



**Estimación de biomasa de la especie Polylepis SP en la Reserva Ecológica El Ángel,
mediante imágenes satelitales Sentinel para su conservación**

Jácome Báez, Silvia Mishell

Departamento de Ciencias de la Tierra y de la Construcción

Carrera de Ingeniería Geográfica y Medio Ambiente

Trabajo de titulación, previo a la obtención del título de Ingeniera Geógrafa y Medio Ambiente

PHD. Padilla Almeida, Oswaldo Vinicio

9 de septiembre del 2020



Urkund Analysis Result

Analysed Document: tesis_Jacome Mishell.pdf (D112038536)
 Submitted: 9/3/2021 7:33:00 PM
 Submitted By: mv.garcia@uta.edu.ec
 Significance: 8 %

Oswaldo
 Padilla
 Almeida

Firmado digitalmente por Oswaldo
 Padilla Almeida
 Nombre de reconocimiento (DN):
 cn=Oswaldo Padilla Almeida,
 o=Universidad de las Fuerzas Armadas
 ESPE, ou=Departamento de Ciencias
 de la Tierra y de la Construcción,
 email=ospadilla@espe.edu.ec, c=EC
 Fecha: 2021.09.03 15:10:57 -0500'

Sources included in the report:

UNIDO - copia.docx (D26104197)
 9_ESPE_NOX_SAT_JULIO2017-CORRV1_CA_28_08_LIZBETH JIMENEZ_MSGA.docx (D30405105)
 TESIS_BIOMASA_LILIANA_GUASCAL.docx (D35171629)
 1bc570f7fba2506a088bce59480ad2158b6d6285.pdf (D75182259)
<https://es.calameo.com/books/0005050546a5c03432492>
<http://eprints.uanl.mx/4359/1/1080253734.pdf>
https://www.researchgate.net/publication/329153698_Estimacion_de_Biomasa_Aerea_y_Carbono_con_Teledeteccion_en_Bosques_Alto-Andinos_de_Boyaca_Colombia_Estudio_de_caso_Santuario_de_Fauna_y_Flora_Iguaque
<https://www.slideshare.net/javi1651/teledeteccion-espacial>
<https://idoc.pub/documents/teledeteccionpdf-d4pqzm9z7rnp>
https://207.249.117.34/jspui/bitstream/1003/1179/1/PCB_RN_M_Tesis_2018_Reyes_Gabriela.pdf
http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/34487/Documento_completo.pdf%3Fsequence%3D1
<https://1library.co/document/y4wxperq-identificacion-especie-polylepis-reticulata-mediante-teledeteccion-andinas-ecuador.html>
<https://core.ac.uk/download/pdf/33104782.pdf>
<https://journal.espe.edu.ec/ojs/index.php/revista-geoespacial/article/download/1264/936>

Instances where selected sources appear:

49

Oswaldo
 Padilla
 Almeida

Firmado digitalmente por Oswaldo
 Padilla Almeida
 Nombre de reconocimiento (DN):
 cn=Oswaldo Padilla Almeida,
 o=Universidad de las Fuerzas Armadas
 ESPE, ou=Departamento de Ciencias de
 la Tierra y de la Construcción,
 email=ospadilla@espe.edu.ec, c=EC
 Fecha: 2021.09.03 15:11:12 -0500'



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y DE LA CONSTRUCCIÓN
CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO AMBIENTE

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, "Estimación de biomasa de la especie *Polylepis* SP en la Reserva Ecológica El Ángel, mediante imágenes satelitales Sentinel para su conservación" fue realizado por la señorita Jácome Báez, Silvia Mishell el cual ha sido revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 26 agosto del 2021

Oswaldo
Padilla
Almeida

PHD. Padilla Almeida, Oswaldo Vinicio

C. C. 1709776650

Firmado digitalmente por Oswaldo Padilla Almeida
Nombre de reconocimiento (DN):
cn=Oswaldo Padilla Almeida, o=Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, ou=Departamento de Ciencias de la Tierra y de la Construcción,
email=ovpadilla@espe.edu.ec, c=EC
Fecha: 2021.08.16 09:30:04 -0500'



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y DE LA CONSTRUCCIÓN
CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO AMBIENTE

RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA

Yo Jácome Báez, Silvia Mishell, con cédula de ciudadanía n°1722213061 declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **"Estimación de biomasa de la especie Polylepis SP en la Reserva Ecológica El Ángel, mediante imágenes satelitales Sentinel para su conservación"**, es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teórico, científicos, técnicos, y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Sangolquí, 26 de agosto del 2021

Firma

Jácome Báez, Silvia Mishell

C.C.: 1722213061



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y DE LA CONSTRUCCIÓN
CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO AMBIENTE

AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN

Yo, Jácome Báez, Silvia Mishell, con cédula de ciudadanía n°1722213061 autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **“Estimación de biomasa de la especie Polylepis SP en la Reserva Ecológica El Ángel, mediante imágenes satelitales Sentinel para su conservación”**, en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

Sangolquí, 26 de agosto del 2021

Firma


.....
Jácome Báez, Silvia Mishell

1722213061

Dedicatoria

Este trabajo lo dedico principalmente a mi abuelo José Miguel Báez Vera, un hombre que deja en mí los mejores recuerdos y la infancia más hermosa, con grandes enseñanzas y con todo el amor que puede dar un abuelo a su nieta.

A mis padres Silvia Báez y César Jácome, por inculcarme valores como la honestidad, responsabilidad y perseverancia, a nunca rendirme a pesar de las adversidades para cumplir mis metas.

A mi hermana Erika Jácome, mi futuro sobrino y mi cuñado Santiago Oña, por su eterno apoyo en lo personal, por sus palabras de aliento y su cariño.

A mis amigos Michelle, David, Daniel, Antonella, Paola y al “Cuartel” quienes me brindaron su cariño y amistad incondicional, que la vida les llene de alegrías y cumplamos nuestros sueños.

Agradecimiento

Agradezco principalmente a Dios por darme la perseverancia para culminar con este proyecto y por haber sido el pilar en cada decisión tomada en mi vida.

Un eterno agradecimiento al Ministerio del Medio Ambiente de la Reserva Ecológica El Ángel por su gran acogida a este proyecto, por su apoyo con personas que llegaron a ser grandes amigos.

A mis familiares Vicente Carrera y Verónica Tucanes por abrirme las puertas de su hogar para realizar este proyecto.

A mi tutor Dr. Oswaldo Padilla por su colaboración, paciencia y apoyo en el desarrollo de este proyecto y a lo largo de la carrera, al Dr. Fabián Rodríguez por su orientación y ayuda en el desarrollo de mi tesis, al Ing. Luna y Crnl. Rodolfo Salazar. A los profesores de la Carrera de Ingeniería Geográfica y del Medio Ambiente por brindarme su conocimiento y su calidad de persona.

Urkund.....	2
Certificado del director del trabajo de titulación	3
Responsabilidad de Autoría	4
Autorización de Publicación	5
Dedicatoria	6
Agradecimiento.....	7
RESUMEN	15
ABSTRACT	16
CAPITULO I.....	17
Generalidades	17
Planteamiento de problema	18
Justificación e importancia	19
Objetivos.....	20
Objetivo General.....	20
Objetivos específicos.....	20
Metas del proyecto	20
CAPITULO II.....	21
Marco Teórico.....	21
Métodos de estimación de Biomasa Forestal.....	30
Estimación de Biomasa mediante ecuaciones alométricas	33
Marco Legal.....	34
Tratados Internacionales	34
Leyes.....	35
Ordenanzas	36

Decretos ejecutivos	36
Acuerdos ministeriales.....	37
CAPITULO III.....	38
METODOLOGIA.....	38
Descripción del área de estudio.....	39
Propiedades colectivas o comunitarias.	41
Fase 1: Recolección de información geoespacial	42
Modelo Digital del terreno	43
Generación de la Geodatabase	46
Fase 2: Procesamiento de información geoespacial.....	50
Correcciones de una imagen satelital	50
Niveles de Procesamiento.....	50
Corrección Radiométrica.	51
Corrección Geométrica.....	51
Corrección atmosférica.....	52
Corrección topográfica.....	54
Índices de Vegetación	57
Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI).	58
Índice de vegetación de diferencia normalizadas verde (GNDVI).	59
Estimación de Biomasa aérea.....	61
Cálculo del índice de Vegetación Normalizado para estimación de biomasa (NDVI).	61
Cálculo del Índice de vegetación de diferencia normalizadas verde para la estimación de biomasa (GNDVI).....	62
Clasificación de imágenes satelitales	62

	10
Clasificación Supervisada.....	62
Clasificación no supervisada.	63
“Inicialización.	63
“Asignación objetos a los centroides.	64
Actualización centroides.....	64
Fase 3 (Recopilación de datos para inventario forestal)	66
Toma de muestras.....	66
Intensidad de muestreo en campo	68
Toma de puntos	70
Recolección de información en campo para la estimación de biomasa	71
Tipos de muestreo de vegetación	72
Distanciamiento entre parcelas	78
Fase 4 (Estimación de biomasa forestal mediante ecuaciones alométricas) ..	79
Estimación de la biomasa área	79
Fase 5 (Estimación de biomasa forestal mediante índices de vegetación)	80
Ecuación de correlación	80
Biomasa aérea total.....	81
Fase 6 (Comparación y validación de resultados)	82
CAPITULO IV	83
Análisis y discusión de los resultados	83
Identificación de Coberturas Vegetales	83
Clasificación No Supervisada	86
Índice de Vegetación NDVI	88
Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada Verde (GNDVI).....	90

Identificación de parches de bosque Polylepsis en la Reserva Ecológica El Ángel	92
Biomasa aérea del bosque Polylepsis Sp en la REEA	93
Biomasa aérea total	102
CAPITULO V	104
Conclusiones y Recomendaciones	104
Conclusiones	104
Recomendaciones	106
Bibliografía	106
Anexos	114

Índices de Tablas

Tabla 1 Resumen de bandas espectrales en micrómetros y sus aplicaciones	23
Tabla 2 Característica imagen sentinel-2	25
Tabla 3 Combinación de cañones para imágenes Sentinel 2	27
Tabla 4 Clasificación de los métodos de estimación de biomasa forestal.....	31
Tabla 5 Tratados internacionales ratificados por el estado ecuatoriano, aplicables para la REEA	34
Tabla 6 Leyes aplicables a la administración de las áreas protegidas	35
Tabla 7 Artículos 1 del decreto 1815 y artículo 2 del decreto 985	36
Tabla 8 Tabla de coberturas para la geodatabase.....	48
Tabla 9 Clasificación de los valores de NDVI.....	59
Tabla 10 Fórmulas de índices de vegetación	60
Tabla 11 Tipos de muestreo	66
Tabla 12 Intensidad de muestreo	68
Tabla 13 Puntos de muestreo	70

Tabla 14	Datos promedio de los parches Polylepiss.....	79
Tabla 15	Bondad de ajuste en función del valor.....	82
Tabla 16	Cobertura vegetal de la REEA en el periodo 2013-2020	83
Tabla 17	Validación de píxeles en software ENVI con licencia	84
Tabla 18	Hectáreas por año de parches de Polylepiss sp.	87
Tabla 19	Escala de valores de NDVI	89
Tabla 20	Escala de valores obtenidos de GNDVI.....	91
Tabla 21	Datos recolectados en campo para la especie Polylepiss sp.	93
Tabla 22	Biomasa por parche de bosque Polylepiss SP en la Reserva Ecológica El Ángel.....	95
Tabla 23	Datos de Biomasa por año con el índice NDVI de cada parche en la REEA.....	95
Tabla 24	Datos de Biomasa por año con el índice GNDVI de cada parche en la REEA.....	97
Tabla 25	Ecuaciones de regresión lineal con el índice NDVI.....	99
Tabla 26	Ecuaciones de regresión lineal con el índice GNDVI.....	100
Tabla 27	Ecuación de regresión para la estimación de biomasa de Polylepiss con el índice NDVI en el año 2017.	100
Tabla 28	Ecuación de regresión para la estimación de biomasa de Polylepiss con el índice GNDVI en el año 2017.....	101
Tabla 29	Tabla de estimación de biomasa entre muestreo, NDVI y GNDVI	103
Tabla 30	Correlación entre metodologías de estimación de biomasa.	104

Índices de Figuras

Figura 1	Espectro electromagnético	22
Figura 2	Bandas del satélite Sentinel 2.....	26

Figura 3 Biomasa forestal de un árbol	28
Figura 4 Metodología para estimación de biomasa en la REEA.....	38
Figura 5 Mapa de ubicación de la Reserva Ecológica El Ángel.....	39
Figura 6 Mapa de tenencia de la tierra de la REEA	41
Figura 7 Búsqueda de imágenes satelitales	42
Figura 8 Modelo digital del terreno (MDT)	43
Figura 9 Mapa de pendientes de la Reserva Ecológica El Ángel	44
Figura 10 Mapa de sombras de la Reserva Ecológica El Ángel.....	45
Figura 11 Modelo cartográfico de la base de datos	46
Figura 12 Geodatabase de la Reserva Ecológica El Ángel.....	48
Figura 13 Corrección atmosférica.....	54
Figura 14 Corrección topográfica	55
Figura 15 Corrección topográfica.	57
Figura 16 Modelo cartográfico de Índices de vegetación	60
Figura 17 Calculo de índices de vegetación.	61
Figura 18 Clasificación supervisada.....	63
Figura 19 Clasificación No Supervisada.....	65
Figura 20 Ejemplos de muestreo.....	67
Figura 21 Formato de hoja de campo	68
Figura 22 Ubicación de muestras realizadas en campo.	69
Figura 23 Toma de puntos con navegador GPS.....	70
Figura 24 Ejemplo de transecto variable	73
Figura 25 Ubicación de parcelas	75
Figura 26 Medidas de DAP en los tipos de pie	76
Figura 27 Establecimientos de parcelas.....	77
Figura 28 Toma de medida de diámetro de altura de pecho.....	78

Figura 29	Coberturas vegetales dentro de la REEA.....	81
Figura 30	Clasificación de Coberturas Vegetales de la REEA en el año 2013.....	85
Figura 31	Clasificación de Coberturas Vegetales de la REEA en el periodo 2020.....	86
Figura 32	Índices de Vegetación Normalizado.....	88
Figura 33	Comparación de valores máximos y mínimos de NDVI	89
Figura 34	Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada Verde	90
Figura 35	Comparación de valores máximos y mínimos de GNDVI	92
Figura 36	Parches de Bosque Polylepis en la Reserva Ecológica El Ángel	92
Figura 37	Gráfico de tendencia de los niveles digitales de NDVI 2017-2020	96
Figura 38	Gráfico de tendencia de los niveles digitales de NDVI 2017-2020	98
Figura 39	Gráfico de comparación de metodologías de estimación de biomasa.....	103

RESUMEN

El presente proyecto se desarrolló en la Reserva Ecológica El Ángel (REEA), cantón Espejo, provincia del Carchi, con el objetivo de estimar la biomasa total del bosque altoandino *Polylepis* sp. Como objetivos fue el comparar la biomasa obtenida mediante ecuaciones alométricas con la biomasa obtenida mediante imágenes satelitales Sentinel 2; para ello se realizó un muestreo de parcelas en transectos variables de forma circular, tomando datos de (DAP) diámetro a nivel de pecho y altura de cada árbol. Para determinar la biomasa aérea se utilizó la ecuación alométrica de Zapana. A través de las imágenes Sentinel 2 del año 2017 al 2020 se logró realizar el cálculo de índices de vegetación como el NDVI (índice de vegetación normalizado) y GNDVI (Índice de vegetación de diferencia normalizadas verde), estas ecuaciones obtenidas tienen como variable independiente a los ND del índice (NDVI) y los índices (GNDVI). El índice de vegetación más adecuado para la estimación de biomasa se obtuvo mediante el coeficiente de correlación entre la biomasa obtenida de las ecuaciones alométricas y la biomasa obtenida de cada índice de vegetación. Es así que se estimó la biomasa de los dos métodos obteniendo, una biomasa de 5704,79 ton/ha mediante el muestreo de parcelas y las ecuaciones alométricas al año 2020; mientras que mediante el índice NDVI se obtuvo una biomasa de 5864,411 ton/ha y con el índice GNDVI una biomasa de 6054,05 ton/ha. De igual manera se estimó en los años previos con un notable crecimiento de la biomasa por año. El índice de vegetación más adecuado para la estimación de la biomasa de esta especie fue el NDVI obteniendo una alta correlación de 0,99677

Palabras clave:

- BIOMASA
- ÍNDICES DE VEGETACIÓN
- ECUACIONES ALOMÉTRICAS

ABSTRACT

This project was developed in the *El Ángel* Ecological Reserve (REEA), *Espejo* town, *Carchi* province, with the objective of estimating the total biomass of the high Andean Forest *Polylepis* sp. The objectives were to compare the biomass obtained through allometric equations with the biomass obtained through Sentinel 2 satellite images; For this, a sampling of plots in variable circular transects was carried out, taking data of (DBH) diameter at chest level and height of each tree.

In order to determine the aerial biomass, The Zapana allometric equation was used. Through the Sentinel 2 images from 2017 to 2020, it was possible to calculate vegetation indices such as the NDVI (normalized vegetation index) and GNDVI (green normalized difference vegetation index), these equations have as independent variable the ND of the index (NDVI) and the ND of the index (GNDVI). To find the most suitable vegetation index for estimating biomass, a correlation coefficient was performed between the biomass obtained from the allometric equations and the biomass obtained from each vegetation index. (GNDVI). In this way, the biomass of the two methods was estimated, obtaining a biomass of 5704.79 ton/ha through the sampling of plots and the allometric equations to the year 2020; while through the NDVI index a biomass of 5864.411 ton / ha was obtained and with the GNDVI index a biomass of 6054.05 ton /ha. Similarly, it has been estimated in previous years with a notable growth in biomass per year. The most suitable vegetation index for estimating the biomass of this species was the NDVI, obtaining a high correlation of 0.99677.

Keywords:

- **BIOMASS**
- **VEGETATION INDICES**
- **ALLOMETRIC EQUATIONS**

CAPITULO I

Generalidades

Antecedentes

El Ecuador cuenta con 1'258.500 ha de páramos (Robayo & Cepeda, 2001) ecosistema altamente frágil y amenazado por la expansión demográfica.

Dentro de la cual existe la Reserva Ecológica El Ángel declarado sitio Ramsar que abarca un área de 17.002,70 ha, que contiene en su totalidad la superficie de la REEA más el área de las Lagunas Verdes. (Secretaría de la Convención de Ramsar, 2013)

Este ecosistema es de gran importancia ya que proveen servicios ecosistémico como: recursos hídricos de calidad y sumideros de carbono que juegan un papel importante en la regulación del mismo y en la mitigación del cambio climático. (Perea, 2018)

Según Rodríguez, Wheeler, Louis, Tansey y Balzter, (2017) el carbono se almacena en mayor cantidad en la biomasa aérea de los árboles mediante fotosíntesis, siendo sumamente importante el monitoreo de la biomasa aérea de los bosques para comprender el ciclo del carbono y reducir las emisiones de CO₂.

Según Houghton, Lawrence, Hackler y Brown, (2001) la biomasa forestal se puede cuantificar en campo con bajas incertidumbres, ya sea por el método de recolección de partes del árbol, o por un muestreo de parcelas, donde la biomasa del árbol es estimada por medio de mediciones de los atributos del árbol, como altura y diámetro a pecho (DAP) y ecuaciones alométricas.

No obstante, autores como, Phua y Saito (2003) mencionan que el muestreo directo en campo de la biomasa aérea puede ser más costoso, de un mayor tiempo y puede tener problemas según las condiciones del terreno.

Foody et al. (2001) menciona que “existe otros métodos para estimar y mapear la distribución de biomasa forestal a partir de datos de sensores remotos, siendo los índices de vegetación un método ampliamente utilizados que pueden ser aplicados a las

imágenes satelitales”, lo que asevera Córtes, Hernández, Valencia y Corvalán (2014) donde se “refieren a que la información proporcionada mediante sensores remotos admite utilizar la reflectancia e índices de vegetación para relacionarla con la biomasa aérea, además que algunas imágenes de sensores remotos son distribuidas gratuitamente”. Mohd Zaki & Abd Latif (2017) afirman que “existen varias imágenes satelitales de sensores pasivos multiespectrales de mediana y baja resolución como el Landsat, Sentinel, Aster y Modis que brindan varios enfoques y posibilidades para estimar la biomasa aérea y realizar un monitoreo forestal”.

*Con el avance de la tecnología en los últimos tiempos, los sensores remotos han sido de mucha importancia para estimar la biomasa aérea forestal, para una mejor gestión de los bosques naturales; en el desarrollo de este contexto se pretende en esta investigación estimar la biomasa aérea de la Reserva Ecológica El Ángel (REEA), lo cual ayude a establecer una línea base en la cuantificación de biomasa aérea de la especie *Polylepis* sp., los resultados servirán para investigaciones en el monitoreo y estimación de biomasa en los bosques de *Polylepis*.*

Planteamiento de problema

Para un mejor manejo de los recursos naturales del Estado Ecuatoriano debido a actividades de deforestación que amenazan los bosques y páramos; se busca ayudar con la toma de decisiones para evitar futuros daños con respecto a estos pisos climáticos

Se va estimar la biomasa aérea mediante sensores remotos que como menciona Córtes, Hernández, Valencia, y Corvalán (2014) utiliza la reflectancia del sensor, índices de vegetación y en conjunto con las ecuaciones alométricas llegar a estimar la biomasa aérea, sabiendo que es un método de menor costo y más eficiente, el cual será comparado con el método más utilizado trata de obtener información directamente en campo de la especie a muestrear.

Es así que mediante sensores satelitales se podría abarcar mayor superficie terrestre obteniendo el aporte ecosistémico de la biomasa y almacenamiento de carbono para poder conocer las consecuencias del cambio climático y poder proponer planes para su mitigación.

Justificación e importancia

Por causa de la deforestación amenazan los bosques y páramos. Es así que al año 2016 como menciona (Ministerio del Ambiente, 2015) existió una pérdida total de 64.074 ha de bosques dentro del territorio nacional alterando los ciclos hídricos, degradando suelos, aumentando la vulnerabilidad a los efectos del cambio climático y pérdida de biodiversidad.

El Ministerio del Ambiente (2014) revela que existe una pérdida 8.841 ha de Bosque siempre Verde Andino Montano correspondiente a bosques de páramos, estos tienen un rol muy importante en la mitigación del cambio climático, MAGAP (2019) explica que “por sus propiedades de captación y almacenamiento del carbono es preciso efectuar investigaciones sobre la biomasa que estimulen estudios bioclimáticos y acciones de conservación de ecosistemas”.

Así los sensores satelitales constituyen una fuente extensa de información que permite describir la superficie terrestre, los fenómenos que en ella se desarrollan y las interacciones de los seres humanos dentro de esta. Poseen una serie de ventajas entre las que se destacan el área de cobertura que abarcan, el corto tiempo en la adquisición de datos, existen sensores Multiespectrales que permiten la descripción de las diferentes coberturas del planeta de acuerdo a su respuesta en el espectro electromagnético además de que son independientes de las condiciones climáticas y de riesgos naturales o antropogénicos. (Bunge, 2001)

La Reserva Ecológica “El Ángel” fue declarada área protegida por varios motivos; entre ellos está el ser uno de los páramos en el Ecuador donde se encuentra la especie

arbórea Polylepis sp., una subespecie de planta endémica que habita en los páramos del Norte de Ecuador y Sur de Colombia. (Ministerio del Ambiente, 2015)

Objetivos

Objetivo General

Determinar la biomasa de la especie Polylepis SP en ton/ha localizado en la Reserva Ecológica El Ángel mediante imágenes satelitales, información geoespacial y muestreo en campo que sea apoyo para la toma de decisiones en el cuidado de este ecosistema.

Objetivos específicos

- *Realizar la clasificación supervisada de las imágenes satelitales obtenidas en diferentes años.*
- *Validar la clasificación de las imágenes satelitales mediante el software ENVI.*
- *Determinar el índice de vegetación más adecuado para estimación de biomasa de la especie Polylepis SP.*
- *Realizar un muestreo estratificado para la información dasométrica de la especie Polylepis SP de acuerdo a una planificación previa realizada.*
- *Calcular la biomasa mediante las ecuaciones alométricas con los datos obtenidos en campo.*
- *Determinar la correlación de la biomasa obtenida de las imágenes satelitales con las mediciones tomadas en campo.*
- *Estimar la pérdida de biomasa mediante álgebra de mapas entre imágenes desde el año 2017 al 2020 mediante técnicas multitemporal.*

Metas del proyecto

- *Un mapa a escala 1:50000 del tipo de vegetación presente en el área de estudio en donde se cuantifique la superficie de Polylepis SP.*
- *Reporte de la validación de la clasificación supervisada.*

- *Una Geodatabase con la información de campo.*
- *Un mapa de índices de vegetación escala 1:50000 para la estimación de la biomasa*
- *Un mapa del cálculo de biomasa mediante la información de campo.*
- *Dos mapas de la correlación entre la estimación de la biomasa por imágenes satelitales y el cálculo mediante las ecuaciones alométricas con información obtenida en campo.*
- *Mapa de la pérdida de biomasa.*

CAPITULO II

Marco Teórico

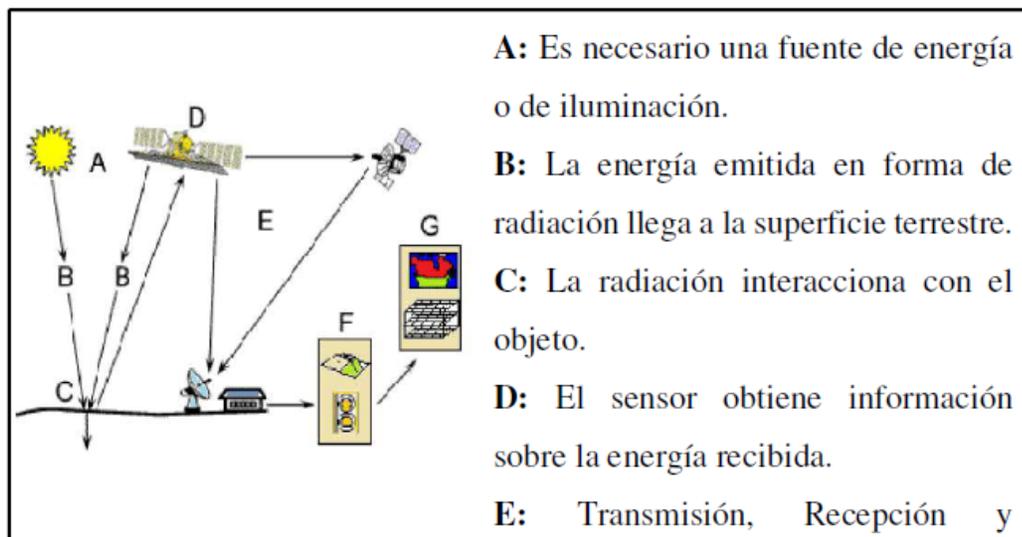
Las nuevas tecnologías geoespaciales constituyen una ciencia en creciente expansión, debido a su versatilidad en aplicaciones, para ámbitos distintos como el medio ambiente y los recursos naturales.

Por lo que se destaca que esta ciencia puede ser percibida por la población en múltiples campos: como la teledetección, satélites e imágenes satelitales capaces de estudiar la influencia del cambio climático en la disminución de bosque, contaminación del medio ambiente y pérdida de masas de agua, con las nuevas tendencias de análisis espacial.

Las tecnologías geoespaciales nos permiten obtener información de cualquier tipo de datos o fenómenos de investigación sin tener una relación directa con el objeto como lo menciona Lillesand & Kiefer (2004), es decir miden la radiación electromagnética que incide sobre los objetos que se reenvía al sensor como lo menciona Chuvieco (2008), esto conlleva a tener varios componentes que realizan un proceso de recolección de la información, como se muestra en la figura 1.

Figura 1

Componentes de un sistema de teledetección

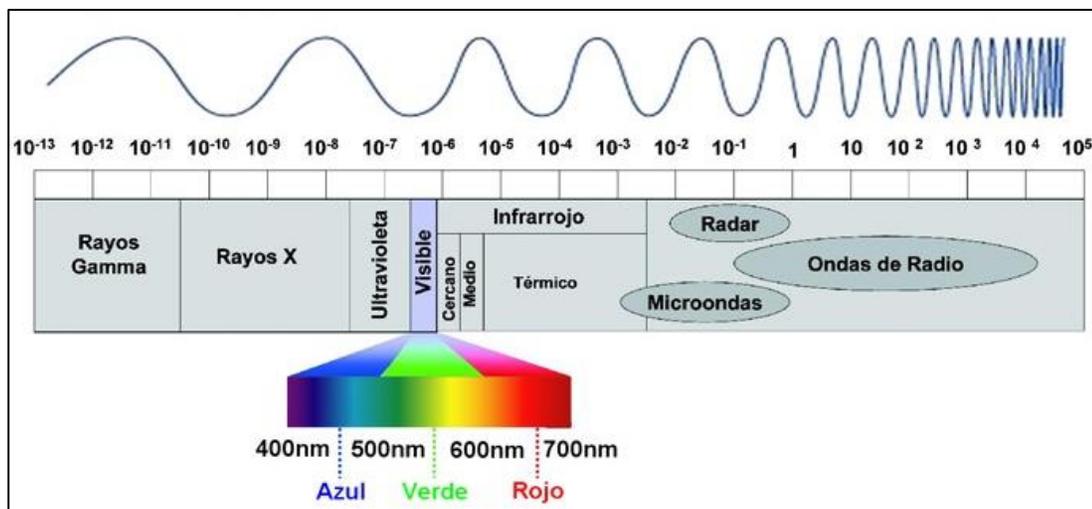


Nota. Proceso de recolección de información mediante teledetección. Tomado de "Análisis de la estimación de Biomasa Forestal mediante imágenes Radar y Vehículos Aéreos no tripulados- UAV del Parque Metropolitano de la Armenia, (p. 8), por Esther Guascal, Carrera de Ingeniería Geográfica y del Medio Ambiente".

Sánchez (2012) menciona que existen dos tipos de sensores, los sensores pasivos son aquellos que captan la radiación electromagnética la cual es transmitida de un lado a otro a la velocidad de la luz Chuvieco (2008) ya que esta es generada por un objeto externo a ellos como el sol, mientras que los sensores activos es el que emite la radiación electromagnética y es reflejada por sí mismo. El espectro electromagnético es el encargado de dividir la radiación electromagnética de la más baja longitud de onda a las ondas más grandes. En la figura 2, podemos observar el espectro visible y en la tabla 1 podemos observar la banda espectral y sus aplicaciones dentro del espectro electromagnético.

Figura 1

Espectro electromagnético



Nota. Espectro electromagnético con longitud de onda en metros. Tomado de “Coordinación de Universidad Abierta Innovación Educativa y Educación Distancia CUAIEED, 2020”.

Tabla 1

Resumen de bandas espectrales en micrómetros y sus aplicaciones

Banda Espectral	Longitud de Onda (μm)	Aplicación	
Espectro visible	Azul	0.4 – 0.5	Puede ser percibida por el ojo humano.
	Verde	0.5 – 0.6	
	Rojo	0.6 – 0.7	Es la razón de los colores primarios del espectro visible que permiten diferenciar: Suelo, agua, vegetación y nieve
Infrarrojo cercano	0.7 – 1.3	Puede detectarse mediante películas, discrimina coberturas vegetales y acumulación de humedad.	

Banda Espectral	Longitud de Onda (μm)	Aplicación
Infrarrojo medio (SWIR)	1.3 – 2.5	Este espectro se entremezclan los procesos de reflexión de luz solar y emisión de la superficie terrestre. Región idónea para estimar el contenido de humedad en la vegetación o los suelos
Infrarrojo Medio (IRM)	3 – 5	Discrimina los focos de alta temperatura como incendios y volcanes activos.
Infrarrojo Lejano o Térmico	8 – 14	Discrimina el calor proveniente de gran parte de la superficie terrestre
Microondas	Por encima de 1 mm a 1 m	De gran importancia por que es un tipo de energía transparente a la cubierta nubosa.

Nota. Se describe la aplicación más común de cada banda espectral. Tomado de “Análisis de la estimación de Biomasa Forestal mediante imágenes Radar y Vehículos Aéreos no tripulados- UAV del Parque Metropolitano de la Armenia, (p. 8), por Esther Guascal, Carrera de Ingeniería Geográfica y del Medio Ambiente”.

El principal insumo a ser utilizado en el presente proyecto son las imágenes satelitales Sentinel 2, Bravo (2017) menciona “que este sensor pasivo tiene un escáner multiespectral que permite obtener la información en las longitudes de onda visible e infrarrojos”, como se puede observar en la tabla 2, esto permitirá evaluar los cambios en la superficie terrestre y en la vegetación, para estar alerta a nivel del cambio climático.

Con una resolución de 10 metros en el presente proyecto utilizaremos las bandas multiespectrales 2, 3, 4 e infrarrojo cercano o banda 8, como podemos visualizarlo en la figura 3. (Bravo, 2017)

Este satélite pasivo es una misión de imágenes multiespectrales con alta resolución espacial, que gira en la órbita polar y tiene una constelación de dos satélites Sentinel 2A y 2B, estas grandes naves se encuentran a una altitud de 786 km, cubriendo la superficie terrestre, grandes islas, aguas continentales y costeras de la tierra, en un periodo de 5 días. (Bravo, 2017)

Tabla 2

Característica imagen sentinel-2

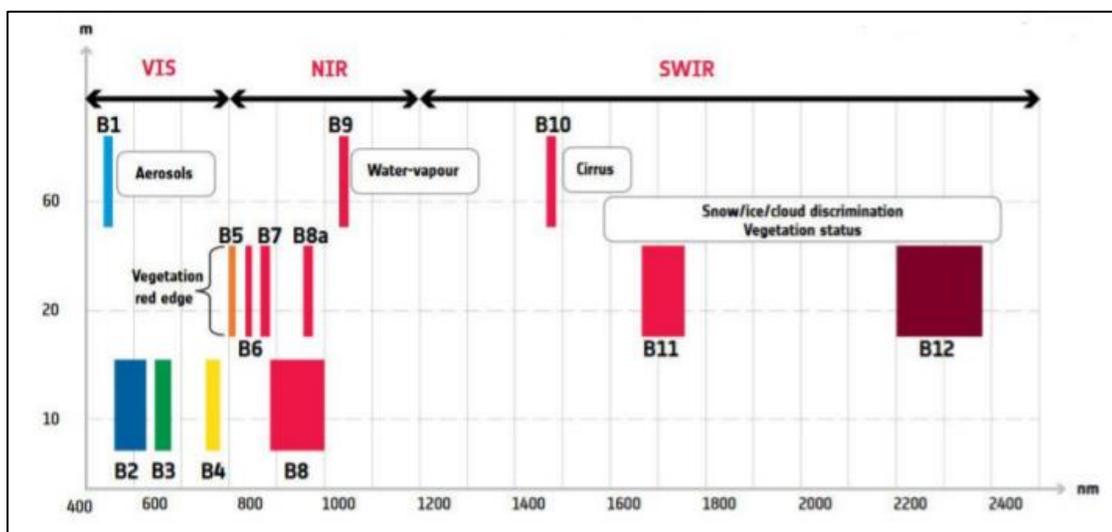
Bandas Sentinel- 2	Sensor	Longitud de Onda Central (μm)	Resolución (m)
Banda 1 – Costero / aerosol		0.443	60
Banda 2 – Azul		0.49	10
Banda 3 – Verde		0.56	10
Banda 4 – Rojo		0.665	10
Banda 5 - Visible e Infrarrojo Cercano (VNIR)		0.705	20
Banda 6 - Visible e Infrarrojo Cercano (VNIR)	VNIR	0.74	20
Banda 7 - Visible e Infrarrojo Cercano (VNIR)		0.783	20
Banda 8 - Visible e Infrarrojo Cercano (VNIR)		0.842	10

Bandas Sentinel- 2	Sensor	Longitud de Onda Central (μm)	Resolución (m)
Banda 8A - Visible e Infrarrojo Cercano (VNIR)		0.865	20
Banda 9 - Vapor de Agua Infrarroja (SWIR)		0.945	60
Banda 10 - Cirrus Infrarroja (SWIR)	SWIR	1.375	60
Banda 11 - Onda Corta Infrarroja (SWIR)		1.61	20
Banda 12 - Onda Corta Infrarroja (SWIR)		2.19	20

Nota. Las imágenes Sentinel-2 están disponibles gratuitamente desde el sitio web de la ESA. Tomado de (Bravo, 2017)

Figura 2

Bandas del satélite Sentinel 2



Nota. Bandas multispectrales satelitales de Sentinel 2. Tomado de (European Space Agency, 2017)

Dentro de las bandas multiespectrales se almacena información de distintas regiones del espectro electromagnético como lo menciona la Comisión Europea (2015), a su vez menciona que se utiliza cada canal del monitor para representar los niveles digitales de una banda y obtener la composición de color, estos datos multiespectrales se pueden representar por medio de la combinación de tres bandas. Es así que Copernicus (2018) indica que se puede visualizar los tres canales que incluyen tres bandas que ayudan a discriminar visualmente los elementos de interés, con mayor reflectividad y visualizaciones más estéticas.

La combinación de color para la designación de cada combinación puede variar dependiendo el autor, aun así Copernicus (2018) discrimina cada combinación como se muestra en la tabla 3.

Tabla 3

Combinación de cañones para imágenes Sentinel 2

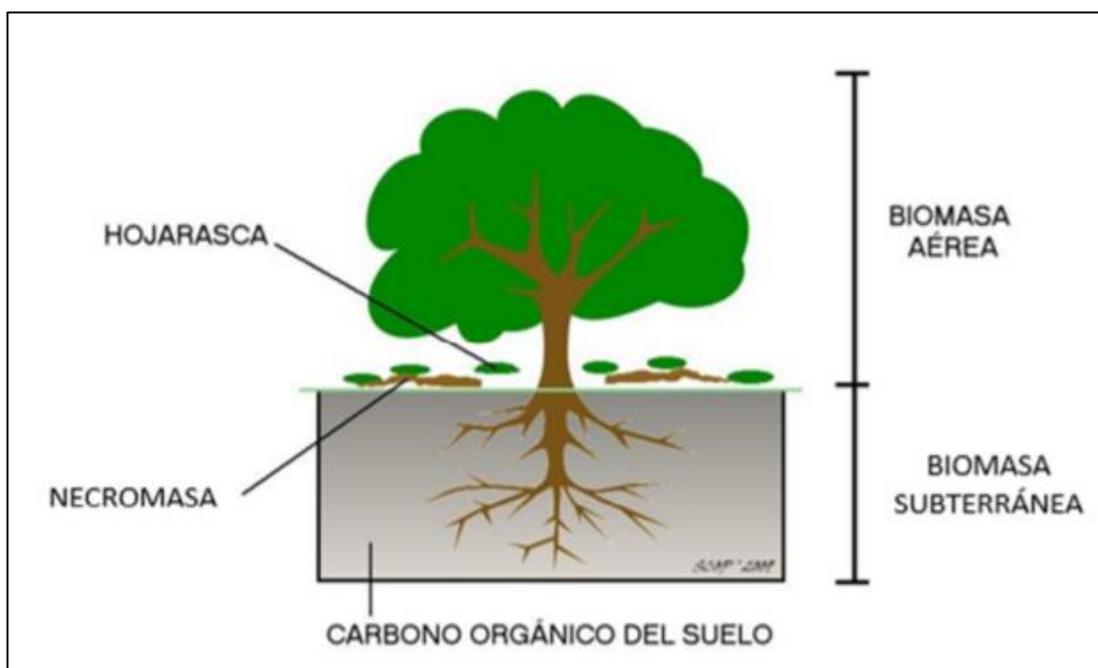
Combinaciones	Canales del monitor		
	Rojo	Verde	Azul
Color Natural	4	3	2
Falso color	12	11	4
Agricultura	11	8A	2
Penetración atmosférica	12	11	8A
Vegetación sana	8A	11	2
Falso color	8	4	3

Nota. En esta tabla se puede observar la combinación de cañones para imágenes Sentinel 2.

Con la ayuda de estos canales y combinaciones de bandas espectrales dentro de un software académico Arc Gis 10, podemos discriminar la vegetación dentro del área de estudio, para lograr llegar al objetivo de este proyecto se debe reconocer la biomasa aérea de la vegetación, concretamente de la especie arbórea nativa *Polylepis sp.*; la biomasa según Nájera Luna & Hernández (2009) es todo aquello encima del suelo incluyendo los troncos, tocones, sus ramas, semillas, la corteza y hojas, como se puede observar en la figura 4. La biomasa natural (Grupo Empresarial ENCE , 2009) que es el producto de la actividad fotosintética de los vegetales, es la biomasa que va a ser trabajada, es decir la biomasa viva. (Grupo Empresarial ENCE , 2009)

Figura 3

Biomasa forestal de un árbol



Nota. Se clasifica la biomasa de un árbol. Recuperado de Estimación de biomasa aérea en árboles dispersos en potreros en la sierra sur de tabasco, México (p.12), por C. Estrella, 2016, Instituto Tecnológico de la Zona Maya.

La importancia de la biomasa es debido a que su energía limpia, siendo la fuente de energía limpia más importante frente al cambio climático, colaborando con el balance de CO₂ emitido por las industrias y el hombre. (Vignote, 2016)

La especie Polylepis sp., es una especie endémica de la Reserva Ecológica El Ángel, que se encuentra dentro de un ecosistema tropical alto andino, con una extensión que va a partir de los bosques andinos de los 3000 m.s.n.m. a los 5000 m.s.n.m. como lo menciona Haro (2012), en el Ecuador los páramos tiende a encontrarse en una altura promedio desde los 3300 m.s.n.m.

En Ecuador estos páramos son importantes debido a su gran biodiversidad, gracias a tres condiciones: al estar ubicados en la zona ecuatorial, la existencia de la cordillera de los Andes y la Amazonia, permitiendo tener una riqueza faunística y forestal dentro de los páramos.

Ya que los páramos en Ecuador cubren el 6% del territorio nacional es decir 1.250.000 ha, según Medina & Mena (2001) el Ecuador es el país que tiene más páramo con relación a su extensión total.

Al ser un piso climático de mucha importancia y conociendo la biodiversidad que alberga, es declarado parte de los sitios Ramsar en 2012 (Secretaría de la Convención de Ramsar, 2013), esta convención sobre la conservación de los humedales es un acuerdo gubernamental, la Secretaría de la Convención de Ramsar (2013) también indica que “su objetivo es la conservación y el uso racional de los humedales mediante acciones locales, regionales y nacionales, gracias a la cooperación internacional”.

Siendo el área total según la Secretaría de la Convención de Ramsar (2013) de 17.002,07 ha incluyendo en su totalidad la superficie de la REEA.

Dentro de la REEA nos encontramos entre los 3000 y 3200 m.s.n.m. con grandes zonas que están abarcadas de los bosques de Polylepis sp., mencionado por Chimbolema, Suárez, Peñafiel, & Paredes (2014) donde señalan también que existen dos tipos de

remanentes de bosque dentro de la REEA, el Bosque siempre verde montano alto, cubriendo el 1,6% del área total de la reserva y el bosque altimontano norte-andino de Polylepis, cubriendo un 0,2% del área de la reserva.

Métodos de estimación de Biomasa Forestal

De acuerdo con Herold et al. (2009), la biomasa aérea es estimada por medio de algunos métodos: el directo o destructivo, el indirecto o no destructivo, y a través de sensores remotos.

El método destructivo se concentra en talar árboles y pesar sus partes (fuste, ramas y hojas) individualmente, siendo el método con mejores resultados, pero con un alto costo de mano de obra, el tiempo que requiere y materiales usados.

(Huxley J, Strauss R, & Churchill F, 1932)

La estimación no destructiva cuenta con funciones matemáticas basadas en las ecuaciones alométricas que ocurren entre los órganos de un individuo, con la intención de estimar la biomasa total con base en el tamaño y dimensiones como diámetro a la altura del pecho sobre el suelo (DAP) o altura del árbol (h) de forma cuantitativa de los árboles de un determinado bosque (Acosta Mireles, Vargas Hernández, & Velázquez, 2002)).

Los autores Terán, Dauber, y Guzmán (1992) menciona “a partir de la información de inventarios forestales, se tienen dos diferentes métodos de cálculo de estimación de biomasa: el primero basado en ecuaciones matemáticas conocidas como alométricas y el segundo en factores de expansión”.

Más adelante se muestra un detalle del método de estimación de biomasa mediante ecuaciones alométricas.

Posteriormente se obtiene los métodos basados en la utilización de SIG que utilizan datos auxiliares, siendo un procedimiento que depende del uso de los datos auxiliares. Por lo tanto, los enfoques basados en los SIG no han sido

ampliamente aplicados para la estimación de biomasa. Sobre estos datos obtenidos por teledetección presentan ventajas, permitiendo un ágil procesamiento de grandes cantidades de datos, y altas correlaciones entre las bandas espectrales y los parámetros del follaje. (Lu, 2006).

A continuación, se describen algunos métodos de interés de acuerdo a la clasificación mencionada (Véase tabla 4), para definir adecuadamente la metodología que se utiliza en el actual estudio.

Tabla 4

Clasificación de los métodos de estimación de biomasa forestal

Categoría	Métodos	Datos	Características
Método basado en mediciones de campo	-Muestreo destructivo -Ecuaciones Alométricas -Conversión de volumen en Biomasa	Muestreo de árboles Muestreo de árboles Volumen de muestreo de árboles o de tablas estándares	Árboles individuales Árboles individuales Estándares de vegetación
Método basado en Sensores Remotos	Método basado en alta resolución espacial Método basado en media resolución espacial Método basado en gruesa resolución espacial Método basado en datos Radar	Fotografía Aérea, IKONOS Landsat TM/ETM+, SPOT IRS-1CWIFS Radar, LIDAR	Por nivel de píxel Por nivel de píxel Por nivel de píxel
Método basado en Sistemas de información Geográfica	Basado en datos auxiliares	Elevación, pendiente, precipitación, tipo de suelo, etc.	Por nivel de píxel o nivel de campo

Nota. “En esta tabla se especifica los métodos, datos necesarios y características para la estimación de Biomasa Forestal. Tomado de “The potential and challenge of remote sensing based biomass estimation”. International Journal of Remote Sensing” (Lu, 2006)

Estimación de Biomasa mediante ecuaciones alométricas

La alometría es utilizada para reunir datos de complicada obtención (biomasa o área foliar), con componentes de medida como el área basal, diámetro a la altura de pecho (DAP), altura total, la edad y la altura de la copa viva, mencionado en Parresol (1999) que la unidad más utilizada en las mediciones es el DAP, es así que se puede relacionar con las variables de difícil alcance por ser el más fácil de medir. Para la estimación de la biomasa, mediante este método, se debe medir el DAP del árbol, lo que permite el balance de las medidas tomadas sobre distintos árboles en distintos momentos, esta medida es un acuerdo universal, en la que se mide el diámetro con corteza (a menos que se determine lo contrario), a una altura fija desde el nivel del suelo, esta medida estándar es la altura del pecho, la misma que puede modificar dependiendo los autores. (Rojas, 2015)

Hay variación de modelos para conseguir estimar la biomasa de un árbol, ya que todas las ecuaciones proceden de alguna las ecuaciones (1),(2) y (3).

$$\text{Lineal: } b = b_0 + b_1 \cdot x_1 + \dots + b_j \cdot x_j \quad [1]$$

$$\text{No lineal: } b = b_1 \cdot x_1^{b1} \cdot x_2^{b2} * \dots * x_j^{bj} \quad [2]$$

$$\text{Logarítmica: } \log b = b_0 + b_1 \cdot \log x_1 + b_2 \cdot \log x_2 + \dots + b_j \cdot \log x_j \quad [3]$$

Donde:

b = biomasa seca total o de alguno de los componentes del árbol;

x_j = componente de medición simple,

b_j = parámetros del modelo

Marco Legal

Para el protección, conservación y manejo de las zonas naturales resguardadas es el manejo del marco legal, ya que permite el cuidado y regulación de procesos que forman este sistema administrativo. El marco normativo está constituido por cuerpos legales que son los rectores del Ministerio del Medio Ambiente. (Ministerio del Ambiente, 2015)

Tratados Internacionales

“Se deberían profundizar los acuerdos conciliados por el estado ecuatoriano, que tengan una relación con estas zonas o áreas protegidas, con respecto a los acuerdos que tienen que ver con la REEA, podemos encontrar los siguientes tratados internacionales”. (Ministerio del Ambiente, 2015). Ver tabla 5.

Tabla 5

Tratados internacionales ratificados por el estado ecuatoriano, aplicables para la REEA

Tratado internacional	Fecha de suscripción
Convención sobre la Protección de Flora, Fauna y Bellezas Escénicas Naturales, Registro Oficial No.990	17 de diciembre de 1943
Convención sobre el Comercio Internacional de Especies Amenazadas de Fauna y Flora Silvestres – CITES	11 de febrero de 1975
Convención sobre la Protección del Patrimonio Mundial, Cultural y Natural de la UNESCO	16 de junio de 1975
Convención sobre los Humedales de Importancia Internacional - Ramsar	7 de enero de 1991
Convenio sobre la Diversidad Biológica	23 de febrero de 1993
Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático	4 de octubre de 1994

Tratado internacional	Fecha de suscripción
Convenio Internacional de Lucha Contra la Desertificación	6 de septiembre de 1995
Decisión 391 de la Comunidad Andina de Naciones sobre Acceso a los Recursos Genéticos, Registro Oficial No. 41	7 de octubre de 1996
Decisión 523 de la Comunidad Andina de Naciones, que aprueba la Estrategia Regional de Biodiversidad para los Países del Trópico Andino, Registro Oficial No. 671	27 de septiembre de 2002
Convención para la Conservación de las Especies Migratorias de Animales Silvestres – CMS	2 de octubre de 2003

Nota. Caso de la REEA, al haber sido designada como sitio Ramsar desde el año 2012.

Recuperado: “El Plan de Manejo Ambiental del Ministerio del Medio Ambiente”

(Ministerio del Ambiente, 2015)

Leyes

Existen leyes aplicadas en dirección de las zonas protegidas, que se obtienen de la Constitución de la República, ver tabla 6.

Tabla 6

Leyes aplicables a la administración de las áreas protegidas

Leyes o Códigos Orgánicos	Fecha de publicación
Ley de Gestión Ambiental	10 de septiembre de 2004
Texto Unificado de Legislación Ambiental Secundaria del Ministerio del Ambiente	Marzo de 2003

Leyes o Códigos Orgánicos	Fecha de publicación
Ley Forestal y de Conservación de Áreas Naturales y Vida Silvestre	10 de septiembre de 2004
Ley de Recursos Hídricos, Usos y Aprovechamiento del Agua	06 de agosto de 2014
Código Orgánico de Organización Territorial, Autonomía y Descentralización	9 de octubre de 2010
Código Orgánico Integral Penal	10 de febrero de 2014

Nota. Tomado de El Plan de Manejo Ambiental del Ministerio del Medio Ambiente.

Recuperado: “El Plan de Manejo Ambiental del Ministerio del Medio Ambiente”

(Ministerio del Ambiente, 2015)

Ordenanzas

“Se destaca la protección y normalización del recurso hídrico del Carchi, publicada en el Registro Oficial 277 de febrero del 2004, emitida para la provincia. Esta disposición es base importante para controlar servicios medio ambientales que prestan estos ecosistemas”. (Ministerio del Ambiente, 2015)

Decretos ejecutivos

En el entorno con respecto al cambio climático, se debe tomar en cuenta el Decreto Ejecutivo 1815, que fue publicado en el año 2009, cuyo propósito principal es tener en cuenta y contener la adaptación y el control al cambio climático como una política de Estado. A través de este decreto, se plantea que el MAE, según el Art. 1. El Decreto 1815 fue modificado con el Decreto 895, específicamente en el Art. 2, en el que dispone la creación del Comité interinstitucional de cambio climático, ver tabla 7. (Ministerio del Ambiente, 2015)

Tabla 7

Artículos 1 del decreto 1815 y artículo 2 del decreto 985

Decreto 1815, Art. 1	Decreto 895, Art. 2
<p>El Ministerio del Medio Ambiente es la institución competente de la formulación y ejecución de la estrategia nacional y el plan que permita generar e implementar acciones y medidas tendientes a concienciar en el país la importancia de la lucha contra este proceso natural y antropogénico y que incluyan mecanismos de coordinación y articulación interinstitucional en todos los niveles del Estado.</p>	<p>Se dispone la creación del Comité interinstitucional de cambio climático. A la vez, en este artículo se plantean medidas de mitigación para los gases de efecto invernadero, así como mecanismos para el incentivo de tecnologías limpias y para la compensación de impactos asociados al cambio climático; todo esto, como una manera de incluir en los procesos de entidades, organismos y empresas públicas, criterios de mitigación y adaptación al cambio climático, bajo directrices emitidas por el MAE.</p>

Nota. La presente tabla muestra los Artículos 1 del decreto 1815 y artículo 2 del decreto 985 Tomado de El Plan de Manejo Ambiental del Ministerio del Medio Ambiente (Ministerio del Ambiente, 2015)

Acuerdos ministeriales

Entre los acuerdos ministeriales que son parte del marco legal está el 128 del Ministerio de Ambiente, que corresponde a las “Normas para el manejo sustentable de los bosques andinos”, inédito en el Registro Oficial No. 416 del 13 de diciembre del 2006, amparado en la Ley Forestal y de Conservación de Áreas Naturales y Vida Silvestre. Esta regla es aplicable para el argumento de la REEA ya que en su Artículo 1, considera como bosques andinos a la vegetación sobre los 900 y 1.300 msnm, lo cual abarcaría a toda la vegetación de la REEA,

en vista que, su rango altitudinal va de los 3.200 a los 4.200 msnm. (Ministerio del Ambiente, 2015)

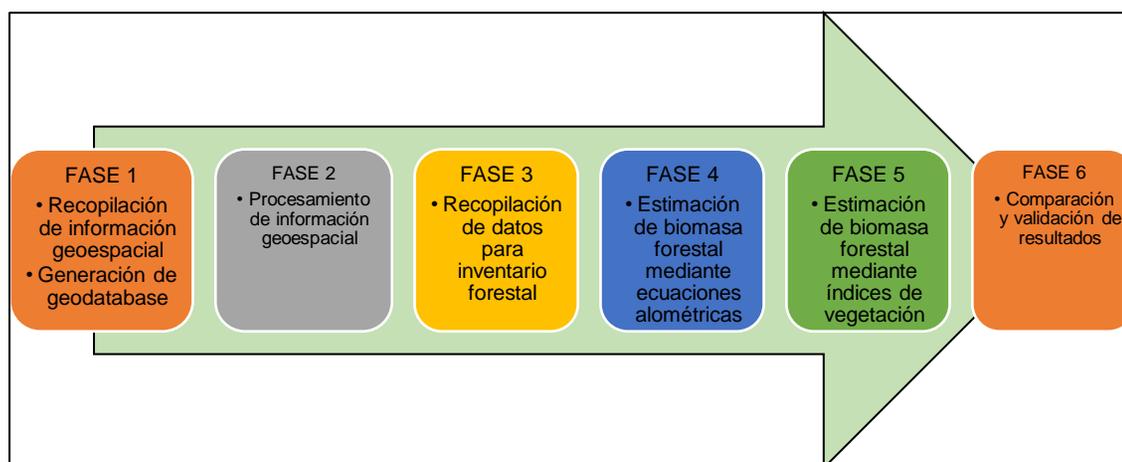
CAPITULO III

METODOLOGIA

En el presente capítulo se desarrolla la metodología utilizada para cumplir con los objetivos, comprende los procesos utilizados en la obtención de la información fundamental, adquisición y especificación de los procesos cartográficos empleados para el desarrollo del proyecto, en la preparación de la base de datos con la información geoespacial adquirida, al igual que las correcciones: atmosférica y topográfica que se realizaron a las imágenes satelitales que conllevo al cálculo de índices de vegetación que se utilizaron para las imágenes de los años 2017-2020, la clasificación no supervisada, su validación y el cálculo de biomasa para su correlación, como se describe a continuación en la figura 5.

Figura 4

Metodología para estimación de biomasa en la REEA



Nota. El gráfico representa el desarrollo de cinco fases en términos generales.

Estas metodologías se dividen en dos tipos, la primera es la aplicación de varias mediciones indirectas dentro de las imágenes satélites Sentinel 2B para estimar la

biomasa aérea mediante la correlación de índices de vegetación y la segunda es estimación de biomasa aérea mediante ecuaciones alométricas de los datos obtenidos en campo.

Descripción del área de estudio

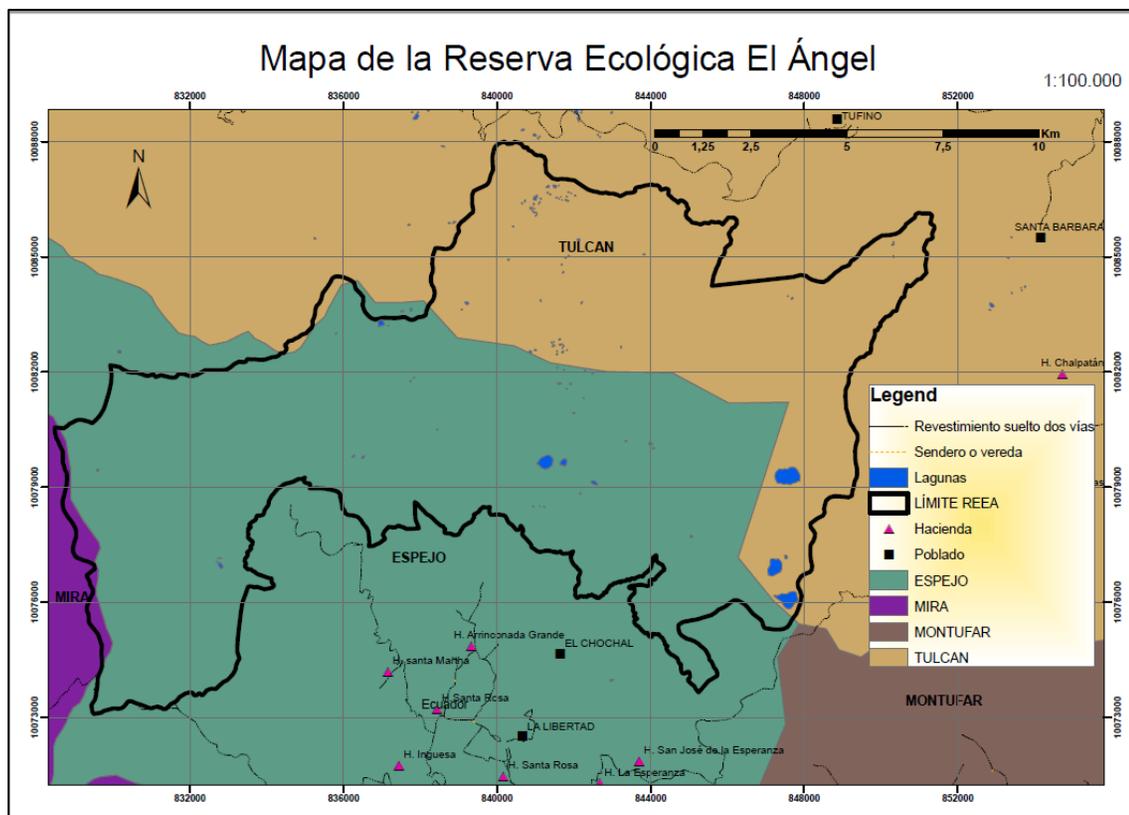
El área de estudio para el desarrollo del presente proyecto, se encuentra ubicada en La Reserva Ecológica “El Ángel” (REEA) en la provincia del Carchi, en la Sierra Norte de Ecuador, con una superficie entre las parroquias La Libertad y El Ángel del cantón Espejo; las parroquias Maldonado y Tufiño, en el cantón Tulcán; y La Concepción, en el cantón Mira (Ministerio del Ambiente, 2015), como se observa en la figura 6.

*Dentro se ha elegido un bosque altimontano norte-andino. La REEA existen cinco rodales de bosque *Polylepis* sp, inventariados por el Ministerio del Ambiente, los cuales tienen un área total de 258,34 has, estas se dividen en Bosque El *Polylepis* con 75,44 has, Bosque Baños con 5,01 has, Bosque La Buitrera con 48,01 has, Bosque El Curiquingue con 23,48 has y Bosque el Mal Paso con 106,39 has.*

Dada las características del terreno del sector, así como su importancia para la mitigación al cambio climático, se seleccionó esta área de estudio, con el propósito de usar una metodología no destructiva de estimación de biomasa, comparando dos metodologías en la estimación de biomasa forestal a partir de imágenes Sentinel 2 y mediante inventarios forestales con la construcción de ecuaciones alométricas, con la finalidad de establecer sus similitudes y diferencias, y obtener conclusiones para establecer rutas que mejoren el conocimiento en el tema de la estimación de la biomasa.

Figura 5

Mapa de ubicación de la Reserva Ecológica El Ángel



Nota. El presente gráfico tiene el mapa de la ubicación de la REEA.

La reserva Ecológica está distribuida en ocho asociaciones y comunas que tienen tierras dentro de la misma, como se puede observar en la figura 7.

En el caso de la REEA, los territorios son destinados a la conservación fueron reconocidos jurídicamente a través del Registro Oficial promulgado en septiembre de 1992. Donde se concluye que en la REEA coexisten diversas formas de tenencia de la tierra. Una investigación realizada por el Sistema de Investigación sobre la Problemática Agraria en él (Ministerio del Ambiente, 2015)

Estas tenencias determinan las características de tenencia predominantes en el país. A continuación, se presenta la respectiva tipología:

“Propiedades individuales. *son propiedades que pertenecen a una persona natural o jurídica en forma plena, sin plazo de vencimiento y con todas las garantías que la ley otorga sobre el predio”.* (Ministerio del Ambiente, 2015)

Propiedades colectivas o comunitarias. Esta propiedad corresponde a un bien colectivo otorgado en beneficio y uso de una comuna, proveniente de poblaciones indígenas, montubias o afros, generalmente reconocidas en la Ley de Comunas 14. Además, puede ser otorgada en beneficio de cooperativas y asociaciones, en su mayoría, reconocidas a partir de las leyes de reforma agraria¹⁵. (Ministerio del Ambiente, 2015)

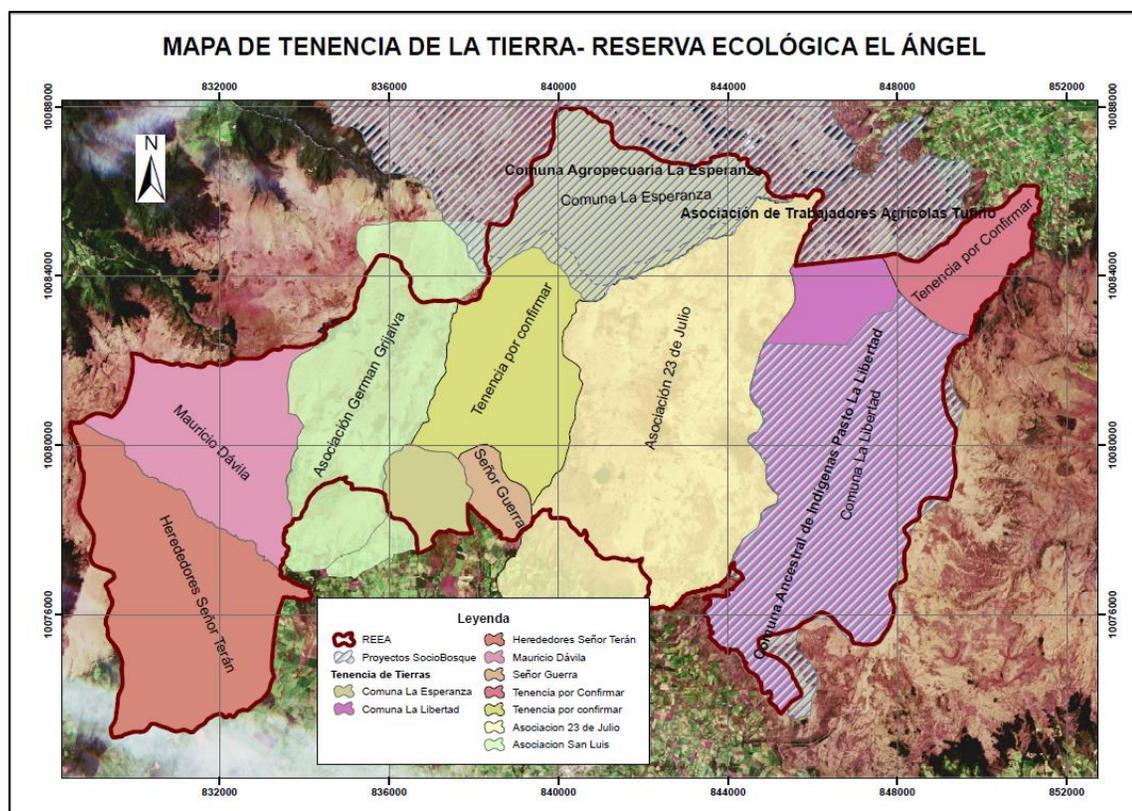
“Propiedades estatales. el Código Civil (artículos 604 y 605) define a los bienes estatales como los pertenecen a la nación, pero cuyo uso, a diferencia de los bienes públicos, no es de los habitantes sino de las instituciones del Estado”. (Ministerio del Ambiente, 2015)

Según la clasificación descrita en los párrafos anteriores, en la REEA predominan los propietarios individuales y propietarios colectivos. En el caso de los primeros, la superficie aproximada comprendería a un 35%; mientras que, en el caso de los segundos, abarcaría cerca del 65% de la superficie de la REEA. (Ministerio del Ambiente, 2015)

Existe el Programa de Incentivos de Ministerio de Ambiente: Socio Bosque, que como finalidad tiene la conservación de bosques y paramos nativos dentro del territorio ecuatoriano, ya que tiene un beneficio económico. De las propiedades que son parte del proyecto Socio Bosque, 4,767 ha están localizadas dentro de la REEA, es decir, cerca de un 30% de la superficie total de la misma. (Ministerio del Ambiente, 2015)

Figura 6

Mapa de tenencia de la tierra de la REEA



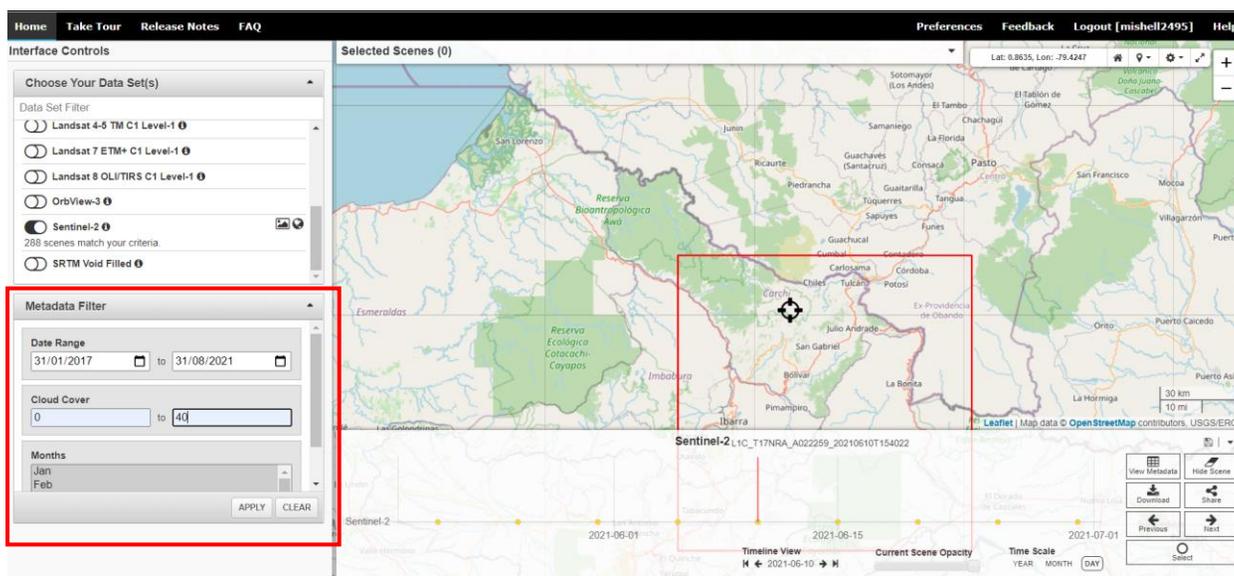
Nota. Mapa de la tenencia de tierras en la REEA y el proyecto SocioBosque.

Fase 1: Recolección de información geoespacial

Para la recopilación de las imágenes Sentinel se contó con el portal de datos, conocido como USGS (United States Geological Survey). Las imágenes descargadas del portal, fueron Sentinel 2, adquiridas desde el año 2017 al 2020, con 12 bandas espectrales, con un nivel de procesamiento 1C que corresponde a las correcciones radiométrica y geométrica. (figura 8)

Figura 7

Búsqueda de imágenes satelitales



Nota. El gráfico representa los parámetros definidos de nubosidad y el rango de fecha.

Tomado de la USGS-Glovis,2020.

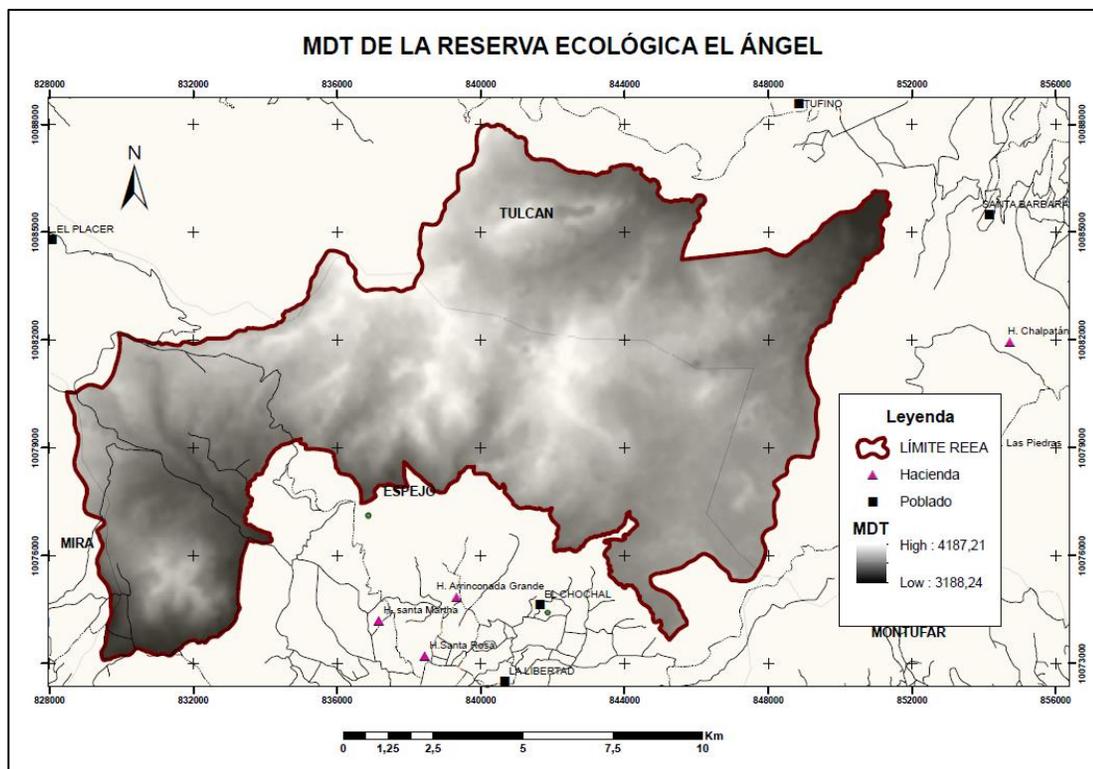
Modelo Digital del terreno

El MDT es un modelo o una representación abreviada de la realidad en la que se reflejan algunas de sus características para representar una realidad desde el punto de vista exclusivo del intérprete, realizando las características que a criterio del observador son significativas para el propósito del modelo. Tiene como propósito diferenciar el mundo real a través de la percepción de ciertas propiedades que trascienden a un fenómeno en particular. Duque (2015)

El modelo digital del terreno (MDT) utilizado en el proyecto fue proporcionado por el Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAGAP), para generar mapas de sombras y pendientes, y para obtener la corrección topográfica de las imágenes satelitales Sentinel 2. Este MDT tiene una resolución espacial de 3m para las provincias de la Costa y Sierra; mientras que en las provincias del Oriente es de 5 m. (figura 9).

Figura 8

Modelo digital del terreno (MDT)

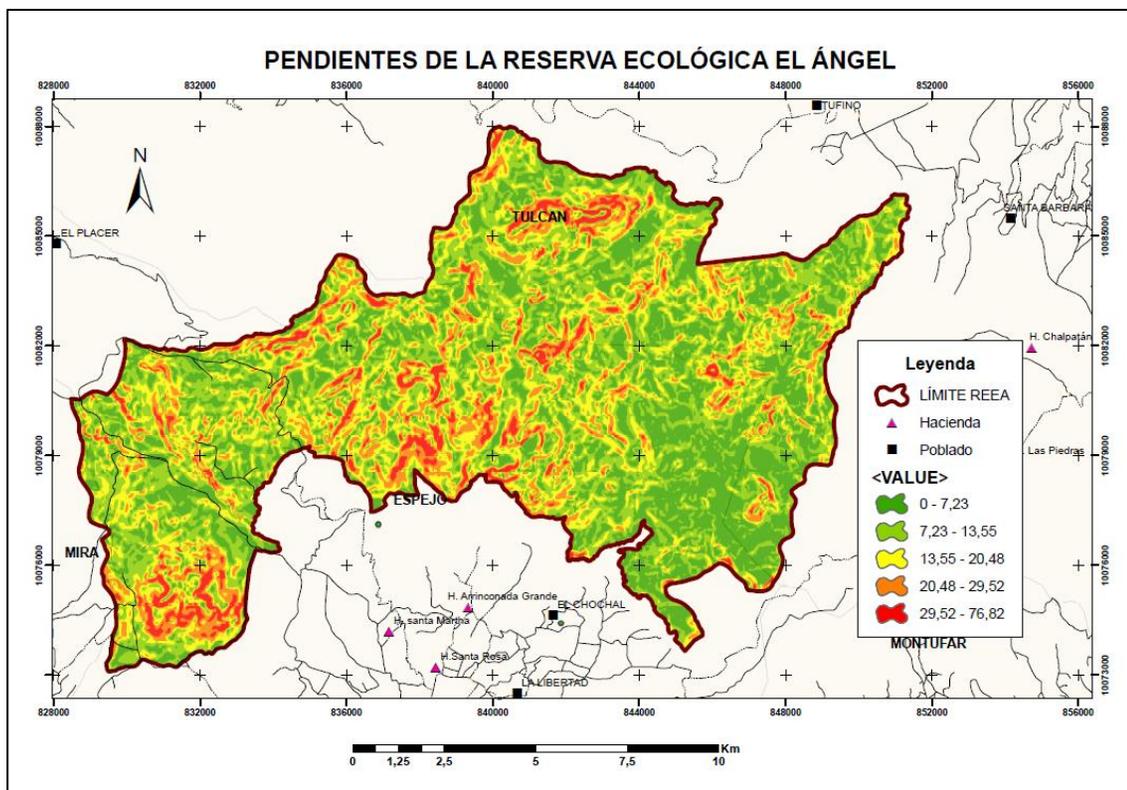


Nota. El presente gráfico muestra el MDT. Obtenido del MAGAP.

Una vez que se unió los rasters para la generación del MDT se realizaron dos procesos con el mismo raster, que son los mapas de pendientes (figura 10) y sombras (figura 11).

Figura 9

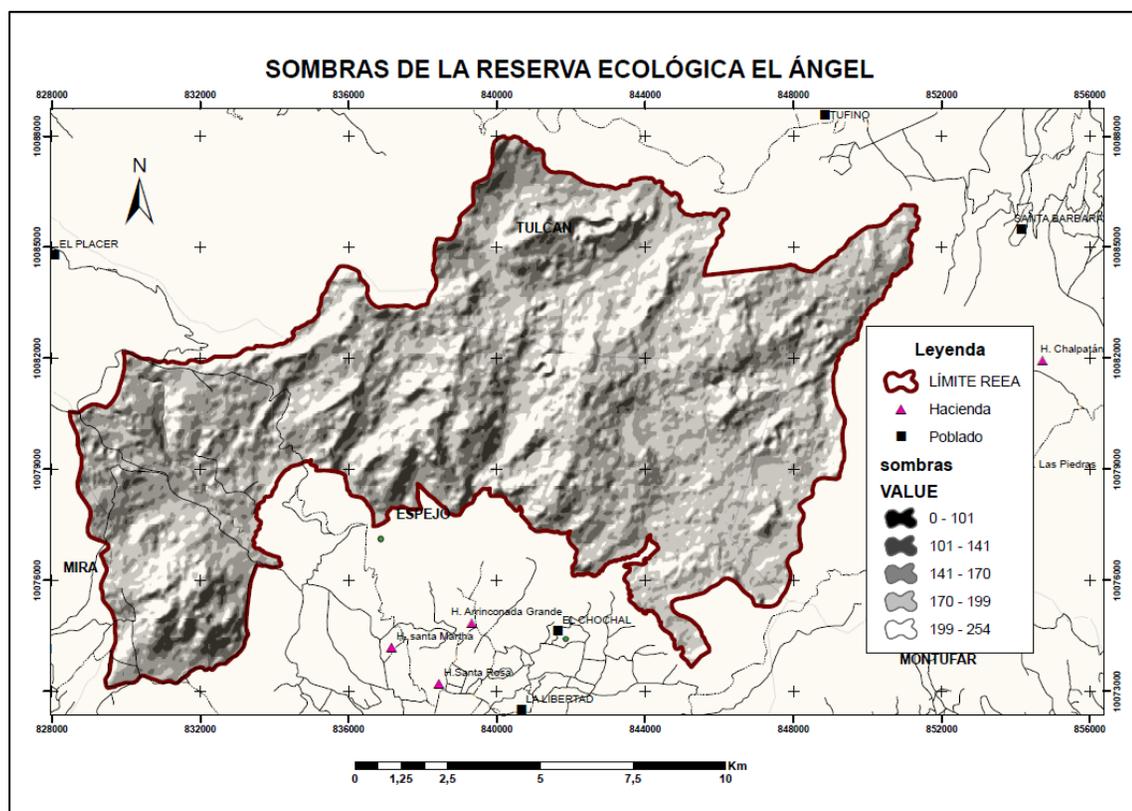
Mapa de pendientes de la Reserva Ecológica El Ángel



Nota. El mapa representa el porcentaje de pendiente dentro de la Reserva Ecológica El Ángel.

Figura 10

Mapa de sombras de la Reserva Ecológica El Ángel



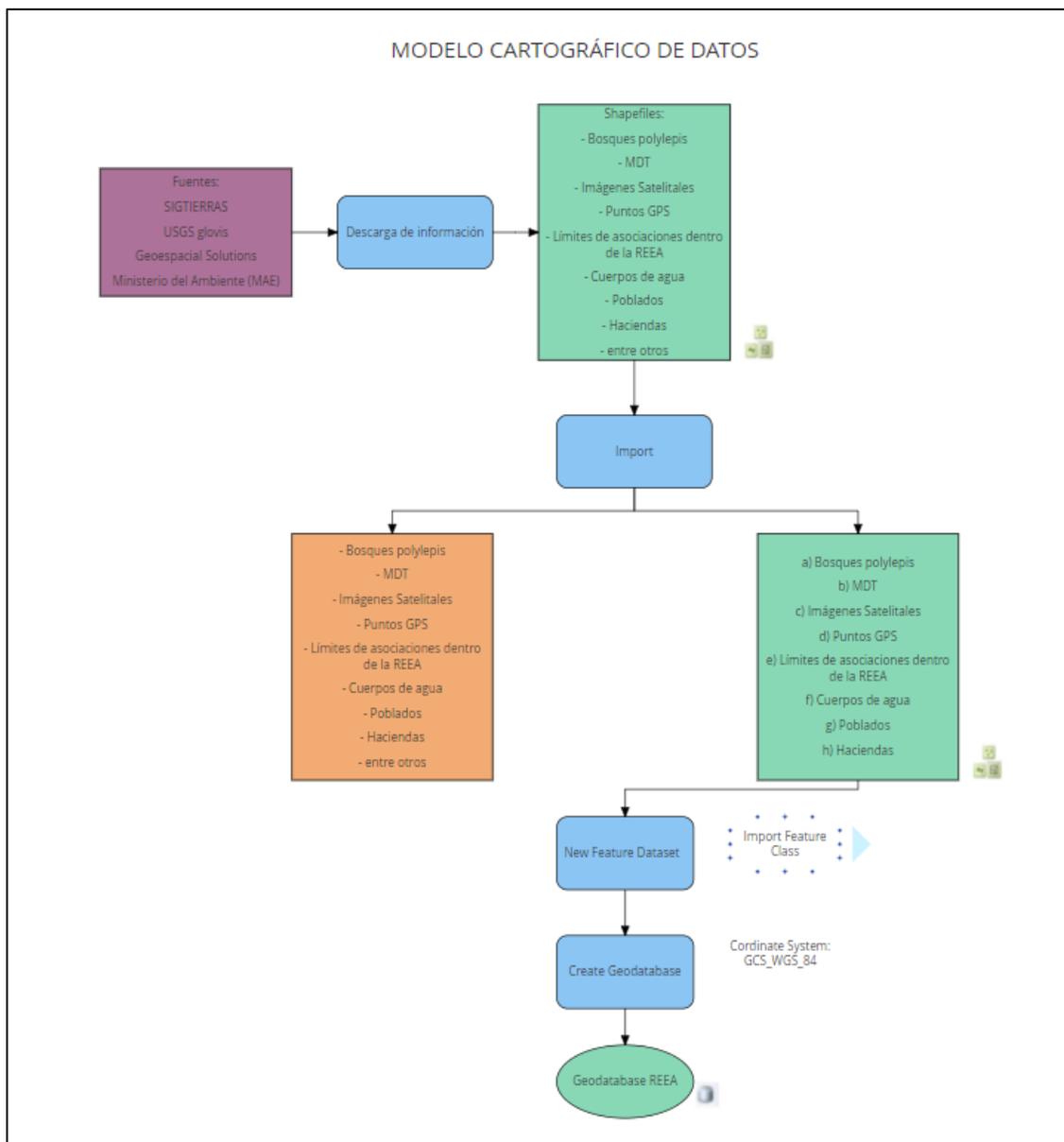
Nota. Mapa de sombras obtenido a partir de mapa de pendientes en Reserva Ecológica El Ángel.

Generación de la Geodatabase

Debido a la necesidad de tener estructurado el conjunto de datos geográficos referenciados, que facilite el manejo y para su análisis se realizó una base de datos con la obtenida recopilada de las distintas instituciones. (figura 12).

Figura 11

Modelo cartográfico de la base de datos



Nota: El gráfico representa la estructuración de la Geodatabase de la Reserva Ecológica El Ángel.

La geodatabase de la “Reserva Ecológica El Ángel” se agrupa las diferentes coberturas generadas por categorías, las cuales son empleadas para el avance del presente trabajo. La base de datos posee de una hoja informativa que presenta algunos aspectos como: título, sinopsis, descripción del proyecto de cómo se utilizaron las coberturas, un

mapa representativo de la Reserva Ecológica El Ángel, créditos a las instituciones que proporcionaron la información, autor, el uso, y las escalas de trabajo. (figura 13).

Figura 12

Geodatabase de la Reserva Ecológica El Ángel

GEODATABASE DE LA RESERVA ECOLOGICA EL ÁNGEL



Tags

CÁLCULO DE BIOMASA DE LA RESERVA ECOLOGICA EL ÁNGEL 2017-2018-2019-2020

Summary
 Desarrollo para el proyecto de titulación:
 "Estimación de biomasa de la especie *Polylepis* SP en la Reserva Ecológica El Ángel, mediante imágenes satelitales Sentinel para su conservación"

Description
 El proyecto de investigación se plantea la estimación de la biomasa total de bosque altoandino *Polylepis* sp., en base a la geoinformación y ecuaciones alométricas obtenidos de la Reserva Ecológica El Ángel, que permita estudiar el crecimiento de la biomasa en los diferentes años 2017, 2018, 2019 y 2020. Haciendo una comparación entre los resultados obtenidos de las imágenes satelitales y de las ecuaciones alométricas. Exhortando a promover investigaciones afines a los recursos naturales y ecosistemas; debido al valor de estos para encaminarnos a un desarrollo sostenible, donde se pueda hacer parte a la población en todo el proceso. En estos estudios lograremos proveer de información relevante a los gobiernos locales y nacionales para la toma de decisiones respecto al manejo del territorio; por lo tanto, en el momento el bienestar del ambiente.

Credits
 Información recopilada de distintas fuentes como:
 - Geospacial Solutions
 - Ministerio del Medio Ambiente

- Projecto REEA Polylepis.mdb
 - BOSQUES
 - Area_total_polylepis1
 - INFORMACION BASE
 - MAE
 - MDT
 - REEA
 - RESULTADOS

Nota. Descripción y contenido de la geodatabase de la Reserva Ecológica El Ángel
 Como resultado se obtuvo 32 coberturas, entre las cuales se encuentran 3 de tipo lineal, 16 de tipo raster, 3 de tipo polígono y 10 de tipo polígono. Ver (tabla 8).

Tabla 8

Tabla de coberturas para la geodatabase

Características	Cobertura	Tipo
BOSQUES	Parches de Bosque <i>Polylepis</i> sp.	Polígono
MAE	Suelos	Polígono
	Vegetación	Polígono

Características	Cobertura	Tipo
	Tenencia de tierras	Polígono
	Límite de comunas	Polígono
IMÁGENES		
SATELITALES	Sentinel-2	Raster
	Poblados	Puntos
	Vías	Línea
INFORMACIÓN	Ríos	Línea
BASE	Cantones	Polígono
	Parroquias	Polígono
	Haciendas	Puntos
	MDT Magap	Raster
MDT	Pendientes	Raster
	Sombras	Raster
	Puntos GPS	Puntos
REEA	Curvas de nivel	Línea
	Límite REEA	Polígono
	Zona de estudio	Polígono
	Índices NDVI 2017	Raster
	Índices NDVI 2018	Raster
	Índices NDVI 2019	Raster
	Índices NDVI 2020	Raster
RESULTADOS	Índices GNDVI 2017	Raster
	Índices GNDVI 2018	Raster
	Índices GNDVI 2019	Raster

Características	Cobertura	Tipo
	Indices GNDVI 2020	Raster
	Clasificación K-Means 2017	Raster
	Clasificación K-Means 2018	Raster
	Clasificación K-Means 2019	Raster
	Clasificación K-Means 2020	Raster
	Cobertura de vegetación de MAE	Polígono

Nota. La tabla muestra el tipo de elemento con la que representa cada cobertura.

De la recopilación de 32 coberturas se obtuvo la base de datos que dio como resultado la información que se empleó para la estimación de la biomasa, conformada por cuatro imágenes Sentinel-2, comprendidas entre los meses de marzo y diciembre pertenecientes a los años 2017,2018,2019 y 2020.

Fase 2: Procesamiento de información geoespacial

Correcciones de una imagen satelital

” Las imágenes de satélites posee varias interferencias que provocan que la información que se quiera obtener parezca con varias perturbaciones por una serie de errores. Errores que se nombra a continuación fueron obtenidos” Geograf (2008) :

Niveles de Procesamiento

“La asociación entre la ESA y el USGS permite la distribución de información de la reflectancia de nivel superior de la atmósfera (TOA)” (Bravo, 2017). Bravo (2017) explica que “el Nivel 1C de procesamiento tiene incluido las correcciones radiométrica, ortorrectificación y radiométrica su registro espacial en un sistema de referencia global con una precisión de sus píxeles que geo localiza productos de alta precisión”.

El procesamiento de Nivel-1C está compuesto en una asociación de azulejos para seleccionar los predefinidos que intersecan la huella de la imagen requerida, el cálculo de la rejilla en rejilla permitiendo vincular la imagen de

geometría nativa a la imagen de geometría de destino (orto-rectificada). El re-muestreo de cada banda espectral en la geometría de la orto imagen usando las rejillas de re-muestreo y un filtro de interpolación. El cálculo de las reflectancias TOA también ocurre en este paso Finalmente el cálculo de máscaras que se generan máscaras de nubes y tierra / agua y compactación de imágenes de las imágenes de nivel 1C resultante mediante el algoritmo JPEG2000 y un encabezado codificado por imágenes geográficas GML. (Bravo, 2017)

Corrección Radiométrica. La corrección radiométrica consiste en tratar los valores de los píxeles de una imagen satelital, para obtener valores de intensidad homogéneos, equilibrando los histogramas y corrigiendo imperfecciones que exista en los píxeles. Hay varios motivos que influyen para que se produzcan distorsiones en las imágenes satelitales al momento de ser receptadas, los fallos de los propios sensores, alteraciones en el movimiento del sensor o instrumento a bordo del satélite o la interferencia de a atmosfera, esta corrección implica la restauración de líneas o píxeles perdidos y la corrección del bandeado de la imagen. (Fing.edu, 2011)

Corrección Geométrica. La corrección geométrica consiste en ubicar correctamente los píxeles en el espacio geográfico corrigiendo las posibles distorsiones, donde las imágenes satelitales no suelen proporcionar su información georreferenciada, por lo que cada pixel se ubica en un sistema de coordenadas arbitrario conocido como fila-columna cómo se maneja en programas de tratamiento digital de imágenes. (Geograf., 2008)

Tras la georreferenciación se obtiene una capa igual donde cada columna va a tener correspondencia con un valor de longitud y cada fila con un valor de latitud. Si la imagen satelital no hubiese sufrido ningún tipo de distorsión, el procedimiento sería bastante sencillo, obteniendo capas para poder combinarla

con otras capas en un software SIG, que pueden ser: vías, ríos y poblados, pudiendo obtener estudios más completos. (Geograf., 2008)

Corrección atmosférica. Esta corrección es una fase que se utiliza en las imágenes satelitales, con la intención de eliminar el efecto de los aerosoles y la radiancia intrínseca que se produce en el sensor y se ve reflejado en la imagen, como producto de la interacción del sensor con la atmósfera. Con el paso de corrección atmosférica se consigue optimar la calidad sensorial de la imagen; así como, eliminar el componente intrusivo de la atmósfera. (Aguilar, Mora, & Vargas, 2014)

Para lo cual se utilizó Sen2cor, Mueller-Wilm (2018) lo define como un prototipo de procesador para el formato y procesamiento de productos Sentinel-2 Nivel 2A, que realiza la tarea de corrección atmosférica, opcionalmente se puede realizar la corrección del terreno y corrección del cirro de los datos de entrada de una imagen Sentinel-2 de Nivel 1C de la parte superior de la atmósfera, luego del proceso Sen2Cor obtiene productos de imágenes de reflectancia corregidas en la parte baja de la atmósfera de Nivel 2A, adicional crea mapas de densidad óptica de aerosol, mapa de concentración de agua, mapa de indicadores de calidad para las probabilidades de nubes y nieve. Su formato de producto de salida son imágenes JPEG 2000 con tres resoluciones diferentes, 60, 20 y 10 m.

El algoritmo para la corrección atmosférica que convierte los datos de reflectancia del nivel 1-C (TOA) a nivel 2-A (BOA), pertenece al algoritmo propuesto en la metodología de corrección atmosférica/topográfica de imagen satelital (ATCOR) de (Richter & Schlapfer, 2015). Este algoritmo estima el "Aerosol Optical Thickness" (AOT) descartando el vapor de agua contenido y corrigiendo según la superficie del terreno.

El algoritmo de Sen2cor se aplica a las radiancias medidas por el sensor o radiancia Top Of Atmosphere (TOA), y da como resultado la reflectancia corregida o reflectancia Bottom Of Atmosphere (BOA). Tomando en cuenta las

anomalías de interacción con la atmósfera, se puede observar la radiancia solar que obtiene un sensor de teledetección observando una superficie horizontal. Todas estas magnitudes se observan mediante códigos de transferencia radiactiva funcionando en modo directo. En dicha simulación de transferencia radiactiva es donde se introducen a la corrección los datos geométricos y atmosféricos sincrónicos a la obtención de la imagen. (Martínez , Palá, & Arbiol , 2012)

Martínez , Palá, & Arbio (2012) especifica que “la magnitud $\langle \rho_e \rangle$ o reflectividad corregida del medio en el que se encuentra la superficie observada se obtendrá tratando el conjunto de píxeles que constituyen el entorno o vecindad, como un nuevo píxel situado en un entorno uniforme de reflectividad”.

Véase ecuación 4.

Su valor vendrá dado por

$$\langle \rho_e \rangle = \frac{L^* - L_a}{A + B + S(L^* - L_a)} \quad [4]$$

donde:

$\langle \rho_e \rangle$ es la reflectividad corregida del entorno en el que se encuentra la superficie observada.

S es el albedo esférico de la atmósfera.

L_a es la radiancia retro dispersada por la atmósfera hacia el sensor.

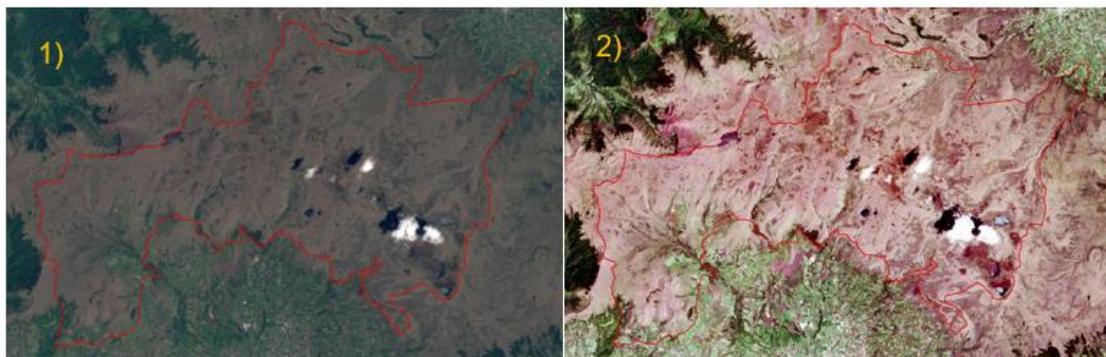
A y B dan cuenta del efecto atmosférico sobre la radiación directa y difusa, respectivamente.

Las imágenes satelitales Sentinel necesitaban un proceso de corrección, entre ellos el atmosférico con el algoritmo de Sen2cor descrito por medio de la ecuación (4), donde se obtiene como resultado la corrección atmosférica de las imágenes satelitales Sentinel 2 figura 14, mediante la herramienta Sen2Cor280, del software libre SNAP.

Este proceso se realizó en todas las imágenes desde el año 2017 al 2020.

Figura 13

Corrección atmosférica



Nota. El gráfico representa en 1) la imagen sin corrección atmosférica y en 2) la imagen con la corrección atmosférica.

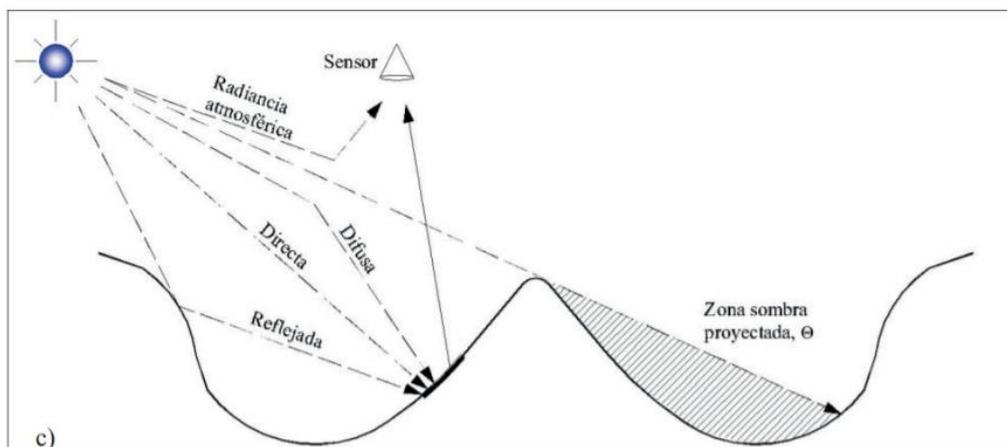
Corrección topográfica. “La corrección topográfica nos permite equiparar las discrepancias de irradiación solar, debidas a la diferenciación altitudinal del terreno”.

(Riaño , Salas, & Chuvieco, 2000)

“La configuración geométrica del sistema sol-superficie-sensor durante la adquisición de la imagen afecta la respuesta espectral de la superficie en términos cuantitativos, modificando la intensidad de la energía que se detecta”. (Bowen, 2018)

Para la corrección del efecto topográfico se considera dos variables principales: el ángulo solar y la pendiente del terreno. Como se observa en la figura 15. Estas variables se las obtiene de un Modelo Digital de Elevaciones (MDT).

Para corregir la iluminación se toma en cuenta la posición del sol, medida a través del ángulo cenital y azimutal durante la adquisición de la imagen, mientras que para corregir la topografía se toma en cuenta la orientación relativa de las superficies con respecto a la dirección de donde viene la luz. (Hantson & Chuvieco, 2011)

Figura 14*Corrección topográfica*

Nota. Aportaciones de irradiancia sobre una pendiente del terreno reflejadas por ésta y la radiancia atmosférica que finalmente son registradas conjuntamente por el sensor. Recuperado de Asociación Española de Teledetección (p.3), por Grau, G., Vicent, J., Moreno, J., 2014

La corrección topográfica permite reparar las discrepancias de iluminación solar, esto se produce debido a la variación de altitud de terreno. Riano (2000) dice que “las zonas de iluminación presentan menos reflectividad de lo debido, mientras que las zonas con mayor iluminación presentan una mayor reflectividad.”

“Para realizar la corrección topográfica es necesario calcular la iluminación (IL), véase ecuación 5, es decir, el coseno del ángulo de incidencia (γ_i)”: (Riano, 2000)

$$IL = \cos\gamma_i = \cos\theta_p \cos\theta_i + \sin\theta_p \sin\theta_i \cos(\phi_a - \phi_o) \quad [5]$$

Donde:

θ_p = pendiente del terreno: La inclinación del terreno con respecto a la horizontal.

θ_i = ángulo cenital solar: El ángulo complementario de la elevación solar.

ϕ_a = ángulo azimutal solar: La dirección del sol con respecto al norte.

ϕ_o = ángulo de orientación: El ángulo existente entre el vector que señala el norte y la

proyección sobre el plano horizontal del vector normal a la superficie en ese punto.

El método de corrección topográfica semiempírico conocido como corrección-c, se observa en la ecuación 6: (Teillet, 1982)

$$\rho_H = \rho_T \left(\frac{\cos\theta_i + c_k}{IL + c_k} \right) \quad [6]$$

Donde:

$$c_k = \frac{b_k}{m_k}; \rho_T = b_k + m_k IL \quad [7]$$

Introduce un parámetro “ck” que es el cociente entre la pendiente (bk) y el término independiente (mk) de la ecuación de regresión entre la rT y la IL.

“Este proceso permite comprobar que se eliminan ciertas sombras que surgen en las imágenes por la baja iluminación, logrando homogenizar la variación del espectro dentro de cada imagen”. (Teillet, 1982)

Por medio de la corrección de las imágenes satelitales, se obtuvo los parámetros utilizados para la corrección topográfica con las ecuaciones (5), (6) y (7), para aplicar la corrección-C, se utilizan los metadatos del archivo de cada una de las imágenes de los años 2017, 2018, 2019 y 2020. Utiliza los metadatos como altura y acimut. Estos datos se aplican en la corrección-C (figura 16), la misma que presenta problemas en los resultados, aquí se ve la diferencia de las imágenes posterior a esta corrección.

Los metadatos proporcionan en ángulo del cenit y el acimut de la imagen, mientras se ingresó el ángulo de la elevación o altura. Para ello se utilizó la siguiente ecuación:

$$\zeta = 90 - \alpha \quad [8]$$

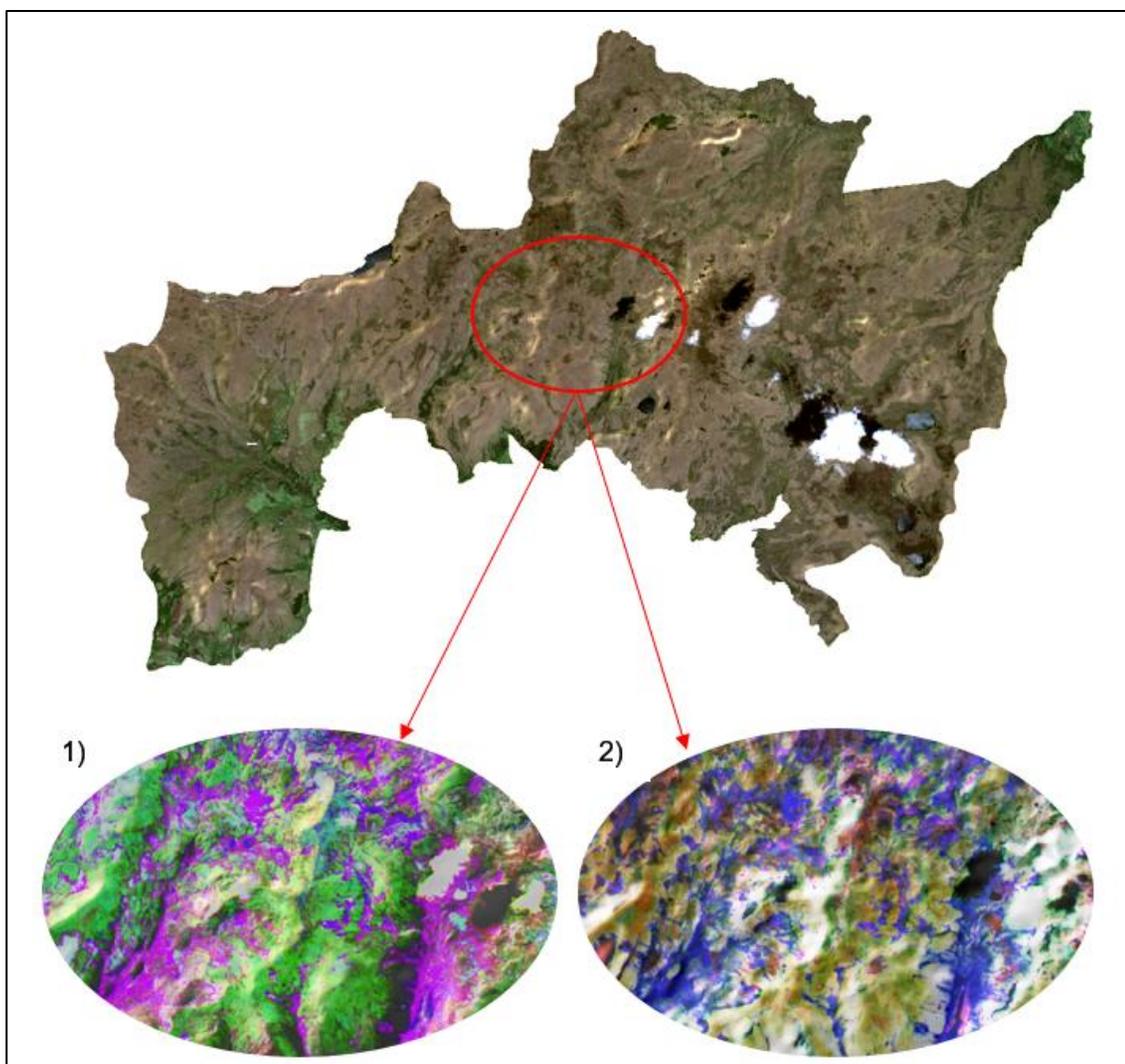
Donde:

α : ángulo de elevación

ζ : ángulo cenit

Figura 15

Corrección topográfica.



Nota. El gráfico representa en 1) la imagen sin corrección topográfica y en 2) la imagen ya realizada la corrección topográfica, obtenidas en Q-GIS.

Índices de Vegetación

“Las coberturas vegetales presentan energía que es detectada por el satélite o sensor pasivo. Esta energía es variada según las características del terreno y el ambiente de las coberturas”. (Sancha, 2010)

Los índices de vegetación son herramientas que permiten reconocer los elementos vegetales situados sobre la superficie terrestre a través de la energía que emiten o reflejan. A su vez permiten implementar los sensores remotos que se han desarrollado numerosos índices que relacionan las bandas antes mencionadas para obtener una valoración cuantitativa de las cubiertas vegetales. (Sancha, 2010)

Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI). *Los valores de reflectancia son manejados en un índice para poder evaluar con mayor precisión las propiedades biofísicas; el estado de salud de la vegetación, contenido de humedad, dentro de los cuales el índice más conocido y utilizado es el índice normalizado de vegetación (NDVI). (Escobar, 2016)*

“Este índice se expresa adimensional, en valores entre -1 y 1, siendo más cercano a 1 para vegetación sana y cercano a 0 para vegetación enferma. Otras superficies como agua o nubes pueden presentar valores negativos descartables”. (Córdova & García , 2013)

“La actividad fotosintética de la vegetación permite determinar en gran medida el vigor y por ende el contenido de biomasa”. (Díaz, 2014)

El cálculo del NDVI se realiza con la Ecuación 9:

$$NDVI = \frac{NIR-R}{NIR+R} \quad [9]$$

Donde NIR representa la reflectancia del canal infrarrojo cercano o banda 8 correspondiente en el satélite Sentinel 2 y R representa la reflectancia en la banda roja del visible. Esta fórmula indica que existe una relación inversa entre el valor de reflectancia de estas bandas, por lo que es posible su uso para discriminación de cubiertas vegetales. (Díaz, 2014)

El NDVI tiene valores entre -1 a + 1. A continuación se separó en 4 clases para separar la vigorosidad de las plantas en Alto, medio, bajo y ausencia, como se puede observar en la Tabla 9.

Tabla 9

Clasificación de los valores de NDVI

CLASIFICACIÓN	VALOR DE NDVI
Ausencia	-1 a 0
Bajo	0 a 0,33
Medio	0,33 a 0,66
Alto	0,66 a 1

Nota. En el presente grafico se divide la clasificación de índice NDVI.

Índice de vegetación de diferencia normalizadas verde (GNDVI). El GNDVI es utilizado ampliamente para estimar la vegetación, sin embargo al saturarse cuando la vegetación presenta un valor de 3 en los valores de su area foliar lo que menciona Gordillo (2017).

En la ecuación 10 el índice GNDVI es estimado mediante la relación entre la diferencia y la suma del NIR y el verde.

$$GNDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{GREEN}}{\rho_{NIR} + \rho_{GREEN}} \quad [10]$$

Una alternativa al NDVI fue la construcción del índice GNDVI, según Gitelson et al. (1996) “encontró que el índice de vegetación GNDVI era más sensible a la concentración de clorofila para un extenso rango de variaciones de clorofila que el NDVI, el GNDVI permitió una estimación precisa| de la concentración del pigmento”. Para la aplicación de los índices de vegetación, se escogieron los índices de la ecuación 9 y ecuación 10, los mas relevantes según sus características (tabla 10).

El modelo cartográfico se muestra en la figura 17, con ello se obtuvo los índices correspondientes a los años 2017, 2018, 2019 y 2020. El resultado de la corrección se muestra en la figura 18.

Tabla 10

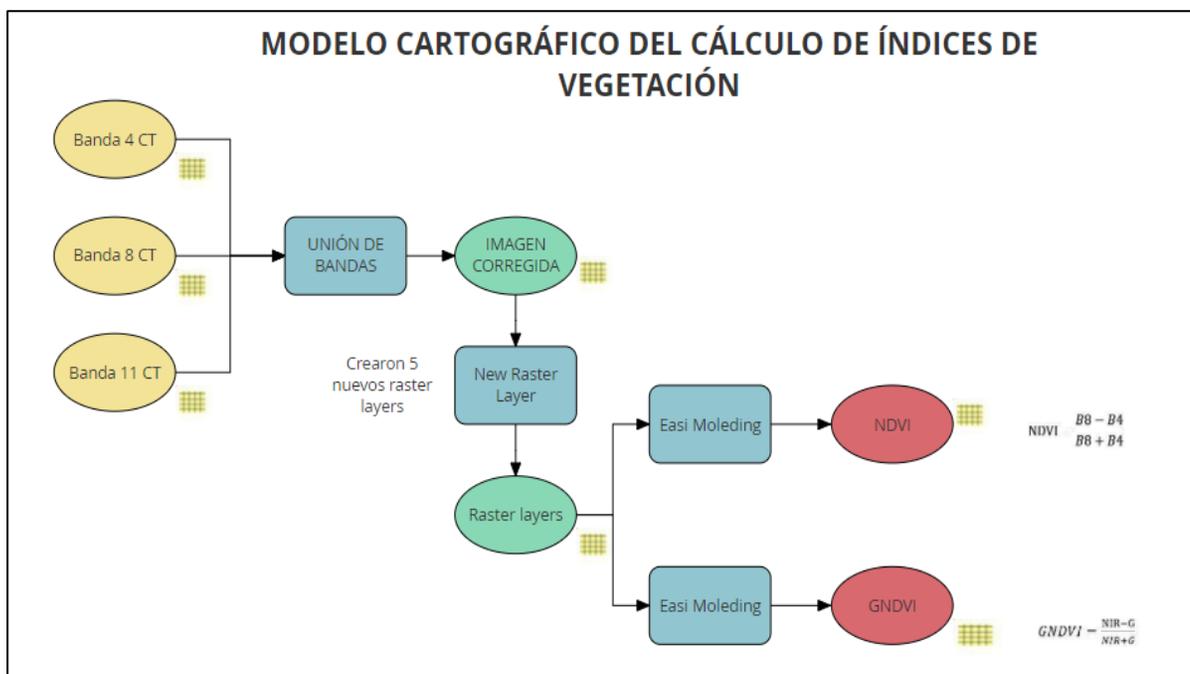
Fórmulas de índices de vegetación

Índice de vegetación	Fórmula
NDVI	$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED}}$
GNDVI	$GNDVI = \frac{NIR - \rho_{GREEN}}{NIR + \rho_{GREEN}}$

Nota. La tabla presenta las fórmulas de índices de vegetación empleados en el proyecto de investigación.

Figura 16

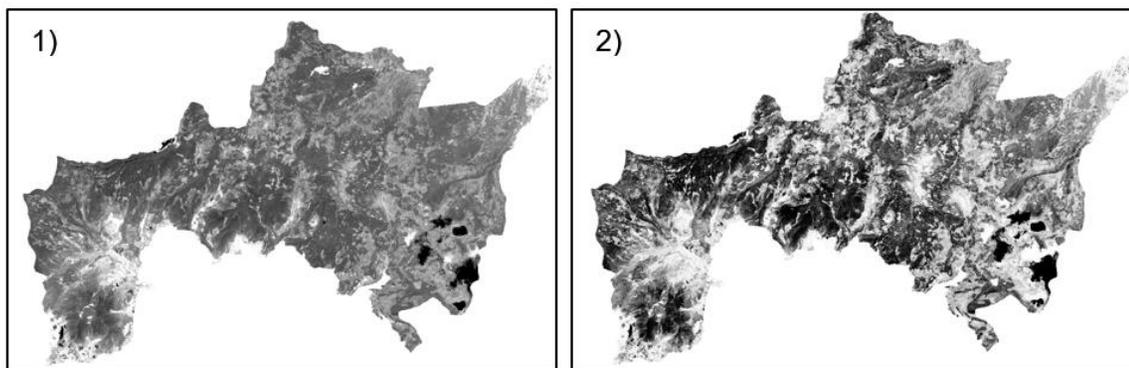
Modelo cartográfico de Índices de vegetación



Nota. El gráfico representa la metodología empleada en la estimación de índices de vegetación.

Figura 17

Calculo de índices de vegetación.



Nota. El gráfico representa el cálculo de los índices de vegetación realizados en el proyecto de investigación 1) NDVI y 2) GNDVI

Estimación de Biomasa aérea

Para la estimación de la biomasa aérea en la Reserva Ecológica El Ángel se realizaron algunos procesos; el primero es trabajar con la imagen satelitales Sentinel-2 desde el año 2017 al 2020 para obtener los ND o niveles digitales del índice NDVI, en los denominados parches de bosque *Polylepis sp.*, el segundo proceso fue realizado en campo para la tomar de datos necesarios para aplicar en las ecuaciones alométricas, con el propósito de obtener las ecuaciones de regresión que relacionen los valores de los ND con los valores de biomasa. Rodríguez Cortes (2015) y Echeverría (2018).

Cálculo del índice de Vegetación Normalizado para estimación de biomasa (NDVI). Para la generación de los índices de vegetación como el NDVI para realizar la estimación de la biomasa, se menciona en algunos artículos de investigación algunos de ellos son de Rodríguez Cortes (2015) y Echeverría (2018), entre otros. Para la

generación de NDVI con las imágenes que pertenecen al sensor Sentinel 2, se aplica la fórmula 9, para las cuales la banda NIR es la octava banda y la Red es la cuarta banda.

Cálculo del Índice de vegetación de diferencia normalizadas verde para la estimación de biomasa (GNDVI). Para la generación de los índices de vegetación como el GNDVI para realizar la estimación de la biomasa, se menciona en algunos artículos de investigación, algunos de ellos son de Rodríguez Cortes (2015) y Echeverría (2018), entre otros. Para la generación de GNDVI con las imágenes que pertenecen al sensor Sentinel 2, se aplica la fórmula 10, para las cuales la banda NIR es la octava banda y la Red es la tercera banda.

Clasificación de imágenes satelitales

La clasificación digital dicta que, en su mayoría de casos, la culminación del tratamiento de imágenes satelitales. Clasificar una imagen implica categorizarla en términos estadísticos, es decir, reducir la escala de medida de una variable continua (ND), a una escala nominal o categórica (clases temáticas). (Chuvieco, 2008)

La imagen multiespectral se transforma en otra imagen en donde los ND limitan a cada pixel dejando de tener relación con la energía detectada, y pasan a ser identificados con una etiqueta con categorías que ayudan a un mejor conocimiento del territorio. (Mendoza, 2010)

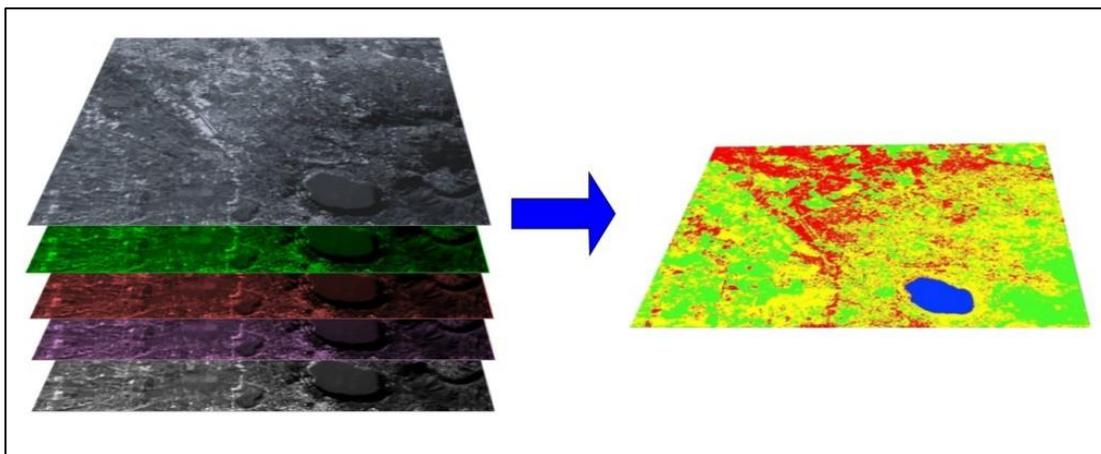
Clasificación Supervisada. La clasificación supervisada inicia con elementos propios de la imagen, denominados áreas de entrenamiento, estos tienen una alta precisión de la variedad a ser clasificada de parte del encargado, la clasificación consiste en que a cada elemento contenido en la imagen se le fija una categoría, basándose en las características obtenidas de las áreas de entrenamiento, correspondiendo cada resultado para las coberturas del suelo determinadas por el

usuario, sin embargo, esto no garantiza que las clases sean divididas a partir del punto estadístico, como se observa en la figura 19. (Ress, 2005)

“En una clasificación supervisada, la equivalencia y ubicación de algunos de los tipos de cobertura del suelo (e.g. agricultura, urbano, humedal) son conocidos de antemano a través de trabajo de campo, análisis de fotos aéreas, o experiencia personal”. (Mausel, Kramber, & Lee, 1990)

Figura 18

Clasificación supervisada



Nota. La clasificación supervisada de una imagen satelital en cada una de sus bandas.

Clasificación no supervisada. El algoritmo k-means. K-means es un algoritmo de clasificación no supervisada (clusterización) que concentra objetos en k grupos basándose en sus características. El agrupamiento se ejecuta minimizando la suma de recorridos entre cada objeto y el centroide de su grupo o cluster. Se suele usar la distancia cuadrática. (Uniovido, 2020)

El algoritmo consta de tres pasos:

“**Inicialización.** una vez seleccionado el número de grupos, k , se establecen k centroides en el espacio de los datos”. (Uniovido, 2020)

“Asignación objetos a los centroides. *cada objeto de los datos es asignado a su centroide más cercano”.* (Uniovido, 2020)

Actualización centroides. *se actualiza la posición del centroide de cada grupo tomando como nuevo centroide la posición del promedio de los objetos pertenecientes a dicho grupo. Se repiten los pasos 2 y 3 hasta que los centroides no se mueven, o se mueven por debajo de una distancia umbral en cada paso.* (Uniovido, 2020)

“El algoritmo k-means soluciona un problema de optimización, siendo la función a optimizar (minimizar) la suma de las distancias cuadráticas de cada objeto al centroide de su cluster”. (Uniovido, 2020)

“Los objetos se representan con vectores reales de dimensiones (x_1, x_2, \dots, x_n) y el algoritmo k-means construye k grupos donde se minimiza la suma de distancias de los objetos, dentro de cada grupo $S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$ a su centroide”. (Uniovido, 2020)

El problema se puede formular de la siguiente forma:

$$\min_s E(\mu_i) = \min_s \sum_{i=1}^k \sum_{x_j \in s_i} \|x_j - \mu_i\|^2 \quad [11]$$

“donde S es el conjunto de datos cuyos elementos son los objetos x_j representados por vectores, donde cada uno de sus elementos representa una característica o atributo. Tendremos k grupos o clusters con su correspondiente centroide μ_i ”. (Uniovido, 2020)

“En cada actualización de los centroides, desde el punto de vista matemático, imponemos la condición necesaria de extremo a la función $E(\mu_i)$ que, para la función cuadrática (12) es” (Uniovido, 2020)

$$\frac{\partial E}{\partial \mu_i} = 0 \rightarrow \mu_i^{(t+1)} = \frac{1}{|s_i^{(t)}|} \sum_{x_j \in s_i^{(t)}} x_j \quad [12]$$

Las principales ventajas del método k-means son que es un método sencillo y rápido.

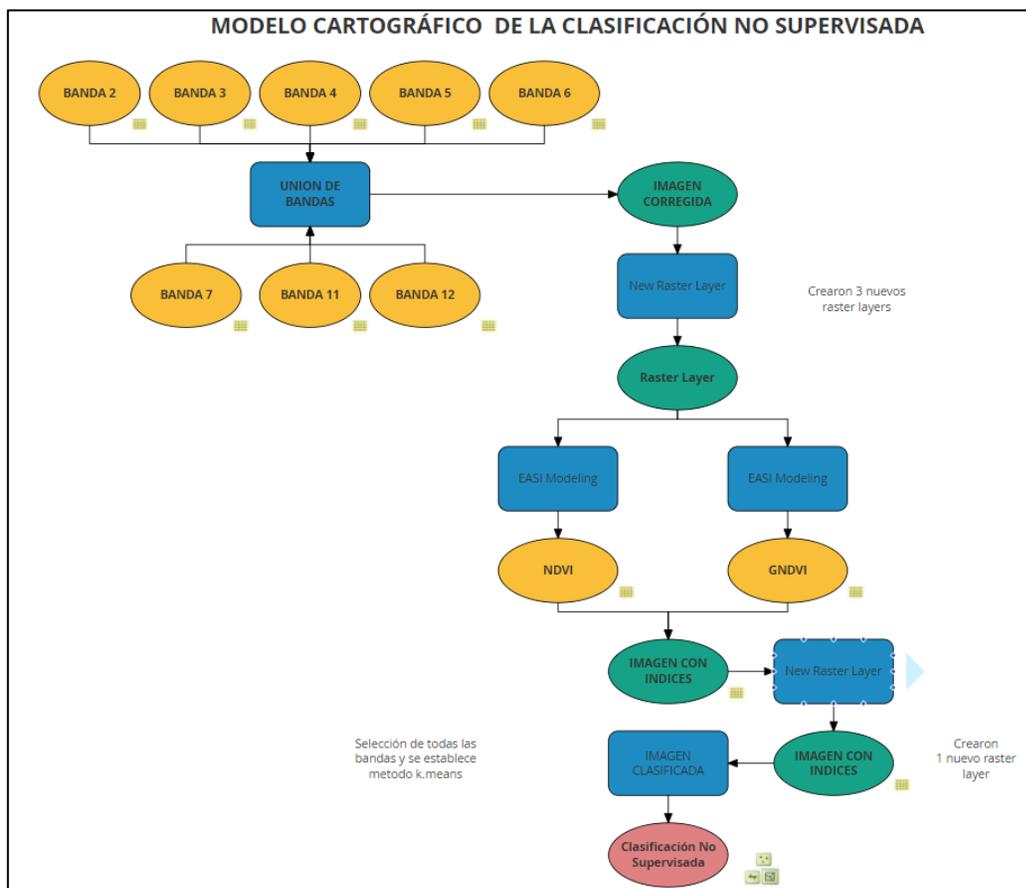
Pero es necesario decidir el valor de k y el resultado final depende de la inicialización de los centroides. En principio no converge al mínimo global sino a un mínimo local.

(Uniovido, 2020)

Como se mencionó antes no es necesario establecer una clase a priori en una clasificación no supervisada, pero es indispensable determinar el número de clases que se requiere diferenciar y dejar que las defina un procedimiento estadístico, en este caso se define el triple de las clases conocidas en el Plan de Manejo de a REEA, en este caso es el mínimo de clases son 16, como se observa en la figura 20, en el que se utilizó el algoritmo de Fuzzy K-Means que es una clase de algoritmo de agrupamiento donde cada elemento tiene un grado de pertenencia difuso a los grupos.

Figura 19

Clasificación No Supervisada



Nota. El gráfico representa el método de clasificación no supervisada y sus parámetros

Este proceso se realizó para obtener la estimación de biomasa desde el año 2017.

Fase 3 (Recopilación de datos para inventario forestal)

Toma de muestras

Se pueden hacer muestreos de diferentes formas. Existen cuatro tipos de muestreo: descriptivo, comparativo, observacional y experimental. Menciona también que los estudios e investigaciones ecológicas, el diseño de muestreo es la parte que requiere más cuidado, ya que éste establece el éxito potencial de un experimento, y de éste depende el tipo de análisis e interpretación a realizarse. (Mostacedo & Fredericksen, 2000)

“Existen varios tipos de muestreo que son muy sencillos de manejar, como el muestreo aleatorio simple, muestreo aleatorio estratificado y el muestreo sistemático” (Mostacedo & Fredericksen, 2000) , como se resume en la tabla 11.

Tabla 11

Tipos de muestreo

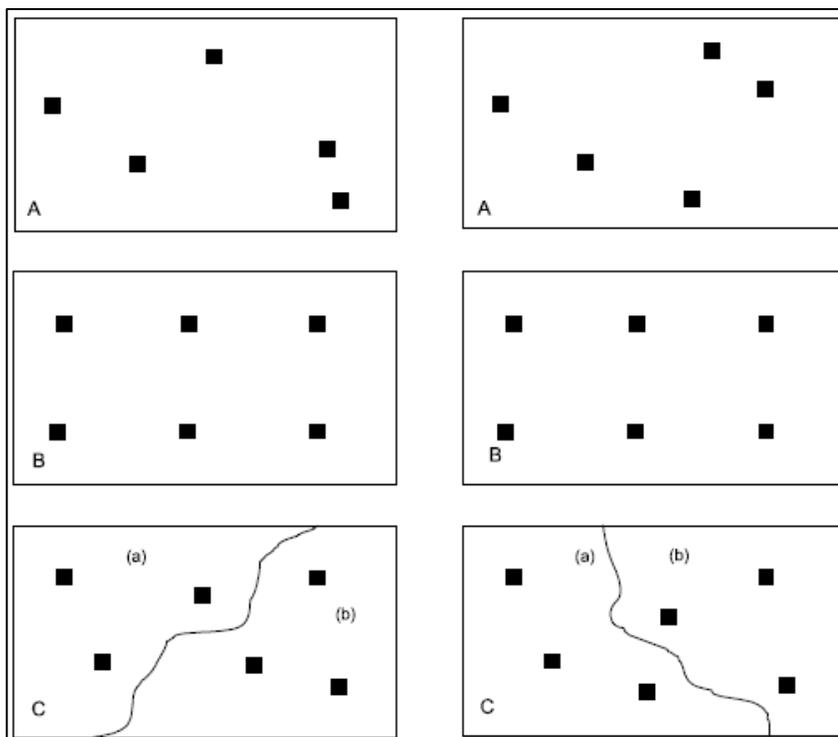
Tipo de muestreo	Descripción
Muestreo aleatorio simple	Es el muestreo más sencillo de todos. Es empleado en aquellos casos que no existe mucha información previa acerca de las características de la población que se está midiendo.
Muestreo aleatorio estratificado	En este tipo de muestreo la población en estudio se separa en subgrupos o estratos que tienen cierta homogeneidad.
Muestreo sistemático	Consiste en ubicar las muestras o unidades muestrales en un patrón regular en toda la zona de estudio. Este tipo de muestreo permite detectar variaciones espaciales en la comunidad.

Nota. Adaptada del Proyecto de Manejo Forestal Sostenible (BOLFOR), 2000

Algunos ejemplos de las formas de muestreo sistemático se muestran en la figura 21.

Figura 20

Ejemplos de muestreo



Nota. A = Muestreo aleatorio, B = Muestreo sistemático, C=Muestro estratificado aleatorio. Las letras (a) y (b) indican el tipo de estrato (sea tipo de suelo, tipo de pendiente, tipo de bosque) en los que se puede separar antes de muestrear aleatoriamente. Tomado de (Mostacedo & Fredericksen, 2000)

Se identificó los puntos de acceso dentro de la Reserva Ecológica El Ángel, para establecer el reglamento con respecto a lo necesario en la obtención de datos de campo, diseñando con ello la estructuración la hoja de campo, como se muestra en la figura 22, que permitió especificar la ubicación del parche a levantar según sus coordenadas geográficas, descripción de los datos requeridos para la estimación biomasa como son: altura de pecho y distancia al árbol.

Figura 21

Formato de hoja de campo

 HOJA DE CAMPO- LEVANTAMIENTO DE INFORMACIÓN 						
Proyecto: Estimación de biomasa de la especie <i>Polylepis</i> SP en la Reserva Ecológica El Ángel, mediante imágenes satelitales Sentinel para su conservación		Provincia: Carchi	Cantón:	Parroquia:		
Sistema de referencia:		Fecha:	Nombre del técnico:			
Parcela:	Norte:	Este:	Metodología:			
Descripción: CAP y Altura					Foto de la parcela:	
CAP	H	CAP	H	CAP		H

Nota. Este gráfico presenta el diseño la tabla para el trabajo de campo según las necesidades del proyecto de investigación.

Intensidad de muestreo en campo

“Para la toma de datos en campo, dada la difícil accesibilidad a muchos de los sectores de la Reserva Ecológica El Ángel, se prosiguió a la toma de datos en campo”. (Murillo & Camacho , 1998) detallada en la tabla 12 de los parches identificados. (figura 23).

Tabla 12

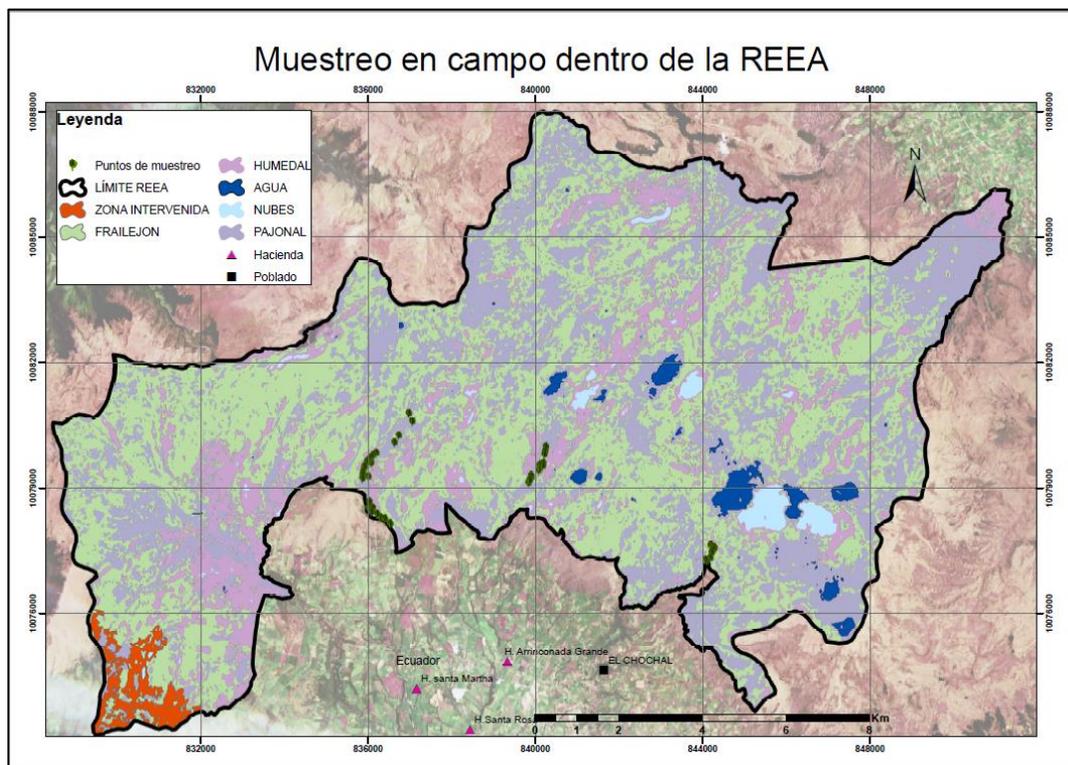
Intensidad de muestreo

Bosque	Área (ha)	Intensidad de muestreo (% del área total)	Número de parcelas por ha	Distanciamiento entre parcelas y fajas (m)
Bosque Polylepis	75,4	1	1.0	100
Bosque Curiquingue	23,4	1.5	1.5	80
Bosque Baños	5,0	4	4.0	50
Bosque Buitrera	48,0	1.5	1.5	80

Nota. La tabla muestra la intensidad de muestreo en cada parche que se pudo obtener.

Figura 22

Ubicación de muestras realizadas en campo.



Nota. El gráfico representa el muestreo en campo de la Reserva Ecológica El Ángel

Toma de puntos

Se realizó la toma de puntos con navegador GPS (Sistema de Posicionamiento Global) en la Reserva Ecológica El Ángel (Tabla 13), en áreas de interés como en las entradas de la REEA y los parches e hitos dentro de esta, como se muestra en la figura 24.

Figura 23

Toma de puntos con navegador GPS



Nota. Las fotografías fueron tomadas en Un hito dentro de la Reserva Ecológica El Ángel.

Tabla 13

Puntos de muestreo

Lugar	Punto	X	Y
Bosque Polylepis	1	168097	79236
Bosque Polylepis	2	167969	79350
Bosque Polylepis	3	167988	79427
Bosque Polylepis	4	168163	79572
Bosque Polylepis	5	168610	78129
...	...		
Bosque			
Curiquingue	53	833617	78793
Bosque			
Curiquingue	54	833606	78863
Bosque			
Curiquingue	55	833633	78925
Bosque			
Curiquingue	56	833628	78984

Nota. La tabla completa se muestra en la sección de anexos.

Recolección de información en campo para la estimación de biomasa

Para realizar el trabajo de campo se localizó los parches dentro de la REEA para el muestreo, se consideró la emergencia sanitaria en la que se encuentra en país por el COVID-19, por lo cual, se registró y ubicó las zonas dentro del área de estudio que se podía visitar para la toma de datos.

*Se realizaron cinco visitas a campo realizando el levantamiento de información de dos parches de *Polylepis sp*, mientras que el resto de la información fue obtenida de la base de datos del Ministerio del Ambiente.*

*En esta especie de *Polylepis sp*, la estratificación se estableció como una de las labores más importantes, para esta tarea se necesita dividir al bosque en rodales con características homogéneas, de tal forma se minimice variabilidad dentro de cada estrato.*

Jingo (2019) “explica que la estratificación puede realizarse considerando una amplia variedad de factores que afecten el desarrollo, es posible estratificar por su edad, grupo de especies, por las características de los suelos, por la densidad o por diferencias en condiciones fisiográficas”.

Para la estimación de biomasa mediante método basado en mediciones de campo, se recolecto información de la especie *Polylepis sp.*, de 59 parcelas, con un radio de 9 metros de radio dando un área de 250 m², como se muestra en la figura (25). En las cuales se obtuvo la circunferencia a nivel de pecho (CAP) y la altura del árbol de 1896 individuos con características similares.

Tipos de muestreo de vegetación

Según Mostacedo & Frederickse (2000) n, “para que un muestreo sea lo suficientemente característico y confiable, debe estar bien diseñado. Esto quiere decir que la muestra a tomarse debe considerar la mayor variabilidad existente en toda una población estadística”.

“La representatividad está dada por el número de réplicas a tomarse en cuenta y por la comprensión de los factores que pueden influir en una determinada variable”.

(Mostacedo & Fredericksen, 2000)

Para esto existen diferentes tipos de muestreo:

- Transectos variables

- Cuadrantes
- Punto centro cuadrado
- Líneas de intercepción
- Puntos de intercepción
- Muestreo fitosociológico

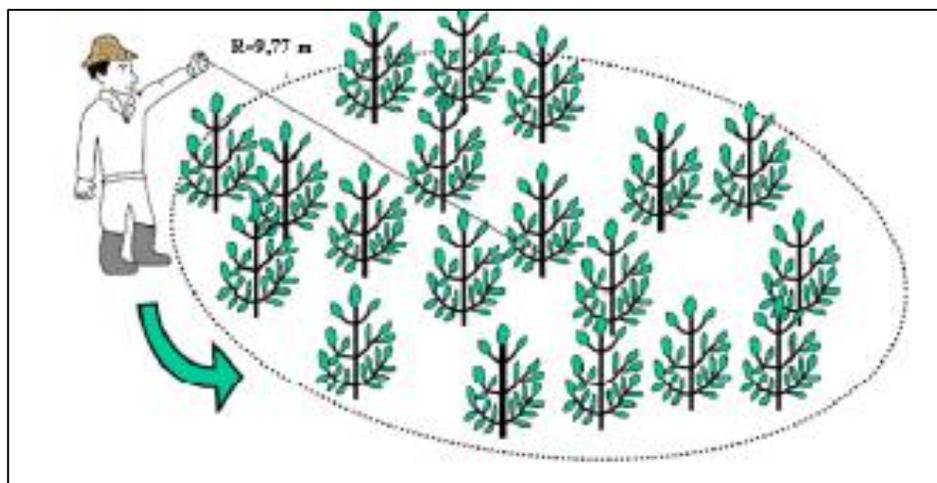
En referencia al tema de estudio vamos a concentrarnos en el muestreo de Transectos variables.

Este método es una variante de los Transectos y fue propuesto por Foster et al. (1995) para realizar estimaciones rápidas de la vegetación que tiene como objetivo muestrear un número determinado de individuos a lo largo de un transecto con un ancho determinado y el largo definido por el número estándar de individuos a muestrearse.

Con este método, se pueden muestrear todas las plantas o clases de plantas, separadas por formas de vida (árboles, arbustos). Para considerar el número de plantas a muestrear, se debe tomar en cuenta que usualmente es mejor hacer muchos muestreos pequeños que pocos muestreos grandes. El ancho del transecto es variable y depende de la clase de plantas y la densidad de individuos. (Mostacedo & Fredericksen, 2000)

Figura 24

Ejemplo de transecto variable



Nota. El gráfico representa el método transecto variable, obtenido de Manual de Métodos Básicos de Muestreo y Análisis en Ecología Vegetal.

“Se debe ubicar puntos a través de una línea (camino, picadas, línea imaginaria). En esta línea, cada distancia (50 o 10 m) o al azar, debemos localizar un punto a partir del cual se hará el muestreo de la vegetación”. (Mostacedo & Fredericksen, 2000)

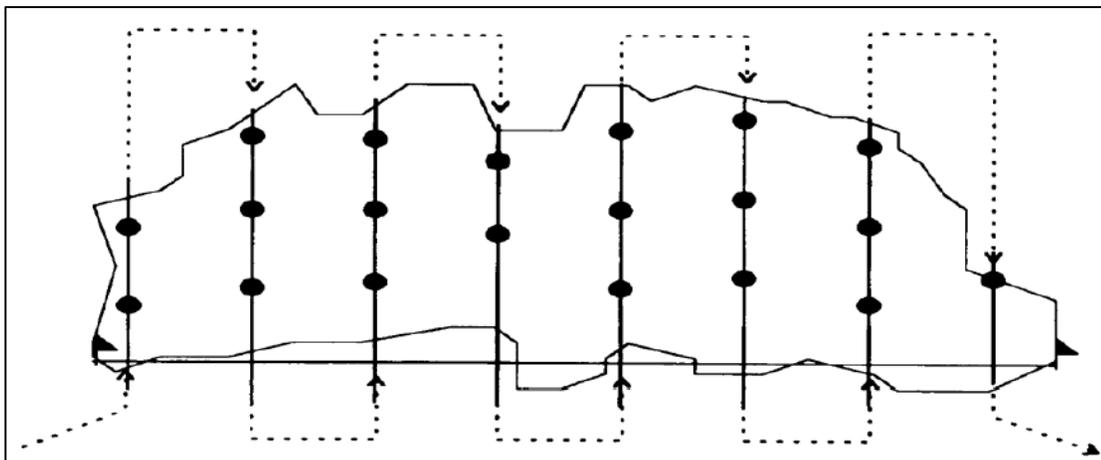
Se deben intersecar dos líneas imaginarias, con las cuales se obtienen 4 cuadrantes con ángulos de 90°. Al final, en cada punto se consideran solo 4 árboles, de los cuales se pueden tomar datos adicionales como especie, altura, DAP, forma de copa e infestación de bejucos. (Mostacedo & Fredericksen, 2000)

El sistema de muestreo es del tipo sistemático utilizando parcelas circulares de tamaño fijo, ubicadas a lo largo de fajas de muestreo. A partir de esta primera parcela ubicada en forma aleatoria, se continúa con el resto del muestreo en forma sistemática. Una vez definida la estratificación de la plantación, según sea requerido, se procede a determinar la ubicación de las parcelas y la intensidad de muestreo. Las parcelas circulares han demostrado su eficiencia (menor efecto de borde), facilidad de instalación y costos con respecto a otros tipos de parcelas. Las parcelas se ubican a lo largo de fajas o transectos que atraviesan la plantación, como se observa en la figura 26. La

distancia entre estas parcelas dentro de las fajas, así como la distancia entre fajas debe ser la misma (AKÇA, 1993)

Figura 25

Ubicación de parcelas



Nota. El gráfico representa un ejemplo de la ubicación de parcelas dentro de una plantación, obtenido de Forest Inventory.

El muestreo de árboles en pie vivos y muertos se realizó en parcela preferiblemente circular de radio fijo de 9 metros. Se debe asegurar que se muestreen al menos 15 pies vivos de diámetro normal o igual a 17,5 cm. Existen los pies mayores muertos que pueden estar en pie enteros, con o sin ramas parcialmente en el suelo y generalmente en pie, incluyendo también los pies descabezados y estacas que tengan al menos 1,30 metros de altura. (Life Red Bosques , 2017)

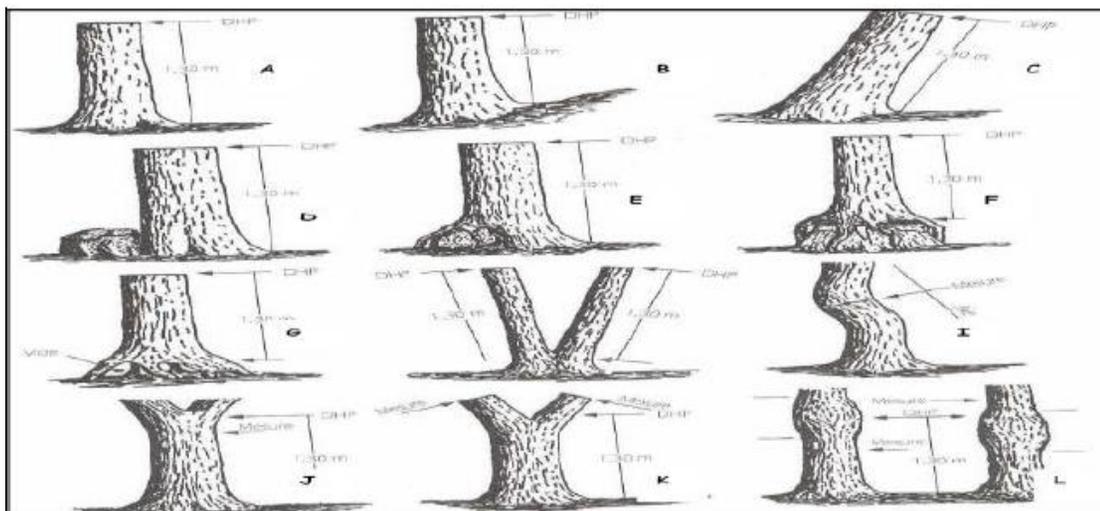
Su muestrea en el radio de parcela determinada según la metodología de muestreo de árboles vivos. Es conveniente hacer el muestreo de los pies vivos al mismo tiempo que los muertos en pie y utilizar la misma numeración. Para árboles con más de un pie que crecen del mismo tocón o pies bifurcados por debajo de 1,30 m de altura, como se muestra en la figura 27, se considera cada uno de los pies por separado. (Life Red Bosques , 2017)

“Al medir se obtiene el perímetro o circunferencia (CAP) que fue convertido en DAP” (Villareal, 2004) a partir de la ecuación (13).

$$DAP = \frac{CAP}{\pi} \quad [13]$$

Figura 26

Medidas de DAP en los tipos de pie



Nota. El gráfico representa como se toman las medidas de DAP en cada pie de árbol.

Obtenido de Manual de campo para la identificación de rodales de referencia-

Reconocimiento con levantamiento de parcelas de campo.

La metodología para el muestreo de árboles vivos y muertos es la siguiente:

Realizar un conteo aproximado de los 15-20 árboles vivos de mayor o igual diámetro que el de referencia y más próximos al centro de la parcela para medir el valor del radio o lado, según la forma, de la parcela. Este radio, en parcelas circulares, estará entre 15 y 25 m. En caso que no se llegue al mínimo de pies requerido se aumentará el radio de muestreo hasta alcanzar el tamaño muestral requerido a continuación medir para cada pie, con un diámetro normal mayor o igual de 17,5 cm, la distancia al centro de la parcela para determinar si hay que medirlo. Usar el punto central del pie a la altura

del diámetro normal (a la altura de 130 cm) para determinar si el árbol entra o no en la parcela y medir para registrar todos los atributos del pie. (Life Red Bosques , 2017)

“Al finalizar el muestreo de árboles vivos, considerando el valor del segundo radio determinado antes de su registro, no se hubiera alcanzado la cifra de 15-20 árboles, se procederá a ampliar el tamaño de muestreo hasta conseguir la cantidad requerida”. (Life Red Bosques , 2017)

Figura 27

Establecimientos de parcelas



Nota. El gráfico muestra la manera de cómo se establecieron las parcelas en cada parche.

Consecutivamente se ingresó las coordenadas al GPS para luego ubicar en el campo y proceder a establecer las unidades de muestreo (PPM) Parcelas permanentes de monitoreo de 250 m^2 de forma circular. Se procede a tomar los datos de las variables de estudio CAP a 1,30m., desde el suelo y la altura de los árboles en pie.

Para medir se utilizó una cinta métrica, flexible a los 1,30 m de altura para individuo (figura 28), se obtuvo el perímetro o circunferencia (CAP) que fue convertido en DAP a partir de la fórmula (13) de Villareal et al. (2004).

Figura 28

Toma de medida de diámetro de altura de pecho



Nota. En el grafico se muestra la manera en la que se tomaron datos del diámetro de altura de pecho DAP, con la ayuda de una cinta métrica a 1,30 m de altura.

Distanciamiento entre parcelas

El distanciamiento entre parcelas y fajas se obtiene con ayuda de la ecuación 14:

$$Distanciamiento = \sqrt{\frac{\text{Área}}{\text{No.parcelas}}} \quad [14]$$

Se debe tener especial cuidado con la ubicación exacta de las parcelas en el campo. Cuando una parcela corresponda con un terreno sin árboles, cualquiera que sea la causa, deberá instalarse en ese sitio y la observación será de “0” árboles. En el formulario se deberá anotar las razones visibles que expliquen la

ausencia de árboles. Este tipo de información es la que precisamente permitirá posteriormente estimar el área efectiva plantada. (Murillo & Camacho , 1998)

Como se observa en la figura 29, si hay árboles en cada parcela muestreada.

Fase 4 (Estimación de biomasa forestal mediante ecuaciones alométricas)

Estimación de la biomasa área

Para estimar la biomasa aérea según el muestreo realizada en campo, se logro el reconocimiento de los diferentes parches de *Polylepis sp* dentro de la Reserva Ecológica El Ángel.

Entre cada parche de la tabla 14, se puede observar los nombres de cada uno, con su respectivo diámetro promediado en centímetros y el cálculo de DAP realizado según la formula (14), al igual que su respectiva altura calculada con trigonometría.

Tabla 14

Datos promedio de los parches Polylepis.

Parche	Área (ha)	Porcentaje (%)	Altura(m)	Diámetro cm (DAP)
Bosque Polylepis	78,82	28,5	21,37	12,45
Bosque Baños	5,31	1,92	15,69	5,74
Bosque La Buitrera	47,76	17,27	18,30	6,25
Bosque Curiquingue	27,41	9,87	15,30	5,47
Bosque Mal Paso	117,3	42,42	-	-
TOTAL	276,5	100,00		

Nota. La presente tabla muestra las áreas y alturas promedio de la especie *Polylepis sp.*, en los diferentes parches.

Por las características de las especies muestreadas en campo se utilizó el modelo alométrico propuesto por Zapana (2016) con los parámetros propuestos por Lerma & Orjuela (2014), “que son para diámetros entre 5 a 67 centímetros de DAP y para una altura entre 4,22 a 25,5 metros, especifica que no debe ser utilizado para valores superiores o inferiores a los estipulados evitando un sesgo en los resultados”.

La ecuación 15 de Zapana toma en cuenta los parámetros de DAP y altura del árbol.

$$\text{BIOMASA} = 62,14888556 * \text{DAP}^{1,36161} * \text{HT}^{1,31511} \quad [15]$$

Dónde

DAP: Diámetro a la altura del pecho en m

HT: Altura total (m)

BT: Biomasa aérea total (kg/árbol)

Fase 5 (Estimación de biomasa forestal mediante índices de vegetación)

Ecuación de correlación

La relación entre los niveles digitales del cálculo de los índices NDVI y GNDVI con la biomasa de cada una de los parches de la Reserva Ecológica El Ángel, se obtiene una ecuación de regresión, donde existe la relación entre ambas variables. Por lo que se hace importante plantear la ecuación de correlación polinómica, fórmula 16, que considere como variable dependiente las toneladas de biomasa por hectárea pertenecientes a cada tipo de parche, y como variable independiente a los niveles digitales de los índices de vegetación NDVI y GNDVI. (Cortes, 2015)

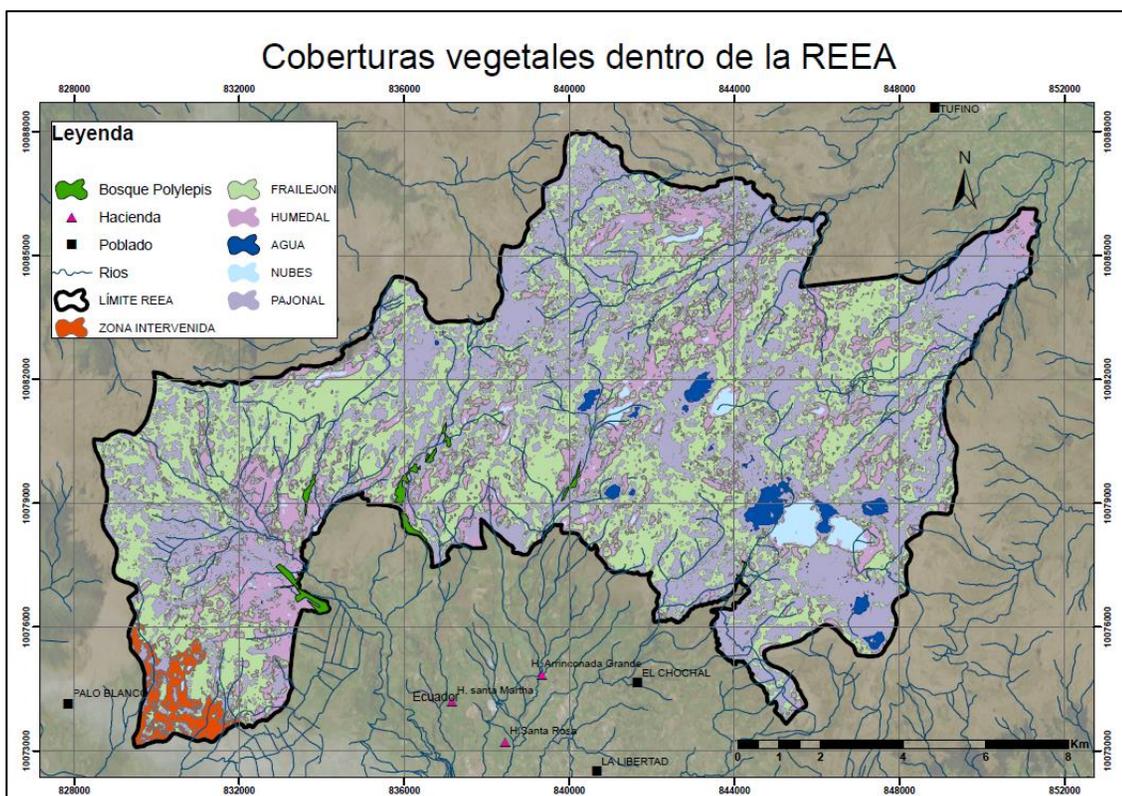
$$y = ax^2 + bx + c \quad (16)$$

Biomasa aérea total

Ya con la ecuación de regresión generada se reemplazaron los valores de los niveles digitales del NDVI de cada parche de la Reserva Ecológica El Ángel para obtener la biomasa por hectárea de la totalidad de la especie.

Figura 29

Coberturas vegetales dentro de la REEA



Nota. En el presente gráfico se identifican las coberturas de la reserva Ecológica El Ángel

Como se observa en la figura 30 no se tomó en cuenta la vegetación arbustiva dentro de la Reserva Ecológica El Ángel.

Por lo tanto, el total de todos los valores de toneladas de biomasa por hectárea obtenidos con la ecuación se suma y se calcula el valor aproximado de biomasa que existe en toda la REEA.

Fase 6 (Comparación y validación de resultados)

Se realizó un análisis de resultados con el coeficiente de correlación para determinar el índice de vegetación más adecuado para la estimación de biomasa. Para lo cual se hizo una comparación de la biomasa obtenida en el muestreo de campo con la biomasa obtenida con los índices de vegetación NDVI y GNDVI.

En estadística, es una medida de relación entre dos variables cuantitativas, este índice tiene un problema debido a que su valor depende de las unidades de medida de las dos variables, de esta manera si un valor varía en su escala de medida esto produce que cambie el valor de la covarianza. Donde si R es igual a 1, hay una correlación positiva alta, donde hay una dependencia alta entre las dos variables, si r va desde 0 a 1, existe una correlación positiva y si R es igual a 0, no existe relación directa o lineal entre las variables o sea son independientes. (Palmer, Jiménez, & Montaña, 2001)

“El coeficiente de determinación es la proporción de la varianza total de la variable explicada por la regresión. El coeficiente de determinación, también llamado R cuadrado, refleja la bondad del ajuste de un modelo a la variable que pretender explicar”. (López, 2017)

Según la siguiente tabla 15.

Tabla 15

Bondad de ajuste en función del valor

Bondad del Ajuste	Valor de R
Correlación positiva o directa perfecta	>0.85
Correlación positiva	0.5-0.85
Correlación débil	0.4-0.5
Correlación negativa	0.3-0.4

Bondad del Ajuste	Valor de R
Muy malo	<0.3

Nota. La tabla representa los rangos de bondad del ajuste del coeficiente de determinación.

CAPITULO IV

Análisis y discusión de los resultados

En el presente capítulo se presentan los resultados obtenidos de las seis fases del capítulo de metodología.

Identificación de Coberturas Vegetales

Con la información obtenida del Plan de Manejo de la Reserva Ecológica El Ángel e información del MAGAP se identificaron las coberturas vegetales dentro de la REEA en el año 2013, para así realizar una comparación de los valores de estas coberturas con ayuda de las imágenes satelitales Sentinel 2, mismas que se utilizaron para el reconocimiento de bosque *Polylepis Sp.*

Tabla 16

Cobertura vegetal de la REEA en el periodo 2013-2020

Cobertura vegetal de la REEA	Superficie 2013 (ha)	Porcentaje	Superficie 2020 (ha)	Porcentaje
Páramo de frailejones	14368	89,95%	14971,59	87,82%
Páramo de almohadillas	507	3,17%	763,49	4,48%
Bosque siempre verde montano alto	94	0,59%	-	-
Áreas intervenidas	943	5,90%	957	5,61%

Cobertura vegetal de la REEA	Superficie 2013 (ha)	Porcentaje	Superficie 2020 (ha)	Porcentaje
Cuerpos de agua	62	0,39%	98,57	0,58%
Páramo lacustre	-	-	-	-
Plantaciones forestales	-	-	-	-
Bosque Polylepis	-	-	258	1,51%
Total	15974	100%	17048,65	100%

Nota. La presente tabla representa la superficie de las coberturas dentro de la REEA en los años 2013-2020

En el area de trabajo se realizó una clasificación de coberturas como se muestra en la tabla 16, comparando las superficies del año 2013 y el año 2020, aquí podemos observar que las coberturas de páramo de almohadillas, áreas intervenidas y bosque polylepis tuvieron un incremento en sus superficies en 7 años, mientras que páramo de frailejones disminuyen su valor. Para la validación de esta clasificación se utilizó el software ENVI con licencia de un mes, que permitió validar los porcentajes de la clasificación no supervisada, obteniendo el porcentaje de pixeles por cada clase, obteniendo un reporte de la validación, como se muestra en la tabla 17.

Tabla 17

Validación de pixeles en software ENVI con licencia

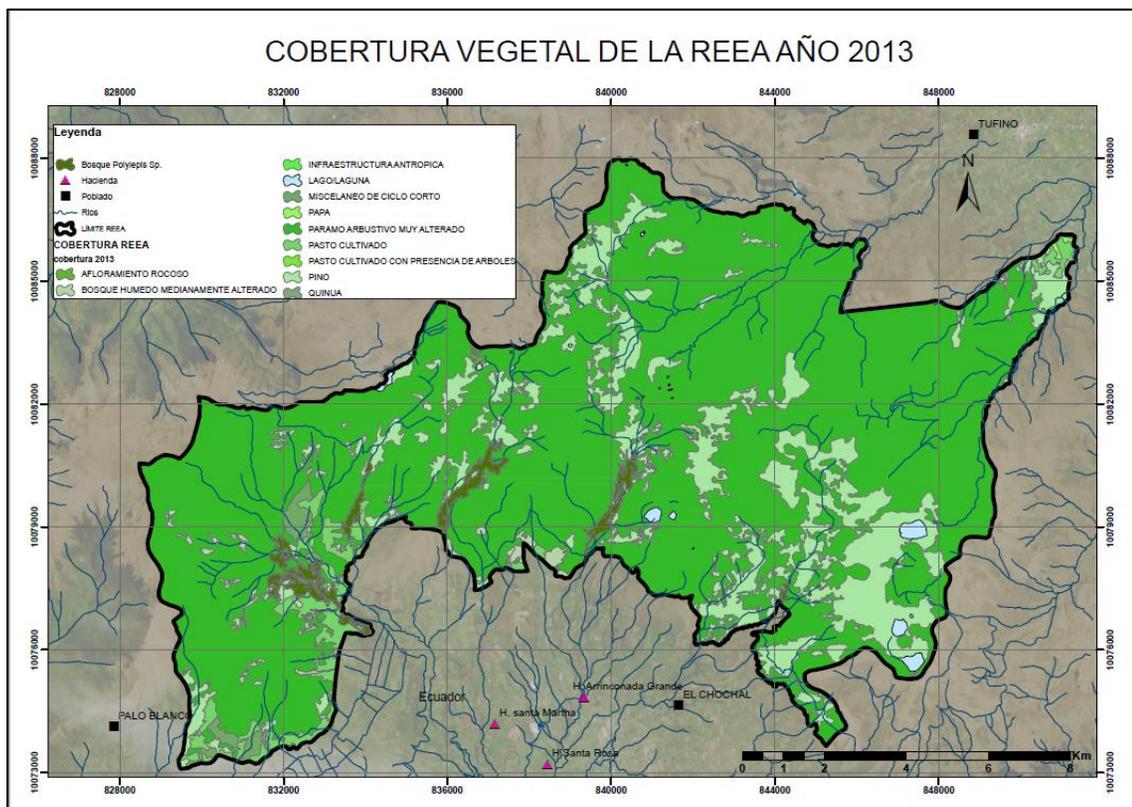
N°	Clase	Pixeles	% en la imagen
1	Polylepis Sp.	74997,032	2,2
2	Cuerpos de agua	36816,7248	1,08

N°	Clase	Pixeles	% en la imagen
4	Almohadillas	208628,1072	6,12
5	Área intervenida	281238,87	8,25
6	Frailejones	2807275,266	82,35
Total		3408956	100

Nota. La presente tabla indica la validación de datos de la clasificación no supervisada. Nos indica que el porcentaje de bosque *Polylepis sp.*, esta dentro de lo indicado con la clasificación realizada, validando los datos de superficies.

Figura 30

Clasificación de Coberturas Vegetales de la REEA en el año 2013



Nota. El gráfico representa la cobertura vegetal del año 2013 proporcionada por la Reserva Ecológica el Ángel. Fuente: MAE,2013. Modificado de MAE

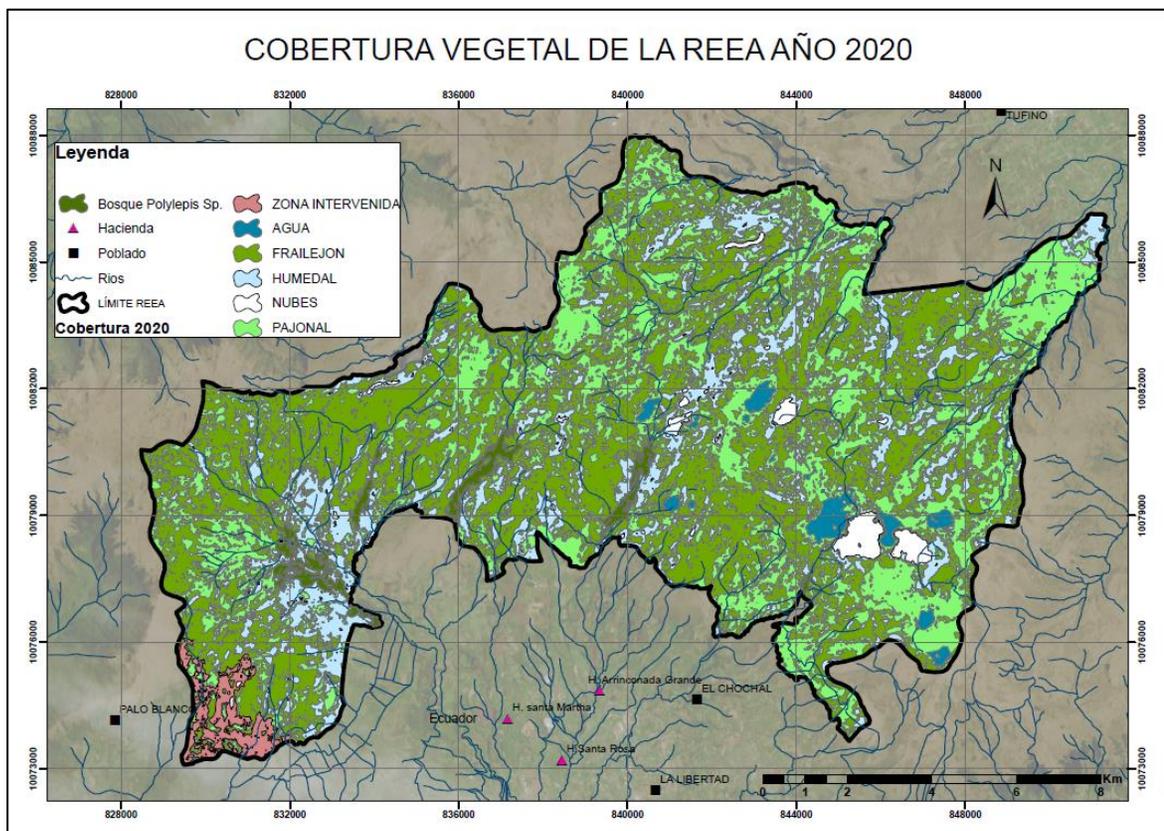
En la clasificación de la cobertura vegetal en el año 2013, (figura 31) que fue proporcionada por la Reserva Ecológica El Ángel no consta un campo para la especie estudiada *Polylepis Sp.*, únicamente consta el Bosque húmedo medianamente alterado.

Clasificación No Supervisada

En la cobertura Vegetal en el año 2020 (figura 32) que se obtiene mediante la clasificación no supervisada se puede observar las diferentes zonas donde existe la especie *Polylepis sp.*, con una extensión de 258 ha aproximadamente en el respectivo año.

Figura 31

Clasificación de Coberturas Vegetales de la REEA en el periodo 2020



Nota. El gráfico representa la cobertura vegetal del año 2020 obtenida mediante la clasificación no supervisada.

Para cada año desde el 2017 se realizó una clasificación con el fin de obtener las hectáreas de *Polylepis sp.*, que proporcionen información sobre el crecimiento o pérdida de biomasa en esos años. En la tabla 18 se puede observar el crecimiento de los parches dentro de la REEA.

Tabla 18

Hectáreas por año de parches de Polylepis sp.

Parche de Bosque	2017	2018	2019	2020
Bosque Mal Paso (ha)	101,58	102,55	104,13	117,3
Bosque Curiquingue (ha)	21,15	22,73	22,75	27,31
Bosque Polylepis	70,28	73,47	79,22	78,82
Bosque Buitrera (ha)	47,75	47,77	48,74	47,76
Bosque Baños (ha)	4,56	5,33	4,85	5,31
Total de hectáreas	245,32	251,85	259,69	276,5

Nota. La presente tabla describe las hectáreas de cada año.

Se determinó una extensión total mediante la clasificación no supervisada para los bosques altoandinos de *Polylepis sp.* en La Reserva Ecológica El Ángel al año 2017 de 245,32 ha.

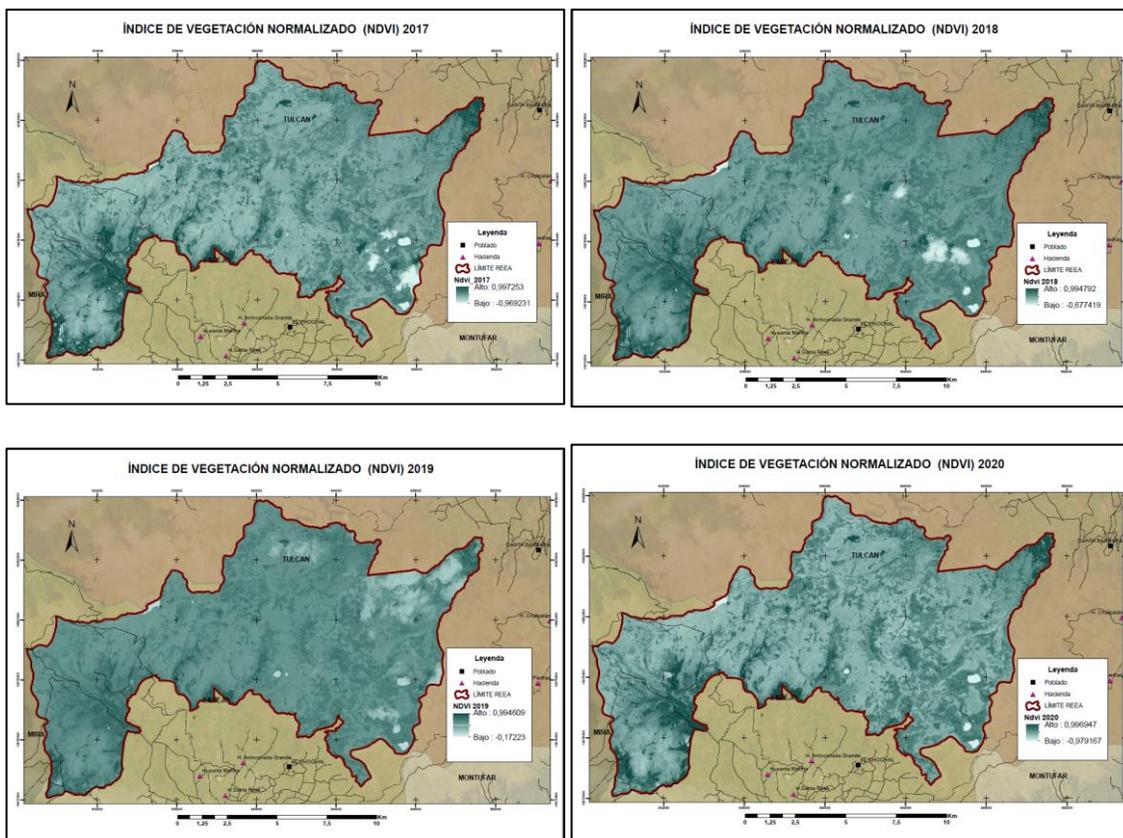
Siendo un área mayor de 276,5 ha al año 2020. El bosque de esta especie tiene un crecimiento del 2,66% en el año 2018, del 3.1% en el año 2019 y del 6,8% en el año 2020.

Índice de Vegetación NDVI

Aplicando la metodología descrita en el capítulo de metodología, se representa una escala de rangos en los que se encuentra el índice de vegetación normalizado NDVI, de los años 2017, 2018, 2019 y 2020, perteneciente a la REEA. (figura 33)

Figura 32

Índices de Vegetación Normalizado



Nota. Indica los índices de Vegetación Normalizados por año donde las figuras representan 1) año 2017, 2) año 2018, 3) año 2019 y 4) año 2020

Los valores de NDVI obtenidos de los años 2017 al 2020 se encuentran detallados en la tabla 19.

Tabla 19

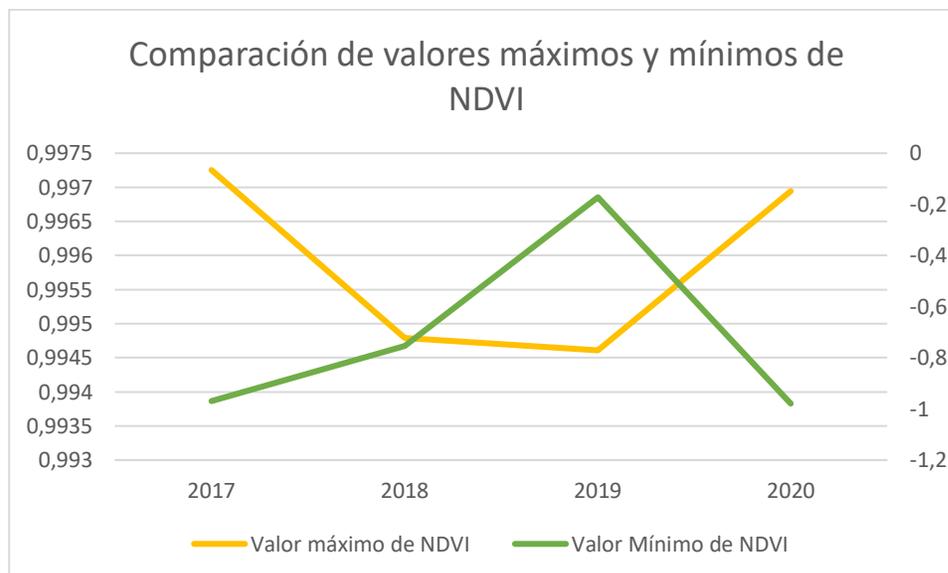
Escala de valores de NDVI

AÑOS	Valor máximo de NDVI	Valor Mínimo de NDVI
2017	0,997253	-0,969231
2018	0,994792	-0,754717
2019	0,994609	-0,17223
2020	0,996947	-0,979167

Nota. En la presente tabla se observa los límites de NDVI desde el 2017 al 2020

Figura 33

Comparación de valores máximos y mínimos de NDVI



Nota. La presente gráfica representa la comparación entre valores de niveles digitales máximos y mínimos de NDVI.

Para su interpretación están dentro del rango establecido por este índice NDVI, donde representa que los valores en el rango de -1 a 0 existe ausencia de vigorosidad, ósea, es suelo desnudo, mientras que en el rango de 0 a 0,33 muestra una vegetación poco vigorosa, en el rango de 0,33 a 0,66 muestra una vigorosidad media en la vegetación y el rango desde 0,66 a 1 representa alta vigorosidad de la vegetación.

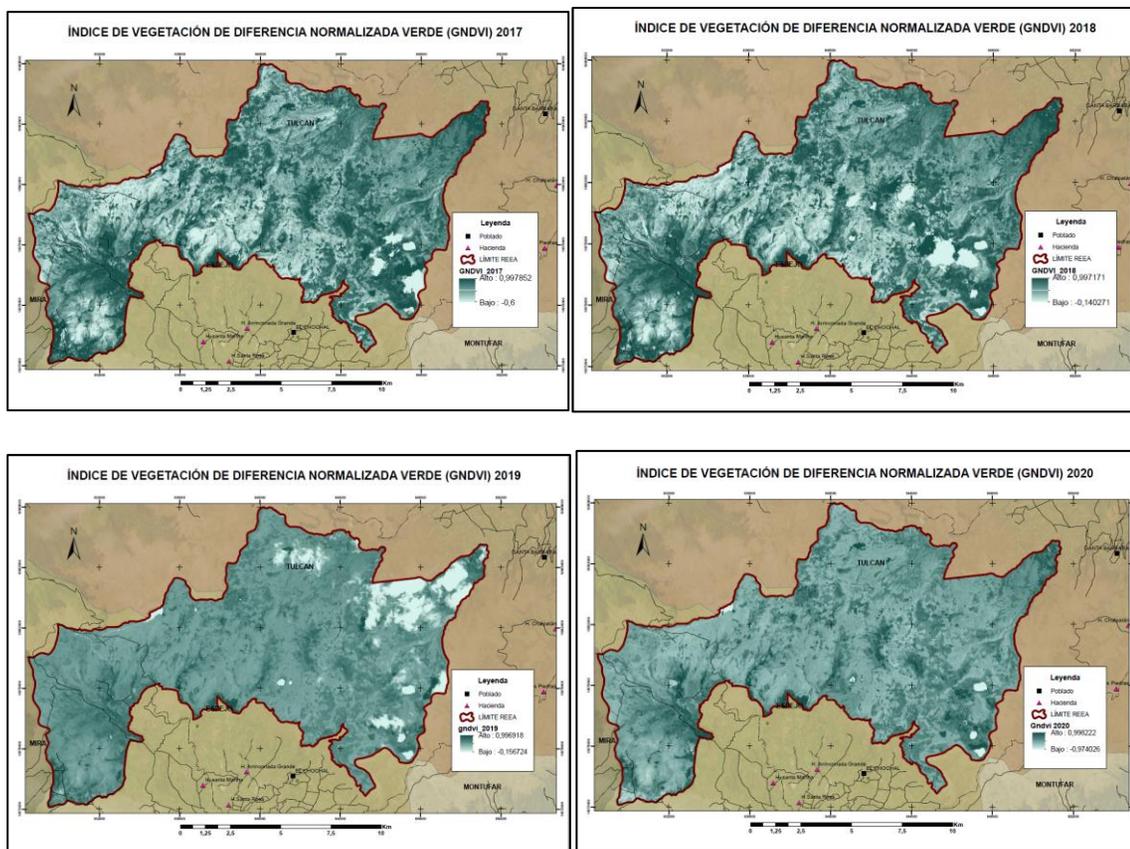
Como se observa en la figura 34 los valores máximos de NDVI muestran que hay un decrecimiento de vigorosidad en los años 2018 y 2019, para una posterior recuperación en el año 2020. Tenemos la misma tendencia en los valores mínimos de NDVI, existiendo una mayor diferencia en los años 2018 y 2019.

Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada Verde (GNDVI)

Aplicando la metodología descrita en el Capítulo III, se representa una escala de rangos en los que se encuentra el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada Verde GNDVI, de los años 2017, 2018, 2019 y 2020, perteneciente a la REEA. (figura 35)

Figura 34

Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada Verde



Nota. Indica los Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada Verde GNDVI por año donde las figuras representan 1) año 2017, 2) año 2018, 3) año 2019 y 4) año 2020

Los valores de NDVI obtenidos de los años 2017 al 2020 se encuentran detallados en la tabla 20.

Tabla 20

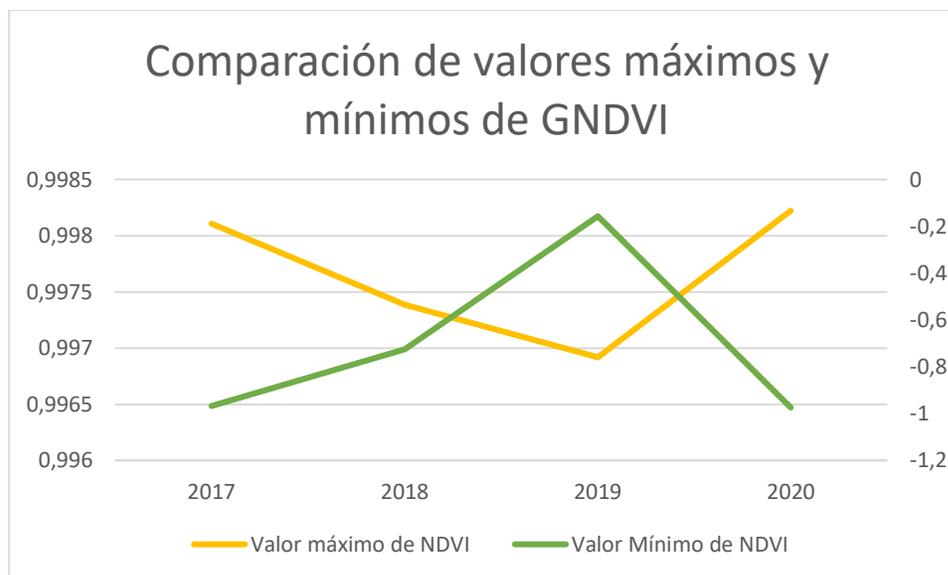
Escala de valores obtenidos de GNDVI

Años	Valor máximo de GNDVI	Valor Mínimo de GNDVI
2017	0,998108	-0,96875
2018	0,997386	-0,726316
2019	0,996918	-0,156724
2020	0,998222	-0.974026

Nota. En la presente tabla se observa los límites de GNDVI desde el 2017 al 2020

Figura 35

Comparación de valores máximos y mínimos de GNDVI



Nota. La presente gráfica representa la comparación entre valores de niveles digitales máximos y mínimos de GNDVI.

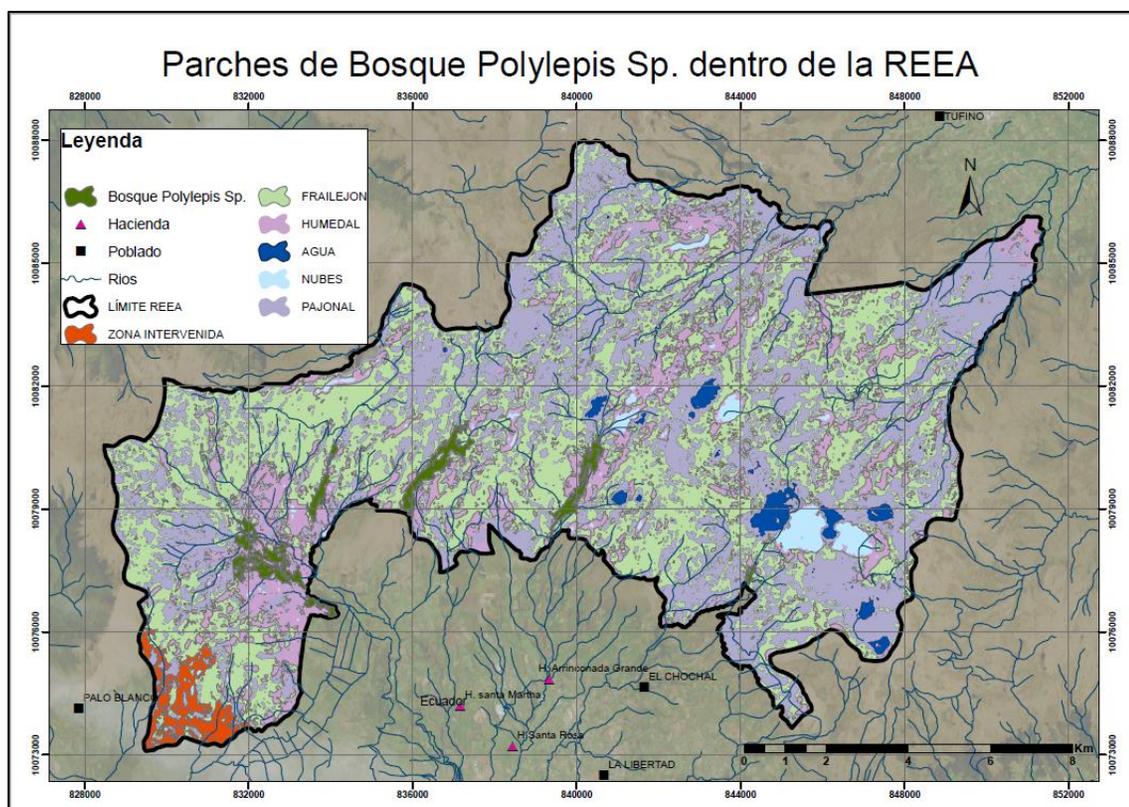
Como se observa en la figura 36 los valores máximos de GNDVI muestran que hay un decrecimiento de vigorosidad en los años 2018 y 2019, para una posterior recuperación en el año 2020. Tenemos la misma tendencia en los valores mínimos de NDVI, existiendo una mayor diferencia en los años 2018 y 2019.

Identificación de parches de bosque Polylepis en la Reserva Ecológica El Ángel

En la Reserva Ecológica El Ángel se determinaron 5 parches de bosque Polylepis como se muestra en la figura 37.

Figura 36

Parches de Bosque Polylepis en la Reserva Ecológica El Ángel



Nota. Mapa de Bosque Polylepis en la REEA, e izquierda a derecha, se los conoce como: Bosque El Mal Paso, Bosque Curiquingue, Bosque Polylepis, Bosque La Buitrera y Bosque Baños.

Biomasa aérea del bosque Polylepis Sp en la REEA

Una vez realizado el trabajo de campo, se obtuvo el DAP y la altura promedio de la especie estudiada; en el caso de la Reserva Ecológica El Ángel, se logró identificar 5 zonas de esta especie. Con la información obtenida se calculó la biomasa aérea. (tabla 21)

Tabla 21

Datos recolectados en campo para la especie Polylepis sp.

Parcela	Parche	X	Y	Altura	Diámetro (cm) DAP	Diámetro real (DAP/PI)
1	Polylepis	168097	79236	6,599	87,552	27,869
2	Polylepis	167969	79350	6,615	54,330	17,294
3	Bosque Polylepis	167988	79427	6,935	83,478	26,572
4	Bosque Polylepis	168163	79572	6,908	73,316	23,390
5	Bosque Polylepis	168610	78129	8,357	118,857	37,833
	∴ continua					
52	Curiquingue	833602	78722	5,280	44,800	14,260
53	Curiquingue	833617	78793	5,150	35,575	11,324
54	Curiquingue	833606	78863	5,426	61,037	19,429
55	Curiquingue	833633	78925	5,324	47,588	15,148
56	Curiquingue	833628	78984	4,609	26,065	8,297

Nota. La tabla completa se encuentra en Anexos

Aplicando la ecuación (15), mediante la metodología de Zapana, que se encuentra en el capítulo de metodología se tuvo la biomasa aérea de las zonas donde se encuentra la especie *Polylepis sp.*

1	Polylepis	168097	79236	0,85	0,82	0,82	0,82
2	Polylepis	167969	79350	0,86	0,84	0,84	0,83
3	Polylepis	167988	79427	0,86	0,82	0,83	0,83
4	Polylepis	168163	79572	0,81	0,77	0,81	0,83
5	Polylepis	168610	78129	0,81	0,7	0,77	0,8

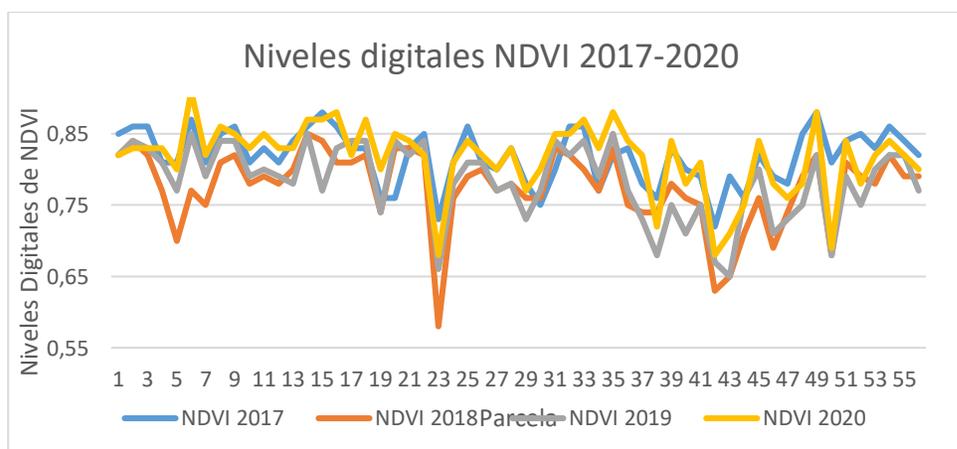
: continua

51	Curiquingue	833586	79281	0,84	0,81	0,79	0,84
52	Curiquingue	833602	78722	0,85	0,79	0,75	0,78
53	Curiquingue	833617	78793	0,83	0,78	0,8	0,82
54	Curiquingue	833606	78863	0,86	0,82	0,82	0,84
55	Curiquingue	833633	78925	0,84	0,79	0,82	0,82
56	Curiquingue	833628	78984	0,82	0,79	0,77	0,8

Nota. La tabla completa la encuentra en anexos.

Figura 37

Gráfico de tendencia de los niveles digitales de NDVI 2017-2020



Nota. La grafica representa las líneas de tendencia de los niveles digitales de NDVI de los años 2017-2020.

En la figura 38, se observa la misma tendencia en los niveles digitales de NDVI en los años 2018, 2019 y 2020, siendo en el año 2017 la mayor diferencia. Donde los valores más altos se observan en la parcela 6 y parcela 48, pertenecientes a los parches del bosque *Polylepis* y parche de bosque Curiquingue respectivamente, estos representan una mayor vigorosidad en las parcelas muestreadas de la especie *Polylepis* sp., mientras que la parcela 23 y parcela 42, pertenecientes a los parches del Bosque Baños, tienen los valores más bajos.

Tabla 24

Datos de Biomasa por año con el índice GNDVI de cada parche en la REEA

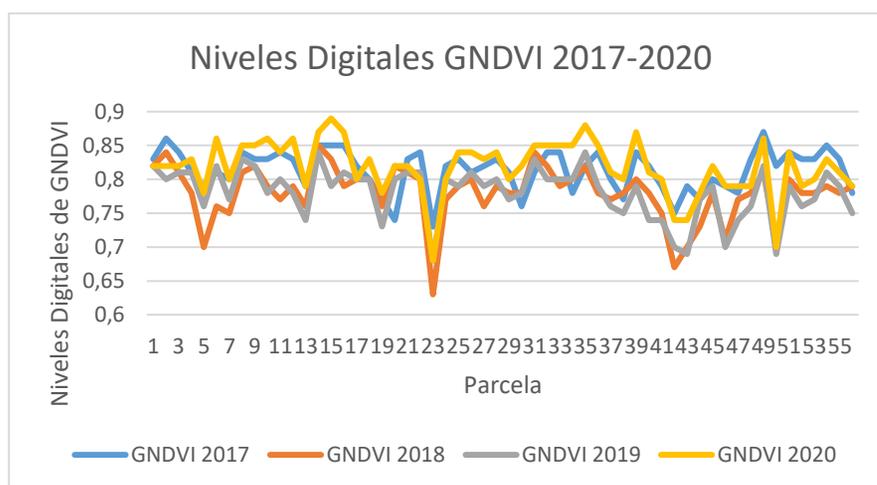
Parcela	Parche	X	Y	GNDVI	GNDVI	GNDVI	GNDVI
				2017	2018	2019	2020
1	Polylepis	168097	79236	0,83	0,82	0,82	0,82
2	Polylepis	167969	79350	0,86	0,84	0,8	0,82
3	Polylepis	167988	79427	0,84	0,81	0,81	0,82
4	Polylepis	168163	79572	0,81	0,78	0,81	0,83
5	Polylepis	168610	78129	0,79	0,7	0,76	0,78
6	Polylepis	168122	78642	0,81	0,76	0,82	0,86
⋮	Continúa						
51	Curiquingue	833586	79281	0,84	0,8	0,79	0,84
52	Curiquingue	833602	78722	0,83	0,78	0,76	0,79
53	Curiquingue	833617	78793	0,83	0,78	0,77	0,8

Parcela	Parche	X	Y	GNDVI 2017	GNDVI 2018	GNDVI 2019	GNDVI 2020
54	Curiquingue	833606	78863	0,85	0,79	0,81	0,83
55	Curiquingue	833633	78925	0,83	0,78	0,79	0,81
56	Curiquingue	833628	78984	0,78	0,79	0,75	0,79

Nota. La tabla completa se encuentra en anexos

Figura 38

Gráfico de tendencia de los niveles digitales de NDVI 2017-2020



Nota. La grafica representa las líneas de tendencia de los niveles digitales de GNDVI de los años 2017-2020.

En la figura 39, se observa la misma tendencia en los niveles digitales de GNDVI en los años 2018, 2019 y 2020, siendo en el año 2017 la mayor diferencia. Donde los valores más altos se observan en la parcela 15 y parcela 35, pertenecientes a los parches del bosque *Polylepis* y parche de bosque *Buitrera* respectivamente, estos representan una mayor vigorosidad en las parcelas muestreadas de la especie *Polylepis sp.*, mientras que la parcela 23 y parcela 42, pertenecientes a los parches del Bosque Baños, tienen los valores más bajos.

Ecuación de regresión

Las ecuaciones de regresión generadas se presentan a continuación con los datos obtenidos en el apartado de Biomasa aérea del bosque *Polylepis Sp* en la REEA, se obtuvo ecuaciones polinómicas ya que es la mejor manera de representar el coeficiente de Pearson, en la tabla 25 se muestran las cuatro ecuaciones de regresión lineal con sus respectivos coeficientes, obtenidas a partir del índice NDVI, mientras que en la Tabla 26 se muestran las cuatro ecuaciones de regresión lineal con sus respectivos coeficientes, obtenidas a partir del índice GNDVI :

Tabla 25

Ecuaciones de regresión lineal con el índice NDVI.

Año	Ecuación de regresión polinómica	Coefficiente de Pearson
2017	$y = -20436x^2 + 33199x - 13470$	$R^2 = 0,8105$
2018	$y = 4532,4x^2 - 6958,9x + 2674,1$	$R^2 = 0,9493$
219	$y = 1942,3x^2 - 2932,2x + 1109$	$R^2 = 0,9757$
2020	$y = 18531x^2 - 30130x + 12248$	$R^2 = 0,9556$

Nota. La tabla tiene las ecuaciones de regresión polinómica y su respectivo coeficiente de Pearson del índice NDVI.

Para obtener las ecuaciones de regresión lineal con un mayor coeficiente de Pearson, se procedió a depurar los datos por cada índice y año, mediante la media poblacional menos una desviación estándar, debido a que en ciertas parcelas muestreadas no hay únicamente la especie estudiada, sino que comparte espacio con especies arbustivas propias de la reserva.

Esto se le conoce como la pureza de pixel, en este caso la mayor cantidad de Niveles Digitales eliminados fueron menores al 0,72 ya que son valores correspondientes a especies arbustivas de la zona. Al existir pixeles con mayor pureza de *Polylepis sp.* ofrece mejor capacidad de discernir entre especies de la reserva.

Tabla 26

Ecuaciones de regresión lineal con el índice GNDVI.

Año	Ecuación de regresión polinómica	Coefficiente de Pearson
2017	$y = -21863x^2 + 35626x - 14505$	$R^2 = 0,7331$
2018	$y = 31682x^2 - 49362x + 19226$	$R^2 = 0,9973$
2019	$y = 5492,7x^2 - 8348,6x + 3172,1$	$R^2 = 0,9743$
2020	$y = 8779,9x^2 - 14299x + 5824,1$	$R^2 = 0,8463$

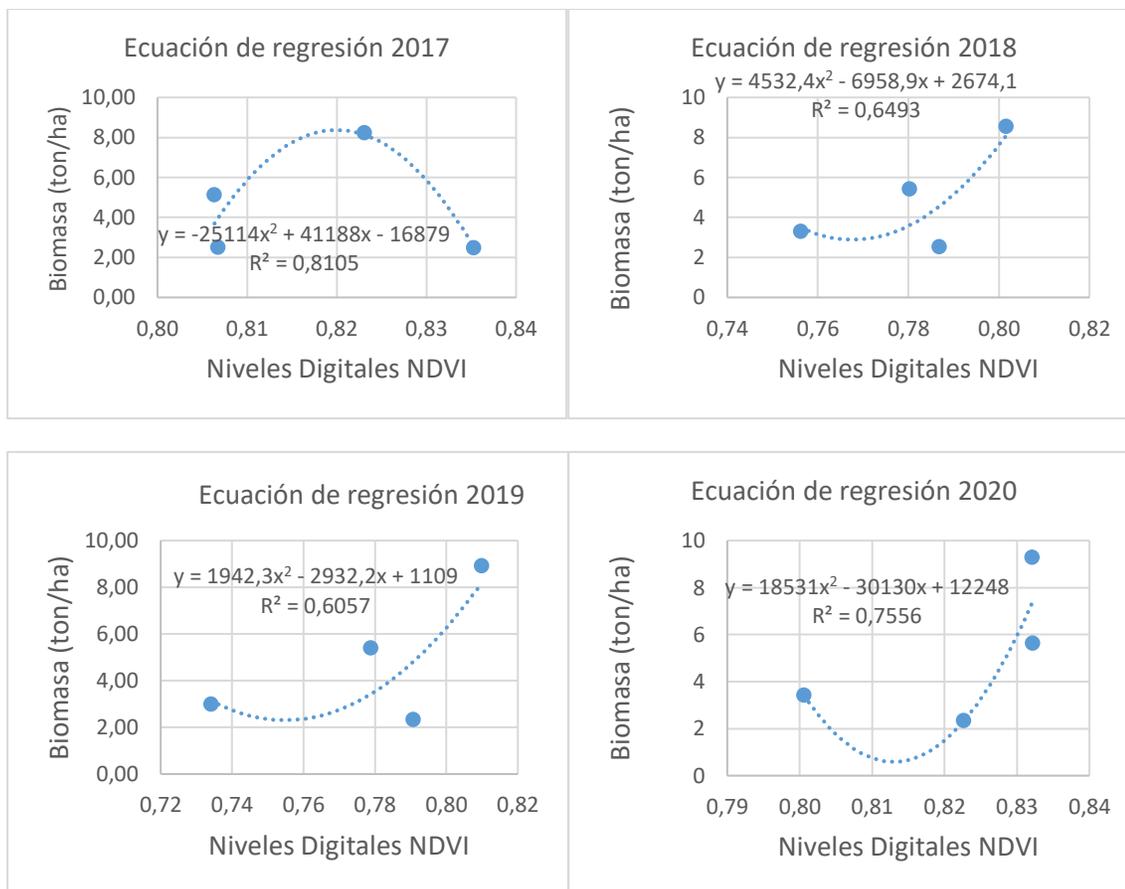
Nota. La tabla tiene las ecuaciones de regresión polinómica y su respectivo coeficiente de Pearson del índice GNDVI.

En el caso del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada Verde la mayor cantidad de Niveles digitales eliminados fueron menores a 0,74 ND, de igual manera corresponden a especies arbustivas presentes en la parcela muestreada.

A continuación, se muestran las gráficas generadas para la obtención de las ecuaciones de regresión para la biomasa de la REEA del bosque *Polylepis* con el índice de NDVI. (ver figura 40).

Tabla 27

*Ecuación de regresión para la estimación de biomasa de *Polylepis* con el índice NDVI en el año 2017.*



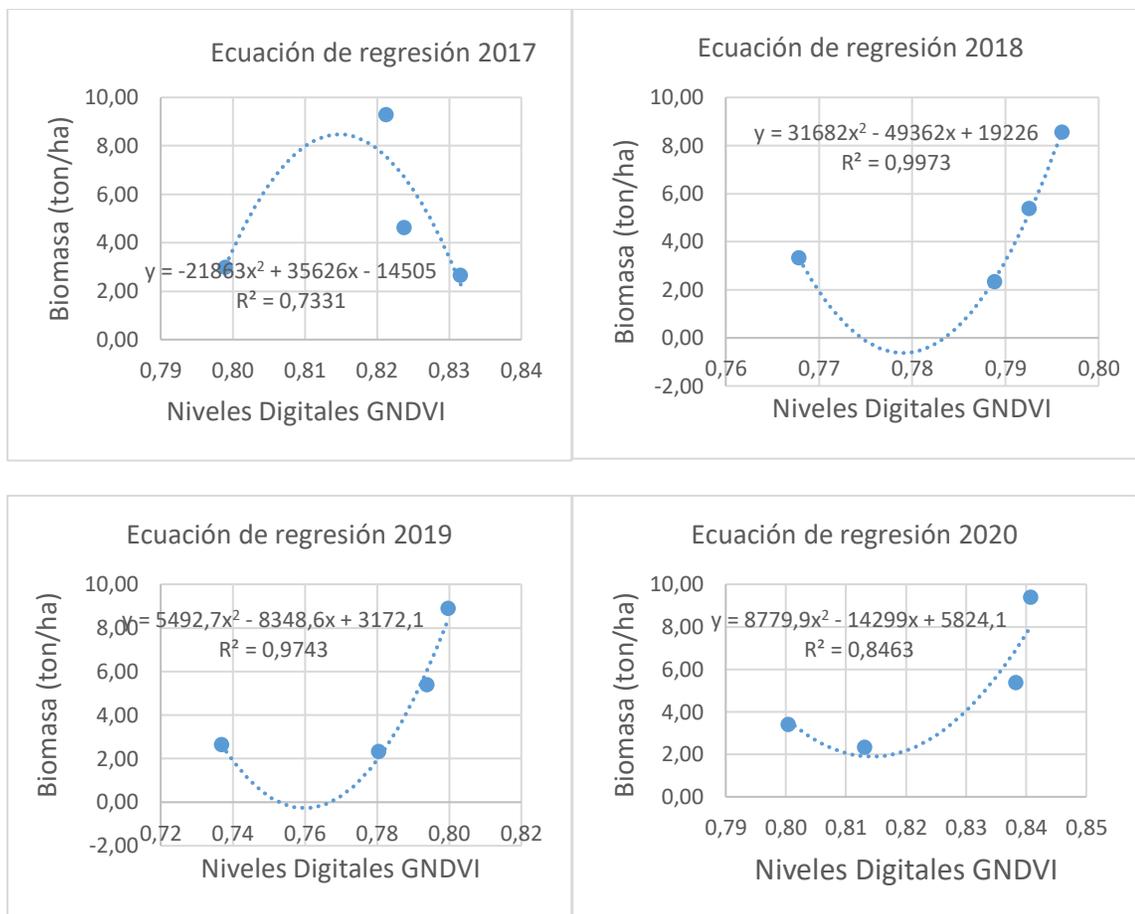
Nota. Gráficas de las ecuaciones de regresión de la biomasa con NDVI

Podemos diferenciar que en la ecuación de regresión lineal del año 2017 existe una anomalía en el sentido de la curva y en la ecuación polinómica, esto nos indica que existe una interferencia es así que Nickolas Castro (2018) señala que la zona con una recurrencia de incendios moderada muestra un descenso del índice de vegetación bajo, por lo que se produce esta alteración en este año. Lo mismo sucede con en la figura 41 con el GNDVI.

A continuación, se muestran las gráficas generadas para la obtención de las ecuaciones de regresión para la biomasa de la REEA del bosque Polylepis con el índice de GNDVI.

Tabla 28

Ecuación de regresión para la estimación de biomasa de Polylepis con el índice GNDVI en el año 2017



Nota. Gráficas de las ecuaciones de regresión de la biomasa con GNDVI

Biomasa aérea total

Para el cálculo de la biomasa total se reemplazó los valores de NDVI y GNDVI en las respectivas ecuaciones que se encuentran en la tabla 26 y tabla 27, “donde se tiene como variable dependiente a las toneladas de biomasa por hectárea y como variable independiente a los ND del índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)”.

(Cortes, 2015)

La tabla 29 representa los valores en toneladas por hectárea de biomasa obtenidas de tres diferentes maneras, donde se puede observar la diferencia entre el modelo de muestreo en campo con los índices NDVI y GNDVI, para conocer cuál de los

índices tiene una mejor estimación de biomasa en comparación a los valores tomados en campo.

Tabla 29

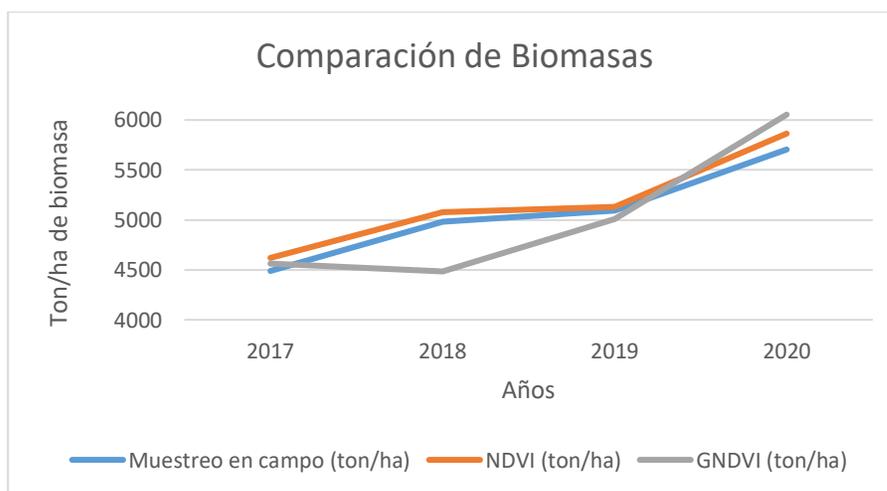
Tabla de estimación de biomasa entre muestreo, NDVI y GNDVI

BIOMASA	Áreas (ha)	Muestreo de campo (ton/ha)	NDVI (ton/ha)	GNDVI (ton/ha)
2017	245,32	4488,71	4619,56	4563,11
2018	251,85	4982,20	5078,83	4483,92
2019	259,69	5090,72	5130,98	5006,84
2020	276,50	5704,79	5864,41	6054,05

Nota. La presente tabla muestra la diferencia entre la biomasa calculada mediante muestreo en campo, NDVI y GNDVI.

Figura 39

Gráfico de comparación de metodologías de estimación de biomasa



Nota. La presente figura representa los valores de tendencia de la biomasa.

En la figura 42 se compara el aumento de la biomasa aérea de la especie Polylepis sp., donde se observa que la estimación de biomasa con el índice NDVI es muy similar a la

estimación mediante el muestreo en campo, pudiendo decir a simple vista que es el índice que mejores resultados da para la estimación de biomasa.

*Para determinar el índice de vegetación más adecuado para la estimación de biomasa de la especie *Polylepis sp.*, determino el coeficiente de correlación entre los datos obtenidos en campo con el Índice de Vegetación normalizado (NDVI) obteniendo una alta correlación de 0,99677, mientras que la correlación entre los datos obtenidos en campo con el Índice de Vegetación Normalizada Verde (GNDVI) tiene una correlación más baja que la anterior con un 0,9217044. Estos datos lo observamos en la tabla 28.*

Tabla 30

Correlación entre metodologías de estimación de biomasa.

Metodologías	Correlación
Muestreo en campo	1
Biomasa GNDVI	0,92170441
Biomasa NDVI	0,99677732

Nota. La presente tabla muestra los valores obtenidos de correlación de Pearson.

CAPITULO V

Conclusiones y Recomendaciones

Conclusiones

- Como se puede ver en el apartado de clasificación no supervisada en el capítulo de resultados, tabla 17, entre los años 2017-2020 aumento la superficie de la especie *Polylepis sp.*, lo que indica que la política de reforestación de especies nativas en la REEA dio un resultado positivo.
- Las correcciones atmosféricas y topográficas realizadas en las imágenes satelitales, brindaron una mayor fiabilidad en los resultados, tomando en cuenta

- el momento de la corrección topográfica que el ángulo de elevación es igual a noventa menos el ángulo cenital para un mejor ajuste y resultados más fiables.
- En las imágenes satelitales Sentinel 2 hay que tomar en cuenta que cuando se produce algún fenómeno de origen antrópico puede producir anomalías en los valores de índices de vegetación, por lo cual en el año 2017 existe ruido en la imagen satelital Sentinel 2 causado por un incendio cerca de la zona de Bosque Polylepsis, que consumió 28,21 ha de paramo siendo el incendio de origen antrópico que causa que la ecuación de ese año en ambos índices sea negativa, como se menciona en el estudio Recurrencia de incendios y dinámica del el Índice de Vegetación normalizado (NDVI) en la sabana brasileña de Nickolas Castro, que señala que la zona con una recurrencia de incendios moderada muestra un descenso del índice de vegetación bajo, por lo que se puede justificar que las ecuaciones de regresión lineal en dicho año sean negativas.
 - En la Reserva Ecológica El Ángel en el año 2020 mediante la clasificación no supervisada fue mayor al resto de años debido a un crecimiento de la especie como se muestra en la tabla 18 en el capítulo de análisis y resultados
 - Los índices de vegetación NDVI y GNDVI junto a la aplicación de las ecuaciones alométricas, permitieron realizar el cálculo de las zonas a las que no se logró tener acceso por la emergencia sanitaria, por lo cual, mediante la ecuación de regresión cuadrática se logró calcular la biomasa en estas áreas como se muestra en la tabla 29.
 - Mediante un análisis del coeficiente de correlación se determinó que el Índice de Vegetación normalizado (NDVI) es el más adecuado para estimar la biomasa, de la especie *Polylepsis sp.*, ya que tiene el valor más alto de correlación como se observa en la tabla 27 en comparación al GNDVI.

- Utilizando todas las técnicas de asesoramiento remoto y estimación mediante ecuaciones alométricas con la información obtenida en campo se pudo concluir con el objetivo principal del presente proyecto estimando la biomasa mediante estas técnicas.

Recomendaciones

- Se debería realizar estudios para determinar la firma espectral de la especie del género *Polylepis* sp. presente en la Reserva Ecológica El Ángel, a fin de obtener mejores datos para el análisis de esta cobertura mediante imágenes satelitales, incluyendo otras especies de interés en el país con el fin de alimentar un banco de firmas espectrales.
- De acuerdo a los cálculos de biomasa realizados se puede ver que es una unidad ambiental importante, por lo cual se debería sensibilizar sobre su preservación y conservación, para evitar una degeneración y pérdida de estos ecosistemas.
- Se debe promover investigaciones afines a los recursos naturales y ecosistemas; a fin de continuar con el trabajo ya realizado en este y otros proyectos similares para continuar con la temática y obtener un mejor resultado.
- Se debe continuar con el estudio de diferentes índices de vegetación para la determinación de biomasa para ver cómo trabaja en esta y otras especies.

Bibliografía

Acosta Mireles, Vargas Hernández, & Velázquez. (2002). Estimación de la biomasa aérea mediante el uso de relaciones Alométricas en seis especies arbóreas en Oaxaca, México. *Agrociencia*, 725-736.

- Aguilar, H., Mora, R., & Vargas, C. (2014). METODOLOGÍA PARA LA CORRECCIÓN ATMOSFÉRICA DE IMÁGENES ASTER, RAPIDEYE, SPOT 2 Y LANDSAT 8 CON EL MÓDULO FLAASH DEL SOFTWARE ENVI. *Revista Geográfica de América Central*, pp 39-59.
- AKÇA, A. (1993). Forest Inventory. Alemania: Institut für Forsteinrichtung und Ertragskunde. Universidad de Göttingen.
- Bowen, C. (2018). "Análisis multitemporal del cambio de uso de suelo en la microcuenca del río Tabacay para el periodo 2005-2017. Cuenca: Universidad de Cuenca- Facultad de Ciencias Químicas .
- Bravo, F. (2017). *TEORÍA – TELEDETECCIÓN ESPACIAL LANDSAT, SENTINEL-2, ASTER L1T y MODIS*. Tingo María: GEOMÁTICA AMBIENTAL S.R.L.
- Bunge, V. (2001). Satélites artificiales: ampliación de nuestras fronteras. *Guía del Maestro*, 2.
- Castro, N. (2018). Recurrencia de incendios y dinamica del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) en la sabana brasileña. *Fuego*, 15-20.
- Chimbolema, S., Suárez, D., Peñafiel, M., & Paredes, T. (2014). Guía de Plantas de la Reserva Ecológica El Ángel. Quito: Researchgate.
- Chuvieco, E. (2008). *Teledeteccion ambiental la observacion de la Tierra desde el Espacio*. España: Editorial Ariel.
- Comisión Europea. (2015). Copernicur La mirada de Europa sobre la Tierra. *Copernicus*, 15.
- Copernicus. (2018). El componente espacio Copernicus. *Copernicus framework Partnership Agreement for Copernicus User Uptake*, 47.
- Córdova , J., & García , N. (2013). Caracterización de islas frescas urbanas (IFU) en la ciudad de Santiago de Cali, Colombia. Calí: Entorno Geográfico,.

- Córtés , L., Hernández , J., Valencia , D., & Corvalán , P. (2014). estimation of aboveground Forest Biomass Using Landsat ETM+, Aster GDEM and Lidar . *Forest Research Open Access*, 1-7.
- Cortes, Á. N. (2015). ESTIMACIÓN DE BIOMASA ARBOREA POR MEDIO DE ÍNDICES DE VEGETACIÓN PARA EL PARQUE NACIONAL NATURAL LA PAYA. . Bogotá: Universidad Militar Nueva Granada.
- Díaz, J. (2014). Estudio de Índices de vegetación a partir de imágenes aéreas tomadas desde UAS/RPAS y aplicaciones de estos a la agricultura de precisión. *Universidad complutense de Madrid*, 40-45. Obtenido de http://www.biblioteca.udep.edu.pe/BibVirUDEP/tesis/pdf/1_59_185_24_508.pdf
- Duque, J. (2015). Comparación Estadística de Métodos Interpolación Determinísticos y Estocásticos para la generación de Modelos Digitales del Terreno a partir de datos LIDAR, en la parroquia de Tumbabiro, cantón San Miguel de Urququí, provincia de Imbabura. Quito: universidad San Francisco de Quito.
- E.L., L. M. (2014). *Alométricos para la estimación de la Biomasa Aérea total en el páramo de Anaimé*. Tolima, Colombia: Departamento de Tolima.
- Echeverría, A., Pachacama, R., Villaverde , Y., & Proaño, N. (2018). CÁLCULO DE BIOMASA AÉREA Y CARBONO CAPTURADO DE LA RESERVA YANACOCCHA A TRAVÉS DE IMÁGENES SATELITALES. *Resvista Geoespacial*, 36-43.
- Escobar, R. (2016). ESTIMACIÓN DE LA BIOMASA FORESTAL DE LA SIERRA SAN MIGUELITO POR MEDIO DE IMÁGENES DE SATÉLITE. *IPICYT INSTITUTO POTOSINO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA, A.C.*, 81.
- European Space Agency. (2017). *Sentinel-2 MSI Technical Guide*. Obtenido de <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/toolboxes>
- Fing.edu. (2011). Archivo de correccion de imagenes y clases de sensores. *PROCIMAGEN*, 97-98.

- Foody, G., Boyd, D., Cutler, M., McMorrow, J., Pelz, D., Tangki, H., & Douglas, I. (2001). Mapping the biomass of Bornean tropical rain forest from remotely sensed data. *Global Ecology and Biogeography*, 379-387.
- Foster, B., Hernández, E., & Burnham, R. (1995). Un método de transectos variables para la evaluación rápida de comunidades de plantas en los. Washington: Conservation Biology, Conservation International.
- Geograf. (2008). Correcciones de Imágenes de satélite. 10p.
- Gitelson, A., & Merzlyak, M. (1996). Signature analysis of leaf reflectance spectra: algorithm development for remote sensing of chlorophyll. *Plant Physiol*, 494-500.
- Gordillo, V. (2017). Evaluación del estado del nitrógeno y estimación de Biomasa en el cultivo de trigo, usando sensores remotos y UAV. *Instituto de enseñanza e investigación en Ciencias Agrícolas*, 108.
- Grupo Empresarial ENCE . (2009). El Valor de la Biomasa Forestal .
- Hanson, S., & Chuvieco, E. (2011). Evaluation of different topographic correction methods for Landsat imagery. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 691–700. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jag.2011.05.001>.
- Haro, F. (2012). Determinación de carbono orgánico en la biomasa y suelo del páramo de la comunidad de Pichán Central-San Isidro. 190.
- Herold, M. W. (2009). *Assessment of the status of the development of the standards for the Terrestrial Essential Climate Variables: T9 Land Cover*. FAO, GTOS report. T9 Land cover.
- Houghton, R., Lawrence, K., Hackler, J., & Brown, S. (2001). The spatial distribution of forest biomass in the Brazilian Amazon The spatial distribution of forest biomass in the Brazilian Amazon. *Global Change Biology*, 7, 731-746.
- Huxley J, Strauss R, & Churchill F. (1932). Problems of relative growth.

- Jingo, A. (2019). EVALUACIÓN DEL BOSQUE DE POLYLEPIS UBICADO DENTRO DE LA RESERVA ECOLÓGICA EL ANGEL. *Reserva Ecológica El Ángel*, 23.
- Life Red Bosques . (2017). Manual de campo para la identificación de rodales de referencia-Reconocimiento con levantamiento de parcelas de campo. *Life Red Bosques* , 55.
- Lillesand, T. M., & Kiefer, R. W. (2004). *Remote sensing and image interpretation*. New York: John Miley & Sons.
- López, J. F. (02 de octubre de 2017). Obtenido de Coeficiente de determinación (R cuadrado): Economipedia.com
- Lu, D. (2006). The potential and challenge of remote sensing based biomass estimation. *International Journal of Remote Sensing*. 10.1080/01431160500486732, 1297-1318.
- MAGAP. (2019). *Estás aquí: Inicio/Noticias y Eventos/Importancia de conservar los bosques para combatir el cambio climático*. Obtenido de <https://ecuadorforestal.org/noticias-y-eventos/importancia-de-conservar-los-bosques-para-combatir-el-cambio-climatico/>
- Martínez , L., Palá, V., & Arbiol , R. (2012). CORRECCIÓN ATMOSFÉRICA EN ESPECTRO SOLAR PARA SERIES MULTITEMORALES. APLICACIÓN A IMÁGENES LANDSAT 7 ETM+. *Institut Cartogràfic de Catalunya*, 4.
- Mausel, P., Kramber, W., & Lee, J. (1990). Optimum Band Selection for Supervised Classification of Multi spectral Data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 55-60.
- Medina, G., & Mena, P. (2001). Los páramos del Ecuador. *Proyecto Páramo y Abya Yala*, 1-23.
- Mendoza, F. (03 de 2010). *Análisis multitemporal del cambio de uso de suelo en base a imágenes satelitales de los territorios indígenas de Mayangna Sauni As,*

- Mayangna Sauni Bas, Sikilta, MatungBak/Sauni Arungka, SIPBAA, Layasilksa y el área afectada por el huracán Félix en 2007 08.* Obtenido de <https://es.calameo.com/books/0005050546a5c03432492>
- Ministerio del Ambiente. (2014). Programa Nacional de Reforestación con Fines de Conservación Ambiental, Protección de Cuencas Hidrográficas y Beneficios Alternos. *MAE*, 10-15.
- Ministerio del Ambiente. (2015). Plan de Manejo de la Reserva Ecológica El Ángel. Quito- Ecuador: Ministerio del Medio Ambiente.
- Mohd Zaki, N., & Abd Latif, Z. (2017). Carbon sinks and tropical forest biomass estimation: a review on role of remote sensing in aboveground-biomass modeling. *Geocarto International*, 701-716.
- Mostacedo, B., & Fredericksen, T. S. (2000). *Manual de Métodos Básicos de Muestreo y Análisis en Ecología Vegetal*. Santa Cruz, Bolivia: El País.
- Mueller-Wilm, U. (2018). Sen2Cor Configuration and User Manual. *Eesa*, 54.
- Murillo, O., & Camacho, P. (1998). METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DE PLANTACIONES FORESTALES. *Primer Congreso Latinoamericano IUFRO Valdivia*, 11.
- Nájera Luna, J., & Hernández Hernández, E. (2009). ACUMULACIÓN DE BIOMASA AÉREA EN UN BOSQUE COETÁNEO DE LA REGIÓN DE EL SALTO, DURANGO. *Ra Ximhai*, 1-2.
- Palmer, A., Jiménez, R., & Montaña, J. (2001). Tutorial sobre el coeficiente de correlación lineal de Pearson en internet. *Researchgate*, 32.
- Parresol, B. (1999). Assessing tree and stand biomass: a review with examples and critical comparisons. *Forest Science*, 573-593.
- Perea, M. (2018). Estimación de biomasa aérea y carbono con teledetección en bosques Alto-Andinos de Boyacá, Colombia. *UNIGIS*, 14-20.

- Phua, M., & Saito, H. (2003). Estimation of biomass of a mountainous tropical forest using Landsat TM data. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 429-440.
- Ress, G. (2005). The Remote Sensing Data Book. *Cambridge University Press*, 262.
- Riano, D. (2000). Corrección Atmosférica y Topográfica, Información Multitemporal y Auxiliar Aplicadas a la Cartografía de Modelos de Combustibles con Imágenes Landsat-TM. *Madrid: Universidad de Alacala*.
- Riaño , D., Salas, X., & Chuvieco, E. (2000). Corrección Atmosférica y Topográfica, Información Multitemporal y Auxiliar Aplicadas a la Cartografía de Modelos de Combustibles con Imágenes Landsat-TM. *Universidad de Alcalá*, 222-239.
- Richter, R., & Schlapfer, D. (2015). Atmospheric/ Topographic Correction for Airborne Imagery. *ATCOR-4*, 252.
- Robayo, J., & Cepeda, E. (2001). Informe Técnico de Base-Propuesta de declaración de un área municipal de conservación Reserva Biológica Yanacocha, parroquia de Nono. *No publicado*.
- Rodríguez, P., Wheeler, J., Louis V., Tansey , K., & Balzter, H. (2017). *Quantifying Forest Biomass Carbon Stocks From Space*. Obtenido de <https://doi.org/10.1007/s40725-017-0052-5>
- Rojas, S. (2015). Estimación de Biomasa Forestal mediante el uso de imagenes Radar. *Universidad Técnica Superior de Ingenieros en Topografía, Geodesia y Cartografía.*, 191.
- Sancha, E. (2010). El estudio de los índices de vegetación como base para conocer las relaciones entre la vegetación y el clima. *Tecnologías de la Información Geográfica. La Información Geográfica al servicio de los ciudadanos*.
- Sánchez, P. (2012). *La Teledetección enfocada a la obtención de mapas digitales*. Cuenca: Universidad de Cuenca .

- Secretaría de la Convención de Ramsar. (2013). Manual de la Conservación de Ramsar: Guía a la Convención sobre los Humedales (Ramsar, Irán,1971). En S. d. Ramsar. Gland (Suiza).
- Teillet, P. (1982). On the slope-aspect correction of multispectral scanner data. *Canadian Journal of Remote Sensing*. 86-102.
- Terán, J., Dauber, E., & Guzmán, R. (1992). Estimaciones de biomasa y carbono en bosques naturales de Bolivia. *Revista Forestal Iberoamericana*,, 1-10.
- Uniovido. (10 de 08 de 2020). *El algoritmo k-means aplicado a clasificación y procesamiento de imágenes*. Obtenido de https://www.uniovido.es/compnum/laboratorios_py/kmeans/kmeans.html
- Vignote, S. (2016). La biomasa: Importancia, tipos y características y formas de preparación. *Researchgate*, 37.
- Villareal, H. Á. (2004). *Manual de métodos para el desarrollo de inventarios de biodiversidad*. Bogotá : D.C.: Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.
- Zapana. (2016). *Carbono Almacenado en la Biomasa Aérea de los Queñoales (Polylepis spp.) en el bosque de Motoni- San Cayetano ubicado en el distrito de Pucará- Region Puno*. Perú: Universidad Nacional del Altiplano.

Anexos