

# UCUENCA

## Universidad de Cuenca

Facultad de Ciencias Agropecuarias

Carrera de Ingeniería Agronómica

### **Contenido de carbono en biomasa aérea y suelo, y su relación con variables climáticas en sitios reforestados en el sur del Ecuador**

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero Agrónomo


#### **Autores:**

Daniel Antonio Villacís Loja

David Fernando Albarracín Mejía

#### **Directora:**

Fanny Ximena Palomeque Pesántez

ORCID:  0000-0003-4711-9650

**Cuenca, Ecuador**

2023-04-27

## Resumen

En el contexto de cambio climático, es relevante estimar el stock de carbono almacenado en la biomasa aérea (biomasa viva y muerta sobre el suelo) y a nivel del suelo (diferentes profundidades) en los bosques de la región andina. Sin embargo, existe poca información de cómo la reforestación contribuye con el secuestro y almacenamiento de carbono, considerando que esta es una medida de mitigación del cambio climático. El objetivo general de este estudio fue: Estimar el contenido de carbono en la biomasa aérea y en el suelo, y relacionarlo con variables climáticas y características propias de las parcelas en sitios reforestados ubicados específicamente en la zona andina de las provincias del Azuay y Cañar. Para esto, se seleccionaron seis sitios reforestados, donde se instalaron un total de 16 parcelas. Los criterios para la selección de los sitios fueron, la edad entre 5 a 10 años de plantación y sembradas principalmente con especies nativas. Se aplicaron métodos no destructivos para determinar el contenido de carbono, por tanto, se usaron ecuaciones alométricas. Además, se utilizó las variables climáticas obtenidas de base de datos globales como CHELSA, y base de datos globales DRYAD para obtener información de la densidad de madera. El Análisis de Componente Principales mostró que las parcelas se dividieron en cuatro grupos para el carbono almacenado en la biomasa aérea. Este estudio contribuye con información importante sobre el rol de la reforestación en el contenido de carbono en la región andina.

*Palabras clave:* stock de carbono, reforestación, región andina

### Abstract

In the context of climate change is relevant to estimate the carbon stock stored in the aboveground biomass and belowground biomass in the Andean region. However, there exist little information about how the reforestation contributes to carbon sequestration and storage, considering that this is a mitigation strategy to face climate change. The main aim of this study was to estimate the carbon content aboveground and below ground biomass of reforested sites, and their relation with weather variables and site- specific characteristics. The reforested sites were located in the Andean region in Azuay and Cañar provinces. Six sites were selected, where a total of 16 plots were installed; the criteria for site selection was the age of the plantation, which ranges between 5 to 10 years and using mainly native tree species. Non-destructive methods were applied through allometric equations for carbon calculations. Moreover, weather variables were obtained from global data base named CHELSA, and global data base named DRYAD to obtain information of wood density. The organic matter was analyzed in different soil depths (Total = 5), and the method used was Loss on Ignition (LOI). The principal component analysis (PCA) showed that the observational plots formed four groups for the carbon stock stored in the aboveground biomass. This study contributed with important information about the carbon stock stored in reforestation projects in the Andean region

*Keywords:* carbon stock, reforestation, andean region

## Índice de contenido

|  |    |
|--|----|
| Introducción .....   | 12 |
| 1. Objetivos.....  | 14 |
| 1.1 Objetivo general .....   | 14 |
| 1.2 Objetivos específicos .....  | 14 |
| 2. Pregunta de investigación .....   | 14 |
| 3. Revisión bibliográfica.....   | 15 |
| 3.1. Situación de la deforestación en el Ecuador y sus causas.....                 | 15 |
| 3.2. Importancia e iniciativas de reforestación en el Ecuador .....                | 15 |
| 3.3. Importancia de los estudios de carbono en bosques .....                       | 16 |
| 3.4. Carbono en la biomasa aérea y carbono en el suelo en los bosques andinos..... | 17 |
| 4. Metodología.....  | 19 |
| 4.1. Sitios de estudio .....   | 19 |
| 4.2. Establecimiento de parcelas en sitios reforestados.....                       | 22 |
| 4.3. Inventario forestal .....   | 22 |
| 4.4. Muestreo de densidad de madera .....  | 23 |
| 4.5. Muestreo de biomasa viva y muerta sobre el suelo .....                        | 23 |
| 4.6. Muestreo de suelo .....   | 24 |
| 5. Análisis en laboratorio .....   | 25 |
| 5.1. Análisis de la densidad de madera de los árboles .....                        | 25 |
| 5.2. Carbono en suelo .....  | 25 |
| 5.2.1 Determinación de carbono de materia viva y muerta sobre el suelo.....        | 25 |
| 5.3 Extracción de información de las bases globales.....                           | 27 |
| 5.3.1 Base de datos global CHELSA y DRYAD .....                                    | 27 |
| 5.4 Análisis de datos .....  | 28 |
| 6. Resultados.....   | 30 |
| 6.1. Objetivo específico uno .....   | 30 |
| 6.2. Carbono en la biomasa subterránea .....                                       | 33 |
| 6.3. Carbono en la biomasa viva y muerta presente sobre el suelo.....              | 34 |

|  |    |
|--|----|
| 6.4. Carbono presente a diferentes profundidades del suelo (compartimentos)..... | 35 |
| 7. Discusión .....   | 41 |
| 8. Conclusiones y recomendaciones .....  | 45 |
| Referencias.....   | 48 |
| Anexos .....   | 55 |

## Índice de figuras

|  |    |
|--|----|
| Figura 1. Mapa de ubicación de los sitios reforestados en las provincias del Azuay y Cañar ...   | 21 |
| Figura 2. Esquema de la distribución de las subparcelas en las parcelas de reforestación .....   | 24 |
| Figura 3. Carbono total en la biomasa aérea por cada parcela en las provincias de Azuay y Cañar, R# representa el código asignado a cada parcela ..... | 31 |
| Figura 4. Estimación del stock de carbono total en la biomasa subterránea para las provincias de Azuay y Cañar .....                                   | 33 |
| Figura 5. Estimación del stock de carbono total de la biomasa sobre el suelo viva y muerta ....  | 34 |
| Figura 7. Biplot de las diferentes variables recolectadas en el estudio frente al stock de carbono en la biomasa aérea .....                           | 40 |
| Figura 8. Biplot de las diferentes variables analizadas dentro del estudio frente al stock de carbono del suelo.....                                   | 41 |

## Índice de tablas

|  |    |
|--|----|
| Tabla 1. Información general de las localidades estudiadas en las provincias de Azuay y Cañar .....  | 20 |
| Tabla 2. Ecuaciones implementadas para los cálculos de estimación de carbono .....   | 26 |
| Tabla 3. Valores estadísticos del carbono en la biomasa aérea.....   | 31 |
| Tabla 4. Especies representativas en el stock de carbono en biomasa aérea, en forestales, sumatoria por especie de cada provincia.....               | 32 |
| Tabla 5. Estimación total del stock de carbono acumulado en el suelo, a diferentes profundidades en parcelas de reforestación de Cañar y Azuay ..... | 35 |

## Agradecimientos

Queremos agradecer a todo el cuerpo docente de la facultad de Ciencias Agropecuarias de la Universidad de Cuenca por guiarnos y darnos sabiduría para elaborar con éxito este trabajo. También queremos expresar un sincero agradecimiento a la docente, Ximena Palomeque, nuestra tutora de tesis, quien con su dirección, experiencia, conocimiento y paciencia nos permitió el desarrollo de este trabajo. De igual manera agradecemos al proyecto VLIR UOS, con el nombre del proyecto: “*Consolidando una red de monitoreo forestal a largo plazo en un paisaje modificado por humanos en el norte de Ecuador*” (COFOREC II). Proyecto que se ejecuta entre la Universidad de Ghent, Universidad de Cuenca y Escuela Politécnica Nacional; el cual financió nuestra tesis.



## Introducción

Los bosques andinos conservados cumplen funciones ecológicas importantes para el bienestar humano, sin embargo, estos se encuentran amenazados por el cambio de uso de suelo y por prácticas agrícolas insostenibles que conlleva a la ampliación de la frontera agrícola (Wasserstrom & Southgate, 2013). Indudablemente, posterior a la deforestación, ocurre el uso intensivo de las tierras, las cuales con el tiempo se vuelven improductivas. La deforestación también produce degradación y fragmentación, con consecuencias negativas desde el punto de vista ecológico y también socio económico (Kleemann et al., 2022). A nivel de secuestro de carbono también hay una pérdida importante por la deforestación, por lo que a nivel global, se sugiere que para recuperar las tasas de almacenamiento de carbono se debe realizar intervenciones de revegetación y restauración (Georgiou et al., 2022).

En esta misma línea, para contrarrestar la degradación de los bosques andinos, la práctica más común es la reforestación, con el fin de recuperar servicios ecosistémicos como: conservación de la biodiversidad, regulación hídrica, calidad y cantidad de agua (Hendrayanto & Sudomo, 2013), secuestro y almacenamiento de carbono (Gasparini et al., 2022). La actividad de reforestación en los últimos años ha sido ejecutada por instituciones encargadas de la conservación de agua, por ejemplo, en el cantón Cuenca, provincia del Azuay, por la Empresa de Telecomunicaciones, Agua Potable, Alcantarillado y saneamiento de Cuenca, (ETAPA) y a nivel de la provincia por el Fondo del Agua para la Conservación de la Cuenca del Río Paute (FONAPA), Prefectura y los Gobiernos Autónomos Descentralizados.

Por otro lado, existe un creciente interés y necesidad por realizar reforestación con el fin de secuestrar y almacenar el carbono, como una medida de mitigación de cambio climático. En el marco del programa REDD+ en el país se han realizado grandes esfuerzos por estimar el carbono almacenado principalmente en los bosques naturales de la Amazonía por su alta productividad (Duque et al., 2021), con la finalidad de ingresar a los mercados de carbono. La reforestación puede ser financiada por países desarrollados dentro de los programas de mitigación de emisiones de gases de efecto

invernadero en países en desarrollo a través del Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL), contemplado en el Protocolo de Kioto (Minvielle & Orozco, 2012).

En la región Andina poco se conoce sobre el aporte en términos de stock de carbono de los sitios reforestados con especies nativas, pues esto depende de las especies plantadas, de las condiciones ambientales del sitio dadas por la elevación, precipitación, temperatura, propiedades físicas y químicas del suelo (FAO, 2020). Sin duda, estimar los stocks de carbono en los diferentes compartimentos del sistema como son: biomasa aérea y al nivel del suelo, contribuirá a cuantificar el carbono como uno de los servicios ambientales promovidos en la reforestación. Por lo tanto, el presente estudio que es parte de un proyecto a nivel nacional que intenta consolidar una red de parcelas de monitoreo forestal en un paisaje modificado por humanos, con financiamiento VLIR OUS, en colaboración con la Universidad de Ghent en Bélgica, Escuela Politécnica Nacional y la Universidad de Cuenca.

## 1. OBJETIVOS

### 1.1 Objetivo general

Estimar el contenido de carbono de la biomasa aérea y en el suelo, y relacionarlo con variables climáticas en sitios reforestados en el Sur del Ecuador.

### 1.2 Objetivos específicos

2. Estimar el carbono almacenado en la biomasa aérea y en los diferentes compartimentos del suelo en sitios reforestados.
3. Clasificar los sitios reforestados considerando el efecto de las variables climáticas en el carbono almacenado tanto en biomasa aérea como en suelo.

## 2. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

¿Cómo varía el contenido de carbono tanto en biomasa aérea como en los diferentes compartimentos del suelo entre diferentes condiciones climáticas en sitios reforestados al sur del Ecuador?

### 3. Revisión bibliográfica

#### 3.1. Situación de la deforestación en el Ecuador y sus causas

De acuerdo a una revisión sistemática de 369 artículos publicados entre 1990 y 2014 a nivel de Latinoamérica, que incluye 17 países y diferentes tipos de bosque, se encontró que Ecuador está entre los cuatro países con mayor deforestación, con una tasa de  $-2,19$  promedio anual. Aquí, los bosques tropicales montanos son los más afectados con una tasa de  $-1,55$  (Armenteras et al., 2017). Entre el 2014 y 2016, la tasa de deforestación bruta anual fue de 94.35 ha/año, lo que significa un porcentaje de  $-0,74$  (MAE, 2017). Las provincias con mayor deforestación son Esmeraldas, Manabí, Morona Santiago, Sucumbíos y Zamora Chinchipe de acuerdo al Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica (2017, 2021), siendo esta última la que ha sufrido mayor incremento de deforestación en relación con el periodo 2008-2014. La deforestación neta para las provincias del Azuay y Cañar para los años 2014 – 2016 fueron 1824 ha/año y 1357 ha/año, respectivamente (MAE, 2017, 2021).

Asimismo, se sabe que entre 1990 y 2018, aproximadamente 4% de la deforestación acumulada ocurre dentro de los límites del Sistema Nacional de Áreas Protegidas y un 25.5 % en las zonas de amortiguamiento (Kleemann et al., 2022). La deforestación en el país principalmente en la región andina ocurre por el cambio de uso de suelo, es decir se elimina la cobertura forestal para ampliar la frontera agropecuaria (Knoke et al., 2014). En un reciente estudio en la Amazonía noreste del Ecuador, la deforestación está asociada a la proximidad de los centros poblados, distancia a las vías de acceso y las condiciones de terreno como la topografía (López 2022).

#### 3.2. Importancia e iniciativas de reforestación en el Ecuador

En Ecuador, la restauración activa como la reforestación, inicialmente fue conocida como plantación forestal, esto para fomentar el aumento de la cobertura boscosa (Van Dijk & Keenan, 2007). Históricamente en la región andina se utilizaba especies exóticas en los programas de reforestación como son *Pinus radiata*, *Pinus patula*, *Eucalyptus globulus*, *Eucalyptus saligna*, entre otras. Estas especies fueron

usadas debido a la falta de conocimiento de la silvicultura de las especies nativas (Palomeque et al., 2020; Stimm et al., 2008).

De acuerdo al Programa FACE de Forestación del Ecuador que duro 25 años, se logró establecer plantaciones de pino (dos especies) con cerca de 22 000 ha en la Sierra y con 2 500 ha con especies nativas tanto en la costa como en la sierra del país. El propósito de este proyecto a largo plazo ha sido la captura de dióxido de carbono (PROFAFOR, 2016, Farley, 2008).

Además, el Ecuador con el fin de dar cumplimiento a compromisos internacionales y por propósitos nacionales, en los últimos años ha propuesto programas o planes de reforestación como son: Plan Nacional de Restauración Forestal 2014-2017 (MAE, 2014), Plan Nacional de Restauración Forestal 2019-2030 (MAE, 2019), y en la actualidad está vigente el Proyecto Nacional de Restauración del Paisaje para el 2022 – 2025, el mismo que tiene como finalidad restaurar 30 000 ha con necesidad de restauración en categoría muy alta, con base a un mapa de prioridad a nivel nacional (MAATE, 2021).

Hasta el momento el Ecuador, no cuenta con información oficial sobre la captura de carbono en procesos de restauración. Sin embargo, se ha tomado como referencia lo ejecutado efectivamente por el Programa Nacional de Reforestación, donde se ha intervenido en 59 741,46 ha en el Ecuador Continental hasta el año 2021, logrando con esto un aporte de 5 800 042,32 toneladas de carbono fijadas en 20 años. Esta información de acuerdo al Programa Nacional de Reforestación.

### **3.3. Importancia de los estudios de carbono en bosques**

El mercado de carbono está aumentando considerablemente y se espera que aumente aún más debido a la alta demanda de grupos corporativos y gobiernos del mundo (Blaufelder et al. 2021). Históricamente, el protocolo de Kioto permitía a los gobiernos y organizaciones empresariales invertir en países poco desarrollados por medio de la compra de créditos de carbono para compensar las emisiones industrializadas (FAO, 2020). Poco después, empezaron a emerger organismos independientes, como el Gold Standard (GS) y el Verified Carbon Standard (VERRA)

que constatan y certifican los proyectos de compensación de carbono. Esta última, permite a las entidades certificarse mediante un riguroso conjunto de reglas y requisitos, pero una vez realizada la certificación de los créditos de carbono (también llamados Unidades de Carbono Verificadas) pueden ingresar al mercado abierto de carbono. El problema radica en el alto costo que conlleva un inventario forestal manual, ya que requiere mucho capital, mano de obra y tiempo. Aquí se suma la oferta limitada de los proyectos de compensación debido a que los propietarios de estos bosques carecen del capital inicial y el acceso al mercado (Kreibich y Hermwille, 2021).

En 2009, Ecuador marca un hito importante en su historia por la creación de la ENF (Evaluación Nacional Forestal), la cual es una iniciativa liderada en ese momento por el Ministerio del Ambiente (MAE), con el acompañamiento técnico de la FAO y mediante el soporte financiero del Gobierno de Finlandia. Este proyecto buscaba generar información necesaria para planificar de mejor manera el manejo, aprovechamiento y conservación de los recursos forestales nativos del Ecuador en sus múltiples escenarios y realidades (Aguirre et al., 2010). Mediante esta iniciativa la ENF realizó un inventario forestal nacional en 9 estratos de bosques naturales desde 2009 hasta 2014, y reportó contenidos de carbono que van desde 37,04 Mg ha<sup>-1</sup> en Bosques Secos Pluvio estacionales hasta 160,40 Mg ha<sup>-1</sup> en Bosques Siempre Verdes de Tierras Bajas de la Amazonía. Sin embargo, debido a la magnitud del proyecto no se realizó una estimación del carbono orgánico a nivel de suelo en aquellos estratos (MAE, 2015).

Aunque uno de los objetivos del ENF es responder a los requerimientos para acceder a los mercados internacionales de carbono, organismos como el Verified Carbon Standard (VCS) requieren verificar la cantidad de carbono almacenado o emitido en el tiempo y espacio; pero para eso es fundamental obtener estimaciones confiables del stock de carbono tanto en la biomasa aérea (Higuchi, 2004) como en el suelo.

### **3.4. Carbono en la biomasa aérea y carbono en el suelo en los bosques andinos**

Los bosques andinos actúan como potenciales sumideros de carbono aéreo con un valor de 0,67±0,08 Mg ha<sup>-1</sup> de carbono por año, estos valores provienen de 119 parcelas

de monitoreo en bosques tropicales y subtropicales de Sud América (Duque et al., 2021). Sin embargo, hay que considerar que la variación biótica y abiótica determina el carbono almacenado tanto a nivel aéreo en la vegetación como en el suelo, por ejemplo, la variación topográfica tiene gran influencia en las condiciones de suelo y consecuentemente afecta el crecimiento de los árboles en la región andina (Werner & Homeier, 2015), asimismo, en bosques restaurados la productividad, específicamente el carbono almacenado depende de la variación ambiental, específicamente del clima (Leuschner et al., 2013, Asner et al., 2017). En una síntesis realizada por Spracklen y Righelato (2014), a nivel de los bosques tropicales de montaña encontró que en bosques maduros la biomasa área fue de  $271 \text{ Mg ha}^{-1}$ , aunque esto declina con la pendiente y la elevación. Estos mismos autores, en el año 2016 publicaron datos para el Ecuador y encontraron que, en bosques montanos en proceso de regeneración, los árboles más pequeños con  $\text{DBH} < 10 \text{ cm}$ , contribuyen hasta con un 50 % del total de biomasa área, por tanto, los sitios restaurados son importantes para el secuestro del carbono (Spracklen y Righelato, 2016). Los sistemas productivos también almacenan carbono, de allí que en un estudio realizado en la reserva de la biosfera de Sumaco, en Napo, se encontró que el sistema chakra, almacenó un promedio de carbono de  $141,40 \text{ Mg ha}^{-1}$ , mientras en el bosque primario almacenó un promedio de  $334 \text{ Mg ha}^{-1}$  (Jadán et al., 2013).

Por otro lado, se conoce que los suelos son grandes reservorios de carbono orgánico en los ecosistemas terrestres, por tanto, juegan un rol importante en la mitigación al cambio climático (Georgiou et al., 2022). En algunos bosques tropicales se ha encontrado, que el contenido de carbono, está asociado al clima local y a las propiedades del suelo como son: humedad del suelo, densidad aparente, pH, y materia orgánica (Saimun et al., 2021). Otros autores sugieren por ejemplo que el carbono orgánico depende de la cantidad y el tipo de minerales (Georgiou et al., 2022).

La elevación y el tipo de cobertura vegetal cumplen un rol importante en el almacenamiento de carbono. En un estudio realizado en el bosque de *Polylepis* en el páramo de Zhuruca, se encontró que el carbono varía de acuerdo a la profundidad del suelo desde  $2,54 \text{ Mg ha}^{-1}$  a la profundidad de 60 a 90 cm hasta  $8,92 \text{ Mg ha}^{-1}$  a la profundidad de 0 a 10 cm (Puma, 2022). En plantaciones de árboles en ecosistemas de

tierras bajas en Costa Rica, el carbono orgánico de suelo (COS) presentó valores desde 44,90 a 55,20 Mg ha<sup>-1</sup> (0–10 cm), y decreció con la profundidad hasta 12,70 – 16,80 Mg ha<sup>-1</sup>(40–50 cm) (Jiménez et al., 2007).

## 4. Metodología

### 4.1. Sitios de estudio

Este estudio se realizó en un total de seis sitios reforestados ubicados en las provincias del Azuay (5) y Cañar (1) (Figura 1). Estos sitios presentan diferentes condiciones ambientales tal como se muestra en la tabla 1. Para la selección de los sitios se definieron los siguientes criterios:

- Especies utilizadas principalmente nativas
- Edad de la plantación entre 5 a 10 años
- Altitud superior a 2 083 m s.n.m.
- El área mínima fue de 625 m<sup>2</sup>
- Uso del suelo previo a la reforestación correspondió a pastizal

Cabe indicar que se realizó una entrevista a los propietarios de los predios reforestados para obtener información del año de la plantación, especies utilizadas, historia de uso de suelo, área reforestada, entre otros.

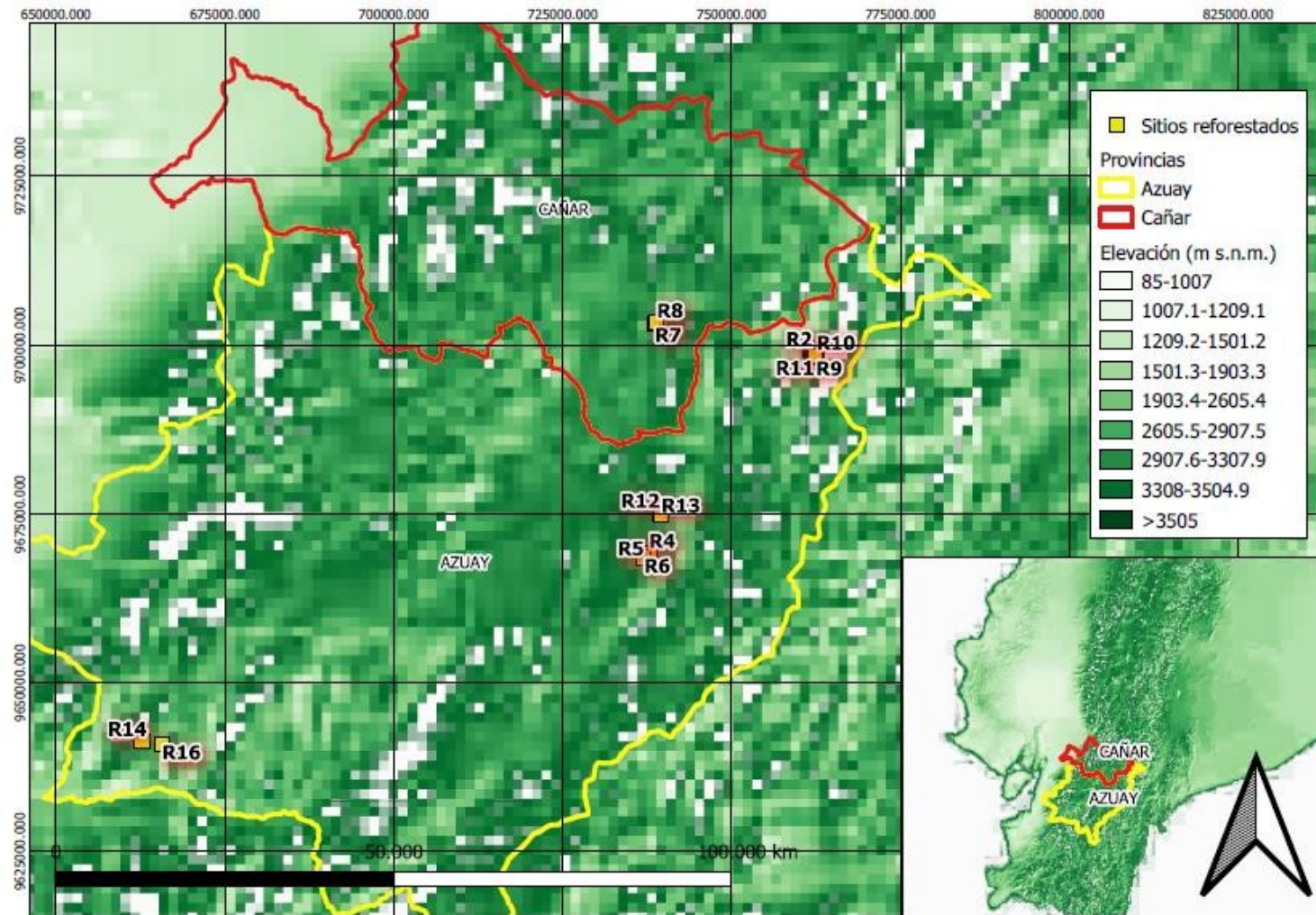


**Tabla 1.** Información general de las localidades estudiadas en las provincias de Azuay y Cañar

| Locación       | Provincia | Elevación<br>m s.n.m. | Promedio<br>Precipitación<br>media anual<br>(mm) | Promedio<br>Temperatura<br>máxima<br>anual (°C) | Promedio<br>Temperatura<br>mínima anual<br>(°C) |
|----------------|-----------|-----------------------|--|---|---|
| Guapán         | Cañar     | 3 238                 | 1 165,48   | 12,98   | 5,72  |
| San Bartolomé  |           | 3 218                 | 1 333,94   | 13,10   | 6,27  |
| Chilcapamba    |           | 3 037                 | 1 274,53   | 13,87   | 6,98  |
| Sevilla de Oro | Azuay     | 2 325                 | 1 227,46   | 17,31   | 10,48   |
| Aguarongo      |           | 3 189                 | 1 375,43   | 13,10   | 6,25  |
| San Rafael     |           | 2 083                 | 1 921,50   | 16,94   | 8,73  |

Fuente: Información Climática obtenida de la base de datos CHELSA (2013 a 2018)

# UCUENCA



**Figura 1.** Mapa de ubicación de los sitios reforestados en las provincias del Azuay y Cañar

#### 4.2. Establecimiento de parcelas en sitios reforestados

Previo al establecimiento de las parcelas se realizó una validación en campo para determinar si los criterios mencionados anteriormente se cumplían. En función del tamaño del parche reforestado se implementó las parcelas con diferentes tamaños: menor a 0,50 ha, el tamaño de las parcelas fue de 400 m<sup>2</sup> (20 × 20 m) (López et al., 2016) y superior a 0,50 ha, el tamaño de las parcelas fue de 1600 m<sup>2</sup> (40 × 40 m) (Hairiah et al., 2001). En total se establecieron 16 de parcelas. Además, se tomó en cuenta que las condiciones del terreno sean las más homogéneas posibles tanto pendiente (entre 5 y 55 %) y que no esté interrumpida por caminos, canales de riego, deslizamientos, quebradas o ríos, etc.

Para delimitar las parcelas se colocó tubos plásticos de PVC en las esquinas y con la ayuda de una piola se trazaron los bordes, con el fin de establecer parcelas permanentes de monitoreo de crecimiento y de estimación de carbono almacenado. Entre parcelas por sitio se estableció una distancia mínima de 20 m y todas las parcelas tuvieron la misma orientación a favor de la pendiente. Cabe indicar que a cada parcela se le asignó un código que fueron: R1, R2, R3, R4, R5, R6, R7, R8, R9, R10, R11, R12, R13, R14, R15 y R16.

#### 4.3. Inventario forestal

En cada parcela, todos los individuos >5 cm de diámetro a la altura del pecho (DAP) fueron medidos, a una altura de 1,30 m desde el suelo, con una cinta diamétrica. La altura total de los árboles fue medida a través de un hipsómetro Vertex (HAGLÖF) previamente calibrado. Además, se procedió a tomar dos medidas perpendiculares entre sí de las copas de los diferentes árboles con un flexómetro. Cada individuo fue etiquetado con un código alfanumérico único para su posterior monitoreo. Se tomó datos generales a nivel de parcela tales como: Coordenadas geográficas con un GPS, pendiente (%) con un clinómetro, se evaluó la forma del terreno si era cóncava o convexa y la cobertura del dosel con un

densiómetro. Esta última variable se la midió en los cuatro principales puntos cardinales de la parcela y en el centro de la parcela.

Se procedió a registrar el nombre común y científico de todos los individuos considerados al interior de la parcela. En caso de desconocer el nombre común de los individuos se les proporcionó un nombre genérico, mediante un código alfanumérico, haciendo referencia en su primera parte a una especie desconocida y en la segunda parte al código de parcela (Sp#R#).

#### **4.4. Muestreo de densidad de madera**

Con los datos obtenidos a nivel de individuo en cada parcela de reforestación y en cada sitio, se procedió a realizar un histograma considerando el DAP (Arango et al., 2001). Esto se lo realizó con el fin de determinar las diferentes clases diamétricas; luego se consideró tres réplicas por cada clase diamétrica y especie. Posteriormente, se seleccionó los individuos representativos por clase diamétrica a nivel de parcela (5 - 7,59 cm 7,60 – 10 cm y > 10 cm) para extraer una muestra de madera utilizando un barreno a una altura de 1,30 m del árbol. Luego, las muestras fueron almacenadas en un tubo de ensayo con su respectiva etiqueta y llevadas al laboratorio de Semillas y Ecología Forestal en la Facultad de Ciencias Agropecuarias de la Universidad de Cuenca para su posterior análisis.

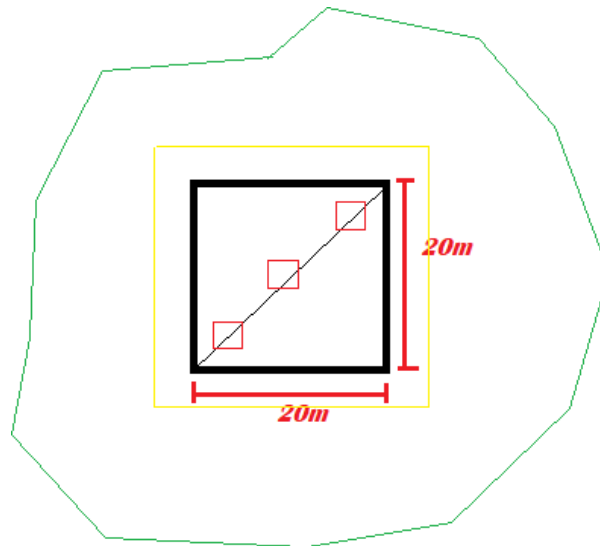
#### **4.5. Muestreo de biomasa viva y muerta sobre el suelo**

En el presente estudio se consideró como biomasa sobre el suelo a todo material vivo y/o muerto que se encontraba sobre la superficie del suelo; para ello, al interior de cada parcela, un total de 3 subparcelas fueron establecidas y distribuidas de manera diagonal. Estas subparcelas sirvieron para realizar el muestreo y análisis de la biomasa sobre el suelo, cuya dimensión fue de 1 m<sup>2</sup> (USAID, 2013). La biomasa fue separada en: a) biomasa viva de no leñosas que incluye, pastos o hierbas en general y, b) biomasa muerta, representada por hojarasca, cortezas y ramas pequeñas (Céspedes et al., 2018). Entre el 10 a 20%

de cada muestra de biomasa fueron pesadas y colocadas en bolsas plásticas debidamente etiquetadas para su posterior análisis en el laboratorio.

#### 4.6. Muestreo de suelo

Con la finalidad de cuantificar el contenido de carbono del suelo en las diferentes profundidades, considerados como una parte de los compartimentos de carbono para el presente estudio, se realizó una calicata por subparcela y se procedió a tomar muestras alteradas e inalteradas de suelos a 0-10 cm, 10 - 20 cm, 20-30 cm, 30-50 cm y 50 -100 cm de profundidad (Jandl et al., 2022). Las muestras fueron recolectadas en cada profundidad con una pala, homogenizadas a nivel de parcela y colocada en una bolsa plástica (500 g) debidamente etiquetada. Para las muestras inalteradas se utilizaron cilindros kopeky de 100 cm<sup>3</sup>. Estas muestras fueron almacenadas con su respectiva etiqueta para ser analizadas en el laboratorio de suelos de la Facultad de Ciencias Agropecuarias.



**Figura 2.** Esquema de la distribución de las subparcelas en las parcelas de reforestación

Nota: el polígono de color verde representa el parche de reforestación, el cuadrado de color amarillo representa el efecto borde de la parcela, las líneas de color negro representan el borde de la parcela de estudio y los cuadros rojos representan la distribución de las subparcelas.

## 5. Análisis en laboratorio

### 5.1. Análisis de la densidad de madera de los árboles

En el laboratorio se procedió a determinar su volumen mediante el método de desplazamiento de agua utilizando una probeta graduada. Luego las muestras fueron secadas en un horno a una temperatura de 72 °C por 24 horas o hasta obtener peso constante utilizando una balanza analítica. A través del peso seco dividido para el volumen de la muestra se determinó la densidad de madera de cada muestra, utilizando la ecuación tradicional de masa sobre volumen ( $\text{g cm}^{-3}$ ) (Valencia & Vargas, 2016).

### 5.2. Carbono en suelo

#### 5.2.1 Determinación de carbono de materia viva y muerta sobre el suelo

Las muestras de biomasa sobre el suelo tanto la viva como la muerta fueron secadas por 24 horas en un horno a 72°C, o hasta obtener un peso constante. Luego del secado se determinó el peso seco de cada submuestra. Finalmente, el peso seco se lo multiplicó por un factor de 0,50 para obtener el contenido de carbono. Estos valores de carbono fueron ponderados a 1 m<sup>2</sup> en función del porcentaje de muestreo de biomasa recolectada en cada subparcela y por último se transformó a toneladas por hectárea (Rügnitz et al., 2008).

##### 5.2.1.1 Densidad aparente

Para determinar la densidad aparente de la muestra de suelo se utilizaron las muestras inalteradas de suelo, mismas que fueron secadas a una temperatura de 105°C por 72 horas (Blake & Hartge, 1986), para obtener la masa de la muestra. Adicionalmente, se procedió a extraer las dimensiones de cada cilindro Kopecky, que fueron de fabricación artesanal, para obtener el valor exacto del volumen, así mismo como en el caso anterior procedimos a realizar el cálculo de la densidad haciendo uso de la ecuación tradicional, masa sobre volumen ( $\text{g cm}^{-3}$ ).

##### 5.2.1.2 Fragmentos rocosos



Con las muestras de suelo alteradas se procedió a saturarla en agua por 24 horas, para luego ser llevadas a ser tratadas en un tamiz de 2 mm (FAO, 2009), en donde con ayuda de agua corriente se lavó todo el contenido de suelo y se extrajeron solamente los fragmentos rocosos. Los mismo posteriormente fueron llevados a un proceso de secado, el cual se realizó a una temperatura de 105°C por 24 horas, para luego ser pesados en una balanza de precisión y finalmente haciendo uso del método volumétrico (desplazamiento de volumen de agua) se determinó el volumen de los mismos.

### 5.2.1.3 Materia orgánica

Para realizar este análisis se usaron las muestras de suelo alteradas, las mismas que fueron procesadas de la siguiente manera: 1) las muestras fueron homogenizadas una vez más al interior del laboratorio, 2) luego se procedió a secar cada una de las muestras en un ambiente seco y carente de luz solar directa por al menos una semana hasta que esté totalmente seca, 3) una vez seca procedemos a desmenuzar las fracciones de tierra mediante un método manual, 4) se procedió a tamizar el suelo en un tamiz de 2 mm. Finalmente, se tomó una muestra de 50g, para luego de la misma extraer dos muestras de 10 g, para luego llevarla a quemar en una mufla a una temperatura de 360°C por 3 horas (método LOI) (M. H. Salehi et al., 2011), previamente todas las muestra de 10g fueron secadas a una temperatura de 105°C.

### 5.3. Ecuaciones para los distintos cálculos de carbono

A continuación, se muestran las ecuaciones implementadas para calcular la biomasa aérea y carbono orgánico en el suelo (Tabla 2).

**Tabla 2.** Ecuaciones implementadas para los cálculos de estimación de carbono

|                             | <b>Ecuaciones para el cálculo</b>               | <b>Unidades</b>     | <b>Referencia</b>    |
|-----------------------------|---|---------------------|----------------------|
| Biomasa aérea               | $AGB_{est} = 0,063 \times (\rho D^2 H)^{0,976}$ | Kg                  | (Chave et al., 2014) |
| Carbono en la biomasa aérea | $CBM_{ae} = AGB_{est} \times 0,47$              | Mg ha <sup>-1</sup> | (IPCC, 2006)         |

|                                   |   |                     |                           |
|-----------------------------------|---|---------------------|---------------------------|
| Carbono en la biomasa subterránea | $CBM_{sb} = AGB_{est} \times 0,21$                              | Mg ha <sup>-1</sup> | (Mokany et al., 2006)     |
| Carbono en suelo                  | $COS = [COS] \times pb \times Prof \times (1 - frag) \times 10$ | Mg ha <sup>-1</sup> | (Rügnitz et al., 2008)    |
| Carbono en el suelo corregido     | $COS_{soil} = COS \times 1,724$                                 | Mg ha <sup>-1</sup> | (Barrezueta et al., 2020) |

Para la estimación del carbono de la biomasa aérea, en primer lugar, se utilizó la ecuación de Chave del 2014, la cual fue aplicada para cada individuo con los cuales se obtuvo valores totales por parcela. En segunda instancia obtuvimos los datos del aporte total de carbono de las diferentes especies estudiadas dentro de nuestro estudio por provincia. De manera similar para el stock de carbono total en el suelo a diferentes profundidades para lo cual se aplicó las ecuaciones anteriormente descritas.

### 5.3 Extracción de información de las bases globales

#### 5.3.1 Base de datos global CHELSA y DRYAD

En la base de datos global de CHELSA se encontró información climática anual desde 1974 hasta el 2018. Para el propósito de este estudio, se extrajo datos en formato raster con una resolución de 1 km<sup>2</sup> desde 2013 hasta 2018 de: precipitación media, temperatura máxima y mínima. Estas variables climáticas fueron procesadas en el programa QGIS. Los datos obtenidos fueron exportados al Excel para su posterior uso en el análisis estadístico

La base de datos global DRYAD fue utilizada para extraer información sobre la densidad de madera de las especies conocidas, mientras que para las especies desconocidas realizamos mediciones directas con muestras de campo. Los valores encontrados en esta base fueron expresados en g cm<sup>-3</sup>. Cabe mencionar que en esta base de datos no se encuentran nombres comunes por lo cual fue necesario trabajar con los nombres científicos de dichas plantas.



#### 5.4 Análisis de datos

Para el objetivo 1, se aplicó una estadística descriptiva para cada variable de respuesta como son: Carbono almacenado en la biomasa aérea, subterránea, en la biomasa sobre el suelo viva y muerta, y en los diferentes compartimentos o profundidades del suelo, diferenciando por provincia (Azuay y Cañar).

Para cumplir con el Objetivo 2, las variables de respuesta antes mencionadas pasaron por un análisis de su normalidad a través de la prueba Kolmogórov-Smirnov, con corrección de significancia de Lilliefors, con excepción de la biomasa aérea, la misma que fue transformada a logaritmo natural. Estas pruebas y transformación se llevaron a cabo para lograr la normalidad de los datos. Uno de los primeros pasos fue construir la matriz de correlaciones, en donde se determinó qué las variables de carbono de la biomasa sobre el suelo tanto viva como muerta, desestabilizaban el modelo, asimismo, ocurrió con las variables de densidad aparente, tamaño de la parcela y orientación, por tanto, se procedió a sacarlas del análisis. Posteriormente, se realizó un análisis de componentes principales (ACP) para encontrar una correlación entre las variables de respuesta entre de los diferentes sitios reforestados con los parámetros climáticos. Las variables colectadas en campo fueron: densidad de dosel (%), pendiente (%), Elevación (m s.n.m.) y orientación (°). También, se utilizó tres variables climáticas de precipitación media anual ( $\text{mm año}^{-1}$ ), temperatura máxima y mínima (°C). Adicionalmente, se aplicó una prueba de KMO y Bartlett para verificar si los datos son idóneos para la detección de las estructuras del modelo, luego conformamos las comunidades, para más tarde realizar los gráficos de sedimentación y los gráficos del ACP final en formato biplot. Cabe mencionar que para realizar el ACP, optamos por dividir el análisis en dos partes, la primera para la biomasa aérea y las variables climáticas y la segunda de igual manera, pero con el carbono del suelo. Los símbolos de “e1” y “e2”, representan el grado de aporte a las componentes principales por parte de las distintas variables tomadas en consideración; correspondiéndoles valores de entre 0 a 1, siendo 0 el aporte menos significativo y 1 el aporte más significativo a la conformación de las diferentes componentes principales.

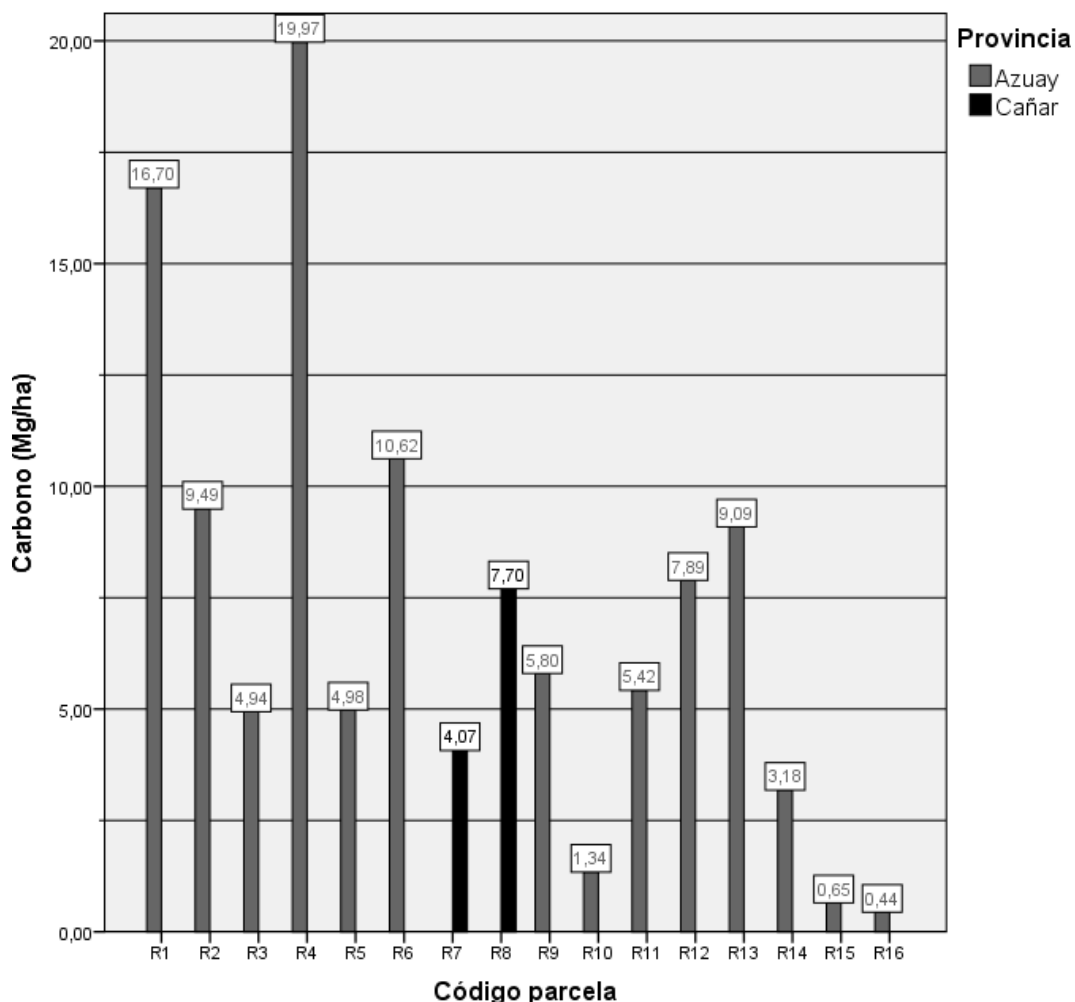
Los datos del presente estudio fueron analizados mediante el programa estadístico SPSS, en su versión 21.

## 6. Resultados

### 6.1. Objetivo específico uno

A continuación, se presentan los resultados sobre el contenido de carbono estimado en la biomasa aérea, en el suelo y en los diferentes compartimentos del suelo en sitios reforestados.

La estimación del contenido de carbono total de la biomasa aérea de los seis sitios reforestados en el sur del Ecuador varió entre 0,44 (valor mínimo) a 19,97 Mg ha<sup>-1</sup> (valor máximo) (Figura 3) con un promedio de 5,80 Mg ha<sup>-1</sup>. Las áreas reforestadas de la provincia del Azuay presentaron un mayor contenido de carbono de la biomasa aérea con un promedio de 7,18 Mg ha<sup>-1</sup> en comparación con los sitios de la provincia del Cañar que presentaron menor contenido promedio de 5,89 Mg ha<sup>-1</sup>.



**Figura 3.** Estimación del contenido de carbono total en la biomasa aérea por cada parcela en las provincias de Azuay y Cañar.

Después de analizar los diferentes sitios de estudio obtuvimos los siguientes valores estadísticos, el sitio que contó con mayor aporte de stock de carbono fue Aguarongo con un valor promedio de  $15,81 \text{ Mg ha}^{-1}$  y el sitio que menos carbono promedio aportado fue San Rafael con  $0,52 \text{ Mg ha}^{-1}$  (Tabla 3.).

**Tabla 3.** Valores estadísticos del carbono en la biomasa aérea

| Locación      | Provincia | Elevación m s.n.m. | Media C. BM aérea ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ) | Máximo C. BM aérea ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ) | Mínimo C. BM aérea ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ) | Desviación estándar Carbono BM aérea |
|---------------|-----------|--------------------|---|--|--|--------------------------------------|
| Guapán        | Cañar     | 3 238              | 5,89                                      | 7,70                                       | 4,07                                       | 2,57                                 |
| San Bartolomé | Azuay     | 3 218              | 8,56                                      | 10,45                                      | 6,78                                       | 3,47                                 |
| Chilcapamba   |           | 3 037              | 2,61                                      | 4,98                                       | 0,23                                       | 3,36                                 |

|                |       |       |       |      |      |
|----------------|-------|-------|-------|------|------|
| Sevilla de Oro | 2 325 | 6,36  | 11,16 | 1,34 | 3,50 |
| Aguarongo      | 3 189 | 15,81 | 36,38 | 3,18 | 7,96 |
| San Rafael     | 2 083 | 0,52  | 0,60  | 0,43 | 0,12 |

En la tabla 4 se muestra todas las especies registradas en los 6 sitios de estudio. Los resultados indican que las especies con la mayor cantidad de carbono estimado son: *Alnus acuminata* Kunth (Aliso nativo) con 43,45 Mg ha<sup>-1</sup> y *Polylepis racemosa* Ruiz & Pav (Queñua) con 15,9 Mg ha<sup>-1</sup> en la provincia del Azuay. La misma tendencia se mostró para las especies mencionadas en la provincia de Cañar, pero los valores son menores. Cabe indicar que los valores de estas especies corresponden al carbono total estimado en todas las parcelas.

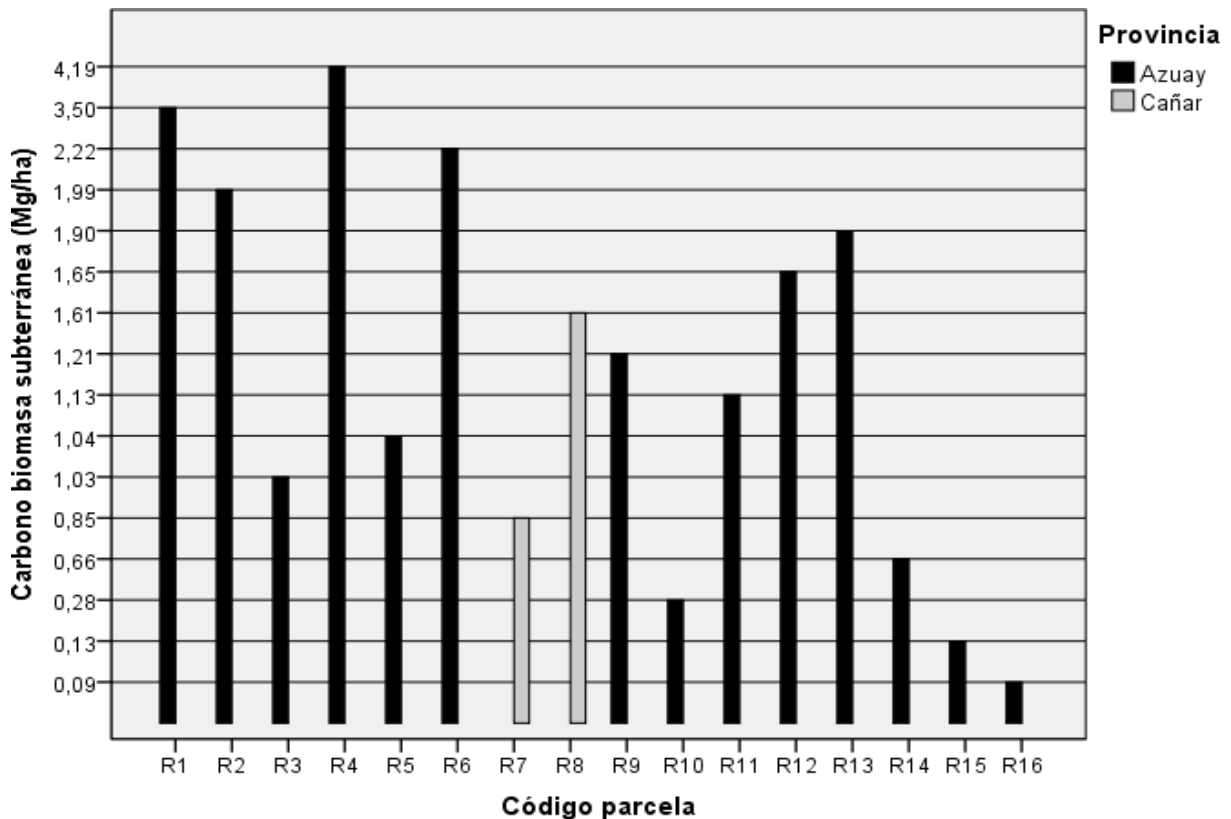
**Tabla 4.** Especies representativas en el stock de carbono en biomasa aérea, en forestales, sumatoria por especie de cada provincia.

| Provincia | N. como Cod. sp | Nombre científico                              | Carbono total (Mg/ha) | Desviación estándar | N. como Cod. sp | Carbono total (Mg/ha) | Desviación estándar |
|-----------|-----------------|--|-----------------------|---------------------|-----------------|-----------------------|---------------------|
| Azuay     | Acacia          | <i>Mimosa andina</i> Benth.                    | 0,44                  | 0,05                | Sp1R5           | 2,83                  | 1,04                |
|           | Aliso           | <i>Alnus acuminata</i> Kunth                   | 43,45                 | 4,91                | Sp1R6           | 0,03                  | -                   |
|           | Cañaro          | <i>Erythrina edulis</i> Triana ex Micheli      | 1,35                  | 0,25                | Sp1R10          | 0,09                  | -                   |
|           | Chachaco        | <i>Escallonia myrtilloides</i>                 | 2,37                  | 0,49                | Sp1R12          | 0,01                  | -                   |
|           | Chilca          | <i>Baccharis latifolia</i> (Ruiz & Pav.) Pers. | 3,52                  | 0,92                | Sp1R14          | 0,09                  | -                   |
|           | Gañal           | <i>Oreocallis grandiflora</i> (Lam.) R. Br     | 0,12                  | 0,07                | Sp1R13          | 0,06                  | 0,52                |
|           | Guaba           | <i>Inga insignis</i> Kunth                     | 0,54                  | 0,05                | SP2R5           | 0,04                  | -                   |
|           | Halo            | <i>Hesperomeles ferruginea</i> (Pers.) Benth.  | 0,73                  | 0,31                | Sp2R6           | 0,16                  | 4,28                |
|           | Laurel          | <i>Morella parvifolia</i> (Benth.) Parra-O.    | 7,57                  | 2,07                | Sp2R12          | 0,01                  | -                   |
|           | Motemuro        | <i>Gaultheria erecta</i> Vent.                 | 0,17                  | 0,53                | Sp3R5           | 0,04                  | -                   |
|           | Queñua          | <i>Polylepis racemosa</i>                      | 15,99                 | 2,35                | Sp3R12          | 0,03                  | 1,11                |
|           | Sauce           | <i>Salix humboldtiana</i> Willd                | 0,07                  | -                   | Sp4R12          | 0,05                  | 2,56                |
|           | Sp1R1           | -  | 0,83                  | 2,44                | Sp5R12          | 0,01                  | -                   |
| Cañar     | Aliso           | <i>Alnus acuminata</i> Kunth                   | 5,12                  | 5,09                |                 |                       |                     |
|           | Chachaco        | <i>Escallonia myrtilloides</i>                 | 0,15                  | 0,26                |                 |                       |                     |
|           | Chilca          | <i>Baccharis latifolia</i> (Ruiz & Pav.) Pers. | 0,06                  | -                   |                 |                       |                     |
|           | Pumamaqui       | <i>Oreopanax andreanus</i> Marchal             | 2,29                  | 3,52                |                 |                       |                     |
|           | Queñua          | <i>Polilepis racemosa</i>                      | 4,07                  | 1,92                |                 |                       |                     |
|           | Sp4R9           | -  | 0,06                  | -                   |                 |                       |                     |

*Nota: N. com ó Cod. sp, representan el nombre común o el código que se les asignó a las especies que no pudimos identificar en campo. Además, se resaltaron los valores máximos y mínimos registrados, en el presente estudio. La mayoría de las especies no identificadas resultaban ser únicas tanto para la parcela como para el sitio.*

### 6.2. Carbono en la biomasa subterránea

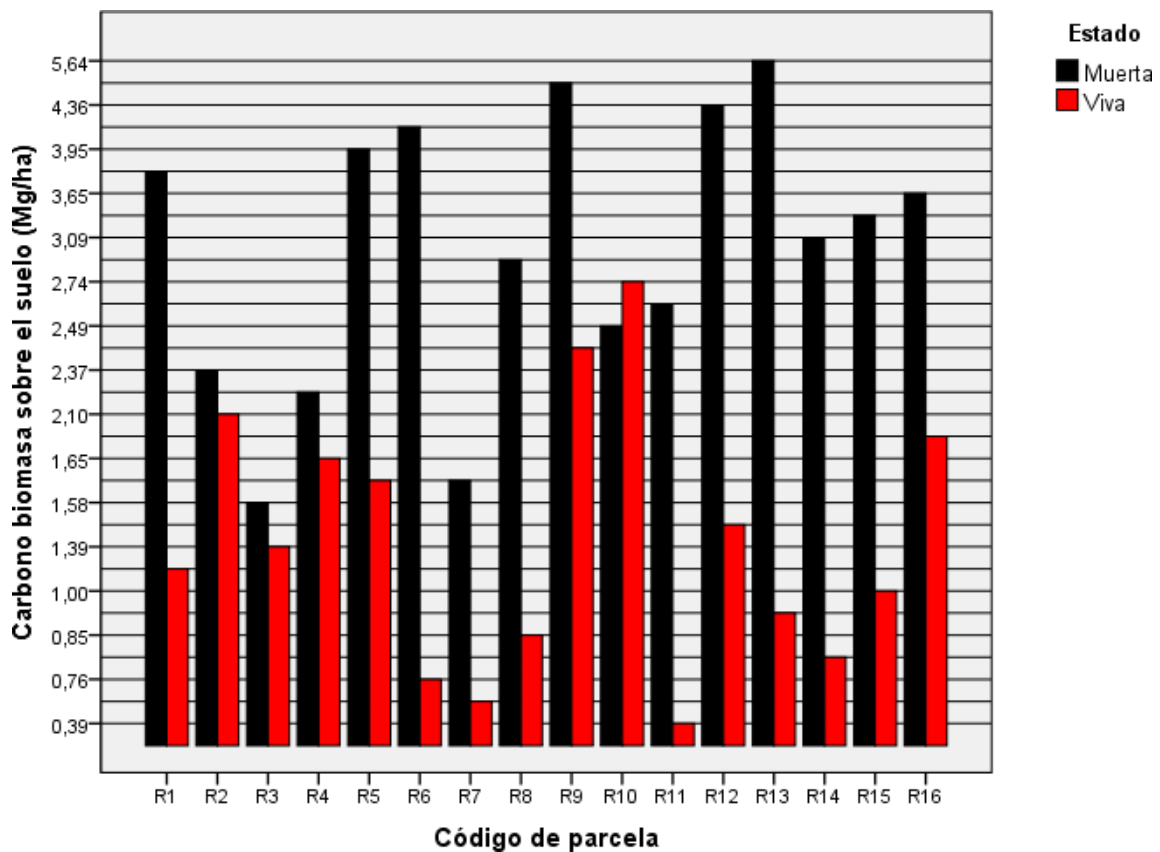
El carbono para la biomasa subterránea, los valores variaron entre 4,19 y 0,09 Mg ha<sup>-1</sup> como máximo y mínimo, respectivamente en la provincia del Azuay. Para las parcelas de Cañar los valores fueron de 1,62 y 0,86 Mg ha<sup>-1</sup> siendo el máximo y mínimo, respectivamente. El valor promedio general del estudio fue de 1,47 Mg ha<sup>-1</sup> (Figura 4).



**Figura 4.** Estimación del stock de carbono total en la biomasa subterránea para las provincias de Azuay y Cañar

**6.3. Carbono en la biomasa viva y muerta presente sobre el suelo**

El promedio estimado para el carbono total de la biomasa viva sobre el suelo de 1,35 Mg ha<sup>-1</sup> y para la biomasa muerta 3,31Mg ha<sup>-1</sup>. Se registraron valores máximos de 2,74 Mg ha<sup>-1</sup> para la viva y 5,64 Mg ha<sup>-1</sup> para la muerta; finalmente los valores mínimos que se registraron fueron de 0,39 Mg ha<sup>-1</sup> para la biomasa viva y de 1,58 Mg ha<sup>-1</sup> para la biomasa muerta (Figura 5). Cabe recalcar que las parcelas R7 y R8 pertenecen únicamente a la provincia del Cañar, mientras que las demás se hallan al interior de la provincia del Azuay.



*Figura 5. Estimación del contenido de carbono total de la biomasa sobre el suelo viva y muerta en las provincias del Azuay y Cañar*

#### 6.4. Carbono presente a diferentes profundidades del suelo (compartimentos)

La tabla 4 muestra el carbono estimado almacenado en las profundidades de: 0 a 10 cm, 10 a 20 cm, 20 a 30 cm, 30 a 50 cm y de 50 a 100 cm por cada parcela analizada (16 parcelas). Los resultados indican que en cada parcela el contenido de carbono total se acumula con la profundidad, y esta tendencia se observó en todas las parcelas, siendo la parcela 13 con mayor contenido de carbono en la profundidad de 50 a 100 cm con 95,15 Mg ha<sup>-1</sup> y la parcela 16 con menor contenido de carbono en la profundidad de 0 a 10 cm.

**Tabla 5.** Estimación total del stock de carbono acumulado en el suelo, a diferentes profundidades en parcelas de reforestación de Cañar y Azuay

| Provincia | Profundidades (cm) | Carbono total (Mg ha <sup>-1</sup> ) |              |            |              |            |            |             |
|-----------|--------------------|--------------------------------------|--------------|------------|--------------|------------|------------|-------------|
|           |                    | R1                                   | R2           | R3         | R4           | R5         | R6         | R9          |
| Azuay     | 0-10               | 12,06                                | 8,12         | 13,91      | 22,62        | 20,73      | 26,56      | 20,21       |
|           | 10-20              | 16,24                                | 17,99        | 18,38      | 34,56        | 32,11      | 32,95      | 20,05       |
|           | 20-30              | 23,12                                | 9,75         | 21,60      | 39,80        | 30,5       | 44,47      | 14,39       |
|           | 30-50              | 41,14                                | 19,06        | 21,08      | 59,91        | 35,82      | 82,28      | 18,70       |
|           | 50-100             | 45,65                                | 27,46        | 29,43      | 77,09        | 51,89      | 90,90      | 38,20       |
|           |                    | <b>R10</b>                           | <b>R11</b>   | <b>R12</b> | <b>R13</b>   | <b>R14</b> | <b>R15</b> | <b>R16</b>  |
|           | 0-10               | 11,94                                | 14,16        | 16,38      | 15,58        | 30,56      | 20,03      | <b>4,47</b> |
|           | 10-20              | 16,86                                | 19,56        | 32,46      | 31,41        | 55,46      | 24,86      | 11,51       |
|           | 20-30              | 19,98                                | 17,74        | 41,86      | 37,70        | 51,17      | 42,09      | 11,47       |
|           | 30-50              | 36,30                                | 27,41        | 48,62      | 63,50        | 53,40      | 50,65      | 13,14       |
|           | 50-100             | 45,39                                | 30,53        | 56,52      | <b>95,15</b> | 55,81      | 72,69      | 16,72       |
| Cañar     |                    | <b>R7</b>                            | <b>R8</b>    |            |              |            |            |             |
|           | 0-10               | 14,53                                | <b>13,57</b> |            |              |            |            |             |
|           | 10-20              | 39,70                                | 23,60        |            |              |            |            |             |
|           | 20-30              | 70,92                                | 35,71        |            |              |            |            |             |
|           | 30-50              | 66,29                                | 57,50        |            |              |            |            |             |
|           | 50-100             | 69,61                                | <b>82,91</b> |            |              |            |            |             |

**Nota:** Dentro de la tabla se resaltaron los valores máximos y mínimos más significativos.



Por otro lado, en la tabla 5 se resume la media de carbono del suelo en cada profundidad para las dos provincias en estudio. Los resultados indican que esta variable se incrementa a medida que se incrementa la profundidad, siendo, de 50 a 100 cm los valores son más altos debido al efecto acumulativo en los cálculos. En el caso de Azuay podemos observar que va desde los 15,35 Mg ha<sup>-1</sup> (valor mínimo) a 54,11 Mg ha<sup>-1</sup> (valor máximo) que corresponden al compartimento más profundo. De la misma manera estos valores aumentan según el espesor del compartimento de suelo, tal como se puede ver en los dos compartimentos más profundos (Tabla 5.), tendencia que comparten las dos provincias analizadas.

**Tabla 5.** Promedio estimado del stock de carbono acumulado a diferentes profundidades en las provincias de Azuay (n = 14) y Cañar (n=2).

| Provincia | Profundidad (cm) | Media de carbono en el suelo (Mg/ha) | Desviación estándar |
|-----------|------------------|--------------------------------------|---------------------|
| Azuay     | 0-10             | <u>15,35</u>                         | <u>5,76</u>         |
|           | 10-20            | 24,10                                | 9,68                |
|           | 20-30            | 29,93                                | 16,59               |
|           | 30-50            | 42,20                                | 21,31               |
|           | 50-100           | <u>54,10</u>                         | <u>25,29</u>        |
| Cañar     | 0-10             | <u>25,29</u>                         | 7,44                |
|           | 10-20            | 40,16                                | <u>21,64</u>        |
|           | 20-30            | 46,63                                | 6,41                |
|           | 30-50            | 52,03                                | <u>1,94</u>         |
|           | 50-100           | <u>64,26</u>                         | 11,93               |

**Nota:** Los valores presentados en las distintas profundidades son acumulativos de acuerdo al espesor de las capas muestreadas en el suelo. Los valores resaltados son los máximos y mínimos generales de cada provincia.

## Objetivo específico 2

### Relación entre carbono aéreo y en el suelo con variables climáticas

En la tabla 6 se representa las diez variables analizadas que incluye los valores promedio del contenido de carbono en biomasa aérea y de los diferentes compartimentos en el suelo, variables del clima y otros del medio biofísico (ej. Elevación). A nivel descriptivo se puede indicar que las parcela R1 ubicada en Paute, provincia del Azuay, obtuvo el valor más alto de biomasa aérea ( $16,70 \text{ Mg ha}^{-1}$ ), y coincide con los valores más altos de temperatura máxima ( $18,41 \text{ }^\circ\text{C}$ ), mínima ( $11,55 \text{ }^\circ\text{C}$ ) y precipitación anual  $1\ 129,26 \text{ mm}$  y sobre todo se destaca el número de árboles por parcela. Asimismo, las parcelas ubicadas en Sevilla de Oro (R9 y 10) presentaron los valores más altos de contenido de carbono en la biomasa viva ( $2,49$  y  $2,74 \text{ Mg ha}^{-1}$ , Figura 5) y biomasa muerta sobre el suelo ( $> 4 \text{ Mg ha}^{-1}$ , R9, figura 5.), lugar en donde las temperatura máxima y mínima fueron también altos (tabla 6.). En la parcela de San Rafael (R15) ubicada en la provincia del Azuay, presentó la estimación de carbono sobre el suelo más alto con respecto a las otras parcelas ( $210,32 \text{ Mg ha}^{-1}$ ), en donde la precipitación fue la más elevada ( $1\ 921,5 \text{ mm}$ ) (Tabla 6).

En el anexo G.a., se muestra los resultados de la correlación para la biomasa aérea, donde se indica que las dos temperaturas y la elevación estuvieron correlacionadas negativamente. Cabe indicar, que, para el stock de carbono en la biomasa aérea, las variables de diámetro a la altura del pecho (DAP) y la altura total del árbol (altura) estuvieron correlacionadas, tal como se esperaba.

En la matriz de correlaciones para el stock de carbono en el suelo se implementaron un menor número de variables en comparación a la matriz anteriormente mencionada. Las correlaciones más altas que se dieron entre las distintas variables climáticas y el stock de carbono en el suelo a diferentes profundidades; fueron temperatura máxima y mínima, cuya relación fue inversa. Finalmente cabe mencionar que, los fragmentos rocosos poseen una correlación moderada con referencia a las temperaturas y elevación (Anexo H.a.).

**Tabla 6.** Resumen de las variables climáticas y de los stocks de carbono implementadas para el análisis de componentes principales en los sitios reforestados

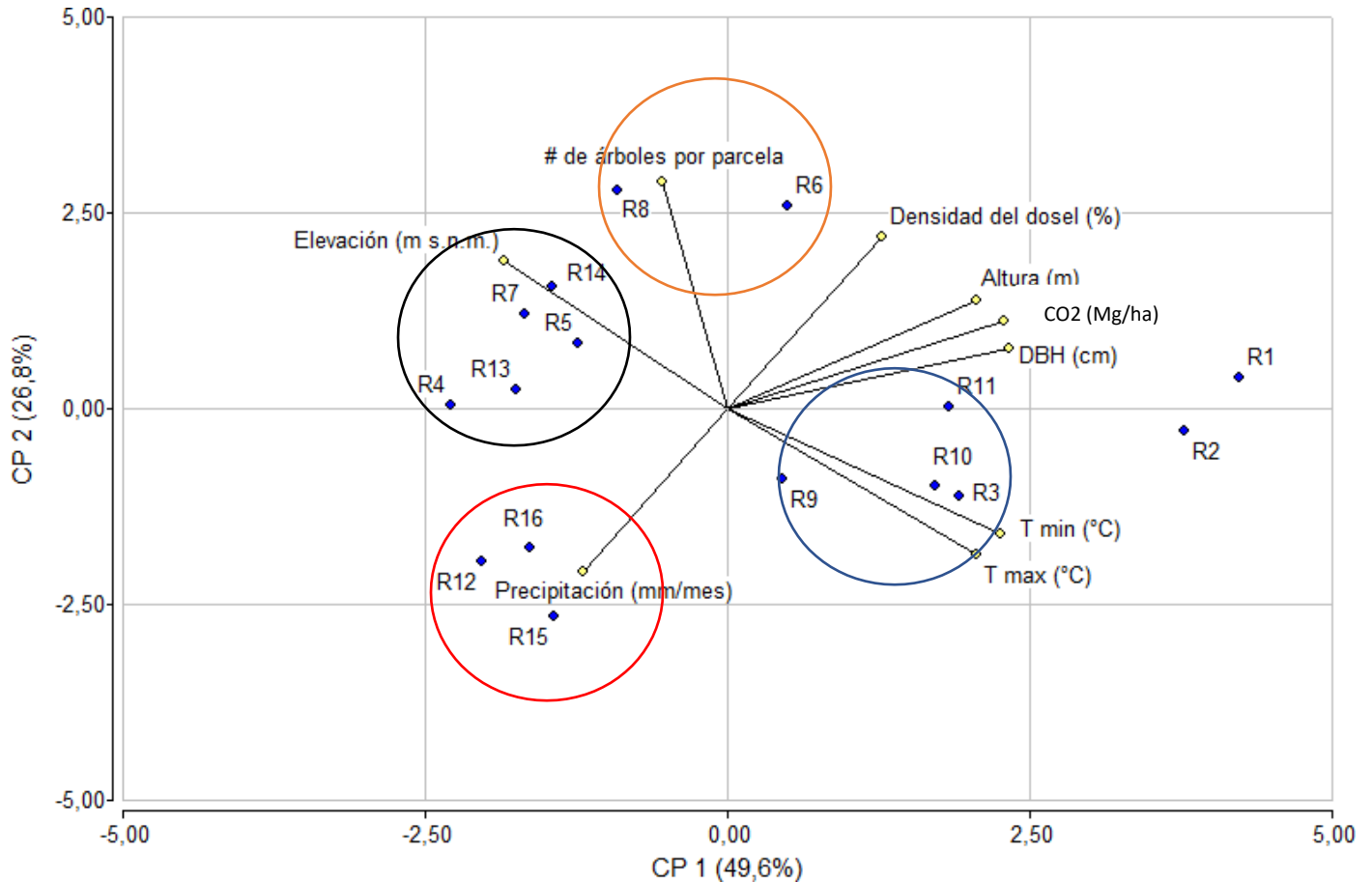
| Provincia | Locación       | Código de parcela | Carbono aéreo (Mg/Ha) | Elevación (m s.n.m.) | DAP promedio (cm) | Altura prom. (m) | C. suelo (Mg/Ha) | T. máx (°C)  | T. mín (°C)  | Ppt (mm/año)    | Den. dosel (%) | Frag. rocosos (cc) | # árboles por parcela |
|-----------|----------------|-------------------|-----------------------|----------------------|-------------------|------------------|------------------|--------------|--------------|-----------------|----------------|--------------------|-----------------------|
| Azuay     | Paute          | R1                | <b>16,70</b>          | 2 180                | 10,54             | <b>9,64</b>      | 138,21           | <b>18,41</b> | <b>11,55</b> | <b>1 129,26</b> | 45             | 5,29               | 17                    |
| Azuay     | Paute          | R2                | 9,49                  | <b>2 178</b>         | <b>10,63</b>      | 7,93             | 72,38            | <b>18,41</b> | <b>11,55</b> | 1 256,29        | <b>28</b>      | 11,26              | <b>7</b>              |
| Azuay     | Paute          | R3                | 4,94                  | 2 180                | 8,71              | 6,27             | 104,04           | 18,03        | 11,21        | 1 249,95        | 66,66          | 11,28              | 11                    |
| Azuay     | San Bartolomé  | R4                | <b>19,97</b>          | 3 218                | <b>5,37</b>       | 3,89             | 253,98           | 13,12        | 6,27         | 1 364,46        | 69,44          | <b>0</b>           | 13                    |
| Azuay     | San Bartolomé  | R5                | 4,98                  | 3 254                | 7,03              | 4,22             | 171,05           | 13,07        | 6,2          | 1 333,94        | 60             | 0,01               | 25                    |
| Azuay     | Chilcapamba    | R6                | 10,62                 | 3 037                | 7,21              | 6,22             | <b>277,16</b>    | 13,87        | 6,98         | 1 274,53        | <b>91,13</b>   | 2,04               | <b>82</b>             |
| Cañar     | Guapán         | R7                | 4,07                  | <b>3 263</b>         | 7,12              | 3,59             | 216,05           | <b>12,98</b> | <b>5,72</b>  | 1 165,48        | 82,41          | 3,12               | 32                    |
| Cañar     | Guapán         | R8                | 7,70                  | 3 213                | 6,85              | 6,41             | 213,29           | <b>12,98</b> | <b>5,72</b>  | 1 165,48        | 78,45          | 0,06               | 51                    |
| Azuay     | Sevilla de Oro | R9                | 5,80                  | 2 325                | 7,14              | 4,25             | 111,55           | 17,31        | 10,48        | 1 227,46        | 84,49          | 1,46               | 28                    |
| Azuay     | Sevilla de Oro | R10               | 1,34                  | 2 326                | 10,24             | 4,17             | 130,47           | 18,03        | 11,21        | 1 249,95        | 86,45          | 3,62               | 12                    |
| Azuay     | Sevilla de Oro | R11               | 5,42                  | 2 271                | 8,62              | 5,06             | 109,40           | 17,31        | 10,48        | 1 227,46        | 88,23          | 0,64               | 35                    |
| Azuay     | Aguarongo      | R12               | 7,89                  | 3 155                | 7,68              | 3,82             | 195,84           | 13,1         | 6,25         | 1 375,43        | 78,47          | 1,56               | 32                    |
| Azuay     | Aguarongo      | R13               | 9,09                  | 3 189                | 8,31              | 4,21             | 243,34           | 13,1         | 6,25         | 1 375,43        | 82,36          | 0,24               | 81                    |
| Azuay     | Aguarongo      | R14               | 3,18                  | 3 151                | 6,46              | 3,55             | 246,40           | 13,1         | 6,25         | 1 375,43        | 73,56          | 0,66               | 21                    |
| Azuay     | San Rafael     | R15               | 0,65                  | 2 574                | 6,12              | <b>3,31</b>      | <b>210,32</b>    | 16,94        | 8,73         | <b>1 921,5</b>  | 83,79          | 5,84               | 9                     |
| Azuay     | San Rafael     | R16               | <b>0,44</b>           | 3 151                | 6,42              | 4,22             | <b>57,31</b>     | 16,94        | 8,73         | <b>1 921,5</b>  | 85,31          | <b>14,87</b>       | 11                    |

**Nota:** (DAP promedio) representa al diámetro a la altura del pecho, (C. suelo) al total del carbono en el suelo de cada sitio, (T. máx.) a la temperatura máxima, (T. mín) a la temperatura mínima, (Ppt) representa a la precipitación media, (Den. dosel) a la densidad de dosel de la parcela y (Frag. rocosos) al promedio de los fragmentos rocosos de las diferentes parcelas. Los valores resaltados indican los valores mínimos y máximos de cada una de las variables tomadas en consideración para el análisis estadístico.

### **Análisis de componentes principales (ACP) en función del carbono de la biomasa aérea**

De acuerdo al ACP el stock de carbono de la biomasa aérea mostró un 76,4 % de la variación explicada en los dos componentes (CP1 y CP2). El primer componente principal (CP1), engloba las variables que explicaron mejor fueron: temperatura máxima, temperatura mínima, diámetro a la altura del pecho y Altura del árbol. El segundo componente principal CP2, agrupó a las siguientes variables: número de árboles, densidad de dosel, elevación y precipitación (Anexo G.h).

Se formaron cuatro grupos, donde las parcelas R12, R15 y R16 están agrupadas por su relación a una mayor precipitación y a características con menor desarrollo de árboles y número de individuos por parcela. Las parcelas R4, R5, R7, R13 y R14 se agrupan en función de la elevación y la temperatura mínima son menores. Las parcelas R3, R9, R10 y R11 se agruparon de acuerdo a las temperaturas más cálidas (Temperatura máxima) con una menor elevación, y finalmente las parcelas R6 y R8 están influenciadas por el mayor número de árboles por parcela, en otras palabras, por la densidad y la biomasa aérea (Figura 6).

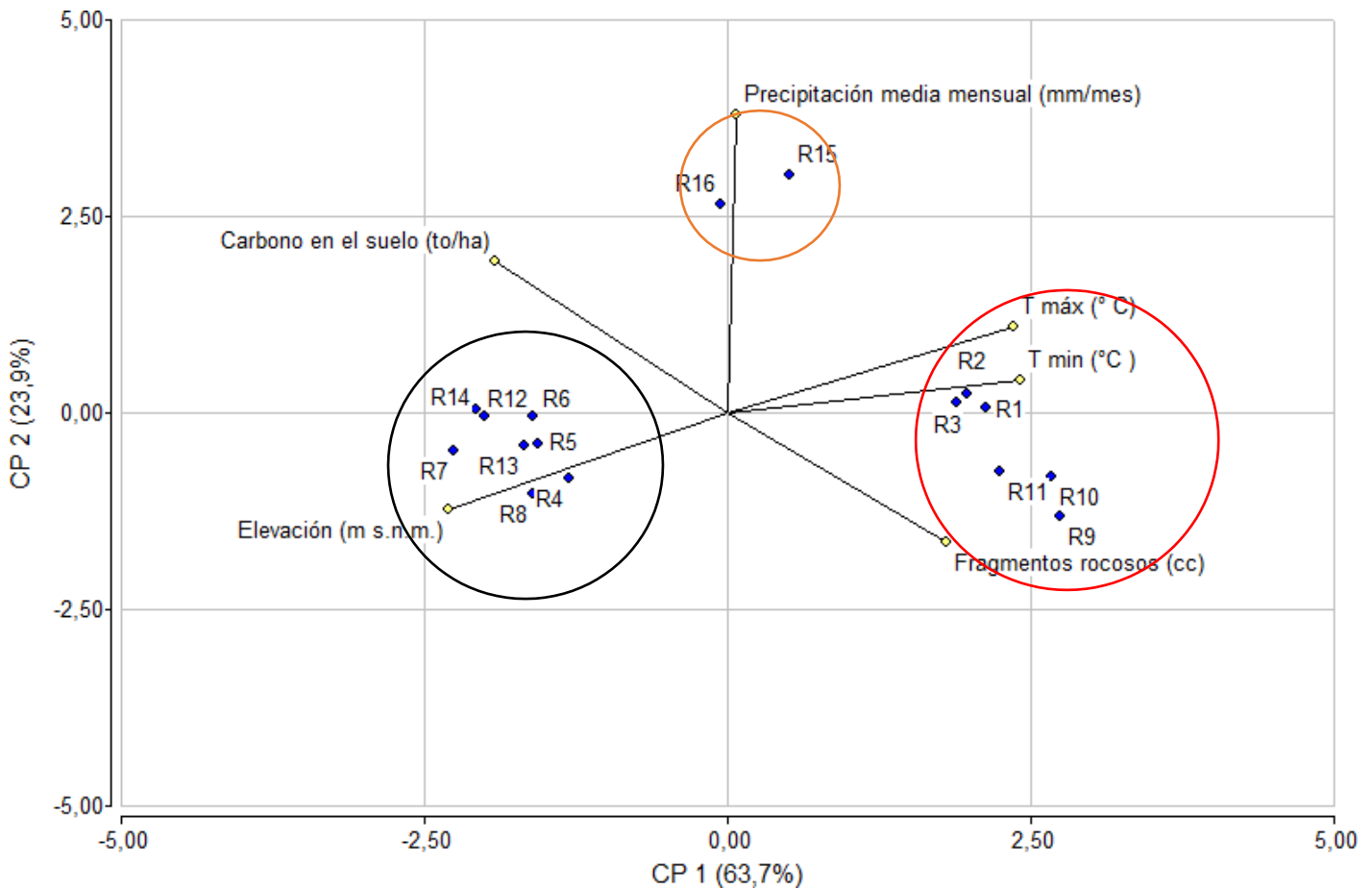


**Figura 6.** Biplot de las diferentes variables recolectadas en el estudio frente al stock de carbono en la biomasa aérea

### **Análisis de componentes principales (ACP) en función del stock de carbono en el suelo**

En el caso del stock de carbono en los diferentes compartimentos del suelo, el 87,60% de la variación del presente estudio, está siendo explicada por las dos componentes principales (CP1 y CP2). En el CP1, las variables que explican mejor la variación para el carbono en suelo son: temperatura máxima, temperatura mínima y elevación. En segundo componente principal (CP2), las variables que se agruparon fueron: precipitación media mensual y fragmentos rocosos. (Anexo H.h). De acuerdo a la Figura 7, se muestran tres grupos formados, donde las parcelas R4, R5, R6, R7, R8, R12; R13 y R14 presentan mayor contenido de carbono del suelo localizadas en elevaciones altas (> 3 000 m s.n.m.) y correlacionadas

negativamente con temperaturas ( $T^{\circ}$  min y  $T^{\circ}$  max). Las parcelas R1, R2, R3, tuvieron un contenido de carbono medio, localizadas a menor elevación, y por tanto, con temperaturas más cálidas. Sin embargo, para las parcelas R9, R10 y R11, se observó la misma tendencia, aunque los valores del contenido de carbono en el suelo fueron más bajas (Figura 7.).



**Figura 7.** Biplot de las diferentes variables analizadas dentro del estudio frente al stock de carbono del suelo

## 7. Discusión

**Objetivo específico número uno:** *Estimar el carbono almacenado en la biomasa aérea y en los diferentes compartimentos del suelo en sitios reforestados.*

Los hallazgos encontrados en este estudio sobre el contenido de carbono en la biomasa aérea demostraron variabilidad en los valores de los sitios reforestados con una edad de 5 a 10 años de plantación en la zona andina de las provincias de Azuay y Cañar con valores promedios de 7,18 Mg ha<sup>-1</sup> y 5,89 Mg ha<sup>-1</sup>, respectivamente. Sin duda, estos valores son bajos comparados, por ejemplo, a un bosque nativo de *Polylepis* en Zhurucay ubicado en páramo en donde se registró valores mayores a 66 Mg ha<sup>-1</sup> (Puma, 2022). Así mismo, en un estudio realizado en plantaciones de pino en los páramos de la provincia del Azuay con una edad entre 16 y 29 años se encontró un promedio de carbono aéreo almacenado entre 12,50 a 91,70 Mg ha<sup>-1</sup>, en donde la altitud fue una variable determinante (Quiroz et al., 2021). Los bosques montanos en regeneración como fue en Tapichalaca cerca del parque Nacional Podocarpus en Zamora Chinchipe a una elevación de 2 250 m s.n.m., con una edad entre 12 y 15 años el bosque tuvo un total de biomasa aérea de 71,60 Mg ha<sup>-1</sup> (Spracklen & Righelato, 2014). Con estas comparaciones, se puede explicar que la edad de la plantación es un factor determinante en el almacenamiento de carbono, así como también se puede deber a las condiciones climáticas, edáficas y disponibilidad de agua asociadas a cada sitio plantado. Sin embargo, a mediano y a largo plazo, estos programas de reforestación pueden ser una fuente de stock de carbono importante y que funcione como una medida de mitigación al cambio climático, considerando que la tasa de fijación de carbono puede ser más eficiente en plantaciones jóvenes que en bosques naturales o plantaciones maduras.

La especie *Alnus acuminata* kunth como especie nativa, es considerada un potencial para la restauración por ser pionera, de crecimiento rápido y con capacidad por fijar nitrógeno, y por lo tanto es una especie utilizada en programas de reforestación en la región Andina (Palomeque et al., 2020). En este estudio resultó ser la especie con la mayor capacidad de almacenamiento en cuanto a stock de carbono aéreo, con un contenido de carbono estimado de 43,45 Mg ha<sup>-1</sup> para las parcelas ubicadas en el Azuay y 5,12 Mg ha<sup>-1</sup> para las parcelas en Cañar. De allí que un estudio realizado en un ecosistema tropical de montaña al sur del Ecuador, con 20 años de plantación, se registró un total de carbono de 24,50 (Mg ha<sup>-1</sup>) (Knoke

et al., 2014). Por tanto, para los 10 años de plantación registrado en nuestro estudio para la provincia de Azuay es comparable con estudios previos en la zona andina. En otro estudio, realizado en zona de amortiguamiento del Parque Nacional Podocarpus, sector de Cajanuma, se logró identificar que un bosque natural (no plantación) de *A. acuminata* con una densidad de 120 plantas/ha, puede almacenar en total 23,34 Mg ha<sup>-1</sup> de carbono (Aulestia et al., 2018). Esto también indica que las características propias de la plantación como la densidad de plantación puede ser determinantes en el almacenamiento de carbono.

En cuanto al carbono en el suelo en nuestro estudio, se registró que este se incrementaba en función de la profundidad, siendo las capas más profundas (de 50 a 100 cm), donde se registraron valores promedios entre 54,10 y 64,10 Mg ha<sup>-1</sup> para las dos provincias, no obstante, estos datos son más altos porque el espesor fue de 50 cm, con respecto a la primera profundidad de 0 a 10 cm que tuvo un espesor de 10 m.

Esta tendencia también fue observada en el estudio realizado en el bosque de *Polylepis* ubicado en el Páramo de la microcuenca en Zhurucay, Azuay, en donde el valor de carbono orgánico del suelo fue de 298,25 Mg ha<sup>-1</sup> a la profundidad de 30 a 60 cm en parcelas de interior del bosque (Puma, 2022). También, en un estudio realizado en plantaciones de pino en Colombia, mediante el método Walkley-Black (WB), se analizó, el suelo en dos profundidades de 0-15 cm y 15-30 cm, y estimaron que: a la primera profundidad el suelo almacenaba de 36 a 46 Mg ha<sup>-1</sup> de carbono y para la segunda profundidad este albergaba de 106 a 113 Mg ha<sup>-1</sup> de carbono (Fernández et al., 2019). Por otro lado, los resultados de nuestro estudio, no coincide con lo encontrado por Quiroz et al., (2021) en plantaciones de pino distribuidas en una gradiente de altitud desde los 2 830 a 3 750 m s.n.m.; solamente para citar un ejemplo, en Irquis se encontró que ente 0 a 10 cm de profundidad el total de carbono orgánico fue de 46,40 Mg ha<sup>-1</sup> y de 30 a 45 cm de profundidad se registró 32,80 Mg ha<sup>-1</sup>. Esta diferencia puede deberse a que el uso del suelo previo, en este estudio del páramo fue más conservado mientras que en nuestro estudio el uso previo fue uso intensivo de pastoreo. En la misma línea, un estudio realizado



en sitios reforestados con especies nativas y exóticas en las provincias de Pichincha e Imbabura, en cinco sitios en una gradiente de elevación entre 325 a 1 862 m s.n.m., se observó que el contenido de carbono decreció con la profundidad (Overtoom, 2022).

Las diferencias de carbono encontradas entre las provincias de Azuay y Cañar tanto para la biomasa aérea como en el suelo, son explicadas por el número de parcelas consideradas para este estudio, siendo la provincia del Azuay con mayor número de parcelas que en Cañar.

La variación en los valores puede también puede deberse al método para la obtención de la materia orgánica utilizada en los diferentes estudios que evaluaron la precisión de los métodos Walkley- Black (WB) y Pérdida de peso por ignición (Loss Organic Ignition LOI), en donde determinaron que el método WB es mucho más preciso principalmente en suelos con bajo contenido de materia orgánica, para determinar el contenido de carbono. No obstante, el método LOI es lo suficientemente certero como para ser aplicado y obtener una buena estimación (Barrezueta et al., 2020; Dabadie et al., 2018; Salehiet al., 2011).

**Objetivo específico número dos:** *Clasificar los sitios reforestados considerando el efecto de las variables climáticas en el carbono almacenado tanto en biomasa aérea como en suelo.*

Los resultados mostraron que las parcelas en función de la biomasa aérea como de suelo, se agruparon de acuerdo a los diferentes parámetros abióticos que incluyen parámetros del clima y la elevación. Por ejemplo, las parcelas R4, R5, R7, R13 y R14 estuvieron agrupadas por la variable elevación tanto para biomasa aérea como de suelo y correlacionada con la temperatura, indicando por un lado que a mayor elevación hay mayor biomasa de suelo, y lo opuesto ocurrió para la biomasa aérea. Estos resultados tienen sentido pues a menor temperatura la descomposición de la materia orgánica es más lenta y por tanto hay carbono que se acumula en las diferentes capas del suelo, lo que coincide con estudios realizados en altas elevaciones por Puma (2022).

Homeier et al. (2010) mencionaron que la elevación y la topografía en los Andes representa un rango amplio de condiciones climáticas y de condiciones edáficas propias de cada sitio; de allí, que las especies utilizadas para la reforestación y su capacidad de secuestrar carbono tanto a nivel aéreo y en los diferentes compartimentos de suelo estarían influenciadas por estos factores abióticos. En cuanto al parámetro de precipitación, demostró cumplir un rol importante en el contenido de carbono en la biomasa aérea, pues es conocido, que la precipitación también interviene en la productividad de los ecosistemas junto a la temperatura, ya que la disponibilidad del agua en el suelo permite el crecimiento de los árboles. De hecho, en nuestro estudio las parcelas R15 y R16 estuvieron agrupados por la variable precipitación, la misma que demostró que a mayor precipitación hubo mayor cantidad de carbono en el suelo. Linger et al., (2020) encontró en un bosque lluvioso tropical en China, que la precipitación fue el único factor que determinó la productividad neta primaria, a partir de un conjunto de datos de 9 años (2009 – 2017). De acuerdo a nuestro conocimiento, en los bosques o plantaciones andinos hay pocas investigaciones para entender el rol de la precipitación en relación al stock de carbono ya que se necesita de experimentos controlados y a largo plazo para entender las respuestas.

## **8. Conclusiones y recomendaciones**

La reforestación entre 5 y 10 años de edad ubicadas en la zona andina de las provincias de Azuay y Cañar con especies nativas y exóticas demostraron que aportan a almacenar el carbono tanto en la biomasa aérea y en el suelo, incluyendo sus diferentes compartimentos del suelo. Esto indica que la reforestación sirve como un potencial servicio ecosistémico a mediano y largo plazo para almacenar carbono.

Se concluye que hubo una gran variabilidad en los sitios reforestados en el contenido de carbono en la biomasa aérea, pues esto dependió de la ubicación con características propias de elevación y clima, siendo la zona más baja con mayor temperatura como Paute, donde se registró mayor carbono, aunque la edad pudo ser un factor determinante. A nivel del suelo, hubo concentración de carbono levemente mayor en la materia muerta que en la viva, mientras que a nivel de la

profundidad de suelo se encontró que el contenido de carbono incrementa con la profundidad por un efecto acumulativo.

Por otro lado, a partir del Análisis de Componentes Principales, se identificó que tanto variables climáticas como la precipitación, T° min. y T° max. y características propias de la plantación como densidad (número de árboles por parcela) influyeron en la formación de cuatro grupos para el carbono en la biomasa aérea y tres grupos para el carbono en la biomasa a nivel del suelo, donde la densidad no estuvo presente.

Se recomienda continuar con el monitoreo del contenido de carbono almacenado en los programas de reforestación estudiados, especialmente si el propósito fue este servicio eco sistémico, pues esta valoración se podría incluir en los mercados de carbono.

Por otro lado, se recomienda a las instituciones encargadas de la reforestación en las provincias del Azuay y Cañar, implementen una base de datos con información clave, por ejemplo: edad de la plantación, especies plantadas, densidad de plantación, área sembrada, entre otras. Esta información contribuirá a que la información generada sea más precisa en futuras evaluaciones de carbono.

Además, se recomienda complementar los valores obtenidos de carbono de suelo con una caracterización física y química, para entender el rol de la calidad de los suelos en la productividad en términos de carbono. Así como también incluir en el análisis otras variables como por ejemplo el tipo de especie (pionera, sucesión intermedia y avanzada). Así también, se recomienda probar otros métodos de análisis de carbono, por ejemplo, WB, aunque son de mayor costo y se requiere experiencia en la técnica, podrían brindar información más precisa.

Se recomienda que en futuros programas de restauración activa se utilice especies nativas de acuerdo a los requerimientos ecológicos de la especie y de las propiedades específicas de los sitios para promover un mejor almacenamiento de carbono aéreo, en suelo y otros servicios ecosistémicos.

Nuestro estudio es una línea base para futuras investigaciones relacionadas con los sitios reforestados en las provincias de Azuay y Cañar, con el fin de mejorar la comprensión de la dinámica del carbono tanto en la biomasa aérea como a nivel del suelo.

### Referencias

- Aguirre, N., Añazco, M., Cueva, K., Ordoñez, L., Pekkarinnen, A., Ramírez, C., Román, R., Sánchez, G., Velasco, C. (2010). Metodología para desarrollar el estudio piloto de la ENF en conformidad con el mecanismo REDD+. Quito. 58 pp.
- Arango, B., Hoyos, J., & Vásquez, A. (2001). Variación de la densidad básica de la madera de *Eucalyptus grandis* en árboles de siete años de edad. *Rev.Fac.Nal.Agr.Medellín.*, 54, 1275–1284.
- Armenteras, D., Espelta, J. M., Rodríguez, N., & Retana, J. (2017). Deforestation dynamics and drivers in different forest types in Latin America: Three decades of studies (1980–2010). *Global Environmental Change*, 46, 139–147.
- Asner, G.P., Martin, R.E., Anderson, C.B., Kryston, K., Vaughn, N., Knapp, D.E., Bentley, L.P., Shenkin, A., Salinas, N., Sinca, F., Tupayachi, R., Quispe Huaypar, K., Montoya Pillco, M., Ccori Álvarez, F.D., Díaz, S., Enquist, B.J. and Malhi, Y. (2017), Scale dependence of canopy trait distributions along a tropical forest elevation gradient. *New Phytol*, 214: 973-988.  
<https://doi.org/10.1111/nph.14068>
- Aulestia, E., Jiménez, L., Quizhpe, J., & Capa, D. (2018). *Alnus acuminata* kunth: una alternativa de reforestación y fijación de dióxido de carbono. *Bosques Latitud Cero*, 8(2), 64–74.  
<https://revistas.unl.edu.ec/index.php/bosques/article/view/495>
- Barrezueta, S., Cervantes, A., & Barrera, J. (2020). Assessing Loss on ignition to determine organic matter in soils of the El Oro province of Ecuador . *Revista FAVE*, 19(2).
- Blaufelder, C. et al. (2021) A blueprint for scaling voluntary carbon markets. Available at: <https://www.mckinsey.com/business-functions/sustainability/our-insights/a-blueprint-for-scaling-voluntary-carbon-markets-to-meet-the-climate-challenge>
- Céspedes, F., Fernández, J. A., Giménez, L., Leonhardt, E. A., & Bernardis, A. C.

- (2018). Carbon retained by litter and roots in different land uses in the semiarid region of Chaco Province. *Chilean Journal of Agricultural and Animal Sciences*, 34(2), 165–172. <https://doi.org/10.4067/S0719-38902018005000405>
- Chave, J., Réjou-Méchain, M., Búrquez, A., Chidumayo, E., Colgan, M. S., Delitti, W. B. C., Duque, A., Eid, T., Fearnside, P. M., Goodman, R. C., Henry, M., Martínez-Yrizar, A., Mugasha, W. A., Muller-Landau, H. C., Mencuccini, M., Nelson, B. W., Ngomanda, A., Nogueira, E. M., Ortiz-Malavassi, E., ... Vieilledent, G. (2014). Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees. *Global Change Biology*, 20(10), 3177–3190. <https://doi.org/10.1111/gcb.12629>
- Dabadie, M., Perez, C., Arturi, M., Goya, J., & Sandoval, M. (2018). Calibración del método de pérdida de peso por ignición para la estimación del carbono orgánico en Inceptisoles del NE de Entre Ríos. *Revista de la Facultad de Agronomía, La Plata*, 117(1), 157–162.
- Duque, A., Peña, M. A., Cuesta, F., González-Caro, S., Kennedy, P., Phillips, O. L., Calderón-Loor, M., Blundo, C., Carilla, J., Cayola, L., Farfán-Ríos, W., Fuentes, A., Grau, R., Homeier, J., Loza-Rivera, M. I., Malhi, Y., Malizia, A., Malizia, L., Martínez-Villa, J. A., ... Feeley, K. J. (2021). Mature Andean forests as globally important carbon sinks and future carbon refuges. *Nature Communications*, 12(1), 1–10. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-22459-8>
- FAO. (2020). Global Forest Resources Assessment 2020. En *Main Report*. <https://doi.org/10.4324/9781315184487-1>
- Farley, K. (2008). Plantaciones Forestales y Producción de Servicios Ambientales. En *Páramo*. <https://biblio.flacsoandes.edu.ec/libros/digital/56332.pdf>
- Fernández, C., Cely, G., & Serrano, P. (2019). Cuantificación de la captura de carbono y análisis de las propiedades del suelo en coberturas naturales y una plantación de pino en el páramo de Rabanal, Colombia. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*, 28(1), 121–133. <https://doi.org/10.15446/rcdg.v28n1.66152.1>

- Gasparini, P., Di Cosmo, L., & Floris, A. (2022). *Forest Carbon Stock*. 10.1007/978-3-030-98678-0\_12
- Georgiou, K., Jackson, R. B., Vindušková, O., Abramoff, R. Z., Ahlström, A., Feng, W., Harden, J. W., Pellegrini, A. F. A., Polley, H. W., Soong, J. L., Riley, W. J., & Torn, M. S. (2022). Global stocks and capacity of mineral-associated soil organic carbon. *Nature Communications*, 13(1), 1–12. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-31540-9>
- Hairiah, K., Sitompul, S., Van Noordwijk, M., & Palm, C. (2001). Methods for sampling carbon stocks above and below ground. *ICRAF Southeast Asia*, 32.
- Hendrayanto, & Sudomo, S. (2013). Hydrological Services of Forests and Their Compensation Initiatives. *Jurnal Manajemen Hutan Tropika*, 19, 9–84.
- Higuchi, N. (2006). Variation in aboveground tree live biomass in a central Amazonian Forest: Effects of soil and topography. *Forest Ecology and Management* 234, 85-96.
- Homeier, J., Breckle, S., Günter, S., Rollenbeck, R., & Leuschner, C. (2010). *Tree diversity, forest structure and productivity along altitudinal and topographical gradients in a species-rich Ecuadorian montane rain forest*. *Biotropica*. 42, 140–148.
- IPCC. (2006). Tierras Forestales. *Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero*, 4(4), 1–93.
- Jadán, O., Torres, B., Günter, S. (2013). Influencia del uso de la tierra sobre almacenamiento de carbono en sistemas productivos y bosque primario en Napo, Reserva de Biosfera Sumaco, Ecuador. *Revista Amazónica: Ciencia y Tecnología* 1(3): 173-186. [https://www.academia.edu/7234966/Almacenamiento\\_de\\_Carbono\\_SAFs\\_Ecuador](https://www.academia.edu/7234966/Almacenamiento_de_Carbono_SAFs_Ecuador)
- Jandl, R., Leitgeb, E., & Englisch, M. (2022). Decadal Changes of Organic Carbon, Nitrogen, and Acidity of Austrian Forest Soils. *Soil Systems*, 6(1).

<https://doi.org/10.3390/soilsystems6010028>

- Kreibich, N., & Hermwille, L. (2021). Caught in between: credibility and feasibility of the voluntary carbon market post-2020, *Climate Policy*, 21:7, 939-957, DOI: 10.1080/14693062.2021.1948384
- Kleemann, J., Zamora, C., Villacis, A., Cuenca, P., Koo, H., Noh, J., Fürst, C., & Thiel, M. (2022). Deforestation in Continental Ecuador with a Focus on Protected Areas. *Land*, 11(2), 268. [papers3://publication/uuid/FB750DBC-0865-4EE5-BD7E-EDCFB1FE35EF](https://doi.org/10.3390/land11020268)
- Knoke, T., Bendix, J., Pohle, P., Hamer, U., Hildebrandt, P., Roos, K., Gerique, A., Sandoval, M. L., Breuer, L., Tischer, A., Silva, B., Calvas, B., Aguirre, N., Castro, L. M., Windhorst, D., Weber, M., Stimm, B., Günter, S., Palomeque, X., ... Beck, E. (2014). Afforestation or intense pasturing improve the ecological and economic value of abandoned tropical farmlands. *Nature Communications*, 5. <https://doi.org/10.1038/ncomms6612>
- Leuschner, C., Zach, A., Moser, G., Homeier, J., Graefe, S., Hertel, D., . . . Wolf, K. (2013). The carbon balance of tropical mountain forests along an altitudinal transect, Southern Ecuador. In J. Bendix, E. Beck, A. Bräuning, F. Makeschin, R. Mosandl, S. Scheu, & W. Wilcke (Eds.), *Ecosystem services, biodiversity and environmental change in a tropical mountain ecosystem of South Ecuador. Ecological Studies* (Vol. 221, pp. 117-139). Berlin: Springer
- Linger, E., Hogan, J., Cao, M., Zhang, W., Yang, X., & Hu, Y. (2020). Precipitation influences on the net primary productivity of a tropical seasonal rainforest in Southwest China: A 9-year case study. *Forest Ecology and Management*, 467.
- López, L., Domínguez, M., Martínez, P., Zabala, J., Gómez, A., & Posada, S. (2016). Anatomía de la madera de tres especies de Mimoso (Leguminosae-Mimosoideae) distribuidas en México. *Madera Bosques*, 22(1), 191–202. <https://doi.org/10.21829/myb.2016.221486>
- López, S., (2022). Deforestation, forest degradation, and land use dynamics in the Northeastern Ecuadorian Amazon. *Applied Geography*. Volume 145:102749.



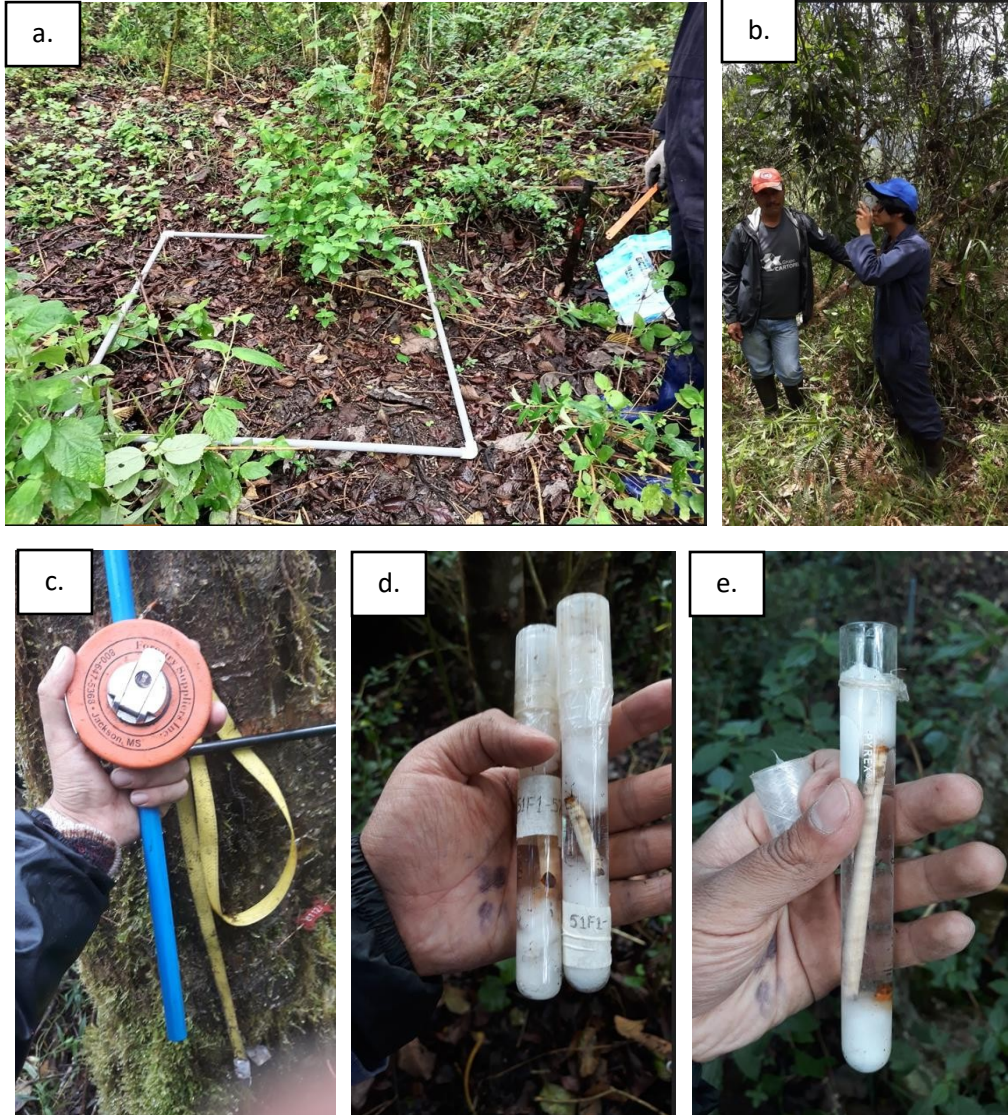
- .MAATE. (2021). *Proyecto nacional de restauración de paisaje 2022-2025*.
- MAE. (2014). Plan Nacional de Restauración Forestal. *Ministerio del Ambiente- República del Ecuador*, 5–33. <http://extwprlegs1.fao.org/docs/pdf/ecu155383anx.pdf>
- MAE. (2015). La Deforestación del Ecuador 1990-2013. Subsecretaría de Patrimonio Natural. Quito. En prensa
- MAE. (2017). Programa Nacional de Reforestación con Fines de Conservación Ambiental, Protección de Cuencas Hidrográficas y Beneficios Alternos. *Plan nacional de restauración forestal*, 12–50.
- MAE. (2019). *Plan Nacional de Restauración Forestal 2019-2030*. Programa nacional de reforestación con fines de conservación ambiental, protección de cuencas hidrográficas y beneficios alternos. <http://extwprlegs1.fao.org/docs/pdf/ecu197256.pdf>
- MAE. (2021). *Proyecto Nacional de Restauración del paisaje*. 5–105.
- Minvielle, Z., & Orozco, D. (2012). Estudio de factibilidad de un proyecto de Mecanismo de Desarrollo Limpio para captura de carbono mediante siembra de samanes en la zona Estero de Cuello Proyecto de grado previo a la obtención del título de ingeniero comercial. *Universidad católica Santiago de Guayaquil*.
- Mokany, K., Raison, R. J., & Prokushkin, A. S. (2006). Critical analysis of root: Shoot ratios in terrestrial biomes. *Global Change Biology*, 12(1), 84–96. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2005.001043.x>
- Overtoom, N., Verbeeck, H., & Bauters, M. (2022). Soils as a driver for reforestation success in the Andes. Master's Dissertation submitted to Ghent University in partial fulfilment of the requirements for the degree of International Master of Science in Soils and Global Change.

- Palomeque, X., Günter, S., Hildebrandt, P., Stimm, B., & Aguirre, N. (2020). *Reforestación con especies San Francisco , Zamora Chinchipe*.
- Puma, K. (2022). *Contenido de carbono almacenado en biomasa de árboles y en el suelo en un parche del bosque del género Polylepis en Zhuruca, provincia del Azuay*.
- Quiroz, C., Crespo, P., Stimm, B., Mosandl, R., Cueva, J., Hildebrandt, P., & Weber, M. (2021). Impacts of pine plantations on carbon stocks of páramo sites in southern Ecuador. *Carbon Balance and Management*, 16(1), 1–15. <https://doi.org/10.1186/s13021-021-00168-5>
- Rügnitz, M. T., Chacón, M. L., & Porro, R. (2008). Guía para la Determinación de Carbono en Pequeñas Propiedades Rurales. En *Consortio Iniciativa Amazónica (IA) y Centro Mundial Agroforestal (ICRAF)*.
- Salehi, M., Beni, O., Harchegani, H., Esfandiarpour, I., & Motaghian, H. (2011). Refining Soil Organic Matter Determination by Loss-on-Ignition. *Pedosphere*, 21(4), 473–482. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(11\)60149-5](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(11)60149-5)
- Saimun, R., Karim, R., Sultana, F., Arfin, M. (2021). Multiple drivers of tree and soil carbon stock in the tropical forest ecosystems of Bangladesh. *Trees, Forests and People*. Volume 5-100108. ISSN 2666-7193. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tfp.2021.100108>
- Spracklen, D., & Righelato, R. (2014). Tropical montane forests are a larger than expected global carbon store. *Biogeosciences*, 11(10), 2741–2754.
- Stimm, B., Beck, E., Günter, S., Aguirre, N., Cueva, E., Mosandl, R., & Weber, M. (2008). Reforestation of Abandoned Pastures: Seed Ecology of Native Species and Production of Indigenous Plant Material. *Gradients in a Tropical Mountain Ecosystem of Ecuador*, 198.
- USAID. (2013). Manual práctico para la toma de datos de carbono en el inventario de bosques de producción permanente - BPPs de Ucayali . *Ministerio de agricultura: Dirección general forestal t de fauna silvestre*, 11–16.

- Valencia, S., & Vargas, J. (2016). Método empírico para estimar la densidad básica en muestras pequeñas de madera. *Madera y Bosques*, 3(1), 81–87. <https://doi.org/10.21829/myb.1997.311381>
- Van Dijk, A., & Keenan, R. (2007). Planted forests and water in perspective. *Forest Ecology and Management*, 251(1–2), 1–9.
- Wasserstrom, R., & Southgate, D. (2013). Deforestation, Agrarian Reform and Oil Development in Ecuador, 1964-1994. *Natural Resources*, 04(01), 31–44. <https://doi.org/10.4236/nr.2013.410041>
- Werner, F., Homeier, J. (2015). Is tropical montane forest heterogeneity promoted by a resource-driven feedback cycle? Evidence from nutrient relations, herbivory and litter decomposition along a topographical gradient. *Functional Ecology*. Volume 29: 0269-8463. DOI: <https://doi.org/10.1111/1365-2435.12351>

## Anexos

**Anexo A.** Instrumentos utilizados para la toma de datos de la biomasa aérea, biomasa sobre el suelo y densidad de madera.





**Anexo B. Toma de muestras de suelo en los diferentes sitios reforestados.**



**Anexo C. Procesamiento de las muestras de biomasa viva y muerta sobre el suelo, para el análisis de laboratorio.**





## Anexo D. Recolección, toma y procesamiento de muestras de suelo.









a.

**Matriz de correlaciones**

|                          | T máx. (°C) | CO2 (to/ha) | T min (°C) | Precipitación media mensual (mm/mes) | DAP (cm) | Altura (m) | Densidad de dosel | # árboles por parcela | Elevación (m s.n.m.) |
|--------------------------|-------------|-------------|------------|--------------------------------------|----------|------------|-------------------|-----------------------|----------------------|
| T máx. (°C)              | 1,000       | ,131        | ,987       | -,005                                | ,091     | ,189       | ,271              | -,695                 | -,890                |
| CO2 (to/ha)              | ,131        | 1,000       | ,154       | -,164                                | ,880     | ,685       | ,214              | ,013                  | -,163                |
| T min (°C)               | .987        | ,154        | 1,000      | -,127                                | ,119     | ,214       | ,309              | -,665                 | -,937                |
| Precipitación            | -,005       | -,164       | -,127      | 1,000                                | -,144    | -,312      | -,604             | -,098                 | ,330                 |
| DAP (cm)                 | ,091        | .880        | ,119       | -,144                                | 1,000    | ,555       | ,139              | ,030                  | -,127                |
| Altura (m)               | ,189        | .685        | ,214       | -,312                                | .555     | 1,000      | ,414              | ,087                  | -,225                |
| Densidad de dosel        | ,271        | ,214        | ,309       | -,604                                | ,139     | .414       | 1,000             | ,086                  | -,285                |
| # de árboles por parcela | -,695       | ,013        | -,665      | -,098                                | ,030     | ,087       | ,086              | 1,000                 | ,610                 |
| Elevación (m s.n.m.)     | -,890       | -,163       | -,937      | ,330                                 | -,127    | -,225      | -,285             | .610                  | 1,000                |
| T máx. (°C)              |             | ,000        | ,000       | ,437                                 | ,001     | ,000       | ,000              | ,000                  | ,000                 |
| CO2 (to/ha)              |             |             | ,000       | ,000                                 | ,000     | ,000       | ,000              | ,331                  | ,000                 |
| T min (°C)               |             | ,000        |            | ,000                                 | ,000     | ,000       | ,000              | ,000                  | ,000                 |
| Precipitación            |             | ,000        | ,000       |                                      | ,000     | ,000       | ,000              | ,001                  | ,000                 |
| DAP (cm)                 |             | ,001        | ,000       | ,000                                 |          | ,000       | ,000              | ,162                  | ,000                 |
| Altura (m)               |             | ,000        | ,000       | ,000                                 | ,000     |            | ,000              | ,002                  | ,000                 |
| Densidad de dosel        |             | ,000        | ,000       | ,000                                 | ,000     | ,000       |                   | ,002                  | ,000                 |
| # de árboles por parcela |             | ,000        | ,331       | ,000                                 | ,001     | ,162       | ,002              |                       | ,000                 |

Elevación (m s.n.m.)

,000

,000

,000

,000

,000

,000

,000

,000

**Anexo G. Procesos estadísticos para el ACP, para el carbono en la biomasa aérea**

c.

**Comunalidades**

|                                | Inicial | Extracción |
|--------------------------------|---------|------------|
| T max (°C)                     | 1,000   | ,946       |
| CO2 (to/ha)                    | 1,000   | ,753       |
| T min (°C)                     | 1,000   | ,967       |
| Precipitación<br>media(mm/mes) | 1,000   | ,267       |
| DAP (cm)                       | 1,000   | ,656       |
| Altura (m)                     | 1,000   | ,712       |
| Densidad del dosel             | 1,000   | ,353       |
| # de árboles por parcela       | 1,000   | ,674       |
| Elevación (m s.n.m.)           | 1,000   | ,901       |

Método de extracción: Análisis de Componentes principales.

b.

**KMO y prueba de Bartlett**

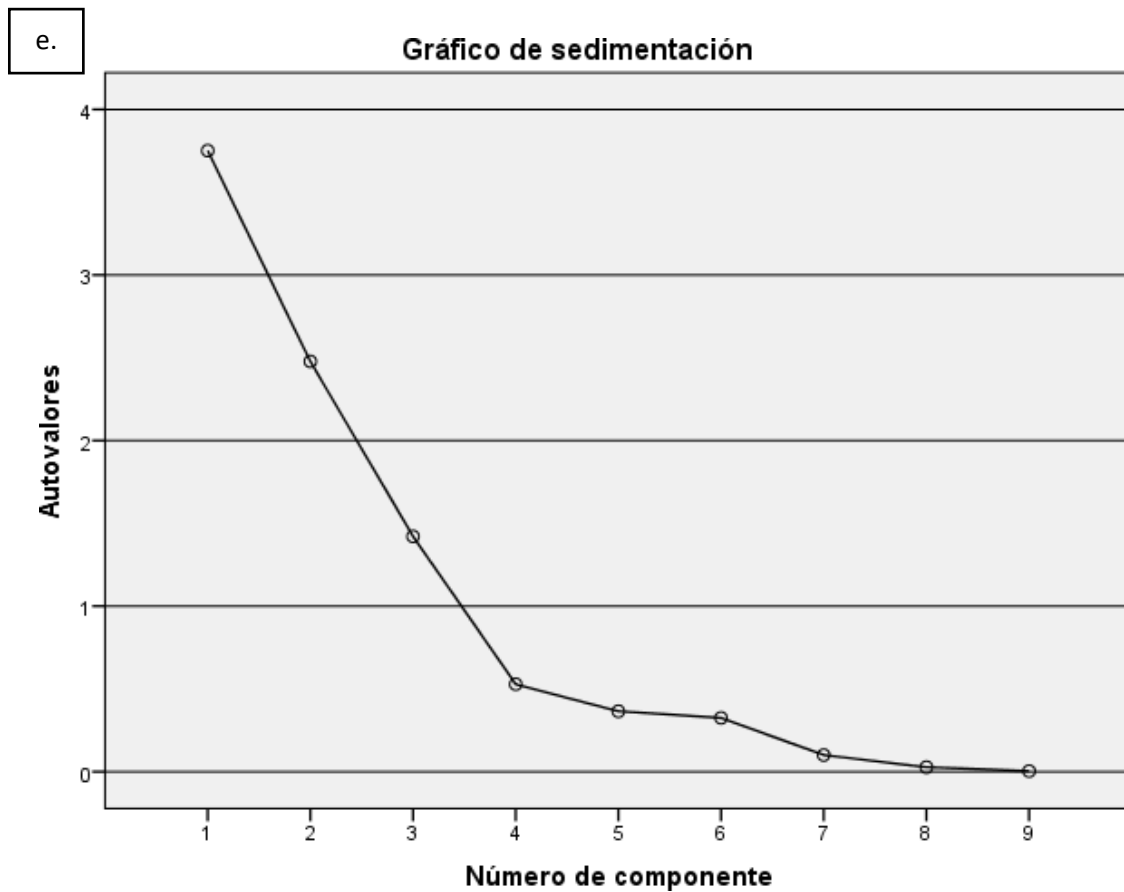
|  |           |      |
|--|-----------|------|
| Medida de adecuación muestral de Kaiser-Meyer-Olkin. |           | ,588 |
| Chi-cuadrado aproximado                              | 12340,354 |      |
| Prueba de esfericidad de Bartlett                    | gl        | 36   |
|  | Sig.      | ,000 |

d.

**Varianza total explicada**

| Componente | Autovalores iniciales |                  |             | Sumas de las saturaciones al cuadrado de la extracción |                  |             |
|------------|-----------------------|------------------|-------------|--|------------------|-------------|
|            | Total                 | % de la varianza | % acumulado | Total  | % de la varianza | % acumulado |
| 1          | 3,751                 | 41,677           | 41,677      | 3,751  | 41,677           | 41,677      |
| 2          | 2,478                 | 27,534           | 69,211      | 2,478  | 27,534           | 69,211      |
| 3          | 1,421                 | 15,791           | 85,002      |  |                  |             |
| 4          | ,528                  | 5,868            | 90,870      |  |                  |             |
| 5          | ,365                  | 4,057            | 94,927      |  |                  |             |
| 6          | ,325                  | 3,611            | 98,538      |  |                  |             |
| 7          | ,101                  | 1,118            | 99,656      |  |                  |             |
| 8          | ,027                  | ,301             | 99,957      |  |                  |             |
| 9          | ,004                  | ,043             | 100,000     |  |                  |             |

Método de extracción: Análisis de Componentes principales.



f.

**Matriz de componentes <sup>a</sup>**

|                              | Componente |       |
|------------------------------|------------|-------|
|                              | 1          | 2     |
| T max (°C)                   | ,891       | -,389 |
| CO2 (to/ha)                  | ,447       | ,744  |
| T min (°C)                   | ,922       | -,340 |
| Precipitación media (mm/mes) | -,337      | -,393 |
| DAP (cm)                     | ,387       | ,711  |
| Altura (m)                   | ,486       | ,690  |
| Densidad del dosel           | ,468       | ,365  |
| # de árboles por parcela     | -,601      | ,559  |
| Elevación (m s.n.m.)         | -,909      | ,275  |

Método de extracción: Análisis de componentes principales.

a. 2 componentes extraídos

g.

**Matriz de coeficientes para el cálculo de las puntuaciones en las componentes**

|                              | Componente |       |
|------------------------------|------------|-------|
|                              | 1          | 2     |
| T max (°C)                   | ,238       | -,157 |
| CO2 (to/ha)                  | ,119       | ,300  |
| T min (°C)                   | ,246       | -,137 |
| Precipitación media (mm/mes) | -,090      | -,158 |
| DAP (cm)                     | ,103       | ,287  |
| Altura (m)                   | ,130       | ,278  |
| Densidad del dosel           | ,125       | ,147  |
| # de árboles por parcela     | -,160      | ,226  |
| Elevación (m s.n.m.)         | -,242      | ,111  |

Método de extracción: Análisis de componentes principales.

Puntuaciones de componentes.

h.

### Autovalores

| Lambda | Valor   | Proporción | Prop Acum |
|--------|---------|------------|-----------|
| 1      | 4,47    | 0,50       | 0,50      |
| 2      | 2,42    | 0,27       | 0,76      |
| 3      | 0,74    | 0,08       | 0,85      |
| 4      | 0,68    | 0,08       | 0,85      |
| 5      | 0,36    | 0,04       | 0,96      |
| 6      | 0,25    | 0,03       | 0,99      |
| 7      | 0,06    | 0,01       | 1,00      |
| 8      | 0,02    | 1,7e-03    | 1,00      |
| 9      | 3,6e-03 | 4,0e-04    | 1,00      |

### Autovectores

| Variables             | e1    | e2    |
|-----------------------|-------|-------|
| Temperatura máxima    | 0,37  | -0,34 |
| Temperatura mínima    | 0,40  | -0,29 |
| CO2                   | 0,41  | 0,20  |
| Precipitación         | -0,21 | -0,37 |
| # árboles por parcela | -0,10 | 0,52  |
| Elevación             | -0,33 | 0,34  |
| DAP                   | 0,42  | 0,14  |
| Altura                | 0,37  | 0,25  |
| Densidad de dosel     | 0,23  | 0,39  |

## Anexo H. Procesos estadísticos para el ACP, relacionado con carbono en el suelo

Matriz de correlaciones <sup>a</sup>

| a.          |                                      | Fragmentos rocosos (cc) | Carbono suelo (to/ha) | T máx. (°C) | T min. (°C) | Precipitación media mensual (mm/mes) | Elevación (m s.n.m.) |
|-------------|--------------------------------------|-------------------------|-----------------------|-------------|-------------|--------------------------------------|----------------------|
| Correlación | Fragmentos rocosos (cc)              | 1,000                   | -,313                 | ,473        | ,514        | -,209                                | -,484                |
|             | Carbono suelo (to/ha)                | -,313                   | 1,000                 | -,378       | -,437       | ,222                                 | ,333                 |
|             | T máx. (°C)                          | ,473                    | -,378                 | 1,000       | ,981        | ,229                                 | -,964                |
|             | T min. (°C)                          | ,514                    | -,437                 | ,981        | 1,000       | ,051                                 | -,941                |
|             | Precipitación media mensual (mm/mes) | -,209                   | ,222                  | ,229        | ,051        | 1,000                                | -,258                |
|             | Elevación (m s.n.m.)                 | -,484                   | ,333                  | -,964       | -,941       | -,258                                | 1,000                |

a. Determinante = ,000

| b.                                   | Comunalidades |            |
|--------------------------------------|---------------|------------|
|                                      | Inicial       | Extracción |
| Fragmentos rocosos (cc)              | 1,000         | ,565       |
| Carbono suelo (to/ha)                | 1,000         | ,530       |
| T max (°C)                           | 1,000         | ,974       |
| T min (°C)                           | 1,000         | ,947       |
| Precipitación media mensual (mm/mes) | 1,000         | ,830       |
| Elevación (m s.n.m.)                 | 1,000         | ,958       |

| c.   |      | KMO y prueba de Bartlett |
|--|------|--------------------------|
| Medida de adecuación muestral de Kaiser-Meyer-Olkin. |      | ,603                     |
| Chi-cuadrado aproximado                              |      | 656,388                  |
| Prueba de esfericidad de Bartlett                    | gl   | 15                       |
|  | Sig. | ,000                     |

Método de extracción: Análisis de Componentes principales.



**d. Matriz de componentes <sup>a</sup>**

|                                      | Componente |       |
|--------------------------------------|------------|-------|
|                                      | 1          | 2     |
| Fragmentos rocosos (cc)              | ,631       | -,409 |
| Carbono suelo (to/ha)                | -,519      | ,511  |
| T max (°C)                           | ,968       | ,190  |
| T min (°C)                           | ,973       | ,028  |
| Precipitación media mensual (mm/mes) | ,109       | ,904  |
| Elevación (m s.n.m.)                 | -,953      | -,224 |

Método de extracción: Análisis de componentes principales.

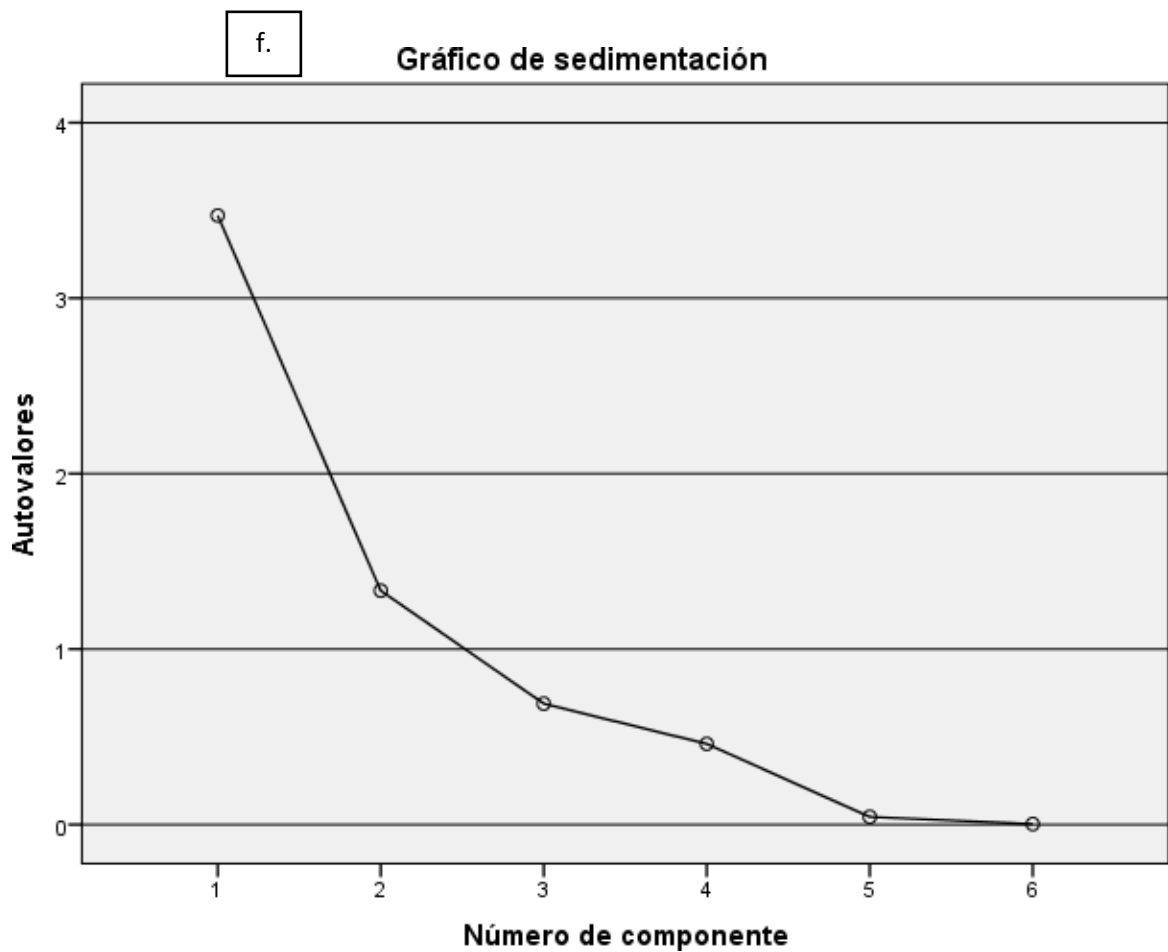
a. 2 componentes extraídos

**e. Matriz de coeficientes para el cálculo de las puntuaciones en las componentes**

|                                      | Componente |       |
|--------------------------------------|------------|-------|
|                                      | 1          | 2     |
| Fragmentos rocosos (cc)              | ,182       | -,307 |
| Carbono suelo (to/ha)                | -,150      | ,383  |
| T max (°C)                           | ,279       | ,143  |
| T min (°C)                           | ,280       | ,021  |
| Precipitación media mensual (mm/mes) | ,032       | ,678  |
| Elevación (m s.n.m.)                 | -,275      | -,168 |

Método de extracción: Análisis de componentes principales.

Puntuaciones de componentes.



g.

### Autovalores

| Lambda | Valor   | Proporción | Prop Acum |
|--------|---------|------------|-----------|
| 1      | 3,82    | 0,64       | 0,64      |
| 2      | 1,43    | 0,24       | 0,88      |
| 3      | 0,43    | 0,07       | 0,95      |
| 4      | 0,27    | 0,05       | 0,99      |
| 5      | 0,04    | 0,01       | 1,00      |
| 6      | 2,4e-03 | 4,0e-04    | 1,00      |

### Autovectores

| Variables                   | e1    | e2    |
|-----------------------------|-------|-------|
| Carbono en el suelo         | -0,39 | 0,40  |
| Temperatura máxima          | 0,49  | 0,22  |
| Temperatura mínima          | 0,50  | 0,08  |
| Precipitación media mensual | 0,01  | 0,78  |
| Elevación                   | -0,47 | -0,25 |
| Fragmentos rocosos          | 0,37  | -0,34 |