

Análisis de cambios de coberturas en dos áreas de compensación forestal ubicadas en los municipios de la Cumbre y Dagua en el departamento del Valle del Cauca durante los años 2013, 2014 y 2020.

Artículo de estudio de caso como opción de grado

Igor Pérez Durán
igor.perez00@usc.edu.co

Universidad Santiago de Cali
Facultad de Ingenierías
Especialización en Sistemas de información geográfica

Resumen

Fueron generadas capas de coberturas sobre dos predios en compensación forestal denominados como Villa María en el municipio de Dagua y también el predio Santa Fe en el municipio de la Cumbre, departamento de Valle del Cauca - Colombia. Las coberturas se generaron para marzo de 2020 (ambos predios), para Diciembre de 2013 (Villa María) y Agosto de 2014 (Santa Fe) aplicando una clasificación supervisada e implementando la leyenda de clasificación de coberturas Corine land cover ajustado para Colombia (CLC Colombia). Además de la actualización de coberturas al año 2020, se hizo comparación con las épocas 2013 y 2014, que fueron los años iniciales de inicio de estas compensaciones, y través de esta comparación se evaluó el aumento o disminución de coberturas que generó la implementación de la medida de compensación enfocada principalmente a una estrategia de restauración forestal. Se pudo determinar que durante el periodo de análisis multitemporal (6-7 años) se presentaron aumentos en las coberturas herbazales principalmente a cambio de disminución en coberturas tipo pastizal. Sin embargo se presentaron aumentos en coberturas no deseadas en los procesos de sucesión ecológica como el caso de aumento de coberturas helechal, mientras que para algunos sectores se presentó disminución de cobertura arbustal. De esta manera que el 50% de las área desarrollaron cambios positivos que contribuyen positivamente en lograr estados sucesionales mas avanzados, pero entre un 40% y 43% presenta un estancamiento o deterioro en el proceso deseado de sucesión ecológica, por lo que se recomiendan implementar medidas erradicación de coberturas no deseadas (helechal principalmente), siembra de especies pioneras y repoblamiento forestal de alta densidad en los sectores con bajos cambios en sus coberturas.

Palabras clave: Clasificación supervisada de coberturas, percepción remota, Corine land cover, restauración forestal, sucesión ecológica.

Abstract

Coverage layers were generated on two lands in forest compensation called Villa María in the municipality of Dagua and also the Santa Fe estate in the municipality of La Cumbre, department of Valle del Cauca - Colombia. Coverages were generated for March 2020 (both properties), for December 2013 (Villa María) and August 2014 (Santa Fe) applying a supervised classification and implementing the Corine land cover classification legend adjusted for Colombia (CLC Colombia). In addition to updating coverage to 2020, a comparison was made with the periods 2013 and 2014, which were the initial years of the beginning of these compensations, and through this comparison the increase or decrease in coverage generated by the implementation of the compensation measure focused mainly on a forest restoration strategy. It could be determined that during the multitemporal analysis period (6-7 years) Increases in grassland coverings occurred mainly in exchange for a decrease in grassland-type coverings. However, there were increases in unwanted coverage in the processes of plant succession as the case of increased fern coverage, while for some sectors there was a decrease in tree cover. In this way, 50% of the areas developed positive changes that contribute positively to achieving more advanced successional states, but between 40% and 43% present a stagnation or deterioration in the desired process of plant succession, so it is recommended to implement measures to eradicate unwanted cover (mainly fern), planting of pioneer species and high-density afforestation in sectors with low changes in cover.

Keywords: Supervised coverage classification, remote sensing, Corine land cover, forest restoration, ecological succession

1. Introducción

Las coberturas de la tierra proporcionan información fundamental para diversos procesos nacionales como la generación de mapas de ecosistemas, conflictos de uso del territorio, ordenación de cuencas y del territorio, seguimiento a la deforestación de los bosques, y los inventarios forestales, sólo por citar a algunos (IDEAM, 2010). Se considera que el análisis de las coberturas puede ser utilidad para establecer estrategias de restauración forestal en medio de obligaciones de compensaciones forestales, obligaciones que son muy frecuentes en los proyectos de infraestructura que licenciamiento ambiental.

Se cuenta con la necesidad de actualizar las coberturas del suelo, principalmente de tipo vegetal, sobre dos áreas que fueron enriquecidas con plantaciones forestales con especies nativas, como medidas de compensación forestal entre los años 2013 y 2014, lo cual obedece a la obligación adquirida en su licencia ambiental al ejecutor del proyecto del poliducto del pacífico (Yumbo-Buenaventura).

Dicha necesidad nace de que las plantaciones estuvieron abandonadas por 05 años (2014-2018) y sus coberturas vegetales cambiaron en este tiempo, por lo cual se establece la importancia de contar con la cartografía actualizada de dichas coberturas, para conformar una herramienta de planificación de las áreas en las que son requeridas realizar nuevos enriquecimientos forestales de acuerdo con las coberturas presentes. Adicionalmente se hace conveniente hacer un análisis multitemporal entre los años 2013 y 2014 (años iniciales de los establecimientos) y el primer trimestre del año 2020 para determinar que coberturas se consolidaron dentro del predio y determinar si son de valor ecológico para la compensación forestal en ejecución.

Se debe considerar que la información temática disponible actualmente en los geoportales del IDEAM y CVC relacionadas con coberturas, son discrepantes referente a lo observado en visitas de campo sobre estos predios, por lo que se hace necesario realizar análisis particulares para determinar la cobertura vegetal con un mayor detalle sobre los predios en cuestión en escalas entre 1:2.000 a 1:5.000

También es considerar que no es habitual implementar este tipo de evaluaciones en las compensaciones forestales pero se hace relevante para este caso implementar técnicas de percepción remota para clasificar las coberturas sobre estas áreas y evaluar sus cambios considerando lo extenso en el periodo de seguimiento que habitualmente no superaría los 03 a 05 años y para estos dos casos se cuenta con la oportunidad de poder integrar este tipo de seguimiento en un mayor lapso de tiempo (6 a 7 años) lo que podría dar indicios de si realmente es útil la implementación de la percepción remota en el seguimiento de este tipo de proyectos.

2. Antecedentes

Para la construcción del poliducto del pacífico Yumbo-Buenaventura fue otorgada la licencia ambiental N° 258 de 1995 y para dicho proyecto ya fue culminada su etapa constructiva y actualmente se encuentra en proceso de operación. De la etapa constructiva, en su licencia ambiental, quedaron unos pendientes ambientales por subsanar, entre los que se encuentra la compensación forestal de 83 hectáreas por el permiso de aprovechamiento forestal que se le otorgó en su momento al proyecto para la construcción del poliducto.

Con el objeto de cumplir con este pendiente de la licencia ambiental, Ecopetrol como empresa operadora del poliducto, recibió dicha obligación y contrató a la fundación los Bitacoes para que ejecutará compensación forestal en estos predios

los cuales en conjunto suman una extensión de 53,39 hectáreas las cuales fueron realizadas en los predios Santa Fe y Villa María en los municipios de La Cumbre y Dagua, respectivamente, durante los años 2013 y 2014. Sin embargo, a partir de mediados del año 2014, por cuestiones presupuestales fue suspendido el contrato de operación de Ecopetrol a este poliducto del pacífico, y con ello también el mantenimiento que se le venía prestando a las plantaciones en estos dos predios. Después de cinco años de abandono, en Septiembre del año 2018 fueron retomadas las labores de mantenimiento sobre estas plantaciones a través de la suscripción de un nuevo contrato con la fundación los Bitacoes,

El panorama encontrado a partir de Octubre del 2018, cuando fueron retomadas las labores, es que durante las 05 años que estuvo la plantación sin mantenimiento se presentó gran pérdida de los árboles que previamente habían sido sembrados en el año 2013, pero también se presentaron cambios en el tipo de cobertura vegetal, ya que algunos individuos sobrevivientes continuaron con su crecimiento conformando bloques o sectores o en otras situaciones la cobertura predominante fue de tipo arbustiva, herbácea o helechal.

Entre los meses de Octubre y Diciembre de 2018 fueron realizadas las resiembras o reposición de los árboles perdidos o muertos, sin embargo aún faltan sectores en los que se deben realizar mas resiembras, mientras que hay otros en las que no se observa la conveniencia de realizar estas resiembras por cuanto han aparecido especies arbustivas o arbóreas de valor ecológico que por sí solas constituyen parte de la compensación forestal y que han ganado una ocupación en estos predios producto de la regeneración natural o por crecimiento de los individuos sembrados.

De esta forma se hace necesario poder determinar por medio de percepción remota (aplicación de sensores remotos) las actuales coberturas, principalmente de tipo vegetal sobre estos predios, para poder establecer una base cartográfica sobre la que se puedan tomar decisiones de en donde se puede realizar las nuevas siembras de árboles. Acompañado de esta determinación de coberturas actuales, se hace adecuado realizar un análisis multitemporal entre los años 2013-2014 y 2020 para establecer cuáles fueron las nuevas coberturas vegetales que se desarrollaron dentro del predio y establecer donde se encuentra y si son de importancia para su conservación o en su lugar deben ser reemplazadas por nuevas plantaciones.

3. Marco teórico

3.1 Percepción remota

La percepción remota o teledetección es la ciencia de adquirir información sobre objetos lejanos sin hacer contacto físico con ellos, restringida a medidas de radiación electromagnética, incluyendo luz visible e infrarroja, al igual que ondas de radio y calor. Tal definición implica que entre la superficie de la tierra y el sensor debe existir una interacción energética, ya sea por reflexión de la energía solar o de un haz energético artificial, o por emisión propia. A su vez, es preciso que ese haz energético recibido por el sensor se transmita a la superficie terrestre, donde la señal detectada pueda almacenarse y, en última instancia, ser interpretada para una aplicación determinada (Villegas Vega, 2008).

El proceso de teledetección se inicia con radiaciones electromagnéticas del sol (detección remota pasiva) o del propio satélite (detección remota activa). Las radiaciones incidentes se reflejan, absorben y transmiten mientras interactúan con la superficie de la Tierra. El sensor del satélite mide estas radiaciones reflejadas, que contienen información sobre la tierra, procesos que tienen lugar durante el paso elevado del satélite en una ubicación. Los procesos terrestres incluyen los componentes del ciclo hidrológico, procesos de vegetación, interacciones con cuerpos de agua, geomorfología y topografía. Cada uno de los procesos terrestres podrían ser sensible a mediciones en longitudes de onda / frecuencias específicas. Además, las mediciones satelitales también están influenciadas por resoluciones espaciales, temporales, espectrales y radiométricas, que son asociadas con la configuración del sensor (Karthikeyan, Chawla, & Mishra, 2020).

3.2 Restauración ecológica

La restauración ecológica es entendida como el proceso y practica de auxiliar a la recuperación de un ecosistema que fue degradado, damnificado o destruido (SER, 2004). La restauración tiene un amplio espectro de actividades que van dirigidas

a la mejoría ambiental, como rehabilitación ecológica, restauración forestal, restauración de hábitat, recuperación ambiental y revegetación. El caso de la restauración forestal entiéndase como la restauración ecológica aplicada a ecosistemas forestales (Isaacs & Ariza, 2015).

La restauración y la escala del paisaje

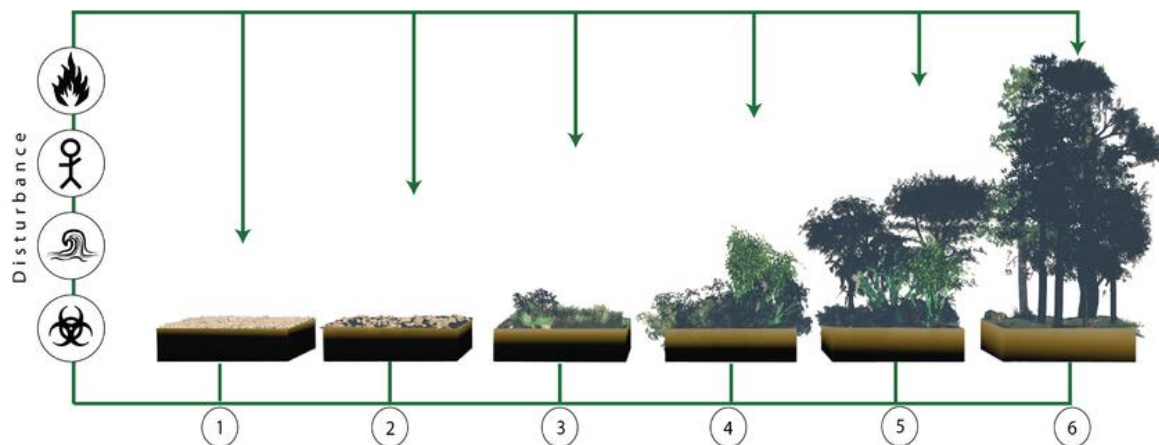
Usualmente, cuando se quiere abordar la restauración ecológica a nivel espacial se deben determinar los disturbios que se presentan y que pueden ser observables a partir de insumos cartográficos (e. g. zonas quemadas, especies exóticas, erosión, etc.). En este caso, es importante determinar el tipo de disturbio, si fue natural o antrópico, si abarcó un área extensa o pequeña, si ha sido recurrente y persistente, si ha sido frecuente o impredecible, si su magnitud es amplia y si ha sido planeado intencionalmente (Isaacs & Ariza, 2015). La restauración a escala de paisaje implica la búsqueda de la reintegración de ecosistemas fragmentados y paisajes, más que el enfoque sobre un único ecosistema. De hecho, aún si el objetivo de la restauración es planteado a escala ecosistémica, se requiere una visión del proceso a una escala de paisaje, puesto que las funciones ecosistémicas están relacionadas con flujos de organismos, materia y energía entre las diferentes unidades del paisaje (SER, 2004).

Debido a que los paisajes presentan zonas heterogéneas dinámicas y con variados patrones, es necesario contar con una serie de indicadores que evalúen las condiciones del paisaje en términos de estructura y función y que faciliten el monitoreo. El monitoreo debe llevarse a cabo de acuerdo a la escala y extensión del área de estudio y a través de diferentes espacios de tiempo (corto, mediano y largo plazo). Para analizar dichos aspectos se requieren de insumos geoespaciales obtenidos en su mayoría por medio de imágenes de sensores remotos y procesamiento por medio de sistemas de información geográfica (GREUNAL, Vargas, Reyes, Gomez, & Díaz, 2012).

Concepto de sucesión ecológica

La sucesión ecológica fue definida como el reemplazo secuencial de las especies después de una perturbación, entendiendo la perturbación como una pérdida relativamente abrupta de la estructura o la biomasa. (Prach & Walker, 2011). En su camino secuencia de reemplazo de especies, gradualmente va cambiando el tipo de cobertura, principalmente de tipo vegetal empezando por pastizales y herbazales, dando lugar a especies pioneras de tipo arbustivo y arbóreo que permiten ir conformando nuevos sectores con coberturas arbustivas y de bosque.

Figura 1. Cambios de cobertura en los proceso de sucesión vegetal.

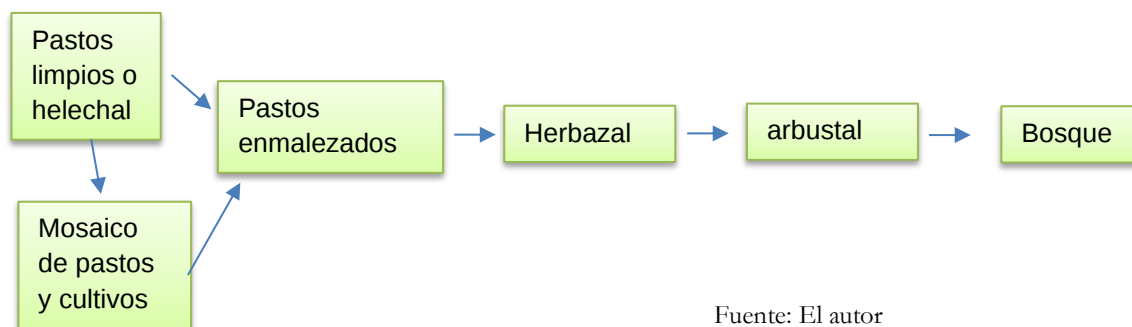


Fuente imagen: modificado de Sucesión forestal de (Lucas Martin, 2011)

Es de tener en cuenta que la restauración es un proceso de asistencia al proceso de sucesión que se puede generar de forma natural o con medidas de asistencia como los enriquecimientos forestales que se manejan en las compensaciones forestales. De esta manera debe ser evaluado de forma permanente si la dirección de la sucesión basado en las coberturas que se

alcancen, es adecuado para lograr obtener áreas con coberturas, principalmente de tipo boscoso con especies de distribución en la región, ya que lo que se desea con los procesos de restauración es intentar lograr obtener el ecosistema que se tenía en el área antes de su intervención antrópica. En este sentido se propone la siguiente dirección en los proceso de sucesión, considerándose que los cambios son positivos cuando las coberturas van en la dirección indicada o por lo menos cuando se conservan las áreas boscosas y son negativos estos cambios cuando van en dirección opuesta.

Figura 2. Dirección positiva de los cambios de cobertura en los proceso de sucesión ecológica



Fuente: El autor

3.3 Clasificación de coberturas

En términos puntuales para la delimitación de las coberturas de la Tierra, el IDEAM (Ceballos, A. et al., 1997) describe la cobertura como la unidad delimitable que surge a partir de un análisis de respuestas espectrales determinadas por sus características fisionómicas y ambientales, diferenciables con respecto a la unidad próxima.

Clasificación supervisada.

Este tipo de clasificación requiere del conocimiento de la zona de estudio, adquirido por experiencia previa o por la realización de un trabajo de campo. Es decir, que el intérprete debe tener una gran familiaridad con el área de interés, para poder interpretar y delimitar sobre la imagen, áreas suficientemente representativas, denominadas áreas o regiones de interés (ROI por sus siglas en inglés), de cada una de las categorías representadas y que forman parte de la leyenda (Francisco, Conde, & Ambiente, 2020). Los pasos básicos para realizar una clasificación supervisada son los siguientes:

- Etapa de entrenamiento: en esta etapa el intérprete identifica áreas de entrenamiento representativas, y genera una descripción numérica de los atributos espectrales de cada categoría de cobertura de la tierra por escena.
- Etapa de clasificación: Cada píxel es categorizado y asociado a una determinada categoría de la leyenda de acuerdo a su mayor semejanza. En el caso que el píxel sea insuficientemente similar, este se catalogará como "desconocido".
- Etapa de análisis de precisión y verificación de resultados: La estimación de la exactitud de una clasificación es el grado de concordancia entre las clases asignadas por el clasificador y los datos tomados en el terreno obteniendo una estimación más realista de los errores siempre y cuando la muestra de píxeles sea lo suficientemente representativa.

Existen diversos procedimientos matemáticos para analizar los patrones espectrales por medio de la clasificación supervisada. El tipo de clasificación óptimo dependerá del tipo y procesamiento de la imagen, datos disponibles e información que se quiera identificar. Son de amplio uso los denominados como clasificación por Paralelepípedos, clasificación por Mínima distancia, clasificación de Máxima verosimilitud y clasificación Spectral Angles.

En el caso de la clasificación mínima distancia consiste en la determinación de las medias de cada clase. La asignación se realiza hacia la clase con menor distancia. Algunos de los píxeles quedarán sin clasificar si se introduce una distancia máxima o una desviación estándar máxima. Los software realizarán este procedimiento de clasificación ubicando cada píxel no identificado (x_i) en la clase cuya media (m_i) se encuentra más cercana para lo cual puede utilizar la distancia euclidiana ("teledet.com," 2015), como se muestra en la siguiente ecuación en donde d es la distancia que se utiliza como base para determinar la distancia mínima al grupo o clase, a la que se sería asignado el píxel en proceso de clasificación:

$$d_j(\mathbf{x}) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - m_i)^2}$$

Metodología y leyenda de clasificación Corine Land Cover.

Corine Land Cover es una metodología de clasificación que se engloba dentro del Programa CORINE (Coordination of Information of the Environment), el cual inicia el 27 de junio de 1985, y en virtud de una decisión del Consejo de Ministros de la Unión Europea, pasa a ser responsabilidad de la Agencia Europea de Medio Ambiente (AEMA) en el año 1995 .

La metodología de clasificación Corine Land Cover tiene como propósito la realización del inventario homogéneo de la cubierta biofísica (cobertura) de la superficie de la tierra a partir de la interpretación visual de imágenes de satélite asistida por computador y la generación de una base de datos geográfica.

Para Colombia, el proceso de adopción y estandarización de la metodología y su leyenda de coberturas terrestres de Colombia, inició desde el año 2004 con la adaptación a nivel nacional de la metodología europea CORINE Land Cover - CLC; este proceso surge como respuesta a la necesidad que tenía el país de unificar y armonizar las diferentes metodologías y leyendas de cobertura terrestre empleadas hasta el momento, todo con el fin último de establecer un sistema de monitoreo que le permita generar información actualizada, confiable y trazable; dado que la amplia variabilidad de sistemas de clasificación no lo permitían.

A partir de la adopción de la Metodología CLC para Colombia y de la definición de una leyenda unificada, se logra estandarizar esta importante fuente de información a nivel nacional (IDEAM, 2014)

El proceso de clasificación se ha implementado en Colombia con imágenes de alta resolución como el caso de (Valecia & Anaya, 2009) en el que se determinaron los cambios en el uso del suelo entre 1992 y 2005 para una región de los Andes colombianos, además identificar las potencialidades y limitaciones de la metodología CLC en el ámbito colombiano. Para ello se ajustó la leyenda a las condiciones de Colombia, se mejoró la unidad mínima de mapeo a 0.5 ha, y se utilizaron como fuentes de información escenas Ikonos Geo no ortorrectificadas.

Para el presente estudio de caso de se implementa una metodología de clasificación supervisada usando las clases propuestas en la leyenda nacional a nivel nacional (IDEAM, 2010), para mantener un criterio unificado con la corriente actual en términos de leyendas de clasificación en Colombia.

Preprocesamiento y corrección de imágenes satelitales.

Las imágenes de satélite vienen dadas en valores de niveles digitales (DN), pero se debe tener especial cuidado de determinar lo que representan dichos valores y el estado de corrección al que ha sido sometido previamente la imagen por parte del proveedor de la misma. En este sentido en muchas ocasiones antes de iniciar la clasificación se debe realizar un preprocesamiento en donde son realizadas correcciones de tipo atmosférica, geométrica o radiométrica dependiendo de cada situación.

Un tipo de corrección atmosférica es el método del objeto oscuro, también conocido como DOS por sus siglas en inglés, que consiste en asumir que las áreas cubiertas con materiales de fuerte absortividad (agua, zonas de sombra) deberían presentar una radiancia espectral muy próxima a cero. Este valor mínimo es mayor en las bandas más cortas, disminuyendo hacia el IRC y SWIR. Una sencilla aproximación a la corrección atmosférica consiste en restar a todos los ND de cada banda el mínimo de esa misma banda, situando el origen del histograma en cero (Francisco et al., 2020).

Dicho método puede ser aplicado sobre imágenes con valores ND en reflectancia, sin embargo, existen casos en el que la imagen satelital aún no se encuentra en valores de reflectancia y los valores de sus píxeles deben ser primero convertidos a valores de radiancia y reflectancia. Habitualmente los factores de conversión para cada tipo de imagen vienen establecidos en sus metadatos. Para el caso de las imágenes del satélite RapidEye, se encuentra que solo es establecido sus factores para conversión a radiancia. Una solución para poder luego de ello convertir los valores de radiancia a reflectancia en el caso de imágenes RapidEye, es propuesta por (Carvalho, A. A.; Baptista, 2016), donde se establece la siguiente fórmula:

$$\text{Ref TOA (i)} = \text{Rad TOA (i)} \frac{\pi \times (\text{SunDist})^2}{\text{IEA (i)} \times \cos(\text{zénite solar})}$$

Donde Ref TOA: Reflectancia en tope de la atmósfera. Rad TOA: Radiancia en tope de la atmósfera. i: número de banda espectral. SunDist: Distancia Tierra-Sol en unidades astronómicas. IEA: Irradiancia exoatmosférica. Zenit solar: Angulo solar expresado en grados. Para RapidEye los valores de IEA para cada una de las 05 bandas son:

Azul: 1997,8 W/m²μm; Verde: 1863,5 W/m²μm; Rojo: 1560,4 W/m²μm; Rojo borde: 1395,0 W/m²μm; NIR: 1124,4 W/m²μm.

3.4 Monitoreo en procesos de restauración y compensación forestal en Colombia

En Colombia, la entidad encargada del monitoreo de bosques es el IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales) y desde 2012 Colombia cuenta con un Sistema de Monitoreo de bosque y Carbono (SMByC) con el apoyo del MADS (Ministerio de medio ambiental y desarrollo sostenible) y varias organizaciones gubernamentales y no gubernamentales de ámbito nacional e internaciones que apoyan la labor (IDEAM, 2016). Sin embargo la labor del IDEAM no tiene un enfoque particularizado para el monitoreo de áreas en restauración forestal, y su enfoque principal es la de inventariar coberturas forestales y la detección temprana de situaciones de deforestación.

Por otro lado también se cuenta con el SIATAC (Sistema de Información ambiental Territorial de la Amazonia colombiana) a cargo del instituto SINCHI (Instituto amazónico de investigaciones científicas), que soporta el monitoreo ambiental de la región de la Amazonía colombiana y que también tiene una enfoque orientado a la detección de incendios sobre vegetación.

Por otro lado en Colombia existen planes de compensación por pérdida de biodiversidad (CPPB), plan de inversión del 1% y planes de restauración ecológica, que son correspondiente con obligaciones adquiridas en licencias ambientales para la construcción de proyectos de infraestructura como vías, hidroeléctricas, poliductos, entre otros. Es de considerar que los CPPB presentan como alternativa de implementación la restauración ecológica que a su vez puede involucrar la restauración forestal. En un estudio realizado por (Murcia, Guariguata, Quintero-Vallejo, & Ramirez, 2017) sobre 17 planes de CPPB, 10 contemplaron estrategia de restauración y solo 2 de estos planes tuvieron planteada una estrategia de monitoreo, mientras que 3 de los documentos presentaron información cartográfica que soporte el CPPB. El estudio no encontró reportes de que se diera uso de los sensores remotos como técnica para hacer monitoreo a estos planes de restauración y solo son aplicados para la generación de los MaFE (Mapeo de fórmulas equivalentes) lo cual es requerido para establecer las áreas en las que se deben realizar las restauraciones pero como tal no constituyen un instrumento de monitoreo.

Es de tener en cuenta que para restauración ecológica, Colombia cuenta con el marco de referencia conformado por el plan nacional de restauración (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015) . Además se recomienda la metodología propuesta por (Isaacs & Ariza, 2015) para la implementación de sensores remotos según el documento denominado como Monitoreo de restauración ecológica de ecosistemas terrestres, que en su capítulo 2, en la sección denominada como Monitoreo a la restauración ecológica desde la escala del paisaje, se hacen recomendaciones sobre los indicadores a implementar y análisis de la información obtenida a través de sensores remotos.

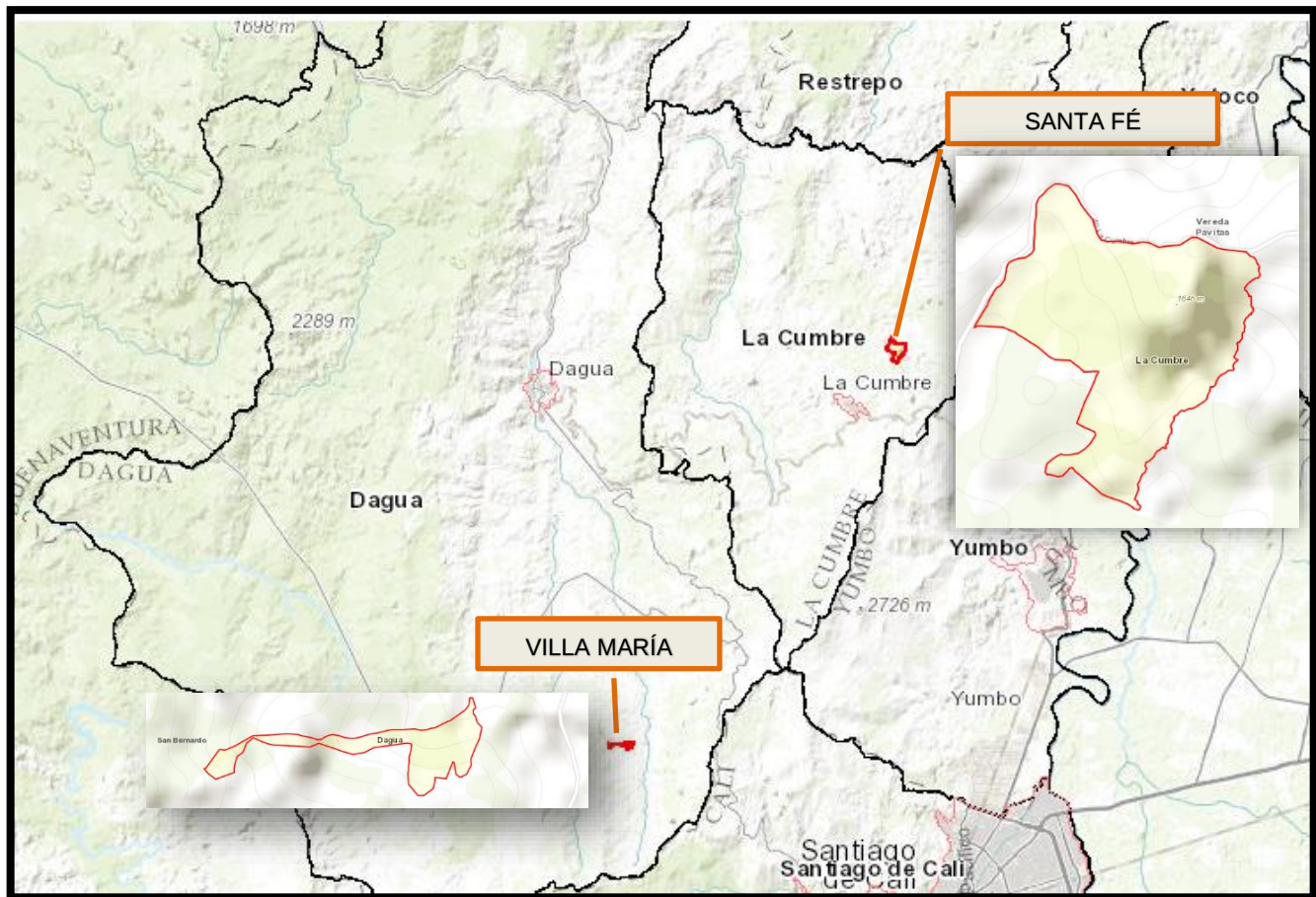
Se encuentra de que a pesar de existir un marco teórico para el monitoreo en procesos de restauración o de compensación forestal en Colombia implementando técnicas de percepción remota para evaluar cambios en las coberturas y monitorear los avances, su implementación en el país es baja.

4. Materiales y métodos

4.1 Áreas de compensación forestal en estudio.

Las plantaciones de las 53,39 hectáreas, pertenecientes a la compensación de las 83 hectáreas se localizan en los municipios de Dagua y la Cumbre, como se aprecia en la **Figura 3**.

Figura 3. Localización general de las 53,39 hectáreas en mantenimientos de la compensación forestal 83 hectáreas en los municipios de Dagua y la Cumbre.



Fuente: (Fundación Los Bitacoes, 2020). Ajustado por el autor.

Condiciones del sitio

La compensación se realizó con enfoque en restauración forestal se establecieron sus plantaciones en los municipios de La Cumbre y Dagua con las siguientes características particulares:

Predio Santa Fe: Se ubica en una zona de pastos cultivados junto a relictos de Arbustales y matorrales denso alto de tierra firme y Bosques mixto denso alto de tierra firme. El ecosistema general en el que se ubica esta plantación es el denominado como Bosque medio húmedo en montaña fluvio-gravitacional.

Predio Villa María: Se ubica en una zona de pastos cultivados junto a relictos de zonas de arbustales bajos. El ecosistema general en el que se ubica esta plantación es el denominado como Bosque medio húmedo en montaña fluvio-gravitacional.

Situación encontrada en los predios

En Marzo del año 2020, fueron revisados los predios Santa Fe y Villa María, encontrándose los mismos con plantaciones de remanentes de la siembras (establecimientos) realizados en el año 2013 y también algunos individuos sembrados en el año 2018 y 2019 como medida de reposición.

Las plantaciones se encontraron concentradas en algunos sectores de estos predios, mas no en toda la extensión de los mismo haciendo importante georreferenciar las áreas efectivas en donde realmente se encuentran estas plantaciones.

Adicionalmente se observó en las visitas que las plantaciones se encuentran en una matriz de coberturas conformadas principalmente por pastizales y/o herbáceas. En otros sectores se observó procesos de avance en la sucesión vegetal con especies de tipo arbustivo y arbóreo que contribuyen con la recuperación de las áreas previamente degradadas.

Figura 4. Plantación del predio Santa Fe en medio de herbáceas



Fuente: el autor

Figura 5. Plantación del predio Villa María en medio de herbáceas



Fuente: el autor

Sin embargo también existen otro tipo de coberturas que debe ser evaluada su conveniencia de permanencia dentro del predio o en su defecto remoción de las mismas, como es el caso de la cobertura Helechal, conformado principalmente por la especie denominada como “helecho marranero” (*Pteridium aquilinum*), la cual conforma una matriz de cobertura que no permite la emergencia y regeneración natural de otro tipo de especies de valor ecológico de porte arbustivo y arbóreo, frenando los procesos naturales de sucesión.

Por otro lado al hacerse una revisión sobre los linderos se encontraron se encontraron unas inconsistencias que debieron subsanarse para determinar las áreas efectivas en las que se implementaron las plantaciones. En el mes de Marzo y Junio de 2020 se pudo adelantar la verificación y corrección del perímetro de las áreas de compensación forestal en estudio, ajustándose la forma de su geometría, presentándose a continuación ubicación y resumen de las áreas en estudio:

Tabla 1. Ubicación de las áreas de compensación forestal en estudio y su actualización de área.

OBLIGACIÓN	PREDIO	MUNICIPIO	LATITUD	LONGITUD	AREA INICIAL (Ha)	AREA ACTUALIZADA (Ha)
COMPENSACIÓN FORESTAL	Santa Fe	La Cumbre	3°40'18.31"N	76°33'1.58"O	41,26	43,65
	Villa María	Dagua	3°31'6.48"N	76°39'24.54"O	17,56	9,74
	TOTAL				58,82	53,39

Fuente: (Fundación Los Bitacoes, 2020). Ajustado por el autor.

4.2 Gestión preliminar para la obtención de imágenes satelitales de alta resolución.

El plan de compensación enfocado en restauración forestal que se encuentra en ejecución en los predios Villa María y Santa Fe, requiere un estudio que permita obtener información cartográfica que sirva de instrumento para tomar decisiones en la planificación del manejo que se le deba dar a estas plantaciones con base en la actualización e identificación de coberturas del suelo. También es requerido un análisis multitemporal para determinar los cambios en las coberturas, principalmente vegetales, y poder sustentar un avance en el proceso de sucesión del ecosistema que se intenta restaurar.

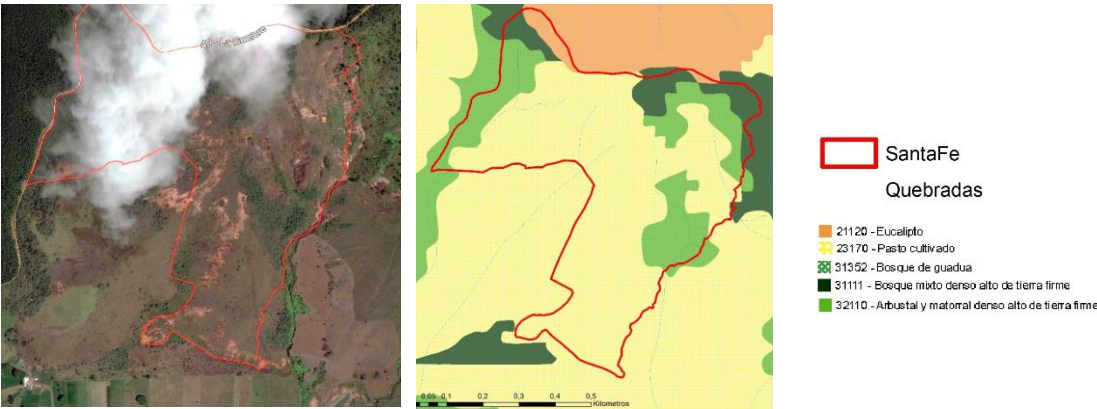
Para ello se adelantaron los siguientes pasos en la gestión preliminar:

Revisión de disponibilidad de consecución de información secundaria o de imágenes satelitales en los sectores de ambos predios para los años 2013, 2014 y 2020 en sistemas de datos abiertos o de libre descarga.

Las instituciones CVC (Corporación autónoma regional del Valle del Cauca) e IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales) tienen dispuesto público información de cobertura de manera online a través de sus geoportales, pero manejan resultados diferentes en cuanto estas coberturas del suelo (IDEAM, 2014) y (CVC, 2014). Se realizó entonces exploración con información secundaria de coberturas de CVC y el IDEAM, y se encuentra que dista mucho de la realidad, por lo que dicha información fue descartada para el análisis.

Por otro lado en datos abiertos se encontró información de imágenes recopiladas por los servidores de Google que se pueden visualizar en su plataforma Google earth; También se revisaron imágenes satelitales sentinel2 y landsat 7 y 8. Para el caso de las imágenes del servidor de Google earth, las imágenes del año 2014 se encontraron con nubosidad en sombra de forma parcial sobre los sectores con interés en estudio.

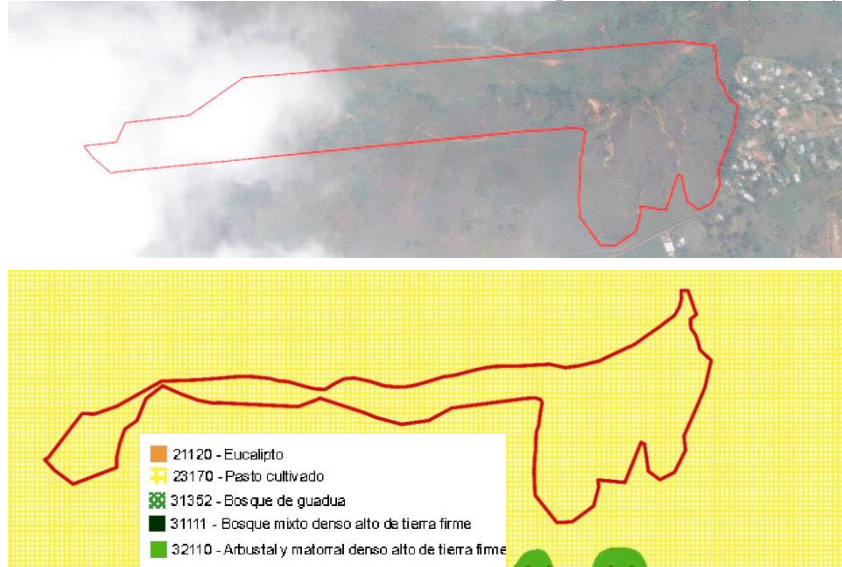
Figura 6. Imagen de servidor de Google earth en Santa Fe para Septiembre de 2014 (Izquierda) junto con coberturas del suelo con base en información temática de CVC para el año 2014 (Derecha)



Fuente: Software Google earth Pro y geovisor de CVC (CVC, 2014). Ajustado por el autor.

Para el caso del predio Villa María también se encontró una situación similar, a la del predio Santa Fe:

Figura 7. Imagen de servidor de Google earth en Villa María para Septiembre de 2014 (Superior) junto con coberturas del suelo con base en información temática de CVC para el año 2014 (inferior).



Fuente: Software Google earth Pro y geovisor de CVC (CVC, 2014). Ajustado por el autor.

Como se pudo observar en los anteriores mapas con información temática de CVC (CVC, 2014), gran parte de la extensión de los predios son clasificados como pasto cultivado, pero estos predios desde los años 2013 y 2014 ya presentaban coberturas de tipo herbazal, helechal, arbustal y de boques, situación que no se registra en esta fuente consultada, por lo que la información disponible y generada por la CVC es descartada para realizar el presente estudio. Es de considerar también que las imágenes satelitales en el servidor de Google earth para los años 2018 y 2019 se encuentran libres de nubes para estos sectores, pero al no contarse con imágenes libre de nubes para los años previos, no se cuenta con una base que sirva de insumo para realizar una comparación en diferentes temporalidades.

En este sentido es descartada la opción de utilizar imágenes del servidor de Google earth para generar coberturas, aunque si son una guía para la interpretación de las coberturas presentes.

Generación preliminar de coberturas con imágenes de satélites Lansat y Sentinel.

Las imágenes satelitales capturadas por los sensores Lansat y Sentinel son de libre descarga y manejan resoluciones espaciales de 30 m y 10 m respectivamente. De esta manera se procedió a realizar descarga de imágenes Lansat del portal Earth explorer (USGS, 2020) e imágenes Sentinel del portal Sentinel-hub (ESA, 2020) para fecha de toma de imagen en Enero de 2020 y Marzo de 2020.

Para el caso de Villa María se hizo procesamiento con imágenes Lansat de Enero de 2020 y se obtuvieron resultados muy deficientes para poder definir coberturas. Al realizar el procesamiento con una imagen sentinel de Marzo de 2020 se obtuvieron resultados un poco mas aceptables y cercanos a la realidad en cuenta las coberturas presentes, pero sigue siendo el resultado limitado para poder hacer comparaciones de cambios en cobertura con el detalle requerido.

Se pudo determinar que el procesamiento con imágenes de descarga gratuita, principalmente del satélite Sentinel, permiten un acercamiento mas aproximado de las coberturas sobre el predio Villa María. Sin embargo la precisión que ofrece la resolución de estas imágenes Lansat y Sentinel no son adecuadas por cuanto aún falta detalle en las formas y diversidad de coberturas, según el conocimiento previo que se tiene de este predio y según lo que se pudo interpretar con imágenes de visualizadas en la plataforma de Google earth. De esta manera se considera que las imágenes de descarga gratuita de satélites Sentinel y Lansat no son adecuadas para la implementación de un análisis multitemporal por cuanto ofrecen una resolución

espacial baja para el detalle que se contempla evaluar en estas dos áreas de compensación forestal, estableciéndose entonces la necesidad de poder realizar el análisis con imágenes de alta resolución espacial capturas por sensores transportados en satélites o UVAs.

La solución encontrada finalmente para poder contar con las imágenes satelitales de alta resolución espacial requeridas para el presente estudio fue la suministrada por la empresa Planet, la cual se especializa en la venta y distribución de imágenes satelitales y productos de análisis geoespacial producidos a partir de estas imágenes. Dicha empresa, tiene además un programa de educación e investigación, al cual se aplicó y después de ser aceptada la aplicación por parte de la empresa Planet, se permitió la descarga de algunas de las imágenes satelitales de alta resolución que se encuentran en su portal (Planet, 2020a), encontrándose disponible para descarga principalmente las imágenes capturadas por los sensores de los satélites, PlanetScope y RapidEye.

4.3 Materiales

Imágenes satelitales:

Se presenta a continuación las imágenes descargadas y el estado en que se encuentran las mismas:

Tabla 2. Imágenes satelitales para el procesamiento y generación de coberturas.

Nombre de imagen	Satélite	Resolución Espacial (m)	Predio	Mes-Año	Predio	Mes-Año
3252997_1840707_2020-03-22_105d_BGRN_SR	PlanetScope	3,125	Santa Fe	mar-20	Villa	mar-20
1840707_2014-08-14_RE5_3A_Analytic	RapidEye5	5	Santa Fe	ago-14	-	-
1840707_2013-12-25_RE1_3A_Analytic	RapidEye1	5			Villa	dic-13

Fuente: Imágenes: (Planet, 2020a). Ajustado por el autor.

Software:

QGIS v3.12.

Aplicación profesional de SIG que está construida sobre Software Libre y de Código Abierto (FOSS). Es un software versátil que posee el complemento de clasificación semiautomática (SCP) el cual es un plug in gratuito de código abierto para QGIS que permite la clasificación semiautomática supervisada de imágenes en teledetección.

ArcGIS v10.5

Es un completo sistema que permite recopilar, organizar, administrar, analizar, compartir y distribuir información geográfica. Como la plataforma líder mundial para crear y utilizar sistemas de información geográfica (SIG). De este sistema se utilizó principalmente la interfaz del software ArcMap para organizar la información tipo vector y generar las salidas gráficas, haciendo uso de la potencialidad que tiene ArcMap la producción de producto cartográficos mas estéticos referente a su homologado QGIS.

4.4 Métodos.

Recorridos en campo sobre los predios para georreferenciar áreas en las que se ubican las plantaciones y se georreferencian puntos estratégicos en los que se puedan determinar los diferentes tipos de coberturas.

Se realizaron recorridos al interior de los predios Villa María y Santa Fe dejando registro fotográfico georreferenciado de los diferentes coberturas al interior del mismo. En el proceso se hizo corrección de algunos sectores de los linderos de las áreas de compensación, por lo que la información de trabajo se actualizó y se consignó en formato vector para el análisis correspondiente.

Metodología para generación de coberturas y análisis multitemporal

El plan de compensación en ejecución en los predios Villa María y Santa Fe, requieren un estudio que permita obtener información cartográfica que sirva para entender la distribución de las coberturas al interior de los mismos junto con los cambios alcanzados por estas en el proceso de avance de esta compensación iniciada en el año 2013 hasta la fecha de ejecución de estudio en el primer trimestre del año 2020.

El proceso de generación de coberturas involucra la aplicación de procesos de revisión, clasificación, comparación, suavizado y generación de salidas gráficas, Se explica a continuación cada uno de los pasos de la metodología.

Revisión del estado de corrección las imágenes satelitales.

Antes de iniciar el proceso de clasificación se debe hacer revisión de cada una de las imágenes y sus metadatos para determinar el estado de corrección con el que es entregado por parte de la empresa distribuidora. Para lo cual se debe determinar si la imagen cuenta con corrección geométrica, radiométrica y atmosférica, que en caso de no contarse con alguna de estas correcciones o detectarse anomalías deber implementarse el respectivo preprocesamiento de acuerdo a la corrección requerida:

- Preprocesamiento para corrección geométrica
- Preprocesamiento para corrección radiométrica
- Preprocesamiento para corrección atmosférica

Generación de coberturas para los años iniciales 2013 y 2014

Debido a que se encontró nubosidad en los sectores donde se ubican los predios en estudio para las primeras etapas de los mantenimientos sobre las plantaciones no se logró que se manejara una misma fecha de captura de las imágenes satelitales para ambos predios. De esta manera las coberturas iniciales para el predio Villa María se deben realizar con una imagen satelital de Diciembre del año 2013, mientras que para el predio Santa Fe se deben utilizar imágenes capturadas en Agosto de 2014.

Se realiza el análisis e interpretación de coberturas empleando el software QGIS con su plugin SCP (Semiautomatic Classification plugin) realizando una clasificación de coberturas supervisada basado en interpretación de imágenes disponibles en el servidor de Google earth para la época. Las clases para la clasificación son asignadas en concordancia con la leyenda Corine land cover ajustada para Colombia (CLC Colombia) propuestas por parte del IDEAM (IDEAM, 2010).

Generación de coberturas primer trimestre del año 2020

Para el caso del primer trimestre del año 2020 en la búsqueda que se realizó en la plataforma de planet.com se encontró una imagen de Marzo de 2020 que contiene los sectores de ambos predios y se encuentran libres de nubes o sombras. De esta manera se logró que se manejara una misma fecha de captura de las imágenes satelitales para ambos predios.

Se realiza el análisis e interpretación de coberturas empleando el software QGIS con su plugin SCP (Semiautomatic Classification plugin) realizando una clasificación de coberturas supervisada basado en fotografías georreferenciadas tomadas en campo junto con el apoyo de interpretación de imágenes en el servidor de Google earth. Las clases para la clasificación son en asignadas en concordancia con la leyenda Corine land cover ajustada para Colombia (CLC Colombia) propuestas por parte del IDEAM (IDEAM, 2010).

Análisis multitemporal.

Con apoyo del plugin SCP (Semiautomatic Clasification plugin) se realiza comparación de clases entre las clasificaciones en formato raster, generadas en los puntos anteriores, haciendo comparaciones entre las coberturas al interior de los predios para ambas épocas (2013 y 2014 vs 2020). Se genera entonces para cada predio un raster de cambios que muestren o aumentos o disminuciones en las coberturas respecto a la temporada inicial de análisis, Dic/2013 para predio Villa María y Ago/2014 para predio Santa Fe. Se propone en la Tabla 3 la siguiente clasificación de los cambios de coberturas con base en la dirección deseada del proceso de sucesión según la Figura 2.

Tabla 3. Clases propuestas para capa de cambio de coberturas en el análisis multitemporal

Clase	Descripción
Deterioro de estado sucesional	Se presentan cuando los cambios van en dirección opuesta a lo planteado en el diagrama de la Figura 2 : De esta manera cambios como por ejemplo de una cobertura arbustal a herbazal o pastizal, son consideradas un deterioro. Cualquier cobertura vegetal que pase al estado helechal también se considera un deterioro por cuanto este tipo de coberturas inhibe el crecimiento de especies arbustivas y arbóreas y representan un estancamiento en la proceso de sucesión; solo se considera que el cambio genera mejorías cuando se pasa de una cobertura de tierra desnuda a helechal, por cuanto genera un cubrimiento sobre suelos expuesto.
Sin Cambios	Es cuando las coberturas entre las diferentes épocas permanecen invariable
Conservación de bosques y arbustos	Es un caso particular de cuando las coberturas entre las diferentes épocas permanecen invariable, pero considerando que desde la época inicial ya se encontraba establecido una cobertura tipo arbustivo o arbóreo y para la época final de estudio se continúa conservando este tipo de coberturas
Mejoría de estado sucesional	Se presentan cuando los cambios van en dirección planteada en el diagrama de la Figura 2: De esta manera cambios como por ejemplo de una herbazal o pastizal hacia arbustal, son consideradas una mejoría, por cuanto la meta es poder llegar a coberturas arbustivas y arbóreas en el proceso de restauración forestal.

Fuente: Propuesto por el autor.

Generación de información tipo vector.

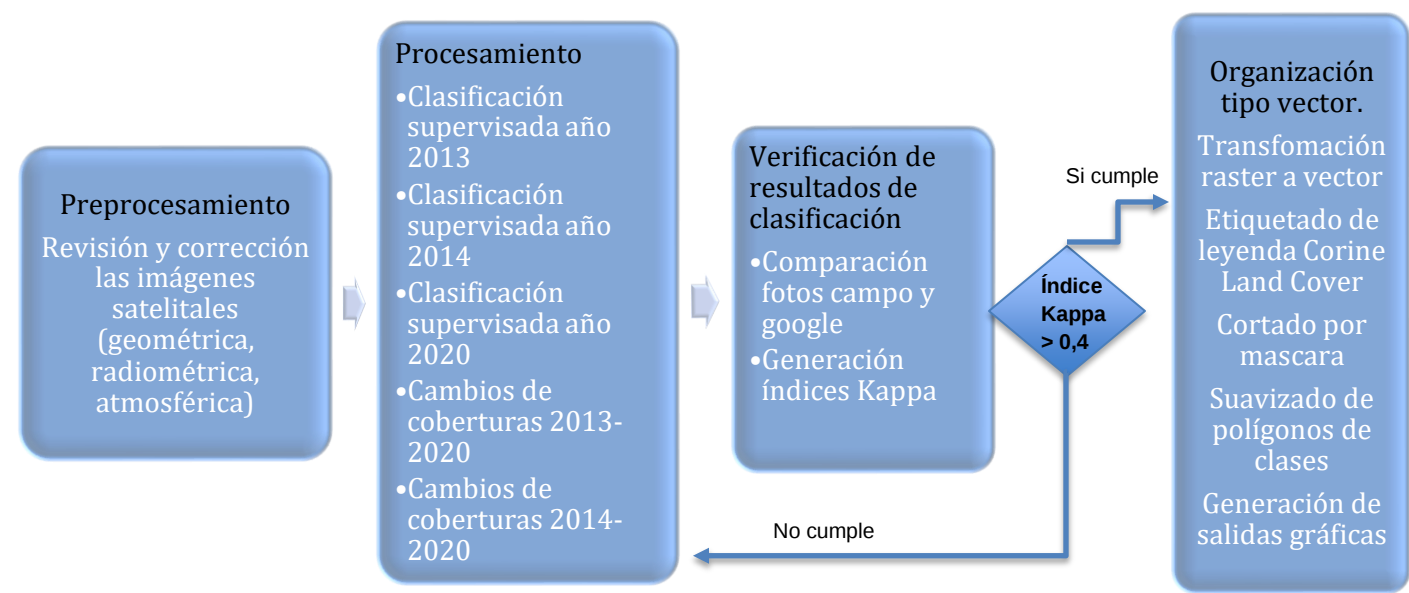
Con la información generada para cada temporada y predio, junto con las comparaciones multitemporales, se obtienen coberturas o cambios las cuales se exportan como archivos vector en formato shapefile. A esta información se organizan sus atributos y códigos definidos según la nomenclatura CLC Colombia.

Todos esta información representada por archivos vector tipo polígono, es mejorada su presentación aplicando un tratamiento de suavizado de polígonos. Con base en esta información ajustada se procede a generar las correspondientes salidas gráficas en el software ArcGIS 10.5.

Flujograma de trabajo.

En la siguiente figura se presenta un resumen del proceso que se implementa para las clasificaciones de coberturas en las dos áreas de compensación en estudio y el respectivo análisis multitemporal.

Figura 8. Flujograma de trabajo para clasificación de coberturas en dos área de compensación forestal



Fuente: Desarrollado por el autor.

5. Resultados

Se procede a mostrar los resultados según la metodología descrita

5.1 Revisión del estado de corrección las imágenes satelitales

Se revisan los metadatos y también las firmas espectrales sobre diferentes regiones de las imágenes satelitales, encontrándose el siguiente estado corrección y tratamiento previo de las imágenes:

Tabla 4. Estado de corrección de Imágenes satelitales para el preprocesamiento.

Imagen	Satélite	Tipo producto	Corrección geométrica	Corrección radiométrica	Corrección atmosférica	Observaciones
3252997_1840707_2020-03-22_105d_BGRN_SR	Planet Scope	Analityc	X	X	X	Se puede utilizar imagen para procesamiento
1840707_2014-08-14_RE5_3A_Analytic	RapidEye5	Analityc	X	X		Se debe hacer preprocesamiento para corrección atmosférica
1840707_2013-12-25_RE1_3A_Analytic	RapidEye1	Analityc	X	X		Se debe hacer preprocesamiento para corrección atmosférica

Fuente: Imágenes: (Planet, 2020a). Ajustado por el autor.

Se encuentra que las imágenes capturadas por RapidEye no cuentan con corrección atmosférica, por lo cual se procede a realizar un preprocesamiento de corrección atmosférica con el método de DOS y haciendo uso de la fórmula propuesta por (Carvalho, A. A.; Baptista, 2016) para convertir las imágenes a valores de reflectancia. Por otro lado la imagen de planetScope de Marzo de 2020 maneja una resolución espacial de 3,125 m, la cual es superior a los 5 m de resolución espacial del resto de imágenes rapideye, por lo que se procede a ajustar esta imagen de planetscope a resolución espacial de 5 m para poder hacer las debidas comparaciones multitemporales con unidades de celda de la misma dimensión espacial.

Adicionalmente la imagen planetscope se corrigió geométricamente para mejorar su correspondencia espacial respecto a las imágenes rapideye.

Luego con estas imágenes ya corregidas se cuenta con las tres imágenes del estudio corregidas en reflectancia para proceder con la etapa de clasificación.

Es de tener en cuenta que las imágenes satelitales manejan diferentes fuentes ya que se manejan dos constelaciones diferentes de satélites, con especificaciones individuales que se describen a continuación:

Tabla 5. Especificaciones sobre la constelación de satélites fuente de las imágenes satelitales.

Constelación	Resolución Espacial (m)	Resolución espectral	Resolución radiométrica
Planet Scope	5 (inicialmente 3,125)	4 (RGB, NIR)	Analytic: 16 bit
RapidEye	5	5 (RGB, red edge, NIR))	Analytic: 16 bit

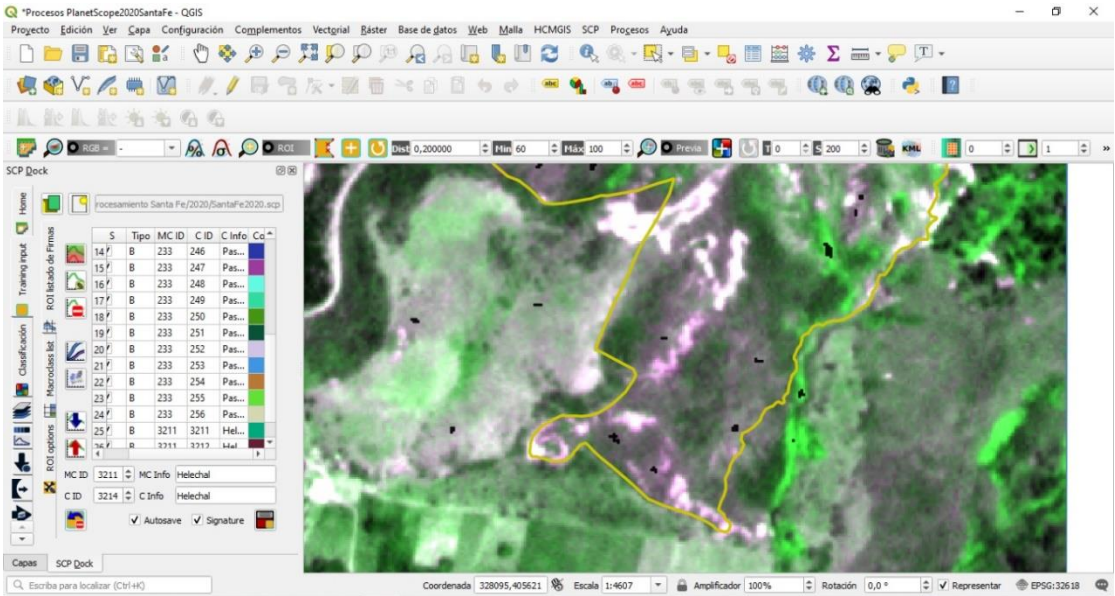
Fuente: (Planet, 2020b). Ajustado por el autor.

5.2 Coberturas para la época marzo de 2020

A la imagen denominada como 3252997_1840707_2020-03-22_105d_BGRN_SR, la cual tiene fecha de captura del 22 de Marzo de 2020, se procede a realizar un corte con base en una máscara en cada una de los sectores de interés en inmediaciones a los predios Villa María y Santa Fe. Sobre esta imagen recortada se aplica el módulo SCP (Semiautomatic Classification plugin) del programa QGIS para realizar el proceso de clasificación supervisada. Se escogen puntos de cada una de las coberturas con base en fotografías georreferenciadas en campo, en el que previamente se había un reconocimiento de las coberturas presentes y también se hizo observaciones en imágenes del servidor Google earth para la interpretación de la ubicación de las coberturas.

Se ilustra el proceso de ingreso de ROI para el entrenamiento en el proceso de clasificación supervisada.

Figura 9. Proceso de entrenamiento para clasificación supervisada para para el año 2020 en predio Santa Fe



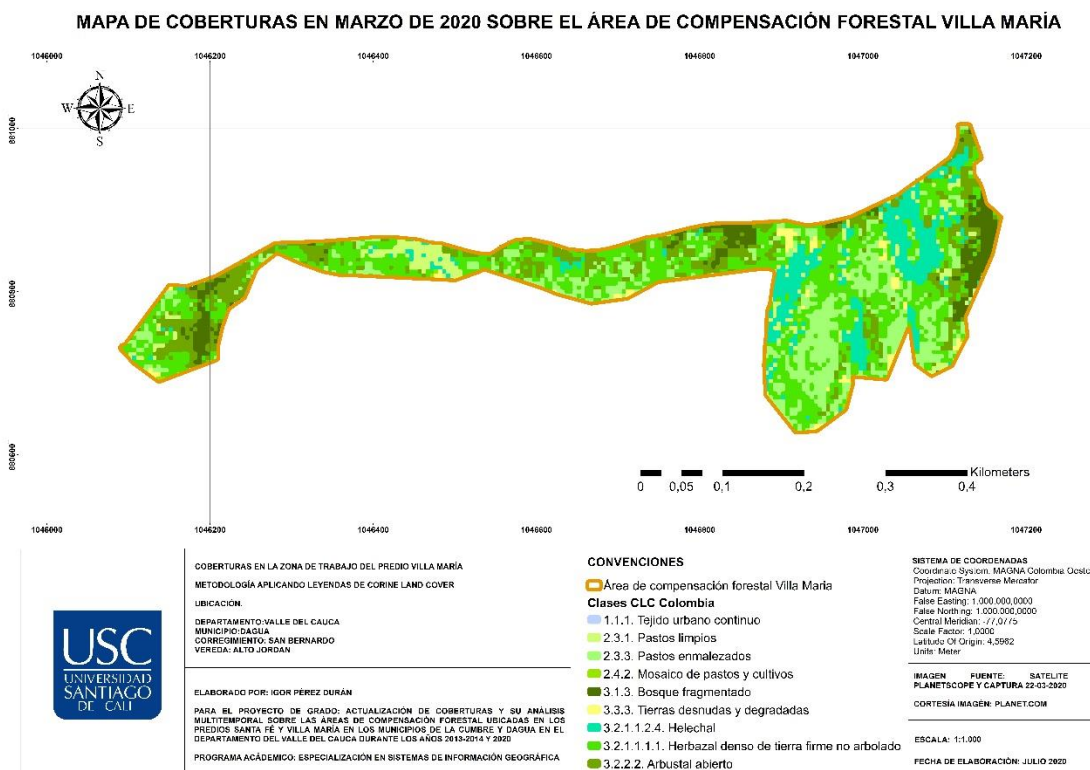
Se observan las muestras de entrenamiento como pixeles de color oscuro.

Fuente: El autor.

Análisis de cambios de coberturas en dos áreas de compensación forestal ubicadas en los municipios de la Cumbre y Dagua en el departamento del Valle del Cauca durante los años 2013, 2014 y 2020. [Especialización en Sistemas de información geográfica], [(2020)]

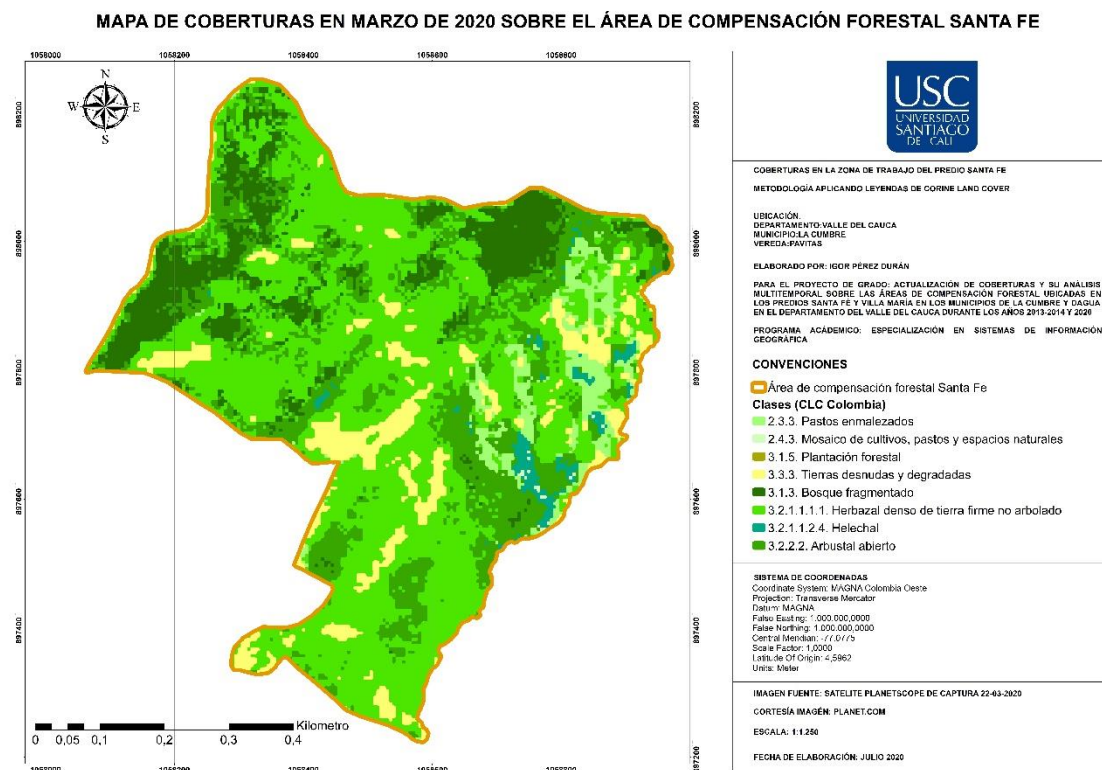
Se muestra a continuación los resultados obtenidos para cada una de los predios:

Figura 10. Coberturas generadas para el sector en el predio Villa María para la época de Marzo de 2020



Fuente: El autor.

Figura 11. Coberturas generadas para el sector en el predio Santa Fe para la época de Marzo de 2020



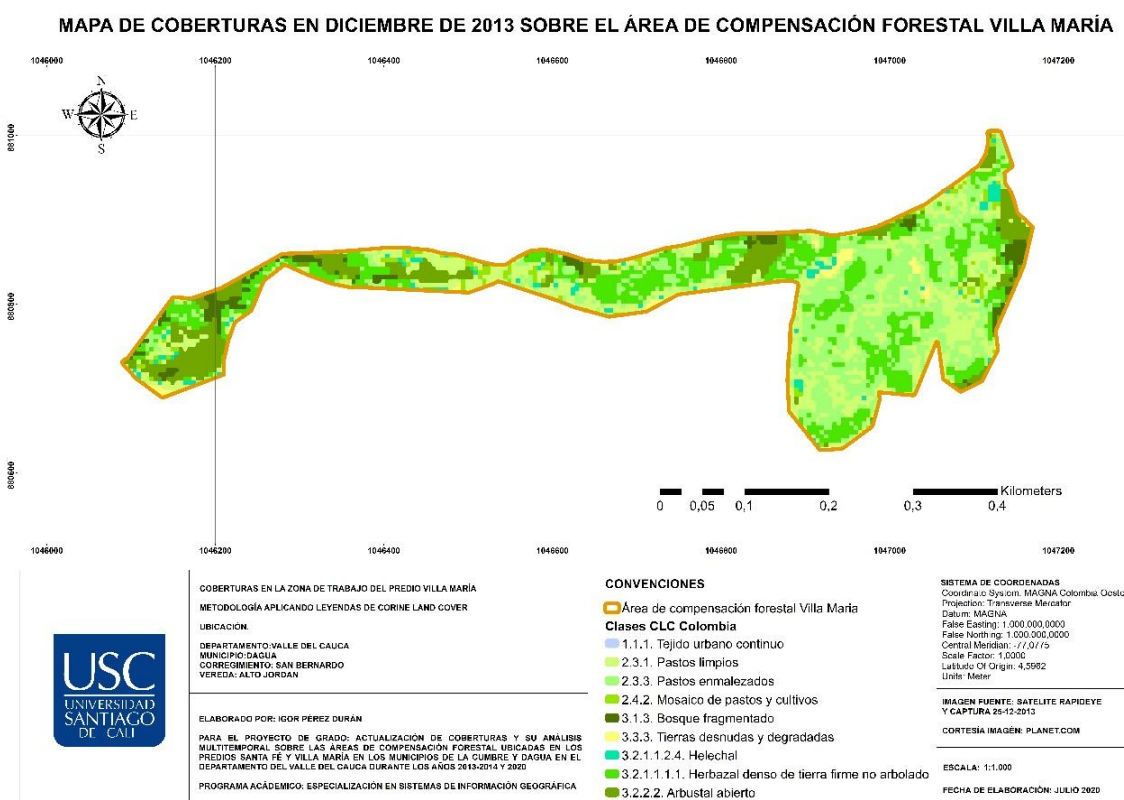
Fuente: El autor.

5.3 Coberturas para la época de diciembre de 2013 y agosto de 2014

A las imágenes denominadas como 1840707_2013-12-25_RE1_3A_Analytic y 1840707_2014-08-14_RE5_3A_Analytic, las cuales tienen fecha de captura del 25 de diciembre de 2013 para el predio Villa María y del 14 de agosto de 2014 para el predio Santa Fe; se les procede a realizar un corte con base en una máscara en cada una de los sectores de interés en inmediaciones a los predios Villa María y Santa Fe. Sobre esta imagen recortada se aplica el módulo SCP (Semiautomatic Classification plugin) del programa QGIS para realizar el proceso de clasificación supervisada. Se escogen puntos de cada una de las coberturas con base interpretaciones en imágenes de Google earth para proyectar el tipo de cobertura presenta en cada una de las épocas.

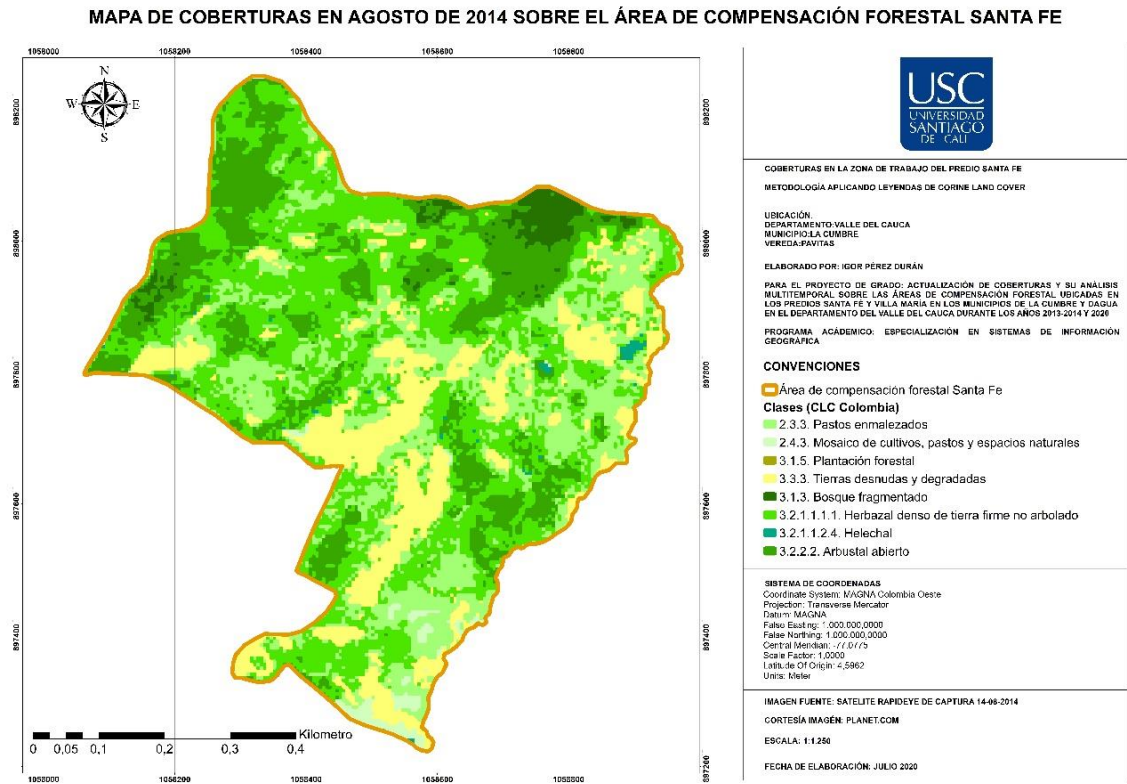
Se muestra a continuación los resultados obtenidos para cada una de los predios:

Figura 12. Coberturas generadas para el sector en el predio Villa María para la época de Diciembre de 2013



Fuente: El autor.

Figura 13. Coberturas generadas para el sector en el predio Santa Fe para la época de Agosto de 2014



Fuente: El autor.

5.4 Verificación de los resultados de la clasificación.

El índice kappa relaciona el acuerdo que exhiben los observadores, más allá del debido al azar, con el acuerdo potencial también más allá del azar. (Landis JR; Koch GG, 1977) propusieron en 1977 una escala de interpretación del valor de kappa que considera como aceptable un valor mayor o igual a 0,40 y excelentes los valores superiores a 0,75. Se utilizó dicho parámetro junto con los valores de acierto en las observaciones detallándose los resultados en la siguiente tabla:

Tabla 6. Índices Kappa de clasificaciones realizadas

Predio	Año	Índice	%Observado como
Villa María	2013	0.950263	95.876289
Villa María	2020	0.415978	54.716981

Predio	Año	Índice	%Observado como
Santa Fe	2014	0.945266	96.223022
Santa Fe	2020	0.577575	85.004869

Fuente: El autor.

Se encuentra entonces que las clasificaciones realizadas para los años 2013 y 2014 presentan un alto grado de correspondencia en la clasificación respecto a los valores ingresados para el entrenamiento de muestras para determinar las diferentes coberturas. Mientras tanto para el caso de las clasificaciones realizadas para el año 2020 se obtuvieron bajos índices Kappa (y % observado como correcto) que se atribuye principalmente a que para esta época se presentaron aumento de coberturas helechal que presentaron firmas espectrales similares a las de pastos limpios, situación que requirió realizar varias reclasificaciones hasta poder generar una separación de estas clases, pero se presume que en dicho proceso se generó disminución del índice Kappa.

5.5 Análisis multitemporal entre épocas 2013-2014 y 2020

Se presentan los consolidados de las coberturas y los cambios en cada uno de las áreas en estudio:
Se presenta el consolidado de clases de coberturas al interior del predio Villa María a Marzo de 2020 y Diciembre de 2013 según clasificación Corine Land Cover ajustado para Colombia, realizándose comparación de los cambios de coberturas:

Tabla 7. Clases de coberturas al interior del predio Villa María para Marzo de 2020 y Diciembre de 2013.

Clases (CLC Colombia)	Área (Ha) Dic-2013	Área (Ha) Mar-2020	Área (Ha) aumento	Área (Ha) Disminución
2.3.1. Pastos limpios	2,33	0,55		-1,77
2.3.3. Pastos enmalezados	2,87	1,98		-0,89
2.4.2. Mosaico de pastos y cultivos	0,25	0,02		-0,23
3.1.3. Bosque fragmentado	0,42	0,67	0,26	
3.3.3. Tierras desnudas y degradadas	0,12	0,17	0,05	
3.2.1.1.2.4. Helechal	0,21	1,25	1,03	
3.2.1.1.1.1. Herbazal denso de tierra firme no arbolado	2,23	3,36	1,12	
3.2.2.2. Arbustal abierto	1,31	1,74	0,42	
Total general	9,74	9,74	2,89	-2,89

Fuente: El autor.

Como se puede notar en la anterior tabla entre los años 2013 y 2020 al interior de esta área se presentó aumento de coberturas como bosque fragmentado, arbustal y herbazal, siendo el de mayor aporte en aumento. También aumentaron coberturas no deseadas en el proceso de sucesión como son tierras desnudas y helechal. Por otro lado se presentó disminución de las coberturas pastos enmalezados, mosaicos de pasto y cultivos y pastos limpios, siendo esta última la cobertura con mayor disminución, y se observa que la disminución en este tipo de cobertura permitió el aumento de la cobertura herbazal.

Por otro lado fue realizado un proceso de comparación espacial entre las coberturas generadas para los años 2013 y 2020, proceso que se realizó por medio de resta de los archivos raster que contienen estas clasificaciones de las coberturas. Se generó un nuevo raster de cambios, al cual se le asignaron valores de clasificación positivos o negativos para el proceso de sucesión vegetal de acuerdo con Tabla 3 y la siguiente reclasificación realizada sobre los valores DN del archivo raster de cambios de cobertura:

Tabla 8. Matriz de reclasificación para raster de cambios de cobertura de Villa María.

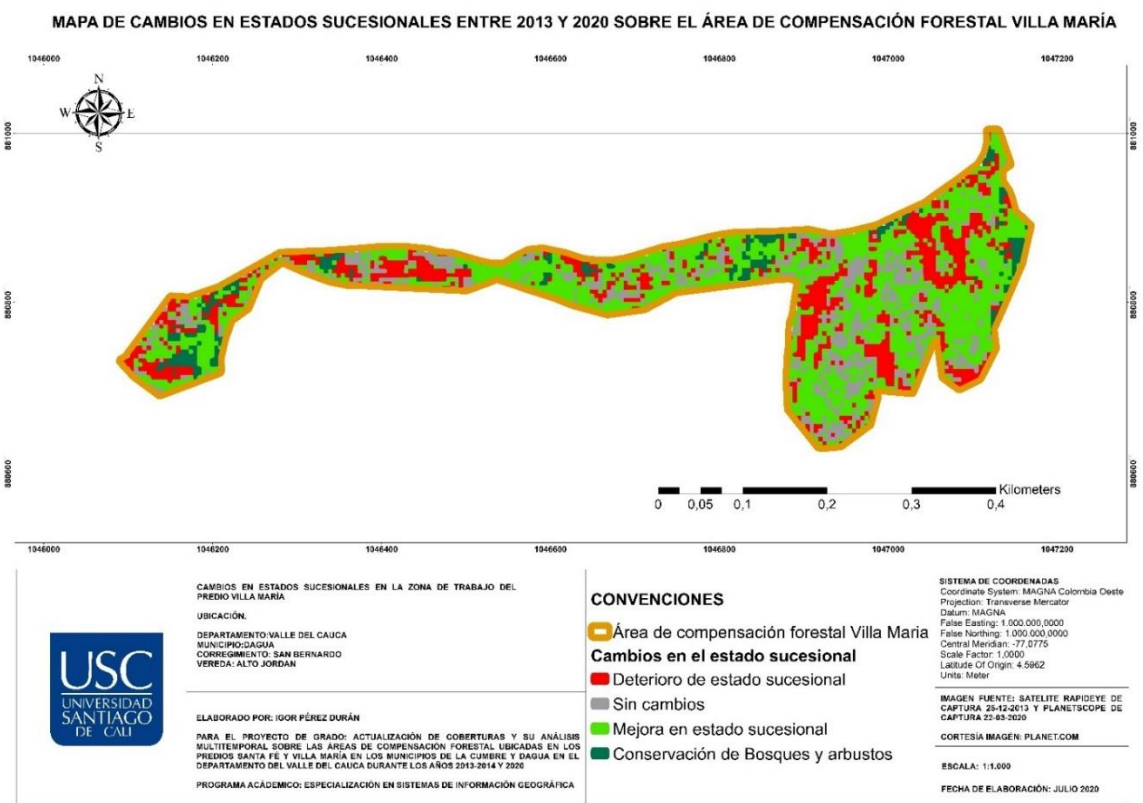
Nº Clase	Clase	DN (Clasificación)	231	233	242	333	313	3212	3211	3222
2.3.1.	Pastos limpios	231	0	-2	-11	-102	-82	-2981	-2980	-2991
2.3.3.	Pastos enmalezados	233	2	0	-9	-100	-80	-2979	-2978	-2989
2.4.2.	Mosaico de pastos, cultivos y espacios naturales	242	11	9	0	-91	-71	-2970	-2969	-2980
3.3.3.	Tierras desnudas y degradadas	333	102	100	91	0	20	-2879	-2878	-2889
3.1.3	Bosque fragmentado con vegetación secundaria	313	82	80	71	-20	0	-2899	-2898	-2909
3.2.1.1.1.1.	Herbazal denso de tierra firme no arbolado	3212	2981	2979	2970	2879	2899	0	1	-10
3.2.1.1.2.4.	Helechal	3211	2980	2978	2969	2878	2898	-1	0	-11
3.2.2.2.	Arbustal abierto	3222	2991	2989	2980	2889	2909	10	11	0

	Deterioro de estado sucesional		Sin cambios		Mejora en estado sucesional		Conservación de Bosques y arbustos
---	--------------------------------	---	-------------	---	-----------------------------	---	------------------------------------

Fuente: El autor.

Con base en la anterior reclasificación se muestra a continuación los cambios en coberturas y su contribución en el proceso de sucesión vegetal y ecológica:

Figura 14. Cambios de Coberturas generadas para el sector en el predio Villa María entre las época Diciembre de 2013 y Marzo de 2020.



Fuente: El autor.

Se presenta la información consolidada de cambios según el anterior mapa (Figura 14):

Tabla 9. Consolidado de cambios de cobertura de Villa María.

Clase de cambios de estado	Área (Ha) Dic-2013 vs Mar-2020
Deterioro de estado sucesional	2,26
Sin cambios	1,94
Mejora en estado sucesional	4,85
Conservación de Bosques y arbustos	0,62
TOTAL	9,67

Fuente: El autor.

Con base en la tabla Tabla 9 y Figura 14 se puede determinar que los principales cambios de cobertura mejoran el proceso de sucesión ya que representan cambio en dirección positiva hacia los estados deseados y dicha mejora se dio en 4,85 hectáreas. Mientras tanto sobre 2,26 hectáreas se presentó un deterioro, que se atribuye a que aumentaron las áreas en cobertura helechal, tierras desnudas y un sector con pastos limpios, representando esto un retroceso en el proceso adelantado de restauración forestal. Por otro lado se pudo determinar que dentro del predio se conservan 1,94 hectáreas sin cambio y adicionalmente 0,62 hectáreas representan bosques y arbustos que se conservaron sin alteraciones. Se presenta el consolidado de clases de coberturas al interior del predio Santa Fe a Marzo de 2020 y Agosto de 2014 según clasificación Corine Land Cover ajustado para Colombia, realizándose comparación de los cambios de coberturas:

Tabla 10. Clases de coberturas al interior del predio Santa Fe para Marzo de 2020 y Agosto de 2014.

Clases (CLC Colombia)	Área (Ha) Ago-2014	Área (Ha) Mar-2020	Área (Ha) aumento	Área (Ha) Disminución
2.3.3. Pastos enmalezados	10,24	2,10		-8,14
2.4.2. Mosaico de pastos y cultivos	0,61	0,05		-0,56
3.3.3. Tierras desnudas y degradadas	7,05	3,92		-3,14
3.1.3. Bosque fragmentado	1,05	5,55	4,50	
3.2.1.1.1.1. Herbazal denso de tierra firme no arbolado	15,93	22,07	6,15	
3.2.1.1.2.4. Helechal	0,16	0,71	0,56	
3.2.2.2. Arbustal abierto	8,61	9,24	0,63	
Total general	43,65	43,65	11,84	-11,84

Fuente: El autor.

Como se puede notar en la anterior tabla entre los años 2014 y 2020 al interior de esta área se presentó aumento de coberturas como bosque fragmentado, arbustal y herbazal, siendo este último el de mayor aporte en aumento. También aumentó la cobertura no deseada en el proceso de sucesión de tipo helechal, mientras que para este caso las tierras desnudas, representado principalmente por cárcavas en el sector presentó una disminución en su área. Por otro lado se presentó disminución de las coberturas de pastos enmalezados, mosaicos de pasto y cultivos y como se había menciona también tierras desnudas y se observa que la disminución en este tipo de cobertura permitió el aumento de la cobertura herbazal.

Por otro lado fue realizado un proceso de comparación espacial entre las coberturas generadas para los años 2014 y 2020 para el área Santa Fe, proceso que se realizó por medio de resta de los archivos raster que contienen estas clasificaciones de las coberturas. Se generó un nuevo raster de cambios, al cual se le asignaron valores de clasificación positivos o negativos para el proceso de sucesión vegetal de acuerdo con Tabla 3 y la siguiente reclasificación realizada sobre los valores DN del archivo raster de cambios de cobertura:

Tabla 11. Matriz de reclasificación para raster de cambios de cobertura de Santa Fe.

Nº Clase	Clase	DN (Clasificación)	233	243	333	3132	3211	3212	3222
2.3.3.	Pastos enmalezados	233	0	-10	-100	-2899	-2978	-2979	-2989
2.4.2.	Mosaico de pastos, cultivos y espacios naturales	243	10	0	-90	-2889	-2968	-2969	-2979
3.3.3.	Tierras desnudas y degradadas	333	100	90	0	-2799	-2878	-2879	-2889
3.1.3	Bosque fragmentado con vegetación secundaria	3132	2899	2889	2799	0	-79	-80	-90
3.2.1.1.1.1.	Herbazal denso de tierra firme no arbolado	3211	2978	2968	2878	79	0	-1	-11
3.2.1.1.2.4.	Helechal	3212	2979	2969	2879	80	1	0	-10
3.2.2.2.	Arbustal abierto	3222	2989	2979	2889	90	11	10	0

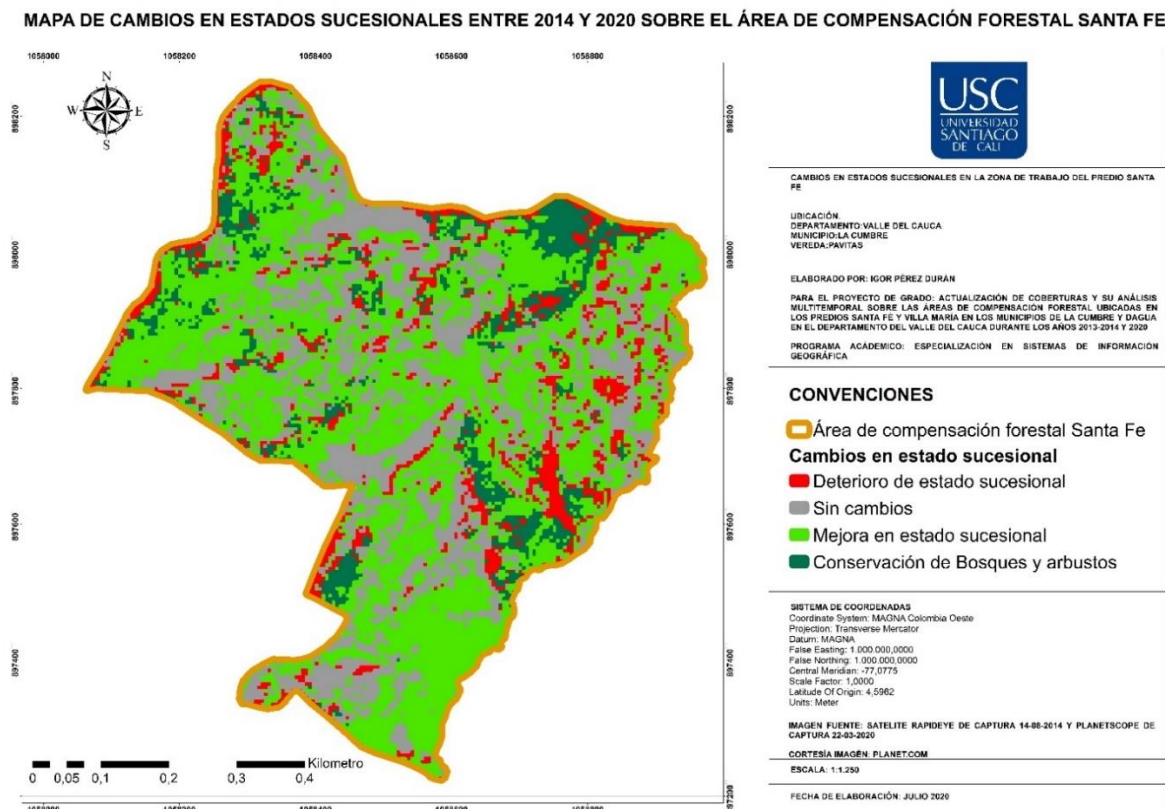


Fuente: El autor.

Con base en la anterior reclasificación se muestra a continuación los cambios en coberturas y su contribución en el proceso de sucesión vegetal y ecológica:

Figura 15. Cambios de Coberturas generadas para el sector en el predio Santa Fe entre las época Agosto de 2014 y Marzo de 2020.

Análisis de cambios de coberturas en dos áreas de compensación forestal ubicadas en los municipios de la Cumbre y Dagua en el departamento del Valle del Cauca durante los años 2013, 2014 y 2020. [Especialización en Sistemas de información geográfica], [(2020)]



Fuente: El autor.

Se presenta la información consolidada de cambios según el anterior mapa (Figura 15):

Tabla 12. Consolidado de cambios de cobertura de Santa Fe.

Clase de cambios de estado	Área (Ha) Ago-2014 vs Mar-2020
Deterioro de estado sucesional	4,51
Sin cambios	12,78
Mejora en estado sucesional	22,24
Conservación de Bosques y arbustos	4,12
TOTAL	43,65

Fuente: El autor.

Con base en la anterior Tabla 12 y Figura 15 se puede determinar que los principales cambios de cobertura mejoran el proceso de sucesión ya que representan cambio en dirección positiva hacia los estados deseados y dicha mejora se dio en 22,24 hectáreas. Mientras tanto sobre 4,51 hectáreas se presentó un deterioro, que se atribuye a que aumentaron las áreas en cobertura helechal, y disminución de zonas arbustales que se encontraban consolidadas para el año 2014, representando esto un retroceso en el proceso adelantado de restauración forestal. Por otro lado se pudo determinar que dentro del predio se conservan 12,78 hectáreas sin cambio y adicionalmente 4,12 hectáreas representan bosques y arbustos que se conservaron sin alteraciones.

6. Conclusiones

La clasificación supervisada permitió establecer las diferentes clases de coberturas al interior de las áreas en compensación forestal Santa Fe y Villa María, con bajos errores en el método de clasificación de mínima distancia según sus índices Kappa para los años 2013 y 2014. En referencia a la clasificación generada para el año 2020 se presentaron un menor ajuste entre las entradas de entrenamiento y la clasificación final realizada, situación que se atribuye a que para el año 2020 se presentaron aumentos de coberturas con firmas espectrales similares como el caso de las clases pastos limpios y helechal. Es conveniente

considerar para próximas clasificaciones otros métodos de clasificación supervisada como son paralelepípedo, clasificación de Máxima verosimilitud y clasificación Spectral Angles para determinar si se pueden obtener mejores ajustes en la separación de clases de coberturas. Es de mencionar que a pesar los índices Kappa fueron bajos la clasificación realizada en el año 2020, al hacerse revisiones en campo se pudo establecer que la cartografía de clasificación generada se ajusta a la realidad del terreno, respecto a las condiciones actuales de coberturas en estas dos áreas, por lo que se valida la información y se considera aceptable.

Por otro lado se pudo determinar que en el área de compensación Villa María se presentaron cambios en las coberturas entre los años 2013 y 2020 que representaron una mejoría en su proceso de sucesión ecológica en la que se lograron cambios deseados en 4,85 hectáreas (50%), mientras tanto se presentaron en 1,94 hectáreas y 2,26 hectáreas sectores sin cambio o con deterioro, lo que indica que sobre estas áreas que representan el 43% de la extensión del área de compensación, se deben reevaluar las medidas de intervención sobre la compensación ya que en dichos sectores no se están obteniendo resultados satisfactorios para avanzar el proceso de repoblamiento forestal que garantice un avance en alcanzar estados sucesionales deseados (Arbustal y arbóreo).

Para el caso del área de compensación Santa Fe se presentaron cambios en las coberturas entre los años 2014 y 2020 que representaron una mejoría en su proceso de sucesión ecológica en la que se lograron cambios deseados en 22,24 hectáreas (50%), mientras tanto se presentaron en 4,51 hectáreas y 12,78 hectáreas sectores sin cambio o con deterioro, lo que indica que sobre estas áreas que representan el 40% de la extensión del área de compensación, se deben reevaluar las medidas de intervención sobre la compensación ya que en dichos sectores no se están obteniendo resultados satisfactorios para avanzar el proceso de repoblamiento forestal.

Una estrategia de intervención recomendada para ambos predios puede ser la erradicación de coberturas no deseadas como son las helechales para aprovechar estas áreas para repoblamiento forestal; otra estrategia puede ser la siembra de especies pioneras en áreas degradadas de tierras desnudas y el aumento de densidad de siembra en sectores.

Los resultados del presente estudio permitieron mostrar el planteamiento de una metodología de reclasificación por parte del autor y su aplicación para un caso de estudio para evaluar de una manera concisa y sin muchos pasos metodológicos, el como se puede hacer un análisis multitemporal de coberturas y determinar si el cambio va en una dirección adecuada en búsqueda de mejorías en los estados sucesionales a través del tiempo o si por el contrario estos cambios va en una dirección de deterioro sobre el proceso de sucesión en áreas en proceso de restauración ecológica. También pudo evaluarse de manera concisa las áreas que no presentan cambios, es decir áreas que presentan un estancamiento en su proceso de restauración y que en conjunto con las áreas en deterioro deben ser objeto de análisis para mejorar las técnicas aplicadas en restauración ecológica. Se espera que este tipo de estudio sirva de ejercicio práctico para demostrar la importancia de las técnicas de percepción remota o teledetección en el monitoreo de procesos de restauración ecológica, considerando que en Colombia se tiene una baja utilización de este tipo de técnicas, talvez porque se piense que no generan información de utilidad para la planificación durante el proceso de restauración de áreas pequeñas o que se requieren de metodologías muy complejas para obtener información útil y aplicable; pero para el caso de estudio se obtuvo una base cartográfica de planificación basado en la evaluación a través de percepción remota y que puede ser aplicable a otras áreas, esperándose que con todo ello se incentive a otros profesionales e instituciones a dar mayor uso a este tipo de recursos tecnológicos para mejorar sus procesos de restauración ecológica durante su fase de ejecución.

7. Bibliografía

- Carvalho, A. A.; Baptista, G. M. de M. (2016). Influência da Correção Atmosférica na Conversão dos Dados de Radiância para Reflectância para o Cálculo do EVI em Imagem RapidEye. Revista Brasileira de Cartografia (Online), 1371–1390. Retrieved from <http://www.lsie.unb.br/rbc/index.php?journal=rbc&page=article&op=view&path%5B%5D=1071>
- Ceballos, A., J. L., Montoya, J. W., De Castro, L. A. G., Barajas, A. F., IDEAM, Colombia., D. de G. U. N. de, & Bogotá. (1997). Montoya, L. A. Castro y A. F. Barajas. 1997. Geosistemas de la alta montaña en escala 1:200.000 y 1:25.000

elaborado dentro del convenio 041/97.

- CVC. (2014). Visor Geográfico Avanzado CVC. Retrieved from https://www.geo.cvc.gov.co/visor_avanzado/
- ESA. (2020). EO Browser. Retrieved from <https://apps.sentinel-hub.com/eo-browser/>
- Francisco, D., Conde, C., & Ambiente, A. L. M. (2020). Curso “teledetección aplicada al medio ambiente”. In Material de estudio (p. 24). Ingeoexpert.
- Fundación Los Bitacoes. (2020). Informe técnico del mantenimiento parcial de cuatro plantaciones de 74,6 hectáreas en: predio santa Fé, en la vereda pavitas del municipio de la cumbre. predio Villa María en la vereda alto jordán, corregimiento san bernardo; predio tierra blanca. La Cumbre, Valle.
- GREUNAL, Vargas, O., Reyes, S., Gomez, P., & Díaz, J. (2012). Grupo de restauración ecológica. https://doi.org/http://www.minambiente.gov.co/images/BosquesBiodiversidadyServiciosEcosistemicos/pdf/plan_nacional_restauracion/Anexo_8_Guias_Tecnicas_Restauracion_Ecologica_2.pdf
- IDEAM. (2010). Leyenda Nacional de Coberturas de la Tierra. Metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia Escala 1:100.00. 72. Retrieved from http://siatac.co/c/document_library/get_file?uuid=a64629ad-2dbe-4e1e-a561-fc16b8037522&groupId=762
- IDEAM. (2014). Ecosistemas de coberturas de la Tierra. Retrieved from <http://www.ideam.gov.co/web/ecosistemas/coberturas-tierra>
- IDEAM. (2016). Sistema de Monitoreo de bosque y Carbono SMByC. Retrieved from <http://smbyc.ideam.gov.co/MonitoreoBC-WEB/reg/indexLogOn.jsp>
- Isaacs, P., & Ariza, A. (2015). Monitoreo a la restauración ecológica desde la escala del paisaje. In Monitoreo a procesos de restauración ecológica, aplicado a ecosistemas terrestres (pp. 51–66). Retrieved from http://repository.humboldt.org.co/bitstream/handle/20.500.11761/9281/monitoreo_restauracion_baja_1.pdf?sequence=1
- Karthikeyan, L., Chawla, I., & Mishra, A. K. (2020). A review of remote sensing applications in agriculture for food security: Crop growth and yield, irrigation, and crop losses. *Journal of Hydrology*, 586(March), 124905. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124905>
- Landis JR; Koch GG. (1977). The measurement of observer agreement for categorical data. In *Biometrics* (pp. 33:159-74).
- Lucas Martin, F. (2011). Forest succession depicted over time.png. Retrieved from https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Forest_succession_depicted_over_time.png
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2015). Plan Nacional de Restauración. In Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Retrieved from https://www.minambiente.gov.co/images/BosquesBiodiversidadyServiciosEcosistemicos/pdf/Ordenación-y-Manejo-de-Bosques/PLAN_NACIONAL_DE_RESTAURACIÓN_2.pdf
- Murcia, C., Guariguata, M. R., Quintero-Vallejo, E., & Ramírez, W. (2017). La restauración ecológica en el marco de las compensaciones por pérdida de biodiversidad en Colombia: Un análisis crítico. *Documentos Ocasionales* 176. <https://doi.org/10.17528/cifor/006611>
- Planet. (2020a). Planet. Education & Research program. Retrieved from <https://www.planet.com/markets/education-and-research/>
- Planet. (2020b). Planet imagery and archive. Retrieved from <https://www.planet.com/products/planet-imagery/>
- Prach, K., & Walker, L. (2011). Four opportunities for studies of ecological succession. *Trends in Ecology and Evolution*, 26(3), 119–123.
- SER. (2004). The SER International Primer on ecological Restoration. Group, Society for Ecological Restoration International Science & Policy Working. Retrieved from <https://www.ser.org/default.aspx>
- teledet.com. (2015). Retrieved from <http://www.teledet.com.uy/tutorial-imagenes-satelitales/clasificacion-supervisada.htm>
- USGS. (2020). Earth explorer. Retrieved from <https://earthexplorer.usgs.gov/>
- Valecia, M., & Anaya, A. (2009). Implementación de la metodología Corine land cover con imágenes Ikonos. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 90(15), 39–52.
- Villegas Vega, H. (2008). Introducción a la percepción remota y sus aplicaciones geológicas (Guías para los asistentes). 19–21.