

Identificación de perturbaciones en el bosque húmedo tropical colombiano usando series temporales de imágenes satelitales Landsat mediante el algoritmo Landtrendr

Hurtado, L. ^{*}1, Lizarazo, I. ²

¹ Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ciencias Agrarias, Ciudad Universitaria, Bogotá, Colombia.

² Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ciencias Agrarias, Grupo de Investigación Análisis Espacial del Territorio y del Cambio Global (AET-CG), Ciudad Universitaria, Bogotá, Colombia.

Resumen: El análisis de series temporales de imágenes satelitales para la detección de deforestación o perturbaciones en bosques en un momento específico del tiempo ha sido motivo de investigación a lo largo de los últimos años. Son muchas las limitaciones en la identificación del momento exacto de la deforestación debido principalmente al gran volumen de datos y a los criterios requeridos para su correcta caracterización. Una segunda limitación en el análisis de series temporales de datos multiespectrales es la identificación de una verdadera deforestación teniendo en cuenta que la vegetación boscosa puede sufrir diferentes cambios a lo largo del tiempo. En este estudio se analizó la deforestación en una zona de la Amazonia colombiana usando series temporales del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) obtenido a partir de mosaicos semestrales de mediana generados a partir de imágenes Landsat obtenidas entre los años 2000 y 2017. Se extrajeron diferentes muestras que representan la tendencia de cambio a lo largo de la serie temporal y se clasificaron según su grado de cambio y persistencia en la serie, usando cuatro categorías: (i) deforestación, (ii) degradación, (iii) plantación forestal y (iv) regeneración. Las muestras específicas de deforestación se analizaron de igual manera usando el índice de vegetación ajustado al suelo (SAVI) para reducir el efecto de las variaciones de respuesta espectral debido a cambios en la reflectancia del suelo. Se concluye como los dos índices empleados, junto con las bandas espectrales del infrarrojo cercano (NIR) e infrarrojo de onda corta (SWIR 1) permiten extraer valores e intervalos donde se identifica el cambio producido por deforestación con un nivel aceptable de exactitud. El análisis de la serie temporal haciendo uso del algoritmo *Landtrendr* corroboró una detección acertada de cambios en cada una de las categorías de perturbaciones de la cobertura boscosa.

Palabras clave: deforestación, Landtrendr, series temporales, perturbación del bosque.

Identification of disturbances in the Colombian tropical rainforest from Landsat satellite image time series using the Landtrendr algorithm

Abstract: Time series analysis of satellite images for detection of deforestation and forest disturbances at specific dates has been a subject of research over the last few years. There are many limitations to identify the exact date

To cite this article: Hurtado, L., Lizarazo, I. 2019. Identification of disturbances in the Colombian tropical rainforest from Landsat satellite image time series using the Landtrendr algorithm. *Revista de Teledetección*, 54, 25-39. <https://doi.org/10.4995/raet.2019.12285>

* Corresponding author: johurtadoa@unal.edu.co

of deforestation due mainly to the large volume of data and the criteria required for its correct characterization. A further limitation in the analysis of multispectral time series is the identification of true deforestation considering that forest vegetation may undergo different changes over time. This study analyzes deforestation in a zone within the Colombian Amazon using the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) based on semestral median mosaics generated from Landsat images collected from 2000 to 2017. Several samples representing trends of change over the time series were extracted and classified according to their degree of change and persistence in the series, using four categories: (i) deforestation, (ii) degradation, (iii) forest plantation, and (iv) regeneration. Specific deforestation samples were analyzed in the same way using the soil-adjusted vegetation index (SAVI) to reduce the effect of spectral response variations due to soil reflectance changes. It is concluded that the two indices used, together with the near infrared (NIR) and short-wave infrared (SWIR 1) spectral bands, allow to extract values and intervals where the change produced by deforestation on forest vegetation is identified with acceptable accuracy. The analysis of time series using the *Landtrendr* algorithm confirmed a reliable change detection in each of the forest disturbance categories.

Key words: deforestation, Landtrend, time series, forest disturbance.

1. Introducción

El nivel de las emisiones de carbono en la atmósfera como producto de la deforestación creciente de bosque primario en el territorio colombiano ha alcanzado un punto crítico (Armenteras et al., 2017). La deforestación es un proceso que destruye, en muy pocas horas, el proceso laborioso de consolidación de un ecosistema que proporciona servicios ecosistémicos esenciales (David y Sosa, 2014). La creciente deforestación afecta la calidad del aire, la sostenibilidad de las cuencas hidrográficas y genera eventos climáticos y físicos de alto riesgo para la población más vulnerable (Maser et al., 1992), incluyendo inundaciones y deslizamientos (El Tiempo, 2017). De acuerdo con las autoridades ambientales colombianas, el país puede estar cruzando los niveles máximos de tolerancia en la tasa de deforestación nacional (Armenteras y Rodríguez, 2014; Santos y Tellería, 2006). Los informes oficiales de deforestación anual para el año 2018 muestran un incremento anual de aproximadamente 200.000 hectáreas de bosque perdido, lo cual mantiene encendidas las alarmas ambientales (IDEAM, 2016).

Las metodologías que se emplean para detectar las zonas de deforestación hacen uso extensivo de imágenes satelitales (Landsat, Sentinel, MODIS, entre otras) y utilizan técnicas de interpretación visual para la detección de cambios (Coronel, 2015). El Instituto de Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), la autoridad encargada de ese tema en Colombia, utiliza un protocolo de interpretación visual de imágenes muy detallado

que se enfoca en la detección de cambios en la cobertura terrestre que se presenten en un periodo de tiempo determinado (IDEAM, 2014). Dicha metodología ha obtenido resultados cada vez más altos en exactitud temática, la cual para el año 2018 se estimó en un valor de Kappa global cercano al 95%.

A nivel global, la evaluación de la deforestación anual se realiza utilizando un método desarrollado conjuntamente por la Universidad de Maryland, Google Inc., la Agencia Espacial de Estados Unidos (NASA) y el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS) (Hansen et al., 2013). Este método usa imágenes Landsat, con resolución espacial de 30 metros, y los resultados son publicados a través del proyecto *Global Forest Watch* (GFW) que cuenta con un visor geográfico que permite observar las zonas afectadas por deforestación a escala global, teniendo en cuenta distintos periodos de tiempo, mediante diferentes composiciones de color (Defries et al., 2007). Algunos autores han sugerido que se requiere mejorar esa exactitud y reducir el error temático que presentan los productos GFW en la detección puntual de cambios en la cobertura en un momento específico del tiempo (Hansen et al., 2013; Turubanova et al., 2018).

Por otra parte, el Instituto Nacional de Investigaciones Espaciales (INPE) de Brasil utiliza una metodología para la detección de deforestación similar a la de IDEAM, aunque utiliza como datos adicionales imágenes satelitales CBERS (INPE, 2019). INPE realiza una

comparación de sus resultados con los productos del proyecto GFW (INPE, 2019). Las metodologías de detección de deforestación utilizadas por INPE y IDEAM se basan en la detección de cambios en un momento específico del tiempo, pero carecen de una perspectiva temporal que evalúe la dinámica de la vegetación durante un periodo largo de tiempo y no solamente los cambios ocurridos entre dos años consecutivos.

En este aspecto, hay que indicar que un cambio en la cobertura forestal puede ser resultado de múltiples causas y que ese cambio puede modificarse posteriormente en el tiempo. Una zona en la cual ha ocurrido la pérdida de bosque debido, por ejemplo, a una acción de tala-quema, puede evolucionar a un pastizal, a una siembra ilícita, a un proyecto agroforestal, o a una zona de reforestación (Camacho-Sanabria et al., 2015; Moncada Rasmussen, 2010; Romero-Mieres, González y Lara, 2014). La capacidad de detectar estos cambios, que incluyen un antes, un durante y un después del cambio en sitios con coordenadas geográficas específicas, no es posible mediante el uso de la metodología actual utilizada de manera oficial en IDEAM.

El propósito de este estudio es establecer el potencial de las series temporales de índices de vegetación, es decir registros de la variación semestral de esos índices durante una serie temporal extensa, para detectar zonas de deforestación, utilizando como caso de estudio el denominado “cinturón de fuego” de la deforestación en Colombia (El Tiempo, 2018). Para identificar y analizar puntualmente el cambio ocurrido en la cobertura boscosa de dicha zona se utiliza información oficial sobre la deforestación ocurrida entre 2000 y 2017 (IDEAM, 2014; SMBYC, 2018). La metodología propuesta, que se explica en la próxima sección, hace uso del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), del índice de vegetación ajustado al suelo (SAVI), y de los valores de reflectancia espectral de la superficie en las bandas espectrales de las imágenes Landsat comprendidas entre los 0,64 y los 2,29 micrómetros.

En este estudio se analizan los siguientes tipos de cambio en la cobertura forestal: (i) La *deforestación*, entendida como la conversión directa y/o inducida de la cobertura de bosque a otro tipo de cobertura de la tierra en un momento específico (Defries et al., 2006); (ii) la *degradación forestal*,

entendida como la pérdida a largo plazo de la capacidad de secuestrar carbono en un ecosistema de bosque (IPCC, 2003); (iii) la *regeneración* forestal, entendida como la capacidad de recuperación de un bosque después de sufrir una alteración, en ausencia de la intervención humana (Verified Carbon Standard, 2018); y (iv) la *plantación forestal “comercial”*, entendida como el establecimiento y manejo de especies forestales en terrenos de uso agropecuario o terrenos que han perdido su vegetación forestal natural (Comisión Nacional Forestal, 2017).

El enfoque metodológico de este estudio es el análisis de las series temporales de imágenes de satélite desde un punto de vista empírico combinando la información espectral y la información temporal. Para ello, se hace uso del algoritmo *Landtrendr* incorporado en Google Earth Engine – GEE que utiliza el catálogo completo de imágenes Landsat (Kennedy et al., 2018). El algoritmo *Landtrendr* permite y generar series temporales de los valores de reflectancia de un píxel específico y puede ser utilizado para detectar zonas de posible afectación por deforestación mediante la identificación de momentos o puntos de quiebre en donde se altera de manera brusca el comportamiento cíclico de la respuesta espectral de la vegetación (DeVries et al., 2015; Dutrieux et al., 2015; Molinier et al., 2018). El algoritmo *Landtrendr* permite involucrar las bandas espectrales de Landsat, el índice NDVI y el índice de área quemada (NBR) (Heredia-Laclaustra et al., 2003; UN-SPIDER, 2019).

Este artículo se encuentra organizado de la siguiente manera. La sección 2 describe los datos y la metodología propuesta para el desarrollo de la investigación. En la subsección 2.1 se describe la zona de estudio y su importancia en el contexto de la deforestación. La subsección 2.2 describe detalladamente la generación de mosaicos de imágenes semestrales al igual que el muestreo utilizado para la construcción de la serie temporal. La subsección 2.3 describe la metodología propuesta en el estudio para la generación de la serie temporal y los posteriores análisis. En la sección 3 se presentan los resultados obtenidos. En la sección 4 se discuten dichos resultados. Finalmente, en la sección 5 se presentan las conclusiones del estudio.

2. Materiales y métodos

2.1. Zona de estudio

La zona denominada “cinturón de fuego” de la deforestación en Colombia, se encuentra localizada en la frontera norte de la amazonia colombiana, en una zona que comprende parcialmente el norte del departamento de Caquetá, el noroccidente del departamento de Guaviare y el sur del departamento de Meta. Esta zona, que representa la transición entre la región de la Orinoquia y la Amazonia, cuenta con tres parques nacionales naturales (La Macarena, Tinigua y Picachos) (PNN, 2019), en donde se concentran más del 50% de las alertas trimestrales por deforestación (IDEAM, 2018; SMBYC, 2017). Los municipios con mayor afectación son San José del Guaviare, Cartagena del Chairá, San Vicente del Caguán y La Macarena, en donde se encuentran una gran cantidad de zonas mayores a 50 hectáreas de bosque deforestado (SMBYC, 2018).

En la figura 1 se puede observar la localización geográfica de los departamentos más afectados por deforestación que abarca un área aproximada de 1.075.000 hectáreas, acumulada entre 2000 y 2017, de la cuales 468.500 pertenecen al “cinturón de fuego” para el mismo periodo de tiempo. Como se puede apreciar en la figura 1 existe un contraste entre el paisaje boscoso (tonos verdosos oscuros con texturas grandes características de la vegetación boscosa amazónica) y las zonas con baja o nula vegetación del norte de la zona de estudio (tonos verdes muy claros y texturas entre medias a finas, característico de la Orinoquia y el cambio de vegetación fotosintética a suelos orgánicos). La zona de estudio se caracteriza por suelos levemente desarrollados (Inceptisoles), caracterizados por presencia de minerales altamente reflectivos en la longitud de onda del SWIR (Corpoamazonia, 2018). En el departamento del Meta se pueden identificar los tres parques nacionales naturales mencionados previamente que se encuentran afectados por deforestación.

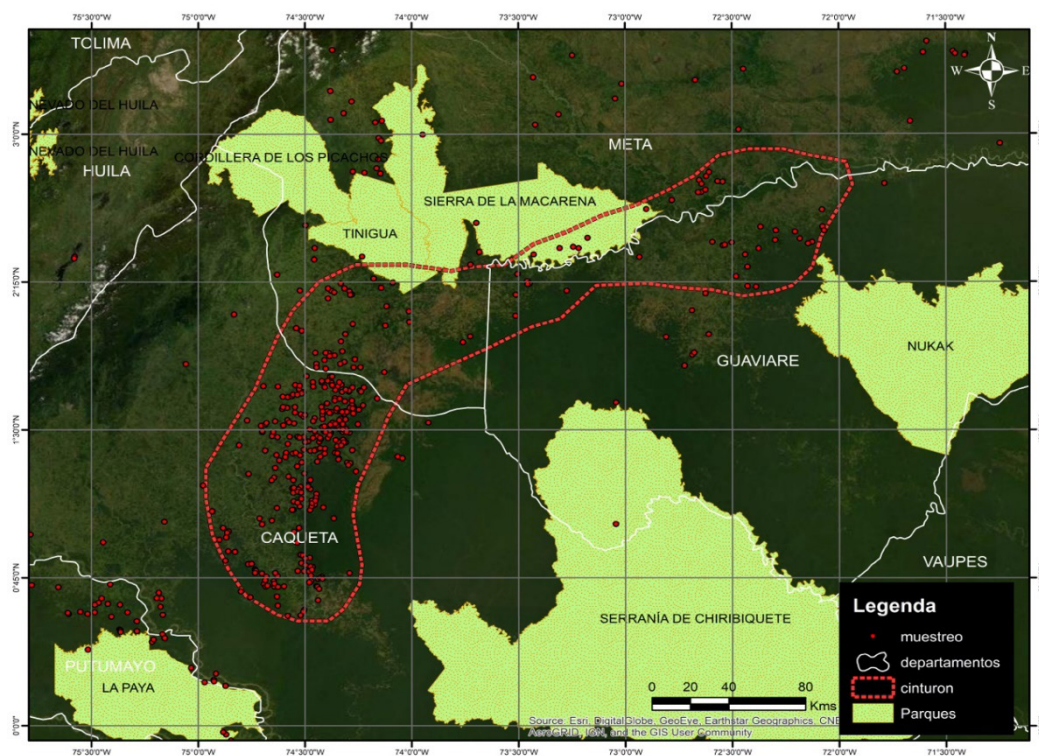


Figura 1. Localización geográfica de la zona de estudio cuyos límites se muestran en línea punteada. Los sitios de muestreo, representados con puntos, corresponden a 500 polígonos de deforestación con áreas individuales mayores a 50 ha.

2.2. Datos

Para la generación de la serie temporal fueron descargadas, procesadas y usadas para obtener los mosaicos semestrales un total de 1873 imágenes Landsat de los sensores TM (*Thematic Mapper*), ETM+ (*Enhanced Thematic Mapper plus*) y *Operational Land Imager* (OLI), adquiridas entre el 1 de enero de 2000 y el 31 de diciembre de 2017. En la figura 2 se observa el flujo de procesos empleados para el preprocesamiento de cada una de las imágenes Landsat, la estandarización de cada una de las imágenes con las mismas características en términos de bandas, medida de reflectancia espectral y calidad de la información.

La base oficial de datos de deforestación del IDEAM se encuentra con una frecuencia bianual desde el año 2000 hasta el 2014, posteriormente con una frecuencia anual hasta el 2017 (SMBYC, 2018). Usando los mapas temáticos oficiales de IDEAM que representan cambios de bosque a no bosque, se extrajo la categoría deforestación y aquellos polígonos con áreas superiores a 50 hectáreas fueron tenidos en cuenta para la generación del muestreo. De un total de 689 polígonos extraídos se realizó un muestreo aleatorio de 500 dentro de la totalidad del área de estudio. El resultado incluye polígonos de diverso tamaño, con área promedio de 80,9 hectáreas, el polígono más pequeño tiene área de 50 hectáreas y el polígono más grande de 440 hectáreas. Cada uno de estos polígonos se extrajo en un momento específico sin tener en cuenta los cambios previos o posteriores, por lo que inicialmente los 500 puntos de muestreo fueron clasificados como pertenecientes a la categoría *deforestación*.

2.3. Metodología

El propósito del estudio es la correcta detección de cambios causados principalmente por deforestación, en un momento determinado del tiempo, a partir del análisis de series temporales espectrales. Para ello, se diseñó una metodología que tiene como principal insumo los datos oficiales reportados para Colombia de deforestación comprendidos entre los años 2000 y 2017. En la figura 3 se puede encontrar el diagrama metodológico compuesto por tres fases. La fase 1 denominada “preparación de insumos” tiene como propósito generar los insumos básicos de la investigación, los cuales son los mosaicos de mediana Landsat semestrales usando la totalidad de imágenes disponibles. La fase 2 denominada “análisis espectral y temático” tiene como propósito la extracción de series temporales con los valores de reflectancia en el espacio-tiempo. Finalmente, la fase 3 “Análisis de series temporales” busca identificar los rangos de cambio sufrido por el bosque en un periodo de tiempo para un punto específico del bosque amazónico. El resultado de la tercera fase son los rangos entre los cuales fluctúa el bosque y su abrupta transición a suelos expuestos o suelos con baja presencia de vegetación. Finalmente, se realiza una etapa adicional, de validación de resultados, con el fin de establecer el grado de confiabilidad de los productos obtenidos.

La metodología está orientada a identificar las diferentes perturbaciones al bosque a través del tiempo usando las bandas individuales de imágenes satelitales y algunos de los índices de vegetación más empleados en estudios de teledetección. El estudio de la serie de tiempo espectro-temporal



Figura 2. Diagrama metodológico del preprocesamiento de datos satelitales. Adaptado de (IDEAM, 2014).

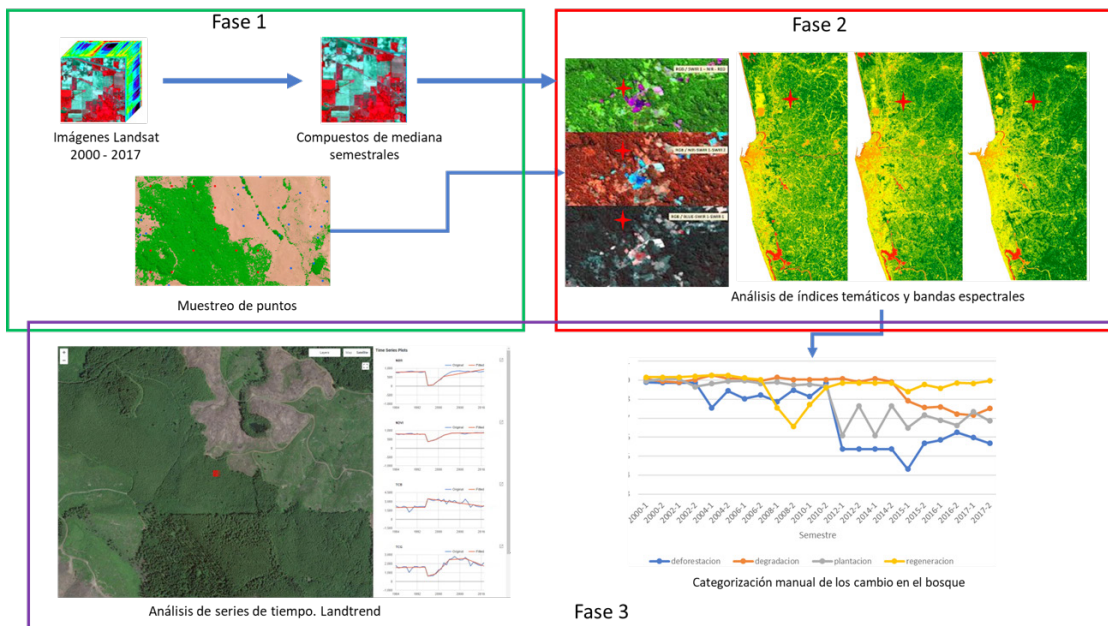


Figura 3. Diagrama metodológico. Fase 1: preparación del muestreo y compuestos semestrales. Fase 2: análisis espectral y temático. Fase 3: análisis de series temporales.

se realiza desde un punto de vista manual y otro automatizado en la nube. Para ello, se realiza el análisis de los cambios en el bosque usando el algoritmo *Landtrendr* implementado en Google Earth Engine lo mismo que una categorización manual mediante la interpretación visual de mosaicos semestrales de los valores de mediana de la respuesta espectral.

La primera fase tiene como resultado la generación del muestreo aleatorio y la generación de los mosaicos de mediana. El muestreo se deriva como resultado de filtrar todos los polígonos oficiales del IDEAM con un área mayor a 50 hectáreas comprendidos entre 2000-2017 y seleccionados 500 puntos (centroides de los polígonos) aleatoriamente en el cinturón de deforestación. Paralelamente, se generan mosaicos de mediana Landsat que son el resultado de agrupar en periodos de tiempo semestrales todos los píxeles resultantes del proceso de normalización y calcular en un píxel resultado el valor de la mediana estadística de los píxeles válidos. El resultado de este proceso son 22 mosaicos semestrales que cubren el periodo 2000-2017.

La segunda fase hace énfasis en la generación de los índices temáticos de vegetación seleccionados.

Teniendo los mosaicos semestrales como resultado de la fase 1 se generan los índices NDVI y SAVI para cada uno de los semestres. Los 500 puntos del muestreo generados en la fase 1 tienen el propósito de extraer los valores de reflectancia (RED, NIR, SWIR y SWIR2) y los valores temáticos (NDVI y SAVI) y de esta manera tener seis valores para cada punto de muestreo en 22 semestres y generar la serie temporal.

La tercera y última fase se divide en dos etapas complementarias. La primera etapa “categorización manual de cambios en el bosque”, busca realizar un análisis de categorización puntual identificando los momentos de cambio en la vegetación boscosa graficando los índices NDVI, SAVI y las bandas RED, NIR, SWIR y SWIR2. Cada punto es comparado tomando como valor la mediana de cada píxel del mosaico semestral y clasificando de manera visual el momento específico de cambio y qué tipo de cambio se presenta en el bosque a través del tiempo. Aunque la serie temporal inicia en el primer semestre del año 2000 y termina en el segundo semestre del año 2017 para todos los análisis del estudio, ningún cambio registrado en el año 2000 o 2017 será considerado como cambio debido a que la totalidad de los análisis requieren conocer el estado de la vegetación dos semestres

antes del cambio y de igual manera dos semestres posteriores con el fin de identificar qué tipo de cambio ocurrió en el bosque.

Sin embargo, la etapa 1 de la fase 3 toma mucho tiempo en interpretación visual, por lo cual los resultados intermedios de la categorización de cambio (enfocado en deforestación) se procesan detalladamente usando el catálogo completo de imágenes Landsat de GEE mediante la herramienta de análisis de series temporales *Landtrendr*. Es importante señalar que, por razones de espacio, en este artículo no se explica en detalle cómo funciona el algoritmo *Landtrendr*. Los lectores interesados en ese aspecto pueden consultar Kennedy et al. (2018). En esta etapa 2 de la fase 3 se analiza cada punto de muestreo categorizado como deforestación usando imágenes individuales e identificando las variaciones en la vegetación con el fin de identificar las características propias que deja la pérdida de bosque en términos espectrales.

Finalmente, la etapa de validación de resultados consiste en extraer los valores entre los cuales fluctúa el cambio entre bosque a no bosque usando las bandas espectrales que mejor identifican el bosque y los índices espectrales NDVI y NBR.

3. Presentación de resultados

El propósito del estudio es la identificación de perturbaciones en la vegetación boscosa haciendo énfasis en la deforestación como resultado de procesos de tala, minería ilegal, ganadería extensiva e incendios forestales como principales causas (Armenteras y Rodríguez, 2014). La primera fase que tiene como propósito la generación de un muestreo que tiene un proceso simple de extracción y la generación de los mosaicos de mediana

de manera manual y automatizada. Realizar el análisis de detección visual con procesamiento manual de las imágenes brinda la ventaja de conocer a detalle la serie espectro-temporal de los datos a diferencia de emplear herramientas automatizadas en la cuales solo se obtienen gráficas del comportamiento de un píxel en el tiempo, por lo que combinar ambas técnicas puede generar resultados más detallados en la identificación de pérdida de bosque.

En la figura 4 se ilustra, para un momento del tiempo cualquiera, el resultado de la serie de procesos que comprenden la Fase 1 que incluye: obtención de imágenes de reflectancia (a), enmascaramiento de zonas de nubosidad y normalizando valores de reflectancia (b) y generación de los mosaicos semestrales de mediana. Estos mosaicos almacenan, en cada píxel, la mediana de los valores espectrales obtenidos del paso (b) y representan una única imagen espectral de todas las bandas de interés obtenida usando todos los datos disponibles en un periodo de seis meses que es el resultado de la imagen (c). Finalmente, la imagen (d) es el resultado de la automatización de los procesos a, b y c en GEE, que, aunque comprende los mismos pasos y usa la totalidad de la información en un periodo de tiempo logra eliminar el efecto de traslape que se observa en la imagen (c). El mosaico se presenta especialmente el cinturón de fuego de la deforestación que permite identificar el comportamiento y los valores entre los cuales se identifica este cambio fuera de un sitio de alta concentración, involucrando otro tipo de ecosistemas como los bosques ripiarias y las zonas de protección de los parques nacionales naturales limitantes con el cinturón.

Por otra parte, la fase 1 permitió obtener una base de datos de 500 polígonos de muestreo, que

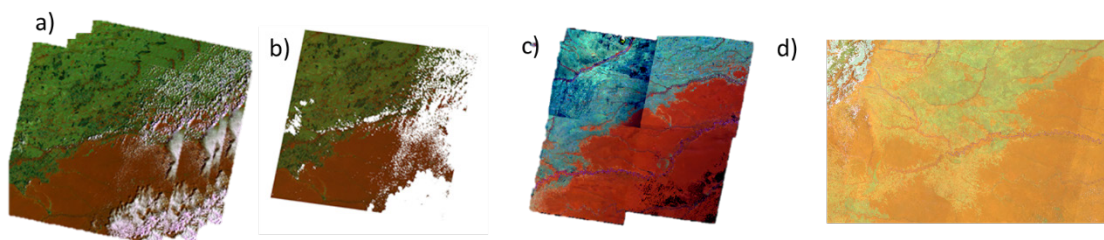


Figura 4. a) Imagen original en reflectancia. b) Imagen enmascarada. c) Mosaico semestral de mediana realizado manualmente. d) Mosaico de mediana semestral. Imagen propia. Composición de color RGB 453 de Landsat correspondiente a las escenas *path* y *row* 758, 658, 759 y 659.

corresponden a los centroides de los polígonos mayores a 50 hectáreas de cambio en el bosque para la totalidad de la serie temporal y se seleccionaron los 500 centroides correspondientes a las mayores áreas de cambio. Cada uno de los sitios del muestreo presenta el cambio en el bosque en un momento específico del tiempo y con un grado de severidad distinto, permitiendo categorizar este cambio en deforestación, plantaciones forestales, degradación y regeneración.

Teniendo los 22 mosaicos mensuales y los 500 puntos de muestreo de la fase 1, se pueden derivar 22 índices NDVI y 22 SAVI para completar los insumos. Con los 500 puntos de muestreo se extrae el valor único de cada una de las 4 bandas espectrales de los mosaicos de mediana y el valor temático de ambos índices temáticos. De esta manera se obtiene dos series temporales, una para el índice NDVI y otra para el índice SAVI, cubriendo un rango temporal de 17 años. Cada serie temporal, que tiene alrededor de 66.000 valores, se utilizó para detectar variaciones en la vegetación boscosa teniendo en cuenta tiempo de ocurrencia y grado de cambio.

La tercera fase (etapa 1 – procesamiento manual) requiere la categorización visual y gráfica de los cambios en el bosque en el periodo de interés.

La detección visual y el grado de variación estadística de los valores espectrales y temáticos de la serie temporal permite identificar cuál de los cuatro tipos de perturbación existe en cada sitio y enfocar el estudio a los puntos clasificados como *deforestación*.

La figura 5 muestra para uno de los 500 puntos del muestreo, localizado en las coordenadas geográficas específicas, la serie temporal de mosaicos semestrales desde el 2000 al 2017. Para este ejemplo en específico, el cambio se presenta en el primer semestre de 2015, donde se aprecia claramente un cambio drástico entre el bosque y suelo expuesto para el segundo semestre del mismo año y posteriormente el cambio permanece en dicho punto permitiendo categorizarlo como deforestación. Este es el propósito y resultado de la categorización mediante interpretación visual usando los mosaicos de mediana.

Por otra parte, la serie temporal construida con los valores temáticos y espectrales permite extraer dichas categorizaciones de una manera diferente, pero llegando a resultados similares. La figura 6 muestra como cada uno de los valores de la serie temporal es graficado tomando como valor de cada punto el valor espectral de una determinada banda espectral o el resultado de un

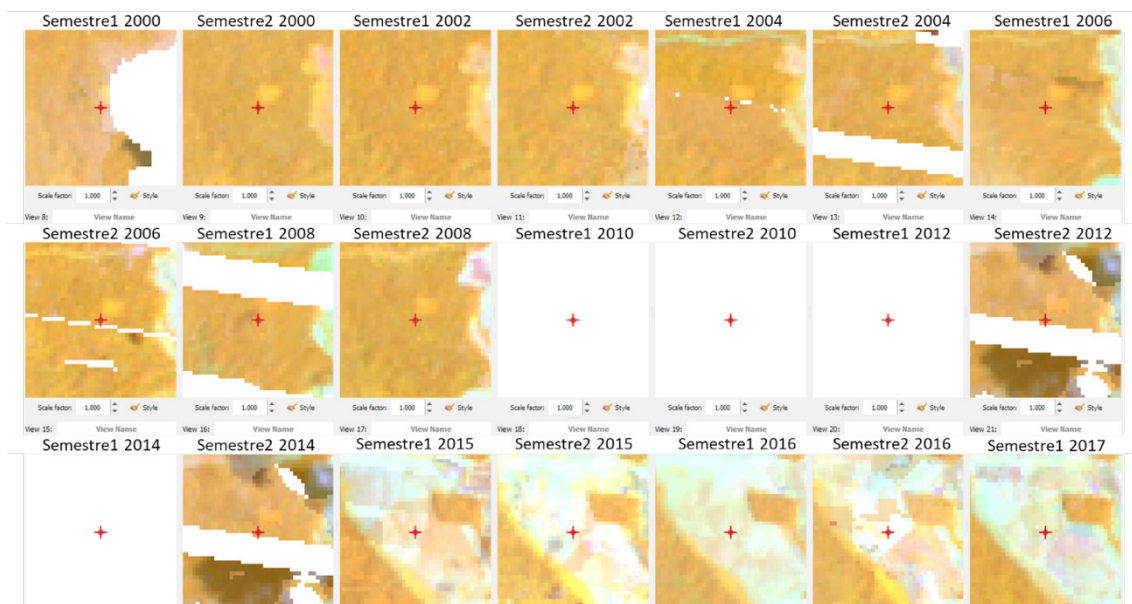


Figura 5. Serie temporal de una composición a color RGB (NIR, SWIR1, RED) para uno de los sitios específicos clasificados como deforestación.

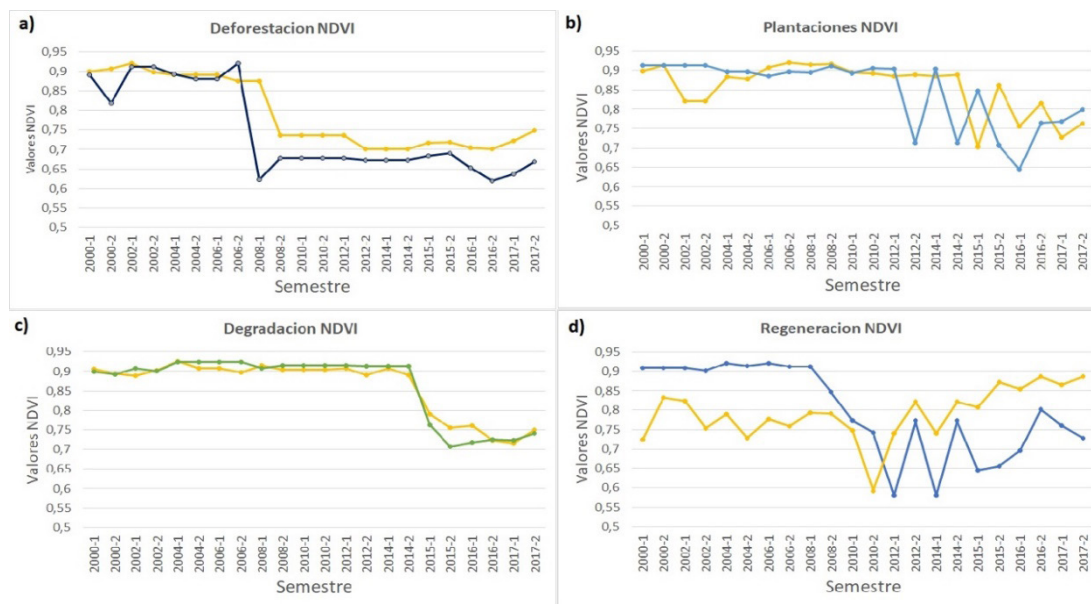


Figura 6. Clasificación de los puntos más representativos de la muestra según el tipo de cambio en el bosque para la serie NDVI. a) puntos de comparación categorizados como deforestación; b) puntos categorizados como plantaciones forestales; c) puntos de comparación categorizados como degradación y; d) puntos categorización como regeneración. Las líneas azules y amarillas representan algunos puntos de los 500 del muestreo categorizados en una determinada clase.

índice temático (eje y) y analizada para cada uno de los semestres del estudio (eje x). Cada uno de los 500 puntos de muestreo es categorizado en las mismas clases de cambio teniendo en cuenta la dinámica del cambio, grado de severidad, intervalo de tiempo en que ocurre el cambio y posible recuperación de vegetación en el tiempo.

Los gráficos para este caso puntual representan los resultados del índice NDVI teniendo en cuenta que es uno de los índices más empleados en detección de cambios de la vegetación boscosa. Una disminución en el eje Y (valores del NDVI) en un momento específico del tiempo puede representar una pérdida de bosque y las diferentes fluctuaciones de esta pérdida en un intervalo del tiempo (un periodo corto podría tratarse de deforestación; un periodo largo podría tratarse de otro tipo de pérdida de bosque, como degradación forestal) permiten clasificar ese tipo de categoría que se pudo apreciar en la interpretación visual de la figura 5.

Con los puntos clasificados como deforestación se realiza un análisis complementario. Al igual que el índice NDVI, el índice SAVI es uno de los índices de vegetación más empleados en diversos estudios con sensores remotos. A diferencia del

índice NDVI, el índice SAVI tiene en cuenta la variación en las bandas del rojo e infrarrojo cercano causado por la reflexión del suelo en zonas con poca vegetación (Schultz et al., 2016). Se realiza una revisión de la serie temporal de los puntos clasificados como deforestación con los valores de la serie del índice SAVI. En la figura 6 se observa como los cambios son consistentes con la serie NDVI, pero a diferencia de ella los cambios presentan una mayor variación causada por el ajuste de suelos en este índice.

Tabla 1. Resultado de categorizar los 500 sitios de perturbación en la vegetación boscosa.

Categoría	# de sitios asignados	% clasificado
Deforestación	445	89%
Degradación	30	6%
Regeneración	23	4,6%
Plantaciones	2	0,4%

En la tabla 1 se muestran los resultados numéricos de los sitios del muestreo con la categorización final asignada teniendo en cuenta la interpretación visual de los mosaicos de mediana como se observa en la figura 5. Empleando el índice SAVI se obtiene que para ser categorizado como deforestación la fluctuación resultante entre un momento t_0 y un momento t_1 disminuye entre 0,4 y 0,7 el valor del

Tabla 2. Parámetros resultantes para la detección automatizada de deforestación en *Landtrends* propuestos para el análisis con el índice de área quemada NBR.

Definición de filtros y parámetros para los mapas de magnitud y duración del cambio		Definición de parámetros para el ajuste de la serie temporal	
Vegetation Change Type	Loss	Max Segments	5 o 6
Vegetation Change Sort	Greatest	Spike Threshold:	0,7 a 0,9
Filter by magnitude	Mayor de 300	Vertex Count Overshoot:	3
Filter by pre-dist value	Mayor de 700	Prevent One Year Recovery:	True
MMU	11	Recovery Threshold:	0,20 a 0,30
		p-value Threshold	0,05
		Best Model Proportion	0,75
		Min Observations Needed:	5

índice mientras que le NDVI disminuye entre 0,2 y 0,4 concluyendo que el índice SAVI permite identificar una mayor variación en la pérdida de bosque.

Por otra parte, la etapa 2 de la fase 3 tiene como propósito automatizar los procesos empleados en la etapa 1. Teniendo en cuenta el volumen de datos que se esta manejando en el estudio y debido a los resultados demostrados en el análisis de series temporales con *Landtrends* se propone replicar el proceso manual automatizándolo con esta herramienta.

El proceso en *Landtrends* tiene algunas perspectivas similares al estudio de la etapa 1. *Landtrends* permite realizar esta detección del cambio a través de algunos índices de vegetación, bandas espectrales y transformaciones, lo cual permite confrontar los resultados previamente obtenidos. Para generar un análisis de las series temporales en *Landtrends* se requiere la configuración de los parámetros que permitan identificar zonas de pérdida y establecer los umbrales entre los cuales se presentan dichas pérdidas. El proceso para fijar estos parámetros

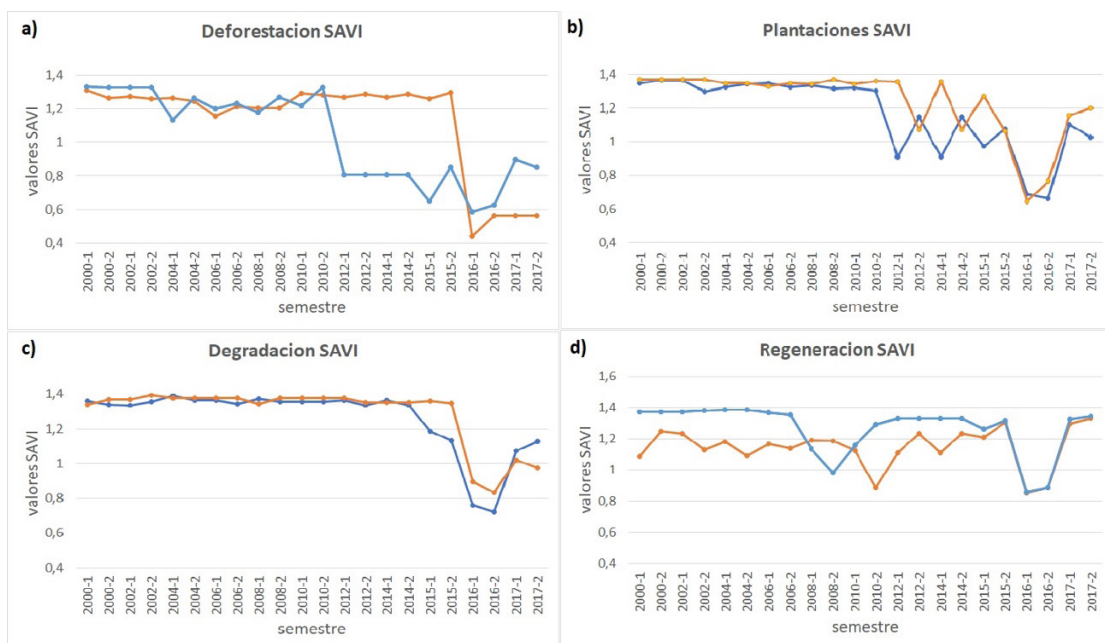


Figura 7. Serie temporal para los puntos de deforestación comparado con la serie SAVI. a) puntos de comparación categorizados como deforestación; b) puntos categorizados como plantaciones forestales comerciales; c) puntos de comparación categorizados como degradación y; d) puntos categorización como regeneración forestal. Las líneas azules y amarillas representan algunos puntos de los 500 del muestreo categorizados en una determinada clase.

se realiza de manera empírica obteniendo los valores que se encuentran en la tabla 2 y que mejor muestran los cambios en el bosque para imágenes Landsat.

Los resultados de la serie temporal con *Landtrendr* muestran la potencialidad de la herramienta teniendo en cuenta el detalle de los resultados generados para un píxel en el tiempo. En la figura 8 se puede observar como el índice NBR logra discriminar la

pérdida de bosque en una serie temporal de análisis donde se evidencia que para el año 2008 se genera dicha pérdida. El NBR tiene una tasa promedio de cambio de 0,6 dando resultados muy detallados junto con el SAVI (Figura 7) en comparación con el NDVI que para ambos casos funciona como índice de verificación.

Por otra parte, *Landtrendr* también permite analizar varias bandas espectrales al mismo tiempo. En

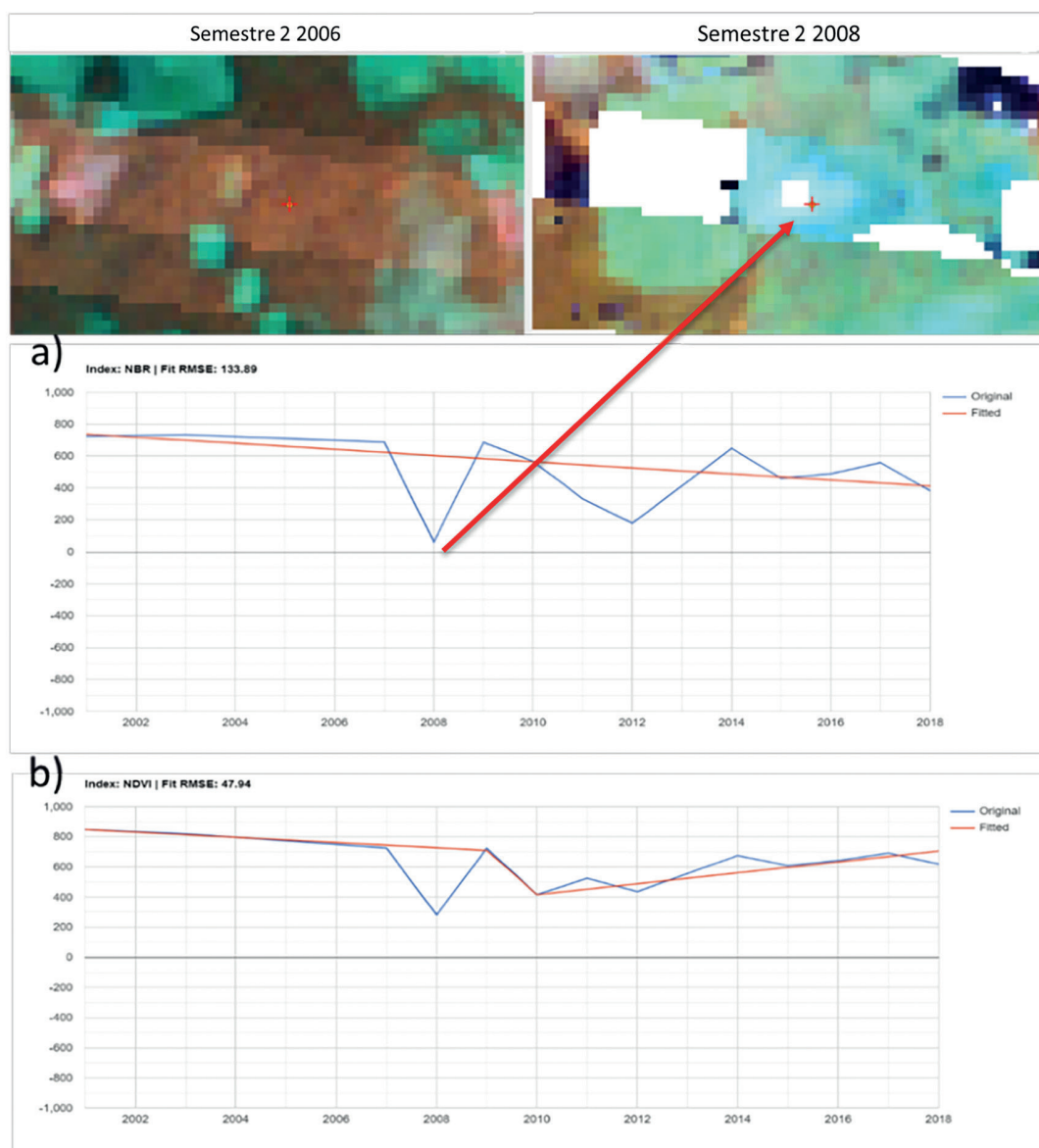


Figura 8. Análisis de un píxel puntual en la serie temporal usando los índices NBR y NDVI. Resultado del análisis con *Landtrendr*. Punto categorizado como deforestación.

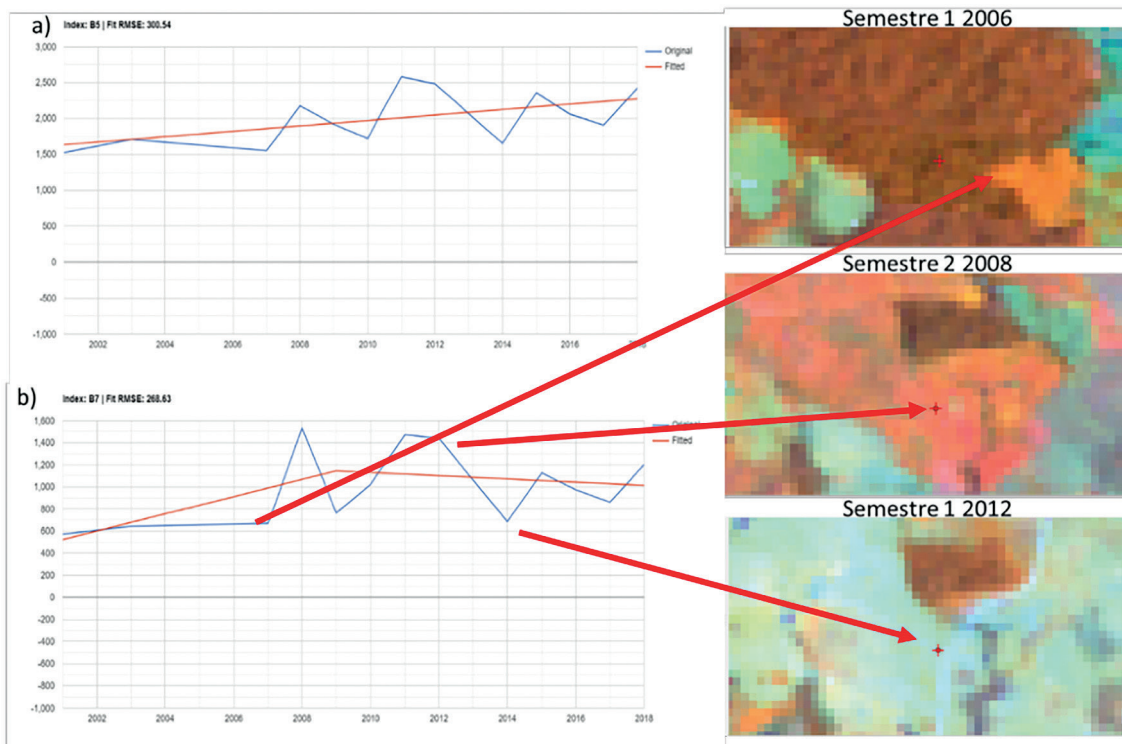


Figura 9. Análisis de un píxel puntual en la serie temporal usando las bandas SWIR y SWIR2 de Landsat. Realizado con *Landtrendr*. Punto categorizado como deforestación entre dos intervalos de tiempo (deforestación acumulada).

la figura 9 se realiza el análisis con las dos bandas del infrarrojo de onda corta y se muestra una deforestación generada parcialmente en dos momentos de la serie temporal. Las gráficas a y b muestran las variaciones de la pérdida de bosque a vegetación arbustiva y posteriormente a suelo expuesto que concuerda con los mosaicos del extremo derecho de la gráfica. La banda del SWIR2 presenta mayores fluctuaciones en el análisis de pérdida de vegetación, permitiendo una identificación mucho más eficaz.

Tabla 3. Resultados de valores y rangos de cambio usando *Landtrendr*.

Banda o índice espectral	Valores antes	Valores después
NIR	3100 - 3200	2900 - 2700
SWIR	1500 - 1600	2500 - 2700
SWIR2	500 - 600	900 - 1100
NDVI	0.8 a 0.9	0.3 - 0.5
NBR	0.8 a 1	0 - 0.2

Teniendo en cuenta los resultados de cambio en el bosque obtenidos en *Landtrendr* se valida la información en los 500 sitios de estudio teniendo como

resultado los umbrales para un periodo previo a la deforestación y los umbrales respectivos para el momento posterior al cambio para las bandas espectrales más relevantes en la detección de deforestación, al igual que los índices temáticos que muestran mayor variación en la detección, dichos umbrales se pueden consultar en la tabla 3. Por otra parte, en la tabla 4 se muestran los resultados de exactitud temática de los puntos analizados con *Landtrendr* y comparados con los resultados derivados de IDEAM y GFW.

Tabla 4. Evaluación de exactitud temática de los resultados derivados de *Landtrendr* respecto a datos oficiales.

Fuente	% errores Omisión	% errores Comisión	% Kappa
IDEAM	0.23	0.40	0.89
GFW	0.38	0.58	0.73

4. Discusión de resultados

El análisis visual de los sitios de perturbación en el bosque amazónico permite identificar el momento exacto de la pérdida de bosque e identificar el

grado de cambio (paulatino o abrupto) al igual que el periodo de tiempo que conlleva dicho cambio. La interpretación visual tiene una gran limitante en cuanto a la preparación de los datos y el tiempo requerido en la categorización de la perturbación según las clases (deforestación, plantaciones, regeneración o degradación) según sea el caso. Sin embargo, la interpretación visual permite evaluar la calidad de los píxeles de análisis incluyendo la presencia de nubes, bruma o sombras que afectan a los resultados finales obtenidos de la categorización.

Por otra parte, el desarrollo de la categorización e identificación de los valores asociados a la detección de deforestación usando *Landtrendr* optimiza considerablemente los tiempos empleados en la tipificación de los sitios de evaluación de la perturbación en el bosque. Los resultados obtenidos entre la metodología visual y la metodología empleando *Landtrendr* son congruentes comparando los sitios de interés y complementan los análisis derivados. Sin embargo, al emplear *Landtrendr* existen ciertos parámetros predefinidos por la herramienta bajo los cuales el usuario no tiene control y pueden derivar errores acumulados que generan análisis confusos de la serie temporal obtenida en un punto específico de la zona de estudio. Los errores de omisión son muy bajos en sitios en los cuales *Landtrendr* identifica deforestación y los datos oficiales no lo hacen, mientras que los errores por exceso muestran zonas identificadas en *Landtrendr* como deforestación y los datos oficiales lo categorizan como otro tipo de cobertura. La exactitud temática evaluada con el índice *Kappa* indica que para resultados derivados de interpretación visual es muy alta mientras que herramientas automatizadas pueden tener una gran diferencia.

La metodología propuesta tiene una gran potencialidad al examinar las diversas perturbaciones del bosque usando las series temporales. Aunque el propósito está centrado en los resultados derivados de deforestación, el análisis de estas series temporales puede ser fácilmente adaptable para la detección de regeneración o el estudio detallado de degradación forestal, que requiere amplios periodos de análisis y un volumen considerable de datos. Este estudio puede enmarcar una investigación alternativa que combine el aspecto visual y estadístico de puntos sobre bosque, aunque no se ha replicado en otras zonas o cambios de coberturas de manera que puedan refinarse los resultados y necesita de una serie

de pruebas más exhaustivas bajo una metodología adaptada o la misma presentada en este artículo.

Para futuras investigaciones los autores proponen que se emplee en otro tipo de zonas de estudio para comprobar si los valores definidos en las categorías de perturbación son válidos para otro tipo de ecosistemas boscosos. *Landtrendr* comprende una metodología automatizada, por lo cual es necesario un estudio más riguroso de la parametrización empleada en la detección de perturbación en el bosque, no solo para deforestación sino para un tipo de cambio inverso como es la reforestación que requiere de una serie de datos mucho más robusta y el análisis de periodos mas largos de tiempo.

5. Conclusiones

Aunque el análisis visual demande amplios periodos de tiempo se recomienda realizarlo teniendo en cuenta que se observan las variaciones puntuales y los rangos estadísticos del cambio de la cobertura boscosa. Sin embargo, herramientas que tienen un alto nivel de desarrollo como *Landtrendr* permiten no solo identificar los cambios y extraer sus valores estadísticos para un sitio en específico, sino también generar mapas de cambios parametrizando modelos de ajustes a partir de los datos de reflectancia.

Esta investigación muestra cómo las series temporales tienen gran potencialidad en la detección de cambios, no solo para la deforestación que es el objeto específico de estudio sino para otro tipo de perturbaciones, lo cual requiere ajustar las zonas de estudio y épocas del año de análisis.

Finalmente, esta investigación podría ser replicada en diversas zonas del mundo y periodos del tiempo, además de examinar otros tipos de cambios como quemas o deslizamientos de masas, ajustando los límites estadísticos en las bandas espectrales o empleando los índices temáticos descritos en este estudio u otros que puedan tener más peso en la identificación de cambio en otras coberturas.

Referencias

- Armenteras, D., Gibbes, C., Anaya, J.A., Dávalos, L.M. 2017. Integrating remotely sensed fires for predicting deforestation for REDD+. *Ecological Applications*, 27(4), 1294-1304. <https://doi.org/10.1002/eap.1522>

- Armenteras, D., Rodríguez, N. 2014. Dinámicas y causas de deforestación en bosques de Latino América: una revisión desde 1990. *Colombia Forestal*, 17(2), 233. <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.colomb.for.2014.2.a07>
- Camacho-Sanabria, J.M., Pérez, J.I., Pineda-Jaimes, N.B., Cadena-Vargas, E.G., Bravo-Peña, L.C., Sánchez-López, M. 2015. Cambios de cobertura/ uso del suelo en una porción de la Zona de Transición Mexicana de Montaña. *Madera y Bosques*, 21(1), 93-112. <https://doi.org/10.21829/myb.2015.211435>
- Comisión Nacional Forestal. 2017. *Situación Actual y Perspectivas de las Plantaciones Forestales Comerciales en México*. Disponible en [https://framework-gb.cdn.gob.mx/files/conafor/Libro-Situacion Actual y Perspectivas de las Plantacionaes Forestales Comerciales en Mexico.pdf](https://framework-gb.cdn.gob.mx/files/conafor/Libro-Situacion_Actual_y_Perspectivas_de_las_Plantacionaes_Forestales_Comerciales_en_Mexico.pdf). Último acceso: diciembre de 2019.
- Coronel, Y.T. 2015. Método de los promedios anuales en el monitoreo de los cambios de cobertura por deforestación usando el sensor MODIS The average annual changes deforestation monitoring method in coverage using the MODIS model. *ECIPeru*, 11.
- Corpoamazonia. 2018. Clasiicacion de suelos en la amazonia. Consultado en Julio de 2019, disponible en http://www.corpoamazonia.gov.co/region/Jur_suelos.htm
- David, C., Sosa, R. 2014. *Determinantes Espacialmente Explícitos de Transiciones en Coberturas Terrestres con Significativo Impacto para la Provisión de Servicios Ecosistémicos: Análisis Temporal y Espacial, 1986-2012*. Disponible en <http://www.bdigital.unal.edu.co/39529/1/1020403076.2014.pdf> Último acceso: diciembre de 2019.
- Defries, R., Achard, F., Brown, S., Herold, M., Murdiyarsa, D., Schlamadinger, B., De Souza, C. 2007. *Earth observations for estimating greenhouse gas emissions from deforestation in developing countries*. 10(4), 385-394. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2007.01.010>
- Defries, R., Frédéric, A., Brown, S., Herold, M., Murdiyarsa, D., Schlamadinger, B., Souza, C. 2006. *Reducing greenhouse gas emissions from deforestation in developing countries: considerations for monitoring and measuring*. Report of the global terrestrial observing system (GTOS) number, 46, 23
- DeVries, B., Verbesselt, J., Kooistra, L., Herold, M. 2015. Robust monitoring of small-scale forest disturbances in a tropical montane forest using Landsat time series. *Remote Sensing of Environment*, 161, 107-121. <https://doi.org/10.1016/J.RSE.2015.02.012>
- Dutrieux, L.P., Verbesselt, J., Kooistra, L., Herold, M. 2015. Monitoring forest cover loss using multiple data streams, a case study of a tropical dry forest in Bolivia. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 107, 112-125. <https://doi.org/10.1016/J.ISPRSJPRS.2015.03.015>
- El Tiempo. 2017. Explicación científica de la tragedia en Mocoa -Medio Ambiente-Vida-eltiempo.com. Consultado en October de 2017, disponible en <http://www.eltiempo.com/vida/medio-ambiente/explicacion-cientifica-de-la-tragedia-en-mocoa-76390>
- El Tiempo. 2018. La Macarena, la zona más deforestada de este 2018 | RCN Radio. Consultado en Julio de 2019, disponible en <https://www.rcnradio.com/estilo-de-vida/medio-ambiente/la-macarena-la-zona-mas-deforestada-de-este-2018>
- Hansen, M.C., Potapov, P.V, Moore, R., Hancher, M., Turbanova, S.A., Tyukavina, A., ... Townshend, J.R.G. 2013. High-resolution global maps of 21st-century forest cover change. *Science (New York, N.Y.)*, 3426160, 850-853. <https://doi.org/10.1126/science.1244693>
- Heredia-Laclaustra, A., Martínez-Sánchez, S., Quintero, E., Piñeros, W., Chuvieco, E. 2003. *Comparación de distintas técnicas de análisis digital para la cartografía de áreas quemadas con imágenes LANDSAT ETM+*. Disponible en www.geofocus.org. Último acceso: diciembre de 2019.
- IDEAM. 2014. *Protocolo de procesamiento digital de imágenes para la cuantificación de la deforestación en Colombia V.2*. Disponible en http://redd.unfccc.int/files/anexo_a_protocolo_procesamiento_digital.pdf. Último acceso: diciembre de 2019.
- IDEAM. 2016. *Estrategia Integrada de control a la deforestación*. (IDEAM, Ed.). Disponible en <http://www.ideam.gov.co/documents/24277/0/Presentación+Estrategia+Integral+de+Control+a+la+Deforestación/173f79bf-3e68-4cbc-9387-80123d09b5e2>
- IDEAM. 2018. Alertas tempranas por deforestación - IDEAM. Consultado en Julio de 2018, disponible en <http://www.ideam.gov.co/web/ecosistemas/alertas-tempranas-por-deforestacion>
- INPE. 2019. PRODES - Coordinación General de Observación de la Tierra. Consultado en Julio de 2019, disponible en <http://www.obt.inpe.br/OBT/assuntos/programas/amazonia/prodes>
- IPCC. 2003. *Decision sixth assessment report (AR6) products Decision and Outline of the Special Report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems*. Disponible en www.ipcc.ch.

- Kennedy, R., Yang, Z., Gorelick, N., Braaten, J., Cavalcante, L., Cohen, W., Healey, S. 2018. Implementation of the LandTrendr Algorithm on Google Earth Engine. *Remote Sensing*, 10(5), 691. <https://doi.org/10.3390/rs10050691>
- Masera, O., Ordoñez, M. de J., Dirzo, R. 1992. Emisiones de carbono a partir de la deforestación en México. *Ciencia*, 43, 151-153. Disponible en https://dirzolab.stanford.edu/wp-content/articles/A_1992/22_1992_Ciencia.pdf. Último acceso: diciembre de 2019.
- Molinier, M., Astola, H., Raty, T., Woodcock, C. 2018. Timely And Semi-Automatic Detection of Forest Logging Events in Boreal Forest Using All Available Landsat Data. *IGARSS 2018 - 2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 1730-1733. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2018.8518112>
- Moncada-Rasmussen, D.M. 2010. Spatio-temporal analysis of oak forests (*Quercus humboldtii* Bonpl.) change and its relationship with pottery at Aguabuena (Ráquira-Boyacá). *Colombia Forestal*, 13, 275-298. <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.colomb.for.2010.2.a07>
- PNN. 2019. Parques Nacionales | Parques Nacionales Naturales de Colombia. Consultado en julio de 2019, disponible en <http://www.parquesnacionales.gov.co/portal/es/parques-nacionales/>
- Romero-Mieres, M., González, M.E., Lara, A. 2014. Recuperación natural del bosque siempreverde afectado por tala rasa y quema en la Reserva Costera Valdiviana, Chile. *Bosque (Valdivia)*, 35(3), 257-267. <https://doi.org/10.4067/S0717-92002014000300001>
- Santos, T., Tellería, J.L. 2006. Pérdida y fragmentación del hábitat: efecto sobre la conservación de las especies. *Revista Científica y Técnica de Ecología y Medio Ambiente*, 15.
- Schultz, M., Clevers, J.G.P.W., Clevers, J.G.P.W., Carter, S., Verbesselt, J., Avitabile, V., ... Herold, M. 2016. Performance of vegetation indices from Landsat time series in deforestation monitoring Copernicus Global Land Service: Dynamic Land Cover View project Finite element modelling of trees based on terrestrial LiDAR scanning data View project Performance of vegetation indices from Landsat time series in deforestation monitoring. *International Journal of Applied Earth Observations and Geoinformation*, 52, 318-327. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2016.06.020>
- SMBYC. 2017. Alertas Tempranas de Deforestación. Consultado en julio de 2018, disponible en <http://smbyc.ideam.gov.co/MonitoreoBC-WEB/pub/alertasDeforestacion.jsp>
- SMBYC. 2018. Cambio de la Superficie Cubierta por Bosque Natural (Nacional) por Consolidado Nacional períodos: 2016-2017. Consultado en julio de 2018, disponible en http://smbyc.ideam.gov.co/MonitoreoBC-WEB/pub/reporteGeoproceso.jsp?id_reporte=6891
- Turbanova, S., Potapov, P. V., Tyukavina, A., Hansen, M. C. 2018. Ongoing primary forest loss in Brazil, Democratic Republic of the Congo, and Indonesia. *Environmental Research Letters*, 13(7), 074028. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aacd1c>
- UN-SPIDER. 2019. Normalized Burn Ratio (NBR) | UN-SPIDER Knowledge Portal. Consultado en octubre de 2019, disponible en <http://un-spider.org/advisory-support/recommended-practices/recommended-practice-burn-severity/in-detail/normalized-burn-ratio>
- Verified Carbon Standard. 2018. *Methodology Assessment Report: Baseline and Monitoring Methodology for Avoiding Planned Deforestation of Undrained Peat Swamp Forests Methodology Element Title Baseline and Monitoring Methodology for Avoiding Planned Deforestation of Undrained Peat Swamp Forests*. Disponible en <https://www.scsertified.com>. Último acceso: diciembre de 2019.

