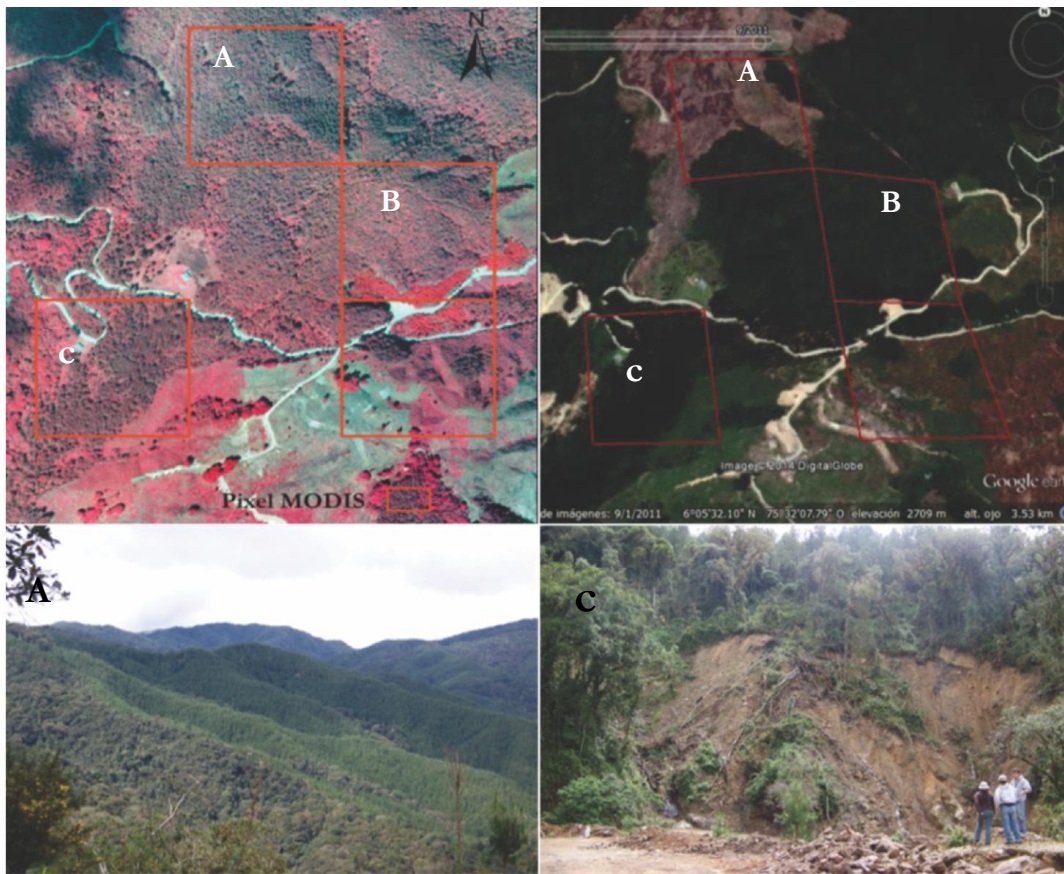


Figura 18 Pixeles del sensor MODIS validados con imágenes de mayor resolución.

Cambios de cobertura identificados por el sensor MODIS y validados con imágenes de alta resolución y registros de campo, en la fila superior imágenes remotas (Derecha ortomosaico e izquierda imagen *google earth*) y la fila inferior registros de campo. (A) Aprovechamiento y quema de una plantación forestal. B Cortes en la ladera para la conformación de una vía y viviendas (C) Movimiento en masa. Municipio de El Retiro, vereda Normandía (X: 846.758 Y: 1°160.034 magna sirgas origen Bogotá).

Para la validación de los píxeles identificados como movimientos en masa una de las mayores restricciones fue la fecha de captura de la escena, además de las imágenes disponibles en *Google Earth* también se emplearon los registros del inventario de movimientos en masa disponible para la región. Con estos insumos fue posible validar algunos procesos subsanando en esas circunstancias dicha limitante (Figura 18). Debido a esta condición es posible que píxeles de cambio no fueran validados y por tal razón se etiquetaron como casos de comisión al no observarse cambios en la superficie, ya que éstas pudieron ser posteriores a las imágenes *Vexcel Ultracam D*.

Fue inviable para validación de resultados el uso del inventario de movimientos en masa como insumo primario, puesto que presenta una limitación derivada de la fecha de registro de los eventos, y en muchos casos no precisaba el momento de ocurrencia o las condiciones morfodinámicas que presentaba; un deslizamiento nuevo, la reactivación de un movimiento en masa, cicatrices de fenómenos activos o inactivos. Sin embargo se empleó como complemento de la validación imágenes *Vexcel Ultracam D*.

Para validar las superficies detectadas como movimiento en masa a partir del análisis de las series de tiempo del sensor MODIS, se siguió como criterio de clasificación las características descritas por GEMMA (2007 y Varnes (1978) como remanentes propios de los procesos de remoción en masa, específicamente la extensión removida, la zona de depósito, los flancos alterados y escarpes identificados en las imágenes remotas las cuales se presentan visualmente como un plano heterogéneo y continuo de color plateado (composición 432). Las intervenciones de origen antrópico tienen espectralmente una respuesta similar, sin embargo presentan una geometría definida y una mayor homogeneidad (explanación, llenos, taludes entre otros), asimismo superficies onduladas y desgarres asociados a procesos erosivos (Csimá, 2010) contrastan en las características espectrales pero no en las geométricas (Figura 18 y Figura 19).

Definidos los criterios de selección se realizó el conteo del número de píxeles que contenían dichas superficies, ya que en la mayoría de los casos son píxeles mezclados en los que incluso se recogen eventos de diversos orígenes. Para estos casos primó la etiqueta de movimientos en masa. Luego los resultados del conteo fueron consolidados en tablas de atributos usando el software "Arcgis 10.1" para posteriormente ser recogidas en la Tabla 4. Ésta en síntesis, representa para el año 2010 los valores asociados a la detección de áreas afectadas por deslizamientos en función del factor umbral. De esta manera se define el total de píxeles que

serán aplicados en los análisis posteriores. Los píxeles sin validación corresponden a candidatos a movimientos en masa para los cuales no fue posible valorar la condición a la que correspondía, ya que en esos casos no se disponía de imágenes (Figura 11). De igual forma como parte del análisis se encontró que un número elevado de píxeles fue etiquetado como error de clasificación, ya que corresponden a terrenos destinados a cultivos agrícolas. De donde se desprende que, por la naturaleza de la cobertura, variaciones a lo largo del año en el registro fotosintético debido a procesos de cosecha y senescencia, afectan la respuesta espectral recogida por el MODIS-NDVI, la cual en la metodología se considera como un deslizamiento. Para descartar esta condición, a los datos falsos de zonas de cambio (comisión), se les aplica un filtro adicional para descartar los usos agrícolas. Este consistió en una máscara con las coberturas vigentes para el año 2010.

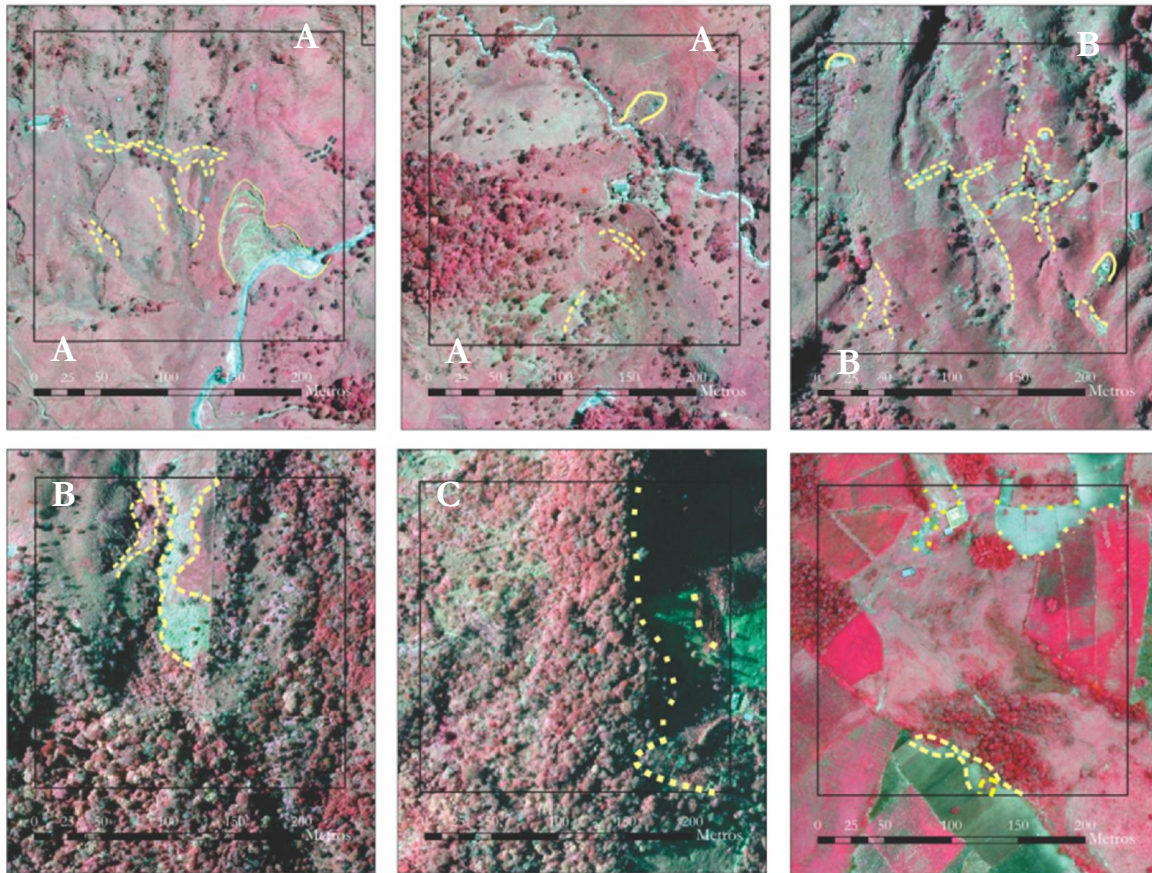


Figura 19. Condiciones detectadas como cambio de cobertura por el índice NDVI-MODIS.

La figura presenta las condiciones de contraste que favorecen la clasificación. A Desprendimientos por socavación de canal y contraste por procesos erosivos concentrados. B procesos erosivos. C. Saprolito expuesto en superficie por actividades agrícolas.

Tabla 4 Pixeles detectados como movimiento en masa para cada factor umbral. Año 2010.

Factor umbral	# pixeles de cambio	Movimiento en masa*	Error clasificación*	Sin validación*	Total cambio *
0,5%	370	52	197	121	249
0,35%	228	34	111	83	145
0,15%	129	19	56	54	75

*Pixel sensor MODIS

De la Tabla 5 se tiene que, para cada factor umbral corresponde un número total de pixeles de cambio para los cuales se calcula, previo descuento de registros sin validación y omisión por agricultura, el porcentaje de fiabilidad global asociada. Para este ejercicio, el cálculo de la fiabilidad global no considera los elementos validados como acierto de no cambio (Tabla 5), debido a que el acuerdo de esta unidad en función del número total de pixeles y el número omitido para cada factor umbral supera el 98% , lo que aumentaría los resultados de fiabilidad global enmascarando los rendimientos para la unidad de interés, deslizamientos, en este caso la fiabilidad global se determinó para los pixeles clasificados como movimiento en masa y los clasificados de manera de incorrecta por comisión u omisión.

Los resultados muestran que la fiabilidad global varía en función de los valores de comisión, de donde, el mejor rendimiento de fiabilidad global 20,99%, se obtiene para el factor umbral del 0.35%. Sin embargo el comportamiento es opuesto para el número de deslizamientos validados, donde el mayor número de eventos 52, está asociado a un factor umbral del 0.5%. En este sentido es necesario identificar nuevos filtros puesto que se dan procesos sobre el relieve que se confunden con movimientos en masa, lo que hace incierta la identificación y la gestión de dichos eventos dando niveles de comisión superiores al 75%, lo que reafirma para estos resultados que, la fiabilidad global está determinada por los registros de comisión. En síntesis, para un factor umbral de 0.5% se obtendría el mayor número de registros con el menor nivel de omisión, 52 eventos y 23.53% respectivamente, sin embargo, para este caso se presenta los mayores niveles de comisión 79.12% aportando al inventario regional de movimientos en masa un número elevado de cambios que obedecen a otras dinámicas.

Al considerar en detalle los valores de comisión (Ce), se encuentra que estos están asociados a modificaciones del terreno similares a movimientos en masa; fenómenos erosivos concentrados y cortes en la ladera (Tabla 7); al fijar los resultados para este tipo de eventos se encuentra que

en estos casos la mayor precisión corresponde a un factor umbral de 0.35% el cual se asocia un acierto de 67.59%, debido a un mejor balance entre los datos validados y los omitidos. Las condiciones descritas motivan la escogencia del factor de 0.35% como el umbral para los procesos posteriores. Para este corresponde un número de 6.92 desviaciones estándar.

Tabla 5. Matriz de error para los factores umbrales de detección de movimientos en masa

	Cambio 0.15%	No cambio 0.15 %	Cambio 0.35%	No cambio 0.35 %	Cambio 0.50%	No cambio 0.50%	Total	Correcto	Comisión
Cambio 0.15 %	19	56					75	25,33%	74,67%
No cambio 0.15 %	19	-					19		
Cambio 0.35 %			34	111			145	23,45%	76,55%
No cambio 35 %			17	-			17		
Cambio 50 %					52	197	249	20,88%	79,12%
No cambio 50 %					16	-	16		
Total	38		51		68				
Correcto	50,00%		66,67%		76,47%				
Omisión	50,00%		33,33%		23,53%				
								FG (%)	
								0.50	19,62%
								0.35	20,99%
								0.15	20,21%

FG= Fiabilidad global

Al confrontar los resultados obtenidos con el análisis de las series temporales del sensor MODIS y los rendimientos reportados por Zhang *et al.*, (2010) y Yang *et al.*, (2013) para la identificación de movimientos en masa a partir de datos del NDVI-MODIS, un acierto del 54% y 75% respectivamente, contrastan con el mayor resultado obtenido en esta investigación, 20.99%.

Una explicación para dichas cifras puede estar en función del periodo de identificación para este trabajo, un año, tiempo en el que la variabilidad del relieve debido a procesos naturales o antrópicos, dificultan asociar los cambios a un proceso específico. En el caso del de los autores citados, desarrollan su investigación a partir de procesos de remoción en masa detonados por un evento específico. El sismo de Wenchuan ocurrido el 12 de mayo en la franja oriental de China.

Teniendo en cuenta las restricciones para los datos de validación, se analizan los resultados por omisión (Oe), los cuales presentan un mejor rendimiento en la medida que se amplía el factor umbral, ya que al incrementar el nivel de referencia, se representa de mejor manera las variaciones en la firma espectral asociada con movimientos en masa, lo que aporta al análisis un mayor número de registros. En este sentido la relación entre Oe/Ce es inversa, en la medida que para detectar un mayor número de posibles deslizamientos, reducir los niveles de omisión, se incrementa los niveles por comisión.

Otra consideración, la cual se reitera a lo largo del texto, hace referencia a la intención y alcances de este trabajo, ya que el éxito en la clasificación no podrían ser superiores a la detección de alteraciones por deslizamientos a partir de variaciones en la serie de tiempo NDVI-MODIS, por lo que el método no pretende estimar la extensión del área afectadas. Si fuera así, los valores de comisión serían mayores ya que para los pixeles detectados, los procesos de remoción en masa son una porción y no al área total (Figura 20, A).

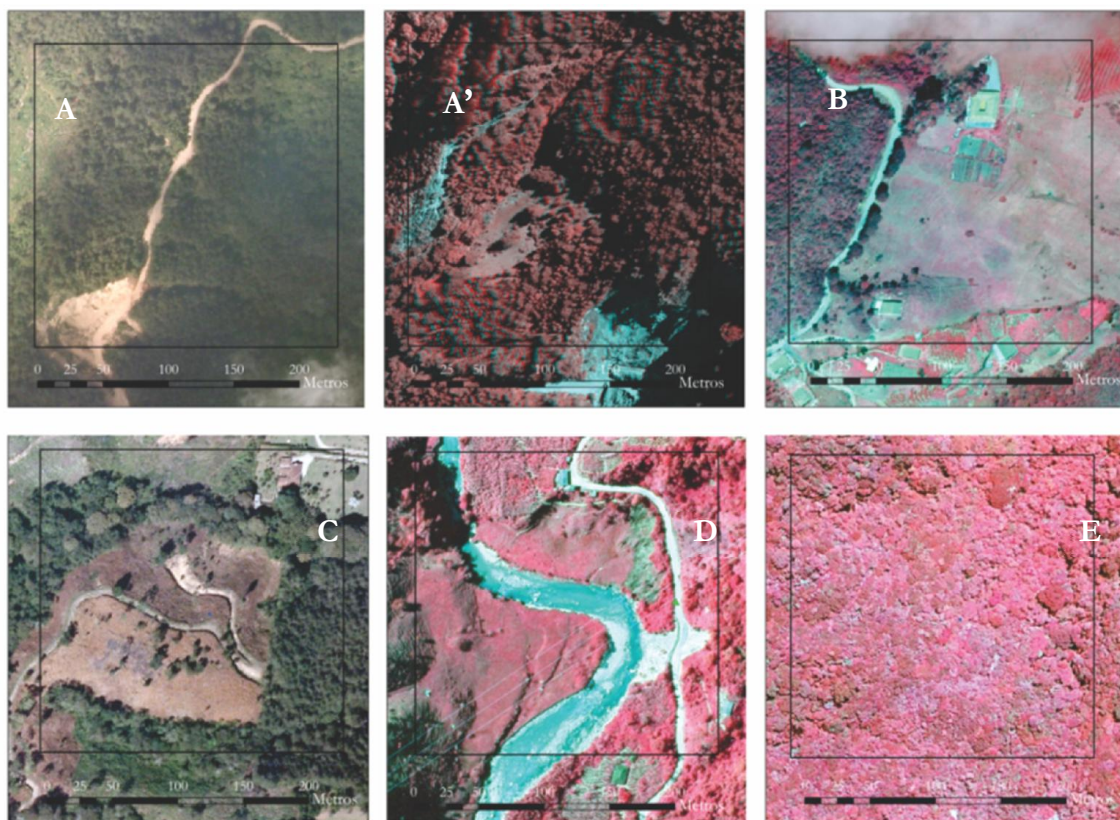


Figura 20 Cambio de cobertura y casos de omisión – comisión series NDVI-MODIS

A Movimiento en masa y apertura de vía en zona boscosa. Municipio de El Retiro ($X_{\text{Centroide: 838.088}}$ $Y_{\text{Centroide: 1'158.778}}$ magna sirgas origen Bogotá). A' Movimiento en masa sucesivo en zona boscosa. Municipio de Abejorral ($X_{\text{Centroide: 851.561}}$ $Y_{\text{Centroide: 1'137.753}}$ magna sirgas) B Pixel Mixto Pasturas-Bosque clasificado como comisión.

Municipio de Guarne ($X_{\text{Centroide}}: 844.009$ $Y_{\text{Centroide}}: 1'179.531$ magna sirgas origen Bogotá). C Intervención antrópica para la construcción de vivienda, corte y apertura de vía. Municipio de El Retiro ($X_{\text{Centroide}}: 840.572$ $Y_{\text{Centroide}}: 1'165.943$ magna sirgas origen Bogotá). D Movimiento en masa omitido por el análisis NDVI-MODIS. Municipio de Granada ($X_{\text{Centroide}}: 881241$ $Y_{\text{Centroide}}: 1'167.000$ magna sirgas origen Bogotá) E Cobertura boscosa clasificada como comisión. Municipio de San Francisco. ($X_{\text{Centroide}}: 896.418$ $Y_{\text{Centroide}}: 1'138.861$ magna sirgas origen Bogotá).

Reiterando la observación anterior, independientemente de los factores que rigen o detonan la remoción de la cobertura vegetal, los altos registros por comisión se presentan debido a comportamientos espectrales causados por la exposición en superficie de los horizontes subsuperficiales del suelo, los cuales son semejantes espectralmente a los presentados por un deslizamiento. Por ejemplo las intervenciones antrópicas en el relieve; corte de taludes, modificación de drenaje, apertura de vías además de llenos artificiales y deforestación, sumando en muchos de los casos entre el 40 y el 50% de los datos detectados de manera inadecuada, falsas detecciones (Tabla 6). Para estas alteraciones la respuesta espectral consiste en una marcada reducción en la porción del infrarrojo cercano (Cheng *et al.*, 2004; Rau *et al.*, 2007) por ende en los valores de NDVI. Otro comportamiento que se clasifica como comisión pero con un comportamiento espectral equivalente, son los procesos erosivos concentrados, los cuales generan en el terreno la exposición del saprolito y se expresan en la formación de surcos o cárcavas (Hermelin, 1992).

El análisis de imágenes de alta resolución permitió determinar que en efecto, muchos de los valores que se clasifican como comisión corresponden a estas condiciones. Adicionalmente se detectan espacios afectados por incendios o deforestación que también pueden llevar a la exposición del saprolito en superficie, además de otros tipos de cobertura, pastos, bosques y arbustos, para los cuales no se apreció variación aparente, En estos caso los valores por comisión se incrementan para un factor umbral del 0.50%. Esta dinámica se puede desprender de la reducción del valor umbral, lo que podría hacer que variaciones asociadas con procesos fenológicos se consideren como candidatos a movimiento en masa, siendo más sensible para las coberturas boscosas si se tiene en cuenta la menor variabilidad del comportamiento espectral debido a una menor desviación estándar de los registros, lo que hace inferior el factor umbral (Figura 16, NDVI bosques).

En la Tabla 6 se detallan las falsas detecciones por comisión que no corresponden con remoción aparente de la cobertura superficial (deslizamientos, actividades antrópicas y erosión), pero que aun así presentaron niveles superiores al valor umbral de NDVI-MODIS. Una

circunstancia para esto se puede desprender del ruido que presentan los datos de origen (Figura 15, NDVI coberturas) en este caso para corregir dicha situación se involucraron filtros de valoración de calidad como forma aceptada de procesamiento de los productos del sensor MODIS, descartando así, valores bajos de NDVI por datos de calidad inferior derivada de condiciones climáticas o funcionamiento del sensor, que aportarían información falsa al análisis de las series de tiempo (Roy *et al.*, 2002; Tzitziki Janik *et al.*, 2011). Es decir se podría catalogar una nube como un deslizamiento. En este caso luego de aplicados los filtros de calidad persisten algunos datos bajos aislados (Figura 15, Series QA).

Tabla 6 Cobertura presente en las zonas que fueron clasificadas como comisión

Factor umbral	comisión (pixel)	Cobertura-Proceso	# de pixel	% comisión	Factor umbral	Comisión (pixel)	Cobertura-Proceso	# de pixel	% comisión
0.50%	198	Deforestación	24	12.12%	0.15%	56	Deforestación	8	14.29%
		Procesos erosivos	56	28.28%			Procesos erosivos	14	25.00%
		Cortes	17	8.59%			Cortes	11	19.64%
		Bosques y arbustos	66	33.33%			Bosques y arbustos	17	30.36%
		Pastos	7	3.54%			Pastos	4	7.14%
		Otros	26	13.13%			Otros	2	3.57%
0.35%	112	Deforestación	17	15.18%					
		Procesos erosivos	36	32.14%					
		Cortes	11	9.82%					
		Bosques y arbustos	31	27.68%					
		Pastos	5	4.46%					
		Otros	12	10.71%					

Para esta condición Tzitziki Janik *et al* (2011) reporta que para zonas con fuerte presencia de nubes pueden persistir valores bajos de NDVI por registros no removidos por el filtro de calidad. Esta situación podría explicar en parte el elevado número por comisión en zonas donde la cobertura vegetal que predomina son bosques y arbustos, ya que en la zona de estudio la mayor presencia de esta vegetación está dada por bosque alto andino y bosque húmedo tropical, regiones donde por fenómenos climáticos persisten alta nubosidad y niebla

(CORNARE, 2009). Otra explicación son los cambios en la cobertura que no pudieron ser recogidos al momento de validar los resultados debido a la fecha de los ortomosaicos disponibles. En el caso de los pastos, los valores por comisión pueden estar dados por condiciones de estrés o erosión, en este último caso la respuesta espectral puede ser similar a la que presentan los suelos desnudos (Figura 20, B).

Así mismo los casos de falsas detecciones por actividades agrícolas, vías, cortes de ladera son reportados por investigadores como Rau *et al.*, (2007) y Martha *et al.*, (2010). Para corregir estos casos los autores proponen filtros que permiten eliminar secuencialmente falsas identificaciones a partir de criterios de clasificación lógica que representen dichas condiciones, tales como el MDE, Mapa de coberturas, entre otros (Martha *et al.*, 2010). En el caso específico del sensor MODIS, Lunetta *et al.* (2006) advierten este comportamiento y para analizar los cambios de cobertura se descartan las áreas destinadas a explotación agrícola. Asimismo Yang y Chen (2010) utilizan criterios morfológicos para descartar áreas que pueden ser detectadas como movimiento en masas pero que no se ajustaran a los criterios morfológicos definidos. Ambos autores coinciden en que los filtros son satisfactorios para los alcances planteados en las respectivas investigaciones.

Para el presente estudio se emplearon filtros de pendiente y cobertura. Luego de aplicado estos filtros se tiene que los movimientos en masa detectados (Figura 17) se distribuyen en los frentes erosivos del Cauca y Magdalena y algunos escarpes, en especial en la margen occidental de la región de estudio, la cual corresponde a las superficies erosivas del Cauca cuyo avance posee una eficiencia geomorfológica alta, transformando el relieve colinado en un relieve montañoso de cañones profundos con alturas relativas del orden de 1.200-1.500 m con una red de valles en “V”, profundos y estrechos (Vélez Restrepo, 2006), cuya morfodinámica está definida por la intensidad de los procesos denudativos incluidos los movimientos en masa (Arias, 1996). Por lo anterior podría considerarse la ubicación y concentración espacial de los deslizamientos detectados como un resultado consistente. Para el caso de los cultivos limpios, el filtro por pendiente fue de utilidad para descartar este tipo de usos, ya que estas se desarrollan en zonas de menor pendiente, en especial en la subregión valle de San Nicolás (CORNARE, 2009). En el caso de otras regiones fue de utilidad el mapa de coberturas vegetales.

Después de aplicados los criterios de control, persisten comisiones o “falsas detecciones” asociadas con zonas de deforestación e incendios. Para descartar falsos resultados puede ser de utilidad el empleo de información proveniente del sensor MODIS para la identificación de zonas afectada por incendios forestales (Anaya *et al.*, 2009). En muchos casos estas actividades hacen parte del mismo proceso por lo que podría considerarse una variable lógica para descartar ambas actividades.

Dada la resolución espacial del índice de vegetación NDVI-MODIS, 250 m, esta condición implica que para ser registrado por el sensor MODIS como un pixel puro, el deslizamiento debe ser superior a seis hectáreas o de acuerdo a lo planteado por Lunetta *et al* (2006) en el caso de un pixel mezclado el área removida debe ser superior a 1.5 hectáreas. Sin embargo, algunos de los eventos detectados son inferiores a este valor, lo cual puede estar dado por particularidades que facilitan su identificación, como procesos de remoción en masa sucesivos o acompañados de otros fenómenos (ensanchamiento de canales por flujos torrenciales y procesos erosivos concentrados (Figura 19, A; Figura 20, A)).

Ajenas a los objetivos de la presente investigación, se explora la fiabilidad de cambios en la superficie terrestre con respuesta espectral equivalente a la presentada por un deslizamiento, en este caso la mayor incertidumbre radica en no disponer de información real de cambio de cobertura vegetal, diferente a la usada para valorar los procesos de remoción en masa. Disponer de esta información hubiese permitido estimar el porcentaje de eventos omitidos. Este ejercicio consistió en la inclusión de variaciones adicionales que alteran el valor espectral en el caso de actividades antrópicas (construcciones, deforestación y quema) y procesos erosivos (ver Tabla 7) lo que incrementa la precisión del análisis, con valores de fiabilidad hasta del 67,59% con un error de comisión del 32,41%. Esto podría ser de utilidad para la identificación de movimientos en masa, en especial, para casos donde el análisis se concentre en un evento de gran energía con la capacidad de detonar numerosos movimiento en masa, evento convulsivo (Hermelin y Hoyos, 2010) donde es posible acotar un periodo de análisis específico, el cual se aproxima al método desarrollado por Yang and Chen (2010). Estos emplean dos escenas de NDVI-MODIS pre y post evento para identificar los deslizamientos a partir de la diferencia entre escenas. Con este método es posible descartar el ruido aportado por las variaciones que presenta el NDVI a lo largo de un periodo de análisis mayor, los cuales son causados por cambios en la respuesta espectral de la superficie terrestre por procesos erosivos,

ocupación del territorio con infraestructura asociada, deforestación por actividades agropecuarias o sobreexplotación de los recursos naturales.

La condición anterior es la mayor limitante para la identificación de movimientos en masa y construcción de inventarios regionales de movimientos en masa a partir de series temporales de NDVI-MODIS, ya que aportan un elevado número de falsas detecciones por comisión para largos periodos de análisis, superiores al 75%. Por la incertidumbre de los resultados se requiere de una mayor validación para considerar el método como una forma de valoración primaria. Sin embargo para periodos de tiempos acotados por eventos detonadores, se podría presentar un mayor potencial dada la sensibilidad del método para la identificación de diversos cambios en la superficie terrestre.

Adicional a lo ya mencionado y teniendo en cuenta los niveles inferiores al 50% de Comisión; deslizamientos identificados además de los falsas detecciones, se podría considerar estos resultados como una forma de explorar las series de tiempo del sensor MODIS, como un mecanismo para detectar cambios en la superficie terrestre asociada a intervenciones que impliquen la remoción de la cobertura original, construcciones, minería, tala. Para el caso sería necesario ajustar los umbrales de cambio y las variables lógicas de control, lo anterior es una aproximación a lo planteado por Lunetta *et al* (2006) como un sistema de alerta por cambios en la cobertura vegetal.

Tabla 7 Pixeles detectados como cambio de cobertura para cada factor umbral. Año 2010

Factor umbral	# pixeles cambio	Validados*	Error de clasificación*	Sin validación*	Fiabilidad Cambio de cobertura*	Comisión
0,50%	370	159	89	121	63,86%	36,14%
0,35%	228	98	47	83	67,59%	32,41%
0,15%	129	49	26	54	65,33%	34,67%

*Pixel MODIS

4.3.2 Cambio de cobertura para los años 2003-2013 con series de tiempo NDVI-MODIS

Para este periodo los valores son calculados a partir del factor umbral de 0.35% al cual corresponde un número de 6.92 desviaciones estándar, cifra que se desprende del análisis anterior. Así mismo para esta zona se empleó el mapa de coberturas 2007 disponible para la región CORNARE. La intención de su uso es descartar las zonas destinadas a cultivo limpio. A

pesar de las diferencias temporales de este mapa y el periodo de análisis, la cobertura empleada como filtro es relativamente estable en el tiempo, dado que la mayor presencia de esta unidad se da en las veredas periféricas a las zonas pobladas donde la vocación presenta pocos cambios en el tiempo, dinámica favorecida por el desarrollo vial y la cercanía a centros de comercialización.

En la Figura 21 se observa que para el total de años los pixeles candidatos a movimiento en masa se concentran al sur de la región de estudio. Esta zona coincide con la reserva forestal de la cordillera central. Este territorio presenta zonas boscosas en diferentes niveles de sucesión que van desde bosques secundarios muy intervenidos hasta bosques primarios con poca intervención (CORNARE, 2009). Para este caso se tendrá como criterio de interpretación los valores de fiabilidad global con los niveles de comisión 20.59% los cuales superan el 75% de comisión. Ambos resultados obtenidos para el año 2010.

Tabla 8 Número de pixeles detectados como posibles movimientos en masa

Año	# de pixeles detectados
2003	295
2004	233
2005	195
2006	115
2007	146
2008	399
2009	116
2010*	228
2011	213
2012	138
2013	212

* Resultados obtenidos para el año de calibración.

En tal sentido la concentración de registros en dichas zonas puede estar asociada con condiciones fenológicas, deforestación o el avance de la frontera agrícola. Los dos últimos son reportados como procesos severos que modifican las composición de las coberturas vegetales en esta región (CORNARE, 2009). Además al considerar los resultados de fiabilidad global, un

porcentaje cercano al 20,59% podría corresponder con procesos de remoción en masa. Se consolidan los pixeles de cambio para los 11 años de análisis en la Tabla 8.

Al contrastar los resultados obtenidos contra imágenes de alta resolución espacial (Figura 21), se observa que los registros candidatos a movimientos en masa se ubican en zonas boscosas fragmentadas con predominio de una matriz de pastos. En términos cualitativos la concentración de estos pixeles podría ser coincidente con zonas marcadas por una dinámica de explotación de los recursos y abandono de estas prácticas en los periodos (2000 - 2006) debido a dinámicas político-sociales que se dieron en la región (CORNARE, 2009).

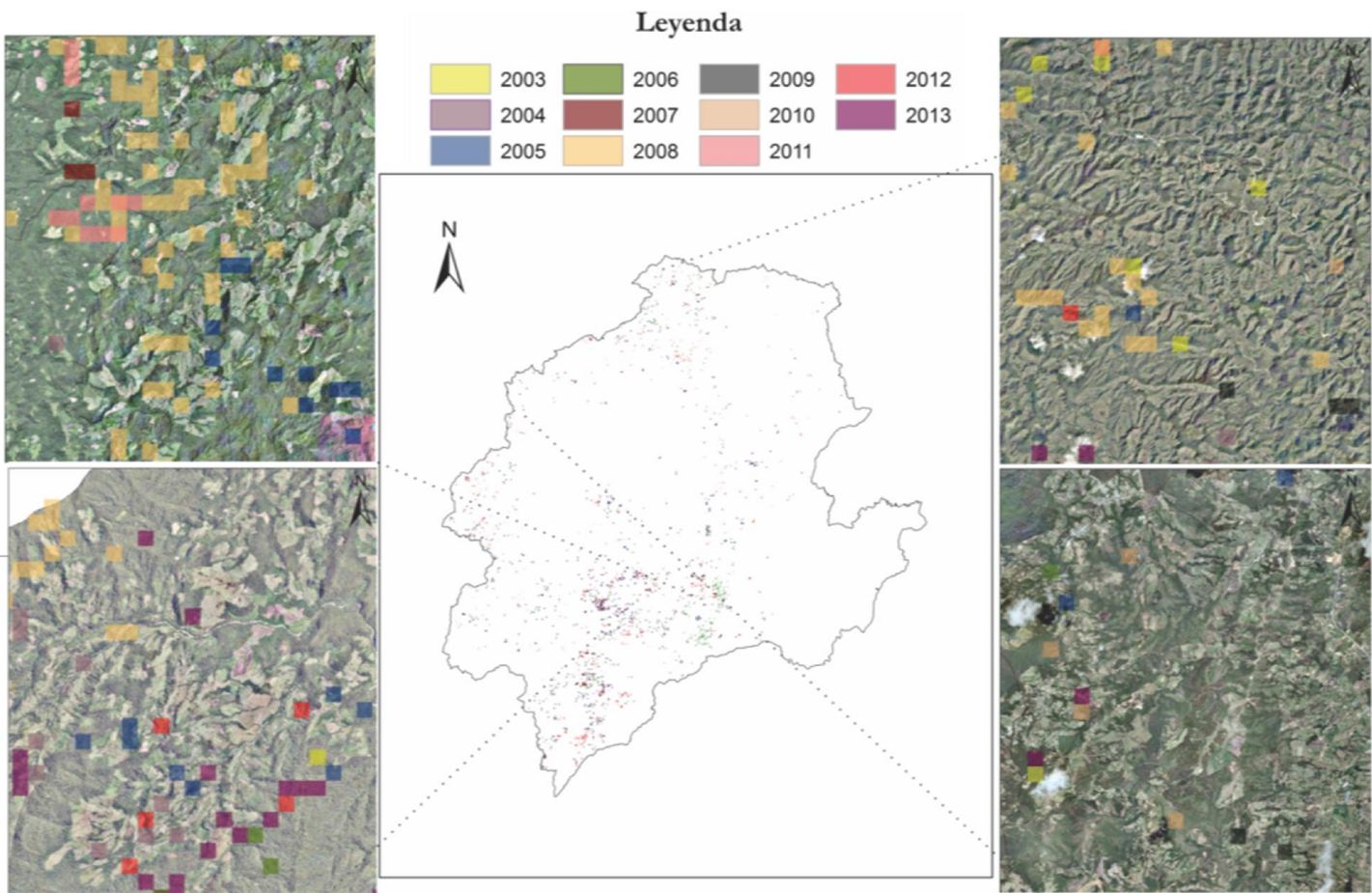


Figura 21 Distribución de la variación anual de la cubierta vegetal asociada con candidatos a movimientos en masa en la zona de estudio

Las imágenes de fondo corresponde con ortomosaicos de alta resolución *Vexcel Ultracam* para el año 2010. La imagen central contiene los pixeles clasificados como candidatos a movimientos en masa para la región de estudio.

Soportado en los resultados obtenidos para el año de calibración, generar inventarios de movimientos en masa a partir de los resultados para los años 2003-2013, podría ser incierto

debido a los niveles de comisión 75% y fiabilidad global 20.99%. No obstante los registros NDVI-MODIS pueden ser útiles representando la alteración en el tiempo por remoción de la cobertura vegetal causado por diversos procesos. 67.59%. En este caso no se dispone de elementos para validar el número de resultados. Los totales son consolidados en la Tabla 8.

También se buscó representar los datos de precipitación como forma de contrastar el comportamiento de los píxeles de cambio (Tabla 8) con valores de precipitación (Figura 22). Este fenómeno hidrometeorológico es reportado como el principal detonante de procesos de remoción en masa en la región andina (Allan *et al.*, 2006; Mantilla *et al.*, 2001). En la Figura 22, se observa cómo los años con registros de precipitación elevados coinciden con la mayor cantidad de píxeles detectados como movimiento en masa. Esta condición podría reflejar en las series 2003-2013 lo analizado para el año 2010, donde el factor umbral recogió cambios en la superficie terrestre asociados con diversos procesos que incluyen los movimientos en masa.

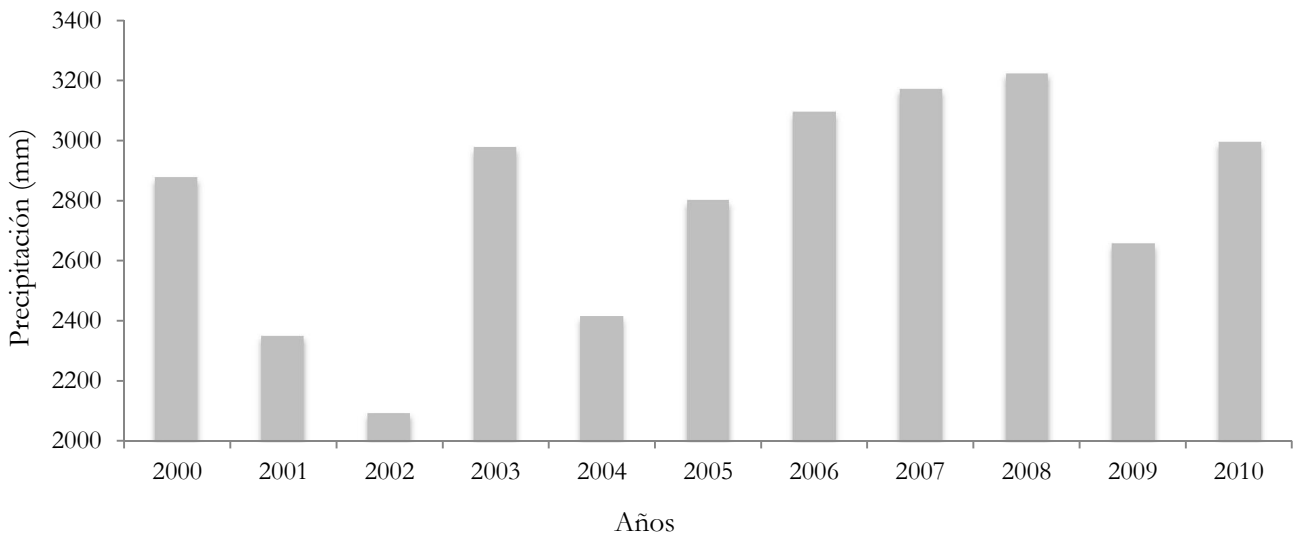


Figura 22. Valores de precipitación promedio anuales para los años del 2000 al 2010

La serie se construyó con los promedios anuales de precipitación de los años 2000 a 2012 tomando datos de la estación San Miguel, del corregimiento del mismo nombre del municipio de Sonsón.

5. Conclusiones

Sobre el método

El desarrollo de aplicaciones con un alto grado de automatización es de utilidad en las estrategias regionales de gestión del riego por fenómenos geológicos. Esto permite a escala regional el análisis de parámetros ambientales intrínsecos a estos procesos, en especial cuando otro tipo de registros no se encuentra disponible.

El método presenta limitaciones en la generación de inventarios de movimientos en masas a escala regional, ya que la detección de superficies afectadas presenta una limitada precisión, fiabilidad del 20,99%, debido a la variabilidad de la superficie terrestre durante tiempos prolongados, lo cual se asocia con procesos antrópicos u otros fenómenos naturales.

Es útil para clasificaciones automáticas de variaciones temporales y espaciales de la cobertura superficial (procesos erosivos, tala, cortes y movimientos en masa) con una fiabilidad global de 67,59%. Sin embargo para periodos prolongados se dificulta asociar los cambios a un proceso específico. Esto se puede corregir con un mayor número de variables lógicas para el control de los resultados.

Es eficiente en términos de disponibilidad de información, costos y procesamiento, lo que puede considerarse como un insumo primario para la caracterización de áreas afectadas por fenómenos geológicos. Su mayor potencial puede estar dado en la documentación de movimientos en masa ocurridos en un periodo de tiempo específico, como eventos sucesivos detonados por fenómenos naturales de gran energía (altas precipitaciones o sismos).

Se requiere de conocimientos en programación y de sistemas de información geográfica.

Sobre los datos NDVI-MODIS

La disponibilidad de información a una escala temporal de ocho días de la superficie terrestre, permite la caracterización regional para zonas de difícil acceso. Situación frecuente en regiones cuyo territorio es amplio y montañoso. Sin embargo la incertidumbre en la variación asociada con movimientos en masa limita el uso de datos en la construcción de series temporales.

La detección de modificaciones en zonas no agrícolas por la remoción de la cobertura vegetal, es de utilidad para el desarrollo de un sistema de alerta a causa de cambios en la superficie terrestre.

Estos permiten detectar a partir de registros multitemporales consistentes, cambios en la cobertura superficial como punto de partida para esfuerzos de mayor complejidad, los cuales demandan de tiempo y dinero. Debido a su baja resolución espacial no reemplaza los alcances de imágenes de escala media-alta espacial, los cuales permiten identificar e incluso caracterizar el tipo de movimiento.

La limitada información para la validación de los resultados, dificulta el definir con certeza el nivel de precisión del método. Son necesarias otras formas de validación pre y post evento de manera que se incremente su confiabilidad.

Sobre los Alcances y trabajo futuro

Para largos periodos de tiempo la detección de movimientos en masa es limitado, sin embargo el producto NDVI-MODIS lograría perfilar una herramienta para la caracterización de zonas alteradas a causa de diversos procesos, configurando un sistema de alerta por remoción de la cobertura vegetal.

La investigación permite desarrollar los objetivos propuestos, donde a partir de un método automatizado NDVI-MODIS se genera un inventario regional de zonas afectadas por movimientos en masa. De estos resultados se obtienen rendimientos que deberán ser examinados para detectar remociones en la cobertura asociado a otras dinámicas; minería, construcciones, agricultura además de zonas afectadas a escala regional por procesos erosivos concentrados.

Se deben incluir en la metodología de manera explícita variables lógicas como explicación de diversos procesos que alteran la superficie terrestre, por ejemplo focos de calor del sensor MODIS para el caso de incendios. También ajustar los filtros de pendiente para procesos de remoción de la cobertura terrestre diferentes a movimientos en masa.

Para el territorio de la corporación autónoma regional CORNARE, podría ser de utilidad el empleo del método a una escala semanal para cuantificar las zonas afectadas para la ampliación de la frontera agrícola, zonas destinadas a minería e intervenciones con fines constructivos.

6. Bibliografía

- Aguilar, A.M., Bedoya, G., Hermelin, M., 2008. Inventario de los desastres de origen natural en Colombia, 1970-2006. Limitantes, tendencias y necesidades futuras. *Gestión y Ambient.* 11, 109–120.
- Allan, B., Yewande, A., Peter, B., Carolina, U., 2006. CONVIVIR CON LOS DESASTRES NATURALES, in: Sánchez-Triana, E., Ahmed, K., Yewande, A. (Eds.), *Prioridades Ambientales Para La Reducción de La Pobreza En Colombia Un Análisis Ambiental Del País Para Colombia*. Banco Mundial en coedición con Mayol Ediciones S.A, Washington DC, USA, p. 522.
- Anaya, J. a., Chuvieco, E., Palacios-Orueta, A., 2009. Aboveground biomass assessment in Colombia: A remote sensing approach. *For. Ecol. Manage.* 257, 1237–1246. doi:10.1016/j.foreco.2008.11.016
- Anaya, J.A., 2009. Departamento de geografía estimación mensual de emisiones por biomasa quemada para colombia basado en imágenes de satélite. Universidad de Alcalá.
- Arango, M., Branch, J.W., Botero, V., 2005. CLASIFICACIÓN NO SUPERVISADA DE COBERTURAS VEGETALES SOBRE IMÁGENES DIGITALES DE SENSORES REMOTOS : “LANDSAT – ETM + .” *Rev.Fac.Nal.Agr.*
- Arias, A., 2011. Estructura, Clasificación y Evolución del relieve en el departamento de Antioquia, in: Posada, R.C., Piedrahíta, Á.I. (Eds.), *FLORA DE ANTIOQUIA CATÁLOGO DE LAS PLANTAS VASCULARES*. Programa Expedición Antioquia-2103. Series Biodiversidad y Recursos Naturales. Universidad de Antioquia, Missouri Botanical Garden & Oficina de planeación departamental de la gobernación de Antioquia. Editorial D Vinni, Bogotá, Medellín, Colombia, p. 299 Vol I.
- Arias, L., 1995. El relieve de la zona central de Antioquia: Un palimpsesto de eventos tectónicos y climáticos. ... *Fac. Ing. Univ. Antioquia*.
- Arias, L., 1996. Altiplanos y cañones en Antioquia: Una mirada genética. ... *Fac. Ing. Univ. Antioquia*.
- Aristizábal, E., Martínez, H., Vélez, J., 2010. Una revisión sobre el estudio de movimientos en masa detonados por lluvias. *Rev. Acad. Colomb. Cienc XXXIV*, 209–227.
- Barona, E., Giron, E., Feistner, K., Dwyer, J., Glenn Hyman, 2006. Metodo de procesamiento de imagenes modis para colombia 1–7.
- Bathurst, J.C., Bovolo, C.I., Cisneros, F., 2010. Modelling the effect of forest cover on shallow landslides at the river basin scale. *Ecol. Eng.* 36, 317–327. doi:10.1016/j.ecoleng.2009.05.001
- Beguiría, S., 2006. Changes in land cover and shallow landslide activity: A case study in the Spanish Pyrenees. *Geomorphology* 74, 196–206. doi:10.1016/j.geomorph.2005.07.018
- Cheng, K.S., Wei, C., Chang, S.C., 2004. Locating landslides using multi-temporal satellite images. *Adv. Sp. Res.* 33, 296–301. doi:10.1016/S0273-1177(03)00471-X
- Chorowicz, J., Scanvic, J.Y., Rouzeau, O., Cuervo, G.V., 1998. Observation of recent and active landslides from SAR ERS-1 and JERS-1 imagery using a stereo-simulation approach: Example of the Chicamocha valley in Colombia. *Int. J. Remote Sens.* 19, 3187–3196. doi:10.1080/014311698214253

- Chu, H.-J., Lin, Y.-P., Huang, Y.-L., Wang, Y.-C., 2009. Detecting the land-cover changes induced by large-physical disturbances using landscape metrics, spatial sampling, simulation and spatial analysis. *Sensors* (Basel). 9, 6670–700. doi:10.3390/s90906670
- Clark, M.L., Aide, T.M., Grau, H.R., Riner, G., 2010. A scalable approach to mapping annual land cover at 250 m using MODIS time series data: A case study in the Dry Chaco ecoregion of South America. *Remote Sens. Environ.* 114, 2816–2832. doi:10.1016/j.rse.2010.07.001
- Colditz, R., Conrad, C., Wehrmann, T., Schmidt, M., Dech, S., 2006. Generation and Assessment of MODIS Time Series using Quality Information. *IEEE Int. Symp. Geosci. Remote Sens.* 779–782. doi:10.1109/IGARSS.2006.200
- Colditz, R.R., Conrad, C., Wehrmann, T., Schmidt, M., Dech, S., 2008. TiSeG: A Flexible Software Tool for Time-Series Generation of MODIS Data Utilizing the Quality Assessment Science Data Set. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 46, 3296–3308. doi:10.1109/TGRS.2008.921412
- CORNARE, 2009. PLAN DE GESTIÓN AMBIENTAL REGIONAL 2009-2034 [WWW Document]. PGAR. URL http://www.cornare.gov.co/Visibilidad_y_transparencia/PGAR/PGAR_2009-2034.PDF
- CORNARE, 2012. Evaluación y zonificación de Riesgo y dimensionamiento de Procesos en los 26 municipios de la jurisdicción de CORNARE. Inédito.
- Cornare, Gobernación de Antioquia, 2012. Evaluación y Zonificación de Riesgos por avenida torrencial, inundación y movimiento en masa y dimensionamiento de procesos erosivos en el Municipio de San Francisco/Cornare, Gobernación de Antioquia. Divegráficas, San Francisco.
- Csima, P., 2010. Urban Development and Anthropogenic Geomorphology, in: Szabó, J., Dávid, L., Lóczy, D. (Eds.), *Anthropogenic Geomorphology*. Springer, p. 300.
- Cuervo, G., 1994. EVALUACIÓN DE IMÁGENES DE SATÉLITE SPOT-LANDSAT Y SAR ERS-1 EN LA CARTOGRAFÍA DE MOVIMIENTOS EN MASA. *Use Appl. ERS Lat. Am. Proc. an Int. Semin. held Novemb. 25-29 1996*. 109.
- Dash, J., Curran, P.J., Foody, G.M., 2008. Remote sensing of terrestrial chlorophyll content, in: *Global Climatology and Ecodynamics*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin Heidelberg.
- Dhakal, A.S., Amada, T., Aniya, M., 2000. Landslide Hazard Mapping and its Evaluation Using GIS: An Investigation of Sampling Schemes for a Grid-Cell Based Quantitative Method. *Photogramm. Eng. Remote Sens.* 66, 981–989.
- Didan, K., Huete, A., 2006. MODIS Vegetation Index Product Series Collection 5 Change Summary [WWW Document]. URL <http://>
- Disabato, F., 2010. REMOTE SENSING DATA ANALYSIS FOR ENVIRONMENTAL AND HUMANITARIAN PURPOSES. The automation of information extraction from free satellite data. Politécnico Di Torino.
- Domenikiotis, C., Loukas, a., Dalezios, N.R., 2003. The use of NOAA/AVHRR satellite data for monitoring and assessment of forest fires and floods. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 3, 115–128. doi:10.5194/nhess-3-115-2003
- Fang, H., Jiang, C., Li, W., Wei, S., Baret, F., Chen, J.M., Garcia-Haro, J., Liang, S., Liu, R., Myneni, R.B., Pinty, B., Xiao, Z., Zhu, Z., 2013. Characterization and intercomparison of global moderate resolution leaf area index

-
- (LAI) products: Analysis of climatologies and theoretical uncertainties. *J. Geophys. Res. Biogeosciences* 118, 529–548. doi:10.1002/jgrg.20051
- Fell, R., Corominas, J., Bonnard, C., Cascini, L., Leroi, E., Savage, W.Z., 2008. Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use planning. *Eng. Geol.* 102, 85–98. doi:10.1016/j.enggeo.2008.03.022
- Gallego, J.J., 2012. Análisis geomorfológico como apoyo a la búsqueda de actividad neotectónica en el Oriente Antioqueño (Oriente Cercano a la ciudad de Medellín). Análisis geomorfológico como apoyo a la búsqueda Act. neotectónica en el Oriente Antioqueño (Oriente Cercano a la Ciudad Medellín) Trab. fin carrera (en edición), Univ. Nac. Colomb. Medellín. Universidad Nacional de Colombia.
- Galli, M., Ardizzone, F., Cardinali, M., Guzzetti, F., Reichenbach, P., 2008. Comparing landslide inventory maps. *Geomorphology* 94, 268–289. doi:10.1016/j.geomorph.2006.09.023
- García, N., Ferreira, R., Latrubesse, E., 2009. Climate and Geomorphologic-related disasters in Latin America, in: Latrubesse, M. (Ed.), *Developments in Earth Surface* Elsevier, pp. 1–27. doi:10.1016/S0928-2025(08)10001-3
- GEMMA, P.M.A.G. para las C.A., 2007. *Movimientos en Masa en la Región Andina: Una guía para la evaluación de amenazas*, 4th ed, (PMA:GCA). (PMA:GCA). Publicación Geológica Multinacional.
- Grigera, G., Oesterheld, M., Pacín, F., 2007. Monitoring forage production for farmers' decision making. *Agric. Syst.* 94, 637–648. doi:10.1016/j.agsy.2007.01.001
- Guzzetti, F., Cesare, A., Cardinali, M., Fiorucci, F., Santangelo, M., Chang, K., 2012. Earth-Science Reviews Landslide inventory maps : New tools for an old problem. *Earth Sci. Rev.* 112, 42–66. doi:10.1016/j.earscirev.2012.02.001
- Hermelin, M., 1992. Los suelos del oriente antioqueño un recurso no renovable. *Bull. Inst. fr. études Andin.*
- Hermelin, M., 2003. El paisaje antioqueño: otra perspectiva. *Revista Universidad EAFIT*, número 130, pp. 19 – 29. Medellín, Abril – Junio de 2003.
- Hermelin, M., 2005. *Desastres de origen natural en Colombia 1979–2004*, 1st ed. Colombia: Universidad EAFIT, OSSO-Univalle, Medellín, Colombia.
- Hermelin, M., Hoyos, N., 2010. Convulsive Events , a Widespread Hazard in the Colombian Andes, First Edit. ed, *NATURAL HAZARDS AND HUMAN-EXACERBATED DISASTERS IN LATIN AMERICA*. Elsevier. doi:10.1016/S0928-2025(08)10007-4
- Hervás, J., Bobrowsky, P., 2009. Mapping: inventories, susceptibility, hazard and risk, in: Sassa, K., Tsuchiya, S., Casagli, N., Canuti, P. (Eds.), *Landslides-Disaster Risk Reduction*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, pp. 321–349.
- Huete, A., Didan, K., Miura, T., Rodriguez, E.P., Gao, X., Ferreira, L.G., 2002. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sens. Environ.* 83, 195–213.
- Huete, A., Justice, C., Leeuwen, W. van, 1999. MODIS vegetation index (MOD 13). Version 3. Algorithm theoretical basis document. ... MD NASA, Goddard Sp. Flight Cent. ... 129.

- Huete, A., Solano Barajas, R., Glenn P., E., Restrepo Coupe, N., 2011. Monitoreo de propiedades y procesos ecosistémicos con índices de vegetación MODIS, in: Mas, J.-F. (Ed.), *Aplicaciones Del Sensor MODIS Para El Monitoreo Del Territorio*. México, D.F, p. 318.
- Inteinsa, 2013. Evaluación del efecto de las voludaras en la estabilidad de las laderas alledañas al tuesel de la PCH El Popal. Medellín, Colombia.
- Iwahashi, J., Kamiya, I., Yamagishi, H., 2012. High-resolution DEMs in the study of rainfall- and earthquake-induced landslides: Use of a variable window size method in digital terrain analysis. *Geomorphology* 153-154, 29–38. doi:10.1016/j.geomorph.2012.02.002
- Justice, C., Townshend, J.R., Vermote, E., Masuoka, E., Wolfe, R., Saleous, N., Roy, D., Morisette, J., 2002. An overview of MODIS Land data processing and product status. *Remote Sens. Environ.* 83, 3–15. doi:10.1016/S0034-4257(02)00084-6
- Klimeš, J., Rios Escobar, V., 2010. A landslide susceptibility assessment in urban areas based on existing data: an example from the Iguaná Valley, Medellín City, Colombia. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 10, 2067–2079. doi:10.5194/nhess-10-2067-2010
- Knipling, E.B., 1970. Physical and Physiological Basis for the Reflectance of Visible and Near-Infrared Radiation from Vegetation. *Remote Sens. Environ.* 1, 155–159. doi:http://dx.doi.org/10.1016/S0034-4257(70)80021-9
- Laake, P.E. Van, Sanchez, G.A., 2005. Mapping PAR using MODIS atmosphere products. *Remote Sens. Environ.* 94, 554–563. doi:10.1016/j.rse.2004.11.011
- Lacasse, S., Nadim, F., 2009. Landslide risk assessment and mitigation strategy. *Landslides–Disaster Risk Reduct.* 31–61.
- Lin, C.-Y., Lo, H.-M., Chou, W.-C., Lin, W.-T., 2004. Vegetation recovery assessment at the Jou-Jou Mountain landslide area caused by the 921 Earthquake in Central Taiwan. *Ecol. Modell.* 176, 75–81. doi:10.1016/j.ecolmodel.2003.12.037
- Lin, W.-T., Lin, C.-Y., Chou, W.-C., 2006. Assessment of vegetation recovery and soil erosion at landslides caused by a catastrophic earthquake: A case study in Central Taiwan. *Ecol. Eng.* 28, 79–89. doi:10.1016/j.ecoleng.2006.04.005
- Lunetta, R.S., Knight, J.F., Ediriwickrema, J., Lyon, J.G., Worthy, L.D., 2006. Land-cover change detection using multi-temporal MODIS NDVI data. *Remote Sens. Environ.* 105, 142–154. doi:10.1016/j.rse.2006.06.018
- Magrin, G., García, C.G., Choque, D.C., Giménez, J.C., Moreno, A.R., Nagy, G.J., Nobre, C., Villamizar, A., 2007. Latin America, in: M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der L. and C.E.H. (Ed.), *Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, Cambridge, UK, pp. 581–615.
- Mantilla, G., De la torre, L., Gómez, C., Ordoñez, N., J.L., C., Euscategui, C., Perez, P., Perez, S., Martínez, N., Sanchez, R., Maldonado, N., Pérez, S., Gaitán, J., Chaves, L., Chamorro, C., Florez, A., 2001. Los Suelos: Estabilidad, Productividad y Degradación, in: *El Medio Ambiente En ... LEIVA*, Bogota-Colombia, pp. 228–227.
- Mantovani, F., Soeters, R., Westen, C. Van, 1996. Remote sensing techniques for landslide studies and hazard zonation in Europe. *Geomorphology* 15.

-
- Marceau, D., 1999. The scale issue in social and natural sciences. *Can. J. Remote Sens.* 25, 347–356.
- Marceau, D., Hay, G., 1999. Remote sensing contributions to the scale issue. *Can. J. Remote Sens.* 25, 357–366.
- Marcelino, E.V., Formaggio, A.R., Maeda, E.E., 2009. Landslide inventory using image fusion techniques in Brazil. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.* 11, 181–191. doi:10.1016/j.jag.2009.01.003
- Martha, T.R., Kerle, N., Jetten, V., van Westen, C.J., Kumar, K.V., 2010. Characterising spectral, spatial and morphometric properties of landslides for semi-automatic detection using object-oriented methods. *Geomorphology* 116, 24–36. doi:10.1016/j.geomorph.2009.10.004
- Martínez, N., Hernández, J., Cano, C., Rodríguez, J., León, J., Alberto, J., 2001. Los suelos : estabilidad , productividad y degradación, in: IDEAM (Ed.), *El Medio Ambiente En Colombia*. Bogota-Colombia, pp. 228–277.
- Marulanda, M., Cardona, O., Barbat, A., 2010. Revealing the socioeconomic impact of small disasters in Colombia using the DesInventar database. *Disasters* 34, 552–570. doi:10.1111/j.0361
- Mas, J., 2011. *Aplicaciones del sensor MODIS para el monitoreo del territorio*, 1st ed, books.google.com. Instituto Nacional de Ecología, México, D.F.
- Mejía, F., Mesa, O., Poveda, G., Vélez, J., 1999. Distribución espacial y ciclos anual y semianual de la precipitación en Colombia. *DYNA* 127.
- Metternicht, G., Hurni, L., Gogu, R., 2005. Remote sensing of landslides: An analysis of the potential contribution to geo-spatial systems for hazard assessment in mountainous environments. *Remote Sens. Environ.* 98, 284–303. doi:10.1016/j.rse.2005.08.004
- Miliareisis, G., Sabatakakis, N., Koukis, G., 2005. Terrain Pattern Recognition and Spatial Decision Making for Regional Slope Stability Studies. *Nat. Resour. Res.* 14, 91–100. doi:10.1007/s11053-005-6951-3
- Mondini, A.C., Chang, K.-T., Yin, H.-Y., 2011. Combining multiple change detection indices for mapping landslides triggered by typhoons. *Geomorphology* 134, 440–451. doi:10.1016/j.geomorph.2011.07.021
- Moreno, H., Vélez, M., 2006. La lluvia y los deslizamientos de tierra en Antioquia: análisis de su ocurrencia en las escalas interanual, intraanual y diaria. *Rev. EIA Número* 5, 59–69.
- Mugagga, F., Kakembo, V., Buyinza, M., 2012. Land use changes on the slopes of Mount Elgon and the implications for the occurrence of landslides. *Catena* 90, 39–46. doi:10.1016/j.catena.2011.11.004
- Myneni, R., Hall, F., 1995. The interpretation of spectral vegetation indexes. ... *Remote Sensing*, ... 33, 0–5.
- Nossin, J., 2000. Monitoring of hazards and urban growth in Villavicencio, Colombia, using scanned air photos and satellite imagery. *GeoJournal*.
- Peduzzi, P., 2010. Landslides and vegetation cover in the 2005 North Pakistan earthquake: a GIS and statistical quantitative approach. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 10, 623–640. doi:10.5194/nhess-10-623-2010
- Poveda, G., 2004. La hidroclimatología de Colombia: una síntesis desde la escala inter-decadal hasta la escala diaria. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.*

- Poveda, G., Waylen, P.R., Pulwarty, R.S., 2006. Annual and inter-annual variability of the present climate in northern South America and southern Mesoamerica. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 234, 3–27. doi:10.1016/j.palaeo.2005.10.031
- Rau, J., Chen, L., Liu, J., Wu, T., 2007. Dynamics Monitoring and Disaster Assessment for Watershed Management Using Time-Series Satellite Images. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 45, 1641–1649.
- Restrepo, S., Foster, D., Stockli, D., Parrasanchez, L., 2009. Long-term erosion and exhumation of the “Altiplano Antioqueño”, Northern Andes (Colombia) from apatite (U–Th)/He thermochronology. *Earth Planet. Sci. Lett.* 278, 1–12. doi:10.1016/j.epsl.2008.09.037
- Rickli, C., Graf, F., 2009. Effects of forests on shallow landslides – case studies in Switzerland. *For. Snow Landsc. Res.* 33–44.
- Roy, D.P., Borak, J.S., Devadiga, S., Wolfe, R.E., Zheng, M., Desclotres, J., 2002. The MODIS Land product quality assessment approach. *Remote Sens. Environ.* 83, 62–76. doi:10.1016/S0034-4257(02)00087-1
- Sánchez, E., Ahmed, K., Awe, Y., 2006. Prioridades ambientales para la reducción de la pobreza en Colombia Un análisis ambiental del país para Colombia, 1st ed. Bogota-Colombia.
- Sánchez-Cuervo, A.M., Aide, T.M., Clark, M.L., Etter, A., 2012. Land cover change in Colombia: surprising forest recovery trends between 2001 and 2010. *PLoS One* 7, e43943. doi:10.1371/journal.pone.0043943
- Schowengerdt, R., 2006. *Remote sensing: models and methods for image processing*, 3rd ed. Elsevier Academic Press.
- Sidle, R., Ochiai, H., 2006. *Landslides: processes, prediction, and land use*, Vol. 18. ed. American Geophysical Union.
- Singhroy, V., 2009. Satellite remote sensing applications for landslide detection and monitoring, in: Sassa, K., Tsuchiya, S., Casagli, N., Canuti, P. (Eds.), *Landslides: Disaster Risk Reduction*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin Heidelberg, pp. 143–158.
- Solano, R., Didan, K., Jacobson, A., Huete, A., 2010. *MODIS Vegetation Index User’s Guide (MOD13 Series)*. Univ. Arizona.
- Tzitziki Janik, G.M., Mas, J.-F., Hinkley, E.A., 2011. Una revisión del uso de MODIS para el mapeo y monitoreo de las cubiertas terrestres, in: Mas, J.-F. (Ed.), *Aplicaciones Del Sensor MODIS Para El Monitoreo Del Territorio*. México, D.F, p. 318.
- Van Leeuwen, W.J.D., Orr, B.J., Marsh, S.E., Herrmann, S.M., 2006. Multi-sensor NDVI data continuity: Uncertainties and implications for vegetation monitoring applications. *Remote Sens. Environ.* 100, 67–81. doi:10.1016/j.rse.2005.10.002
- Varnes, D.J., 1978. Landslide types and processes. Slope movements types Process. en Schuster R.L., y Krizek R.J., ed, *Landslides Anal. Control Washingt. D. C., Natl. Acad. Press. Transp. Res. Board Spec. Rep.* 176, p. 9–33.
- Vélez Restrepo, M., 2006. Caracterización de facetas en un sector del cañón del río Buey mediante MDE. Universidad Nacional de Colombia.

-
- Walsh, S.J., Butler, D.R., Malanson, G.P., 1998. An overview of scale, pattern, process relationships in geomorphology: a remote sensing and GIS perspective. *Geomorphology* 21, 183–205. doi:10.1016/S0169-555X(97)00057-3
- Wang, W., Qu, J.J., Hao, X., Liu, Y., Stanturf, J.A., 2010. Agricultural and Forest Meteorology Post-hurricane forest damage assessment using satellite remote sensing 150, 122–132. doi:10.1016/j.agrformet.2009.09.009
- Westen, C.J. Van, Castellanos, E., Kuriakose, S.L., 2008. Spatial data for landslide susceptibility , hazard , and vulnerability assessment : An overview. *Eng. Geol.* 102, 112–131. doi:10.1016/j.enggeo.2008.03.010
- Wolfe, R.E., Nishihama, M., Fleig, A.J., Kuyper, J. a., Roy, D.P., Storey, J.C., Patt, F.S., 2002. Achieving sub-pixel geolocation accuracy in support of MODIS land science. *Remote Sens. Environ.* 83, 31–49. doi:10.1016/S0034-4257(02)00085-8
- Woodcock, C., Strahler, A., 1987. The factor of scale in remote sensing. *Remote Sens. Environ.*
- Xiang, G., Huete, A., Didan, K., 2003. Multisensor comparisons and validation of modis vegetation indices at the semiarid jornada experimental range. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 41, 2368–2381. doi:10.1109/TGRS.2003.813840
- Xiao, X., Boles, S., Liu, J., Zhuang, D., Frohling, S., Li, C., Salas, W., Moore, B., 2005. Mapping paddy rice agriculture in southern China using multi-temporal MODIS images. *Remote Sens. Environ.* 95, 480–492. doi:10.1016/j.rse.2004.12.009
- Xiong, X., Wolfe, R., Barnes, W., Guenther, B., Vermote, E., Saleous, N., Salomonson, V., 2011. Terra and Aqua MODIS Design, Radiometry, and Geometry in Support of Land Remote Sensing, in: Ramachandran, B., Justice, C.O., Abrams, M.J. (Eds.), *Land Remote Sensing and Global Environmental Change, Remote Sensing and Digital Image Processing*. Springer New York, New York, NY. doi:10.1007/978-1-4419-6749-7
- Yang, W., Wang, M., Shi, P., 2013. Using MODIS NDVI Time Series to Identify Geographic Patterns of Landslides in Vegetated Regions. *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.* 10, 707–710. doi:10.1109/LGRS.2012.2219576
- Yang, X., Chen, L., 2010. Using multi-temporal remote sensor imagery to detect earthquake-triggered landslides. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.* 12, 487–495. doi:10.1016/j.jag.2010.05.006
- Zhang, W., Lin, J., Peng, J., Lu, Q., 2010. Estimating Wenchuan Earthquake induced landslides based on remote sensing. *Int. J. Remote Sens.* 31, 3495–3508. doi:10.1080/01431161003727630

Anexo A. Programación para la sustraer los bits de calidad (LDOPE) 2. Algoritmo para la identificación de candidatos de movimientos en masa (IDL)

El siguiente algoritmo fue empleado como forma de ejemplo LDOPE

1.

```
mask_sds -of=D:\Tesis\Mask_QA\2004\MOD13Q1.A2004001.h10v08.005.2007234181748.hdf -
fill=-9999 -sds="250m 16 days NDVI" -
mask="MOD13Q1.A2004001.h10v08.005.2007234181748.hdf,250m 16 days VI Quality,0-1==00,
OR,*,*,0-1==01,AND,*,*,6-7==00,OR,*,*,6-7==01,OR,*,*,6-
7==10,AND,*,*,10==0,AND,*,*,15==00,AND,*,*,250m 16 days blue reflectance,<2000" -meta
MOD13Q1.A2004001.h10v08.005.2007234181748.hdf
```

2. El siguiente algoritmo fue empleado como forma de ejemplo IDL

pro tesis

```
;Metadatos=(C:\Users\usuario\Documents\NDVI\2009-
2010\MOD13Q1.A2000049.h10v08.005.2006269133402.hdf)
;nCDF_Browser, Metadatos ; metadata
```

```
;area de estudio -8367890.9732E      603001.5006N      -8367890.9732E      730.644,154N
;                2278                2196                2848                1646
;Tamaño de celda= 231.656358263889
```

```
!Path = Expand_Path('+C:\Program Files(x86)\ITT\IDL71\lib\coyote') + '!' + !Path
```

```
TIME = "
Element=48
;Umbral=0.35      ,0.50%=6.928201
;Threshold=6.928205 ;0.15%=6.928205
Threshold=6.928203 ;0.35%=6.928203
;Threshold=6.928201 ;0.50%=6.928201
```

Print, 'Se inicia el procesamiento del producto MOD13 del sensor MODIS'

Print, 'Que año desea analizar?'

; Read input from the terminal:

Read, TIME, Prompt='Enter Año:'

```
;_____// sustraer "julday"//_____
```

```
Path_E=filepath('2000-2013',root_dir='C:\', subdir=['Users','w7','Documents','NDVI'])
```

```
File_time=file_search(Path_E, 'MOD13Q1.*.HDF'); BUSCAR TODOS LOS ARCHIVOS QUE CUMPLEN
ESTA CONDICION
```

```
Path_S=filepath(TIME,root_dir='D:\',subdir=['Tesis','Imagen'])
```

```
Path_NDVI=filepath(TIME,root_dir='D:\',subdir=['Tesis','NDVI'])
```

```
Path_MASK=filepath(TIME,root_dir='D:\',subdir=['Tesis','Mask'])
```

```
File=file_search(Path_NDVI, 'MOD13Q1.*.HDF')
```

```
File=File[sort(File)]
```

```
File_MASK=file_search(Path_MASK, 'MOD13Q1.*.HDF')
```

```
File_MASK=File_Mask[sort(File_MASK)]
```

```
year=intarr(586)
```

```
doy=intarr(586)
```

```
month=intarr(586)
```

```
day=intarr(586)
```

```
ndias=[31,28,31,30,31,30,31,31,30,31,30,31]
```

```
ndiasAc=intarr(12)
```

```
for i=0,586-1 do begin
```

```
frase=file_time(i)
```

```
;strpos(file,'MOD13Q1.A')
```

```
year(i)=strmid(frase,46,4)
```

```
if year(i) eq 2000 or year(i) eq 2004 or year(i) eq 2008 or year(i) eq 2012 then ndias(1)=29 else ndias(1)=28
```

```
for j=0,11 do ndiasAc(j)=total(ndias(0:j))
```

```
doy(i)=strmid(frase,50,3)
```

```
menores=where(ndiasAc lt doy(i),n)
```

```
month(i)=n+1
```

```
if doy(i) le 31 then day(i)=doy(i) else day(i)=doy(i)-ndiasAc(n-1)
```

```
endfor
```

```
tiempo=julday(month,day,year)
```

```
DATEFORMAT=LABEL_DATE(DATE_FORMAT=[ '%D/%N', '%Y'])
```

```
; _____//Inicia lectura de datos de NDVI// _____
```

```
GRID_NAME='MODIS_Grid_16DAY_250m_500m_VI'
```

```
DATAFIELD_NAME='250m 16 days NDVI'
```

```
DATAFIELD_NAME2='STRUCTMETADATA.0'
```

```
NDVI=ftarr(565,551,48)
```

```
for i = 0,Element-1 do begin
```

```
print,'--Procesando la escena NDVI...' + strcompress(i+1) + ' de ' + strcompress(n_elements(File))
```

```
;input_File = File[i]
```

```
input_File = File[i]; exclusivo del año 2010
```

```
file_id = EOS_GD_OPEN(input_File)
```

```
grid_id = EOS_GD_ATTACH(file_id, GRID_NAME)
```

```
status = EOS_GD_READFIELD(grid_id, DATAFIELD_NAME, data) ; Leer los datos, El nuevo Array -
DATA-, lo renombro(NDVI_3D)
```

```
NDVI(*,*,i)=data(2278:2842,1647:2197); line; fila, sample: columna,
```

```
;print,status
```

```

status = EOS_GD_DETACH(grid_id)
status = EOS_GD_CLOSE(file_id)
NEW_FID=HDF_SD_START(input_File, /READ)
index=HDF_SD_NAMETOINDEX(NEW_FID, DATAFIELD_NAME)
thisSdsID=HDF_SD_SELECT(NEW_FID, index)

long_name_index=HDF_SD_ATTRFIND(thisSdsID, 'long_name')
HDF_SD_ATTRINFO, thisSdsID, long_name_index, DATA=long_name

units_index=HDF_SD_ATTRFIND(thisSdsID, 'units')
HDF_SD_ATTRINFO, thisSdsID, units_index, DATA=units

valid_range_index=HDF_SD_ATTRFIND(thisSdsID, 'valid_range')
HDF_SD_ATTRINFO, thisSdsID, valid_range_index, data=valid_range

scale_index=HDF_SD_ATTRFIND(thisSdsID, 'scale_factor')
HDF_SD_ATTRINFO, thisSdsID, scale_index, DATA=scale_factor

offset_index=HDF_SD_ATTRFIND(thisSdsID, 'add_offset')
HDF_SD_ATTRINFO, thisSdsID, offset_index, DATA=offset

fillvalue_index=HDF_SD_ATTRFIND(thisSdsID, '_FillValue')
HDF_SD_ATTRINFO, thisSdsID, fillvalue_index, data=fillvalue

HDF_SD_ENDACCESS, thisSdsID
HDF_SD_END, NEW_FID
endfor

; A continuación se toman los datos de pixel de calidad. lectura de pixel reliability MASK

NDVI_MK=fltarr(565,551,48)

for i= 0,Element-1 do begin

    print,'-- procesando la mascara...' + strcompress(i+1) + ' de' + strcompress(n_elements(File))

    Input_File_MASK = file_MASK[i]

; Open the file and initialize the SD interface
sd_id = HDF_SD_START( input_File_MASK, /read )
; Find the index of the sds to read using its name
sds_index = HDF_SD_NAMETOINDEX(sd_id, '250m 16 days NDVI')
; Select it
sds_id= HDF_SD_SELECT( sd_id, sds_index )

hdf_sd_getdata, sds_id, SDS_NAME

NDVI_MK(*,i)=SDS_NAME(2278:2842,1647:2197)

; end access to SDS
HDF_SD_ENDACCESS, sds_id
; close the hdf file
HDF_SD_END, sd_id
endfor

; ----- //Inicia procesamiento DEM altura// -----

```

```
INPUTDEM='C:\Users\w7\Documents\NDVI\DEM\DEM\SLOPE_DEM.tif'
```

```
NDVIDEM=fltarr(565,551)
```

```
IOPEN, INPUTDEM, data_variable, GEOTIFF=GeoKeys
data_variable=READ_TIFF( INPUTDEM,GEOTIFF=GeoKeys)
```

```
NDVIDEM(*,*)=data_VARIABLE(2278:2842,3087:3637)
```

```
INPUTDEM2='C:\Users\w7\Documents\NDVI\DEM\Area_estudio.tif'
```

```
AREA=fltarr(565,551)
```

```
IOPEN, INPUTDEM2, data_variable, GEOTIFF=GeoKeys
NDVIAREA_variable=READ_TIFF( INPUTDEM,GEOTIFF=GeoKeys)
```

```
AREA(*,*)=NDVIAREA_VARIABLE(0:564,0:550)
```

```
;------ //FINAL procesamiento DEM altura//-----
```

```
MK_NDVI=where(NDVI_MK eq -9999)
NDVI(MK_NDVI)=-999
```

```
;------ //FINAL procesamiento de información_mask//-----
```

```
;do the standard deviation calculation
```

```
variability=fltarr(565,551)
subtraction=fltarr(565,551,48)
Residual=fltarr(565,551,48)
subtraction2=fltarr(565,551,48)
Residual2=fltarr(565,551,48)
```

```
print,'-- Identificando los valores umbrales tenga paciencia '+strcompress(n_elements(File))+' daticos y sale pa
pintura'
```

```
for k=0,Element-2 do begin
  for i=0,565-1 do begin
    for j=0,551-1 do begin
```

```
;print, '-- elemento uno'
```

```
  if NDVI(i,j,k) ne -999 and NDVI(i,j,k+1) ne -999 then begin
    subtraction(i,j,k)= NDVI(i,j,k) - NDVI(i,j,k+1)
    use=where(subtraction(i,j,*) GT -9999)
    variability(i,j)=STDDEV(subtraction(i,j,use))
  ENDF
  Residual(i,j,k) = subtraction(i,j,k)- variability(i,j)*Threshold
```

```
;print, '-- elemento dos'
```

```
  for l=0,Element-3 do begin
    if NDVI(i,j,l) ne -999 and NDVI(i,j,l+2) ne -999 then begin
      subtraction2(i,j,l)= NDVI(i,j,l) - NDVI(i,j,l+2)
    endif
    Residual2(i,j,l) = subtraction2(i,j,l)- variability(i,j)*Threshold
```

```

        endfor
    endfor
endfor
endfor

nuevo=fltarr(565,551,48)
xx=where(Residual gt 0 and Residual2 gt 0 )
nuevo(xx)=1.

print, 'Valores umbrales identificados'

DESLIZAMIENTO=fltarr(565,551)

for i=0,565-1 do begin
for j=0,551-1 do begin
posdes= where(nuevo(i,j,*) ge 0)
DESLIZAMIENTO(i,j)= total(nuevo(i,j,posdes))
endfor
endfor

;+++++

x=where( NDVIDEM le 8 )
DESLIZAMIENTO(X)=-999

print, 'Final mascara de pendiente'

;Base=File_Basename(FileHDF[imagen], '.HDF')
Area_completa=Path_S+'\'+DESLIZAMIENTOS_'+TIME+'.HDF'
fid=hdf_open(Area_completa, /all)

XXX=where(AREA eq 0)
DESLIZAMIENTO(XXX)=-9999
PRINT,'Acotando area de interes'

;Create a new HDF file:
SDinterface_id = hdf_sd_start(Area_completa,/rdwr)
;Create an dataset that includes an unlimited dimension:
type = HDF_IDL2HDFTYPE(SIZE('SDS_NAME',/type))
SDdataset_id = HDF_SD_CREATE(SDinterface_id,'deslizamiento_0.35%', [565,551],/DFNT_FLOAT32)

hdf_sd_adddata, SDdataset_id,deslizamiento
HDF_SD_GETDATA, SDdataset_id, full
hdf_sd_endaccess, SDdataset_id
;Close the file
hdf_sd_end, SDinterface_id
hdf_close, fid

```