

Universidad Andina Simón Bolívar

Sede Ecuador

Área de Ambiente y Sustentabilidad

Maestría de Investigación en Cambio Climático, Sustentabilidad y Desarrollo

Dinámica del carbono en los Altos Andes ecuatoriales después de 26 años de regeneración natural

Priscila Marcela Carpio Cordero

Tutor: Francisco Xavier Cuesta Camacho

Quito, 2023

Trabajo almacenado en el Repositorio Institucional UASB-DIGITAL con licencia Creative Commons 4.0 Internacional

	Reconocimiento de créditos de la obra No comercial Sin obras derivadas	
---	--	---

Para usar esta obra, deben respetarse los términos de esta licencia

Cláusula de cesión de derecho de publicación

Yo, Priscila Marcela Carpio Cordero autora del trabajo intitulado “Dinámica del carbono en los Altos Andes ecuatoriales después de 26 años de regeneración natural”, mediante el presente documento dejo constancia de que la obra es de mi exclusiva autoría y producción, que la he elaborado para cumplir con uno de los requisitos previos para la obtención del título de Magíster en Cambio climático, sustentabilidad y desarrollo en la Universidad Andina Simón Bolívar, Sede Ecuador.

1. Cedo a la Universidad Andina Simón Bolívar, Sede Ecuador, los derechos exclusivos de reproducción, comunicación pública, distribución y divulgación, durante 36 meses a partir de mi graduación, pudiendo por lo tanto la Universidad, utilizar y usar esta obra por cualquier medio conocido o por conocer, siempre y cuando no se lo haga para obtener beneficio económico. Esta autorización incluye la reproducción total o parcial en los formatos virtual, electrónico, digital, óptico, como usos en red local y en internet.
2. Declaro que en caso de presentarse cualquier reclamación de parte de terceros respecto de los derechos de autor/a de la obra antes referida, yo asumiré toda responsabilidad frente a terceros y a la Universidad.
3. En esta fecha entrego a la Secretaría General, el ejemplar respectivo y sus anexos en formato impreso y digital o electrónico.

14 de abril de 2023

Firma: _____

Resumen

Las dinámicas del carbono (C) en ecosistemas en proceso de recuperación natural de los Andes del norte son poco documentados. Este estudio se centra en la reserva privada Yanacocha localizada en la cordillera occidental de los Andes ecuatorianos, conformada por páramo y bosque altoandino. Previo a la creación de la Reserva (1995) sus ecosistemas fueron sometidos a largos períodos de usos extensivos, específicamente pastoreo, quema y extracción de leña. En el 2012, se estableció un sistema de monitoreo de la dinámica del C como indicador de recuperación de los ecosistemas. Esta tesis hace uso de los censos previos (2012, 2014, 2018) realizados en 39 parcelas permanentes establecidas en un gradiente altitudinal desde el bosque al superpáramo y un censo realizado en el 2021 como parte de esta investigación. El objetivo central fue evaluar la recuperación de los ecosistemas de la Reserva Yanacocha, mediante el análisis de los cambios temporales en la estructura de la vegetación así como la cuantificación de los reservorios y dinámica del C en nueve años de monitoreo continuo. Yanacocha se encuentra actuando como un sumidero de carbono (biomasa aérea = $18,37 \pm 17,17 \text{ Mg C ha}^{-1}$ y $0,75 \pm 0,54 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$; carbono orgánico del suelo = $209,29 \pm 49,37 \text{ Mg C ha}^{-1}$), el cual se encuentra en proceso de recuperación. En el bosque encontramos un aumento en sus reservorios de C debido principalmente al incremento del área basal de los árboles con clases diamétricas superiores y al crecimiento en altura y diámetro en las parcelas estudiadas. La demografía (las tasas de mortalidad y crecimiento) nos muestra el paso de un bosque en raleo competitivo a uno maduro. Por otro lado, los incrementos en los reservorios de C en la biomasa aérea del páramo fueron el resultado de la variación en la cobertura del suelo y formas de crecimiento (una mayor presencia de arbustos y una disminución de cojines y rosetas). El cambio de la estructura de la vegetación en el gradiente de elevación (3,900–4,350 m snm) fue el principal indicador de la recuperación del páramo. Encontramos cambios significativos entre la cobertura del periodo 2012 con la del 2021 y una importante relación de los reservorios de C con la elevación. No encontramos una relación del carbono orgánico del suelo con el gradiente de elevación; sin embargo, encontramos un mayor reservorio de C en el suelo del páramo que del bosque. Los reservorios de C y su productividad fueron explicados principalmente por la elevación, el tipo de ecosistema, la diversidad de las comunidades estudiadas a través del índice de Shannon y los nutrientes del suelo.

Palabras clave: bosque andino, páramo, reservorio de carbono, recuperación de ecosistemas, biomasa aérea, carbono orgánico del suelo, cambio climático.

A mi madre y a mi hijo, Sebas, el dador de vida a mis días.

Agradecimientos

A Sebas por su apoyo incondicional y sus palabras de aliento y cariño cuando más he necesitado, aun cuando realizar este trabajo significó estar lejos de él. A mi madre por sostenerme a cada instante con sus sabias palabras y su infinito amor. A Camilo, Andrea, Pablo y Miguel, quienes me acogieron en sus hogares desinteresadamente como si fuera miembro de su familia. A Esteban por guiarme en el trabajo de campo y traernos incontables risas en medio del frío de la montaña. A Blanca por sus clases de estadística. A Belén por su tiempo tan valioso. A Emilia por haber sido un apoyo, tanto en el laboratorio como emocionalmente. A la fundación Jocotoco por permitir realizar este trabajo en su reserva. A la UDLA por financiar esta investigación a través del proyecto FGE.FCC.20.01 y permitirme utilizar sus instalaciones. A Francisco, mi tutor, por su apoyo y por haber confiado en mí para revivir este proyecto.

Tabla de contenidos

Figuras y Tablas.....	13
Introducción.....	15
Capítulo primero Materiales y Métodos.....	19
1. Descripción del área de estudio y definición del sitio de muestreo.....	19
1.1. Descripción del área de estudio: Reserva Yanacocha	19
1.2. Definición del sitio de muestreo	20
2. Muestreos y laboratorio.....	22
2.1. Obtención de datos en campo y recolección de muestras	22
2.1.1. Metodología utilizada para la recolección de muestras en Páramo.....	22
2.1.2. Metodología utilizada para la recolección de muestras y censo en el Bosque de Polylepis	23
2.2. Procesamiento de muestras en laboratorio	24
2.2.1. Procesamiento de muestras de Biomasa.....	24
2.2.2. Procesamiento de muestras de Suelos	24
3. Análisis de datos.....	25
3.1. Corrección de alturas de los árboles	26
3.2. Estructura y composición de las parcelas de bosque	26
3.3. Estructura y composición de las parcelas de páramo	28
3.4. Reservorios de Carbono.....	28
3.5. Efectos de las variables bióticas y abióticas en las tasas de productividad de la biomasa aérea y el carbono orgánico del suelo en Yanacocha.....	30
Capítulo segundo Resultados.....	33
1. Estructura de las parcelas permanentes de Yanacocha.....	33
1.1. Estructura y composición de las parcelas de bosque	33
1.1.1. Dinámicas de la biomasa aérea del bosque	35
1.2. Estructura y composición de las parcelas de páramo	35
2. Reservorios de carbono en Yanacocha.....	36
2.1. Biomasa aérea del bosque.....	36
2.2. Biomasa aérea del páramo.....	37
2.3. Carbono orgánico del suelo en el bosque	38

2.4. Carbono orgánico del suelo en el páramo	39
2.5. Productividad de Yanacocha y su relación con variables biofísicas	40
Capítulo tercero Discusión	43
Conclusiones y recomendaciones	51
Obras citadas.....	53
Anexos	59
Anexo 1: Corrección de los datos de altura de los árboles de las parcelas permanentes de Yanacocha	59
Anexo 2: Análisis de componentes principales	61
Anexo 3: Análisis de coordenadas principales.....	62
Anexo 4: Modelos lineales generalizados	63
Anexo 5: Valores medios por parcela de los contenidos de carbono (Mg C ha ⁻¹) y productividad en la biomasa aérea del páramo y los bosques de las 39 parcelas permanentes de la Reserva Yanacocha.....	65
Anexo 6: Valores medios por parcela de los contenidos de carbono (Mg C ha ⁻¹) y nutrientes almacenado en el suelo del páramo y los bosques de las 39 parcelas permanentes de Yanacocha	66
Anexo 7: Relación de la elevación con la productividad de la biomasa aérea de las 39 parcelas permanentes de Yanacocha.	68
Anexo 8: Detalles del bosque de Yanacocha.....	69

Figuras y Tablas

Figura 1: a) Mapa de ubicación de la provincia de pichincha en Ecuador. b) Mapa de ubicación de la parroquia de Nono dentro de Quito. C) Mapa de ubicación general del área de estudio.	19
Figura 2: Distribución de las parcelas en bosque y páramo. Mapa base: Google Earth. Fuente y elaboración propias.	21
Figura 3: Detalle de la recopilación de información y censos realizados y sus reservorios en las 39 parcelas permanentes de la reserva Yanacocha periodo 2012-2021 y rango de elevación de las parcelas por ecosistema. Fuente y elaboración propias.	21
Figura 4: Posiciones de muestreo de biomasa, necromasa y carbono orgánico del suelo, para la parcela 01 de páramo, para tres años diferentes. Fuente y elaboración: Elaboración propia, adaptado a partir de Calderón et al. 2014.	23
Figura 5: Gráficos de caja con sus medianas, indican el contenido de carbono en la biomasa aérea. Las letras en cada una de ellas muestran los censos que tienen o no diferencias significativas entre los censos realizados en el bosque de Polylepis. Realizado con datos de árboles con DAP >5. Fuente y elaboración propias.	37
Figura 6: Gráficos de caja con sus medianas, indican el contenido de carbono en la biomasa aérea. Las letras en cada una de ellas muestran los censos que tienen o no diferencias significativas entre los censos realizados el páramo y superpáramo de Yanacocha. Fuente y elaboración propias.	38
Figura 7: Gráficos de caja con sus medianas, indican el contenido de carbono orgánico del suelo diferenciado por perfiles y años. Las letras indican la existencia de diferencias significativas entre los perfiles del suelo en el bosque de Yanacocha. Fuente y elaboración propias.	39
Figura 8: Gráficos de caja con sus medianas, indican el contenido de carbono orgánico del suelo diferenciado por perfiles y años. Las letras indican la existencia de diferencias significativas entre los perfiles de suelo del páramo y superpáramo de Yanacocha. Fuente y elaboración propias.	39
Figura 9: Variación de las reservas de carbono de la biomasa aérea (a) y su productividad (b) para los diferentes censos en relación a la elevación del páramo y superpáramo. Fuente y elaboración propias.	41

Tabla 1: Clases diamétricas establecidas para los análisis de los datos del bosque de Polylepis de Yanacocha.....	27
Tabla 2: Estructura de individuos del bosque de Polylepis de la Reserva Yanacocha (10 parcelas) por clase diamétrica para los años 2012, 2014, 2018 y 2021. Se muestra la media del DAP y la altura con su desviación estándar en paréntesis (DE).....	34
Tabla 3: Tasas demográficas de las parcelas de bosque de la reserva Yanacocha para el período 2014-2021.....	35
Tabla 4: Media (± 1 DE) del porcentaje de cobertura por formas de crecimiento de las 29 parcelas de Páramo y Superparamo de la reserva Yanacocha.....	36
Tabla 5: Parámetros obtenidos en los modelos para la biomasa y carbono orgánico del suelo.....	40

Introducción

De acuerdo al resumen para responsables de políticas del IPCC (2018, 6), la temperatura en la Tierra ha aumentado aproximadamente 1°C en referencia a períodos preindustriales (1850). Estos incrementos se correlacionan con la concentración de dióxido de carbono (CO₂) procedente principalmente de emisiones antropógenas, tanto de la quema de combustibles fósiles como a las procedentes del cambio de uso del suelo. Al 2019, la concentración de CO₂eq¹ pasó de 278 ppm en el año de 1750 a 410 ppm (IPCC 2021, 4).

Los riesgos asociados a estos aumentos de temperatura no suceden de manera homogénea en el planeta y dependen de diversos factores como, por ejemplo, la ubicación geográfica, los niveles de desarrollo y vulnerabilidad, las medidas de adaptación y mitigación² utilizadas, entre otros. Al momento, debido al calentamiento global, ya existen cambios en los ecosistemas oceánicos y terrestres, los cuales se encuentran reflejados en los servicios que estos proveen. (IPCC 2018, 7).

Existen estudios que hablan sobre los efectos que han sido observados en los Andes y ecosistemas de montaña debido al cambio climático. Por ejemplo, Tovar et al. (2022) hace un análisis de información de varios autores en donde se demuestra que existe un desplazamiento de la vegetación hacia el límite superior o la alteración de las comunidades vegetales debido a un cambio en la composición de las especies vegetales y también procesos de termofilización de los bosques andinos (Tovar et al. 2022, 1425). Adler et al. (2022, 2277–79) menciona que en la última década han existido cambios en la distribución de especies, en donde plantas de elevaciones medias se han desplazado a elevaciones altas. De acuerdo a Vuille et al. (2018, 1–12) existe una fuerte relación entre los incrementos de temperatura y la altura, siendo más probable un mayor calentamiento a elevaciones más altas. Además, menciona que en los Andes tropicales el cambio de temperatura afectará directamente a la disponibilidad de agua, así como en el retroceso de los glaciares y la degradación de los páramos.

El IPCC manifiesta que para evitar un mayor calentamiento, es necesario “mantener las emisiones antropógenas globales netas negativas de CO₂ o reducir aún más

¹ Co₂-eq= Concentración de Co₂ equivalente

² De acuerdo al informe del IPCC (2014, 140) “la mitigación es una intervención humana encaminada a reducir las fuentes o potenciar los sumideros de gases de efecto invernadero”

el forzamiento radiativo distinto del CO₂” (IPCC 2018, 7) y una manera de lograrlo es mediante los sumideros de carbono³. Por esto, debido a la necesidad de mitigar el cambio climático mediante una reducción sostenida de las emisiones de CO₂ hacia la atmósfera, se hace indispensable un estudio del rol de los ecosistemas terrestres en la absorción y secuestro de carbono en su biomasa aérea y suelo (principales sumideros de carbono).

Pan et al. (2011, 992) reporta que el 70% de los sumideros de carbono forestal bruto en el planeta, corresponden a bosques tropicales y subtropicales de tierras bajas. Sin embargo, estudios recientes (Duque et al. (2021, 1); Hribljan et al. (2016, 7)) indican que ecosistemas de montaña como los bosques montanos y los páramos actúan como importantes sumideros de carbono (77,17 y 1282 Mg C ha⁻¹ respectivamente) y que requieren investigaciones adicionales para incrementar el conocimiento sobre su rol en el almacenamiento y dinámicas del carbono.

Estos ecosistemas de montaña son importantes debido a los servicios que prestan, entre los que se encuentran la provisión de agua para diversos usos, refugios de biodiversidad y almacenamiento de carbono (Vuille et al. 2018, 10; Myers et al. 2000, 854; Adler et al. 2022, 2279), entre otros. Han sufrido largos procesos de degradación debido a los efectos de uso del suelo, entre los que se encuentra el pastoreo, quemas anuales asociadas a la agricultura, extracción de madera, etc. afectando a los servicios ambientales antes mencionados (Hribljan et al. 2016, 2; Buytaert et al. 2006, 54; Román-Cuesta et al. 2011, 1987; Cuesta Camacho 2019, 21).

La influencia de estas perturbaciones, tiene el potencial de afectar la dinámica de la vegetación, su estructura y composición, además de cambiar la estructura del suelo y aumentar su erosión, causando una reducción en las existencias de carbono (Buytaert et al. 2006, 68; Buytaert, Cuesta, y Tobon 2011, 1; Román-Cuesta et al. 2011, 1987). Estas transformaciones en bosques y paramos de los altos Andes resultan, entre otros, en pérdidas de la biodiversidad y en la disminución de los reservorios y la captura de carbono, pudiendo traer como consecuencia, que sumideros de carbono pasen a ser fuentes de emisiones de CO₂, afectando al ciclo de carbono y teniendo una

³ De acuerdo al informe del IPCC (2014, 147) Un sumidero es “todo proceso, actividad o mecanismo que remueve de la atmósfera un gas de efecto invernadero (GEI), un aerosol, o un precursor de cualquiera de ellos”

retroalimentación climática positiva⁴ incierta ante el cambio climático (Urrutia y Vuille 2009, 13; Cuesta Camacho 2019).

De acuerdo al sumario técnico del sexto informe de evaluación del IPCC (2022, 6–86), se estima que los gases de efecto invernadero (GEI) liberados debido a cambios de uso de suelo y silvicultura a la atmósfera desde 1990 hasta el 2019, se incrementaron en un 133%, emitiendo $6,6 \pm 4,6$ GtCO₂ eq en el 2019, sin embargo, sitúa a la protección y restauración de bosques, turberas, sabanas y pastizales como parte de las medidas más efectivas en la reducción de GEI, absorbiendo en su sumidero una media de 7,3 GtCO₂ eq año⁻¹.

Por lo mencionado en los párrafos anteriores sobre la importancia de la protección, regeneración/recuperación de estos ecosistemas andinos, este estudio se centra en la reserva Yanacocha localizada en un ecosistema andino tropical conformada por páramo y bosque altoandino (la cual ha atravesado largos períodos de disturbio) con la finalidad de determinar su potencial como sumidero de carbono después de un periodo de 26 años de regeneración natural y diez años de monitoreo, permitiendo responder a las siguientes preguntas e hipótesis:

1.- ¿Existen cambios en la composición y estructura de la vegetación entre el 2012 y el 2021? De existir, ¿estos cambios en la vegetación, se traducen en una mayor captura de carbono por unidad de área en los diferentes reservorios del bosque y del páramo? Esperamos un incremento promedio de los rangos diamétrico y el área basal del bosque de *Polylepis* y un cambio en la composición de las formas de vida en el páramo, con dominancia de macollas y arbustos (H1).

2.- ¿Cómo varían los contenidos y las tasas de productividad de la biomasa aérea (BA) a lo largo del gradiente de elevación en Yanacocha? La productividad de la BA disminuye con la elevación debido a cambios en la dominancia de formas de crecimiento (H2).

3.- ¿Cómo varían los contenidos de carbono del suelo a lo largo del gradiente de elevación en Yanacocha? La productividad del suelo varía de acuerdo con la cobertura vegetal (H3).

⁴De acuerdo al informe del IPCC (2014, 146) retroalimentación climática es la “interacción en la que una perturbación en una magnitud climática causa un cambio en una segunda magnitud, y el cambio en esta conduce en última instancia a un cambio añadido en la primera magnitud. Se experimenta una retroalimentación negativa cuando la perturbación inicial se debilita por los cambios que esta provoca; y se experimenta una positiva, cuando se amplifica por los cambios que provoca”

Esta investigación aporta al entendimiento de los procesos de regeneración natural de un ecosistema altoandino, al demostrar cómo a través del tiempo existió una recuperación natural.

La estructura de este trabajo de investigación se encuentra ordenado de la siguiente manera: El primer capítulo abarca la metodología utilizada en todas las fases de la investigación, es decir en la fase de campo y recolección de datos y en el procesamiento de las muestras y datos, seguido por un segundo capítulo que trata sobre los hallazgos encontrados y un último capítulo que habla sobre la discusión del trabajo de investigación. Finalmente se presenta un acápite de las conclusiones.

Capítulo primero

Materiales y Métodos

1. Descripción del área de estudio y definición del sitio de muestreo.

1.1. Descripción del área de estudio: Reserva Yanacocha

Propiedad de la Fundación de Conservación Jocotoco, el predio de la Reserva Yanacocha fue adquirido en el año 1995 con el fin de proteger al zamarrillo pechinegro (*Eriocnemis nigrivestis*) que se encuentra en peligro crítico debido a la destrucción de su hábitat. Antes de su creación como reserva, Yanacocha sufrió perturbaciones debido a actividades humanas, principalmente por pastoreo extensivo de ganado, además de quemas anuales y extracción de madera. Actividades que cesaron con la creación de la reserva, la cual actualmente se encuentra en un proceso de recuperación natural de sus ecosistemas (Granizo et al. 2002, 90–91; Fundación Jocotoco s. f.; Calderón et al. 2020, 4), observándose en general, un buen estado de conservación.

La reserva Yanacocha se encuentra ubicada en la ladera este del complejo volcánico Pichincha, en la parroquia rural de Nono, provincia de Pichincha (Figura 1c). Tiene una extensión de 1200 hectáreas conformadas por ecosistemas de páramo y bosque altoandino dominado por *Polylepis pauta*, en un rango altitudinal que va desde los 3200 a los 4400 m snm (Calderón et al. 2020, 3).

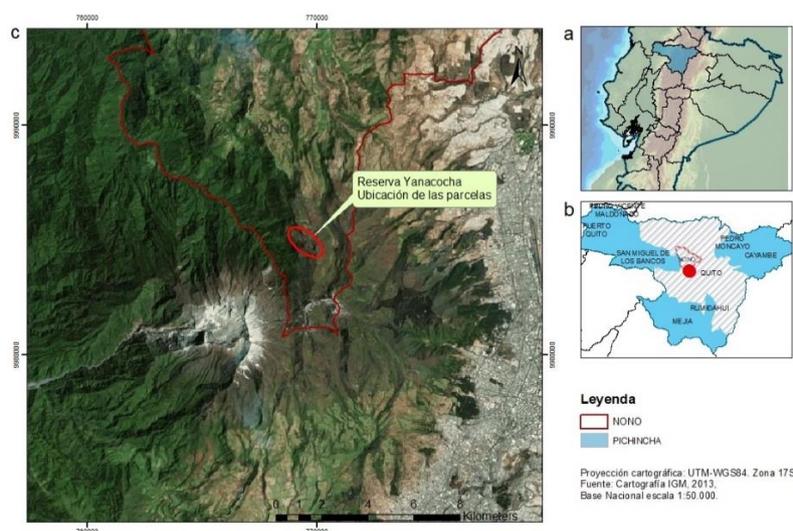


Figura 1: a) Mapa de ubicación de la provincia de pichincha en Ecuador. b) Mapa de ubicación de la parroquia de Nono dentro de Quito. C) Mapa de ubicación general del área de estudio. Fuente y elaboración propias.

El clima de la reserva Yanacocha está influenciado por masas de aire húmedas provenientes de la región pacífica del Chocó (Santander et al. 2015,12). La temperatura varía de acuerdo a la época del año siendo más frío en meses de lluvia (entre enero y mayo y octubre y diciembre con una media anual de 1500 mm año⁻¹) con una media entre 6 y 6,5 °C y entre 6,5 y 7,5 °C en la estación seca (entre junio y septiembre con un promedio anual menor a 250 mm año⁻¹), sin embargo la temperatura diaria puede ser muy cambiante, pudiendo variar de entre 0 a 23 °C durante el día (Calderón et al. 2020, 5; Duchicela et al. 2021, 3,7).

El paisaje se caracteriza por tener grandes relieves producto de procesos eruptivos y erosivos a lo largo de periodos de glaciación y volcanismo, teniendo laderas con pendientes entre media y muy fuertes, pudiendo superar los 45° de inclinación (Santander et al. 2015, 14).

En Yanacocha la composición de la vegetación cambia progresivamente con la elevación, pasando de bosque (3200-3900 m snm) a páramo herbáceo dominado principalmente por hierbas en penacho y arbustos (3900-4100 m snm) hasta la parte más alta de la reserva (4100-4400 m snm), en donde se observa un suelo con abundantes rocas y arena y en que las formas dominantes de crecimiento cambian, reduciendo la cantidad de penacho y aumentando gramíneas y hierbas postradas.

Sus suelos andosoles, están constituidos por capas intercaladas bien definidas de materia orgánica y ceniza volcánica y una capa superficial de suelo que está entre 15 a 18 cm de profundidad con más de 7% de materia orgánica (Calderón et al. 2020, 3).

1.2. Definición del sitio de muestreo

Con el fin de estudiar la regeneración de los ecosistemas de Yanacocha y su capacidad de remover y almacenar carbono (al momento por un período de 26 años, 1995-2021), en el año 2012 se iniciaron estudios sobre sus dinámicas de carbono, mediante un sistema de 39 parcelas permanentes de 10 m x 10 m cada una, emplazadas en un área de 50 hectáreas dentro de la reserva (Figura 2). Diez parcelas fueron instaladas en bosque, 16 en páramo y 13 en ecosistema de superpáramo, teniendo un gradiente de elevación desde los 3600 m snm a los 4350 m snm (Figura 3) (Calderón et al. 2020, 3).

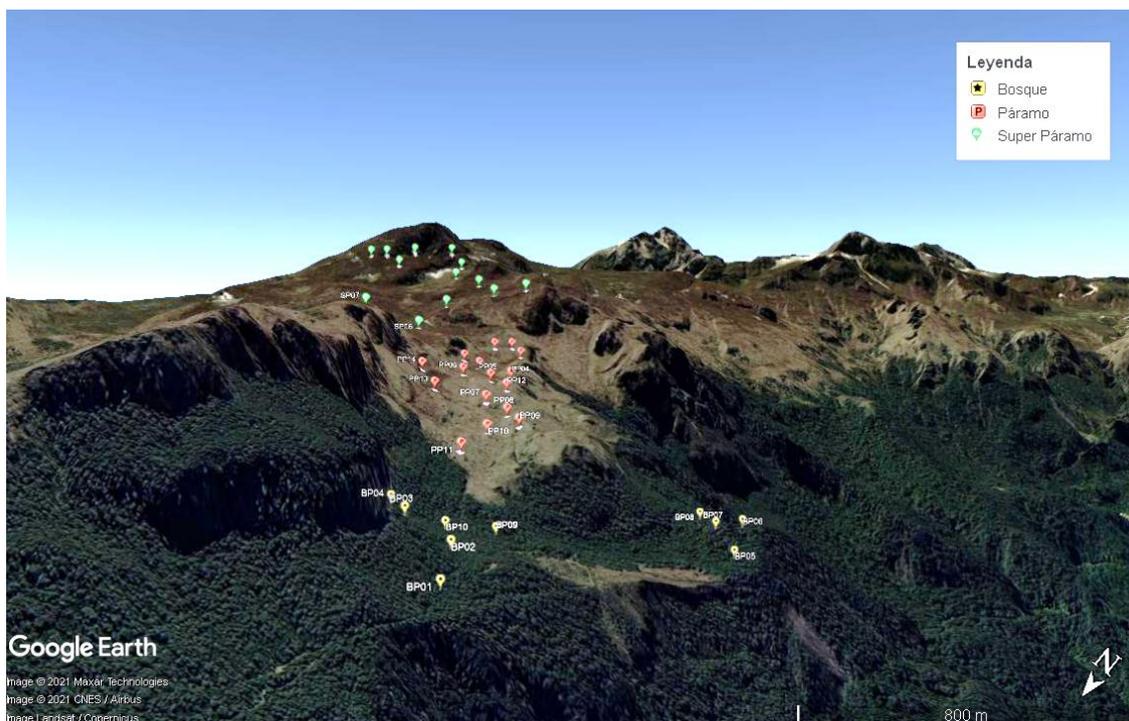


Figura 2: Distribución de las parcelas en bosque y páramo. Mapa base: Google Earth. Fuente y elaboración propias.

Al momento de la elaboración de esta tesis, se contaba con datos de tres censos de bosque (2012, 2014 y 2018) y dos censos de páramos (2012 y 2014) para la determinación de la biomasa aérea (BA) y un muestreo de suelos para la determinación del COS (2012). Entre julio y agosto del año 2021 se realizó el cuarto censo del bosque de *Polylepis*, el tercer censo de las parcelas de páramo y el segundo para COS (Figura 3).

Censos realizados

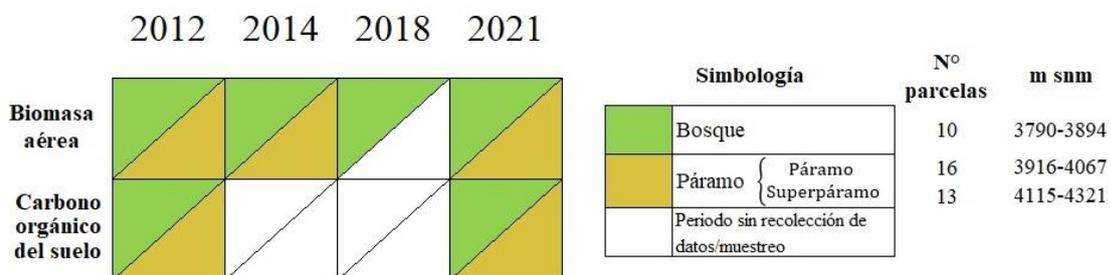


Figura 3: Detalle de la recopilación de información y censos realizados y sus reservorios en las 39 parcelas permanentes de la reserva Yanacocha periodo 2012-2021 y rango de elevación de las parcelas por ecosistema. Fuente y elaboración propias.

2. Muestreos y laboratorio.

Para la obtención de datos tanto en campo como en laboratorio, se utilizó el protocolo de monitoreo establecido en el documento “Monitoreo de contenidos y flujos de carbono en gradientes altitudinales altoandinos” de Calderón et al. 2014.

2.1. Obtención de datos en campo y recolección de muestras

Para la recolección de las muestras y datos, se planificaron salidas de campo al sitio de estudio en los meses de julio y agosto, con el fin de que coincidan con los meses de verano en donde existe una menor precipitación (Duchicela et al. 2021, 3), realizando un total de 5 visitas (de 3 a 4 días cada una) a la reserva Yanacocha en donde se procedió con la recolección de muestras para análisis de almacenamiento de carbono y productividad en páramo y en el bosque de *Polylepis*.

2.1.1. Metodología utilizada para la recolección de muestras en Páramo

Para la determinación de la BA y COS en el páramo, se realizaron los procedimientos para recolección de muestras en tipo reloj⁵ en cada una de las parcelas, de acuerdo al diseño definido en Calderón et al. 2014 (15) y al primer censo realizado.

Para seleccionar las nuevas zonas de recolección de muestras dentro de las parcelas, se utilizaron los datos de las subparcelas censadas en años anteriores sumadas 2 horas, con el fin de tener espacios que no hayan sido muestreados. En la figura 4 se presenta un ejemplo de las subparcelas censadas durante tres periodos diferentes, en donde PP01 hace referencia al código de la parcela, H a la hora y las letras I o E a si la subparcela se encuentra en el círculo interno o externo.

⁵ Este procedimiento se encuentra establecido en uno de los documentos de la serie de protocolos metodológicos del proyecto CIMA-CONDESAN (Generación de conocimiento y fortalecimiento de capacidades como respuesta de adaptación a los cambios ambientales en los Andes, ejecutado entre 2011 y 2014). Este protocolo de monitoreo trata específicamente el cómo estimar y monitorear contenidos y flujos de carbono en los ecosistemas altoandinos en gradientes ambientales.

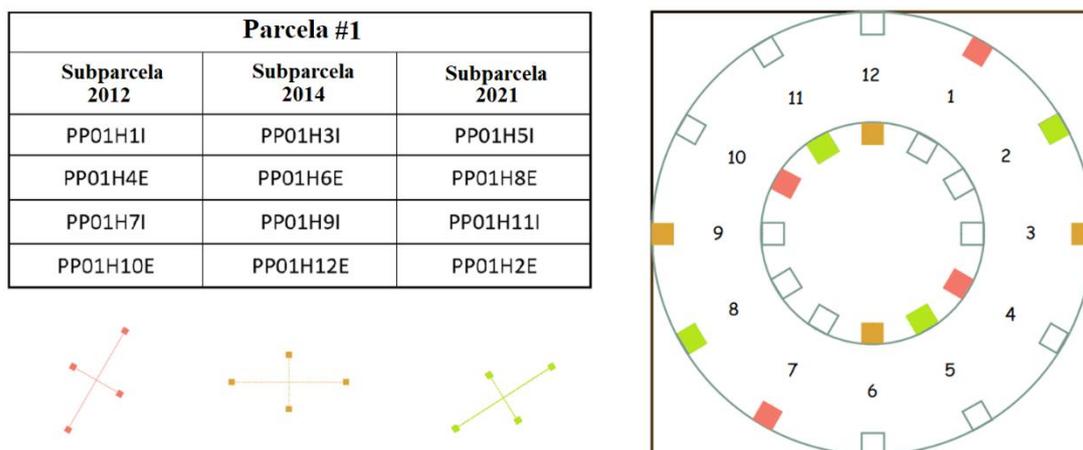


Figura 4: Posiciones de muestreo de biomasa, necromasa y carbono orgánico del suelo, para la parcela 01 de páramo, para tres años diferentes. Fuente y elaboración: Elaboración propia, adaptado a partir de Calderón et al. 2014.

Definidas las zonas de submuestreo de 0,5 x 0,5 metros se estimó el porcentaje de la cobertura vegetal, disgregada en formas de crecimiento (Ramsay y Oxley 1997) presentes en cada subparcela, de acuerdo a las categorías utilizadas en Calderón et al. 2020,7. Posterior a la determinación de la cobertura se procedió con la recolección de la vegetación presente en los sub cuadrantes de acuerdo a lo establecido en el protocolo de Calderón et al. 2014⁶. Cada muestra fue almacenada en fundas herméticas codificadas⁷.

Las muestras de suelo fueron recolectadas mediante un barreno de 16,5 cm de largo y 6,5 cm de diámetro en las subparcelas en donde previamente se recolectó la BA. Se tomaron dos muestras por subparcela, de 0 a 16,5 cm (P1) y de 16,5 a 33 cm (P2) de profundidad, obteniendo un total de 4 repeticiones por parcela y por perfil de suelo. Cada muestra fue almacenada herméticamente⁵.

2.1.2. Metodología utilizada para la recolección de muestras y censo en el Bosque de Polylepis

Con la finalidad de estimar la BA del bosque, se realizó un re-censo de los árboles en donde se midieron sus variables dasométricas (altura, diámetro a la altura del pecho con un DAP $\geq 2,5$ cm), tomando en cuenta las características particulares de los árboles,

⁶ Para mayor información remitirse a: https://www.researchgate.net/publication/264549031_Monitoreo_de_contenidos_y_flujos_de_carbono_en_gradientes_altitudinales_altoandinos_Protocolo_1_-_Version_1

⁷ Todas las muestras del estudio fueron codificadas de acuerdo al número de parcela, al ecosistema en donde se recolectó (super páramo, páramo o bosque) y a la posición dentro de la parcela (sub cuadrante, hora). En el caso de las muestras de suelo se añadió a esta codificación el perfil de suelo muestreado.

como por ejemplo árboles con deformaciones, en pendiente, inclinados, caídos y con tallos múltiples (Calderón et al. 2014, 12).

Para la medición del DAP en árboles con diámetro mayor a 5 cm se utilizó una cinta diamétrica, mientras que para árboles con un diámetro entre 2,5 cm y 5 cm se utilizó un calibrador. Los árboles con un diámetro menor a 2,5 no fueron censados y los árboles nuevos con un DAP igual o mayor a 2,5 cm (sin código) fueron reclutados e incluidos al censo y a la base de datos con la finalidad de determinar la dinámica del bosque.

La medición de altura de los árboles se realizó mediante estimaciones visuales.

Para la recolección de las muestras de suelo se siguió el mismo procedimiento realizado en páramo. Además, para analizar la densidad aparente del suelo se recolectó 14 muestras distribuidas a lo largo del gradiente altitudinal. Las muestras fueron recolectadas mediante anillos Kopecki.

2.2. Procesamiento de muestras en laboratorio

Las muestras recolectadas en campo fueron pesadas y almacenadas a una temperatura de 3°C en el cuarto frío del laboratorio Ambiental de la Universidad de las Américas, en donde se realizó el procesamiento de las muestras.

2.2.1. Procesamiento de muestras de Biomasa

Para el procesamiento de las 156 muestras se realizó la separación de la necromasa presente en la vegetación recolectada, a continuación la BA fue secada hasta alcanzar un peso estable (entre 48 y 72 horas) a una temperatura de 70°C, se registró el peso seco (Calderón et al. 2014, 16).

2.2.2. Procesamiento de muestras de Suelos

Previo al análisis para la determinación del COS, se realizó una separación entre el suelo y las raíces y rocas presentes, durante una hora por cada muestra con el fin de mantener un esfuerzo de muestra constante (Metcalf 2006, 7). El suelo fue molido y tamizado (tamizador plástico de 150 µm) para su entrega al laboratorio de química de la UDLA, en donde mediante el método de combustión instantánea dinámica (equipo “Thermo Scientific™ FlashSmart”), se cuantificó la cantidad de carbono y nitrógeno

presentes en cada muestra. El método de Espectrometría de emisión óptica de plasma acoplada inductivamente (6010D EPA US) fue utilizado para determinar la cantidad de macro y micronutrientes en el suelo.

3. Análisis de datos.

Los datos utilizados para los análisis corresponden a los censos del 2012, 2014, 2018 y 2021 (datos levantados para este estudio) de acuerdo con lo especificado en la figura 3, con las siguientes particularidades:

- La base de datos del año 2012 para el censo de bosque, no cuenta con un levantamiento de información de los árboles con clase diamétrica de 2,5 a 4,9 cm a la altura del pecho, por lo que para los análisis de la dinámica de la BA, utilizamos datos de los censos 2014-2021.
- Los análisis de la estructura del bosque para la clase diamétrica de 2,5 a 4,9 cm, fue realizada gracias a los datos de número de individuos y medias del DAP reportados en Calderón et al. (2020).
- La base de datos del año 2012 para el censo de páramo no cuenta con cobertura por formas de crecimiento, este análisis fue realizado para los años 2014 y 2021.
- Para este trabajo no se analizó la productividad del suelo, debido a la diferencia de metodologías utilizadas entre periodos. Para el año 2012 se utilizó el método por pérdida por Ignición (Loss On Ignition -LOI) y el factor de Van Bemmelen para obtener los valores del COS, mientras que para el año 2021 se utilizó una técnica analítica más precisa (ver 2.2.2).
- Los análisis fueron realizados mediante los programas IBM SPSS Statistics 26, R studio, past 4.03, Jamovi 2.5.5 y Primer-e 6.

Como trabajo preliminar, se realizó una depuración de las bases de datos de los diferentes períodos (2012, 2014, 2018 y 2021) con el fin de contar con un formato estándar para los análisis. Los datos de los censos de bosque fueron organizados en una sola matriz en donde se realizaron correcciones y estandarizaciones a los metadatos, nombre de las familias, género y especies de los árboles, unidades de medición de las variables dasométricas, códigos de las características de los árboles, etc. Los datos de las

muestras recolectadas en bosque y páramo recibieron un procesamiento similar en el que se estandarizaron los formatos, metadatos, nombres, códigos y unidades.

3.1. Corrección de alturas de los árboles

La metodología utilizada para la estimación visual de alturas (H) de los árboles tiene un error de estimación lo que limita la comparación entre los diferentes censos (Réjou-Méchain et al. 2017, 1163). Por lo tanto, realizamos una corrección de las mismas a través de construir un modelo de H:DAP a escala de parcela utilizando la función *model HD* a través de la aplicación web para análisis de dinámicas forestales (Calderón y Cuesta 2018), la cual utiliza el paquete BIOMASS de R (Réjou-Méchain et al. 2017). La función utiliza cinco modelos diferentes; tres modelos polinómicos logarítmicos (log-log), un modelo Weibull de tres parámetros, y un modelo Michaelis-Menten de dos parámetros. La función con el error estándar más bajo (Residual Standard Error - RSE) y el sesgo promedio fue considerado como el mejor estimador para cada parcela (Anexo 1c).

Debido a que las parcelas de 10 x 10 m contienen pocos individuos agrupamos las parcelas en dos grupos con el fin de desarrollar un modelo de H:DAP para cada grupo. Para esto, realizamos una prueba de Kruskal-Wallis para muestras independientes, para identificar las parcelas con diferencias significativas entre ellas y poder realizar una agrupación entre parcelas similares (Anexo 1a).

Para cada grupo de parcelas seleccionamos el 30% de las alturas tomadas en campo, teniendo en cuenta la distribución del DAP en cada grupo a partir de sus cuartiles y frecuencias (Anexo 1b). El 70% restante de árboles de cada grupo fueron asignadas sus alturas con el mejor modelo (Hmix).

3.2. Estructura y composición de las parcelas de bosque

Para el análisis de la estructura y composición de las parcelas de bosque utilizamos los siguientes indicadores a escala de parcela, agrupados en cuatro clases diamétricas: (1) área basal, (2) altura promedio, (3) Número de individuos, (4) Promedio del DAP. Adicionalmente, estimamos las tasas demográficas del bosque entre los períodos censales (ver adelante), parámetros que pueden ayudar a explicar la recuperación de un bosque después de periodos de disturbios (Chazdon et al. 2007, 273; Guariguata y Ostertag 2001, 194).

Adoptamos los rangos diamétricos definidos en Calderón et al. 2020 (Tabla 1), para tener comparabilidad entre lo reportado para los censos 2012 y 2014 con los datos de los censos 2018 y 2021.

Tabla 1.
Clases diamétricas establecidas para los análisis de los datos del bosque de *Polylepis* de Yanacocha

Clase diamétrica	Diámetro (cm)
1	2,5 a 4,99
2	5 a 10,99
3	11 a 20,99
4	>= 21

Fuente y elaboración propias.

El cambio en la estructura del bosque a través del tiempo la estimamos a partir de la variación de estos indicadores entre los censos.

Las tasas de la dinámica de la BA en el bosque de *Polylepis* expresadas en porcentaje por año (% año⁻¹), fueron estimadas con los datos de BA de los censos 2014 y 2021, a partir de las ecuaciones de Peña y Duque (2013):

$$\text{Tasa anual de crecimiento } (g) = \left[\text{Log} \left(\frac{BA_{2021-R}}{BA_{2014-D}} \div t \right) \right] \times 100 \quad \text{Ecuación 1}$$

$$\text{Tasa anual de mortalidad } (m) = \left[\text{Log} \left(\frac{BA_{2021}}{BA_{2014-D}} \div t \right) \right] \times 100 \quad \text{Ecuación 2}$$

$$\text{Tasa anual de reclutamiento } (r) = \left[\text{Log} \left(\frac{BA_{2021-D+R}}{BA_{2014-D}} \div t \right) \right] \times 100 \quad \text{Ecuación 3}$$

$$\text{Cambio neto de la BA } (n) = \left[\text{Log} \left(\frac{BA_{2021}}{BA_{2014}} \div t \right) \right] \times 100 \quad \text{Ecuación 4}$$

En donde,

BA_{2014} y BA_{2021} = Biomasa aérea en cada período

t = Tiempo en años transcurrido entre censos

D = Biomasa aérea de árboles muertos

R = Biomasa aérea de los nuevos reclutas.

Utilizamos la prueba de Shapiro-Wilk para determinar la normalidad de los datos (Mishra et al. 2019, 70) y el coeficiente de correlación de Pearson (Yadav 2018, 117) para identificar si existe una asociación entre las tasas de la dinámica de la BA.

3.3. Estructura y composición de las parcelas de páramo

Para determinar si existen diferencias significativas en la estructura y composición de la vegetación en las parcelas de páramo entre censos, utilizamos los datos de la cobertura (%) por formas de crecimiento (FC) de los censos 2014 y 2021. Obtuvimos los datos de la media ± 1 DE por FC y año y su cambio porcentual entre censos. Con los valores medios se realizó una prueba t para muestras emparejadas (Flores-Ruiz, Miranda-Novales, y Villasís-Keever 2017, 368)

3.4. Reservorios de Carbono

Para determinar la BA del bosque utilizamos la ecuación alométrica (Ecuación 5) desarrollada por Calderón et al. (2020), debido a que fue construida con datos de árboles cosechados en las parcelas permanentes de Yanacocha. Adicionalmente, utilizamos esta ecuación y los datos de los árboles con un DAP ≥ 5 cm para garantizar comparabilidad entre los censos del 2012 y 2014 con los del 2018 y 2021:

$$Biomasa\ Aérea\ (BA) = 0,041 \times (DAP)^{2,56} \quad \text{Ecuación 5}$$

Mediante la sumatoria de la BA calculada por cada árbol (Kg) obtuvimos los valores por parcela que posteriormente escalamos a megagramos por hectárea ($Mg\ ha^{-1}$).

Para obtener los datos de la BA del páramo utilizamos el peso seco en Kg de las cuatro muestras (repeticiones) por parcela, con las cuales obtuvimos un valor medio por parcela por reservorio expresado en $Mg\ ha^{-1}$.

Con estos datos obtenidos por cada parcela de bosque y páramo, calculamos la cantidad de carbono almacenado en la BA (BA_C) en $Mg\ C\ ha^{-1}$ multiplicándolos por el

factor de 0,50⁸ con el fin de mantener comparabilidad entre los datos reportados en Calderón et al. (2020) de los censos del 2012 y 2014.

Para determinar el contenido de COS, utilizamos la ecuación empleada por Calderón et al. (2014, 49):

$$\text{Contenido de C en suelo (COS)} = [(p \times h \times C)] \quad \text{Ecuación 6}$$

En donde:

p = Densidad del suelo medido en g/cm^3

h = Profundidad a la cual se tomó la muestra (cm)

C = Porcentaje en peso de carbono orgánico en el suelo

Con los valores medios por parcela de la BA_C , calculamos la productividad por año ($\text{Mg C ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) mediante la siguiente ecuación (Cancino 2006, 130):

$$\text{Productividad} = \left[\left(\frac{C_{2021} - C_{2012}}{t} \right) \right] \quad \text{Ecuación 7}$$

En donde:

C_{2012} y C_{2021} = Carbono almacenado en cada período (BA_C)

t = Tiempo en años transcurrido entre censos

Con los datos de BA_C y COS y la productividad por parcela, calculamos la media ± 1 DE. En el caso del COS, obtuvimos también una media por cada perfil de suelo (P1 y P2) para las 39 parcelas estudiadas.

Mediante la prueba de Shapiro-Wilk determinamos la normalidad de los datos para los diferentes reservorios. Para determinar si existen diferencias de las reservas de carbono entre censos, utilizamos la prueba t de muestras emparejadas (Calderón et al. 2020, 8)

⁸ El IPCC en el documento “Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories (2006)” establece la fracción de carbono del peso seco (CF) en 0.5 (El carbono como el 50% del peso de la biomasa). Calderón et al. (2020) utiliza este factor de conversión para convertir la Biomasa en valores de carbono almacenado.

3.5. Efectos de las variables bióticas y abióticas en las tasas de productividad de la biomasa aérea y el carbono orgánico del suelo en Yanacocha

Realizamos un análisis de ordenación que nos permita identificar las variables bióticas y abióticas que se relacionan con las diferencias en las tasas de productividad y reservas de carbono observadas entre las parcelas. Con el fin de definir que variables son significativas para el modelo lineal generalizado (explicado más adelante), realizamos un análisis de coordenadas principales (PCoA) utilizando la Distancia de Manhattan como métrica de dis(similaridad) (McCune, Grace, y Urban DL 2002, 289, 47), con el fin de obtener los grupos de parcelas que representan las máximas distancias entre ellas a partir de las variables ambientales evaluadas (Anexo 3). Las variables predictivas incluyeron los macronutrientes del suelo (ver sección 2.2.2) representados en el primer vector del PCA de nutrientes del suelo (ver a continuación), elevación (como indicador de la temperatura), pendiente y la diversidad Alpha ($e^{(H-Shannon)}$). El índice de diversidad Alpha del bosque [$e^{(H-Shannon)}$] fue estimado a partir del área basal (≥ 5 cm DAP) de cada especie (Pinto y Cuesta 2019, 46–47) agregados a escala de parcela mediante el software PAST 4.03 (Hammer, Harper, y Ryan 2001). La diversidad Alpha del páramo se estimó a partir de los valores promedio por parcela de las formas de crecimiento. La elevación y la pendiente fueron medidas en campo con un GPS Garmin e-trex y un clinómetro SUUNTO.

Posteriormente, con las variables ambientales base, definidas gracias al PCoA, construimos un modelo lineal generalizado (GLM, por sus siglas en inglés) para evaluar si las diferencias observadas en la productividad de la BA y en el reservorio del COS, son explicadas por el tipo de ecosistema en donde se encuentran las parcelas, la elevación, la pendiente, los nutrientes del suelo, las existencias de carbono del último censo y la diversidad Alpha de las parcelas (i.e., $e^{(H-Shannon)}$).

Para el modelo de la productividad de la BA, el tipo de ecosistema fue definido como un factor, la elevación, $e^{(H-Shannon)}$ y los reservorios de carbono de la BA del censo final (2021) fueron definidos como covariables y la productividad de la BA como variable respuesta. El modelo del COS incluyó al primer vector del PCA de nutrientes del suelo (ver a continuación) y la relación C:P como covariables, al ecosistema como factor y al reservorio del COS del 2021 como variable respuesta.

Para ambos modelos, los supuestos de la regresión fueron visualmente evaluados para asegurar que la normalidad y homogeneidad de la varianza de los residuales se cumpla, así como la independencia de las observaciones (Anexo 5).

Previamente al desarrollo del GLM y PCoA, realizamos un análisis de componentes principales (PCA) con el fin de reducir las dimensiones de las variables de macronutrientes (P, Na, K, Mg, Fe, Ca, Al) (ver sección 2.2.2) y usar el vector principal del PCA, con el fin de incorporar la multidimensionalidad de los minerales del suelo en un solo vector y evitar efectos de colinearidad en el modelo final (Anexo 3). El componente 1 del PCA explica el 58% de la varianza.

Finalmente, para evaluar cómo los patrones de los reservorios de carbono y la productividad han cambiado su relación con la elevación a través del tiempo, realizamos regresiones lineales simples para los diferentes censos disponibles y para los intervalos de 2012-2014 y 2012-2021 para la productividad. Únicamente los modelos significativos fueron desarrollados en los resultados.

Capítulo segundo

Resultados

De manera general, encontramos que los bosques y páramos de la Reserva Yanacocha, evidencian un proceso de regeneración natural progresivo a través del tiempo. El contenido de carbono se ha incrementado entre los censos del 2012 y 2021 en la biomasa aérea, pasando de una media de $11,61 \pm 16,53$ a $18,37 \pm 17,74$ Mg C ha⁻¹ con una productividad anual de $0,75 \pm 0,54$ Mg C ha⁻¹. El mayor reservorio al 2021 es el COS (0-33 cm) con una acumulación de $209,3 \pm 49,4$ Mg C ha⁻¹.

1. Estructura de las parcelas permanentes de Yanacocha.

1.1. Estructura y composición de las parcelas de bosque

Encontramos un crecimiento en los bosques de Yanacocha desde el año 2012 al 2021 en su área basal total, en sus diámetros medios de las clases diamétricas y en la mayoría de sus alturas promedio por clase diamétrica (Tabla 2). El área basal (m² ha⁻¹) acumulada de las 10 parcelas de los bosques de *Polylepis* incrementó en 51,4 m² ha⁻¹ en 9 años, determinado principalmente por las clases diamétricas superiores. La clase de 11-20,9 cm incrementó en un 25,4% (30,43 m²) y la clase ≥ 21 cm en 28,4% (21,46 m²) (Tabla 1). Al 2021, las cuatro clases diamétricas muestran un incremento en el DAP respecto al 2012, siendo el incremento medio mayor (0,77 cm y 0,55 cm) en los tallos de la clase diamétrica superior (≥ 21 cm) e inferior (2,5-4,9 cm), respectivamente. Los bosques de Yanacocha ganaron en altura también, particularmente en las clases intermedias formando un subdosel más continuo respecto al 2012. La clase de 5 a 10,9 cm incrementó en su media de altura 1,12 m mientras que la clase de 11 a 20,9 cm en 1,17 m.

Tabla 2:
Estructura de individuos del bosque de *Polylepis* de la Reserva Yanacocha (10 parcelas) por clase diamétrica para los años 2012, 2014, 2018 y 2021. Se muestra la media del DAP y la altura con su desviación estándar en paréntesis (DE).

Clase diamétrica	Número de individuos				Media del DAP cm (± 1 DE)				Media de la altura cm (± 1 DE)				Área basal (m ² ha ⁻¹)			
	2012	2014	2018	2021	2012	2014	2018	2021	2012	2014	2018	2021	2012	2014	2018	2021
2,5 a 4,9 cm	*329	262	306	255	*3,05 (0,7)	3,57 (0,65)	3,49 (0,65)	3,60 (0,64)		4,63 (0,34)	4,01 (0,35)	4,31 (0,6)	**31,96	27,13	30,32	26,99
5 a 10,9 cm	205	208	218	189	6,90 (1,51)	7,08 (1,54)	7,18 (1,72)	7,35 (1,75)	5,24 (0,45)	5,85 (0,43)	5,51 (0,62)	6,36 (0,73)	80,30	85,65	93,32	84,74
11 a 20,9 cm	71	78	77	86	14,42 (2,64)	14,48 (2,67)	14,89 (2,76)	14,65 (2,83)	7,13 (0,96)	7,46 (0,81)	7,90 (0,86)	8,30 (0,55)	119,80	132,69	138,69	150,23
>21 cm	15	15	16	18	25,11 (3,39)	25,58 (3,53)	25,95 (3,73)	25,88 (4,20)	10,08 (0,71)	9,56 (0,4)	10,53 (0,52)	9,70 (0,45)	75,57	78,46	86,26	97,03
Total	620	563	617	548									307,63	323,93	348,59	358,99

* Datos reportados en Calderón (2020). **Valor obtenido a partir de los datos de la media del DAP reportados en Calderón (2020)
Fuente y elaboración propias. (Detalles en anexo 1).

1.1.1. Dinámicas de la biomasa aérea del bosque

Los bosques de Yanacocha tuvieron un balance neto positivo en las dinámicas de su BA (media = $1,11 \pm 1,19$) para el período 2014-2021. Las tasas de crecimiento anual ($1,64 \pm 0,807$) fueron mayores que las tasas de mortalidad ($0,68 \pm 0,6$) en nueve de las diez parcelas estudiadas (Tabla 3). Encontramos una relación significativa positiva entre el cambio neto y el crecimiento anual ($r= 0,859$; $p= <0,001$) y entre el cambio neto y el reclutamiento ($r= 0,715$; $p= <0,02$), evidenciando que las parcelas con mayores tasas de crecimiento tienen mayores tasas de cambio neto. No encontramos una relación de la mortalidad con las tasas demográficas analizadas, no obstante, encontramos que las tasas de mortalidad son mayores que las tasas de reclutamiento en ocho de las diez parcelas. La mortalidad fue más alta en árboles con clase dimétrica de 2,5 a 4,9 cm; de hecho, el 70% de árboles muertos para el 2021 corresponden a esta categoría, mientras que el 26% pertenecen a la clase diamétrica de 5 a 10,9 cm.

Tabla 3:
Tasas demográficas de las parcelas de bosque de la reserva Yanacocha para el período 2014-2021.

Parcela	TC	TM	TR	Cambio Neto
BP01	2,99	0,32	0,74	3,14
BP02	2,32	0,50	0,70	2,31
BP03	1,48	0,50	0,02	1,00
BP04	0,90	2,22	0,11	-1,22
BP05	1,35	0,82	0,05	0,57
BP06	0,63	0,13	0,04	0,53
BP07	0,81	0,11	0,06	0,75
BP08	1,61	0,83	0,21	0,94
BP09	1,57	0,68	0,10	0,97
BP10	2,74	0,71	0,12	2,10
Media (\pmDE)	1,64 (\pm 0,81)	0,68 (\pm 0,60)	0,22 (\pm 0,27)	1,11 (\pm 1,19)

TC: tasa relativa de crecimiento, TM: tasa relativa de mortalidad, TR: tasa relativa de reclutamiento.

Fuente y elaboración propias

1.2. Estructura y composición de las parcelas de páramo

En las parcelas de páramo y superpáramo de Yanacocha observamos un cambio significativo en las coberturas de formas de vida a través del tiempo ($p= 0,000$). El páramo y superpáramo ha cambiado la fisonomía de la vegetación hacia un sistema dominado por

gramíneas en penacho (e.g., *Calamagrostis intermedia*) y arbustos (e.g., *Chuquiragua jussei*) con un aumento de su cobertura en 104,88% y 72,19%, respectivamente. Por el contrario, otras formas de vida registran una reducción importante de su cobertura, en particular gramíneas (-59,21%) y rosetas basales (-57,17%) entre el 2014 y 2021 (Tabla 4).

Tabla 4:
Media (± 1 DE) del porcentaje de cobertura por formas de crecimiento de las 29 parcelas de Páramo y Superpáramo de la reserva Yanacocha.

Formas de crecimiento	Páramo y super páramo		Páramo		Super páramo	
	2014	2021	2014	2021	2014	2021
Arbusto	4,51 (8,66)	9,24 (17,19)	4,29 (8,13)	8,47 (17,33)	4,79 (9,33)	10,19 (17,14)
Cojín	3,27 (12,74)	1,96 (7,15)	0,67 (3,76)	0,00	6,48 (18,15)	4,37 (10,23)
Gramínea	2,77 (8,96)	1,13 (5,33)	3,16 (11,15)	1,58 (6,67)	2,30 (5,2)	0,58 (2,91)
Hierba erecta	3,61 (6,32)	3,08 (5,39)	2,74 (5,27)	2,22 (3,9)	4,69 (7,33)	4,13 (6,68)
Hierba rastrera	4,76 (8,58)	5,95 (10,61)	4,10 (5,37)	3,39 (6,92)	5,58 (11,37)	9,10 (13,28)
Penacho	41,1 (27,3)	70,77 (29,73)	46,87 (23,87)	80,8 (21,6)	33,99 (29,73)	58,42 (33,7)
Roseta	5,23 (10,1)	2,24 (5,72)	2,41 (6,58)	0,00	8,70 (12,42)	5,00 (7,73)
Total Plantas vasculares	65,25 (19,44)	94,36 (11,12)	64,23 (18,36)	96,45 (7,6)	66,519 (20,8)	91,79 (13,96)
*Otras	35 (19)	6 (11)	36 (18)	4 (8)	33 (21)	8 (14)

*Hace referencia a coberturas de suelo y plantas no vasculares: suelo desnudo, musgo, roca, líquen.

Fuente y elaboración propias.

2. Reservorios de carbono en Yanacocha.

2.1. Biomasa aérea del bosque

En la BA del bosque de Yanacocha registramos un aumento en la media por hectárea de 8,5 Mg C, pasando de 33 ± 21 a 41 ± 22 Mg C ha⁻¹ entre 2012 y 2021. El incremento constante del C contenido en la BA a lo largo de los censos, en nueve de las diez parcelas, equivale a una productividad anual media de $0,93 \pm 0,70$ Mg C ha⁻¹ (anexo 5). Las pruebas t pareadas indican que existen diferencias significativas entre el carbono almacenado entre censos ($p < 0,01$) excepto para el período 2018-2021 ($p > 0,09$) (Figura 5).

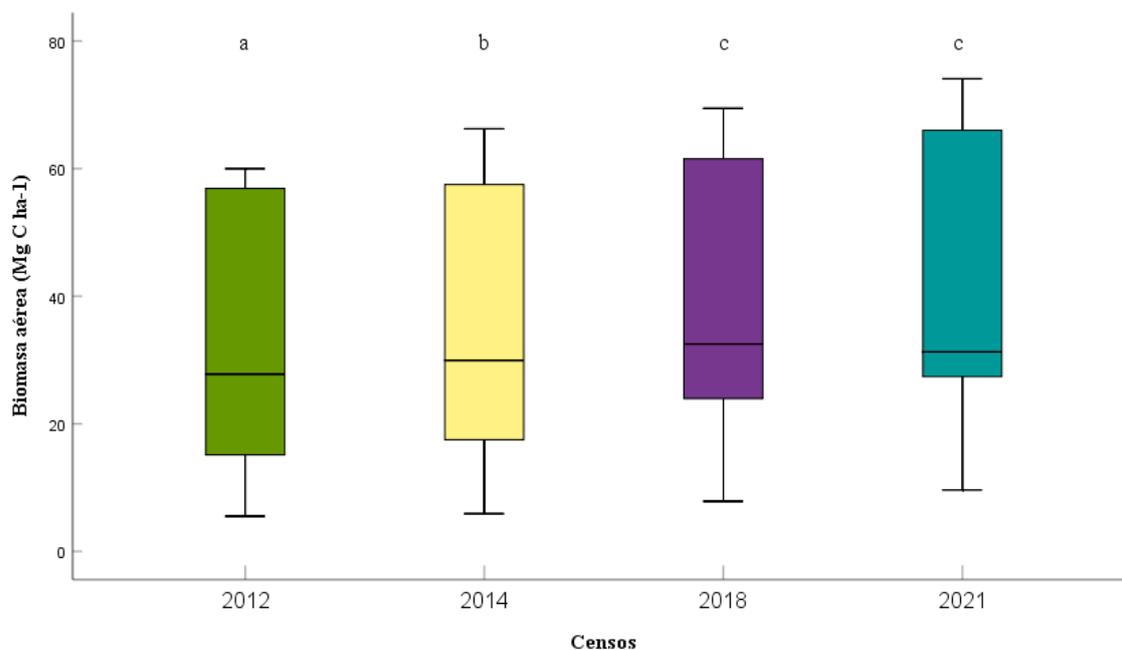


Figura 5: Gráficos de caja con sus medianas, indican el contenido de carbono en la biomasa aérea. Las letras en cada una de ellas muestran los censos que tienen o no diferencias significativas entre los censos realizados en el bosque de Polylepis. Realizado con datos de árboles con DAP >5. Fuente y elaboración propias.

2.2. Biomasa aérea del páramo

Al igual que en el bosque de Yanacocha, observamos un incremento sostenido de BA_C en el páramo y superpáramo a lo largo de los censos, pasando de una media de $4,20 \pm 1,8 \text{ Mg C ha}^{-1}$ en 2012 a $7,16 \pm 5,1$ en 2014 y $10,41 \pm 3,03$ en 2021. Las pruebas T para muestras relacionadas nos indican que existen diferencias significativas en los reservorios de carbono entre cada uno de los censos (2012-2021: $t=-8,295$, $p=0,000$; 2014-2021: $t=-2,513$, $p=< 0,018$) (Figura 6). La productividad media de la BA_C para el período 2012-2021 es de $0,69 (\pm 0,45) \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ (anexo 5).

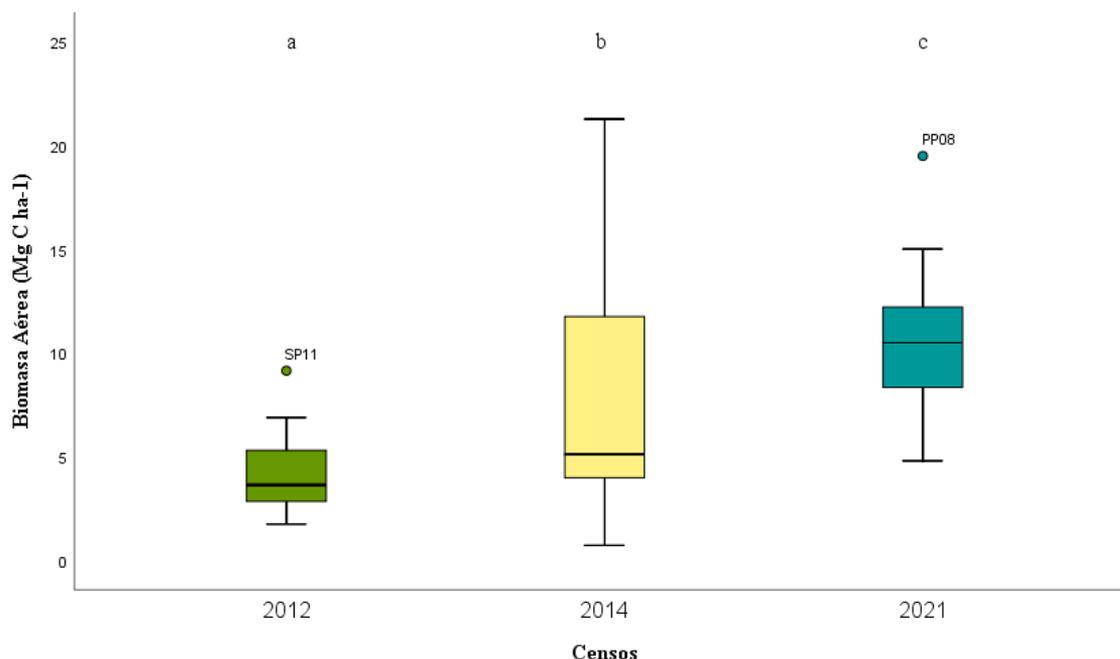


Figura 6: Gráficos de caja con sus medianas, indican el contenido de carbono en la biomasa aérea. Las letras en cada una de ellas muestran los censos que tienen o no diferencias significativas entre los censos realizados el páramo y superpáramo de Yanacocha. Fuente y elaboración propias.

Al analizar por separado las parcelas de páramo (3916 a 4067 m snm) y las del superpáramo (4.115 a 4.321m snm), encontramos que para los censos del 2012 y 2014 el mayor reservorio de carbono se encontró en el superpáramo con $5,61 \pm 1,63$ y $11,27 \pm 4,83$ Mg C ha⁻¹, respectivamente. En el páramo los reservorios fueron de $3,06 \pm 0,74$ y $3,82 \pm 1,59$, respectivamente. Para el 2021 esta relación se invierte; el páramo almacenó en su BA una media de $11,2$ Mg C ha⁻¹ $\pm 2,94$ y el superpáramo $9,5$ Mg C ha⁻¹ ± 3 . La productividad media del páramo para el período 2012-2021 fue de $0,90 \pm 0,31$ Mg C ha⁻¹ año⁻¹ mientras que la productividad del superpáramo fue de $0,43 \pm 0,46$ Mg C ha⁻¹ año⁻¹.

2.3. Carbono orgánico del suelo en el bosque

En el COS del bosque, registramos para el 2021 una reserva media total de $159,10 \pm 24,72$ Mg C ha⁻¹ (Figura 7). El perfil 2 (16,5-33 cm) registró una captura media mayor ($94,09 \pm 20,33$ Mg C ha⁻¹) que el perfil 1 (0-16,5 cm; $65,01 \pm 12,91$ Mg C ha⁻¹) ($p=0.003$) (Anexo 6).

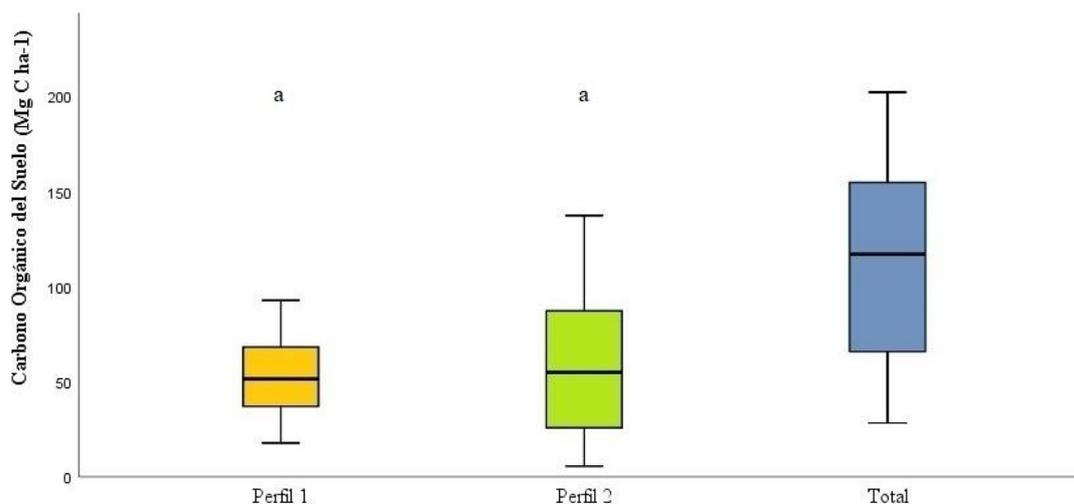


Figura 7: Gráficos de caja con sus medianas, indican el contenido de carbono orgánico del suelo diferenciado por perfiles y años. Las letras indican la existencia de diferencias significativas entre los perfiles del suelo en el bosque de Yanacocha. Fuente y elaboración propias.

2.4. Carbono orgánico del suelo en el páramo

La media total del COS en el páramo fue de $226,6 \pm 43,6$ Mg C ha⁻¹ (Figura 8). La reserva de carbono fue de $100,3 \pm 22$ Mg C ha⁻¹ en el perfil 1 y de $126,3 \pm 30,4$ Mg C ha⁻¹ en el perfil 2 ($p=0.001$).

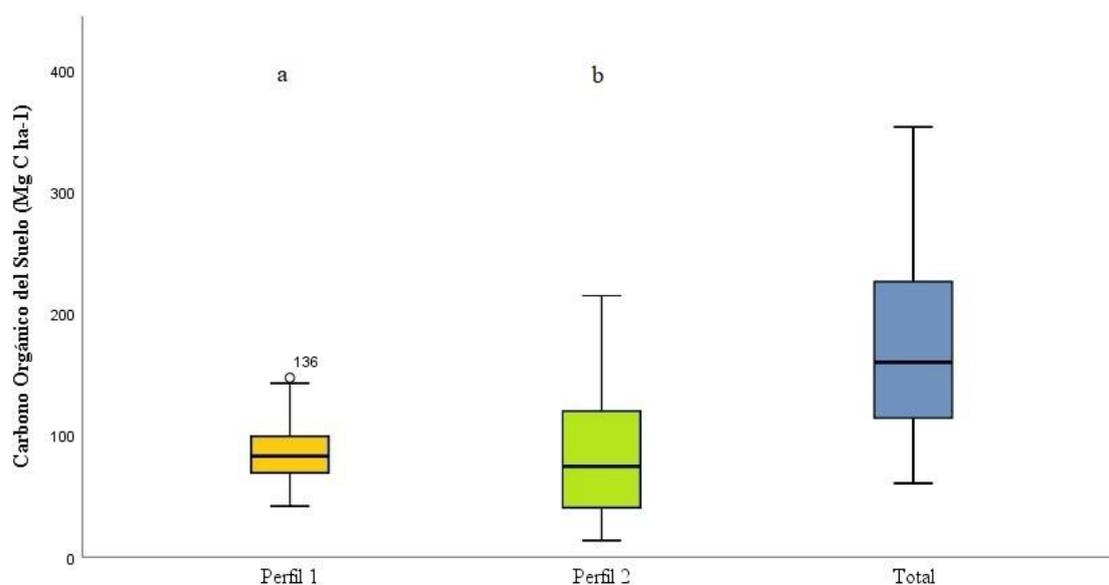


Figura 8: Gráficos de caja con sus medianas, indican el contenido de carbono orgánico del suelo diferenciado por perfiles y años. Las letras indican la existencia de diferencias significativas entre los perfiles de suelo del páramo y superpáramo de Yanacocha. Fuente y elaboración propias.

2.5. Productividad de Yanacocha y su relación con variables biofísicas

Encontramos que la productividad de BA_C esta explicada en un 45% por la elevación (F=4,43; p=0,043) y el índice de Shannon (F=6,44; p=0,016). El tipo de ecosistema y el BA_C del 2021 no fueron significativos para este modelo (Tabla 5a).

Los stocks de carbono en el suelo fueron explicados en un 58% por el ecosistema (F=8.68; p=< .001), la relación C:P (F= 21,08; p= < .001) y los nutrientes del suelo (F= 10,57; p=0,003) (Tabla 5b).

Tabla 5:
Modelo lineal generalizado (GLM) explicando la relación entre (a) la productividad de la biomasa aérea, y (b) el carbono orgánico del suelo.

a) Productividad de la Biomasa Aérea					
R-squared	0.521	Adj. R-squared			0.45
Names	Effect	Estimate	SE	t	p
(Intercept)	(Intercept)	0.7079	0.069	10.19	< .001
Ecosistema1	Superparamo - Bosque	0.9899	0.587	1.69	0.101
Ecosistema2	paramo - Bosque	0.5608	0.358	1.57	0.127
Elevación	Elevación	-0.0028	0.001	-2.1	0.043
SHANNON	SHANNON	-0.1857	0.073	-2.54	0.016
BA _C _2021	BA_2021	0.0084	0.006	1.37	0.181

b) Carbono Orgánico del Suelo					
R-squared	0.621	Adj. R-squared			0.58
Names	Effect	Estimate	SE	t	p
(Intercept)	(Intercept)	204.914	5.253	39.01	< .001
Ecosistema1	Superparamo - Bosque	42.488	14.487	2.93	0.006
Ecosistema2	paramo - Bosque	56.948	13.73	4.15	< .001
C-P	C-P	0.847	0.185	4.59	< .001
nut_comp1	nut_comp1	24.794	7.626	3.25	0.003

Fuente y elaboración propias.

*Nut_comp1= P_Na_K_Ca_Al

Finalmente, analizamos la productividad por ecosistema (bosque y páramo). No encontramos resultados significativos para el bosque, mientras que para todo el gradiente de elevación del páramo (29 parcelas), la relación fue significativa ($R^2= 0.4336$; p=0.000) (Anexo 7), por lo cual analizamos la variación espacial de la BA_C del páramo y su productividad con el gradiente de elevación a lo largo del tiempo.

Para los censos 2012 y 2014 la BAc incrementó con la elevación ($R^2=0,57$, $p < 0,0001$; $R^2=0,59$, $p < 0,0001$, respectivamente). Sin embargo, en el censo 2021 encontramos una relación inversa, en la que los reservorios de carbono en la BA decrecen conforme la elevación incrementa ($R^2 = -0.19$, $p = 0.018$; Figura 9a). Un patrón similar se observa con la productividad (Figura 9b) en donde la tendencia de incremento con la elevación se da para el período 2012-2014 ($R^2 = 0,405$, $p = 0,000$), mientras que para el período 2012-2021 decrece con la elevación ($R^2 = -0,433$, $p = 0,000$).

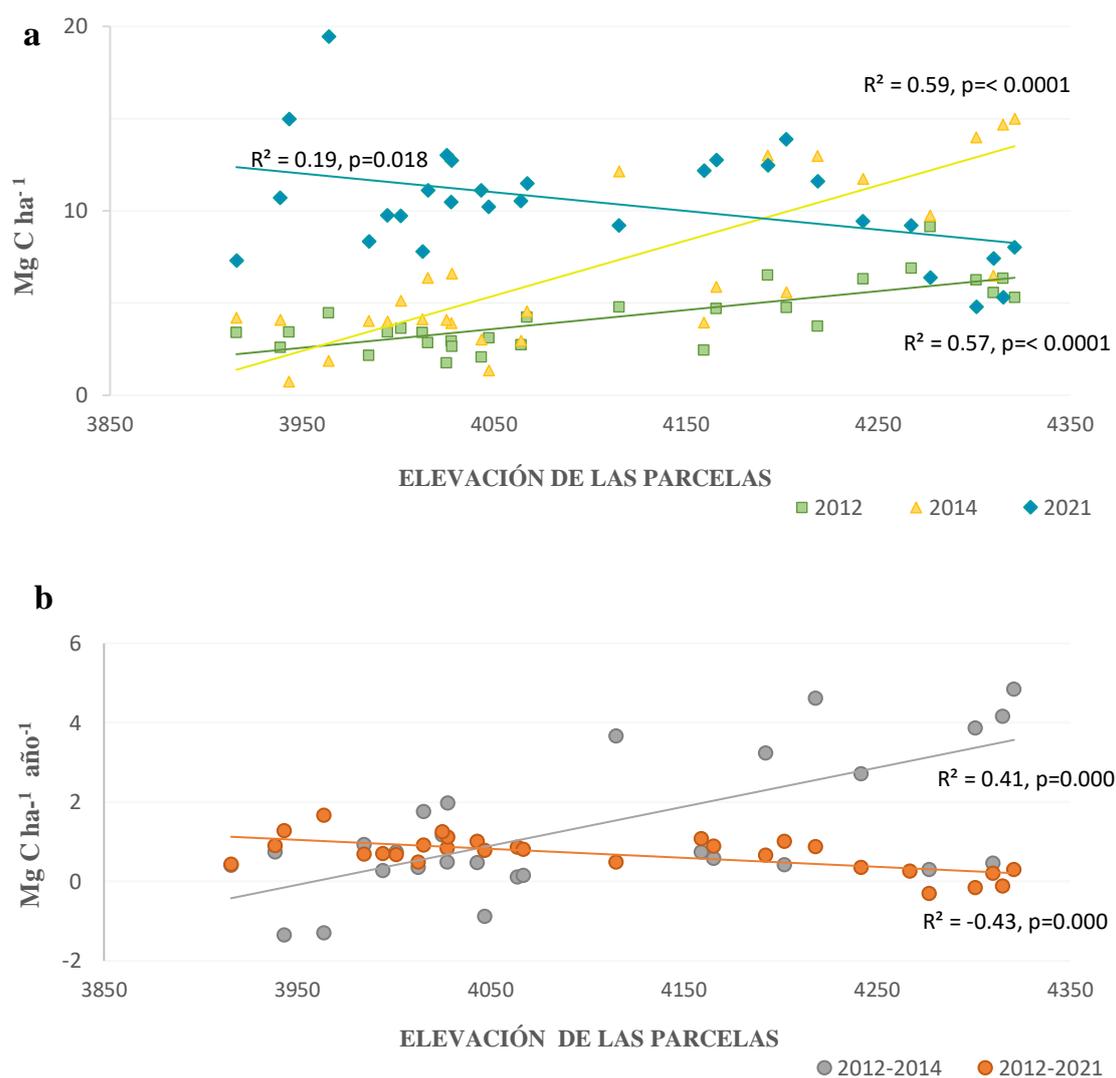


Figura 9: Variación de las reservas de carbono de la biomasa aérea (a) y su productividad (b) para los diferentes censos en relación a la elevación del páramo y superpáramo. Fuente y elaboración propias.

Capítulo tercero

Discusión

El monitoreo realizado durante casi una década en las parcelas permanentes de Yanacocha nos permite tener una aproximación clara de la dinámica del carbono en los ecosistemas de la reserva y los cambios generados a raíz de un proceso de recuperación natural, al limitar el pastoreo, quemas y extracción de leña desde hace 26 años. De manera general, podemos apreciar cambios temporales y espaciales de las reservas de carbono tanto en el bosque como en el páramo, como también cambios en la composición y estructura de la vegetación. Los resultados obtenidos sugieren que los ecosistemas altoandinos de la reserva Yanacocha están actuando como un importante sumidero de carbono tanto en su biomasa aérea como en el horizonte orgánico del suelo.

Reservorios de la Biomasa Aérea

El incremento a través del tiempo en la biomasa aérea del bosque de Yanacocha es el resultado del crecimiento en el área basal, y altura de los árboles (particularmente de las clases diamétricas superiores), lo cual confirma nuestra primera hipótesis, en línea con lo reportado por Chazdon et al. (2007, 284), sobre la dinámica de recuperación de bosques secundarios, quienes concluyen que la acumulación de la biomasa aérea en estos bosques están determinadas por el crecimiento de las variables dasométricas de los tallos de una parcela. De hecho, la reducción en la densidad de árboles, en particular de los rangos de diámetros menores y el incremento en la densidad de árboles en los rangos diamétricos superiores sugieren un proceso sucesional hacia bosques con una estructura próxima a la de los bosques maduros en los Andes (C. Girardin et al. 2014, 5).

El reservorio de carbono de la BA del bosque de Yanacocha al año 2021 ($41,45 \pm 22,4 \text{ Mg C ha}^{-1}$) fue inferior a los reportados en bosques altoandinos maduros a 3000 m de elevación. Gibbon et al. (2010, 1097) estimó un contenido medio de $63,4 \pm 5,2 \text{ Mg C ha}^{-1}$ en los Andes surorientales del Perú a partir de una ecuación alométrica general (Chave et al. 2005, 93) que incluye DAP, altura y densidad de la madera. Moser et al. (2008, 239) reportó un total de $56,1 \text{ Mg C ha}^{-1}$ a 3060 m de elevación en los Andes del

sur del Ecuador. Los altos valores reportados los atribuyeron a la alta densidad de árboles con tallos múltiples y a la proporción de C/N dónde suelos con mayores tasas de mineralización (valores bajos de C/N) tuvieron un reservorio mayor en su biomasa aérea. Girardin et al. (2010, 3181) estima un promedio de $56 \pm 9 \text{ Mg C ha}^{-1}$ a 3020 m de elevación y argumentan que los altos valores de carbono contenido en la BA se deben a la prevalencia de especies de los géneros Clusiaceae, Cunoniaceae que tienden a tener valores altos de carbono por individuo, resaltando la importancia del ensamblaje de especies de las comunidades y su efecto sobre las tasas de acumulación de carbono (Farley et al. 2013, 22). Montalvo et al. (2018, 255) reportó una variación entre 57 y 63 Mg C ha^{-1} en bosques altoandinos dominados por *Polylepis reticulata* en el sur del Ecuador sobre los 3100 m de elevación. El mayor reservorio de carbono en la BA reportado en Montalvo et al. (2018) podría explicarse por la menor densidad de individuos respecto a los censados al 2021 en Yanacocha (Anexo 8). La mayoría de estos individuos (81%) corresponden a árboles menores a los 10,9 cm de DAP, indicador de los legados del uso del suelo pasado sobre la estructura del bosque en Yanacocha.

Adicionalmente, la diferencia de 900 metros en elevación entre la mayoría de estudios que reportan reservorios de carbono más grandes y este estudio, posiblemente tiene una explicación relacionada con la temperatura ambiental. Asumiendo un lapso de proporción de $0,5^{\circ}\text{C}$ por cada 100 metros de variación en la elevación (Bush y Silman 2004, 680), podemos inferir que los bosques de Yanacocha crecen en condiciones de al menos $-4,5^{\circ}\text{C}$ que los bosques de los estudios reportados. Estas condiciones ambientales inciden sobre los rasgos funcionales foliares, los cuales pasan de estrategias adquisitivas a conservadoras (Llerena-Zambrano et al. 2021, 1) incidiendo en una disminución de la productividad primaria neta del dosel y la productividad de la biomasa aérea (Malhi et al. 2017, 1020).

La demografía de un bosque (tasas de mortalidad, crecimiento y reclutamiento) es otro aspecto clave para evaluar la recuperación de un bosque secundario (Ordoñez et al. (en revisión)). Las tasas de mortalidad más altas observadas en árboles con rangos diamétricos menores (ver anexo 8) y el mayor crecimiento encontrado en árboles con rangos diamétricos superiores (ver tabla 2), nos permite inferir que el bosque de Yanacocha podría estar pasado de ser un bosque en raleo competitivo a un bosque en un

raleo maduro (i.e., secundario maduro) (Coomes y Allen 2007, 28; Chazdon et al. 2007, 273).

Luego de 26 años de regeneración natural, la dinámica de la vegetación en el páramo de Yanacocha evidenció la transición de un sistema herbáceo en el 2014 a uno de penachos interdispersos con arbustos en el 2021 (Tabla 4), lo cual concuerda con los resultados del estudio de Zomer (2016,1), en donde los penachos y arbustos incrementaron su frecuencia. Podríamos inferir que esta variación se debe a un proceso de regeneración natural donde especies de grupos funcionales como rosetas basales y cojines disminuyen en cobertura por una mayor eficiencia de los arbustos y penachos en captar luz y competencia por espacio (Keating 2007; Zomer 2016; Ramsay & Oxley, 1996). Estos cambios en la estructura y composición del páramo y superpáramo, el incremento en los reservorios de carbono de la BA y la relación de las tasas de productividad y reservorios de carbono del páramo con la elevación, terminan de confirmar nuestra primera hipótesis y aceptan la segunda hipótesis.

El estudio realizado por Calderón et. al (2020) en las parcelas de Yanacocha, ha sido un punto de partida importante para entender la dinámica de los cambios que ha existido en el páramo y super páramo en estos años de recuperación. Las formas de crecimiento dominantes (Calderón et al. 2020, 15) han cambiado en los 7 años analizados. En el 2014, encontraron que las formas dominantes de vida fueron rosetas caulescentes (5,23%) y penachos (41,1%) mientras que, en el año 2021, las rosetas tuvieron un decrecimiento (2,24%), los arbustos aumentaron en un 4 % y los penachos aumentaron su presencia en un 29%, volviendo a los arbustos la segunda forma más dominante en este ecosistema. En nuestro estudio, la presencia de rosetas y cojines fue mínima en el páramo, teniendo una comunidad menos diversa que el superpáramo, pero con una mayor cantidad de biomasa concentrada en Penachos y arbustos. Esto está acorde al estudio de Minaya et. al. (2016,561), en donde encontraron como formas de crecimiento dominantes a penachos, rosetas acaulescentes y cojines. Ramsay y Oxley (1997,188) encontraron en su estudio que las rosetas acaulescentes y los penachos representaron más del 50% de la cobertura vegetal de los páramos estudiados.

De acuerdo a nuestros resultados y a lo reportado por Calderón et al. (2020, 10), existió un incremento significativo de BA entre periodos, lo cual difiere de los resultados del estudio de Duchicela et al. (2021, 6) para parcelas cercanas al sitio de estudio, en

donde la BA disminuyó en el periodo estudiado, tanto en las cámaras de calentamiento como en las parcelas de control.⁹ Este contraste podría relacionarse a la diferencia en las metodologías utilizadas (tamaño de las parcelas de recolección de BA) o a una influencia del efecto de borde causado por la recolección de la biomasa en periodos anteriores.

Los reservorios de la biomasa aérea y por consecuencia del carbono almacenado, son altamente cambiantes y dependen significativamente de variables como el gradiente altitudinal y el nivel de disturbio (por ejemplo los incendios) del sitio de estudio (Ramsay y Oxley 1997, 173; Román-Cuesta et al. 2011, 1988; Zimmermann et al. 2009, 895). En el páramo de Yanacocha, encontramos un reservorio de $10,41 \pm 3,03$ Mg C ha⁻¹ después de 26 años de recuperación, con una diferencia de 6 Mg C ha⁻¹ desde el inicio de los monitoreos en el 2012. Farley et al. (2013) reporta valores de 2,3 Mg C ha⁻¹ para sitios con una recuperación de 1 a 3 años después de un proceso de quema y entre 19,4 y 22,9 Mg C ha⁻¹ para sitios con un tiempo de recuperación entre 9 y 15 años y una elevación aproximada de 3600 msnm. Por otro lado, Minaya et al (2016, 559) reporta 16,5 Mg C ha⁻¹ (33 Mg ha⁻¹ de BA en páramo – Tabla 4), a una altura similar a la del páramo de Yanacocha (4200-4400 m snm) (no hace mención al tiempo de recuperación de las parcelas de estudio).

Productividad de la Biomasa Aérea

Yanacocha presenta una productividad anual (2012-2021) en la biomasa aérea de sus bosques ($0,93 \pm 0,7$) similar a bosques cercanos al sitio de estudio. Pinto et. al (en revisión) exponen una tasa de productividad de $1,06 \pm 0,46$ Mg C ha⁻¹ año⁻¹ para parcelas permanentes ubicadas cerca al sitio de estudio (2932 – 3507 m snm). La diferencia encontrada puede deberse a la edad de los bosques analizados, como también a la temperatura y a los rangos funcionales de las hojas de los árboles del bosque de Yanacocha que se encuentra a una mayor elevación (3790 a 3894 m snm), además de la influencia que tiene la presencia de nubosidad en las tasas fotosintéticas, provocando una disminución de la productividad primaria neta y productividad leñosa del bosque (Malhi et al. 2017, 1020; Llerena-Zambrano et al. 2021, 47).

⁹ En el estudio de Duchicela et. al 2021 utilizaron cámaras de calentamiento (OTC) para simular cambios en la temperatura en un ecosistema alto andino y poder comparar sus resultados con parcelas de control con el fin de poder entender las dinámicas de la vegetación en un escenario de cambio climático.

Como se mencionó anteriormente, la línea base de este estudio (Calderón et al. (2020,14) nos permite observar el cambio espacial y temporal de las reservas de carbono en el gradiente de elevación de las parcelas permanentes.

En los censos del 2012 y 2014 la relación de los reservorios de carbono con la elevación fue positiva, es decir, que la cantidad de carbono almacenado en la biomasa aérea incrementó conforme incrementó la elevación. Lo cual (contraria a la teoría ecológica¹⁰), puede deberse a que las parcelas ubicadas a una mayor elevación tuvieron una menor intervención humana (ver capítulo 1.1) que las que se encontraron a menor elevación (Calderón et al. 2020, 14-16) afectando a la producción de biomasa.

En este estudio encontramos un patrón inverso, en el cual, la biomasa disminuyó con el incremento de la elevación (figura 9), al igual que la productividad para el periodo 2012-2021, lo cual nos muestra cómo a través del tiempo, el efecto del uso humano fue disminuyendo a medida en que el ecosistema se fue recuperando, lo cual está de acuerdo a lo documentado en varios estudios (por ejemplo: Peng, Bloomfield, y Prentice 2020; Malhi et al. 2017; Homeier y Leuschner 2021).

Este cambio en la pendiente de la regresión entre la productividad y el gradiente de elevación entre los periodos 2012-2014 ($R^2 = 0,405$, $p=0,000$) y 2012-2021 ($R^2 = -0,433$, $p=0,000$) (Ver Figura 9) nos muestra como el páramo de la reserva se encuentra experimentando un cambio a través del tiempo, en donde, al eliminar el efecto humano, la dinámica se invierte y el gradiente ambiental sobrepasa el peso del gradiente de disturbio, demostrando una recuperación del ecosistema, confirmando nuestra segunda hipótesis.

Reservorios del carbono orgánico del suelo

No encontramos una diferencia significativa de COS con la elevación, lo cual confirma nuestra tercera hipótesis. Al igual que en este estudio, Zimmermann et al. (2009,

¹⁰ El estudio de las plantas y los cambios de su biomasa en gradientes altitudinales se han estudiado desde hace siglos atrás (por ejemplo con el famoso Tableau Physique de Alexander von Humboldt. 1807) hasta la actualidad (en estudios como el de Homeier y Leuschner 2021; Girardin et al. 2010; Moser et al. 2008; Malhi et al. 2017) en donde se evidencia una menor cantidad de BA a mayores alturas. Si bien la cantidad de biomasa aérea depende de varios factores como la energía solar recibida por la planta, la humedad, los niveles de CO₂, la disponibilidad de nutrientes, la temperatura, etc. el estudio de Malhi et al. 2017 nos indica que esta reducción de la BA se debe principalmente a que la productividad primaria bruta (PPB) disminuye conforme aumenta la altura.

68) y Calderón et al. (2020, 10) no encontraron diferencias significativas de este reservorio con el incremento de la elevación, sin embargo estudios como el de Nottingham et al. (2015, 909) menciona que el COS incrementa significativamente con la elevación. No obstante, encontramos diferencias significativas del COS entre el bosque y el páramo ($t = -4,62$; $p < 0,001$). En este sentido, Zimmermann et al. (2009, 62) en su estudio realizado en la sección superior del transecto de Tambopata (Andes peruanos), también encontró diferencias entre los ecosistemas analizados, en donde el bosque y la Puna tuvieron menores contenidos de COS (118 y 119 Mg C ha⁻¹ respectivamente) que el páramo (147 Mg C ha⁻¹). Calderón et al. (2020) también reporta valores mayores de COS en el páramo (113 Mg C ha⁻¹) que en el bosque (64 Mg C ha⁻¹). En nuestro estudio el COS fue 42% más alto en el páramo ($226,6 \pm 43,6$ Mg C ha⁻¹) que en el bosque ($159,10 \pm 27,72$ Mg C ha⁻¹), lo cual sugiere que la diferencia de valores de COS entre ecosistemas está relacionada con otros factores distintos a la elevación, como puede ser la tasa de descomposición junto con la tasa de transferencia entre la biomasa subterránea y el suelo (Girardin et al. 2010), entre otros factores que van más allá del alcance de este estudio y requieren de una profundización particular.

Debido a que la zona de Yanacocha sufrió diversos tipos de disturbios (quema, pastoreo, etc.) es difícil comparar con otros sitios en donde solo se reporta un historial de quema. Sin embargo, el reservorio de COS en la reserva, (con un tiempo de recuperación aproximado de 26 años) fue superior a estudios realizados en zonas altas de los Andes. Además de los valores descritos en líneas anteriores sobre los reservorios de COS reportados por Zimmermann et al. (2009, 62), Farley et al. (2013, 24) reporta valores menores al de Yanacocha, para parcelas de estudio con historial de quema, con un tiempo de recuperación entre 9 y 15 años (141 Mg C ha⁻¹) y entre 1 y 3 años (144 Mg C ha⁻¹) años.

Con respecto al contenido de COS en los diferentes perfiles, autores como Muñoz, Faz, y Mermut (2015, 135), Farley et al. (2013, 24) y Zimmermann et al. (2009, 65) indicaron que el contenido de COS fue mayor en el primer perfil y disminuyó con la profundidad, lo cual difiere de nuestro estudio ya que tanto en el bosque como en el páramo, la mayor cantidad de COS se encontró en el segundo perfil analizado (16,5 a 30 cm). Tonnejck y Jongmans (2008, 1072) realizaron estudios en los suelos de bosques y páramos al norte de Ecuador en donde encontraron principalmente que la cantidad de

COS disminuyó con la profundidad, sin embargo, en uno de sus resultados esta relación fue opuesta, atribuyendo la mayor cantidad de COS a mayor profundidad al efecto de biomasa subterránea pasada y a la fauna del suelo.

Conclusiones y recomendaciones

Conclusiones

Si bien existen estudios sobre la captura de carbono en ecosistemas altoandinos en los Andes, la información y estudios sobre su recuperación a través del tiempo a perturbaciones es muy limitada. Yanacocha se encuentra almacenando en sus ecosistemas 235,81 Mg C ha⁻¹, con una productividad de 13,01 Mg C ha⁻¹ año⁻¹, ha tenido un incremento en los reservorios de carbono de su biomasa aérea de 58.23% con respecto a los valores capturados en el año 2012. Por lo tanto, con este estudio se demuestra, que un ecosistema el cual ha sufrido años de intervenciones humanas puede recuperarse, tanto en las dinámicas de su cobertura del suelo como en sus sumideros de carbono en biomasa y suelos.

La bibliografía nos muestra que las regiones montañosas de los Andes son ecosistemas vulnerables a cambios en el uso del suelo y por lo tanto su protección es importante para mantener, recuperar y aumentar los sumideros de carbono como una medida indispensable en la lucha ante el cambio global.

Recomendaciones

Las dinámicas de carbono son complejas y quedan parcialmente explicadas. Es importante, para futuros estudios, incluir datos que complementen lo observado, como por ejemplo temperatura y pluviosidad, datos de pH del suelo, etc.

Por otro lado, teniendo en cuenta la importancia de los ecosistemas andinos y como están vinculados con las medidas de adaptación y mitigación al cambio climático, la regeneración natural de estos ecosistemas es una estrategia de restauración costo-efectiva que permite, entre otras, aumentar la resiliencia de las comunidades, reducir los riesgos ambientales (inundaciones, sequías, deslizamientos, etc.), capturar carbono de la atmósfera, regular temperaturas locales, etc., por lo cual se hace indispensable un análisis de los ecosistemas de los altos andes tropicales para definir/identificar oportunidades de restauración, que traigan beneficios a las personas y a la naturaleza.

Obras citadas

- Adler, Carolina, Philippus Wester, Indra Bhatt, Christian Huggel, Gregory Isarov, Michael Morecroft, Veruska Muccione, y Anjal Prakash. 2022. “Paper 5: Mountains”. En *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the intergovernmental Panel on Climate Change*, 2273–2318. Cambridge, UK and New York, NY, USA: Cambridge University Press. https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/downloads/report/IPCC_AR6_WGII_CCP5.pdf.
- Bush, Mark B., y Miles R. Silman. 2004. “Observations on Late Pleistocene Cooling and Precipitation in the Lowland Neotropics”. *Journal of Quaternary Science* 19 (7): 677–84. <https://doi.org/10.1002/jqs.883>.
- Buytaert, Wouter, Rolando Céleri, Bert De Bièvre, Felipe Cisneros, Guido Wyseure, Jozef Deckers, y Robert Hofstede. 2006. “Human impact on the hydrology of the Andean páramos”. *Earth-Science Reviews* 79 (noviembre): 53–72. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2006.06.002>.
- Buytaert, Wouter, Francisco Cuesta, y Conrado Tobon. 2011. “Potential Impacts of Climate Change on the Environmental Services of Humid Tropical Alpine Regions”. *Global Ecology and Biogeography* 20 (enero): 19–33. <https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2010.00585.x>.
- Calderón, Marco, y Francisco Cuesta. 2018. “Web application for forest dynamics analysis”. CONDESAN.
- Calderón, Marco, Francisco Cuesta, Esteban Pinto, y William Gosling. 2020. “Carbon sequestration rates indicate ecosystem recovery following human disturbance in the equatorial Andes”. *PLOS ONE* 15 (marzo): e0230612. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0230612>.
- Calderón, Marco, Francisco Cuesta, Esteban Pinto, Hugo Romero-Saltos, y Selene Baez. 2014. Monitoreo de contenidos y flujos de carbono en gradientes altitudinales altoandinos. Protocolo 1 - Versión 1. <https://doi.org/10.13140/2.1.3933.5365>.
- Cancino, Jorge. 2006. *Dendrometría básica*. Universidad de Concepción. Facultad de Ciencias Forestales. Departamento manejo de Bosques y Medio Ambiente. http://repositorio.udec.cl/bitstream/11594/407/2/Dendrometria_Basica.pdf.
- Chave, Jerome., C. Andalo, S. Brown, M. A. Cairns, J. Q. Chambers, D. Eamus, H. Fölster, et al. 2005. “Tree Allometry and Improved Estimation of Carbon Stocks and Balance in Tropical Forests”. *Oecologia* 145 (1): 87–99. <https://doi.org/10.1007/s00442-005-0100-x>.
- Chazdon, Robin, Susan Letcher, Michiel van Breugel, Miguel Martinez-Ramos, Frans Bongers, y Bryan Finegan. 2007. “Rates of change in tree communities of secondary Neotropical forests following major disturbances”. *Philosophical*

- transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological sciences 362 (marzo): 273–89. <https://doi.org/10.1098/rstb.2006.1990>.
- Coomes, David, y Robert Allen. 2007. “Mortality and Tree-Size Distributions in Natural Mixed-Age Forests”. *Journal of Ecology* 95 (1): 27–40. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2745.2006.01179.x>.
- Cuesta Camacho, Francisco. 2019. *Global Environmental Changes in the High Tropical Andes*. <https://dare.uva.nl/search?identifier=c97e30b0-90d7-4363-9d33-50d288089712>.
- Duchicela, Sisimac, Francisco Cuesta, Carolina Tovar, Priscilla Muriel, Ricardo Jaramillo, Edison Salazar, y Esteban Pinto. 2021. “Microclimatic Warming Leads to a Decrease in Species and Growth Form Diversity: Insights From a Tropical Alpine Grassland”. *Frontiers in Ecology and Evolution* 9. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fevo.2021.673655>.
- Duque, Alvaro, Miguel Peña, Francisco Cuesta, Sebastián González-Caro, Peter Kennedy, Oliver Phillips, Marco Calderón-Loor, et al. 2021. “Mature Andean Forests as Globally Important Carbon Sinks and Future Carbon Refuges”. *Nature Communications* 12 (1): 2138. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-22459-8>.
- Farley, Kathleen, Leah L. Bremer, Carol P. Harden, y James Hartsig. 2013. “Changes in Carbon Storage under Alternative Land Uses in Biodiverse Andean Grasslands: Implications for Payment for Ecosystem Services”. *Conservation Letters* 6 (1): 21–27. <https://doi.org/10.1111/j.1755-263X.2012.00267.x>.
- Flores-Ruiz, Eric, María Guadalupe Miranda-Navales, y Miguel Ángel Villasís-Keever. 2017. “El protocolo de investigación VI: cómo elegir la prueba estadística adecuada. Estadística inferencial”. *Revista Alergia México* 64 (3): 364–70. <https://doi.org/10.29262/ram.v64i3.304>.
- Fox, J., & Weisberg, S. (2020). *car: Companion to Applied Regression*. [R package]. Retrieved from <https://cran.r-project.org/package=car>
- Fundación Jocotoco. s. f. “Reserva Yanacocha”. Accedido 19 de noviembre de 2021. <https://www.jocotoco.org/wb/ES/Yanacocha>.
- Gallucci, M. (2019). *GAMLj: General analyses for linear models*. [jamovi module]. Retrieved from
- Gibbon, Adam, Miles Silman, Yadvinder Malhi, Joshua Fisher, Patrick Meir, Michael Zimmermann, Greta Dargie, William Farfan, y Karina Garcia. 2010. “Ecosystem Carbon Storage Across the Grassland–Forest Transition in the High Andes of Manu National Park, Peru | SpringerLink”. *Ecosystems*. <https://doi.org/10.1007/s10021-010-9376-8>.
- Girardin, Cécile Aurélie Julie, Yadvinder Malhi, Luiz Aragão, M. Mamani, Walter. Huaraca Huasco, Liliana. Durand, Kenneth. J. Feeley, et al. 2010. “Net Primary Productivity Allocation and Cycling of Carbon along a Tropical Forest Elevational Transect in the Peruvian Andes”. *Global Change Biology* 16 (12): 3176–92. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2010.02235.x>.

- Girardin, Cécile, William Farfan-Rios, Karina García-Cabrera, Kenneth Feeley, Peter Jørgensen, Alejandro Araujo-Murakami, Leslie Perez, et al. 2014. “Spatial patterns of above-ground structure, biomass and composition in a network of six Andean elevation transects”. *Plant Ecology & Diversity* 7 (abril). <https://doi.org/10.1080/17550874.2013.820806>.
- Granizo, Tarsicio, Cecilia Pacheco, Cecilia Ribadeneira, Mauricio Guerrero, y Luis Suarez, eds. 2002. Libro rojo de las aves del Ecuador. SIMBIOE.
- Guariguata, Manuel R, y Rebecca Ostertag. 2001. “Neotropical Secondary Forest Succession: Changes in Structural and Functional Characteristics”. *Forest Ecology and Management* 148 (1): 185–206. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(00\)00535-1](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(00)00535-1).
- Hammer, Øyvind, David.A.T. Harper, y Paul.D Ryan. 2001. “Past: Paleontological Statistics Software Package for Education and Data Analysis”. *Palaeontologia Electronica*.
- Homeier, Juergen, y Christoph Leuschner. 2021. “Factors controlling the productivity of tropical Andean forests: Climate and soil are more important than tree diversity”. *Biogeosciences* 18 (marzo): 1525–41. <https://doi.org/10.5194/bg-18-1525-2021>.
- Hribljan, John, Esteban Suarez, Katherine Heckman, Erik Lilleskov, y Rodney Chimner. 2016. “Peatland carbon stocks and accumulation rates in the Ecuadorian páramo”. *Wetlands Ecology and Management* 24 (abril). <https://doi.org/10.1007/s11273-016-9482-2>.
- IPCC. 2018. Resumen para responsables de políticas. En: Calentamiento global de 1,5 °C, Informe especial del IPCC sobre los impactos del calentamiento global de 1,5 oC con respecto a los niveles preindustriales y las trayectorias correspondientes que deberían seguir las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero, en el contexto del reforzamiento de la respuesta mundial a la amenaza del cambio climático, el desarrollo sostenible y los esfuerzos por erradicar la pobreza. Editado por Valérie Masson-Delmotte, Panmao Zhai, Hans-Otto Pörtner, Debra Roberts, Jim Skea, y Priyadarshi Shukla. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/09/IPCC-Special-Report-1.5-SPM_es.pdf.
- . 2021. Summary for Policymakers. En: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Editado por V Masson Delmotte, P Zhai, A Pirani, S Connors, C Péan, Y Chen, L Goldfarb, y M Gomis. Cambridge University Press. In press. https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_SPM_final.pdf.
- . 2022. “Working group III contribution to the IPCC sixth assessment report: Technical Summary”. En *Sixth assessment report (AR6)*. Editado por: Arnulf Jäger-Waldau, Tek Sapkota. https://report.ipcc.ch/ar6/wg3/IPCC_AR6_WGIII_Full_Report.pdf.

- Llerena-Zambrano, Melissa, Jenny C. Ordoñez, Luis D. Llambí, Masha van der Sande, Esteban Pinto, Laura Salazar, y Francisco Cuesta. 2021. “Minimum temperature drives community leaf trait variation in secondary montane forests along a 3000-m elevation gradient in the tropical Andes”. *Plant Ecology & Diversity* 14 (1–2): 47–63. <https://doi.org/10.1080/17550874.2021.1903604>.
- Malhi, Yadvinder, Cécile A. J. Girardin, Gregory R. Goldsmith, Christopher E. Doughty, Norma Salinas, Daniel B. Metcalfe, Walter Huaraca Huasco, et al. 2017. “The Variation of Productivity and Its Allocation along a Tropical Elevation Gradient: A Whole Carbon Budget Perspective”. *New Phytologist* 214 (3): 1019–32. <https://doi.org/10.1111/nph.14189>.
- McCune, B, JB Grace, y Urban DL. 2002. *Analysis of Ecological Communities*. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology - J EXP MAR BIOL ECOL. Vol. 289. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology. OR-USA: MJM Software Design. [https://doi.org/10.1016/S0022-0981\(03\)00091-1](https://doi.org/10.1016/S0022-0981(03)00091-1).
- Metcalfe, Daniel. 2006. “Cálculo de dinámicas de raíz en ecosistemas tropicales. Manual de campo.” Pan-Amazonia. [http://www.rainfor.org/upload/ManualsSpanish/Roots_spanish\[1\].pdf](http://www.rainfor.org/upload/ManualsSpanish/Roots_spanish[1].pdf).
- Mishra, Prabhaker, Chandra M Pandey, Uttam Singh, Anshul Gupta, Chinmoy Sahu, y Amit Keshri. 2019. “Descriptive Statistics and Normality Tests for Statistical Data”. *Annals of Cardiac Anaesthesia* 22 (1): 67–72. https://doi.org/10.4103/aca.ACA_157_18.
- Moser, G., M. Röderstein, N. Soethe, D. Hertel, y C. Leuschner. 2008. “Altitudinal Changes in Stand Structure and Biomass Allocation of Tropical Mountain Forests in Relation to Microclimate and Soil Chemistry”. En *Gradients in a Tropical Mountain Ecosystem of Ecuador*, editado por Erwin Beck, Jörg Bendix, Ingrid Kottke, Franz Makeschin, y Reinhard Mosandl, 229–42. *Ecological Studies*. Berlin, Heidelberg: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-540-73526-7_22.
- Munoz, M. A., Angel Faz, y Ahmet R. Mermut. 2015. “Soil Carbon Reservoirs at High-Altitude Ecosystems in the Andean Plateau”. En *Climate Change Impacts on High-Altitude Ecosystems*, editado por Münir Öztürk, Khalid Rehman Hakeem, I. Faridah-Hanum, y Recep Efe, 135–53. Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-12859-7_4.
- Myers, Norman, Russell A. Mittermeier, Cristina G. Mittermeier, Gustavo A. B. da Fonseca, y Jennifer Kent. 2000. “Biodiversity Hotspots for Conservation Priorities”. *Nature* 403 (6772): 853–58. <https://doi.org/10.1038/35002501>.
- Nottingham, Andrew T., Jeanette Whitaker, Benjamin L. Turner, Norma Salinas, Michael Zimmermann, Yadvinder Malhi, y Patrick Meir. 2015. “Climate Warming and Soil Carbon in Tropical Forests: Insights from an Elevation Gradient in the Peruvian Andes”. *BioScience* 65 (9): 906–21. <https://doi.org/10.1093/biosci/biv109>.
- Ordoñez, Jenny, Francisco Cuesta, Antonella Bernardi, Esteban Pinto. En revisión, “Tree mortality, recruitment, and growth in Andean tropical mountain forests along a

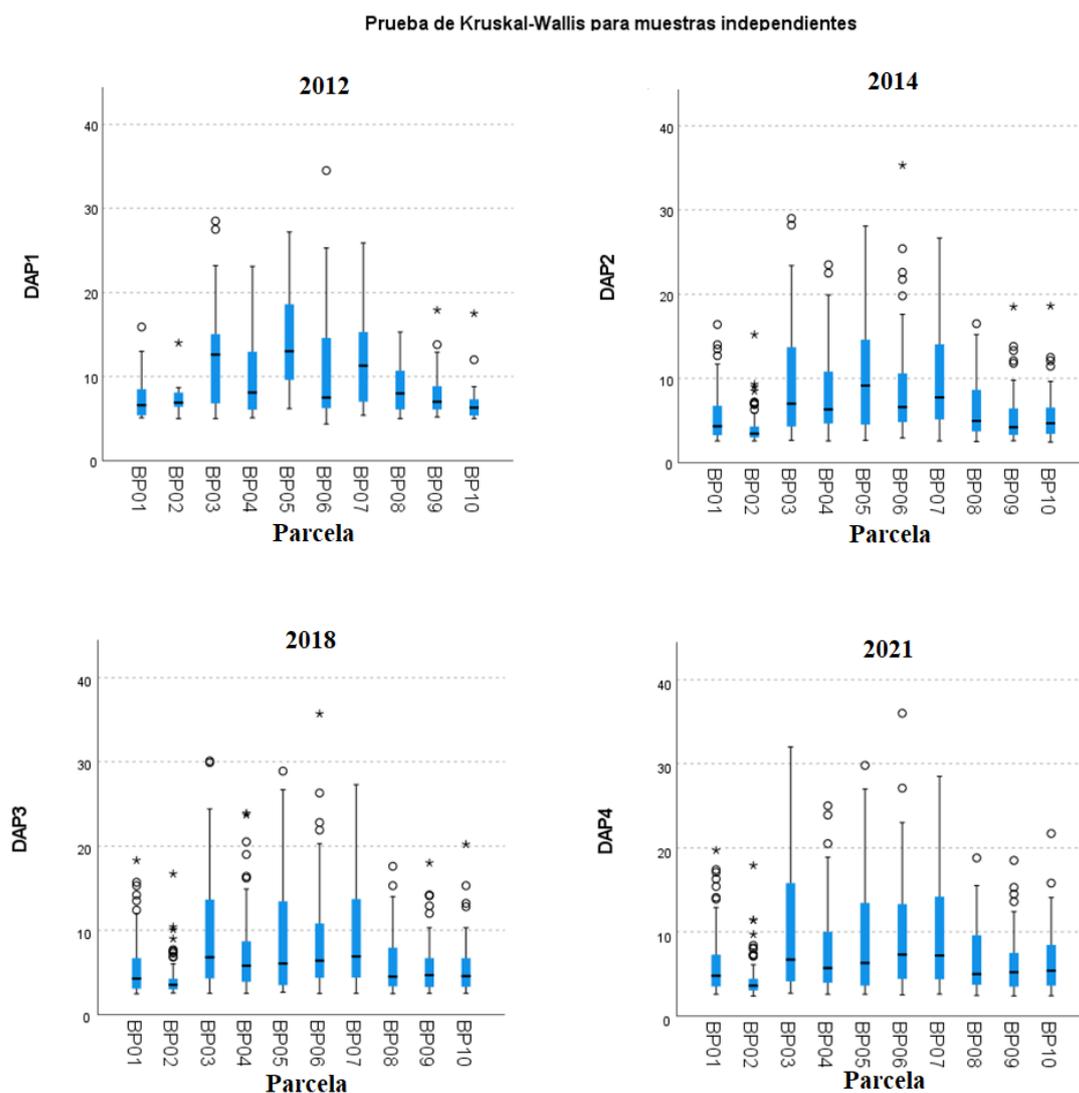
- 3000 m elevation gradient“. Sometido a *Forest Ecology and Management* en Julio 2022
- Pan, Yude, Richard Birdsey, Jingyun Fang, Richard Houghton, Pekka Kauppi, Werner Kurz, Oliver Phillips, et al. 2011. “A Large and Persistent Carbon Sink in the World’s Forests”. *Science* (New York, N.Y.) 333: 988–93. <https://doi.org/10.1126/science.1201609>.
- Peng, Yunke, Keith J. Bloomfield, y Iain Colin Prentice. 2020. “A Theory of Plant Function Helps to Explain Leaf-Trait and Productivity Responses to Elevation”. *New Phytologist* 226 (5): 1274–84. <https://doi.org/10.1111/nph.16447>.
- Pinto, Esteban, Francisco Cuesta, Antonella Bernardi, Mellisa LLerena, Álvaro Perez, Masha van der Sande, William Gosling, Kevin S. Burgess. En revisión. “Forest structure, composition and above-ground carbon stocks reveal rapid ecosystem regeneration of secondary forests along a 3000 m elevation gradient in the Ecuadorian Andes”. Sometido a *Plant Ecology and Diversity* en Agosto 2022.
- Pinto, Esteban, y Francisco Cuesta. 2019. *Monitoreo de Biodiversidad, Contenidos de Carbono, Productividad y Rasgos Funcionales en Bosques Montanos*. Proyecto EcoAndes. Condesan. Quito, Ecuador.
- R Core Team (2021). *R: A Language and environment for statistical computing*. (Version 4.0) [Computer software]. Retrieved from <https://cran.r-project.org>. (R packages retrieved from MRAN snapshot 2021-04-01).
- Ramsay, P. M., y E. R. B. Oxley. 1997. “The growth form composition of plant communities in the ecuadorian páramos”. *Plant Ecology* 131 (2): 173–92. <https://doi.org/10.1023/A:1009796224479>.
- Réjou-Méchain, Maxime, Ariane Tanguy, Camille Piponiot, Jérôme Chave, y Bruno Héroult. 2017. “Biomass: An r Package for Estimating above-Ground Biomass and Its Uncertainty in Tropical Forests”. *Methods in Ecology and Evolution* 8 (9): 1163–67. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.12753>.
- Román-Cuesta, R. M., N. Salinas, H. Asbjornsen, I. Oliveras, V. Huaman, Y. Gutiérrez, L. Puelles, et al. 2011. “Implications of Fires on Carbon Budgets in Andean Cloud Montane Forest: The Importance of Peat Soils and Tree Resprouting”. *Forest Ecology and Management* 261 (11): 1987–97. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2011.02.025>.
- Santander, Tatiana, Pool Segarra, Jessica Solórzano, y Rolando Hipo. 2015. “Informe Técnico Base: Ampliación de estudios técnicos de acuerdo a la nueva delimitación para la declaratoria de Nono Pichán Alambi Tandayapa como Área Protegida Metropolitana”. Informe Técnico. Quito, Ecuador: Aves y Conservación y Secretaría de Ambiente DMQ. http://www7.quito.gob.ec/mdmq_ordenanzas/Proyectos%20Ordenanzas/459/IC-O-2018-395.pdf.
- The jamovi project (2021). *jamovi*. (Version 2.2) [Computer Software]. Retrieved from <https://www.jamovi.org>.

- Tovar, Carolina, Andrea F. Carril, Alvaro G. Gutiérrez, Antje Ahrends, Lluís Fita, Pablo Zaninelli, Pedro Flombaum, et al. 2022. “Understanding Climate Change Impacts on Biome and Plant Distributions in the Andes: Challenges and Opportunities”. *Journal of Biogeography* 49 (8): 1420–42. <https://doi.org/10.1111/jbi.14389>.
- Tonneijck, F. H., y A. G. Jongmans. 2008. “The Influence of Bioturbation on the Vertical Distribution of Soil Organic Matter in Volcanic Ash Soils: A Case Study in Northern Ecuador”. *European Journal of Soil Science* 59 (6): 1063–75. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2008.01061.x>.
- Urrutia, Rocío, y Mathias Vuille. 2009. “Climate Change Projections for the Tropical Andes Using a Regional Climate Change Model: Temperature and Precipitation Simulations for the 21st Century”. *Journal of Geophysical Research* 114 (enero). <https://doi.org/10.1029/2008JD011021>.
- Vuille, Mathias, Mark Carey, Christian Huggel, Wouter Buytaert, Antoine Rabatel, Dean Jacobsen, Alvaro Soruco, et al. 2018. “Rapid Decline of Snow and Ice in the Tropical Andes – Impacts, Uncertainties and Challenges Ahead”. *Earth-Science Reviews* 176 (enero): 195–213. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.09.019>.
- Weiskopf, Sarah R., Madeleine A. Rubenstein, Lisa G. Crozier, Sarah Gaichas, Roger Griffis, Jessica E. Halofsky, Kimberly J. W. Hyde, et al. 2020. “Climate Change Effects on Biodiversity, Ecosystems, Ecosystem Services, and Natural Resource Management in the United States”. *Science of The Total Environment* 733 (septiembre): 137782. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137782>.
- Yadav, Suniti. 2018. “Correlation analysis in biological studies”. *Journal of the Practice of Cardiovascular Sciences*, 4, , 116–21. https://doi.org/10.4103/jpcs.jpcs_31_18.
- Zimmermann, Michael, Patrick Meir, Miles Silman, Anna Fedders, Adam Gibbon, Yadvinder Malhi, Dunia Urrego, et al. 2009. “No Differences in Soil Carbon Stocks Across the Tree Line in the Peruvian Andes”. *Ecosystems* 13: 62–74. <https://doi.org/10.1007/s10021-009-9300-2>.

Anexos

Anexo 1: Corrección de los datos de altura de los árboles de las parcelas permanentes de Yanacocha

a.-. Pruebas de Kruskal-Wallis para agrupación de parcelas.



Grupos establecidos de parcelas

GRUPOS	PARCELA
Grupo 1	BP01; BP02; BP08; BP09; BP10
Grupo 2	BP03; BP04; BP05; BP06; BP07

b.- Cantidad de datos totales y el 30%, por grupo por censo y por cuartiles, para la corrección de alturas, tomando en cuenta el DAP.

		FRECUENCIAS											
Cuartiles %	Censo 1			Censo 2			Censo 3			Censo 4			
	RANGO/ ESTRATOS	Frec.	30%	RANGO/ ESTRATOS	Frec.	30%	RANGO/ ESTRATOS	Frec.	30%	RANGO/ ESTRATOS	Frec.	30%	
GRUPO 1	0-24.99	DAP <= 5.59	35	11	DAP <= 3.27	100	30	DAP <= 3.139	118	35	DAP <= 3.379	94	28
	25-49.99	DAP >= 5.60 & DAP <= 6.69	42	13	DAP >= 3.28 & DAP <= 4.20	103	31	DAP >= 3.14 & DAP <= 4.06	115	35	DAP >= 3.38 & DAP <= 4.49	97	29
	50-74.99	DAP >= 6.70 & DAP <= 8.49	38	11	DAP >= 4.21 & DAP <= 6.49	106	32	DAP >= 4.07 & DAP <= 6.57	120	36	DAP >= 4.50 & DAP <= 7.29	93	28
	75-100	DAP >= 8.50	40	12	DAP >= 6.50	106	32	DAP >= 6.58	119	36	DAP >= 7.3	98	29
GRUPO 2	0-24.99	DAP <= 6.59	34	10	DAP <= 4.69	52	16	DAP <= 3.99	57	17	DAP <= 4.09	55	17
	25-49.99	DAP >= 6.6 & DAP <= 10.69	34	10	DAP >= 4.70 & DAP <= 6.99	50	15	DAP >= 4 & DAP <= 6.29	60	18	DAP >= 4.1 & DAP <= 6.59	51	15
	50-74.99	DAP >= 10.7 & DAP <= 15.39	35	11	DAP >= 7 & DAP <= 13.59	53	16	DAP >= 6.3 & DAP <= 12.09	64	19	DAP >= 6.6 & DAP <= 13.69	54	16
	75-100	DAP >= 15.40	34	10	DAP >= 13.6	52	16	DAP >= 12.1	60	18	DAP >= 13.7	53	16

c.- Coeficientes y modelos utilizados para la corrección de alturas mediante la Función *HD Model*.

		2012	2014	2018	2021
Grupo 1	Modelo	Log 2	Log 2	Log 1	Log 2
	RSE	0,6585	0,9669	0,8618	1,0105
	Sesgo	8e-04	0,0034	0,0036	0,0043
Grupo 2	Modelo	Log 3	Log 1	Log 3	Log 2
	RSE	1,2757	1,5653	1,6039	1,5117
	Sesgo	0,0074	0,0026	0,0076	0,013

Anexo 2: Análisis de componentes principales

Component Loadings

	Component		Uniqueness
	1	2	
P	0.961		0.0610
Na	0.865		0.2231
K	0.909	-0.378	0.0305
Ca	0.837	-0.466	0.0825
Al	0.923		0.1443
Fe		0.988	0.0227
Mg		0.984	0.0290

Note. 'varimax' rotation was used

Component Statistics

Summary

Component	SS Loadings	% of Variance	Cumulative %
1	4.05	57.9	57.9
2	2.35	33.6	91.5

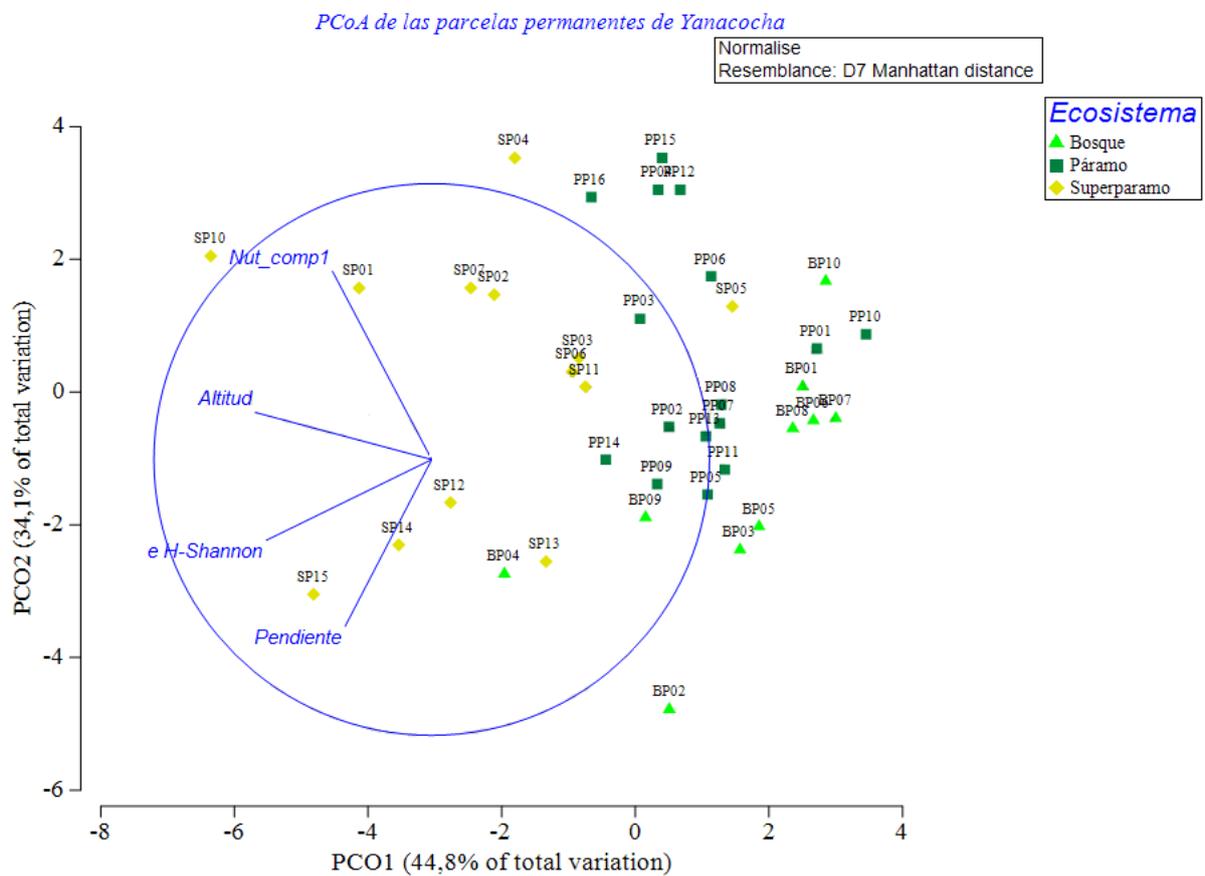
Inter-Component Correlations

	1	2
1	—	0.00
2		—

Anexo 3: Análisis de coordenadas principales.

Correlación múltiple entre los ejes del PCoA y las variables ambientales analizadas.

	Altitud	Pendiente	e H-Shannon	Nut_comp1
PCO1 (44,78% of total variation)	-0.634	-0.311	-0.594	-0.357
PCO2 (34,1% of total variation)	0.170	-0.605	-0.292	0.682
PCO3 (16,4% of total variation)	0.651	-0.357	-0.156	-0.565
PCO4 (14,58% of total variation)	0.305	0.548	-0.689	0.130
PCO5 (5,52% of total variation)	0.120	-0.219	0.014	-0.134



PCoA realizado para las 39 parcelas permanentes de Yanacocha.

Anexo 4: Modelos lineales generalizados

Biomasa aérea

Fixed Effects Parameter Estimates

Names	Effect	Estimate	SE	95% Confidence Interval		β	df	t	p
				Lower	Upper				
(Intercept)	(Intercept)	0.70788	0.06946	0.56656	0.8492	0.000	33	10.19	< .001
Ecosistema1	Superparamo - Bosque	0.98991	0.58691	-0.20416	2.1840	1.846	33	1.69	0.101
Ecosistema2	paramo - Bosque	0.56084	0.35831	-0.16815	1.2898	1.046	33	1.57	0.127
Elevación	Elevación	-0.00286	0.00136	-0.00562	-9.54e-5	-0.877	33	-2.10	0.043
BA_2021	BA_2021	0.00841	0.00616	-0.00412	0.0209	0.278	33	1.37	0.181
SHANNON	SHANNON	-0.18578	0.07318	-0.33467	-0.0369	-0.390	33	-2.54	0.016

Assumption Checks

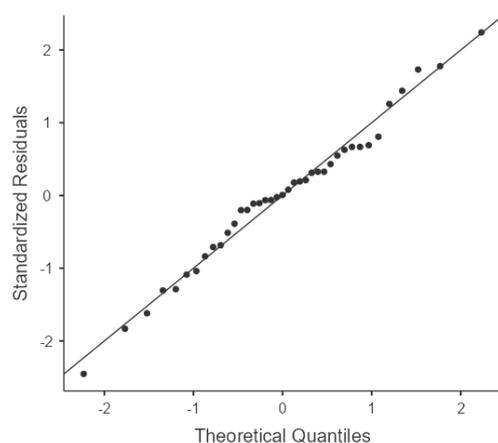
Test for Homogeneity of Residual Variances (Levene's)

F	df1	df2	p
1.27	2	36	0.293

Test for Normality of residuals

Test	Statistics	p
Kolmogorov-Smirnov	0.112	0.668
Shapiro-Wilk	0.984	0.855

Q-Q Plot



Carbono orgánico del suelo

Fixed Effects Parameter Estimates

Names	Effect	Estimate	SE	95% Confidence Interval		β	df	t	p
				Lower	Upper				
(Intercept)	(Intercept)	204.914	5.253	194.238	215.59	0.000	34	39.01	< .001
Ecosistema1	Superparamo - Bosque	42.488	14.487	13.046	71.93	0.861	34	2.93	0.006
Ecosistema2	paramo - Bosque	56.948	13.730	29.046	84.85	1.153	34	4.15	< .001
C-P	C-P	0.847	0.185	0.472	1.22	0.686	34	4.59	< .001
Nutrientes (P,Na,K,Ca,Al)	Nutrientes (P,Na,K,Ca,Al)	24.794	7.626	9.296	40.29	0.502	34	3.25	0.003

Assumption Checks

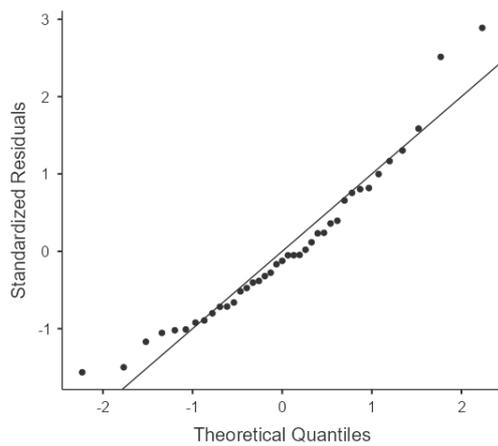
Test for Homogeneity of Residual Variances (Levene's)

F	df1	df2	p
1.16	2	36	0.324

Test for Normality of residuals

Test	Statistics	p
Kolmogorov-Smirnov	0.109	0.705
Shapiro-Wilk	0.941	0.041

Q-Q Plot



Anexo 5: Valores medios por parcela de los contenidos de carbono (Mg C ha⁻¹) y productividad en la biomasa aérea del páramo y los bosques de las 39 parcelas permanentes de la Reserva Yanacocha

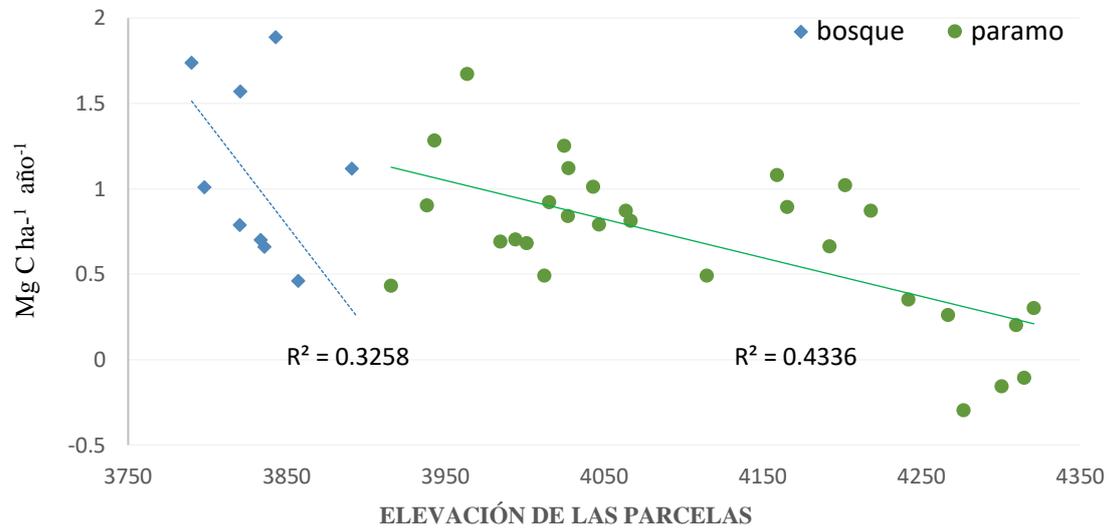
	ID Parcela	Elevación Parcela	Año de Censo				Productividad Mg C ha ⁻¹ año ⁻¹	
			C1- 2012	C2- 2014	C3- 2018	C4- 2021		
Bosque	BP01	3790	14,4	17,5	24	30,1	1,74	
	BP02	3857	5,5	5,9	7,8	9,6	0,46	
	BP03	3891	57	57,5	61,5	67,1	1,12	
	BP04	3894	35,3	36,7	37,8	29,5	-0,65	
	BP05	3798	56,9	60,2	61,7	66	1,01	
	BP06	3835,8	50,9	52,2	55,2	56,9	0,66	
	BP07	3820,6	60	66,3	69,5	74,1	1,57	
	BP08	3820,4	20,3	23,2	25,7	27,4	0,79	
	BP09	3833,4	15,1	16,9	19,3	21,4	0,7	
	BP10	3843	15,4	21,7	27,2	32,4	1,89	
Media (±1 DE)			33,1 (21,3)	35,81 (21,6)	38,97 (21,4)	41,45 (22,4)	0,93 (0,7)	
Páramo	PP01	4027,6	2,96	3,93		10,49	0,84	
	PP02	4043,2	2,09	3,03		11,14	1,01	
	PP03	4063,9	2,75	2,98		10,55	0,87	
	PP04	4015,5	2,86	6,39		11,13	0,92	
	PP05	4012,6	3,41	4,12		7,8	0,49	
	PP06	4027,9	2,65	6,6		12,75	1,12	
	PP07	3984,7	2,18	4,05		8,35	0,69	
	PP08	3963,8	4,47	1,87		19,48	1,67	
	PP09	3943,2	3,44	0,75		15	1,28	
	PP10	3938,5	2,6	4,1		10,73	0,9	
	PP11	3915,8	3,4	4,21		7,31	0,43	
	PP12	4001,3	3,65	5,13		9,74	0,68	
	PP13	3994,4	3,44	4		9,79	0,7	
	PP14	4025,2	1,76	4,11		13,02	1,25	
	PP15	4047,2	3,12	1,36		10,23	0,79	
	PP16	4067,1	4,25	4,57		11,51	0,81	
Superpáramo	SP01	4242	6,31	11,75		9,46	0,35	
	SP02	4218,4	3,77	13		11,63	0,87	
	SP03	4202,1	4,77	5,61		13,91	1,02	
	SP04	4192,5	6,52	13,01		12,48	0,66	
	SP05	4165,7	4,71	5,88		12,76	0,89	
	SP06	4115	4,8	12,14		9,23	0,49	
	SP07	4159,2	2,46	3,95		12,21	1,08	
	SP10	4267,1	6,89	21,25		9,23	0,26	
	SP11	4277	9,15	9,75		6,41	-0,3	
	SP12	4310	5,59	6,5		7,42	0,2	
	SP13	4321	5,31	15		8,05	0,3	
	SP14	4301	6,26	14		4,81	-0,16	
	SP15	4315	6,36	14,68		5,33	-0,11	
	Media (±1 DE)			4,20 (1,76)	7,16 (5,05)		10,41 (3,03)	0,69 (0,45)
	Media 39 parcelas (±1 DE)			11.61 (16.53)	14.51 (17.03)		18.37 (17.74)	0.75 (0.54)

Anexo 6: Valores medios por parcela de los contenidos de carbono (Mg C ha⁻¹) y nutrientes almacenado en el suelo del páramo y los bosques de las 39 parcelas permanentes de Yanacocha

	ID Parcela	Elevación Parcela	Perfil y año de Censo		TOTAL Σ 2021	
			P1- 2021	P2- 2021		
Bosque	BP01	3790	64,94	89,66	154,60	
	BP02	3857	92,68	109,33	202,01	
	BP03	3891	52,15	66,91	119,06	
	BP04	3894	64,82	101,99	166,81	
	BP05	3798	67,77	79,39	147,17	
	BP06	3835,8	69,87	84,77	154,64	
	BP07	3820,6	70,56	82,38	152,94	
	BP08	3820,4	48,32	137,24	185,56	
	BP09	3833,4	68,63	108,08	176,72	
	BP10	3843	50,35	81,13	131,48	
Media (\pm DE)			65,01 (12,91)	94,09 (20,33)	159,10 (24,72)	
Páramo	PP01	4027,6	89,658	141,942	231,60	
	PP02	4043,2	102,167	75,066	177,23	
	PP03	4063,9	95,995	99,438	195,43	
	PP04	4015,5	101,194	129,572	230,77	
	PP05	4012,6	86,643	83,379	170,02	
	PP06	4027,9	92,453	115,482	207,93	
	PP07	3984,7	53,222	173,004	226,23	
	PP08	3963,8	138,602	214,627	353,23	
	PP09	3943,2	147,230	138,835	286,07	
	PP10	3938,5	142,687	154,567	297,25	
	PP11	3915,8	121,185	129,631	250,82	
	PP12	4001,3	93,329	93,762	187,09	
	PP13	3994,4	103,136	139,179	242,31	
	PP14	4025,2	84,693	112,329	197,02	
	PP15	4047,2	104,777	154,105	258,88	
	PP16	4067,1	109,518	119,941	229,46	
Superpáramo	SP01	4242	126,897	109,831	236,73	
	SP02	4218,4	130,071	144,489	274,56	
	SP03	4202,1	104,109	137,398	241,51	
	SP04	4192,5	114,969	151,824	266,79	
	SP05	4165,7	68,692	85,659	154,35	
	SP06	4115	74,543	85,488	160,03	
	SP07	4159,2	94,266	111,793	206,06	
	SP10	4267,1	97,259	110,770	208,03	
	SP11	4277	90,763	163,524	254,29	
	SP12	4310	79,592	117,021	196,61	
	SP13	4321	86,438	118,837	205,27	
	SP14	4301	91,650	110,817	202,47	
	SP15	4315	82,640	140,805	223,45	
	Media (\pm DE)			100,3 (22)	126,3 (30,4)	226,6 (43,6)
	Media 39 parcelas (\pmDE)			91,24 (25,28)	118,05 (31,33)	209,29 (49,37)

	% N			% C			C:N			C:P		
	P1	P2	TOTAL	P1	P2	TOTAL	P1	P2	TOTAL	P1	P2	TOTAL
Bosque	0.53	0.36	0.44	7.16	5.18	6.17	13.47	14.59	13.92	173.86	109.34	147.14
	0.11	0.07	0.06	1.3	1.08	0.82	1.56	0.68	0.87	73.38	38.92	46.95
Páramo	0.61	0.37	0.49	8.69	5.49	7.09	14.34	14.96	14.61	164.99	116.54	150.7
	0.11	0.08	0.7	1.4	1.14	0.9	0.91	0.96	0.84	52.9	44.8	38.19

Anexo 7: Relación de la elevación con la productividad de la biomasa aérea de las 39 parcelas permanentes de Yanacocha.



Anexo 8: Detalles del bosque de Yanacocha.**Relación arboles vivos y árboles muertos 2014-2021**

Rango diamétrico	2014			2021		
	# Vivos (%)	# Muertos (%)	# Reclutas (%)	# Vivos (%)	# Muertos (%)	# Reclutas (%)
1	262	42 (16.03)	142 (54)	255	30 (11.76)	14 (5.49)
2	205	15 (7.32)	17 (8.29)	189	11 (5.82)	1 (0.53)
3	78	2 (2.56)	0 (0)	86	1 (1.16)	0 (0)
4	15	0 (0)	0 (0)	18	1 (5.56)	0 (0)

Cantidad de tallos por parcela del bosque de Yanacocha

Párcelas	Nro árboles / parcela 2012	Nro árboles / parcela 2014	Nro árboles / parcela 2018	Nro árboles / parcela 2021	No tallo principal 2021	No Tallos múltiples 2021
BP01	69	65	76	70	28	42
BP02	84	72	83	76	48	28
BP03	39	36	36	33	19	14
BP04	45	37	44	41	21	20
BP05	38	37	44	42	29	13
BP06	31	28	29	26	22	4
BP07	60	55	62	61	30	31
BP08	84	62	74	60	28	32
BP09	76	71	73	59	42	17
BP10	94	100	96	80	45	35
Total general	620	563	617	548	57%	43%

548 árboles en 1000 m²

Densidad por hectárea = 5480 árboles para el año 2021