



Co-funded by the
Erasmus+ Programme
of the European Union

DEPARTAMENTO DE POSGRADOS

Maestría en Cambio Climático, Agricultura y Desarrollo Rural
Sostenible – MACCARD

**Estimación de captura de carbono en áreas con procesos de
conservación, a partir de imágenes satelitales. Caso de estudio:
bosque protector Aguarongo, comunidad Carmen de Jadán. Provincia
del Azuay.**

Trabajo previo a la obtención del título de:

**MAGISTER EN CAMBIO CLIMÁTICO, AGRICULTURA Y DESARROLLO
RURAL SOSTENIBLE**

Autora:

Maritza Rosalía Bermeo Alvarado

Director:

Diego Francisco Pacheco Prado

Cuenca – Ecuador

2024

Dedico el presente trabajo a mis hijos, mi compañero de vida y a toda mi familia, agradezco por su infinita paciencia y amor. Doy gracias por la vida que tengo y mi hermosa estructura familiar que me ha permitido alcanzar esta meta.

Doy las gracias infinitas a Ruth Arias, Valeria Coronel, Diana Pauta, Lucía Chimborazo y Emanuel Martínez por todo su cariño y apoyo en cada paso. Además, agradezco a la comunidad de Carmen de Jadán por siempre abrirme las puertas de su comunidad y su hermoso bosque. Agradezco a cada persona que de alguna u otra manera me apoyó para realizar el presente estudio. Finalmente, quedo muy agradecida con mi director de tesis Diego Pacheco por toda su guía en este proceso.

Resumen

El cambio climático es uno de los mayores desafíos ambientales que enfrenta la humanidad en la actualidad y evaluar la captura de carbono en los ecosistemas juega un papel crucial en la mitigación de este fenómeno. El estudio se enfoca específicamente en el Bosque Protector Aguarongo, ubicado en la comunidad de Carmen de Jadán, parroquia Jadán, provincia del Azuay, como caso de estudio. El objetivo de estudio fue la estimación de la captura de carbono en áreas con procesos de conservación, utilizando imágenes satelitales. Para ello, se instalaron 20 parcelas de 10 m x 10 m (100 m²) donde se evaluaron los árboles con el diámetro a altura del pecho (DAP) \geq 5 cm. Las variables que se usaron para la generación de la ecuación y el modelo fueron la biomasa aérea total (BT) y el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI por sus siglas en inglés). La biomasa aérea y carbono total en el estrato fue de 1,496.84 tn/ha y 748,4 tn C/ha, respectivamente. De las parcelas evaluadas, la 10 y 12 presentaron los valores más altos en biomasa (3.09 tn/ha; 3.01 tn/ha, respectivamente) a diferencia de las parcelas 4 y 6 con los valores más bajos (0,57 tn/ha y 0.37 tn/ha, respectivamente). Para el modelo alométrico usado, la mejor correlación (R² de 0.61) se produjo entre las variables NDVI de la imagen satelital del año 2023 y biomasa por parcela mayor a 900 kg/árbol. Así también se observó que el análisis para el período 2014 y 2023, donde se obtuvo 633.60 ton C/ha & 2.325 ton CO₂ y 623.80 C/ha & 2.289 ton CO₂ fijado, dando una diferencia de carbono de 9.8 ton C/ha y 36 ton CO₂, además en ese período ha existido un cambio en el bosque de 1,7 % del área total. Los resultados obtenidos muestran la relación entre biomasa y carbono con datos satelitales en un bosque protegido y en proceso de restauración, sirviendo como referente para futuras investigaciones.

Palabras clave: Cambio climático, captura de carbono, Bosque Protector Aguarongo, biomasa aérea, modelo alométrico, NDVI, CO₂.

Abstract

Climate change is one of the greatest environmental challenges humanity currently faces, and evaluating carbon sequestration in ecosystems plays a crucial role in mitigating this phenomenon. This study focuses specifically on the Aguarongo Protective Forest, located in the community of Carmen de Jadán, Jadán Parish, Azuay Province, as a case study. The study aimed to estimate carbon sequestration in areas undergoing conservation processes using satellite images. To achieve this, 20 plots of 10 m x 10 m (100 m²) were established, where trees with a diameter at breast height (DBH) \geq 5 cm were assessed. The variables used to generate the equation and model were total aboveground biomass (TB) and the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI). The total aboveground biomass and carbon in the stratum were 1,496.84 tons/ha and 748.4 tons C/ha, respectively. Among the evaluated plots, plots 10 and 12 had the highest biomass values (3.09 tons/ha and 3.01 tons/ha, respectively) compared to plots 4 and 6, which had the lowest values (0.57 tons/ha and 0.37 tons/ha, respectively). For the allometric model used, the best correlation (R^2 of 0.61) was found between the NDVI variables of the 2023 satellite image and biomass per plot greater than 900 kg/tree. Additionally, the analysis for the period between 2014 and 2023 showed 633.60 tons C/ha & 2,325 tons CO₂ and 623.80 tons C/ha & 2,289 tons CO₂ fixed, indicating a carbon difference of 9.8 tons C/ha and 36 tons CO₂. Furthermore, during this period, there has been a 1.7% change in the forest's total area. The results obtained demonstrate the relationship between biomass and carbon with satellite data in a protected forest undergoing restoration, serving as a reference for future research.

INDICE DE CONTENIDO

Resumen.....	ii
Abstract.....	iii
INDICE DE CONTENIDO.....	iv
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO I.....	3
MATERIALES Y MÉTODOS.....	3
1.1 Área de estudio.....	3
1.2 Metodología.....	3
1.3 Fase 1. Estimación de captura de carbono.....	4
1.3.1 Adquisición de información.....	4
1.3.2 Cálculo de NDVI.....	5
1.3.3 Clasificación de coberturas.....	6
1.3.4 Levantamiento de información de biomasa en campo.....	7
1.3.5 Estimación de biomasa aérea.....	7
1.3.6 Regresión matemática de biomasa en el área de bosque.....	8
1.3.7 Cálculo de biomasa actual.....	9
1.3.8 Cálculo de captura de carbono.....	9
1.3.9 Análisis de captura de carbono para el año 2013.....	10
1.4 Fase 2. Levantamiento de información social.....	10
CAPÍTULO II.....	10
RESULTADOS.....	10
2.1 Cálculo del NDVI.....	10
2.2 Clasificación de coberturas.....	11
2.3 Estimación de biomasa y regresión lineal entre biomasa e Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada NDVI en bosque natural.....	12
2.4 Biomasa actual.....	15
2.5 Captura de carbono actual.....	16
2.6 Análisis de captura de carbono para el año 2013.....	18
2.7 Levantamiento de información social sobre los actores sociales involucrados.....	19
CAPITULO III.....	22
DISCUSIÓN.....	22
CONCLUSIONES.....	24
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	25
ANEXOS.....	31
Anexo 1. Fichas técnicas de las imágenes satelitales.....	31

FIGURA

Figura 1. Localización del área de estudio con respecto al ABVP Aguarongo.....	3
Figura 2. Metodología de trabajo para la obtención de los mapas de biomasa y carbono para el área de conservación dentro del ABVP Aguarongo.	4
Figura 3. Imágenes satelitales PlanetScope (RGB 321) y Landsat 8 (RGB 543); a) imagen PlanetScope de septiembre de 2023; b) imagen PlanetScope de enero de 2024 y c) imagen Landsat de noviembre de 2013	5
Figura 4. Índice de Vegetación Normalizado (NDVI); a) imagen satelital de septiembre del año 2023 (época seca); b) imagen satelital de enero de 2024 (época lluviosa).	11
Figura 5. Clasificación supervisada del área de estudio con la imagen satelital del año 2023.	11
Figura 6. BT por parcela levantada en la zona de estudio.....	13
Figura 7. Relación entre biomasa BT y NDVI con uso de las dos ecuaciones alométricas a) Ecuación alométrica propuesta por Lerma& Orjuela (2014); b) Ecuación alométrica propuesta por Ovington y Olson, (1970).....	13
Figura 8. (a) regresión lineal entre los datos NDVI año 2023 y biomasa BT; (b) regresión lineal entre los datos NDVI año 2024 y biomasa BT; (c y d) modelo estadístico para los datos NDVI-2023 y biomasa BT.	14
Figura 9. Biomasa aérea en la zona de bosque protector Aguarongo	16
Figura 10. Carbono en la zona de bosque protector Aguarongo	17
Figura 11. CO2 fijado en la zona de bosque protector Aguarongo	17
Figura 12. Cobertura y uso del suelo. a) Clasificación supervisada con la imagen satelital LANDSAT 8 del año 2013. b) Cartografía de uso del suelo del Ministerio de Agua y Ambiente y Transición Ecológica. MATTE del año 2014.	18
Figura 13 . Cobertura y uso del suelo. a) Cartografía de uso del suelo del Ministerio de Agua y Ambiente y Transición Ecológica. MATTE del año 2014. b) Cobertura y Uso del suelo según imagen satelital 2023. Clasificación supervisada 2023.....	19
Figura 14. Gobernanza local de la comunidad Carmen de Jadán. Tomada del libro “El Carmen de Jadán y su relación con el agua”	21
Figura 15. Gráfico obtenido del estudio “El Carmen de Jadán y su relación con el agua”	22

TABLA

Tabla 1. Grado de acuerdo del Índice Kappa	7
Tabla 2. Datos filtrados por parcelas y biomasa	8
Tabla 3. Clases de cobertura resultado de la supervisión clasificada	12
Tabla 4. Resultados de la matriz de confusión de los años 2024-2023-2013.	12

Tabla 5. RMSE datos biomasa bosque natural.....	15
Tabla 6. Biomasa actual por cobertura dentro del área de estudio.....	15
Tabla 7. Resultados de Carbono y Co2 en la zona del Bosque Protector Aguarongo.....	16
Tabla 8. Información de cobertura de bosque para los años 2013 y 2014.....	18
Tabla 9. Listado de actores comunitarios e institucionales.....	20

ANEXOS

Anexo 1. Fichas técnicas de las imágenes satelitales.....	31
Anexo 2. Mapas generados.....	32
Anexo 3. Imágenes del levantamiento de información y zona de estudio.....	36
Anexo 4. Datos completos de las 20 parcelas.....	37

INTRODUCCIÓN

Los bosques son ecosistemas críticos, ya que proporcionan hábitats para la mayoría de las especies del planeta y medios de vida para casi 1.000 millones de personas. Los bosques sanos desempeñan un papel crucial en la mitigación del cambio climático al actuar como sumideros de carbono y absorber miles de millones de toneladas métricas de CO₂ al año. Las estimaciones demuestran que, a nivel global entre 2001 y 2019, los bosques absorbieron el doble de la cantidad de carbono que emitieron, equivalente a 7.600 millones de toneladas métricas de CO₂ al año. Por lo tanto, los bosques ofrecen una capacidad esencial para eliminar los gases de efecto invernadero (GEI) de la atmósfera y ayudarnos a evitar las repercusiones más graves de la crisis climática. (PNUD.2023).

En este punto podemos decir que el cambio climático consiste en la modificación a largo plazo de los patrones climáticos dominantes como la temperatura media global. Estos cambios a lo largo de la historia evolutiva planetaria han originado la transición de eras geológicas, respondiendo a cambios de comportamiento y patrones naturales. Sin embargo, en nuestra era estamos presenciando alteraciones que inciden en el escalamiento de la temperatura global con una velocidad alarmante, con alteraciones atmosféricas de origen antrópico, producto del incremento de la concentración de gases efecto invernadero (GEI) en la atmósfera, especialmente el Dióxido de Carbono (CO₂), Metano (CH₄) y Óxido Nitroso (N₂O). Estos tres gases, conocidos como gases de efecto invernadero de larga vida (GEILV), son químicamente estables y permanecen en la atmósfera durante períodos prolongados, que van desde décadas hasta siglos. Su persistencia a largo plazo amplifica su influencia en el clima global, generando efectos duraderos (IPCC, 2007).

Bajo este contexto, además de los mercados internacionales de carbono, como método de compensación por las emisiones industriales, toma relevancia la necesidad de calcular tanto las emisiones de GEI como el “stock” o captura de carbono que un sistema forestal, natural o implementado es capaz de almacenar.

Las metodologías disponibles para la estimación y medición de emisiones y captura de GEI, propuestas y validadas por el IPCC (Panel Intergubernamental de Cambio Climático), se basan en ecuaciones alométricas, que para su empleo requieren de una cantidad considerable de datos de levantamiento espacial, para lo que se necesita un equipo interdisciplinario, equipos, materiales de campo y análisis de laboratorio. Esta complejidad recae en las limitaciones institucionales de disponibilidad de recursos económicos, logísticos y técnicos, que dificultan la efectividad procedimental. La realidad de las instituciones públicas en América Latina, y puntualmente en Ecuador, en evaluación con la exhaustividad de los trabajos de campo requeridos para levantamiento de información a nivel nacional, es que resulta altamente complejo,

costoso y demorado, mientras que el uso de herramientas geográficas base como el DAP (diámetro de altura al pecho) y el uso de imágenes satelitales, que también juegan un papel crucial en la estimación de biomasa, permiten obtener datos certeros y que nos dan una mirada del estado de la cobertura vegetal y su capacidad de captura de carbono.

Ahora es importante poner en contexto, la importancia que tienen las comunidades humanas que viven en relación con los bosques, pues de ellos dependerá una interacción positiva o negativa. Con dicho antecedente, hacemos mención que el presente trabajo fue realizado en la zona específica del Bosque Protector Aguarongo, protegido por más de 30 años por la comunidad de Carmen de Jadán en el cantón Gualaceo en la provincia del Azuay, quienes tiene una historia exitosa de organización, donde se han logrado fomentar prácticas de conservación y protección. Entre 1940 y 1970, la presión sobre el bosque, debida a la extracción de leña y otros recursos, provocó escasez de agua, lo que impulsó a la comunidad a tomar medidas cruciales: sanciones internas y un ordenamiento territorial comunitario para regular el uso del bosque. En 2002 se aprobó un plan de manejo por el Ministerio del Ambiente, seguido por la creación de un centro de gestión ambiental en 2007 y el Consorcio Aguarongo en 2013. Hoy en día, se cuenta con un modelo de gobernanza local y se lleva a cabo un Plan de Manejo de Recursos Naturales para la Ampliación del Área de Bosque y Vegetación Protectora Aguarongo. Así también existe la participación de varias instituciones públicas y privadas, que son fundamentales para llevar a cabo acciones de planificación, pero sobre todo de resiliencia frente al cambio climático (Coronel, 2020).

En este sentido, el propósito de la presente investigación, busca satisfacer la necesidad de estimaciones efectivas en cuanto a **captura de carbono**, de una manera versátil, utilizando la información satelital y Sistemas de Información Geográfica (SIG), contrastada con el levantamiento de datos específicos y básicos de campo como el DAP (diámetro a la altura de pecho) de la vegetación en muestreo, esto con la finalidad de observar el comportamiento de bosque en cuanto a procesos de conservación y cómo estos están vinculados a un proceso de trabajo comunitario.

Los objetivos de este estudio son: 1) Estimar la captura de carbono en áreas sujetas a procesos de conservación. 2) Diseñar un proceso metodológico para la estimación de captura de carbono a partir de imágenes satelitales. 3) Realizar el levantamiento de información en campo para estimar la biomasa a través de ecuaciones alométricas para especies leñosas. 4) Elaborar un mapa de captura de carbono actual y un análisis anterior (2013) y 5) Recopilar información social sobre los principales actores vinculados a los procesos de conservación.

CAPÍTULO I MATERIALES Y MÉTODOS

1.1 Área de estudio

El Área de Bosque y Vegetación Protectora Aguarongo (ABVP), se encuentra ubicada en la provincia del Azuay. Pertenece a las parroquias de Jadán, Shidmad, Gualaceo y San Juan (cantón Gualaceo), Santa Ana (cantón Cuenca) y San Bartolomé (cantón Sígsig). Geográficamente pertenece a la cuenca media del río Paute (Loyola,2019). El sitio de investigación comprende bosque siempre verde andino de ceja andina de los Andes, que se caracteriza por su alta biodiversidad, con árboles de gran altura, abundante musgo y epífitas, además de condiciones de humedad constante. Estos bosques juegan un papel crucial en la regulación hídrica y conservación de suelos en los Andes (Sierra,1999). El área comprende 798,31 ha, de las cuales 495,80 ha están dentro del ABVP Aguarongo (Figura 1). La zona de estudio está ubicada en altitudes que no superan los 3200 m.s.n.m. de altitud. La temperatura se encuentra entre los 6 y 15 °C; con una precipitación media al año de 1.500 a 2.000 mm. (MAATE,2022) La estación seca va desde mayo a septiembre y recibe una precipitación mensual de 25 a 60 mm. La estación lluviosa recibe una precipitación de 75 a 110 mm y va desde octubre hasta abril (Minga, 2002).



Figura 1. Localización del área de estudio con respecto al ABVP Aguarongo.

1.2 Metodología

El procedimiento metodológico de este estudio se representa en la Figura 2. El mismo implica la recolección de mediciones *in situ*, la adquisición y procesamiento de imágenes de satélite, el

cálculo del Índice de Vegetación Normalizado (NDVI), la elaboración de modelos de biomasa basados en el NDVI y la generación de mapas de Biomasa y Carbono en el Área de Interés de Conservación Aguarongo. El análisis estadístico se llevó a cabo utilizando el entorno de desarrollo RStudio. El manejo de datos geoespaciales y el análisis de las imágenes adquiridas por los sensores PlanetScope y Landsat 8 se realizaron mediante el software ArcGIS 10.5 (ESRI, 2014).

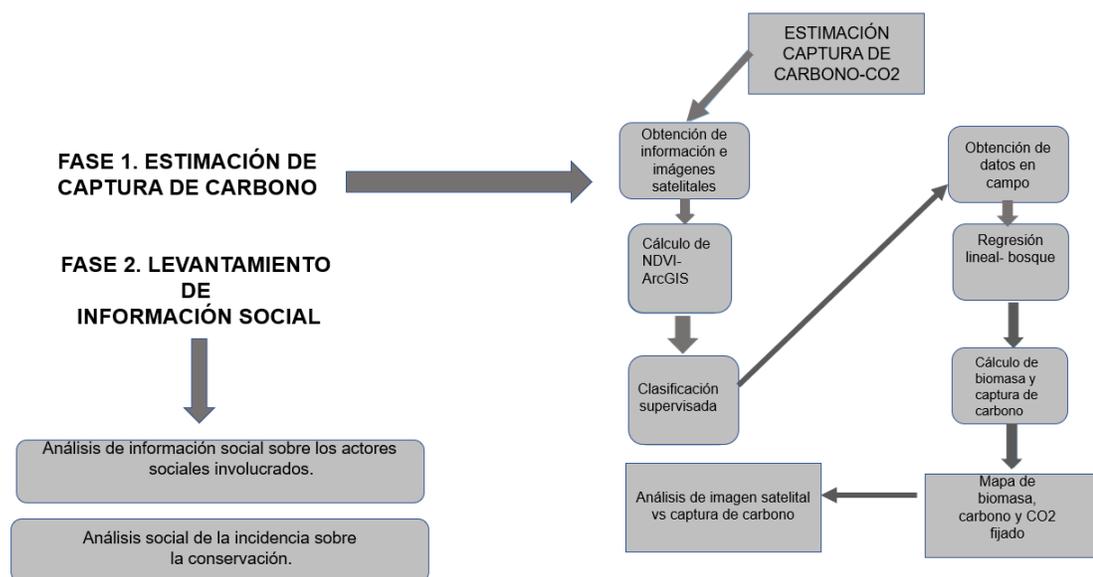


Figura 2. Metodología de trabajo para la obtención de los mapas de biomasa y carbono para el área de conservación dentro del ABVP Aguarongo.

1.3 Fase 1. Estimación de captura de carbono

1.3.1 Adquisición de información

Para este trabajo se usaron las imágenes satelitales Landsat 8 y PlanetScope, siendo las imágenes del 2023 y 2024 obtenidas de la plataforma PlanetScope (Planet Labs Inc. 2024) y la imagen del año 2013 de la plataforma Landsat (Figura 3). Es importante indicar que las imágenes de PlanetScope brindan datos multiespectrales de resolución media de 3, 4 y 8 bandas multiespectrales, con una resolución espacial de 3 m, mientras que las imágenes Landsat tienen una resolución espacial de 30 m. Las mismas se utilizarán para realizar una clasificación supervisada y comparar la cantidad de bosque entre el año 2013 y 2023. Por otro lado, los datos de cobertura y uso de la tierra del Ecuador Continental fueron obtenidos de la plataforma del Sistema Único de Información Ambiental (SUIA-Mapa interactivo), de los años 2014 y 2022 a escala 1:100.000, mismos que serán usados como información referencial para las categorías de uso del suelo de la zona.

Para seleccionar las imágenes satelitales se seleccionó aquellas con una menor cantidad de nubosidad, y que su calidad sea la mejor. Con estos antecedentes, en la plataforma de

PlanetScope se filtraron por fechas y parámetros las imágenes del mes de septiembre del año 2023 y enero de 2024. Así también se obtuvo información de la imagen Landsat del mes de noviembre del año 2013, que posteriormente fue descargada de la plataforma Google Earth Engine.

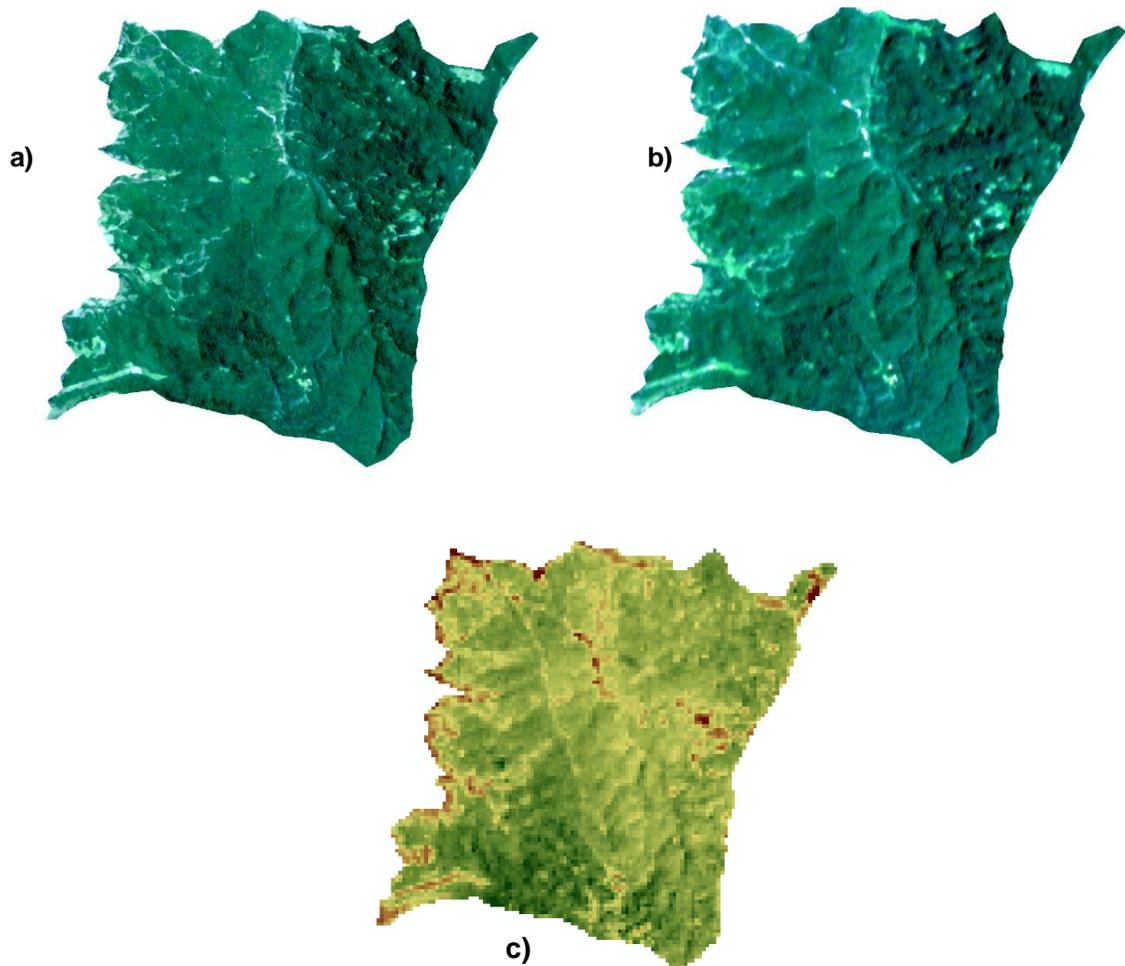


Figura 3. Imágenes satelitales del área de estudio: a) PlanetScope de septiembre de 2023; b) PlanetScope de enero de 2024 y c) Landsat de noviembre de 2013.

1.3.2 Cálculo de NDVI

Con las imágenes de los años 2023 y 2024 de la zona de estudio se procedió a calcular el índice NDVI, mismo que es usado para determinar la vegetación, las condiciones vegetativas y su dinámica en la cobertura terrestre. Este índice se encuentra en un rango entre -1 y 1, teniendo a cero como un valor aproximado de no vegetación (Olivares y López-Beltrán, 2019). Los valores negativos del NDVI representan superficies sin vegetación, mientras valores cercanos a 1 contienen vegetación densa. A través de este índice se pudo diferenciar donde hubo mayor presencia de vegetación, lo cual fue un criterio para establecer los puntos de muestreo en campo,

así también este índice posteriormente permitió encontrar la relación lineal (regresión) entre el NDVI y la Biomasa aérea (BT). Para realizar el cálculo del NDVI (Ecuación 1) se utilizaron las bandas 3 (Rojo) y 4 (Infrarrojo cercano), esto a través del programa ArcGIS 10.5.

(1)

$$\text{NDVI} = \frac{\text{IRC} - \text{R}}{\text{IRC} + \text{R}}$$

Donde:

IRC: Reflectancia de la Banda de infrarrojo cercano

R: Reflectancia de la Banda del rojo

1.3.3 Clasificación de coberturas

Con las imágenes satelitales se realizó un proceso de clasificación supervisada para distinguir entre las diversas coberturas, dado que cada una presenta un comportamiento específico en términos de biomasa y carbono. Este procedimiento implica la transformación de una imagen continua en otra categorizada, utilizando la agrupación de niveles digitales (ND) con similitudes espectrales. Se seleccionan las bandas espectrales de la imagen, se define el número de clases espectrales y se aplican criterios de similitud y algoritmos de agrupación de ND (Posada, 2004). De las distintas coberturas vegetales de interés, se tuvo presente a los bosques naturales, áreas agrícolas y pastizales, dado que cada una tiene un impacto diferente en la biomasa y, por consiguiente, en la captura de carbono, según el protocolo de biomasa-carbono de (Yepes et al., IDEAM, 2011). Una vez completada la clasificación de las coberturas de interés, se llevó a cabo una validación temática para asegurar la precisión del proceso. Para ello se utilizó la matriz de confusión, tomando como referencia la clasificación de coberturas de tierra del Ministerio de Ambiente, Agua y Transición Ecológica (MAATE, 2022). Los resultados de la matriz de confusión se usaron para calcular el índice Kappa (ecuación 2), que evaluó la concordancia entre la clasificación obtenida y la imagen satelital.

(2)

$$K = \frac{P_o - P_c}{1 - P_c}$$

Donde:

P_o: Confiabilidad global

P_c: Confiabilidad resultante al azar.

El índice Kappa se emplea para validar la correspondencia entre el producto cartográfico, representado por la capa clasificada, y la imagen satelital.

Tabla 1. Grado de acuerdo del Índice Kappa

Clasificación del Índice Kappa	
Kappa	Grado de acuerdo
<0.00	Sin acuerdo
0.00-0.20	Insignificante
0.21-0.4	Discreto
0.41-0.60	Moderado
0.61-0.80	Sustancial
0.81-1.00	Casi perfecto

Fuente: López de Ullibarry y Pita Fernández

Para la matriz de confusión se utilizó de referencia la clasificación supervisada y la imagen de PlanetScope de los años 2023,2024 y la imagen Landsat del 2013.

1.3.4 Levantamiento de información de biomasa en campo

La investigación se llevó a cabo en el bosque siempre verde andino de ceja andina de los Andes, específicamente en el cantón Gualaceo de la provincia del Azuay. Para obtener información detallada sobre la biomasa de los árboles y su contribución al secuestro de carbono en esta región, se implementó un enfoque que combina la clasificación supervisada y el índice NDVI. Se estableció un muestreo aleatorio dentro de la cobertura boscosa, seleccionando 20 parcelas de 10x10 m distribuidas en toda el área de estudio. La evaluación de la biomasa se centró en las especies leñosas y su diámetro a la altura del pecho (DAP), ya que este dato es esencial para aplicar ecuaciones alométricas que relacionan el DAP con los componentes de la biomasa arbórea (Dixon et al., 1994; Binkley et al., 2004; Gower et al., 1999; Nívar, 2009).

1.3.5 Estimación de biomasa aérea

Para el cálculo de la biomasa aérea (BT) se utilizó tres ecuaciones alométricas, el uno propuesto por Lerma & Orjuela (2014), el otro de Ovington y Olson (1970) y una última por Chave et al. (2014). La última ecuación fue desechada debido a que se necesitaba la densidad de madera y esta información recolectada en campo no permitía completar en su totalidad este parámetro. Es importante mencionar que la ecuación uno y dos, han sido usadas para zonas de bosque altoandino, y consideran un diámetro de altura del pecho DAP entre 5 y 67 cm. Con dicho antecedente se escogió la ecuación de Lerma & Orjuela (Ecuación 3) debido a que esta tiene mayor correlación entre biomasa estimada y el NDVI, además ha sido usada en zonas donde predominan especies forestales como *Weimannia auriculata*, *Miconia* spp y *Baccharis* spp, siendo similar a la zona de estudio (Perea-Ardila et al., 2021).

(3)

$$\ln BT = -1,85 + 2,11 * \ln DAP. \text{ Lerma \& Orjuela (2014)}$$

Dónde:

DAP: Diámetro a la altura del pecho en cm

BT: Biomasa aérea total (kg/árbol)

Ln: Logaritmo natural (base e/ 2.7182).

1.3.6 Regresión matemática de biomasa en el área de bosque

La variación en la abundancia de árboles y la estructura de la vegetación incide en la densidad de las copas en una parcela, esto influencia la estimación de la biomasa con datos de sensores remotos (Li et al., 2019). De las 20 parcelas levantadas se filtraron 12 parcelas que tuviesen una biomasa ≥ 900 kg/parcela con un DAP $\geq ,5$ cm. Finalmente, 12 parcelas cumplieron con la condición, para una representatividad de 0,12 ha (Tabla 4).

Tabla 2. Datos filtrados por parcelas y biomasa

PARCELA	BIOMASA kg/árbol	BIOMASA tn/ha
1	1.648,2	1,648
2	2.277,2	2,277
3	1.352,7	1,353
7	1.906,4	1,906
8	956,7	0,957
9	1.265,9	1,266
10	3.099,4	3,099
11	945,0	0,945
12	3.012,3	3,012
15	925,2	0,925
16	1.038,7	1,039
19	1.103,0	1,103

Fuente: Autor.

Una vez recopilados y filtrados los datos de biomasa, se procedió a establecer una relación matemática con los valores de NDVI por parcela para obtener una ecuación que explique la biomasa del bosque en función del NDVI. Para ello, se obtuvieron los datos de NDVI de cada parcela utilizando la herramienta *Raster pixels to point* en Quantum Gis (QGIS), para luego extraer la información promedio de cada parcela a través de herramientas como *Zonal Statistics de ArcMap* y posteriormente unir con la información de biomasa medida en campo (ArcMap, 2016).

Para validar la precisión de los resultados obtenidos, se utilizaron dos estadísticos fundamentales: el coeficiente de determinación (R^2) y el error cuadrático medio (RMSE). El coeficiente de determinación R^2 proporciona una medida de la capacidad del modelo para reproducir los resultados observados, reflejando así la calidad del ajuste del modelo a los datos experimentales. Por otro lado, el error cuadrático medio RMSE cuantifica la discrepancia entre los valores de biomasa observados y los valores estimados por el modelo, lo que permite evaluar la eficacia del

modelo en la predicción de la biomasa. Este enfoque estadístico riguroso garantiza una validación adecuada de los resultados, fundamentada en criterios estadísticos sólidos y confiables.

1.3.7 Cálculo de biomasa actual

Para generar el mapa de biomasa actual, es fundamental distinguir entre los bosques naturales y otras coberturas del área, debido a las metodologías divergentes empleadas en la estimación de biomasa. Esta discriminación se efectuó mediante la exclusión de los bosques naturales de la cartografía de coberturas, generando así un archivo independiente. Empleando los datos de biomasa asociados a cada tipo de cobertura, se procedió a integrarlos en la tabla de atributos. Seguidamente, se calculó el valor de biomasa para cada categoría multiplicando su densidad de biomasa por la superficie correspondiente en hectáreas, obteniendo así la biomasa total actual.

Por otro lado, la evaluación de biomasa en los bosques naturales requiere un enfoque especializado. Tras establecer el modelo estadístico apropiado para la estimación de biomasa, se empleó la herramienta *Raster Calculator* sobre el NDVI, donde se introdujo la ecuación del modelo matemático.

Posteriormente, se aplicó la herramienta *Zonal Statistics as Table*, exclusivamente sobre las áreas de bosque natural, para determinar el valor promedio de biomasa aérea. Este valor se multiplicó por el área total cubierta por bosques naturales, obteniendo así la biomasa total correspondiente a esta categoría de cobertura.

1.3.8 Cálculo de captura de carbono

Como indica el Panel Intergubernamental del Cambio Climático (2007), para obtener los datos de carbono a través de la biomasa se multiplicó los resultados por 0,5 y con ello determinar el CO₂ fijado en el área de estudio a través de la Ecuación 4.

(4)

$$\text{CO}_2 = \text{kr} * \text{C} \quad (3)$$

Dónde:

CO₂: Dióxido de Carbono

C: Carbono

Kr: 3,67. Factor de conversión a resultante del cociente de los pesos moleculares del dióxido de carbono 44 y del carbono 12. Con esta relación, finalmente se desarrolla el mapa de captura de carbono para el área de estudio.

1.3.9 Análisis de captura de carbono para el año 2013

Se realizó una clasificación supervisada utilizando la imagen de 2013, aplicando la misma metodología descrita en el ítem 1.3.3. En este proceso, se empleó la matriz de confusión con base en la clasificación de coberturas de tierra proporcionada por el Ministerio de Ambiente, Agua y Transición Ecológica (MAATE, 2014). Los datos de esta matriz se utilizaron para calcular el índice Kappa, que sirvió como medida de precisión del proceso de clasificación.

Al combinar la información sobre la extensión del bosque en 2013 con los datos de carbono del año 2023, se logró realizar una estimación confiable de la cantidad de carbono almacenado en el bosque durante el año base. Este enfoque metodológico ofrece una visión holística de la dinámica del carbono a lo largo del tiempo, lo que permite identificar tendencias significativas en la captura y almacenamiento de carbono por parte de los ecosistemas forestales.

Por último, se llevó a cabo un análisis del comportamiento de la cobertura boscosa a lo largo del tiempo, con el objetivo de utilizar esta información como indicador de las actividades humanas en la zona. Para ello, se seleccionaron períodos de 1 y 10 años, lo que facilitó la observación de cambios significativos en la cobertura forestal.

1.4 Fase 2. Levantamiento de información social

1.4.1 Levantamiento de información social sobre los actores sociales involucrados en la comunidad de Carmen de Jadán

Se llevó a cabo un levantamiento de información social mediante una metodología de diálogo directo con la comunidad que puede denominarse "método de consulta participativa o metodología participativa de diálogo comunitario" (Chambers, 1994). Además, se realizó una revisión de información secundaria con el fin de identificar y analizar a fondo a los diversos actores involucrados en los procesos de gestión en la zona de la comunidad de Carmen de Jadán. Durante este proceso, se recopiló información relevante sobre las instituciones gubernamentales, organizaciones no gubernamentales, líderes comunitarios y otros actores clave que han desempeñado un papel significativo en la gestión y conservación del área durante los últimos años. Con esta información, se pudo analizar el modelo de gobernanza comunitaria, permitiendo comprender su evolución a lo largo del tiempo y valorar los resultados alcanzados en términos de conservación.

CAPÍTULO II

RESULTADOS

2.1 Cálculo del NDVI

Se realizó el cálculo del Índice NDVI, para las imágenes de los años 2023 y 2024, donde se observaron diferencias en los valores para la época seca y la época lluviosa (Figura 4). El NDVI de septiembre del 2023 presentó un valor máximo de 0.90; mientras que el NDVI de enero del

2024 presentó un valor más bajo de 0.86. Como resultado de esto, podemos ver que existe gran parte de bosque, lo que se ve reflejado en los tonos verdes más intensos, mientras que las zonas con colores amarillentos y rojos representan otro tipo de cobertura como pastos y zonas sin vegetación.

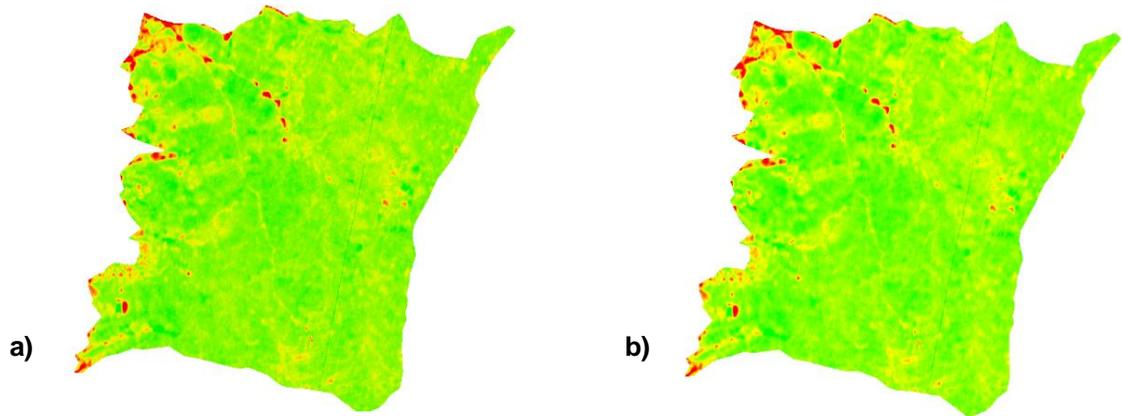


Figura 4. Índice de Vegetación Normalizado (NDVI); a) imagen satelital de septiembre del año 2023 (época seca); b) imagen satelital de enero de 2024 (época lluviosa).

2.2 Clasificación de coberturas

En este proceso, se tomaron en cuenta las categorías de clasificación de la capa de cobertura y uso del suelo del año 2022 proporcionadas por la plataforma del Sistema Único de Información Ambiental-SUIA. Las coberturas resultantes incluyeron bosque, intervención, pastizales y zonas degradadas-mosaico agropecuario. (Figura 5; Tabla 3).

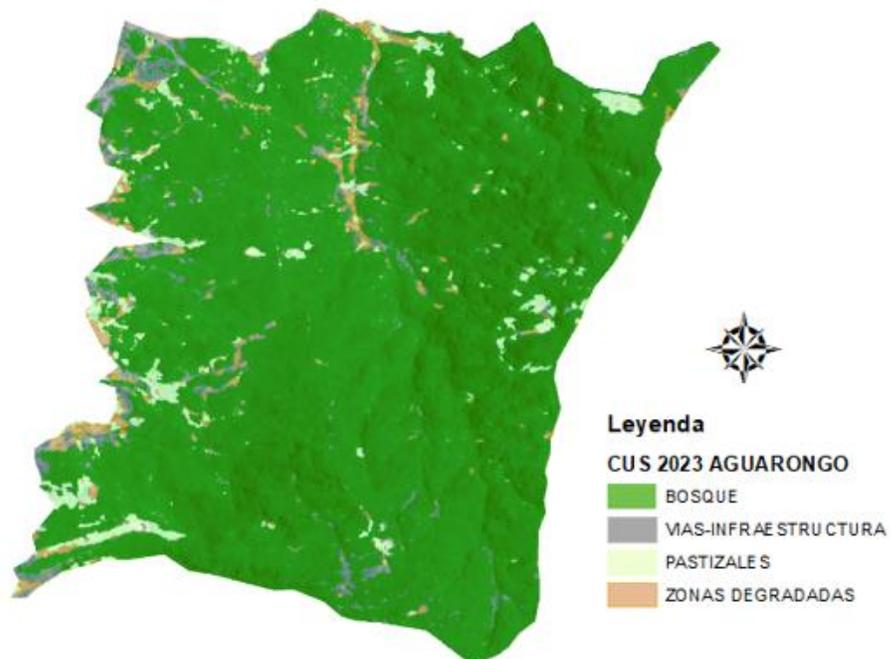


Figura 5. Clasificación supervisada del área de estudio con la imagen satelital del año 2023.

Tabla 3. Clases de cobertura resultado de la supervisión clasificada

CLASES	Area (ha)	%
BOSQUE	708,83	88,79
VIAS-INFRAESTRUCTURA	31,58	3,96
PASTIZALES	30,91	3,87
ZONAS DEGRADADAS -MOSAICO AGROPECUARIO	26,99	3,38
TOTAL	798,31	100

Fuente: Autor

De la matriz de confusión se obtuvo un índice Kappa para el año 2024 de 0,73; para el 2023 de 0,81 y para el año 2013 de 0,32 (Tabla 4). Los mejores resultados se obtuvieron con la imagen el mes de septiembre del año 2023, puesto que al contrastar este resultado con la clasificación del índice Kappa proporcionada por López de Ullibarry y Pita Fernández (1999) (Tabla 1), se evidencia un grado de acuerdo catalogado como "Casi perfecto", esto denota una concordancia muy alta entre ambas capas, sugiriendo así que la capa evaluada se ajusta con gran precisión a la realidad.

Tabla 4. Resultados de la matriz de confusión de los años 2024-2023-2013.

Imagen	Clases	Error Com%	Error Omi%	Precision global(po)	Precision global (po %)	Índice K	Índice K (%)
2024	BOSQUES	0,50	0	0,8	80	0,73	73
	INFRAESTRUCTURA-VIAS	0,86	1				
	MOSAICO AGROPECUARIO	0,51	1,51				
	PASTIZALES	1,18	0,50				
2023	BOSQUES	0,32	0	0,8	80	0,81	81
	INFRAESTRUCTURA-VIAS	0,32	1,18				
	MOSAICO AGROPECUARIO	0,16	0				
	PASTIZALES	0,49	0,5				
2013	BOSQUES	0,11	0,11	0,9	90	0,32	32
	INFRAESTRUCTURA-VIAS	1,59	0,87				
	MOSAICO AGROPECUARIO	1,68	15				
	PASTIZALES	3,03	20				

Fuente: Autor

2.3 Estimación de biomasa y regresión lineal entre biomasa e Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada NDVI en bosque natural

La zona de bosque del Aguarongo, presentó un total de 474 individuos en las 20 parcelas levantadas donde se observó un DAP promedio de 15,42 cm. Las especies forestales con mayor

abundancia fueron *Myrsine dependens*; *Miconia aspergillaris* y *Escallonia myrtilloides*. Las parcelas con mayor BT fueron la 10 y la 12 (Figura 6).

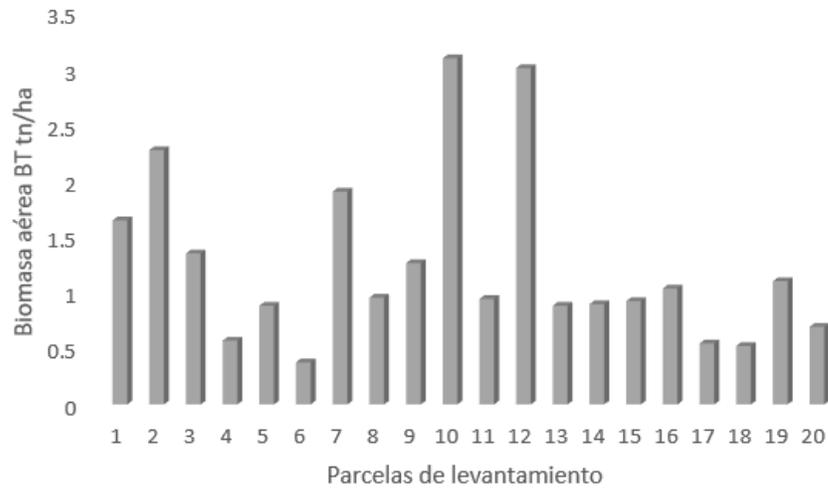


Figura 6. BT por parcela levantada en la zona de estudio

Con la ecuación de Lerma & Orjuela, se obtuvo un total de biomasa de 19,53 ton /ha por las 12 parcelas seleccionadas, para luego realizar un análisis de regresión lineal entre la biomasa y el NDVI derivado de la imagen satelital del año 2023. Se observó un coeficiente de determinación (R²) de 0.61, indicando una asociación moderadamente fuerte entre la biomasa y el NDVI para ese año. Sin embargo, al analizar la imagen del año 2024, se encontró que el R² disminuyó significativamente a 0.15, sugiriendo una correlación más débil entre estos dos parámetros en comparación con el año anterior. En este punto, debemos mencionar que se observó el comportamiento de las ecuaciones alométricas usadas y se consideró la mejor correlación en biomasa y NDVI (Figura.7).

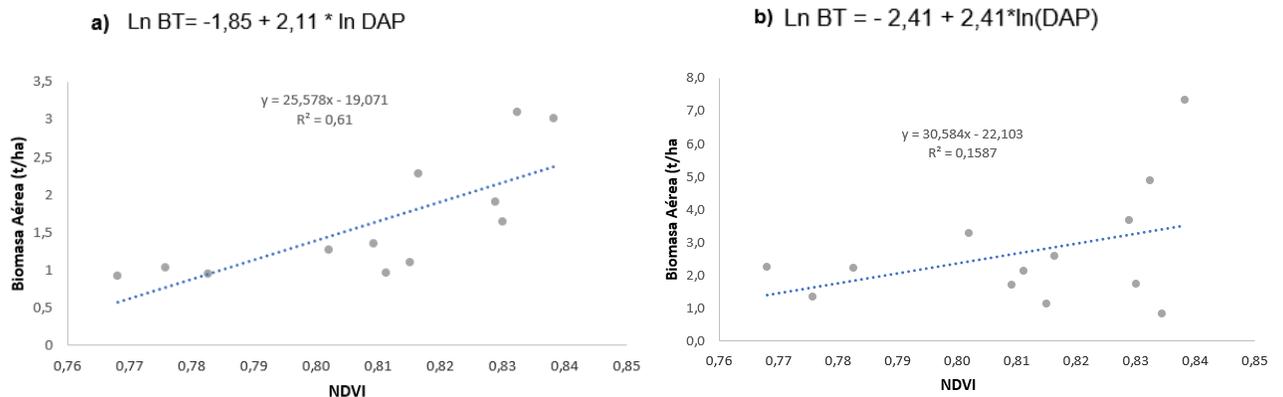


Figura 7. Relación entre biomasa BT y NDVI con uso de las dos ecuaciones alométricas a) Ecuación alométrica propuesta por Lerma & Orjuela (2014); b) Ecuación alométrica propuesta por Ovington y Olson, (1970).

Con los resultados de biomasa BT se realizó el análisis con la información obtenida del NDVI para los años 2023 y 2024, esto con la finalidad de establecer una mejor correlación entre las dos variables. Los datos del año 2023 (época seca) dieron un mejor ajuste con una regresión lineal partiendo de los estadísticos R2 de 0,61 (R2adj = 0,57) (Figura 8) y residual standard error: 0.5213 con nueve grados de libertad que representa un RMSE de 0.49 (Tabla 5).

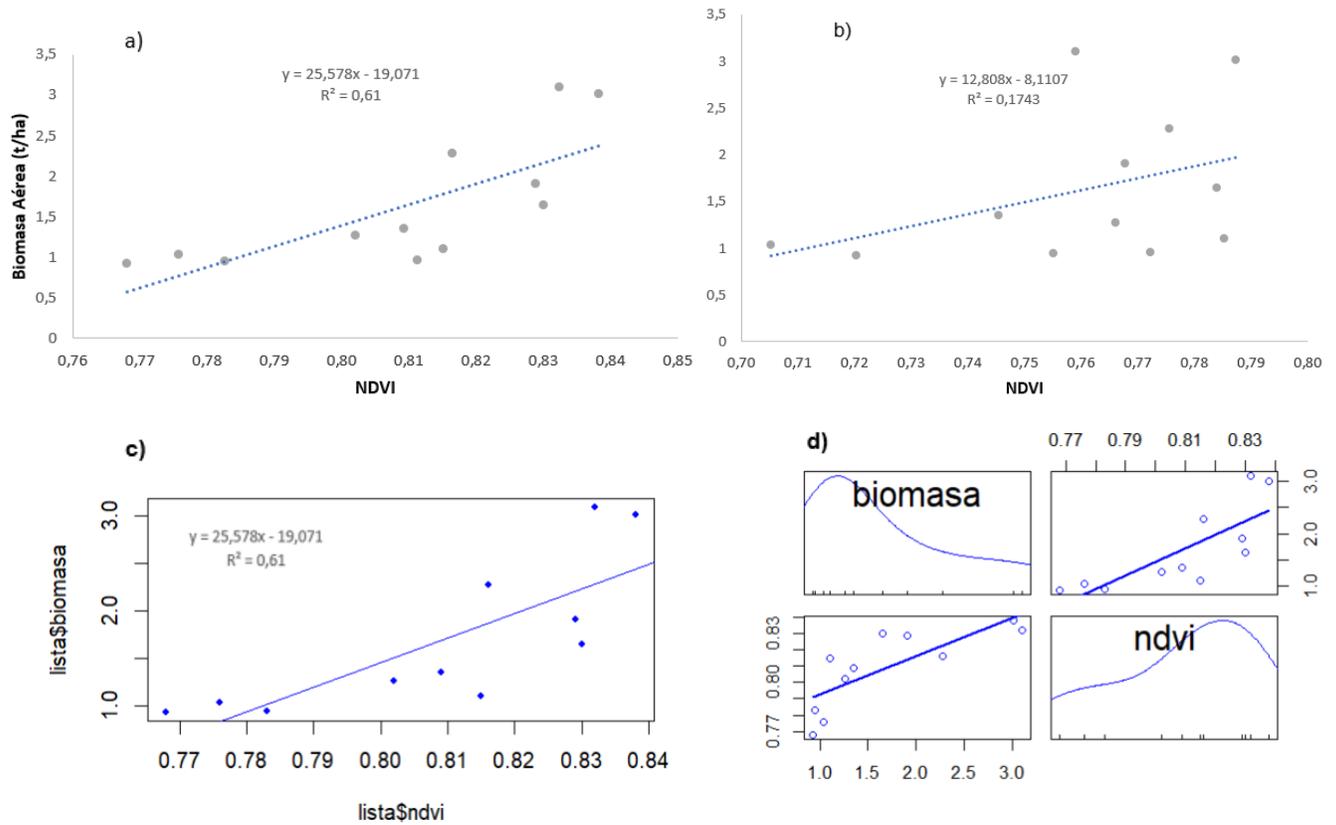


Figura 8. (a) Regresión lineal entre los datos NDVI año 2023 y biomasa BT; (b) regresión lineal entre los datos NDVI año 2024 y biomasa BT; (c y d) modelo estadístico para los datos NDVI-2023 y biomasa BT.

Los resultados revelaron una discrepancia general de 0.49 toneladas por hectárea (ton/ha) de biomasa aérea entre los valores observados y estimados. Esta discrepancia se considera mínima, dado que representa menos del 5% del total de los errores.

Tabla 5. RMSE datos biomasa bosque natural

PARCELAS	OBSERVADOS	ESTIMADOS $y = 25,578x - 19,071$	DIFERENCIA (DESVIACIÓN)	DES ²
1,000	1,648	2,161	-0,513	0,263
2,000	2,277	1,813	0,464	0,216
3,000	1,353	1,630	-0,277	0,077
7,000	1,906	2,132	-0,226	0,051
8,000	0,957	1,681	-0,724	0,524
9,000	1,266	1,444	-0,178	0,032
10,000	3,099	2,222	0,878	0,770
11,000	0,945	0,949	-0,004	0,000
12,000	3,012	2,369	0,643	0,413
15,000	0,925	0,577	0,348	0,121
16,000	1,039	0,774	0,264	0,070
19,000	1,103	1,778	-0,675	0,456
	19,53		RMSE TOTAL	0,49
			Error medio	5,21824E-05
			Error cuadrático	2,992633414
			Error medio cuadrático	0,249386118
			Error estandar	0,499385741

Fuente: Autor

2.4 Biomasa actual

A partir de los resultados derivados de la regresión lineal, se determinó la ecuación 5 para calcular la biomasa promedio en la cobertura actual de bosque natural. Es relevante señalar que, para las restantes coberturas como pastizales y mosaico agropecuario, se utilizó información secundaria, dado que no se disponía de datos de campo para estas áreas, las cuales representan el 7% del total del área estudiada. Con estos datos, se generaron resultados para todas las coberturas que contienen biomasa (ver Tabla 6). Por último, empleando esta información, se elaboró el mapa de biomasa en toneladas por hectárea (ton/ha) para el área de estudio (1.496,84 tn/ha). (Figura 9)

$$(5) \quad y = 25,578x - 19,071$$

Tabla 6. Biomasa actual por cobertura dentro del área de estudio.

COBERTURA	AREA ha	BIOMASA (tn/ha)	BIOMASA TOTAL (tn/ha)
BOSQUE	708,83	1,76	1247,54
VIAS-INFRAESTRUCTURA	31,58	0	0,00
PASTIZALES	30,91	3,7	114,37
ZONAS DEGRADADAS (MOSAICO AGROPECUARIO)	26,99	5	134,93
TOTAL ÁREA	798,31	TOTAL BIOMASA	1496,84

Fuente: Autor

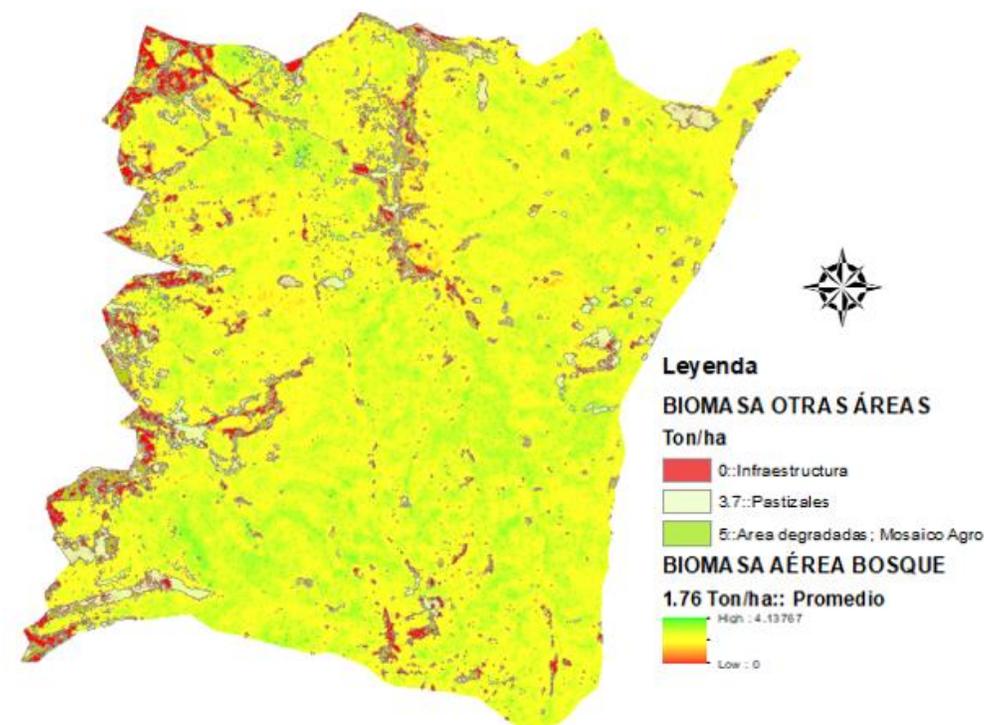


Figura 9. Biomasa aérea en la zona de bosque protector Aguarongo

2.5 Captura de carbono actual

Utilizando el valor de la biomasa aérea del área, se aplicaron las referencias del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (2007) para derivar un total de 748.4 toneladas de carbono por hectárea (tn/ha), lo que equivale a un total de 2,746.70 toneladas de CO₂ fijadas para toda el área de estudio, como se muestra en la Tabla 7. Sin embargo, enfocamos nuestra atención en la captura de CO₂ por parte del bosque, la cual se estima en 2,289.20 toneladas por hectárea de CO₂. Esta estimación se ha elaborado con mayor precisión mediante la metodología desarrollada en el presente documento. Finalmente, con estos resultados, se ha establecido una relación directa entre la biomasa y el contenido de carbono, lo que ha permitido la generación del mapa actual del contenido de CO₂, como se ilustra en la Figura 10.

Tabla 7. Resultados de Carbono y CO₂ en la zona del Bosque Protector Aguarongo

COBERTURA	AREA ha	BIOMASA TOTAL (T)	CARBONO tn C/ha	CO ₂ Fijado tn/ha
BOSQUE	708,83	1247,54	623,8	2289,2
VIAS-INFRAESTRUCTURA	31,58	0,00	0,0	0,0
PASTIZALES	30,91	114,37	57,2	209,9
ZONAS DEGRADADAS (MOSAICO AGROPECUARIO)	26,99	134,93	67,5	247,6
TOTAL	798,31	1496,84	748,4	2746,7

Fuente: Autor

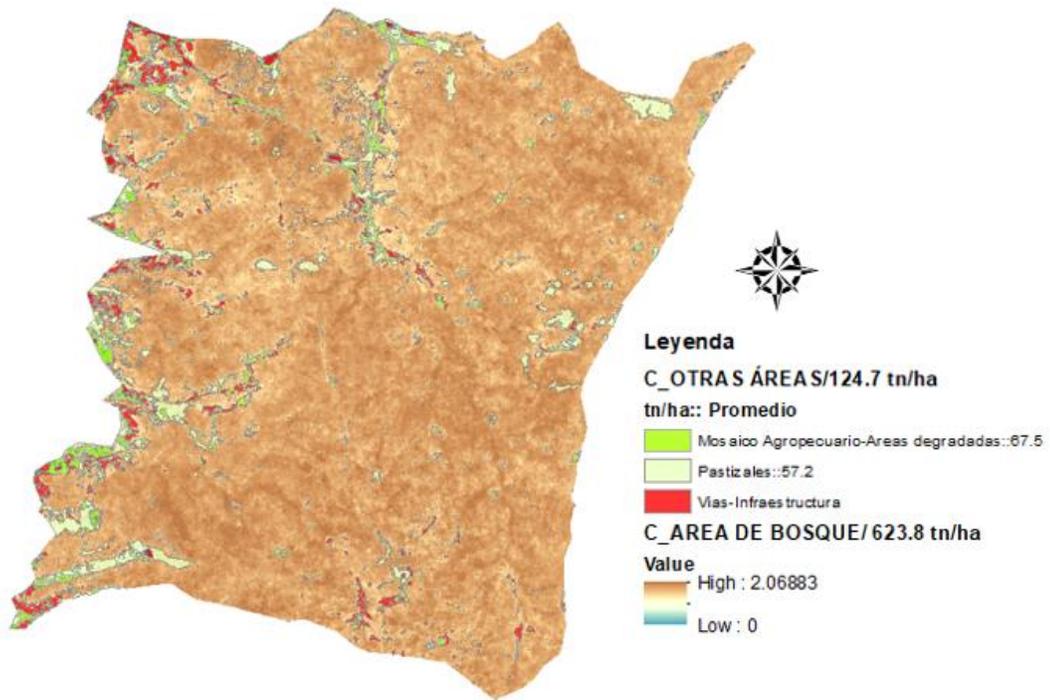


Figura 10. Carbono en la zona de bosque protector Aguarongo

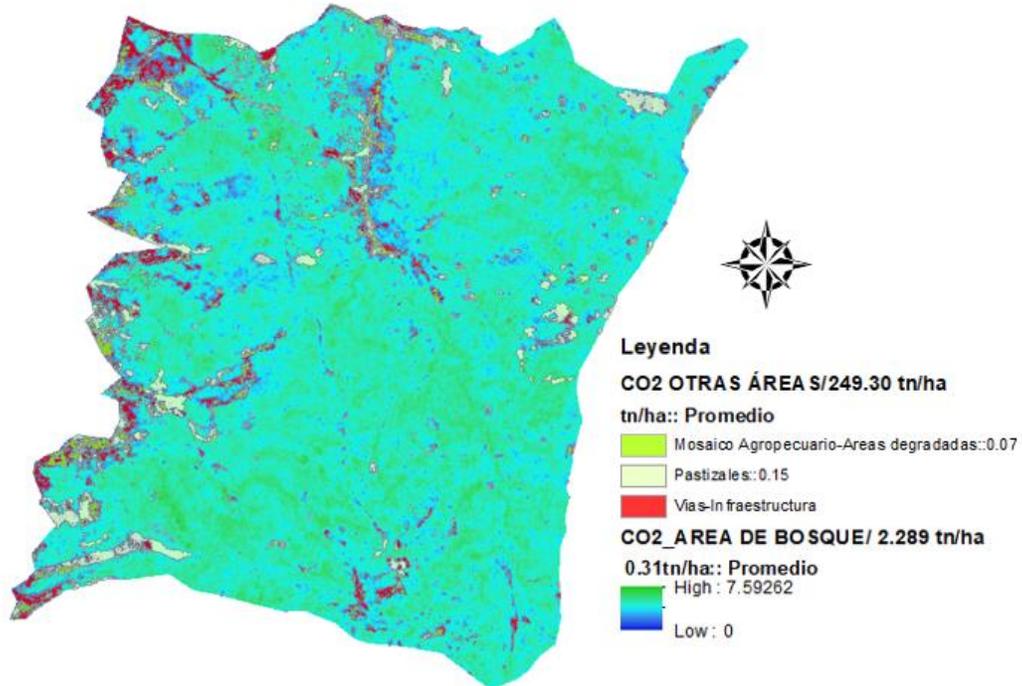


Figura 11. CO2 fijado en la zona de bosque protector Aguarongo

2.6 Análisis de captura de carbono para el año 2013

La clasificación supervisada se llevó a cabo utilizando la imagen satelital Landsat 8 del año 2013 con el objetivo de distinguir entre dos categorías de cobertura del suelo: bosque y zona intervenida. Debido a la resolución de 30 metros de la imagen satelital, se obtuvo una clasificación inicial de baja calidad con un índice Kappa 0.32 (Tabla 4). Por ello se decidió utilizar la información de cobertura y uso del suelo proporcionados por el Ministerio de Agua y Ambiente correspondientes al año 2014 (Figura 12), con una escala 1:100 000 y es información libre y que ha sido usada para temas de ordenamiento, educativos y de gestión. Con los resultados se identificó la cobertura de bosques y se determinó el área y el porcentaje de territorio cubierto por esta categoría de cobertura (Tabla 8).

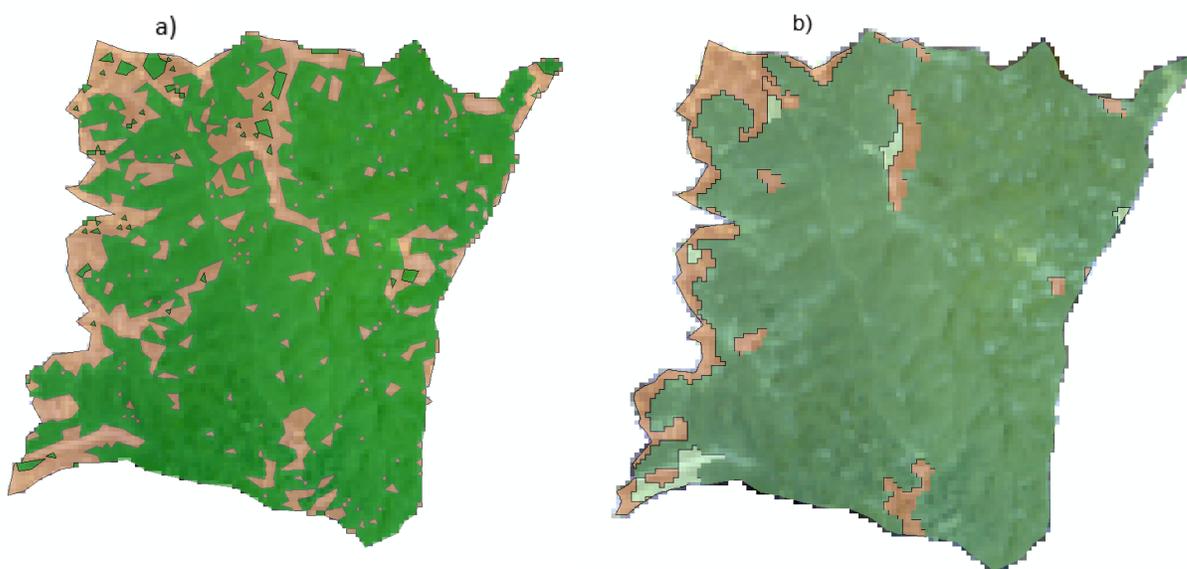


Figura 12. Cobertura y uso del suelo. a) Clasificación supervisada con la imagen satelital LANDSAT 8 del año 2013. b) Cartografía de uso del suelo del Ministerio de Agua y Ambiente y Transición Ecológica. MATTE del año 2014.

Tabla 8. Información de cobertura de bosque para los años 2013 y 2014

AÑO 2014-MINISTERIO DEL AMBIENTE, AGUA Y TRANSICIÓN ECOLÓGICA(MAATE)

TIPO	ÁREA ha	%
BOSQUE NATIVO	720,04	90,50

AÑO 2013-LANDSAT 8

TIPO	ÁREA ha	%
BOSQUE NATIVO	628,03	78,94

Para el año 2014 el área de bosque es de 720.04 ha (MAATE,2014), donde se estimaba que existió un total de 633.60 ton C/ ha y 2.325 ton CO₂ fijado, mientras que para el año 2023 existió

708.83 ha de bosque con un total de 623.80 C/ ha y 2.289 ton CO₂ fijado, dando una diferencia de carbono de 9.8 ton C/ ha y 36 ton CO₂ fijado, respectivamente. Con respecto al cambio de uso de suelo durante el periodo de 2014 a 2023 podemos observar que se ha perdido un total de 11.21 ha equivalente al 1.70 % del total del área de bosque (Figura 13).

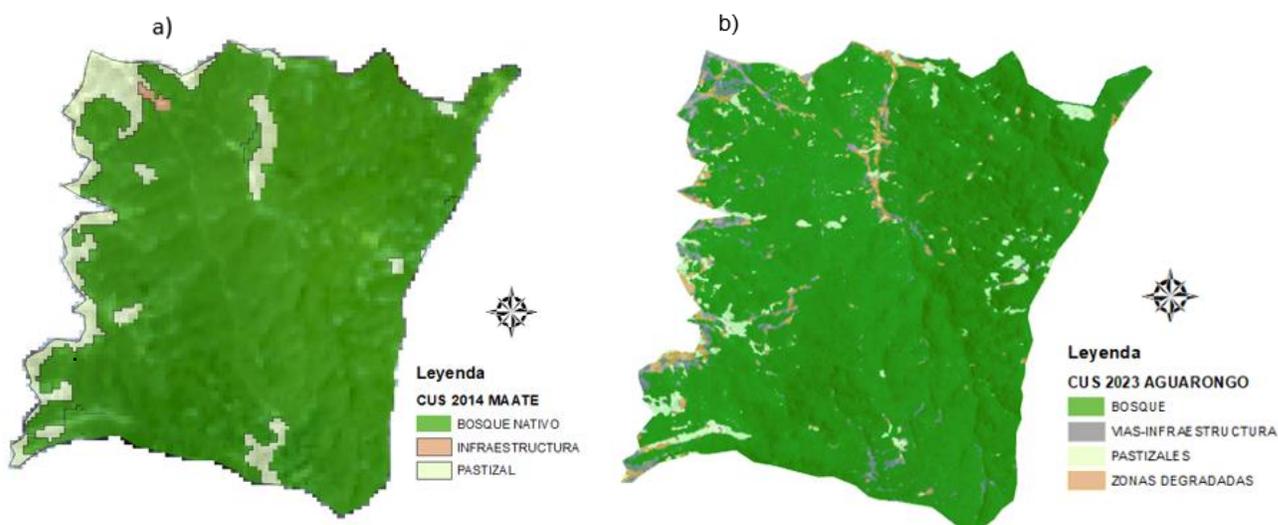


Figura 13 . Cobertura y uso del suelo. a) Cartografía de uso del suelo del Ministerio de Agua y Ambiente y Transición Ecológica. MATTE del año 2014. b) Cobertura y Uso del suelo según imagen satelital 2023. Clasificación supervisada 2023.

2.7 Análisis de la información social levantada en la Comunidad del Carmen de Jadán

Como parte del diálogo comunitario y el levantamiento de información secundaria en la comunidad de Carmen de Jadán, se identificó la guía titulada *"El Carmen de Jadán y su relación con el agua: pasado, presente y futuro"*, elaborada por el Fondo del Agua para la Conservación de la Cuenca del Río Paute (FONAPA), TNC - The Nature Conservancy, Coca-Cola y el Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal del Cantón Gualaceo. Este documento ha sido clave para comprender las dinámicas sociales que existen para conservar el bosque y sus múltiples beneficios.

Los datos proporcionados por la comunidad, junto con la información del documento citado, han permitido demostrar cómo las acciones sociales han contribuido significativamente a que el cambio en el uso de suelo entre 2014 y 2023, sea solo del 1,7 % del total del área de bosque (Zona de estudio). Este resultado es especialmente positivo, considerando que se trata de una zona específica del bosque Aguarongo el cual es altamente intervenido y afectado.

A continuación, se presenta un resumen de los actores involucrados en la historia de Carmen de Jadán y su trayectoria en la conservación:

En la Tabla 9 se presenta un listado de los actores sociales que han participado desde la década de 1970, con inversiones económicas orientadas a desarrollar proyectos de reforestación, conservación, delimitación de áreas protegidas, producción local, educación, y equipamiento. Estos esfuerzos han sido posibles gracias al compromiso comunitario y la sólida organización local. Sin lugar a dudas, los resultados obtenidos en el manejo integral del Bosque Protector Aguarongo son el fruto del esfuerzo colectivo de los habitantes de Carmen de Jadán.

Tabla 9. Listado de actores comunitarios e institucionales.

N°	Instituciones Privadas y Mixtas	Instituciones Públicas	Instituciones comunitarias
1	Fundación Ayuda en Acción	Gobierno Autónomo Descentralizado (GAD) de Gualaceo	Junta de Agua de Carmen de Jadán
2	Fundación Rikcharina	Gobierno Provincial del Azuay	Junta de Agua de Licán
3	Plan Internacional	CG Paute (Corporación para la Gestión del Agua del Río Paute)	Junta de Riego
4	Fundación Mazán	Junta Parroquial de Jadán	Comité de Promejoras
5	FONAPA- Fondo del Agua para la Conservación de la Cuenca del Río Paute	Ministerio del Ambiente actual MAATE.	Organizaciones comunitarias.
6	TNC- The Nature Conservancy		
7	COCA COLA-Agua para el Futuro.		

Fuente: Coronel, 2020 y líderes comunitarios.

Sin embargo, para los propósitos de este estudio, es relevante destacar el trabajo de los últimos 10 años. Durante este período, se llevó a cabo el proyecto "Agua por el Futuro", una iniciativa liderada por el Sistema Coca-Cola (The Coca-Cola Company Ecuador y su embotelladora Arca Continental Ecuador), en colaboración con TNC y la Alianza Latinoamericana de Fondos de Agua. Este proyecto contó con la activa participación de la comunidad de El Carmen de Jadán, el Gobierno Autónomo Descentralizado (GAD) de Gualaceo y el Fondo del Agua para la Conservación de la Cuenca del Río Paute (FONAPA) (Coronel, 2020). Donde, según la información secundaria proporcionada por FONAPA, entre los años 2015 y 2019 se invirtieron un total de \$60,860.00 dólares en este proyecto, los cuales se destinaron a la protección de fuentes

hídricas, proyectos de producción sostenible, reforestación, formación de promotores ambientales y otras acciones en beneficio de la zona del bosque Aguarongo y la Comunidad Carmen de Jadán.

En la **figura 14**, se presenta el modelo de gobernanza local, que ha evolucionado desde 1970 hasta 2023. En este modelo, 11 actores clave han intervenido directamente en la gestión del recurso hídrico, gestionando 14 fuentes de agua dentro de la zona de estudio del Bosque Protector Aguarongo. Estas fuentes abastecen a más de 2.000 habitantes, y gracias a la asignación de recursos económicos, tanto internos como externos, han sido protegidas, delimitadas y conservadas adecuadamente.

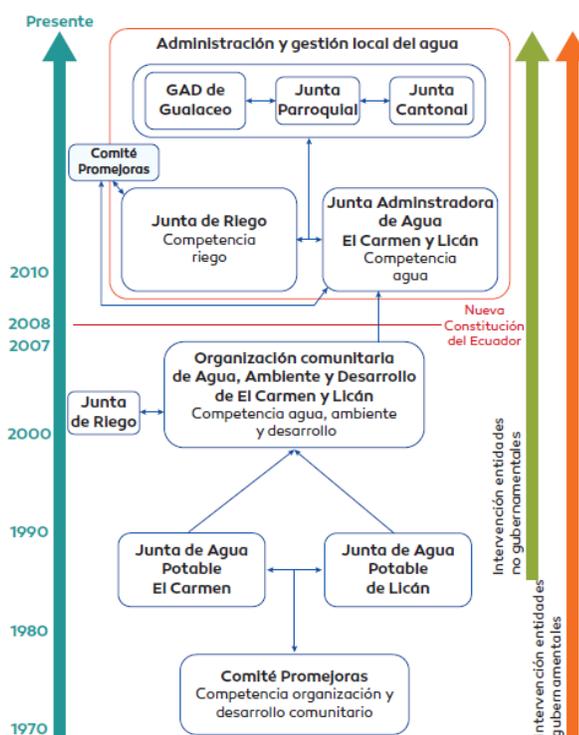


Figura 5. Esquema del proceso histórico de la gobernanza local del agua en El Carmen de Jadán. Cantón Gualaceo, Provincia del Azuay.

Figura 14. Gobernanza local de la comunidad Carmen de Jadán. Tomada del libro “El Carmen de Jadán y su relación con el agua”

Finalmente, como parte del estudio, se realizó un análisis sobre la percepción que tiene la comunidad sobre el cuidado del bosque (Figura 15), donde observamos que la comunidad de Carmen de Jadán es la mayor responsable de cuidar el bosque y sus fuentes de agua, sin embargo, también es importante entender que son conscientes de que existen otras instituciones y que el éxito de las acciones en su territorio son la suma de esfuerzos comunitarios e institucionales:

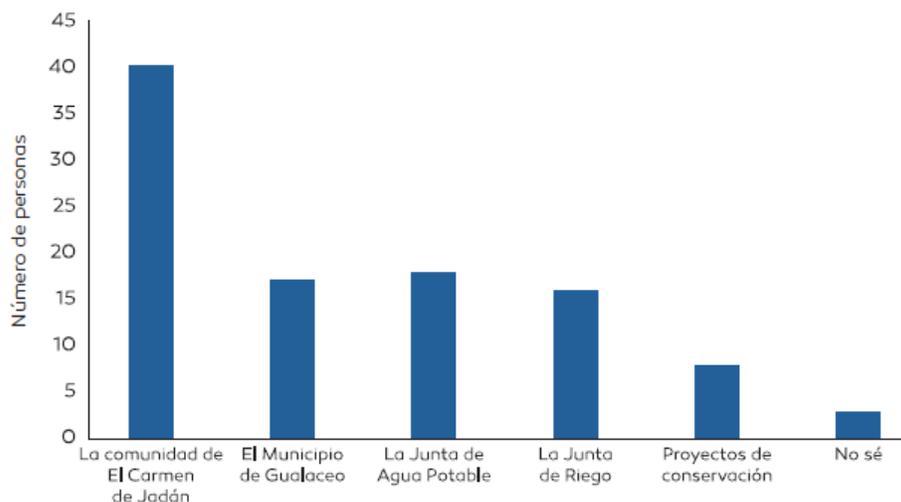


Figura 15. Gráfico obtenido del estudio “El Carmen de Jadán y su relación con el agua”
Fuente: Coronel. 2020

CAPITULO III

DISCUSIÓN

Este estudio se centró en la estimación del carbono y CO₂ fijado en una zona específica del Bosque Protector Aguarongo. Para ello, se inició analizando los datos de biomasa con la aplicación de ecuaciones alométricas específicas para especies leñosas andinas, un enfoque esencial para comprender las condiciones ecológicas de un bosque (Brown et al., 1993; Vashum & Jayakumar, 2012; Reichstein & Carvalhais, 2019).

La planificación del levantamiento de información se basó en el NDVI y el tipo de cobertura de la zona, procurando recopilar la mayor cantidad de biomasa en especies leñosas. Para ello se establecieron 20 parcelas de evaluación. Esto se fundamentó en la idea de que un mayor número de árboles por píxel (densidad de la copa) debería asociarse con mayores contenidos de biomasa aérea (Anaya et al., 2009; Wassihun et al., 2019).

Aunque el modelo exponencial se basó en un conjunto limitado de parcelas (20 de 10 x 10 m), lo que implica una restricción en la cantidad de individuos y biomasa incluidos, este enfoque representa un primer paso hacia la estimación de la recuperación de los bosques andinos mediante tecnologías de sensores remotos. En el contexto de la investigación sobre bosques andinos en Ecuador, se han realizado múltiples estudios sobre biodiversidad y biomasa. Por ejemplo, Cornejo (2022) ofrece una revisión exhaustiva de los estudios botánicos en la región, mientras que Blandariz (2023) se centra en la biodiversidad amenazada en la zona costera. Además, Cuenca et al. (2014) analizan el carbono y las ecuaciones alométricas para grupos de

especies y bosques de tierras bajas en la Amazonía Ecuatoriana. Sin embargo, se requiere llevar a cabo más investigaciones para evaluar la biomasa y su posible relación con herramientas geográficas como el NDVI, con el fin de promover el uso sostenible en estos ecosistemas y reducir el esfuerzo en campo y los costos asociados.

La biomasa hallada en el bosque Aguarongo fue de 1.496,84 tn/ha, lo que contrasta con estudios previos. Por ejemplo, Sivisaca (2018) informa de 322.37 tn/ha en un bosque montano bajo del Ecuador. Asimismo, los bosques alto-Andinos en el Santuario de Fauna y Flora de Iguaque, Boyacá, Colombia, muestran un promedio de biomasa y carbono de 73,1 Mg/ha y 36,6 Mg C/ha, respectivamente. Este contraste sugiere una posible menor densidad de biomasa en el bosque de Aguarongo en comparación con otros tipos de bosques. Sin embargo, es importante destacar que los datos recopilados se limitaron a especies leñosas con un DAP mayor a 5 cm y un peso global por parcela superior a 900 kg/árbol, excluyendo la vegetación arbustiva, herbácea, especies en crecimiento y datos de suelo, lo que podría introducir un sesgo en la cantidad de biomasa. López (2017), en su estudio de valoración de carbono en la necromasa y suelo del bosque protector Aguarongo, determinó que el mayor contenido de carbono se encuentra almacenado en el suelo, con 262.42 tn/ha, y 1.11 tn/ha en la necromasa, lo que resalta la necesidad de considerar toda la biomasa que conforma el bosque, incluyendo especies arbustivas, materia seca, ramas, entre otros componentes.

Una comprensión completa de la biomasa forestal es esencial para garantizar su uso sostenible. (Li et al., 2019) subraya la importancia de llevar a cabo un inventario exhaustivo de la biomasa forestal, abarcando todas las especies de árboles y arbustos leñosos, para determinar su disponibilidad para la conversión de energía. (Zamora-Martínez & M.C., 2017) respalda esta noción al demostrar cómo el LIDAR (Light Detection and Ranging) y los sensores multiespectrales pueden utilizarse para calcular los distintos componentes de la biomasa, como la parte sobre y bajo el suelo, troncos, hojas y ramas. Finalmente, Young. (1978) destaca la factibilidad de incluir árboles pequeños y especies arbustivas en un inventario de biomasa forestal, lo cual resulta crucial para una evaluación más precisa de la biomasa total del bosque.

Como aporte esencial, podemos decir que se estimó un total de carbono para el bosque Aguarongo de 748,4 tn C/ha, siendo las primeras aproximaciones mediante esta metodología para bosques en proceso de restauración. Además, se calculó que podrían emitirse cerca de 2.746,7 tn/ha de CO₂ en caso de deforestación, lo que subraya la importancia de proteger estos bosques para mitigar y adaptarse al cambio climático (Phillips et al., 2011; Saatchi et al., 2011).

El cálculo de la biomasa y el carbono en el bosque Aguarongo reveló una variedad en el diámetro de los árboles, indicando posible intervención humana. Esta observación se ve respaldada por los testimonios locales que sugieren un proceso de regeneración forestal, aunque se observan fragmentos que aún conservan su estructura original. Es así que, la participación humana se

muestra como un factor crucial para el futuro de los ecosistemas (Becerra, 2007), destacando así la importancia de conservar y utilizar los bosques de manera sostenible (Ortiz, 2009).

En cuanto al uso de imágenes de PlanetScope, estas han mejorado significativamente la precisión de nuestros resultados al proporcionar datos de alta resolución espacial de la superficie terrestre. Este enfoque permite un monitoreo continuo y detallado de los cambios en la vegetación, el uso del suelo y otros fenómenos terrestres a lo largo del tiempo (Planet Team, 2017).

Es importante destacar que, durante la época seca en septiembre, el NDVI mostró una alta correlación con los datos de biomasa ($R^2 = 0,61$), mientras que en la época lluviosa (enero) la correlación fue baja ($R^2 = 0,17$). Este estudio destaca la eficacia del NDVI para estimar la biomasa en bosques tropicales debido a su estrecha relación con la actividad fotosintética (Macedo et al., 2018). Además, se estableció un rango de valores de NDVI mínimo y máximo de 0,90 y 0,86, respectivamente, consistentes con los informados por Cargua et al. (2018) para bosques andinos del Ecuador. No obstante, se requiere una mayor profundización en el estudio de los NDVI, ya que su variabilidad está influenciada por las condiciones ambientales, climáticas y fenológicas propias de los ecosistemas forestales (Van Leeuwen et al., 2013; Millano & Paredes, 2016; Suepa et al., 2016).

Con respecto a los cambios de uso de suelo, en el Ecuador entre los años 2001 a 2023, se perdió 997 kha de cobertura arbórea, lo que equivale a una disminución del 5.2% de la cobertura arbórea desde 2000, y al 636 Mt de las emisiones de CO_2 (Globalforestwatch,2023). Mientras que para toda el área del Bosque Protector Aguarongo se muestra que entre 2000 y 2020 ha existido una disminución de 188.92 ha de bosque y un aumento de 287.79 ha para pastizales (Vazquez & Delgado, 2022). Ahora con los datos obtenidos en el área de estudio para el periodo 2013 y 2023, podemos decir que existió una reducción del 1,7% (equivalente a 11.70 ha de bosque). Estos resultados respaldan la idea de que las acciones interinstitucionales refuerzan el trabajo comunitario y los procesos de conservación, demostrando que estas iniciativas son una estrategia efectiva para proteger los recursos naturales.

Finalmente, podemos concluir que esta metodología representa un primer paso experimental para correlacionar el NDVI y la biomasa total (BT), en bosque andino en proceso de regeneración. Además de mostrar el trabajo comunitario y como el apoyo económico básico, puede generar cambios significativos en la gestión integral de los ecosistemas (Vargas, 2014).

CONCLUSIONES

En este estudio se aportó las primeras estimaciones de biomasa BT y C para parte del bosque protector Aguarongo, los cuales estuvieron en promedio en 1,496.84 tn/ha para BT y 748,4 tn C/ respectivamente. Las parcelas de campo estuvieron localizadas de manera aleatoria, intentado

cubrir el territorio representativamente, siendo así que la parcelas 10 y 12 presentaron una mayor BT (3.09 tn/ha- 3.01 tn/ha), donde se pudieron observar parches de bosque con una mayor conservación y DAP representativos con especies dominantes como *Myrsine dependens*, *Miconia aspergillaris* y *Escallonia myrtilloides*, siendo estas las especies que tienen el mayor número de individuos y los individuos más grandes (Minga,2014).

El uso de imágenes PlanetScope, Teledetección y el uso de NDVI reflejaron una alternativa para la estimación indirecta de Biomasa y Carbono. Además, se pudo determinar un modelo de tipo exponencial para el NDVI de temporada seca con un $R^2= 0,61$, lo cual reflejó un ajuste entre moderado y bueno; asimismo, se determinó que los mayores rangos de Biomasa y Carbono se encuentran en zonas con especies de gran tamaño, conservadas y ubicadas al noreste del área de estudio. Sin embargo, es importante destacar la heterogeneidad de toda el área, que incluye parches de bosque conservados, reforestados y en proceso de restauración pasiva.

Por otro lado, se estima que 2,746.70 toneladas por hectárea de CO₂ fueron evitadas de ser emitidas a la atmósfera debido a la deforestación, lo que indica que entre 2013 y 2023 se registró una pérdida del bosque del 1.7%, mientras que el resto se ha mantenido en diversos estados de conservación gestionados por la comunidad.

Finalmente, desde 1970 han participado en la conservación alrededor de 16 instituciones, tanto públicas como privadas, según información de los pobladores y de lo documentado en el libro "El Carmen de Jadán y su relación con el agua: pasado, presente y futuro". Además, que durante el período comprendido entre 2015 y 2019, el proyecto "Agua para el Futuro" ha invertido aproximadamente \$60,860.00 dólares en iniciativas destinadas a la conservación y en prácticas de producción sostenible en las zonas de amortiguamiento del bosque y en la comunidad de Carmen de Jadán. Todos estos hechos ilustran el considerable esfuerzo llevado a cabo por la comunidad, y resalta la importancia de los procesos organizativos para lograr enfoques integrales de conservación. Este trabajo articulado refleja el bajo porcentaje en el cambio en el uso del suelo dentro del área de bosque y que se han logrado preservar 14 fuentes de agua que abastecen a aproximadamente 2000 habitantes, siendo el mejor indicador de resiliencia y mitigación frente al cambio climático.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Albán, E., y Granda, J. (2013). Determinación del contenido de carbono en la biomasa aérea del páramo de la Reserva Ecológica Yanacocha. Escuela Politécnica Nacional. Ecuador. Tesis de ingeniería civil y ambiental. 75.
- Anaya, A., Chuvieco, E., & Palacios-Orueta, A. (2009). Forest ecology and management aboveground biomass assessment in Colombia: A remote sensing approach. *Forest Ecology and Management*, 257, 1237-1246.

- Alexander, S., Nelson, C. R., Aronson, J., Lamb, D., Cliquet, A., Erwin, K. L., y Hobbs, R. J. (2011). Opportunities and challenges for ecological restoration within REDD+. *Restoration Ecology*, 19(6), 683-689.
- Álvarez, E., Saldarriaga, J.G., Duque, A.J., Cabrera, K.R., Yepes, A.P., Navarrete, D.A., y Phillips, J.F. (2011) Selección y validación de modelos para la estimación de la biomasa aérea en los bosques naturales de Colombia. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales-IDEAM-. Bogotá D.C., Colombia. 26.
- Baccini A., W., Walker, L., Carvahlo, M., Farina, D., Sulla-Menashe, R., y Houghton. (2015). Tropical forests are a net carbon source based on new measurements of gain and loss. In review. Accessed through Global Forest Watch Climate on [2016], 5962(September), 1–11.
- Becerra, M.R. (2007). Editorial Dossier: Ingeniería y Medio Ambiente. <https://www.semanticscholar.org/paper/Editorial-Dossier%3A-Ingenier%C3%ADa-y-Medio-Ambiente-Becerra/e8a8f937c8ced18c76e29d7fb991e6aa77719f63>
- Brown, S. (1997). *Estimating Biomass and Biomass Change of Tropical Forests: A Primer*. FAO Forest Paper 134. ISBN: 92-5-103955-0. Roma, Italia. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO).
- Brown, S., Hall, C. A. S., Knabe, W., Raich, J., Trexler, M. C., & Woomer, P. (1993). Tropical forests: their past, present, and potential future role in the terrestrial carbon budget. *Water Air Soil Pollut*, 70, 71-94.
- Chave J., R Condit., S Aguilar., A Hernandez., S Lao y R Perez. 2004. Error propagation and scaling for tropical forest biomass estimates. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences* 359(1443): 409-420.
- Chambers, R. (1994). Los orígenes y la práctica del diagnóstico rural participativo. *Desarrollo Mundial*, 22(7), 953-969.
- Cargua, F., Rodriguez, M., Romero, B., & Santillan, P. (2018). Evaluación del estado de conservación del bosque de ceja Andina sur occidental del Parque Nacional Sangay (Ecuador), para una mejor gestión del recurso forestal. *Revista Espacios*, 39(45), 29.
- Coronel, V. 2020. El Carmen de Jadán y su relación con el agua: pasado, presente y futuro. Fondo del Agua para la Conservación de la Cuenca del Río Paute, Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal del Cantón Gualaceo, The Nature Conservancy. Cuenca, Ecuador. 76pp.
- Cornejo, X. (2022). Estudios Botánicos en la costa de Ecuador. *Revista Científica Ciencias Naturales y Ambientales*, 16(2).

- Cuenca, M. E., Jadán, O., Cueva, K., & Aguirre, C. (2014). Carbono y ecuaciones alométricas para grupos de especies y bosque de tierras bajas, Amazonía Ecuatoriana.
- Eggleston, S., Buendia, L., y Miwa, K. IPCC. (2006). guide lines for national green house gas inventories. Recuperado de: waste. Kanagawa, JP: Institute for Global Environmental Strategies.
- Esri. (2016). ArcMap [Software de SIG]. Redlands, CA: Esri.
- FAO. (2018). El estado de los bosques del mundo, las vías forestales hacia el desarrollo sostenible. Recuperado de: <http://www.fao.org/state-of-forests/es/>
- Grassi, G., House, J., Dentener, F., Federici, S., Den Elzen, M., y Penman, J. (2017). The key role of forests in meeting climate targets requires science for credible mitigation. *Nature Climate Change*, 7(3), 220–226.
- Garzón, A. (s. f.). Una Oportunidad para Mitigar el Cambio Climático y Contribuir a la Gestión Sostenible de los Bosques.
- Global Forest Watch. (2023). Estadísticas mundiales sobre deforestación y degradación forestal. <https://www.globalforestwatch.org/>
- Hansen, M., DeFries, R., Townshend, J. R. G., Carroll, M., Dimiceli, C., & Sohlberg, R. (2003). "Global Percent Tree Cover at a Spatial Resolution of 500 Meters: First Results of the MODIS Vegetation Continuous Fields Algorithm." *Earth Interactions*, 7(10), 1–15.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2007). *Climate Change 2007 - The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the IPCC*. New York, USA: Cambridge University Press. Recuperado de: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/05/ar4_wg1_full_report-1.pdf
- IPCC. (2013). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. New York, USA: Cambridge University Press.
- Kumar, L., y Mutanga, O. (2017). Remote sensing of above-ground biomass. *Remote Sensing*, 9(9).1– 8.
- Main-knorn, M., Cohen, W. B., Kennedy, R. E., Grodzki, W., Dirk, P., Grif, P., & Hostert, P. (2013). Remote Sensing of Environment Monitoring coniferous forest biomass change using a Landsat trajectory-based approach. *Remote Sensing of Environment*, 139, 277–290.
- MAE. 2012. REDD + en Ecuador. Una Oportunidad para Mitigar el Cambio Climático y Contribuir a la Gestión Sostenible de los Bosques. Quito, Ecuador.

- Martínez-Barrón, R. A., Aguirre-Calderón, O. A., Vargas-Larreta, B., Jiménez-Pérez, J., Treviño-Garza, E. J., & Yerena-Yamallel, J. I. (2016). Modelación de biomasa y carbono arbóreo aéreo en bosques del estado de Durango. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 7(35), 91–106.
- Macedo, F. L., Sousa, A. M. O., Gonçalves, A. C., da Silva, J. R., Mesquita, P. A., & Rodrigues, R. A. F. (2018). Above-ground biomass estimation for *Quercus rotundifolia* using vegetation indices derived from high spatial resolution satellite images. *European Journal of Remote Sensing*, 51(1), 932-944.
- Minga, D. (2014). Relación entre conocimiento tradicional y diversidad de plantas en el Bosque Protector Aguarongo Azuay Ecuador. Cuenca: Universidad Politécnica Salesiana: Unidad de Posgrados.
- Lerma, M., & Orjuela, E. (2014). Modelos Alométricos para la Estimación de la Biomasa Aérea Total en el Páramo de Anaimé, Departamento del Tolima, Colombia. Tesis de Pregrado. Universidad del Tolima. Ibagué, Colombia. Re-cuperado de: <https://bit.ly/3k8iLPP>
- Li, C., Li, Y., & Li, M. (2019). Improving forest aboveground biomass (AGB) estimation by incorporating crown density and using Landsat 8 OLI images of a subtropical forest in western Hunan in Central China. *Forests*, 10, 1-17.
- Li, Y., Li, M., Li, C., & Liu, Z. (2020). Forest aboveground biomass estimation using Landsat 8 and Sentinel-1A data with machine learning algorithms. *Scientific Reports*, 10, 9952.
- Lozano Sivilsaca, C., Palacios Herrera, B. G., & Aguirre Mendoza, Z. H. (2018). Modelos alométricos para estimar el almacenamiento de carbono de bosques montanos bajos en el sur del Ecuador [Allometric models to estimate stocks carbon in the lower montane forests in south of Ecuador]. *Ciência Florestal*, 28(3), 1328-1339. Universidade Federal de Santa Maria.
- Lu, D., Chen, Q., Wang, G., Liu, L., & Moran, E. (2014). A survey of remote sensing-based aboveground biomass estimation methods in forest ecosystems. *International Journal of Digital Earth*, 37–41.
- Planet Labs Inc. (2024). Planet Imagery Product Specifications. (Planet Labs Inc, Ed.)
- Perea-Ardila, M. A., Andrade-Castañeda, H. J., & Segura-Madriral, M. A. (2021). Estimación de Biomasa Aérea y Carbono con Teledetección en Bosques Alto-Andinos de Boyacá, Colombia. Estudio de caso: Santuario de Fauna y Flora Iguaque. *Revista Cartográfica*, 102, 91-123.
- Powell, S. L., Cohen, W. B., Healey, S. P., Kennedy, R. E., Moisen, G. G., Pierce, K. B., & Ohmann, J. L. (2010). Remote Sensing of Environment Quantification of live aboveground

forest biomass dynamics with Landsat time-series and field inventory data : A comparison of empirical modeling approaches. *Remote Sensing of Environment*, 114, 1053–1068.

- Reichstein, M., & Carvalhais, N. (2019). Aspects of forest biomass in the Earth system: Its role and major unknowns. *Surveys in Geophysics*, 40(4), 693-707.
- Roy, P. S., & Ravan, S. A. (1996). Biomass estimation using satellite remote sensing data — An investigation on possible approaches for natural forest. *Journal of Biosciences*, 21(4), 535–561.
- Silver, W., Ostertag, R., y Lugo, A. (2000). The Potential for Carbon Sequestration through Reforestation of Abandoned Tropical Agricultural and Pasture Lands. *Restoration Ecology*. 8(4). 394 – 407.
- Steffen, W., Rockström, J., Richardson, K., Lenton, T., Folke, C., Liverman, D., Summerhayes, C., Barnosky, A., Cornell, S., Crucifix, M., Donges, J., Fetzer, I., Lade, S., Scheffer, M., Winkelmann, R., y Schellnhuber, H. (2018). Trajectories of the Earth System in the Anthropocene. Edited by William C. Clark, Harvard University, Cambridge, MA, and approved July 6, 2018 (received for review June 19, 2018).
- Timothy, D., Onisimo, M., Cletah, S., & Adelabu, S. (2016). Remote sensing of aboveground forest biomass : A review. *Tropical Ecology*, 57(2), 125–132.
- Van der Werf, G. R., Morton, D. C., DeFries, R. S., Olivier, J. G. J., Kasibhatla, P. S., Jackson, R. B., y Randerson, J. T. (2009). CO2 emissions from forest loss. *Nature Geoscience*, 2(11), 737–738.
- Van Leeuwen, W. J. D., Hartfield, K., Miranda, M., & Meza, F. J. (2013). Trends and ENSO/ AAO driven variability in NDVI derived productivity and phenology alongside the Andes mountains. *Remote Sensing*, 5(3) 1177-1203.
- Vargas O. Restauración ecológica: biodiversidad y conservación. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá. 2011.
- Vashum, K. T., & Jayakumar, S. (2012). Methods to Estimate Above-Ground Biomass and Carbon Stock in Natural Forests - A Review. *Journal of Ecosystem & Ecography*, 2(4), 1-7.
- Yepes, A.P., Navarrete, D.A., Duque, A.J., Phillips, J.F., Cabrera, K.R., Álvarez, E., García, y M.C., y Ordoñez, M.F. (2011). Protocolo para la estimación nacional y subnacional de biomasa - carbono en Colombia. Instituto de Hidrología, Meteorología, y Estudios Ambientales-IDEAM-. Bogotá D.C., Colombia. 162.
- Zamora-Martínez, M.C. (2017). La tecnología LiDAR, herramienta útil para el estudio de la biodiversidad. <https://www.semanticscholar.org/paper/La-tecnologi%CC%81a->

LiDAR%2C-herramienta-u%CC%81til-para-el-de-Zamora-

Marti%CC%81nez/0dff8550a8fe5439e44c863c9870872310349b37#citing-papers

Zhu, X., & Liu, D. (2015). Improving forest aboveground biomass estimation using seasonal Landsat NDVI time-series. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 102, 222–231.

ANEXOS

Anexo 1. Fichas técnicas de las imágenes satelitales

LANDSAT 8

2013

28 nov 2013 15:28:43 UTC
LC80100622013332LGN01

Source	Landsat 8 Scene
Cloud Cover	38.70%
Ground sample distance	30m
Pixel Resolution	30m
Satellite ID	Landsat8
Off-nadir angle	0.0°
Sun elevation	60.3°
Sun azimuth	130.4°
Quality control	standard
Instrument	OLI_TIRS



PlanetScope

2023

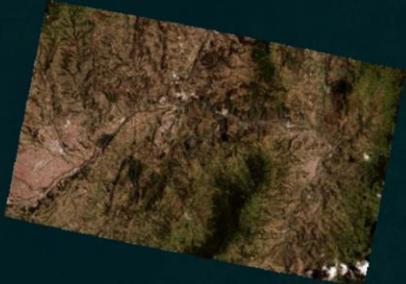
12 sept 2023 14:41:42 UTC
20230912_144142_92_2451

Source	PlanetScope Scene
Cloud Cover	4.00%
Ground sample distance	3.6m
Pixel Resolution	3m
Satellite ID	2451
Off-nadir angle	1.1°
Sun elevation	51.8°
Sun azimuth	79.5°
Ground control	true
Quality control	standard
Instrument	Super Dove (PSB.SD)
Publishing stage	finalized



12 sept 2023 14:41:40 UTC
20230912_144140_82_2451

Source	PlanetScope Scene
Cloud Cover	1.00%
Ground sample distance	3.6m
Pixel Resolution	3m
Satellite ID	2451
Off-nadir angle	1.0°
Sun elevation	51.8°
Sun azimuth	79.7°
Ground control	true
Quality control	standard
Instrument	Super Dove (PSB.SD)
Publishing stage	finalized

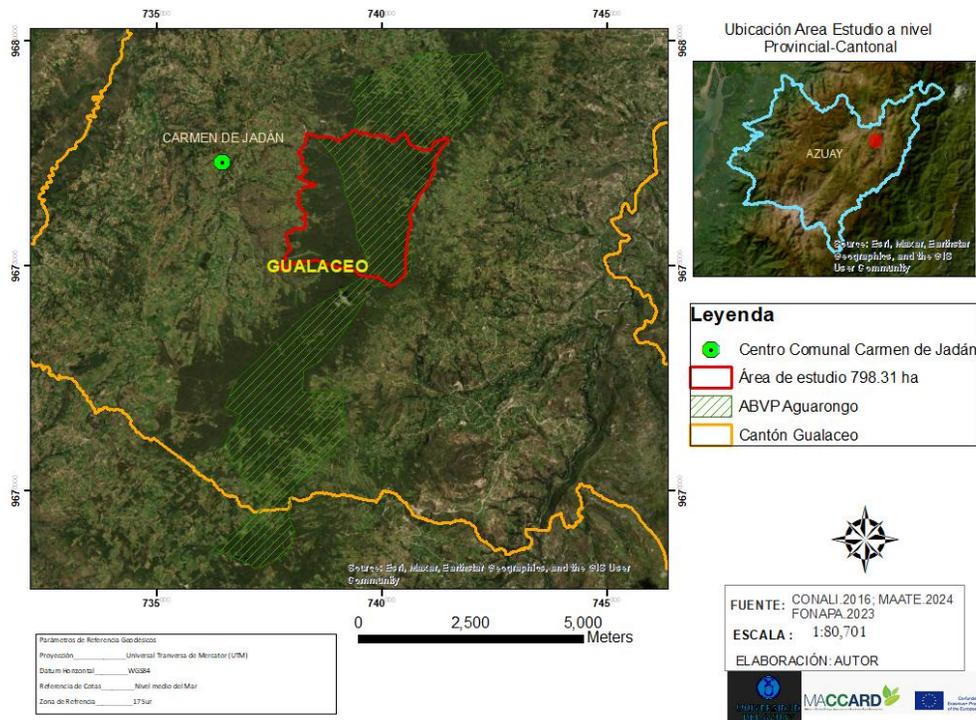


2024

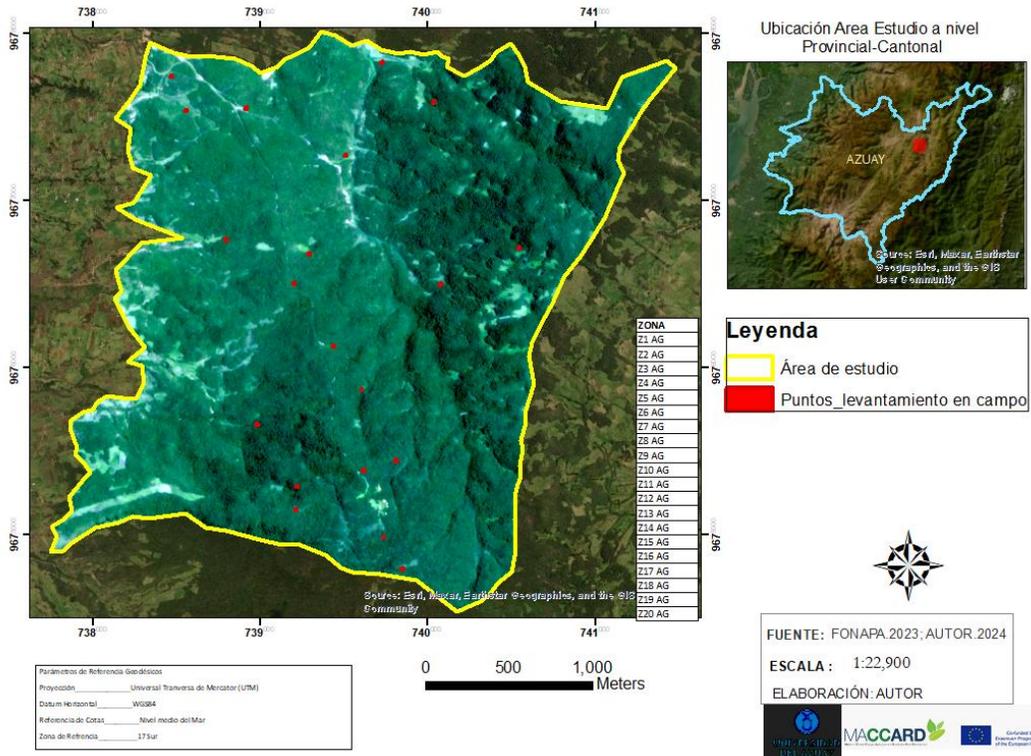


Anexo 2. Mapas generados

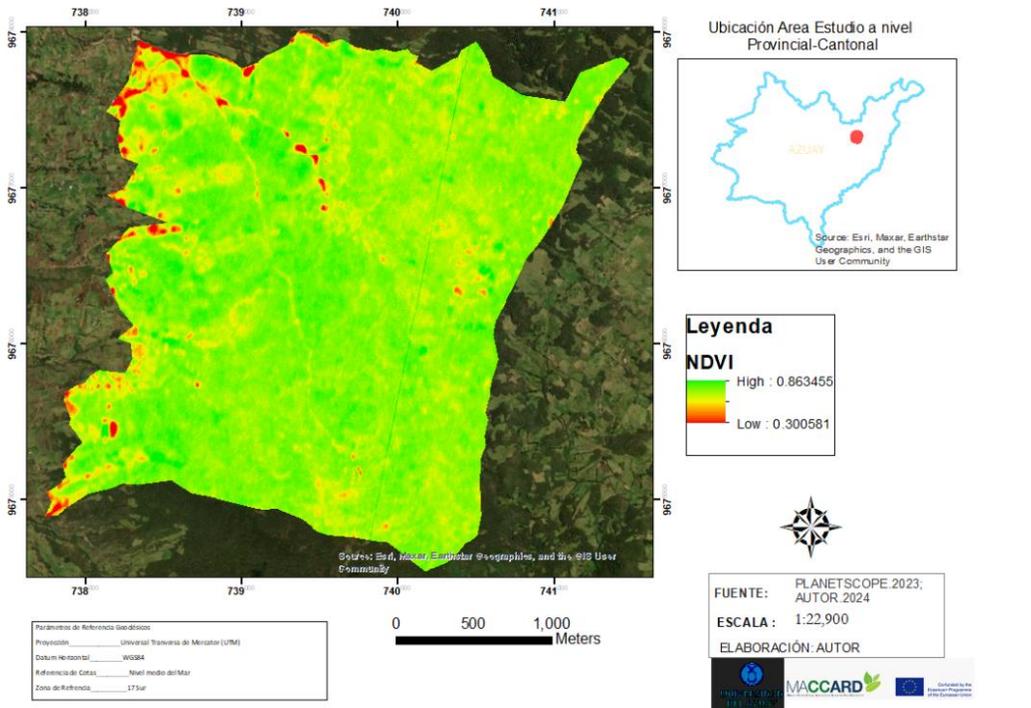
UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO RESPECTO AL BOSQUE PROTECTOR AGUARONGO



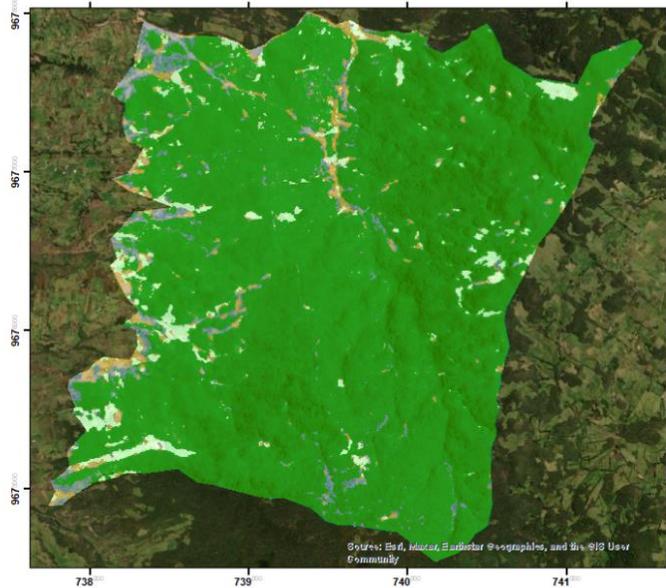
POLÍGONOS DE MONITOREO-BIOMASA ÁREA DE ESTUDIO AGUARONGO



NDVI IMAGEN SATELITAL 2023 ÁREA DE ESTUDIO AGUARONGO

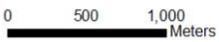


CLASIFICACIÓN SUPERVISADA IMAGEN SATELITAL 2023



Parámetros de Referencia Geodésicos

Proyección	Universal Transversa de Mercator (UTM)
Datum Horizontal	WGS84
Referencia de Cotas	Nivel medio del Mar
Zona de Referencia	17 Sur



Ubicación Área Estudio a nivel Provincial-Cantonal



Leyenda

CUS 2023 AGUARONGO

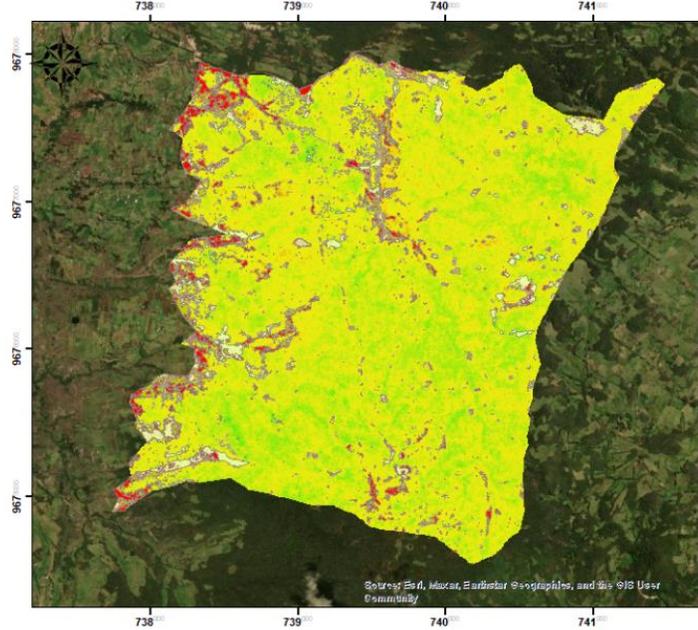
- BOSQUE
- VIAS-INFRAESTRUCTURA
- PASTIZALES
- ZONAS DEGRADADAS



FUENTE: PLANETSCOPE 2023;
AUTOR 2024
ESCALA : 1:22,900
ELABORACIÓN: AUTOR



BIOMASA AÉREA EN EL ÁREA DE ESTUDIO AGUARONGO



COBERTURA	AREA ha	BIOMASA (t/ha)	BIOMASA TOTAL (T)
BOSQUE	708.83	1.76	1247.54
VIAS-INFRAESTRUCTURA	31.58	0	0.00
PASTIZALES	30.91	3.7	114.37
CULTIVOS-ZONAS DEGRADADAS	26.99	5	134.95
TOTAL ÁREA	798.31	TOTAL BIOMASA	1496.86



Parámetros de Referencia Geodésicos

Proyección	Universal Transversa de Mercator (UTM)
Datum Horizontal	WGS84
Referencia de Cotas	Nivel medio del Mar
Zona de Referencia	17 Sur

Ubicación Área Estudio a nivel Provincial-Cantonal



Leyenda

BIOMASA OTRAS ÁREAS

Ton/ha

- 0: Infraestructura
- 3.7: Pastizales
- 5: Área degradadas; Mosaico Agro

BIOMASA AÉREA BOSQUE

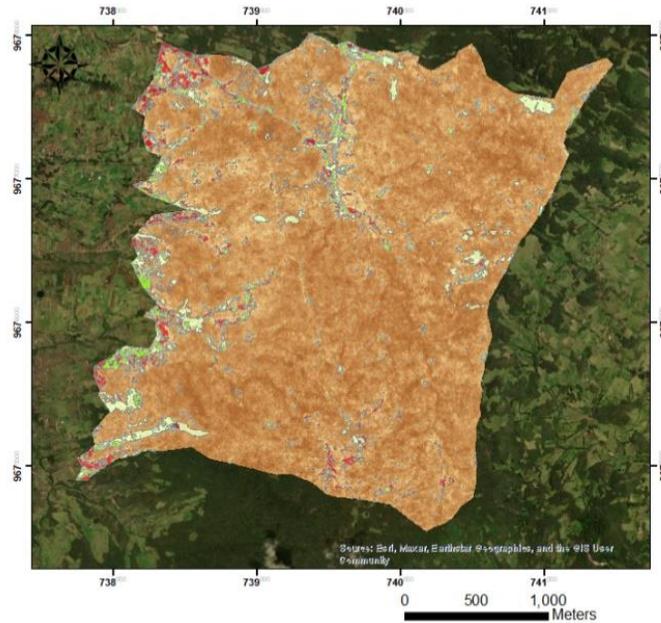
1.76 Ton/ha: Promedio

High : 4.13787
Low : 0

FUENTE: PLANETSCOPE 2023;
AUTOR 2024
ESCALA : 1:25,786
ELABORACIÓN: AUTOR



CARBONO EN EL ÁREA DE ESTUDIO AGUARONGO



Ubicación Area Estudio a nivel Provincial-Cantonal



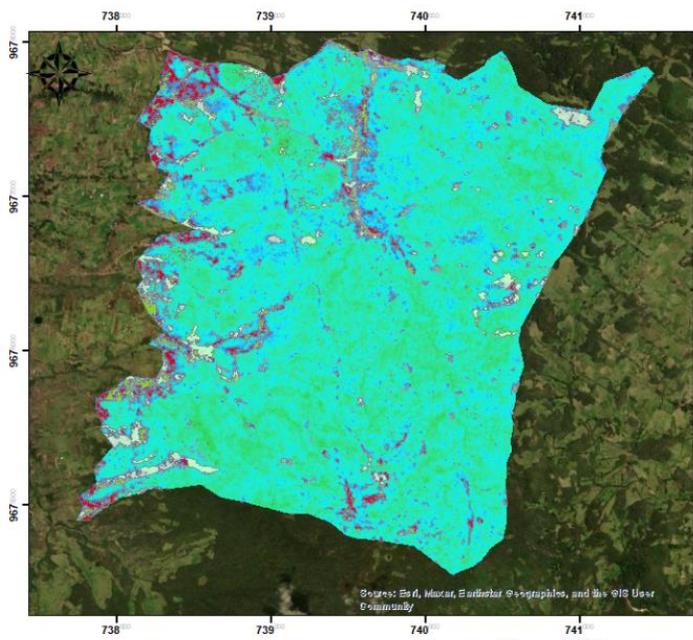
Leyenda

- C_OTRAS ÁREAS/124.7 tn/ha**
 tn/ha.: Promedio
- Mosaico Agropecuario-Areas degradadas: 67.5
 - Pastizales: 57.2
 - Vias-Infraestructura
- C_ÁREA DE BOSQUE/ 623.8 tn/ha**
 Value
 High : 2.06883
 Low : 0

COBERTURA	AREA ha	BIOMASA (t/ha)	BIOMASA TOTAL (T)	CARBONO	CO2 FIJADO tn/ha
BOSQUE	708.83	1.76	1242.54	623.8	2289.2
VIAS- INFRAESTRUCTURA	31.28	0	0.00	0.00	0.00
PASTIZALES	30.91	3.7	114.37	57.2	209.9
CULTIVOS- ZONAS DEGRADADAS	26.39	5	134.83	67.5	247.0
TOTAL	798.41		1492.84		2746.1

FUENTE: PLANETSCOPE 2023;
 AUTOR: 2024
 ESCALA : 1:24,558
 ELABORACIÓN: AUTOR

CO2 FIJADO EN EL ÁREA DE ESTUDIO AGUARONGO



Ubicación Area Estudio a nivel Provincial-Cantonal



Leyenda

- CO2 OTRAS ÁREAS/249.30 tn/ha**
 tn/ha.: Promedio
- Mosaico Agropecuario-Areas degradadas: 0.07
 - Pastizales: 0.15
 - Vias-Infraestructura
- CO2_ÁREA DE BOSQUE/ 2.289 tn/ha**
 0.31tn/ha.: Promedio
 High : 7.59262
 Low : 0

COBERTURA	AREA ha	BIOMASA (t/ha)	BIOMASA TOTAL (T)	CARBONO	CO2 FIJADO tn/ha
BOSQUE	708.83	1.76	1242.54	623.8	2289.2
VIAS- INFRAESTRUCTURA	31.28	0	0.00	0.00	0.00
PASTIZALES	30.91	3.7	114.37	57.2	209.9
CULTIVOS- ZONAS DEGRADADAS	26.39	5	134.83	67.5	247.0
TOTAL	798.41		1492.84		2746.1

FUENTE: PLANETSCOPE 2023;
 AUTOR: 2024
 ESCALA : 1:24,558
 ELABORACIÓN: AUTOR

Anexo 3. Imágenes del levantamiento de información y zona de estudio



Imagen 1. Medición de las parcelas en campo



Imagen 2. Toma del perímetro de árboles



Imagen 3. Toma del perímetro de árboles



Imagen 4. Bosque Aguarongo

Anexo 4. Datos de biomasa de las 20 parcelas

PARCELA	BIOMASA kg/árbol	BIOMASA
		tn/ha
1	1648,17	1,65
2	2277,17	2,28
3	1352,74	1,35
4	571,42	0,57
5	884,43	0,88
6	377,28	0,38
7	1906,36	1,91
8	956,72	0,96
9	1265,91	1,27
10	3099,41	3,10
11	945,02	0,95
12	3012,29	3,01
13	883,75	0,88
14	898,77	0,90
15	925,22	0,93
16	1038,66	1,04
17	545,61	0,55
18	524,24	0,52
19	1103,02	1,10
20	695,39	0,70

Anexo 5.

Portada del documento: "El Carmen de Jadán y su relación con el agua: pasado, presente y futuro"

