

**PROPUESTA METODOLÓGICA PARA EL CÁLCULO DE LA BIOMASA DE
LAS COBERTURAS BOSCOSAS EN LA CUENCA HIDROGRÁFICA RÍO LAS
CEIBAS (NEIVA-HUILA), A PARTIR DE UN MODELO DE REGRESIÓN CON
INSUMOS CARTOGRÁFICOS**

PRESENTADO POR:

GARAVITO SANCHEZ JESÚS DAVID

DIRIGIDO POR:

YENNIFER GARCIA MURCIA
DOCENTE

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍAS
ESPECIALIZACIÓN EN ORDENAMIENTO Y GESTIÓN INTEGRAL DE
CUENCAS HIDROGRÁFICAS
BOGOTÁ
2021

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
GLOSARIO	62
SIGLAS, ACRÓNIMOS Y CONVENCIONES	6
RESUMEN.....	7
INTRODUCCIÓN.....	9
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	11
2. JUSTIFICACIÓN	13
3. OBJETIVOS	16
3.1. OBJETIVO GENERAL.....	16
3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	16
4. MARCO TEÓRICO	17
4.1. ESTADO DEL ARTE	17
4.2. MARCO CONCEPTUAL	19
4.3. MARCO LEGAL.....	30
5. METODOLOGÍA	33
5.1. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	33
5.2. INTERPRETACIÓN CORINE LAND COVER Y ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE COBERTURA DEL SUELO PARA EVALUACIÓN DE TCCN. 35	35
5.3. CÁLCULO DE ÍNDICE DE VEGETACIÓN DE DIFERENCIA NORMALIZADA.....	37
5.4. ELABORACIÓN DE MAPA DE PENDIENTES DEL TERRENO	38

5.5. IMPLEMENTACIÓN DE MODELO DE REGRESIÓN EXPONENCIAL PROPUESTO	41
6. RESULTADOS	44
6.1. INTERPRETACIÓN DE IMAGEN SATELITAL A PARTIR DE METODOLOGÍA CORINE LAND COVER	44
6.2. ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE COBERTURA DEL SUELO CUENCA RÍO LAS CEIBAS	46
6.3. CÁLCULO DE INDICE DE VEGETACIÓN NORMALIZADO – NDVI	48
6.4. GENERACIÓN DE MAPA DE PENDIENTES EN PORCENTAJE	50
6.5. IMPLEMENTACIÓN DE MODELO DE REGRESIÓN EXPONENCIAL PARA EL CÁLCULO APROXIMADO DE BIOMASA.....	52
7. DISCUSIÓN	55
8. CONCLUSIONES	60
REFERENCIAS.....	62

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Bandas espectrales del espectro electromagnético.....	25
Tabla 2. Clasificación de pendientes del terreno metodología IGAC.....	27
Tabla 3. Coberturas naturales del suelo cuenca Río Las Ceibas año 2018	46
Tabla 4. Áreas de coberturas naturales del suelo Cuenca Río Las Ceibas año 2007	46
Tabla 5. Cálculo de áreas por NDVI máximo, mínimo y promedio	49
Tabla 6. Áreas de pendientes del terreno cuenca Río Ceibas	51
Tabla 7. Coberturas boscosas objeto de cálculo de biomasa	52
Tabla 8. Cálculos generales de biomasa de las coberturas boscosas de la cuenca Río Las Ceibas.....	¡Error! Marcador no definido.

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1. Representación del proceso fotogramétrico.....	24
Figura 2. Representación del espectro electromagnético.....	24
Figura 3. Localización general Cuenca Hidrográfica Río Las Ceibas	35
Figura 4. Modelo Digital de Elevación utilizado para la producción el mapa de pendientes del terreno.....	40
Figura 5. Interpretación bosque denso	44
Figura 6. Interpretación bosque de galería y/o ripario	44
Figura 7. Interpretación de vegetación secundaria.....	44
Figura 8. Cobertura boscosa año 2018 cuenca Río Las Ceibas	45
Figura 9. Coberturas del suelo año 2007 cuenca Río Ceibas.....	47
Figura 10. Visualización de coberturas naturales del suelo (izquierda) y respectiva representación de NDVI (derecha).....	48
Figura 11. Visualización de NDVI de un bosque denso interpretado.....	48
Figura 12. Visualización de NDVI de bosques de galería y/o ripario y herbazales densos.	49
Figura 13. Visualización de NDVI de bosques fragmentados	49
Figura 14. NDVI Tipo vectorial para la cuenca Río Las Ceibas para el año 2018.....	50
Figura 15. Pendientes del terreno para la Cuenca Río Las Ceibas.....	51

SIGLAS, ACRÓNIMOS Y CONVENCIONES

BA:	Biomasa aérea
CAM:	Corporación Autónoma Regional del Alto Magdalena
CLC:	Corine Land Cover
CO₂:	Dióxido de carbono
e:	Número o constante de Euler, o constante de Napier
EIA:	Estudio de Impacto Ambiental
HA:	Hectárea
IAvH:	Instituto Alexander Von Humboldt
IDEAM:	Instituto de Hidrología y Estudios Ambientales
IGAC:	Instituto Geográfico Agustín Codazzi
LN:	Logaritmo Natural
MADS:	Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible
MSNM:	Metros sobre el nivel del mar
NDVI:	Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada
PMA:	Plan de Manejo Ambiental
POF:	Plan de Ordenación Forestal
POMCA:	Plan de Ordenación y Manejo de Cuenca Abastecedora
POMCH:	Plan de Ordenación y Manejo de Cuenca Hidrográfica
T:	Tonelada
TCCN:	Tasa de Cambio de Cobertura Natural

RESUMEN

En este proyecto se presenta la propuesta metodológica para el cálculo de biomasa de las coberturas boscosas, en la cuenca río Las Ceibas, ciudad de Neiva (Huila), a través de un modelo de regresión exponencial, con insumos cartográficos y la implementación de herramientas de sistemas de información geográfica.

Los aspectos a considerar en el modelo de regresión son la interpretación de cobertura del suelo mediante metodología Corine Land Cover a escala 1:25.000, evaluación de tasas de cambio de coberturas naturales con metodología del Instituto Alexander von Humboldt, cálculos del índice de vegetación normalizado NDVI con imágenes satelitales, generación y análisis de mapas de pendientes del terreno en porcentaje mediante metodología del Instituto Geográfico Agustín Codazzi.

Esta propuesta metodológica busca resolver problemáticas como el limitado acceso a ciertas áreas del territorio colombiano, las parcelaciones en campo y ser un apoyo técnico preliminar para la aplicación de métodos directos e indirectos para cuantificación de biomasa en pequeñas áreas de terreno. En este sentido, la propuesta podría constituirse en una herramienta que permita aproximarse al cálculo de la biomasa de coberturas boscosas, a partir de dichos productos cartográficos, que posteriormente puede validarse en campo con los métodos tradicionales.

En el desarrollo de la presente propuesta metodológica, se obtuvo resultados aproximados de biomasa, cuyos valores son expresados en toneladas por hectárea. Para el cálculo de biomasa se clasificaron las coberturas por tipos de bosques y grados de pendientes con el objetivo de poder determinar un análisis más detallado del comportamiento del modelo

de regresión exponencial al ser aplicado en la presente propuesta metodológica del cálculo de biomasa sobre la cuenca Río Las Ceibas.

INTRODUCCIÓN

La biomasa es “la materia orgánica originada en un proceso biológico, espontaneo o provocado, tiene carácter de energía renovable, ya que su contenido energético procede en última instancia de la energía solar fijada por las coberturas vegetales mediante el proceso fotosintético” de las coberturas boscosas y áreas seminaturales, esta biomasa es la base del fundamento de captura de CO₂, por ende, presta un servicio ecosistémico primordial para el medio ambiente y para la lucha contra el cambio climático en el planeta (Candel, 2019).

La biomasa como base de la captura de CO₂ por parte de las coberturas boscosas, presta un servicio ecosistémico muy importante al planeta, y más en la problemática actual de cambio climático. Convencionalmente la biomasa sirve para medir las reservas de carbono y para el desarrollo de estudios de aprovechamientos forestales, sus metodologías convencionales se desarrollan de forma directa e indirecta, ya sea mediante corte y pesajes en campo, como también aplicando modelos o ecuaciones para su cuantificación indirecta (Quiceno, Tangarife, & Álvarez, 2016).

Las metodologías que se basan en el trabajo de campo, se fundamentan en levantamientos de información sobre pequeñas áreas de terreno o parcelas y posteriores análisis de laboratorio; pero estas metodologías son de gran complejidad en ecosistemas de difícil acceso y de costos muy altos si se desea cuantificar biomasa sobre grandes extensiones de terreno, por ejemplo, sobre una cuenca hidrográfica (Fonseca, 2017).

Para la cuantificación de biomasa, Fernández en 2004, clasifica métodos en destructivos y no destructivos; el primero es “el método más preciso de estimar biomasa, a partir de cortes y pesajes de un gran número de muestras para obtener estimaciones altamente

óptimas y confiables”. Los métodos no destructivos, se basan en estimaciones a partir de interpretaciones visuales, mediciones de alturas, volúmenes y uso de imágenes satelitales. Por tanto, para estimar biomasa aérea de manera óptima y confiable, se necesita de un muestreo “destructivo” que se realiza directamente en campo (Medina, Gutiérrez, Echavarría, Amador, & Ruiz, 2009).

En la presente investigación se propone una metodología para cuantificar de forma aproximada la biomasa de coberturas boscosas y áreas seminaturales en grandes extensiones de terreno, la cual se basa en la aplicación de un modelo de regresión exponencial en el que se involucran insumos vectoriales y raster como lo son el producto de la interpretación de cobertura del suelo a partir de metodología Corine Land Cover, (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010), el cálculo de tasa de cambio de coberturas naturales con metodología del Instituto Alexander von Humboldt, análisis del índice de vegetación de diferencia normalizada – NDVI a partir de la aplicación de fórmula de cálculo entre la banda roja e infrarroja cercana del sensor SPOT 6/7 y elaboración de mapas de pendientes del terreno a partir de la metodología de clasificación simple del Instituto Geográfico Agustín Codazzi.

El área de estudio para la aplicación de la propuesta metodológica es la cuenca hidrográfica Río Las Ceibas, espacio geográfico ubicado en la ciudad de Neiva en el Departamento del Huila y fuente de abastecimiento de la ciudad.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La biomasa de las coberturas boscosas presenta grandes limitantes para su estudio, por ejemplo las zonas de difícil acceso para trabajo de campo en donde no es posible entrar a obtener las mediciones correspondientes, así que el análisis con metodologías tradicionales, las cuales se realizan a través de parcelaciones, corte, peso y manipulaciones en laboratorios, se puede llegar a dificultar de gran manera al momento de realizar aproximaciones en áreas de trabajo con grandes extensiones de terreno

Hay factores externos que influyen en los procesos metodológicos de cuantificación de biomasa, por ejemplo, la selección de sitios de muestreo y factores como el clima que pueden estar en contra de los planes de trabajo de campo a realizar. Además, para una evaluación forestal es clave enfocar las parcelaciones sobre plantaciones específicas, ya que la cuantificación de biomasa se basaría en la determinación del crecimiento, rendimiento y acumulación de la biomasa de los árboles y sería indispensable un trabajo de campo detallado para determinar las especies y parcelas eficientes para el procedimiento de cálculo (Rodríguez N. , 2013).

Según los objetivos de las investigaciones las parcelas identificadas y seleccionadas se pueden catalogar como permanentes o temporales. Para las parcelas temporales se demandan unos registros puntuales, delimitaciones indefinidas de unidades de estudio o desarrollar una marcación de gran detalle de los individuos a evaluar y para las parcelas permanentes se necesita de seguimientos rigurosos a mediano y largo plazo. Además, si la cuantificación de biomasa lleva objetivos como estudios de fragmentación de bosque o

estudios de biodiversidad, las parcelaciones deben presentar una delimitación perfecta (Rodríguez N. , 2013).

En algunas aplicaciones de cálculos de biomasa se estima la madera mediante su peso y volumen, para esto comúnmente se usan dinamómetros o basculas de tipo digital, además para tema de errores de cuantificación y cálculo de las variables como altura y diámetro, se necesitan equipos como brújulas, cintas métricas, cintas metálicas, forcípulas, clinómetros laser, hipsómetro, cintas diamétricas y barrenos de incrementos, entre otros elementos tecnológicos. Así entonces se estima que para un levantamiento y cálculo de biomasa de grandes extensiones de terreno puede presentar altos costos económicos, tecnológicos y recurso humano que se pueden necesitar para cubrir áreas boscosas que sean o no parte de alguna categoría de protección o conservación (Rodríguez N. , 2013).

De esta forma poder tener información actualizada y confiable de biomasa para el territorio colombiano, con un cubrimiento espacial por el estilo de veredas, cuencas hidrográficas, áreas protegidas o municipios, constituye un gran reto ya que el recurso técnico y económico es escaso para este tipo de investigaciones se lleve a cabo. No contar con información de este tipo dificulta los mecanismos de ayuda para solución de problemas de biodiversidad, conservación de bosques y cambio climático.

Teniendo en cuenta lo anterior, se plantea la siguiente pregunta de investigación:

Pregunta de investigación

¿Es posible generar una metodología novedosa, de fácil aplicación para el cálculo de la biomasa de coberturas boscosas?

2. JUSTIFICACIÓN

La propuesta metodológica para la cuantificación aproximada de biomasa presenta un reto o valor agregado en la presente investigación, dicho valor agregado es poder presentar un mecanismo metodológico para poder catalogar la biomasa de las coberturas como un elemento geográfico y cartografiable. Esto a partir de insumos cartográficos como imágenes de satélite, modelos digitales de elevación, y sin la necesidad de ir a campo preliminarmente.

Esta propuesta metodológica de cuantificación de biomasa contempla el desarrollo de un modelo de regresión exponencial con cuatro productos cartográficos importantes en la evaluación de la respuesta espectral de los bosques y el medio ambiente, como lo es el cálculo del índice de vegetación de diferencia normalizado – NDVI, la interpretación de coberturas del suelo, la evaluación de las tasas de cambio de coberturas naturales y los cambios de las pendientes del terreno en porcentaje.

Uno de los análisis más utilizados o convencionales en el procesamiento digital de imágenes es la evaluación del índice de vegetación de diferencia normalizado (NDVI), el cual muestra valores entre menos uno y uno para clasificar los grados de reflectancia fotosintética de las coberturas naturales. Esto permite analizar en cierto punto los estados de conservación de los bosques, ya que a mayor densidad de bosques mayor respuesta de reflexión fotosintética ante los sensores infrarrojos de sensores remotos, es por eso que este indicador se involucra como la variable independiente del modelo de regresión exponencial a proponer para el cálculo de biomasa de las coberturas boscosas del área de estudio.

En Colombia actualmente la metodología Corine Land Cover- CLC, es la que se emplea generalmente para la interpretación de uso y cobertura del suelo en diferentes

proyectos de ordenamiento del territorio, como los Planes de Ordenación Forestal – POF, Planes de Ordenación y Manejo de Cuencas Abastecedoras - POMCA, Estudios de Impacto Ambiental - EIA y Planes de Manejo Ambiental - PMA. Esta metodología CLC brinda la posibilidad de generar análisis multitemporales del uso y la cobertura del suelo hasta un sexto nivel de clasificación de interpretación, lo que permite obtener una interpretación semi detallada de las coberturas del suelo del área objeto de estudio con respecto al tiempo. Esta permite evaluar la Tasa de Cambio de Coberturas Naturales TCCN, método desarrollado por el Instituto Alexander von Humboldt en 2002, para medir la pérdida o recuperación de las coberturas naturales con respecto al tiempo. Además, mide los cambios de áreas de las coberturas naturales a partir de un análisis multitemporal, en intervalo de tiempo no inferior a diez años, y se puede llegar a estimar el grado de conservación de las coberturas del suelo (Ministerio de Ambiente, 2014).

Por otro lado, contemplar los cambios de pendiente del terreno, es fundamental para determinar los usos potenciales del suelo, por ejemplo, el Instituto Geográfico Agustín Codazzi – IGAC, en su metodología para la clasificación de tierras por su capacidad de uso, clasifica a la pendiente del terreno como una de las limitantes en la capacidad productiva de los suelos. Así entonces es común interpretar grandes extensiones de bosques sobre terrenos con capacidades productivas bajas, lo anterior por condiciones de pendientes fuertes.

Además, este fenómeno físico del terreno influye en la reflectividad del suelo al momento de la captura de las imágenes de satélite, por la generación de sombras y no permite que los índices de vegetación, en cierto punto, reflejen los grados altos de vegetación en las coberturas boscosas, por lo que se considera un aspecto relevante a tener en cuenta para la

formulación del modelo de regresión exponencial propuesto, ya que al tenerlo en cuenta se estará dando un factor mayor de estimación de biomasa a las áreas que por cuestiones topográficas no permiten mostrar o interpretar su respuesta espectral real.

Esta propuesta metodológica de cuantificación de biomasa mediante geomática podrá apoyar, preliminarmente, trabajos de campo para cuantificación de biomasa detallada, estudios de biodiversidad y reservas de carbono. Además de servir como herramienta de priorización en la conservación de bosques y áreas seminaturales, sobre zonas que tal vez sean de difícil acceso o en las que se haya generado una percepción en campo de biomasa bajas por fragmentación ecosistémica o pérdida de biodiversidad.

Un área geográfica excelente para la evaluación de esta investigación es la cuenca hidrográfica Río Las Ceibas, la cual cuenta con altos grados de conservación, biodiversidad y buen manejo de los recursos naturales. Ejemplo de ello ha sido la compra de predios privados por parte del Municipio de Neiva con el objetivo de desarrollar prácticas de reforestación, conexión de corredores biológicos, aislamientos y mantenimientos de áreas boscosas y seminaturales (CAM, 2007).

Desde 1994 al 2005 se adquirieron aproximadamente 3253 hectáreas sobre la cuenca alta del Río Las Ceibas, en las veredas San Bartolo, Alto Motilón, Triunfo, La Lindosa, La Plata, Santa Rosalía y Motilón (CAM, 2007). Adicionalmente la cuenca Río las Ceibas cuenta con áreas estratégicas como Reserva Forestal Protectora Río Las Ceibas, Parque Natural Regional Las Ceibas, zonas de páramo, humedales, bosques secos tropicales y reservas naturales de la sociedad civil (CAM, 2007), áreas que son clave para el desarrollo y cálculos metodológicos del modelo cartográfico a proponer.

3. OBJETIVOS

3.1. OBJETIVO GENERAL

Generar una propuesta metodológica replicable para la generación de un modelo que evalúe, de manera indirecta, la biomasa de coberturas boscosas en la cuenca hidrográfica Río Las Ceibas en Neiva – Huila.

3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Generar un análisis multitemporal de uso y cobertura del suelo para la Cuenca Río Las Ceibas entre los años 2007 y 2018.
- Calcular el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), a partir de los grados reflectancia del componente fotosintético de las coberturas boscosas de la cuenca Río Las Ceibas.
- Generar un modelo exponencial de regresión para el cálculo de biomasa en la Cuenca Río Las Ceibas

4. MARCO TEÓRICO

4.1. ESTADO DEL ARTE

Múltiples estudios a nivel nacional e internacional han apuntado al tratamiento y optimización de insumos de percepción remota, mediante el uso de herramientas de sistemas de información geográfica y la aplicabilidad de metodologías y modelos geoestadísticos, con el fin de establecer comportamientos de diferentes fenómenos medioambientales. A continuación, se citan investigaciones y trabajos con temáticas de estimación de biomasa, cambio climático y medioambiente, en los cuales se han requerido sistemas de información geográfica como sustento técnico y tecnológico.

Medina, Gutierrez, Echavarria, Amador y Ruiz en 2009 generaron un estudio denominado “Estimación de la producción de forraje con imágenes de satélite en los pastizales de Zacatecas” en el cual desarrollaron una metodología para la cuantificación de materia seca de pastizales, a partir de del cálculo de NDVI. El objetivo del estudio fue ajustar un modelo de regresión múltiple con niveles de producción de pastizales y sus correspondientes valores de NDVI. El modelo pudo estimar la producción de forraje de pastizales a partir de imágenes SPOT, concluyendo que los modelos de regresión con base en valores de NDVI, resultan de gran ayuda para estimar cantidades de forraje que existe en las últimas fases de crecimiento en áreas de pastizales, Medina et al.(2009).

Anaya, Chuvieco y Palacios en el año 2010, generaron el estudio denominado “Método basado en teledetección para estimar la emisión de gases efecto invernadero por quema de biomasa” que permite ver la aplicabilidad de la percepción remota en la estimación

de producción de gases efecto invernadero con respecto a la quema de cobertura, como mecanismo para cambiar el uso del suelo. Las variables estimadas a partir de teledetección utilizadas para la aplicación del modelo fueron la biomasa, la eficiencia de lo quemado y el área quemada, la cual fue catalogada como primordial para la estimación de emisiones de gases efecto invernadero, Anaya et al. (2010).

Los autores concluyeron que, con datos obtenidos a partir de procesos de teledetección y trabajo de laboratorio, es posible determinar valores aproximados de emisión de gases efecto invernadero por quema de biomasa y recomienda, aumentar inventarios de biomasa para diferentes ecosistemas y poder mejorar factores de emisión para el territorio colombiano, esto con el objetivo de caracterizar de una mejor manera las emisiones de gases de efecto invernadero.

Chávez, Paz y Bolaños en 2017 desarrollaron el estudio denominado “Estimación de biomasa y cobertura aérea usando radiometría e imágenes digitales a nivel de campo en pastizales y matorrales” el cual tenía como objetivo establecer un análisis entre la reflectancia de la cobertura y biomasa aérea. Analizaron índices de vegetación NDVI con la biomasa y la cobertura, lo cual permitió establecer de manera más rápida relaciones entre variables biofísicas para estimar condiciones, producción y tendencia de la cobertura aérea, Chávez et al. (2017).

4.2. MARCO CONCEPTUAL

En el presente marco conceptual se enunciarán los conceptos y características de los componentes claves de la presente investigación, como lo son algunos métodos directos e indirectos para el cálculo de biomasa, la técnica para captura e interpretación de información remota como lo es la teledetección, la interpretación de imágenes satelitales mediante la metodología Corine Land Cover - CLC, el índice normalizado diferencial de vegetación, las pendientes del terreno y el modelo exponencial de regresión.

4.2.1. Métodos directos e indirectos para cuantificación de biomasa

Dentro de los métodos directos de cuantificación de biomasa, se encuentran los inventarios para monitoreo de biomasa y para la cuantificación de carbono en los ecosistemas, en los cuales se determina, por ejemplo, biomasa sobre el suelo, como lo son leña, ramas y hojas secas, sistemas radiculares y carbono orgánico del suelo (Fonseca, 2017).

Los muestreos, tamaños de las muestras y las extensiones de áreas de trabajo, deben estar acorde a la magnitud o nivel de precisión de la cuantificación de biomasa y de los recursos dispuestos para desarrollar la evaluación; para definir el tamaño o alcance de las parcelas a analizar, se debe tener en cuenta los volúmenes por área que ocupan las coberturas boscosas (Fonseca, 2017).

Para determinar el tamaño de parcelas, MacDicken (1997) recomienda realizar el análisis del área ocupada por árbol en metros cuadrados, tamaño de la parcela en metros cuadrados y su aplicación. Por ejemplo, para áreas de árboles entre 0 y 15 metros cuadrados, el tamaño de la parcela alcanzará los 100 metros cuadrados aproximadamente, y tendría una aplicabilidad en vegetación muy densa con un gran número de tallos con diámetros pequeños

y una distribución uniforme para los tallos grandes. (MacDicken, 1997). Así las mediciones en campo o métodos directos se basan en el corte del árbol, posteriormente se pesa la biomasa y finalmente se determina su peso seco.

Por su parte, en la cuantificación de biomasa mediante métodos indirectos se parte de calcular la biomasa de los miembros arbóreos a partir de ecuaciones o modelos matemáticos, los cuales son calculados mediante regresiones entre variables; las variables comúnmente se atribuyen al diámetro del árbol, la altura, el crecimiento diamétrico, el área basal y la densidad de la madera (Fonseca, 2017).

En los métodos indirectos se encuentra la aplicación de ecuaciones alométricas, según Hernández, Velásquez y Etchevers (2002), el uso de estas ecuaciones ayuda a desarrollar una estimación de biomasa más confiable y directa. El argumento se basa en que la ecuación alométrica contempla la variabilidad de los árboles por su edad, competencia y crecimiento (Fonseca, 2017).

La aplicación de ecuaciones o modelos de regresión se desarrollan para cada especie, lo cual se basa en mediciones de árboles individuales, mediciones que técnicamente son fáciles de obtener y a bajos costos. Así los modelos alométricos asocian la biomasa con variables físicas de los árboles, como lo son el diámetro, altura y crecimiento (Araujo & Higuchi, 1999). Los modelos alométricos se pueden generar a partir de 30 árboles (MacDicken, 1997) y así se usarán, preferiblemente, modelos que transforman los volúmenes de madera de los fustes en biomasa, por lo que las densidades cambian con respecto a las especies de los árboles (Acosta, Vargas, Velázquez, & Etchevers, 2002).

Otros métodos menos comunes contemplan la interpretación de imágenes satelitales, para la determinación de emisión de gases efecto invernadero por quema de biomasa Anaya et al. (2010) o estimación de biomasa y cobertura aérea usando radiometría e imágenes digitales Chávez et al. (2017) entre otros. En sí la generación de mediciones directas sobre la biomasa o la capacidad de captura de carbono presentan costos muy altos.

Es por eso que el practicar metodos destructivos para cuantificación de biomasa, ha llevado a plantear o generar nuevas metodologías de facil aplicación y estimación aproximada. Esto se ha logrado desarrollar mediante la manipulación de insumos como imágenes de satelite y su evaluación de respuesta espectral a partir de indices de vegetación. (Reese et al. 2003)

4.2.2. Información Geográfica

El término información geográfica se desarrolla sobre sistemas orientados a la administración de datos espaciales y al día de hoy se cataloga como la herramienta informática más optima y amplia para temas investigativos, académicos y profesionales en los temas de las ciencias de la tierra y medio ambiente. Esto se ha dado a casusa de las múltiples actividades en las que pueden ser útiles (Bosque & Garcia, 2000).

Los datos espaciales georreferenciados y su información alfanumérica almacenada permiten clasificar dicha información digital en tipos o formatos de información, para los sistemas de información los formatos de datos se clasifican en raster o vectorial. Los cuales se distinguen en su almacenamiento de información y su clasificación de atributos o características de la información geográfica (Bosque & Garcia, 2000).

En la información vectorial la representación geográfica se hace a partir de puntos, líneas y polígonos, los cuales generan límites o fronteras de información teniendo como base un sistema de coordenadas para la localización de los objetos. Por ejemplo los puntos se representan mediante un par ordenado (X,Y) , una línea se genera a partir de un conjunto de coordenadas $(X_1,Y_1;X_2,Y_2;X_3,Y_3;...;X_n,Y_n)$ y un polígono a partir de la unión de líneas y su respectiva región rellena (Bosque & Garcia, 2000).

Dentro de la información de tipo raster se encuentran las fotografías aéreas, imágenes satelitales, modelos digitales de elevación, imágenes de radar entre otros. En este caso las imágenes satelitales son el producto de la captura de la radiación o respuesta de luz de la superficie terrestre, partir de un sensor remoto. Las imágenes satelitales poseen características como la resolución, elevación, sensor, colores, entre otras (Bosque & Garcia, 2000). La ciencia que se encarga del estudio de la captura de información geográfica de forma remota es la teledetección.

Según Chuvieco (2002) “La teledetección se enfoca en la observación remota de la superficie terrestre, así la teledetección espacial es una técnica que permite obtener imágenes de la superficie terrestre, desde plataformas espaciales dotadas de sensores de captura a larga distancia”

Para Jars (1993) la teledetección es “la ciencia y la tecnología por medio de la cual las características de los objetos de interés pueden ser identificados, medidos o se pueden analizar sus características sin contacto directo”.

Romero (2006) cita “La teledetección de recursos naturales se basa en un sistema de adquisición de datos a la distancia sobre la biosfera, que está basado en las propiedades de la radiación electromagnética y en su interacción con los elementos de la superficie terrestre”

Ricrds y Jia (2016) la definen como “la medición de la energía que es emanada desde la superficie terrestre. Si el Sol es la fuente de energía principal, entonces esta teledetección es de tipo pasiva y por ende el resultado de esta medición puede ser una imagen digital”

El Servicio Geológico y Minero Argentino cita “La teledetección o percepción remota se refiere a la adquisición de datos de la superficie terrestre, basada en mediciones de radiación reflejada y emitida de cada componente de esa superficie”

Teniendo en cuenta que la teledetección se basa en la energía radiante y reflejada en la superficie terrestre, esta energía radiante se clasifica a partir del espectro electromagnético el cual clasifica por longitudes de onda toda la energía. Con lo anterior, existe un conjunto de intervalos de longitudes que definen gráficamente el espectro electromagnético (Rodríguez A. , 2005). (Ver Figura 1y Figura 2)

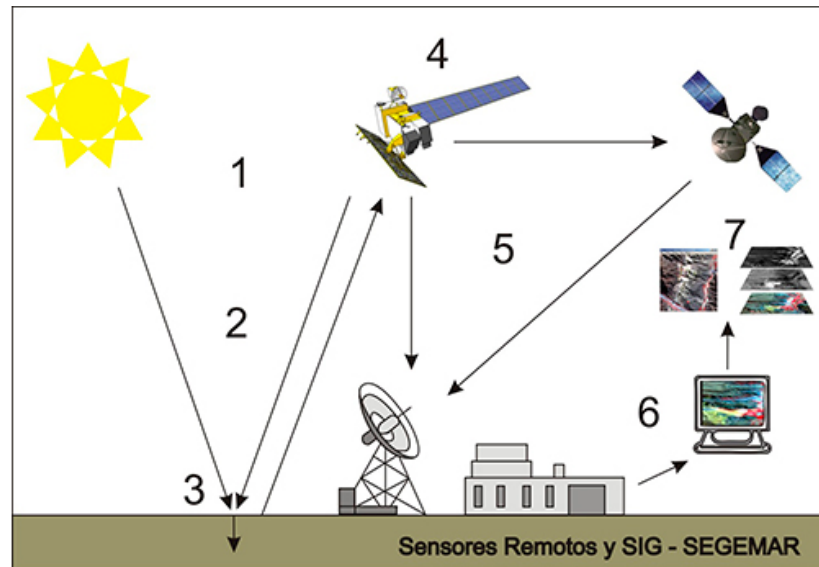


Figura 1. Representación del proceso fotogramétrico
 Fuente: <http://www.segemar.gov.ar/grmsensores-remotos>

En la Figura 1: 1 es la fuente de energía, pasiva o activa 2 es la trayectoria y su interacción con la atmósfera, 3 es la incidencia en la superficie terrestre, 4 es el satélite, 5 es el ciclo de toma y descarga de datos, 6 es la estación terrestre de pre proceso y 7 es la información al usuario (Segemar, s.f.).

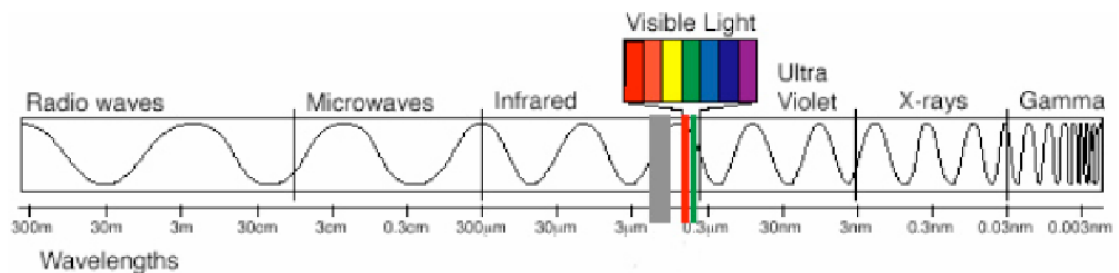


Figura 2. Representación del espectro electromagnético

Fuente: Earth Science Enterprise

A partir del espectro electromagnético a continuación, en la Tabla 1, se especifican las bandas espectrales de uso frecuente en el campo de la teledetección. La denominación y amplitud varía con respecto a varios autores.

Tabla 1. Bandas espectrales del espectro electromagnético

BANDA	CARACTERISTICAS
VISIBLE	Llamada así por ser la percibida por los ojos, allí se presenta la máxima radiación solar, se distinguen tres bandas elementales azul (0,4-055 um), verde (0,5 - 0,6 um), rojo (0,6 a 0,7 um)
INFRARROJO CERCANO	(0,7 A 1,3 UM) Este puede detectarse mediante películas dotadas por emulsiones especiales, en este se pueden diferenciar masas vegetales y concentraciones de humedad
INFRARROJO MEDIO	(1,3 a 0 um) donde se mezclan los procesos de reflexión de luz solar y emisión de la superficie terrestre
INFRARROJO LEJANO	(8 a 14 um) corresponde a la porción emisiva del espectro terrestre
MICROONDAS	(1 mm en adelante) de gran importancia por ser energía transparente a la corriente nubosa.

Fuente: Chuvieco 2002

4.2.3. Metodología Corine Land Cover – CLC para imágenes satelitales

La metodología Corine Land Cover tiene el objetivo de desarrollar el inventario homogéneo de la cobertura biofísica en la superficie de la tierra, esto a partir de la interpretación visual de imágenes satelitales por computador y generación de bases de datos geográfica (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010). Para la estructuración de la leyenda de coberturas del suelo para Colombia, se tomó como base la leyenda elaborada para la Cuenca Río Cauca y Río Magdalena, la cual fue desarrollada por el IDEAM, IGAC y Cormagdalena. (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010).

La leyenda nacional colombiana fue estructurada en un conjunto de categorías y subcategorías, de esto se derivan las unidades de cobertura del suelo de acuerdo con características fisionómicas de altura y densidad de elemento o miembro de las diferentes clasificaciones. Con lo anterior, la metodología garantiza la inclusión de niveles más detallados de interpretación, lo cual permite una ubicación y definición rápida (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010).

Con respecto a la resolución espacial, la interpretación CLC presenta un área mínima de mapeo de 25 hectáreas para una escala 1:100.000 a esta escala los niveles de interpretación varían desde el nivel 32 al nivel 6 (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010). Para llevar la interpretación CLC a una escala 1:25.000 se debe tener en cuenta las características pictóricas morfológicas como lo son forma, tamaño, sombras, tono, color, patrón, textura y posición geográfica (Arenas, 2014).

La metodología CLC define cinco grandes grupos de clasificación son “Territorios artificializados”, “Territorios Agrícolas”, “Bosques y Áreas Seminaturales”, “Áreas Húmedas y Cuerpos de Agua” los cuales se esquematizan en el Anexo 1 de la presente investigación.

4.2.4. Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada – NDVI

El índice diferencial de vegetación normalizado (NDVI) permite generar una imagen que muestra “el verdor” (biomasa relativa) de las coberturas boscosas y seminaturales. Este índice aprovecha la reflectancia de dos bandas de una imagen raster multiespectral, la banda roja refleja las absorciones de clorofila y la banda del infrarrojo refleja los materiales de las plantas. Así, el presente índice de vegetación ayuda a la supervisión de densidad e intensidad

de la vegetación, esto por presentar una mejor reflexión a comparación de áreas rocosas o deforestadas (ESRI, s.f.).

El índice NDVI es utilizado para el seguimiento de sequías, análisis de producción agrícola, se utiliza para predicciones de incendios y desertización. Este índice es muy utilizado para evaluación y seguimiento de la vegetación y compensar los cambios de iluminación, la pendiente del terreno y su orientación (Lillesand, Kiefer, & Chipman, 2004).

4.2.5. Pendientes del terreno

La pendiente del terreno es la inclinación de la superficie terrestre respecto a un plano horizontal que pasa por su base. La pendiente se expresa bajo la función gradiente, la cual se calcula en grados sexagesimales o pendientes en porcentaje (Zuñiga, 2000).

El IGAC en su metodología de clasificación de las tierras por su capacidad de uso, toma a la pendiente como una limitación en la ponderación productiva de los suelos. Donde este fenómeno físico del terreno es el grado de inclinación expresado en porcentaje y directamente hace parte de la configuración de la superficie terrestre (IGAC, 2014).

El IGAC establece una clasificación de las pendientes del terreno de forma simple y de forma combinada, esto depende de la morfología del terreno. En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se muestra la respectiva clasificación.

Tabla 2. Clasificación de pendientes del terreno metodología IGAC

CLASE SIMPLE	PENDIENTE EN PORCENTAJE
Plana	0%-3%
Ligeramente plana	3%-7%
Moderadamente inclinada	7%-12%
Fuertemente inclinada	12%-25%
Ligeramente escarpada o ligeramente empinada	25%-50%
Moderadamente escarpada o medianamente empinada	50%-75%

Fuente: IGAC – 2014

4.2.6. Tasa de Cambio de las Coberturas Naturales – TCCN

El indicador de tasa de cambio de coberturas naturales mide precisamente el cambio de área de coberturas naturales, esto a partir de un análisis multitemporal en un periodo de análisis no inferior a diez años. Con este indicador se identifican la pérdida de hábitat de fauna y flora. Así también, el indicador TCCN estima los grados de conservación de la cobertura natural, la cantidad de hábitat natural o áreas conservadas nativas y patrones de conversión (Ministerio de Ambiente, 2014). El indicador TCCN se calcula a partir de la ecuación uno.

$$TCCN = \left(\frac{\ln(A_{t_2}) - \ln(A_{t_1})}{t_2 - t_1} \right) * 100\%$$

Ecuación 1. Cálculo de tasa de cambio de coberturas naturales – TCCN

Fuente: (Ministerio de Ambiente, 2014)

De la ecuación uno

- $TCCN$ es la tasa de cambio de coberturas naturales
- $\ln(A_{t_2})$ es el logaritmo natural del área de cobertura del suelo específica, del año actual de análisis
- $\ln(A_{t_1})$ es el logaritmo natural del área de cobertura del suelo específica, del año base o inicial evaluado
- t_2 es el año de la cobertura del suelo actual de análisis
- t_1 es el año base de la cobertura del suelo de análisis

4.2.7. Modelo regresión exponencial

Al querer analizar una variable dependiente a través de una variable independiente, muchas veces ocurre que su relación no sea de forma lineal. En estos casos es común desarrollar regresiones o modelos exponenciales cuando se puede asumir que el comportamiento de la variable dependiente es exponencial con respecto al cambio de la variable independiente (Vargas, 2007).

En general un conjunto de datos puede ajustarse a múltiples funciones matemáticas, con el objetivo de poder interpretar, describir de la mejor manera las relaciones o asociaciones entre las variables. (Vargas, 2007)

Por ejemplo, el modelo de regresión exponencial es clave para el análisis de comportamientos crecientes con respecto al tiempo, o para evaluar grandes magnitudes que se presentan en un conjunto de datos. Ver ecuación 2.

$$y = \beta_0 e^{\beta_1 x} + \varepsilon$$

Ecuación 2. Modelo de regresión exponencial

De la ecuación 2 se tiene que:

- y es la variable dependiente
- β_0 es el coeficiente que acompaña la función exponencial
- β_1 es el coeficiente que acompaña a la variable independiente
- ε es el error aleatorio
- x es la variable independiente

4.3. MARCO LEGAL

En el contexto colombiano desde el Decreto 2278 de septiembre de 1953 se han desarrollado reglas para la vigilancia, control, mejoramiento, reserva, repoblación y explotación de bosques. Con lo anterior se buscaba catalogar de diferentes formas o características como lo son protectores, públicos, interés general y de propiedad privada.

Con el objetivo de generar un mejor desarrollo de la economía forestal y protección de los suelos, las aguas y la vida silvestre, a partir de la Ley 2 de 1959, se establecieron áreas con carácter de zonas forestales protectoras y bosques de interés general, esto a partir de la clasificación dictada por el Decreto legislativo número 2278 de 1953.

En el Decreto 2811 de diciembre de 1974, en Colombia, se dicta lo que se denomina “Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente” en el cual se dictan objetivos que buscan la preservación y restauración del ambiente y propender el mejoramiento y el uso racional de los recursos naturales. Así también se dictan derechos y regulaciones del manejo de los recursos naturales, regular efectos nocivos de la explotación de recursos naturales no renovables.

Así mismo la Constitución Política de Colombia, en su Capítulo 3 “De los derechos colectivos y del ambiente”, al Estado se le designa el deber de proteger la diversidad e integridad del ambiente, promover la conservación de las áreas de importancia ecológica y el fomento de la educación para el cumplimiento o alcance de estos objetivos.

Con la llegada de la Ley 99 de 1993 se dicta el principio general de que la biodiversidad deberá ser protegida de modo prioritario y aprovechada de forma sostenible. Esto por el echo de la biodiversidad ser patrimonio nacional y de interés de la humanidad.

Además, se desarrolla la idea que la protección del y la recuperación del medio ambiente se debe generar a partir del trabajo mancomunado la comunidad, las organizaciones no gubernamentales, sector privado y el Estado.

El Estado declara de prioridad nacional e importancia estratégica la conservación y el manejo sostenible de los bosques naturales y establecimiento de plantaciones forestales en suelos de vocación forestal. Así mismo las actividades forestales deben estar dirigidas a la conservación y manejo sostenible de los ecosistemas, a la generación de empleo y en pro del desarrollo y mejoramiento de las condiciones de vida de la comunidad rural y de la sociedad en general. Lo anterior quedó consignado en la Ley 1021 de 2006.

Es de suma importancia dar mención a los Objetivos de Desarrollo Sostenible - OSD de las Naciones Unidas, esto por el enfoque de adaptación al cambio climático que contiene la presente investigación. En primera instancia se nombran los 17 objetivos de desarrollo sostenible y se desarrollará un mayor análisis a los objetivos que presenten mayor afinidad con el desarrollo del presente trabajo.

1. Fin de la pobreza
2. Hambre cero
3. Salud y bienestar
4. Educación de calidad
5. Igualdad de género
6. Agua limpia y saneamiento
7. Energía asequible y no contaminante
8. Trabajo decente y crecimiento económico
9. Industria, innovación e infraestructura
10. Reducción de las desigualdades

11. Ciudades y comunidades sostenibles
12. Producción y consumo responsable
13. Acción por el clima
14. Vida submarina
15. Vida de ecosistemas terrestres
16. Paz, justicia e instituciones solidas
17. Alianzas para lograr los objetivos

Por ejemplo, el objetivo número 13 Acción por el Clima, se enfatiza en el fortalecimiento de la resiliencia y capacidad de adaptación a los riesgos generados por el clima, además de incorporar medidas y estrategias de adaptación y planes nacionales. Esto con la ayuda de la mejora de la educación y sensibilización de la capacidad humana e institucional respecto de la mitigación del cambio climático. Así también se busca el cumplimiento de acuerdos desarrollados en la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre cambio climático

Dentro del objetivo número 15 se proyectaba para el año 2020 trabajar y desarrollar acciones de conservación, restablecimiento y el uso sostenible de los ecosistemas como bosques, humedales, montañas y zonas áridas. Al igual que la búsqueda de poner fin a la deforestación, recuperar los bosques degradados e incrementar la forestación y reforestación a nivel mundial.

En los temas claves de los numerales 13 y 15 se encuentra la necesidad de promover recursos en temas de financiación para la gestión forestal, como también en temas de educación e investigación que promuevan la conservación de los bosques y servicios

ecosistémicos. Como así también aumentar el apoyo a la lucha en contra de la caza furtiva y el tráfico de especies protegidas.

Así las cosas, desde las políticas públicas y acuerdos internacionales es prioritario encontrar y desarrollar medidas, propuestas innovadoras e iniciativas que busquen ser herramientas de ayuda o solución a los múltiples problemas ambientales, sociales, culturales y económicos que está ocasionando el fenómeno del cambio climático, a partir de las malas prácticas de producción y consumo descontrolado por parte de las personas.

Es por eso que iniciativas como la presente investigación pueden llegar a ser de gran ayuda o aporte a nivel profesional y académico para el fomento de la investigación, desarrollo de nuevas metodologías y herramientas que apoyen los planes de mitigación y adaptación al cambio climático y se proyecten desarrollos tecnológicos a favor de la conservación de los servicios ecosistémicos del país.

5. METODOLOGÍA

5.1. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

La cuenca hidrográfica Río Las Ceibas se localiza en el costado oriental de la ciudad de Neiva, en el Departamento del Huila, sobre la vertiente occidental de la cordillera oriental, delimitada desde las altas montañas que dividen al municipio de Neiva con el departamento del Caquetá, hasta la desembocadura en el Río Magdalena. (CAM, 2007)

Cuenta con área actual de 30165 hectáreas, lo que corresponde a un 23.76% del área total del municipio de Neiva, ciudad de la cual el Río Las Ceibas es su fuente hídrica superficial y abastece a todo el municipio (CAM, 2007).

Las coordenadas de localización de la cuenca hidrográfica Río Las Ceibas son las siguientes:

- Al Sur, $2^{\circ}18'29''$ de latitud Norte en el nacimiento del afluente del Río Motilón
- Al Norte $2^{\circ}58'02''$ de latitud Norte en el Alto El Olivo, microcuenca de la Quebrada Los Micos.
- Al Este $74^{\circ}59'48''$ de longitud Este, en cerro de Santa Lucía, en límites con el Departamento del Caquetá.
- Al Oeste $75^{\circ}18'29''$ de longitud Oeste en la desembocadura del Río Las Ceibas, en las aguas del Río Magdalena

Limita por el Norte con la subcuenca del Río Fortalecillas, al Sur con las divisiones de agua de la microcuenca del Río Loro. Por el Oriente, con la subcuenca del Río Balsillas y por el Occidente, con el Río Magdalena. (CAM, 2007)

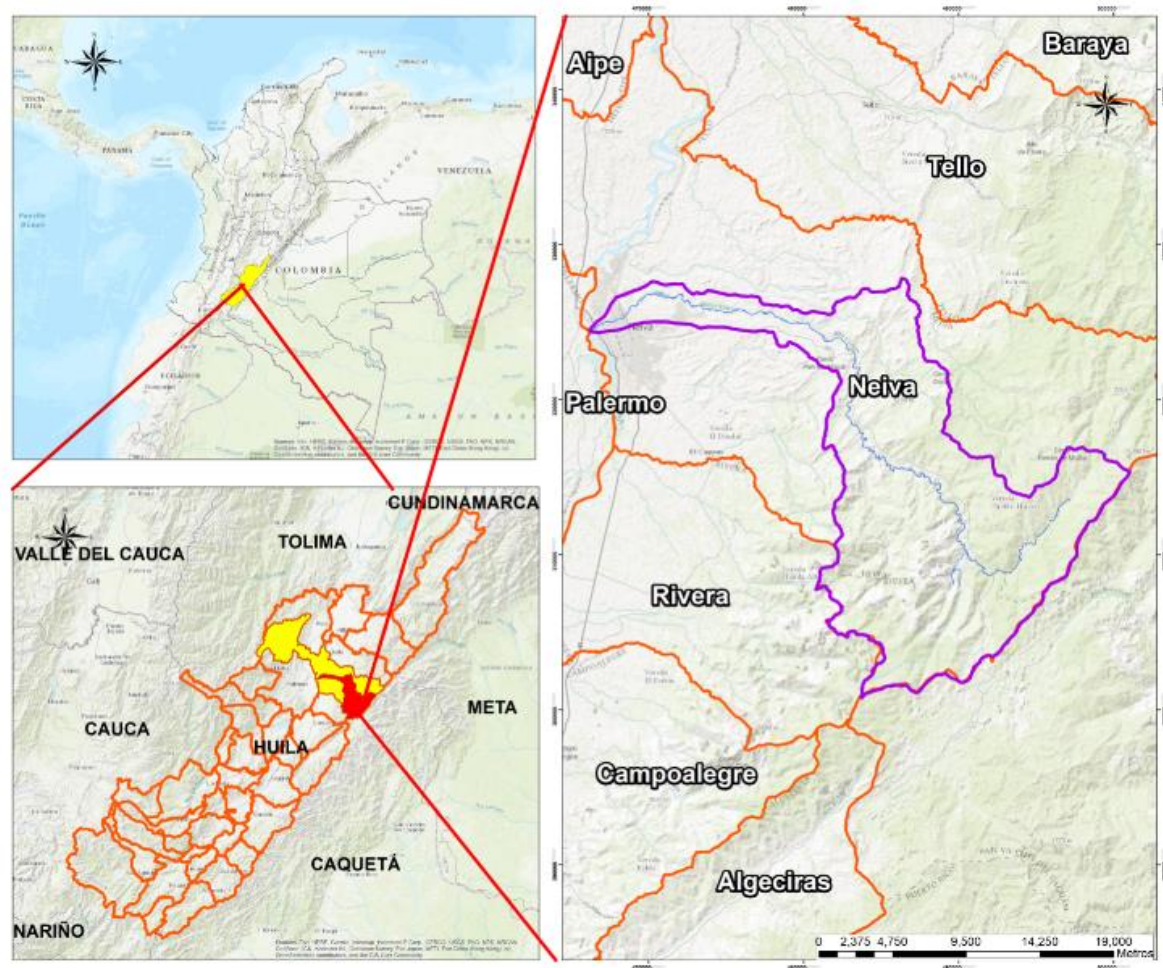


Figura 3. Localización general Cuenca Hidrográfica Río Las Ceibas
 Fuente: Elaboración del autor, información IGAC 2018, SIG CAM 2020

5.2. INTERPRETACIÓN CORINE LAND COVER

En esta fase se analizaron las coberturas del suelo entre los años 2007 y 2018, interpretada con metodología Corine Land Cover a escala 1:25.000 y área mínima de mapeo de 1.56 hectáreas, a partir de una imagen satelital del sensor SPOT 6/7, orto rectificada, con

una resolución espacial de pixel de 1.5 m por 1.5 m. La imagen satelital tiene una temporalidad de diciembre de 2018.

La interpretación de cobertura del suelo a año 2018 se realizó mediante interpretación visual y digitalización, donde cada uno de los polígonos fue generados con computadora, mediante el software ArcGIS 10.5. Cada polígono se clasificó con los códigos que estipula Corine Land Cover en la guía metodológica desarrollada por el IDEAM y se diligenció una base de datos geográfica para tener la leyenda completa de coberturas del suelo para el área de estudio.

Se desarrollaron evaluaciones topológicas de sobreposición y vacíos de información, esto con el objetivo de corregir errores de digitalización e interpretación que pudiesen alterar de mala manera los calculo de áreas de cubrimiento de cada una de las coberturas del suelo. Así entonces se buscó cumplir el proceso metodológico de CLC, el cual fue desarrollado por Melo y Camacho en 2005, entre el IDEAM e IGAC. El cual se basa en la adquisición de imágenes, evaluación de información secundaria, procesamiento digital de imágenes, interpretación visual, evaluación topológica y finalmente la generación del mapa de cobertura del suelo.

5.3. ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE COBERTURA DEL SUELO PARA EVALUACIÓN DE TCCN.

La interpretación CLC de 2007 y 2018 se utilizó para la evaluación del indicador TCCN, el cual tuvo como base comparativa la interpretación de cobertura del suelo realizada para el Plan de Ordenación y Manejo de Cuenca Hidrográfica - POMCH de la Cuenca Río

Las Ceibas del año 2007. Esta interpretación de 2007 se hizo a partir de insumos de imágenes satelitales IKONOS, ASTER y LANDSAT y su respectiva digitalización sobre software GIS. El anterior insumo fue realizado por la Corporación Autónoma Regional del Alto Magdalena – CAM, esto para la realización de la fase de diagnóstico de dicho POMCH en 2007.

El análisis multitemporal de cobertura se basó en la evaluación de los cambios de áreas de cobertura del suelo de 2007 y 20018, en el cual se comparó la compatibilidad de las leyendas interpretadas, en especial los cambios de coberturas boscosas y su respectiva TCCN. Evaluado este indicador se aplicó ecuación uno del presente documento para calcular el primer valor influyente en el modelo de regresión exponencial propuesto para el cálculo de biomasa.

La presente metodología busca que cada polígono interpretado de cobertura boscosa pueda ser evaluado en su cuantificación aproximada de biomasa, por lo que en el modelo exponencial se involucra el área del i-esimo polígono interpretado sobre el área total de la cobertura evaluada. Lo anterior con el objetivo de buscar una aproximación más exacta de biomasa para cualquier polígono interpretado de bosque. Para la revisión esquemática de la metodología se pide ver el Anexo 2 de la presente investigación.

5.4. CÁLCULO DE INDICE DE VEGETACIÓN DE DIFERENCIA NORMALIZADA

El índice de vegetación diferencial normalizado (NDVI) fue determinado mediante la aplicación del algoritmo de NDVI del software ERDAS Imagine. Dicho NDVI fue aplicado

a la imagen satelital SPOT 6/7 2018, que fue corregida mediante algoritmo de corrección atmosférica por temas de sobras y brumas en la atmosfera del programa ERDAS Imagine

Los valores de NDVI para la imagen original y la imagen con corrección atmosférica se comportan como una matriz de $n \times m$ (n filas por m columnas); que constituye la variable independiente para el modelo de regresión exponencial de cálculo aproximado de biomasa de las coberturas boscosas, con lo anterior se relaciona que cada polígono de cobertura del suelo contará con múltiples valores entre -1 y 1 que arroja el cálculo del NDVI. El esquema metodológico de cálculo de NDVI se muestra en el Anexo 2 de la presente investigación.

Para la evaluación del cálculo de biomasa el NDVI los valores obtenidos se clasificaron en NDVI máximo, NDVI mínimo y NDVI promedio, esto con el objetivo de analizar la mejor adaptación posible del modelo de regresión exponencial y optimizar el análisis de los valores NDVI, ya que el resultado puede superar valores de millones de las celdas o pixeles a evaluar.

5.5. ELABORACIÓN DE MAPA DE PENDIENTES DEL TERRENO

Las pendientes del terreno se catalogan como limitaciones en la capacidad de uso de los suelos, de tal manera las pendientes generan una subclase de los suelos que permiten determinar unidades de o niveles categóricos para delimitaciones de áreas homogéneas de capacidad de uso. En esta evaluación de capacidad de uso se puede llegar a generar ocho categorías o clases, lo cual se encuentra consignado en el manual 210 del Servicio de Conservación de los Suelos de los Estados Unidos. Donde las características del último grupo

denominado clase ocho son destinadas a usos de conservación y recuperación de la naturaleza y la biodiversidad. (Paez & Molina, 2017)

Con lo anterior es posible hacer el análisis de que en las zonas que presentan altas pendientes, es más probable encontrar áreas destinadas a la conservación, donde las coberturas del suelo de estas áreas pueden ser bosques densos, fragmentados o de galería. Es por eso que al involucrar esta probabilidad y el tener en cuenta las pendientes del terreno en porcentaje, podrá dar un acercamiento a la realidad en el cálculo de la biomasa de las coberturas boscosas

Para la generación del insumo cartográfico de las pendientes del terreno se utilizó un modelo digital de elevación con resolución espacial de 30 metros por 30 metros (Figura 4) y se desarrolló el cálculo de pendientes en porcentaje a partir de la herramienta de análisis espacial denominada “Slope” y el resultado de este procedimiento sometió a una reclasificación para emplear la metodología IGAC de clasificación de pendientes del terreno por clase simple y por porcentaje.

Para poder calcular las áreas de cubrimiento de cada tipo de pendiente sobre el área de estudio, se generó una conversión de tipos de datos, el cual fue la transformación de tipo raster a tipo vectorial.

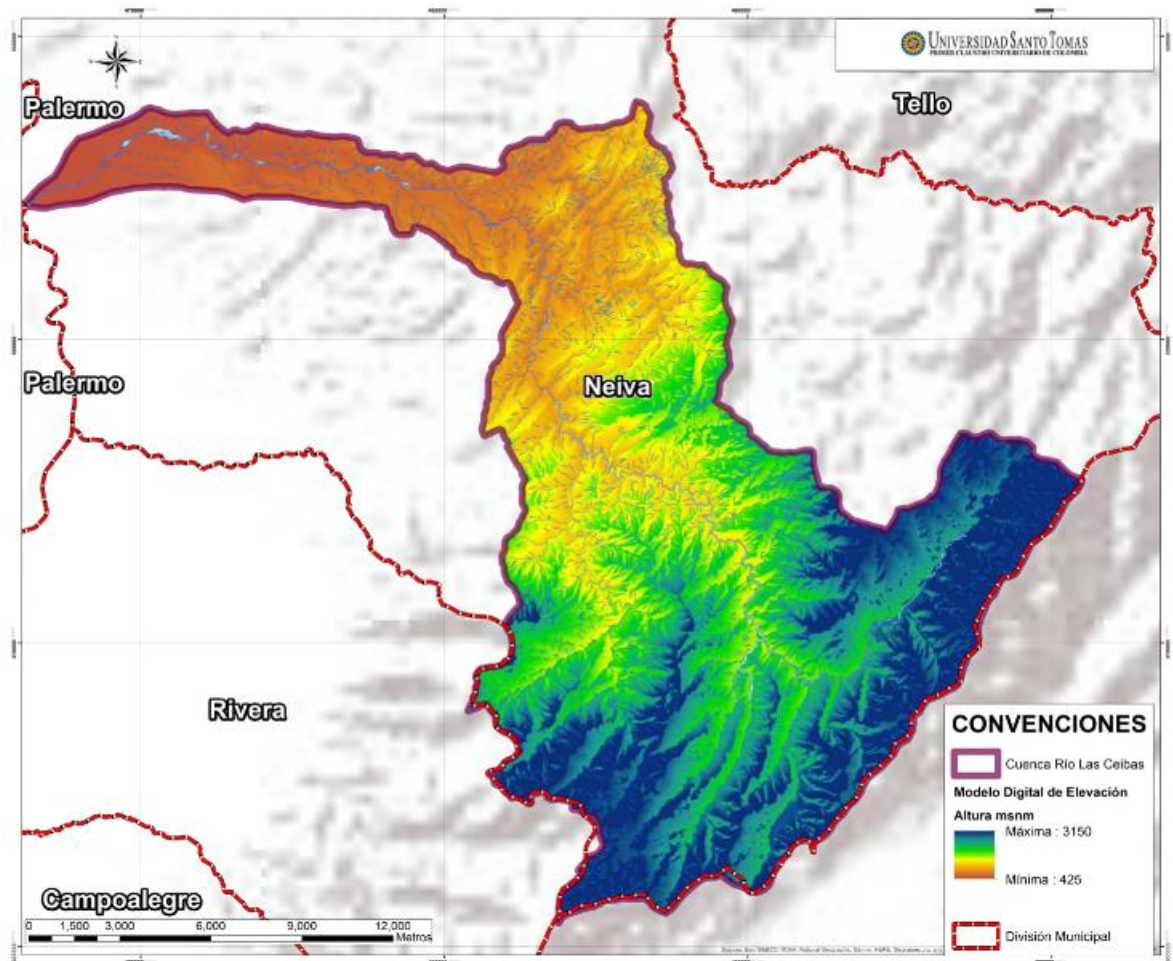


Figura 4. Modelo Digital de Elevación utilizado para la producción el mapa de pendientes del terreno

Para involucrar los cambios de pendientes del terreno en el modelo de cálculo de biomasa, se clasificaron las pendientes del terreno como mínimas, máximas y promedio por áreas evaluadas, esto con el fin de poder determinar con mayor exactitud la incidencia de los cambios de pendiente en el aporte de la conservación y cálculo aproximado de biomasa de los bosques de la cuenca Río Las Ceibas.

5.6. IMPLEMENTACIÓN DE MODELO DE REGRESIÓN EXPONENCIAL PROPUESTO

La creación de la ecuación propuesta para cálculo de biomasa de las coberturas boscosas a partir de insumos cartográficos surge de la necesidad de “simular”, algebraicamente, una ecuación alométrica exponencial convencional, la cual cuenta con variables físicas de los árboles, a diferencia de ecuación propuesta; la cual se basa en variables de productos de información geográfica.

En otras palabras, la presente ecuación es producto del método investigativo denominado ensayo error, el cual se basó en cálculos preliminares a partir de manipulación de ecuaciones, variables y valores que experimentalmente pueden influir en la cuantificación aproximada de la biomasa de bosques con insumos cartográficos.

Teniendo en cuenta cada uno de los apartados de la metodología, el modelo de regresión exponencial propuesto contiene los valores de las áreas de los polígonos de las coberturas boscosas interpretadas y su indicador de TCCN, además contiene las pendientes del terreno calculadas y el NDVI resultante de la imagen satelital utilizada para la interpretación visual de coberturas del suelo a año 2018.

$$Y_B = \left[\left(\frac{AC_i}{\sum_{i=1}^n AC_i} \right) \left[e^{\left(\frac{P\%}{TCCN\%} \right) (NDVI)} \right] \right]$$

Ecuación 3. Modelo de regresión exponencial general para el cálculo de biomasa a partir de insumos cartográficos

De la ecuación 3 se tiene que:

- Y_B es el valor de biomasa aproximado calculado

- AC_i es el área en hectáreas interpretada del i-esimo polígono de un tipo de cobertura boscosa
- $\sum_{i=1}^n AC_i$ es la suma del área en hectáreas interpretada de los i-esimos polígonos de un tipo de cobertura boscosa
- e es el valor de Euler
- $P\%$ es el valor de la pendiente en porcentaje del terreno que contiene los polígonos de cobertura boscosa evaluado
- $TCCN\%$ es el valor de la tasa de cambio de cobertura boscosa en porcentaje
- $NDVI$ es el valor del índice de vegetación de diferencia normalizada que contenido en los polígonos de cobertura boscosa interpretados

Así entonces la implementación por partes de la ecuación de cálculo de biomasa se explica a continuación.

$$C_1 = \left[\left(\frac{AC_i}{\sum_{i=1}^n AC_i} \right) \right]$$

La evaluación de AC_i sobre la sumatoria de los AC_i , busca tener un valor representativo o de influencia del área de cada polígono interpretado de cobertura de bosque, sobre el total del área de bosque interpretada. Esto con el objetivo de que se comporte como un coeficiente que acompañe como producto escalar la función exponencial.

$$C_2 = \left[\left(\frac{P\%}{TCCN} \right) \right]$$

La evaluación de la pendiente del terreno sobre la tasa de cambio de cobertura natural, busca dar una relación matemática a la influencia del cambio de la pendiente del terreno en

la tasa de cambio de cobertura boscosa. El anterior raciocinio se desarrolla ya que, en Colombia, la metodología de la capacidad del uso del suelo evalúa la pendiente como un limitante para actividades productivas, con ello es más probable encontrar coberturas boscosas sobre pendientes altas por el alto grado de dificultad de intervención humana sobre dichas áreas y si la intervención humana es baja con respecto al tiempo la TCCN presentaría valores positivos en conservación de bosque.

Claramente pueden haber zonas de pendientes altas que no presentan coberturas boscosas, pero la ecuación precisamente busca estabilizar o mantener un análisis lógico de este comportamiento, es por eso que el coeficiente uno evalúa los i -ésimos polígonos de bosque y además la variable independiente NDVI compensará la falta bosque sobre las pendientes altas, ya que de no presentarse coberturas boscosas en pendientes altas, los valores de NDVI serán bajos por la baja respuesta fotosintética de las coberturas del suelo y por ende los valores de cuantificación de biomasa boscosa serán bajos o nulos.

En el Anexo 2 de la presente investigación se puede ver gráficamente el esquema utilizado para el desarrollo metodológico de esta propuesta metodológica para el cálculo aproximado de biomasa de las coberturas de bosque de la cuenca Río Las Ceibas

6. RESULTADOS

A continuación, se presentan apartados por capítulos los resultados obtenidos para la generación del modelo de regresión exponencial para el cálculo de la biomasa de la zona de estudio.

6.1. INTERPRETACIÓN DE IMAGEN SATELITAL A PARTIR DE METODOLOGÍA CORINE LAND COVER

En el presente apartado de resultados se muestra los múltiples ejemplos de coberturas del suelo interpretadas mediante la metodología CLC.



Figura 5. Interpretación bosque denso



Figura 6. Interpretación bosque de galería y/o ripario



Figura 7. Interpretación de vegetación secundaria

El cubrimiento de la interpretación de cobertura del suelo para el año 2018, a la fecha se deja en 28302 hectáreas, lo cual representa el 93.8% del área total de la cuenca, este es un excelente porcentaje que permite determinar cambios de la cobertura de bosque a 2018 con el objetivo de dejar abierto el proceso de interpretación para calibración y evaluación futura del modelo de regresión exponencial de cálculo de biomasa. La interpretación CLC para el área de estudio se muestra en la Figura 8

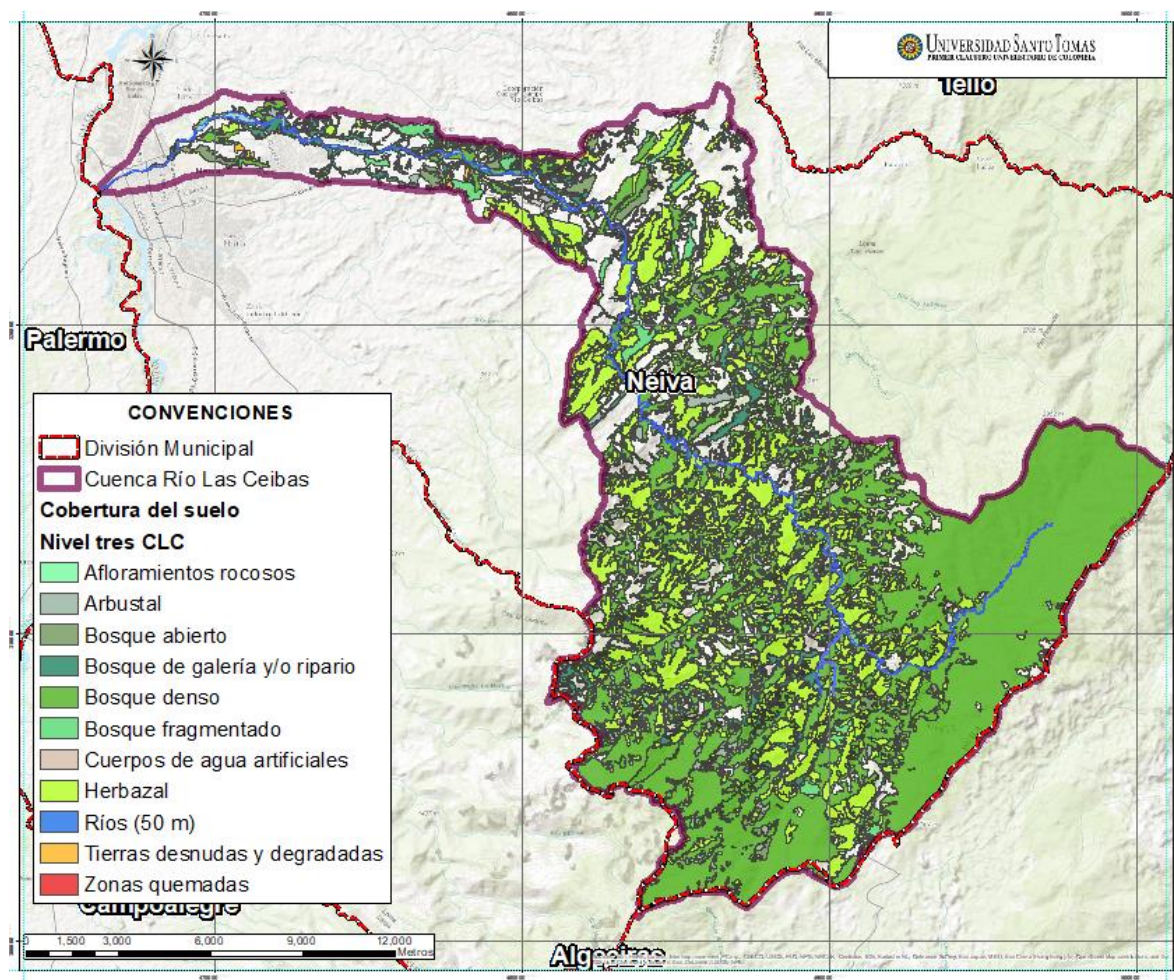


Figura 8. Cobertura boscosa año 2018 cuenca Río Las Ceibas

Tabla 3. Coberturas naturales del suelo cuenca Río Las Ceibas año 2018

COBERTURA DEL SUELO	ÁREA (Has)	ÁREA %
Bosque denso	13665	57.93
Bosque abierto	443	1.88
Bosque fragmentado	566	2.40
Bosque de galería y/o ripario	1288	5.46
Herbazal	6853	29.05
Arbustal	453	1.92
Vegetación secundaria o en transición	35	0.15
Zonas arenosas naturales	1	0.00
Tierras desnudas y degradadas	39	0.17
Ríos (50 m)	231	0.98
Lagunas, lagos y ciénagas naturales	3	0.01
Cuerpos de agua artificiales	11	0.05
TOTAL	23588	100

Fuente: Elaborada por el autor

6.2. ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE COBERTURA DEL SUELO CUENCA RÍO LAS CEIBAS

Para el análisis multitemporal de cobertura del suelo se tomó como insumo base de análisis la interpretación de cobertura CLC del Plan de Ordenación de Cuenca Hidrográfica – POMCH del Río Las Ceibas año 2007 Figura 9 y se comparó las coberturas boscosas de dicho insumo con las coberturas boscosas de la interpretación resultante a año 2018 (Figura 8). En la Tabla 4 se muestra los cálculos de áreas obtenidos en la interpretación del insumo de cobertura del suelo de 2007.

Tabla 4. Áreas de coberturas naturales del suelo Cuenca Río Las Ceibas año 2007

COBERTURA	ÁREA (Has)	ÁREA (%)
Afloramientos rocosos	239	0.79
Bosque denso	6715	22.28
Cultivos permanentes	2243	7.44
Cultivos semipermanentes	89	0.30
Cultivos transitorios	8	0.03
Herbazal	3289	10.91

Pastos enmalezados	7635	25.34
Pastos limpios	9356	31.04
Tierras desnudas y degradadas	18	0.06
Zona Urbana	543	1.80
TOAL	30137	100

Fuente: Elaborada por el autor

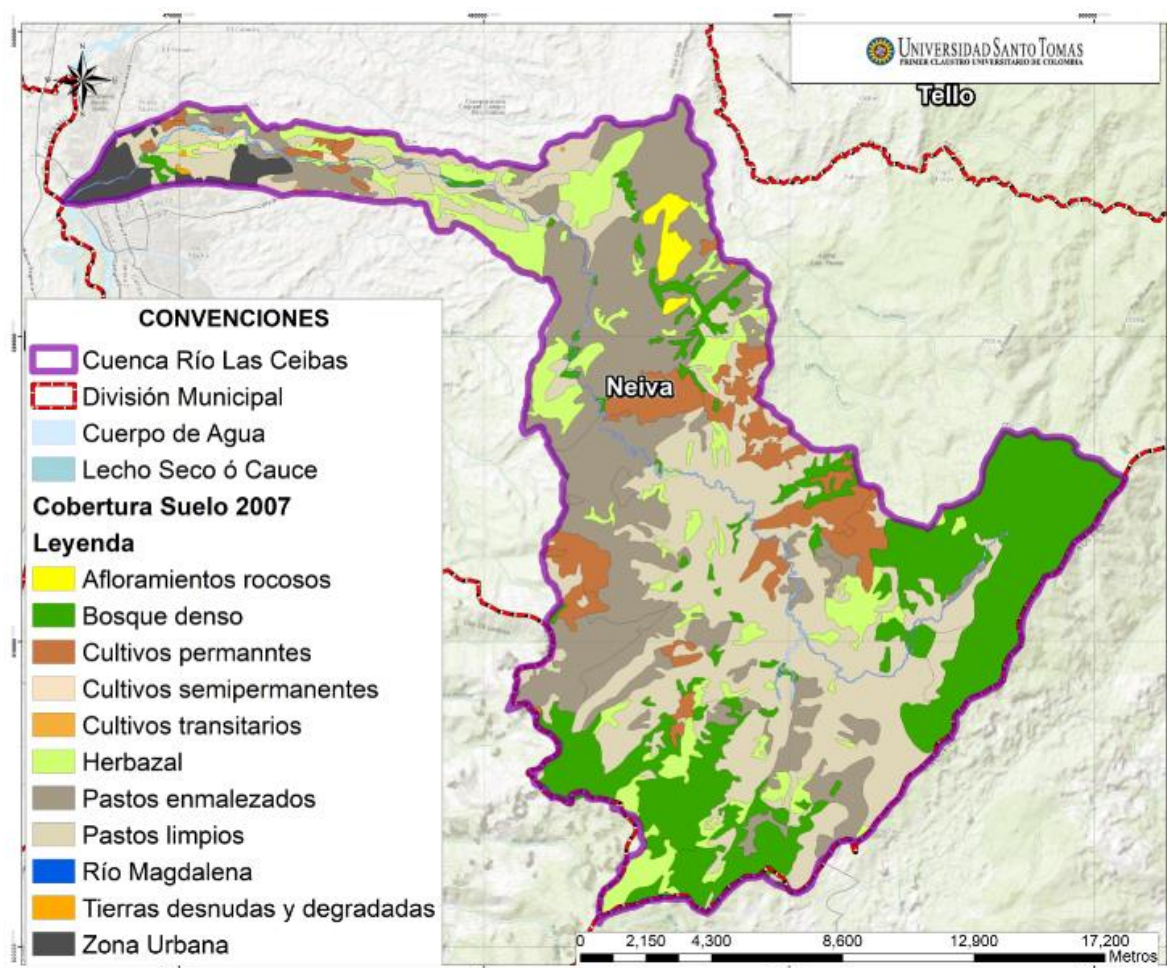


Figura 9. Coberturas del suelo año 2007 cuenca Río Ceibas

Así, teniendo dos insumos de cobertura del suelo con diferencia temporal mayor a diez años, como lo recomienda la metodología del IAvH para el análisis del indicador TCCN, se aplicó la ecuación 1 de TCCN y se da el siguiente resultado

$$TCCN = \left(\frac{\ln(15962) - \ln(6751)}{2018 - 2007} \right) * 100\%$$

$$TCCN = 7.82\%$$

Con un resultado de 7.82%, según la metodología del IAvH, se presenta un indicador de TCCN bajo y es importante destacar lo que muestran los valores. A 2018, la cuenca Río Las Ceibas presenta un aumento de aproximadamente el 50% de coberturas boscosas con respecto al año 2007, y concuerda con la baja tasa de cambio intervención ecosistémica.

6.3. CÁLCULO DE INDICE DE VEGETACIÓN NORMALIZADO – NDVI

El cálculo de NDVI obtenido permitió observar los grados de respuesta o reflectancia de la fotosíntesis de las coberturas boscosas de la cuenca Río Las Ceibas. Para la visualización de los resultados se utilizó una leyenda tipo “semáforo” donde los valores más bajos de fotosíntesis se ven en colores rojos y naranjas, hasta llegar a valores más altos entre amarillos y verdes.

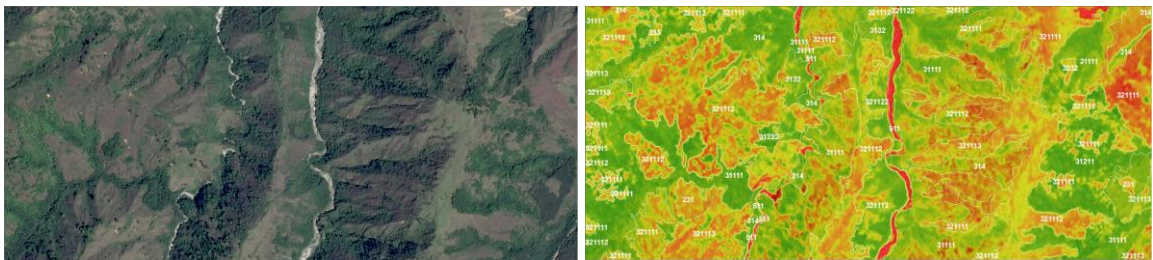


Figura 10. Visualización de coberturas naturales del suelo (izquierda) y respectiva representación de NDVI (derecha).

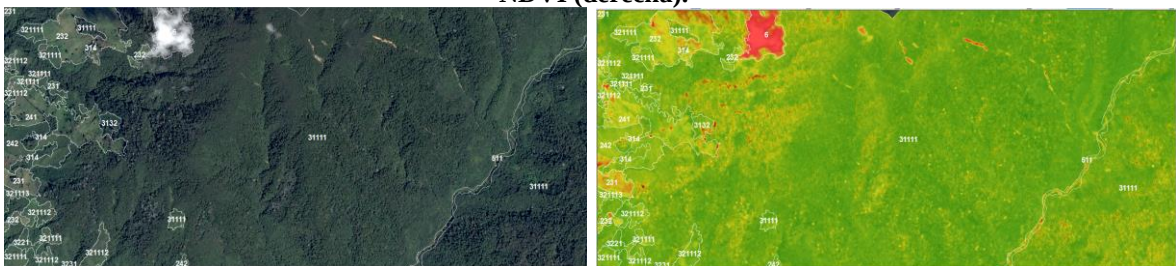


Figura 11. Visualización de NDVI de un bosque denso interpretado

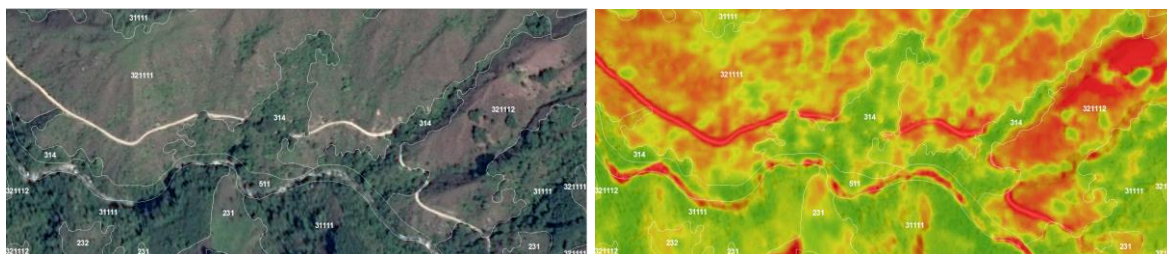


Figura 12. Visualización de NDVI de bosques de galería y/o ripario y herbazales densos

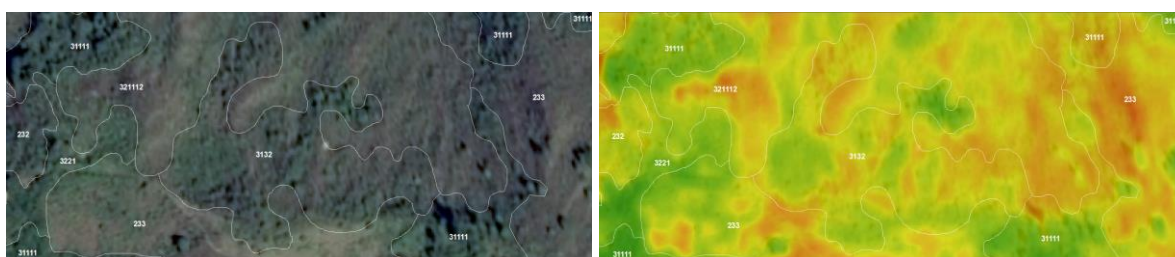


Figura 13. Visualización de NDVI de bosques fragmentados

Teniendo en cuenta la metodología planteada, se realizó la clasificación de NDVI máximo, promedio y mínimo, en la Tabla 5 se muestran los resultados obtenidos para el área de la cuenca Río Las Ceibas. Los resultados permiten inferir la buena respecta espectral fotosintética de la cobertura boscosa en el área de estudio, cerca del 71% de la cobertura natural presenta valores de NDVI positivos.

Tabla 5. Cálculo de áreas por NDVI máximo, mínimo y promedio

NDVI	NDVI_MAX	NDVI_MIN	NDVI_PROM	ÁREA (Has)	ÁREA (%)
-0.27104 - 0.307017	0,307017	-0,27104	0,017989	663,566	2,202
0.307017 - 0.501175	0,501175	0,307017	0,404096	1597,346	5,3
0.501175 - 0.615904	0,615904	0,501175	0,558539	6012,164	19,948
0.615904 - 0.7041579	0,704158	0,615904	0,660031	10460,825	34,708
0.7041579 - 0.8541886	0,854189	0,704158	0,779173	11405,258	37,842
TOTAL				30139,16	100

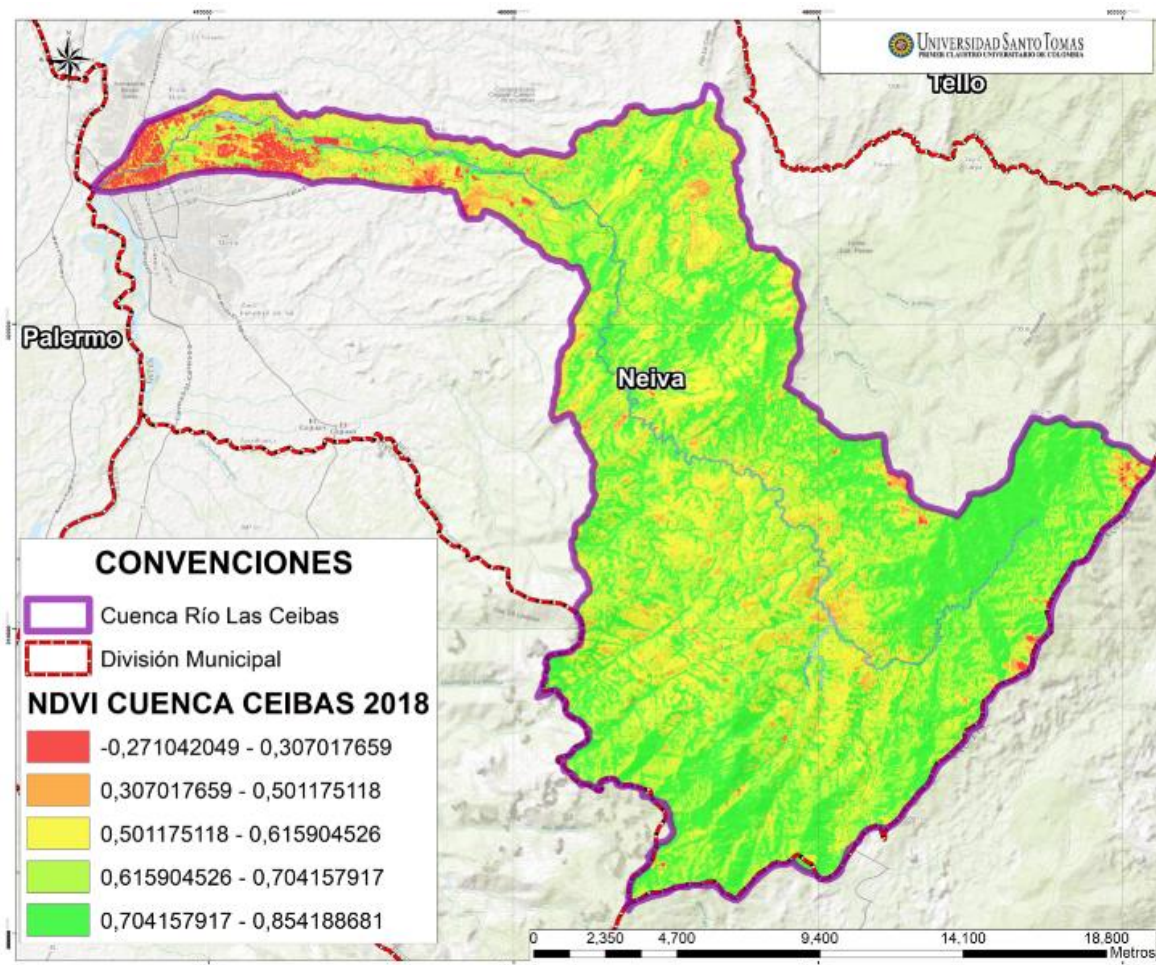


Figura 14. NDVI Tipo vectorial para la cuenca Río Las Ceibas para el año 2018

6.4. GENERACIÓN DE MAPA DE PENDIENTES EN PORCENTAJE

La herramienta SIG utilizada para la generación de este insumo fue la herramienta denominada “Slope”, función de análisis espacial y para poder involucrar la metodología IGAC se realizó una reclasificación del raster resultante de la aplicación de la herramienta Slope y se pudo determinar las pendientes en porcentaje para la cuenca Río Las Ceibas. En la tabla 6 se muestra los resultados obtenidos para la clasificación de pendientes en porcentaje del IGAC y su respectivo plano cartográfico.

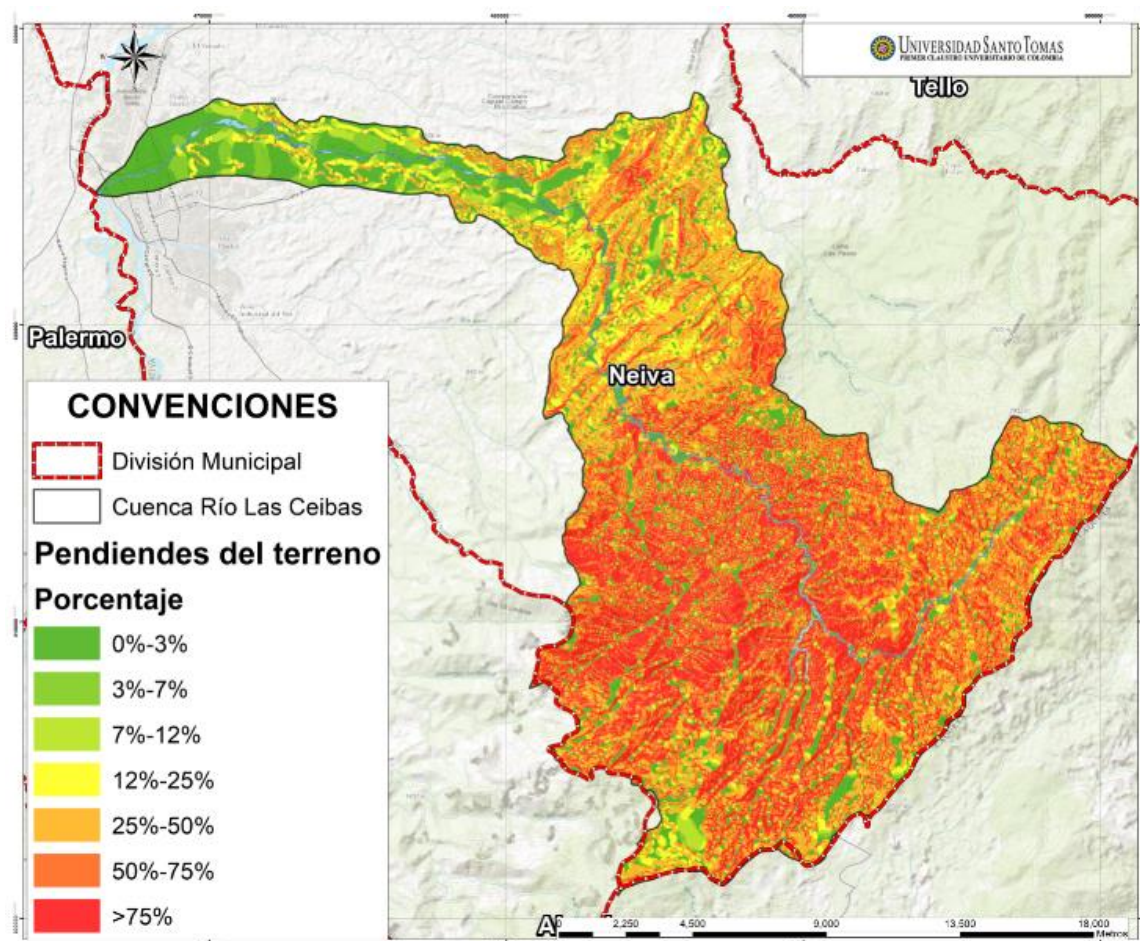


Figura 15. Pendientes del terreno para la Cuenca Río Las Ceibas

Tabla 6. Áreas de pendientes del terreno cuenca Río Ceibas

PENDIENTE	ÁREA (s)	ÁREA (%)
0%-3%	4852,654	16,088
3%-7%	1018,225	3,376
7%-12%	1085,263	3,598
12%-25%	2766,503	9,172
25%-50%	6537,494	21,673
50%-75%	7524,534	24,946
>75%	6379,214	21,149
TOTAL	30163,886	100

Fuente: Elaborada por el autor

Teniendo en cuenta la Figura 15 y los resultados de la Tabla 6 se evidencia como la cuenca Río Las Ceibas cuenta con altas pendientes sobre la cuenca media y alta, donde actualmente se presentan los mayores trabajos de conservación ambiental. Cerca del 66% de la cuenca Río Las Ceibas cuenta con pendientes de ligeramente escarpada o ligeramente empinada, moderadamente escarpada o medianamente empinada y fuertemente escarpada o fuertemente empinada.

6.5. IMPLEMENTACIÓN DE MODELO DE REGRESIÓN EXPONENCIAL PARA EL CÁLCULO APROXIMADO DE BIOMASA

Teniendo por completo los insumos cartográficos necesarios, de tipo vectorial, como lo son la cobertura de bosques año 2018, cálculo de NDVI, cálculo de TCCN y pendientes del terreno se aplicó la ecuación 3. En este apartado de resultados de biomasa, se dará a conocer para cada tipo de cobertura de bosque su respectivo valor aproximado de biomasa por hectárea, para dicha cuantificación se clasificaron las coberturas boscosas por pendientes del terreno. En la tabla 7 se muestran las coberturas boscosas a evaluar en el modelo y su respectiva área involucrada con respecto al total del área de estudio.

Tabla 7. Coberturas boscosas objeto de cálculo de biomasa		
COBERTURA DEL SUELO	ÁREA (Has)	ÁREA %
Bosque denso	13665	85.61
Bosque abierto	443	2.78
Bosque fragmentado	566	3.55
Bosque de galería y/o ripario	1288	8.07
TOTAL	15962	100

Fuente: Elaborada por el autor

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se muestran los cálculos totales de biomasa para cada tipo de cobertura boscosa sobre el área de la cuenca Río Las Ceibas. El total sale de sumar los aportes de los i -ésimos polígonos subdivididos, esto es la aplicación de modelo de regresión exponencial para cálculo de biomasa propuesto y se multiplican por el área total de cada tipo de cobertura de bosque interpretada

CLC	LEYENDA COBERTURA	ÁREA (Has)	ÁREA (%)	BIOMASA MAXIMA T/HA	BIOMASA MEDIA T/HA	BIOMASA MÍNIMA T/HA	BIOMASA MÁXIMA TOTAL	BIOMASA MEDIA TOTAL	BIOMASA MÍNIMA TOTAL
3.1.1	Bosque denso	13661.2	85.61	6,492.62	3,218.47	2,314.31	88,696,980.34	43,968,162.36	31,616,251.77
3.1.2.	Bosque abierto	442.55	2.77	3,703.16	1,955.34	1,526.94	1,638,833.46	865,335.72	675,747.30
3.1.3.	Bosque fragmentado	565.37	3.54	4,151.88	2,000.68	1,416.08	2,347,348.40	1,131,124.45	800,609.15
3.1.4.	Bosque galeria y/o Ripario	1287.91	8.07	4,244.50	2,286.75	1,698.40	5,466,534.00	2,945,128.19	2,187,386.34
	TOTAL	15957.03	100	18,592.16	9,461.24	6,955.73	98,149,696.19	48,909,750.73	35,279,994.56
CÁLCULO APROXIMADO DE BIOAMSA PARA 15957 HECTÁREAS DE BOSQUE DE LA CUENCA RÍO LAS CEIBAS							182339441.4803 TONELADAS		

Fuente: Elaborada por el autor

7. DISCUSIÓN

Cuantificar la biomasa de los bosques y en general de las coberturas vegetales es importante para determinar la fijación de carbono de los mismos, que se relaciona con la temática actual de cambio climático, de esta manera se pueden determinar entre varios aspectos, las zonas que deben ser priorizadas para conservación si constituyen fijaciones de carbono relevantes, que contribuyen a la mitigación del cambio climático.

Una alternativa opcional para la medición indirecta de la biomasa de coberturas vegetales es el uso de sensores remotos ópticos en satélites, los cuales miden la radiación solar reflejada por la superficie terrestre en regiones del espectro electromagnético y la información en la reflectancia puede asociarse a las características de la vegetación observada, permitiendo su uso que es de fácil acceso y a bajo costo (Chávez, Paz, & Bolaños, 2017).

En el modelo de regresión propuesto, el empleo del NDVI como variable independiente es justificable ya que el NDVI tiene una relación directa con variables biofísicas como el índice de área foliar (IAF), la biomasa, la cobertura del suelo, esto debido a las respuestas espectrales de las coberturas del suelo y los niveles de absorción de las bandas rojas e infrarrojas en el espectro electromagnético. (Paz, y otros, 2007) Por lo que suponiendo una relación lineal entre el IAF y la biomasa aérea (BA) se puede establecer la relación de la ecuación 4

$$B_A = uNDVI_{cp}$$

Ecuación 4. Relación lineal del cálculo de biomasa aérea a partir de NDVI

De la ecuación 4, u es una constante empírica que adquiere valores en función de la vegetación analizada en particular (propiedades ópticas de las hojas, distribución espacial y angular de las hojas, arquitectura del dosel y su distribución geométrica en el área de medición); de acuerdo con Medina-García et al (2009), el NDVI es un índice integrador, porque puede reflejar la variación existente en cada tipo de cobertura del suelo y la producción de biomasa.

Con respecto a las variables dependientes del modelo, es importante tener en cuenta la pendiente del terreno como una corrección topográfica, de acuerdo con Gonzaga-Aguilar (2014) en la obtención de información sobre la superficie del terreno a partir de imágenes satelitales, la iluminación oblicua y una topografía irregular, como la de la cuenca del río Las Ceibas, genera un efecto de sombreado e iluminación que modifica la respuesta debida exclusivamente al tipo de superficie, de esta forma el efecto topográfico genera una variación de la respuesta radiométrica de la superficie inclinada frente a la de una horizontal, que se encuentra en función de su posición (pendiente y orientación), frente a las fuentes de iluminación y observación.

Se tiene en cuenta además el tipo de cobertura del suelo, porque obviamente los valores de NDVI cambian con el tipo de cobertura, teniendo en cuenta que es de esperarse una fijación de carbono diferencial en por ejemplo coberturas herbáceas o rasantes, en relación con lo que podría esperarse para coberturas boscosas, además en el caso de esta última, se hace necesario identificar la transformación de la zona objeto de estudio, que se obtiene a partir de la tasa de cambio.

Los estudios de cambio de uso de suelo y vegetación constituyen un referente importante para conocer la dirección de transformación de un área de estudio en particular, asociado a procesos como la deforestación, degradación, perturbación de los bosques que influye en la capacidad de fijación de carbono; y otros procesos como la erosión o desertificación del suelo y la pérdida de biodiversidad asociada. (Lambin, et al. 2001)

La cobertura boscosa de la cuenca Río Las Ceibas presenta altos grados de conservación y bajos grados de deforestación, esto se pudo determinar con el cálculo de tasa de cambio de cobertura natural, la cual arrojó un 7.82% de cambio, esto según el IAvH permite concluir que presenta un bajo nivel de transformación de los ecosistemas boscosos del territorio. Las áreas de coberturas de gran producción agrícola y pecuaria como los cultivos intensivos o los pastos limpios, han presentado una disminución con respecto al tiempo, esto puede ser por la reconversión de los usos del suelo que la aplicación del POMCH Río Las Ceibas ha generado.

Lo anterior se evidencia mediante las grandes extensiones de terreno que se presentan como herbazales densos altos de tierra firme, estos cambios se han presentado sobre los predios adquiridos por el Municipio de Neiva, en convenio con La Corporación Autónoma del Alto Magdalena – CAM y sus inversiones ambientales para la conservación de los recursos naturales de la cuenca Río Las Ceibas.

Los niveles de NDVI más bajos ocuparon tan solo un 2% del área de estudio, esto corresponde a las áreas urbanas, cuerpos de agua, zonas de nubes y ciertas áreas de vegetación con erosiones bajas. Con unos índices de NDVI mejores a los anteriores se encontraron las áreas de producción agrícola y ganadera extensiva, lo cual solo ocupó un 5%

del área objeto de estudio. Esto permite concluir que en general la cuenca Río Las Ceibas cuenta con coberturas naturales con altos grados de reflectancia fotosintética y es posible deducir los altos índices de calidad de la vegetación. Adicionalmente, cerca de al 80% de la cuenca Río Las Ceibas presentó NDVI que oscilan entre los 0.50 y 0.85 esto permite destacar los altos niveles de conservación y coberturas boscosas naturales presentes en el área de estudio, además confirma que el NDVI por su método de reflectancia de la clorofila de la vegetación, sustenta ser un indicador óptimo de evaluación para el cálculo de biomasa de coberturas boscosas. Entonces es de esperarse encontrar altos valores de biomasa para las coberturas asociadas en las zonas con mayores valores de NDVI.

Las pendientes del terreno mayores al 50% son las que se presentan en mayor extensión sobre la cuenca objeto de estudio; la cuenca media y alta del Río Las Ceibas presenta pendientes ligeramente escarpadas, ligeramente empinada, moderadamente escarpada, moderadamente escarpada, fuertemente escarpada y fuertemente empinada. La inclusión de las pendientes en porcentaje, permitió calcular una relación o fracción lógica entre los grados de pendientes y la tasa de cambio de cobertura, la aplicación de esta relación permitió deducir que la probabilidad de que se presente una tasa de cambio fuerte de cobertura natural sobre pendientes fuertes, es menor a que se presenten cambios sobre pendientes leves o moderadas. Este análisis fortalece la evaluación de las pendientes en el cálculo de biomasa para las zonas altas del área de estudio, ya que se proyecta la hipótesis de que a mayor porcentaje de pendiente, se involucraría una mayor cantidad de biomasa aérea.

Con respecto a los cálculos de biomasa para coberturas boscosas con características inundables presentaron valores muy altos, que a simple vista saldrían un poco de contexto

por temas del comportamiento de las pequeñas áreas de terreno. Analizando los valores detalladamente se concluye que para determinar biomasa de áreas inundables lo más conveniente es refinar la interpretación de dichas coberturas, y evaluar que no se estén presentando sobre zonas muy altas o escarpadas del terreno, ya que se puede entrar en un posible error de interpretación de cobertura del suelo. El detalle del cálculo de biomasa se desarrolló a una escala tan considerablemente buena que ha permitido desarrollar una posible técnica de análisis para hallar posibles errores en la interpretación de imágenes satelitales.

8. CONCLUSIONES

- La Cuenca Río Las Ceibas ha pasado de tener aproximadamente 6700 hectáreas de bosque natural desde el año 2007 a 10800 hectáreas a año 2018, esto es un aumento de casi el 50% de cobertura. Esto sin contar los aumentos de área boscosa que se encuentran en periodo de crecimiento y zonas de herbazales densos en mantenimiento.
- El NDVI permite calificar los grados de reflectancia de la clorofila de las coberturas de bosque, logró adaptarse de forma óptima como variable independiente del modelo de regresión exponencial.
- Los cálculos obtenidos de biomasa, clasificados por pendientes del terreno, permitieron determinar que el modelo exponencial por sí solo no calcula la biomasa directamente de la cobertura, en una simple reflexión el modelo busca determinar niveles de biomasa con insumos cartográficos con mayor alcance espacial, es decir con mayor exactitud. De igual manera, para determinar la biomasa total hay que hacer un producto o multiplicación del resultado del modelo con el área de la cobertura natural analizada.
- La metodología desarrollada en la presente investigación deberá tener una comprobación y calibración en campo, con el objetivo de determinar las semejanzas o diferencias de los cálculos aproximados de biomasa obtenidos. Para sustentar con mayor confianza la fiabilidad de esta metodología y por qué no desarrollar un proceso de patente metodológica para la cuantificación de biomasa en las coberturas boscosas del territorio colombiano.
- Una estimación de biomasa y cobertura vegetal utilizando métodos indirectos y estimaciones como las realizadas en el presente proyecto, utilizando insumos

cartográficos permite obtener la información de una forma más rápida, que, si se logra comprobar con datos en campo para realizar los ajustes necesarios, hará posible la toma de decisiones sobre el manejo de la presente área de trabajo y otras zonas de interés, de forma más eficiente. Sin embargo, desde un punto de vista teórico el modelo propuesto es funcional.

GLOSARIO

CAPACIDAD DE USO: Potencial o grado de limitaciones que poseen las tierras para la utilización bajo parámetros específicos de manejos pecuarios, agrícolas, forestal, conservación y protección. (Instituto Geográfico Agustín Codazzi - IGAC, 2014)

CONSTANTE DE NAPIER EULER: Es un número irracional ya que no puede expresarse por la razón de dos números enteros, además sus números decimales son infinitos, así también es un número trascendente porque no puede ser expresado como la raíz de ecuación algebraicas con coeficientes racionales.

CUENCA HIDROGRÁFICA: Es el área de agua superficiales o subterráneas que desemboca a una red hídrica natural con uno o varios cauces naturales, los cuales cuentan con caudales continuos o intermitentes y pueden desembocar a un río principal. (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2012)

ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO: Es el conjunto de los números de ciclos de ondas electromagnéticas por unidad de tiempo, midiendo las posibles frecuencias que producen la radiación electromagnética. (Luque, 2012)

ESTIMACIÓN: Es un cálculo se realiza a partir de evaluaciones estadísticas, para esto es clave tener una serie de datos o variable influyentes en el calculo de la variable a calcular o estimar.

GRADIENTE: Es la variación de una magnitud en función de la distancia, a partir de variaciones máximas sobre las magnitudes, donde cada valor es diferente a los múltiples puntos de evaluación de dicha función.

ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR: Es la expresión numérica adimensional, el cual es resultado de una división directa del área de las hojas de un cualquier cultivo y el área del suelo sobre el que se encuentra desarrollada dicha plantación. Las unidades de medida son metros cuadrados.

MODELO DIGITAL DE ELEVACIÓN: Estructura de datos de tipo numérico que representa la distribución espacial de las elevaciones de la superficie terrestre. El valor o unidad de información de un MDE es un valor (z) denominado como elevación, esto acompañado de un sistema de coordenadas expresados por valor x, y. (Instituto Geográfico Agustín Codazzi - IGAC, 2014)

MORFOLOGÍA: La morfología de los suelos es una descripción o estudio del tamaño, la forma, interrelación o disposición de sus respectivos componentes. Además de la descripción de color, consistencia y estructura con respecto con el paisaje. (Departamento de Ambiente y Recursos Naturales, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, 2019)

NECROSOMA: Es la materia orgánica muerta de un sistema u organismo, donde es expresada por el peso que tiene. (Real Academia de Ingeniería, 2021)

PARCELACIÓN: Es la división de terrenos es una o más nuevas unidades de terreno independientes. Dicha división normalmente se realiza por tema de desarrollo urbanístico.

REFLECTANCIA: Es el fenómeno en que un espectro de luz es reflejado por la superficie de un objeto. Los materiales de los objetos hacen depender los grados de emisión y absorción de energía, esto dependiendo de los rangos luminosos del espectro electromagnético.

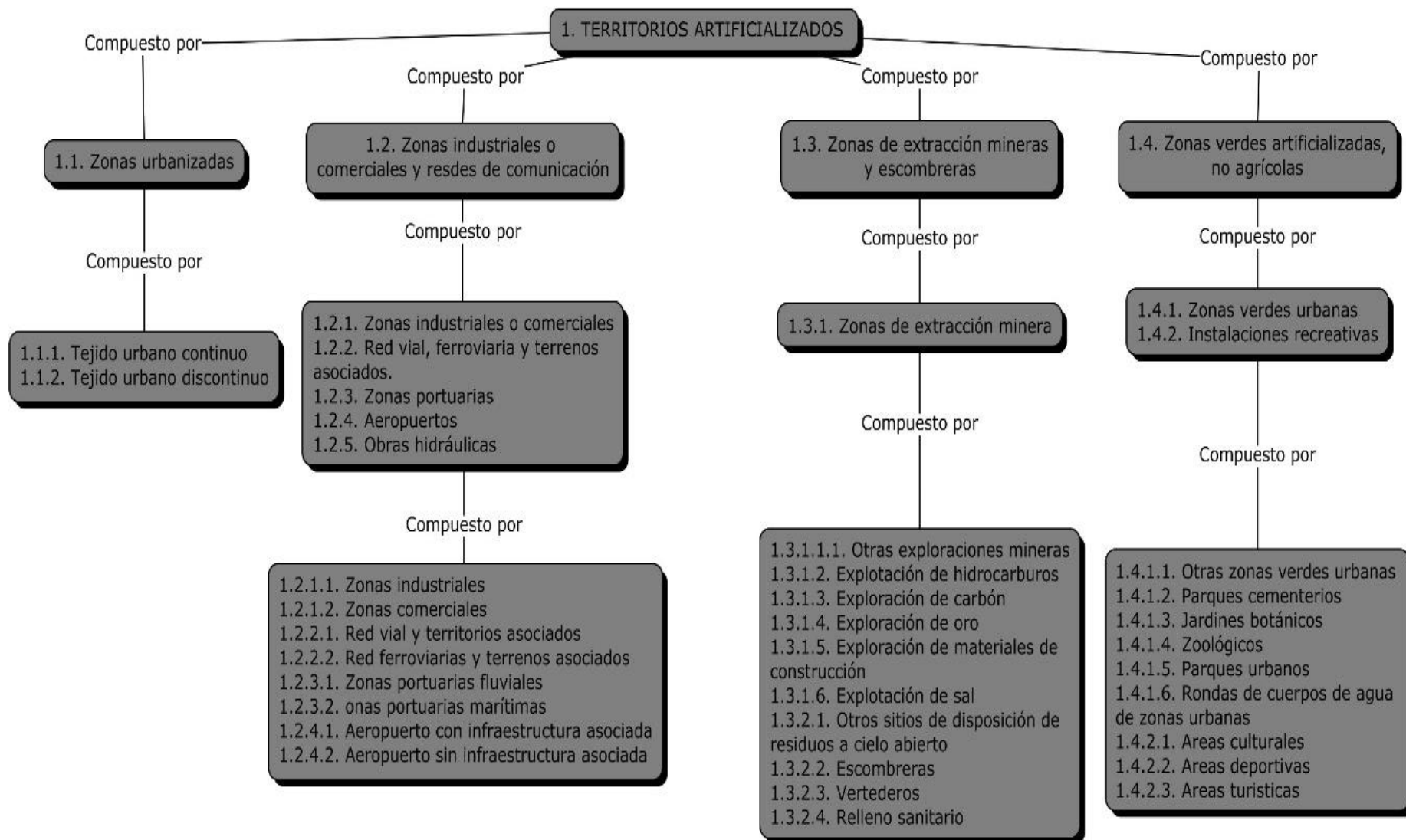
REFERENCIAS

- Acosta, M., Vargas, J., Velázquez, A., & Etchevers, J. (2002). Estimación de la biomasa aérea mediante el uso de relaciones alométricas en seis especies arbóreas en Oaxaca, México. *Agrociencia*, 725-736.
- Anaya, J., Chuvieco, E., & Palacios, A. (2010). Método basado en teledetección para estimar la emisión de gases efecto invernadero por quema de biomasa. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 13-18.
- Araujo, T., & Higuchi, N. d. (1999). Compararison of formulae for biomass content determination in a tropical rain forest in the state of Pará, Brazil. *Forest Ecology and Management*, 43-52.
- Arenas, D. (2014). *Patrones coberturas de la tierra escala 1:25.000 en los páramos priorizados proyecto fondo adaptación (Metodología Corine Land Cover adaptada para Colombia*. Bogotá D.C.
- Arnáiz, C., Isac, L., & Julián, L. (2000). Determinación de la biomasa en procesos biológicos. *Tecnología del agua - Artículos Técnico*, 45-52.
- Baridón, E. (2019). *Apunte de edafología, curso edafología Departamento de Ambiente y Recursos Naturales, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales- Morfología del suelo*.
- Bosque, J., & Garcia, R. (2000). El uso de los sistemas de información geográfica en la planificación territorial. *Anales de Geografía de la Universidad Complutense*, 49-67.
- Brown, S., & Cannell, M. (1996). Management of Forest for Mitigation of Greenhouse Gas Emissions. *Commonwealth Forestry Review*.
- C2, R. (8 de Junio de 2016). *Revista Ciencia y Cultura*. Obtenido de <https://www.revistac2.com/el-numero-e/?print-posts=pdf>
- Camacho, J., Jaun, J., Pineda, N., Cadena, E., Bravo, L., & Sanchez, M. (2015). Cambios de cobertura/uso del suelo en una porción de la Zona de Transición Mexicana de Montaña. *Madera y Bosques*, 93-112.
- Candel, M. (2019). *EL FUTURO DE LAS TECNOLOGÍAS DE BIOMASA CON CAPTURA DE CO2 EN LA UNIÓN EUROPEA*. Sevilla: Departamento de Ingeniería Energética Escuela Técnica Superior de Ingeniería Universidad de Sevilla. Recuperado el 24 de Noviembre de 2020, de <https://idus.us.es/bitstream/handle/11441/93421/TFG-2308-CANDEL.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Chávez, E., Paz, F., & Bolaños, M. (2017). Estimación de biomasa y cobertura aérea usando radiometría e imágenes digitales a nivel de campo en pastizales y matorrales. *Terra Latinoamericana*, 247-257.
- Corporación Autónoma Regional del Alto Magdalena CAM. (2007). *Plan de Ordenación y Manejo Cuenca Hidrográfica Del Río Las Ceibas*. Neiva - Huila: Roa Impresiones.
- Departamento de Ambiente y Recursos Naturales, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales. (2019). *Apunte de Edafología*. Obtenido de https://aulavirtual.agro.unlp.edu.ar/pluginfile.php/42968/mod_resource/content/1/TEMA%20%20MORFOLOG%C3%8DA%2026-03-

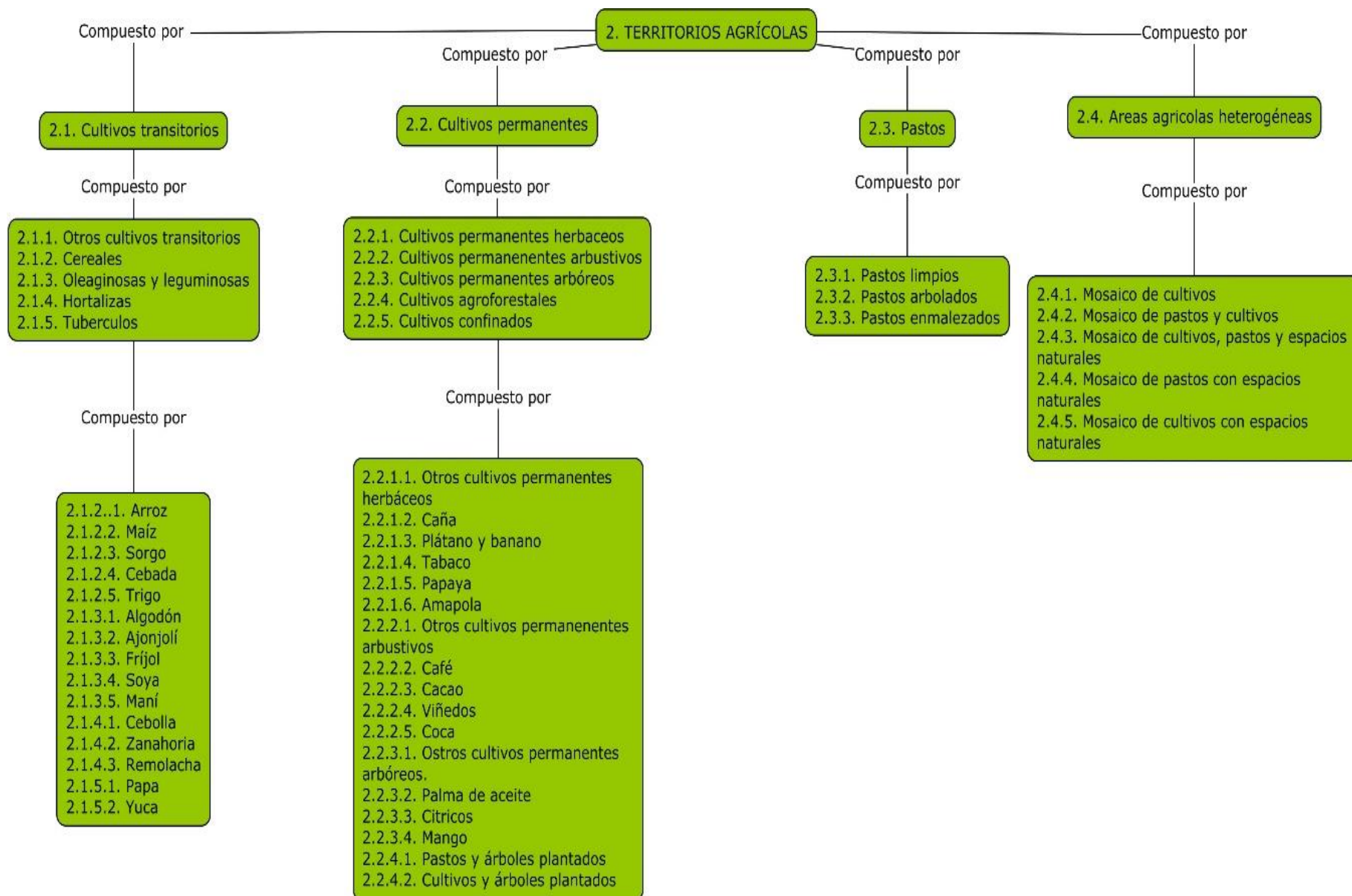
- 19.pdf#:~:text=La%20morfolog%C3%ADa%20de%20suelos%20es,%2C%20consistencia%2C%20estructura%2C%20etc.
- ESRI. (s.f.). *ArcGIS for Desktop*. Obtenido de ArcMAP: <https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/manage-data/raster-and-images/ndvi-function.htm>
- Fernandez, H. (Mayo de 2004). *Producción - Animal*. Obtenido de http://www.produccion-animal.com.ar/produccion_y_manejo_pasturas/pastoreo%20sistemas/41-disponibilidad.pdf
- Fonseca, W. (2017). Revisión de métodos para el monitoreo de biomasa y carbono vegetal en ecosistemas forestales tropicales. *Revista de Ciencias Ambientales Tropical Journal of Environmental Sciences*, 90-109.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi - IGAC. (Abril de 2014). Metodología para la clasificación de las tierras por su capacidad de uso. *Metodología para la clasificación de las tierras por su capacidad de uso*. Bogotá D.C., Colombia.
- Lambin, E., Turner, B., & H, G. (2001). The causes of land use and landcoverchange: moving beyond the myths. *Global Evironmental Change*, 261-269.
- Lillesand, T., Kiefer, R., & Chipman, J. (2004). *Remote Sensing and Image Interpretation*.
- Luque, J. (2012). Espectro electromagnético y espectro radioeléctrico. *Autores científico - técnicos y académicos*, 17-31.
- MacDicken, K. (1997). *A Guide to Monitoring Carbon Storage in Forestry and Agroforestry Projects*. Winrock International Institute for Agricultural Development.
- Medina, G., Gutiérrez, R., Echavarría, F., Amador, M., & Ruiz, A. (Mayo de 2009). *Estimación de la producción de forraje con imágenes de satélite en los pastizales de Zacatecas*. Téc Pecu Mex. Recuperado el 9 de Enero de 2021, de https://www.researchgate.net/publication/28266604_Estimacion_de_la_produccion_de_forraje_con_imagenes_de_satelite_en_los_pastizales_de_Zacatecas
- Ministerio de Ambiente. (2014). *Guía Técnica para la Formulación de los Planes de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas POMCAS*. Bogotá.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2 de Agosto de 2012). Decreto 1640 de 2012. *Decreto número 1640 2 ago 2012*. Bogotá, Colombia.
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2010). *Leyenda Nacional de Coberturas de la Tierra, Metodología CORINE LAND COVER Adaptada para Colombia a escala 1:10000*. Bogotá.
- Paez, R. (2017). *Componente de suelos Río Ceibas y Loro*. Bogotá.
- Paz, F., Palacios, E., Bolaños, M., Palacios, L., Martinez, M., Mejia, E., & Huete, A. (2007). Diseño de un índice espectral de la vegetación: NDVIcp. *Agrociencia*, 539-554.
- Picard, N., Laurent, S.-A., & Henry, M. (2012). *Manual de construcción de ecuaciones alométricas para estimar el volumen y la biomasa de los árboles del trabajo de campo a la predicción*. Roma;Montpellier.
- Quiceno, N., Tangarife, G., & Álvarez, R. (2016). Estimación del contenido de biomasa, fijación de carbono y servicios ambientales, en un área de bosque primario en el Resguardo Indígena Piapoco Chigüiro-Chátare de Barrancominas, Departamento del Guanía (Colombia). *Luna Azul*, 171-202.

- Real Academia de Ingeniería. (21 de Marzo de 2021). *Real Academia de Ingeniería*. Obtenido de <http://diccionario.raing.es/es/lema/necromasa#:~:text=Definici%C3%B3n%3A,o%20sistema%2C%20expresada%20en%20peso>.
- Reese, H., Nilson, M., T, P., Hagner, O., Joyce, S., Tingelof, U., . . . Olsson, H. (2003). Countrywide estimates of forest variables using satellite data and field data from the National Forest Inventory. *AMBIO*, 542-548.
- Rodriguez, A. (2005). *Manual para el manejo y procesamiento de imágenes satelitales obtenidas del sensor MODIS de la NASA, aplicado en estudios de ingeniería civil*. Bogotá.
- Rodriguez, N. (2013). *Guía para la cuantificación de la biomasa y el carbono forestal, generación de modelos y uso de herramientas para su estimación*. Bogotá D.C.
- Salvador, A. (2010). Aprovechamiento de la biomasa como fuente de energía alternativa a los combustibles fósiles. *R.Acad.Cien.Exact.Fis.Nat, CIV*, 331-345. Recuperado el 27 de Noviembre de 2020, de <https://rac.es/ficheros/doc/00979.pdf>
- Segemar. (s.f.). *Segemar*. Obtenido de Sensores Remotos - Conceptos Básicos: <http://www.segemar.gov.ar/igrm/sensores-remotos/>
- Vargas, V. (2007). Estadística descriptiva para ingeniería ambiental con SPSS. En V. Vargas, *Estadística Descriptiva para ingeniería ambiental con SPSS* (págs. 123-194). Bogotá D.C. Colombia.
- Zuñiga, H. (2000). *Hagamos el ordenamiento territorial del sector rural de nuestro municipio*. Bogotá: Publicaciones Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

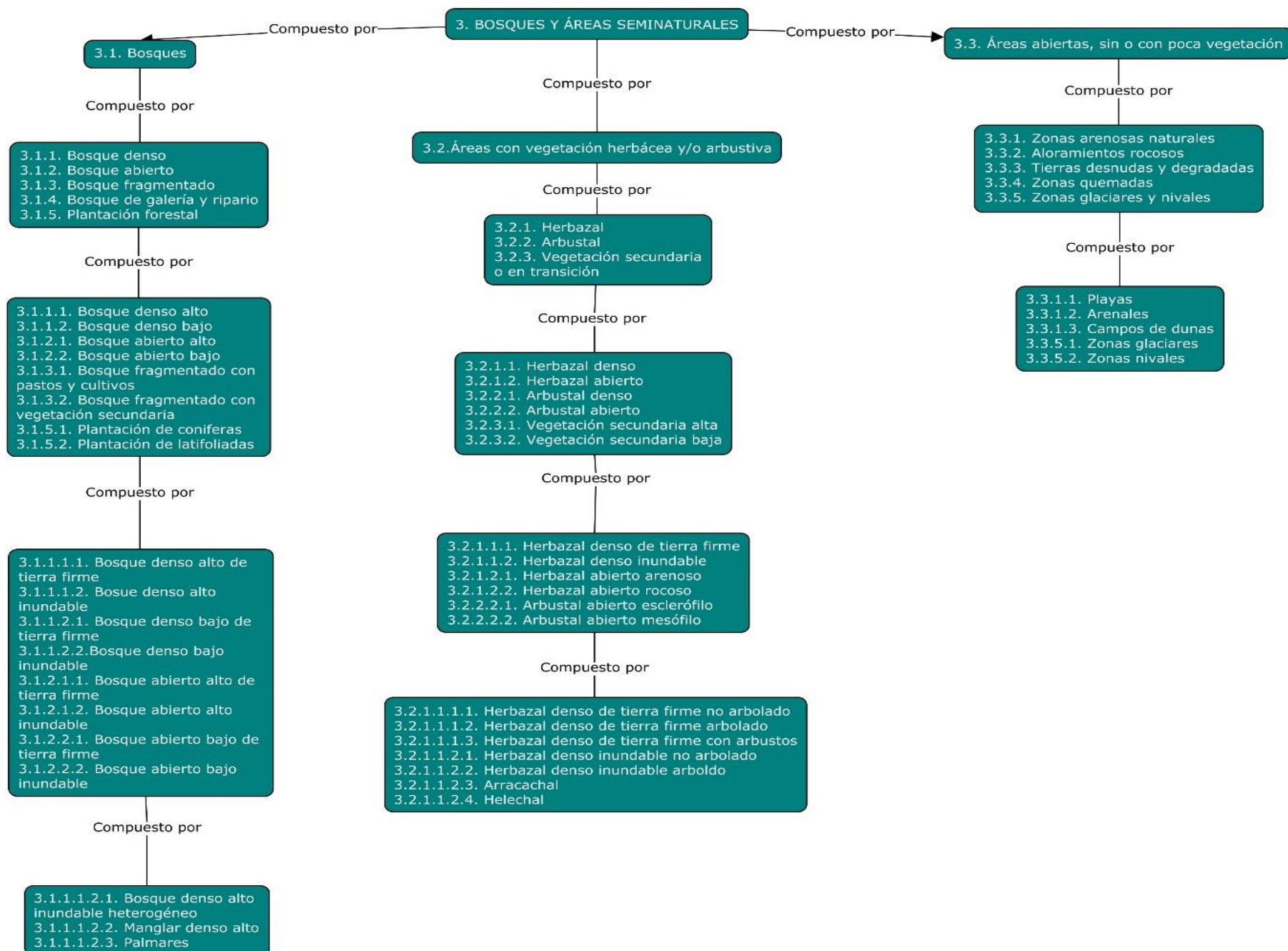
ANEXO 1 – LEYENDA CORINE LAND COVER



ANEXO 1 – LEYENDA CORINE LAND COVER



ANEXO 1 – LEYENDA CORINE LAND COVER



ANEXO 1 – LEYENDA CORINE LAND COVER

