Universidad Andina Simón Bolívar
Sede Ecuador

Área de Ambiente y Sustentabilidad

Maestría en Cambio Climático, Sustentabilidad y Desarrollo

# Análisis espacial del almacenamiento de carbono orgánico en las turberas altoandinas del humedal Jatunhuayco, Área de Conservación Hídrica Antisana, Ecuador

Gabriela Raquel Núñez Caiza
Tutor: Santiago Bonilla Bedoya

Quito, 2026

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



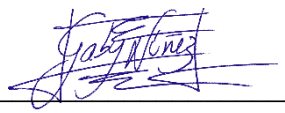

Para usar esta obra, deben respetarse los términos de esta licencia

# Cláusula de cesión de derecho de publicación

Yo, Gabriela Raquel Núñez Caiza, autora del trabajo intitulado “Análisis espacial del almacenamiento de carbono orgánico en las turberas altoandinas del humedal Jatunhuayco, Área de Conservación Hídrica Antisana, Ecuador”, 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 24 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.

08 de mayo de 2026

Firma: 

# Resumen

Las turberas altoandinas constituyen importantes reservas de carbono a nivel mundial. Estos sistemas aportan servicios ecosistémicos esenciales para el bienestar humano, como la regulación climática global y local, al capturar el carbono de la atmósfera y almacenarlo en el suelo por cientos a miles de años. La conjunción de suelos orgánicos, condiciones de saturación hídrica prolongada y vegetación adaptada favorece esta particularidad. Sin embargo, las presiones sobre su sistema natural y funcionamiento ligadas a la intervención antrópica y cambio climático, generan el riesgo de transformarlas en fuentes de carbono, contribuyendo al calentamiento global. En este contexto, el presente estudio se centra en las turberas del humedal Jatunhuayco ubicado en el Área de Conservación Hídrica Antisana, Ecuador, con el objetivo de determinar el almacenamiento de carbono orgánico del suelo en una zona previamente sometida a degradación, a más de una década después de la implementación de medidas de conservación y restauración. Con este fin, se analizó el carbono orgánico y densidad aparente de 72 muestras de suelo recolectadas en 36 puntos en una parcela de 2 500 $m^2$. Los resultados indican que las turberas examinadas contienen en promedio 232,48 Mg C $ha^{-1}$, un valor característico para sistemas de páramo. Asimismo, se determinó que los factores de mayor incidencia sobre la acumulación de carbono son la saturación hídrica del suelo, la cobertura vegetal y densidad aparente. A escala de detalle, los patrones de almacenamiento presentan variaciones espaciales en cuestión de metros, lo que puntualiza la necesidad de considerar estas diferencias en la aplicación de medidas de restauración específicas según las características y condiciones del terreno.

Palabras clave: turberas, carbono orgánico, densidad aparente, almacenamiento, páramo

Por su amor eterno, a mis queridos padres, Manuel y Martha

A Erwin, mi pedacito de tierra en el vasto pastizal de la vida

A Andreita, por su compañía y apoyo

# Agradecimientos

El presente trabajo se realizó bajo la cooperación con el Centro de Investigación para el Territorio y Hábitat Sostenible (CITEHS) de la Universidad Indoamérica. En este sentido, agradezco al Dr. Santiago Bonilla por permitirme el uso de las instalaciones del CITEHS y su auspicio para la recolección, tratamiento y análisis de las muestras y datos del estudio. Asimismo, agradezco a María Belén Bueñano, Asistente de Investigación del CITEHS por su ayuda y apoyo durante las fases de laboratorio y análisis.

La investigación contó con el auspicio del Fondo para la Protección del Agua (FONAG) a través de la suscripción del convenio ECAP-AT-002-2025. Esta cooperación permitió el ingreso al Área de Conservación Hídrica Antisana y la toma de muestras de suelo en el humedal Jatunhuayco. Mi agradecimiento a Braulio Lahuatte, representante del área de proyectos interinstitucionales del FONAG, por permitirme el acercamiento a esta institución y direccionar el proceso del convenio. A la vez, agradezco de forma especial a Rommel Suntaxi, funcionario del FONAG, por su invaluable asistencia en la tramitación de permisos de ingreso, entrega de información cartográfica y climática y su inmensa ayuda durante la jornada de muestreo.

Me gustaría extender mi gratitud a Isidro Bautista, Manuel y Francisco, guarda páramos del Antisana, por su acompañamiento en las salidas y reconocimiento del área de estudio. En especial, a Don Isidro por su incansable entrega a su trabajo y apoyo en la recolección de muestras, ¡considerando que fue un día lluvioso y de frío invernal extremo! no se cansó, ni paró, solo seguimos trabajando ¡Mil gracias!

A la Universidad Andina Simón Bolívar, a sus profesores y profesoras y a mis compxs, por permitirme acceder a su casa y a sus aulas (virtuales) para aprender y compartir pensamientos, ideologías, experiencias y un momento de vida, que significó una nueva oportunidad para mí. Sin olvidarme de mencionar a William Sacher, super buen profe e investigador, parte de mis escritos resultaron de su visto bueno en los seminarios de tesis.

Finalmente, agradezco a la Doc. Sandra Procel, mi mentora, su impulso me trajo aquí. Mis primeros pasos en la investigación siguieron su instrucción, proponiéndome un mundo de inquietantes por comprender; le estoy infinitamente agradecida.

# Tabla de contenidos

Figuras y tablas ..... 13
Introducción ..... 15
Capítulo primero Enfoque y marco teórico ..... 19
1. Ecología de turberas ..... 19
1.1. Ecosistema páramo: condiciones ambientales ..... 19
1.2. Humedales altoandinos ..... 21
1.3. Turberas ..... 22
2. Suelo y carbono ..... 26
2.1. Suelos orgánicos ..... 26
2.2. Propiedades del suelo relacionadas con el carbono ..... 28
2.2.1. Carbono orgánico del suelo ..... 28
2.2.2. Densidad aparente (BD) ..... 29
3. Carbono, servicios ecosistémicos y socioecosistemas ..... 30
3.1. Almacenamiento de carbono como servicio ecosistémico ..... 30
3.2. Cambio climático e intervención antrópica ..... 31
3.3. Restauración, conservación y manejo sostenible ..... 33
3.4. El páramo como socioecosistema ..... 34
Capítulo segundo Área de estudio y metodología ..... 37
1. Área de estudio ..... 37
1.1. Historia socioecológica ..... 37
1.2. Clima e hidrología ..... 39
1.3. Geología ..... 41
1.4. Suelos: Cobertura y uso ..... 43
2. Metodología ..... 44
2.1. Delimitación de la parcela y diseño de muestreo ..... 45
2.2. Análisis de laboratorio ..... 48
Capítulo tercero Resultados y discusión ..... 51
1. Resultados ..... 51
1.1. Carbono orgánico ..... 51
1.2. Densidad aparente ..... 52

1.3. Carbono orgánico y densidad aparente ..... 54
1.4. Almacenamiento de SOC ..... 55
1.5. Distribución del almacenamiento de SOC ..... 56
2. Discusión ..... 58
Conclusiones ..... 61
Lista de referencias ..... 63
Anexos ..... 73
Anexo 1. Registro de peso húmedo y porcentaje de pérdida previo secado de la muestra 73
Anexo 2. Datos empleados en el cálculo del almacenamiento de SOC en Mg C $ha^{-1}$ ... 74
Anexo 3. Parámetros estadísticos para el cálculo de los modelos de distribución de las variables 75
Anexo 4. Registro fotográfico ..... 78

# Figuras y tablas

Figura 1. Distribución del páramo en los Andes del Norte ..... 20
Figura 2. Humedal del Antisana ..... 22
Figura 3. Principales regiones con presencia de turberas ..... 23
Figura 4. Tipos de turberas de los páramos del Ecuador. ..... 25
Figura 5. Representación esquemática de los conceptos de turbera, turba y suelo orgánico ..... 27
Figura 6. Suelos orgánicos en turberas del Antisana ..... 28
Figura 7. Procesos y factores que controlan el SOC ..... 29
Figura 8. Servicios de la naturaleza por ecosistema ..... 31
Figura 9. Aumento exponencial de emisiones de GEI y de la temperatura media del planeta a partir de la Revolución Industrial (1850). ..... 32
Figura 10. Ubicación del área de estudio. ..... 40
Figura 11. Condiciones climáticas del área de estudio. ..... 41
Figura 12. Litologías de la subcuenca del río Jatunhuayco ..... 42
Figura 13. Distribución de la cobertura del suelo en el ACH Antisana ..... 43
Figura 14. Ecosistemas de páramo en el ACH Antisana y el área de estudio según el sistema de clasificación de ecosistemas del Ecuador continental ..... 44
Figura 15. Parcela y diseño de muestreo en el humedal Jatunhuayco (polígono celeste) ..... 45
Figura 16. Recolección de muestras de suelo. ..... 47
Figura 17. Tratamiento de las muestras de suelo para la determinación de la densidad aparente. ..... 48
Figura 18. Representación estadística del carbono orgánico de 36 muestras de suelo .. 52
Figura 19. Representación estadística de la densidad aparente de 36 muestras de suelo 54
Figura 20. Regresión lineal entre la densidad aparente y carbono orgánico de las muestras analizadas ..... 55
Figura 21. Representación estadística del almacenamiento de SOC ..... 56
Figura 22. Distribución espacial del carbono orgánico del suelo ..... 57

Tabla 1 Puntos de control de la parcela de muestreo ..... 46
Tabla 2 Código y ubicación de las muestras de suelo ..... 46
Tabla 3 Porcentaje de carbono orgánico de las muestras de suelo ..... 51
Tabla 4 Densidad aparente de las muestras analizadas ..... 53
Tabla 5 Almacenamiento de SOC en los 36 puntos de muestreo ..... 55

# Introducción

El cambio climático indica las variaciones en la temperatura media del planeta que generan el calentamiento global y provocan alteraciones en los patrones de precipitación en el mundo. Estas variaciones se relacionan con la emisión de gases de efecto invernadero (GEI) como el dióxido de carbono ($CO_2$) y metano ($CH_4$) hacia la atmósfera que ocasionan el aumento de la temperatura media global (IPCC 2023, 42). Este proceso guarda una estrecha relación con el incremento exponencial de emisiones desde la Revolución Industrial, una época de transformación antrópica que acentuó la intensificación del uso y degradación de los ecosistemas naturales (Jones et al. 2025, 15).

Los ecosistemas son esenciales en la regulación del clima por su participación en el ciclo del carbono al capturar este elemento de la atmósfera y almacenarlo en su estructura por cientos a miles de años. De esta manera, mantienen el equilibrio de carbono en la Tierra, contribuyendo a la estabilización de las condiciones climáticas que favorecen la reproducción de la vida. Los sistemas clave en esta función son las turberas, caracterizadas por contener las mayores reservas de carbono a nivel mundial (Xu et al. 2018, 143). No obstante, son ecosistemas altamente vulnerables al cambio climático debido a que su alteración puede revertir los procesos y convertirlos en emisores de carbono como $CO_2$ y $CH_4$ (Moomaw et al. 2018, 188).

El almacenamiento de carbono en turberas resulta de la acumulación y descomposición ralentizada de materia orgánica en suelos con una permanente saturación hídrica (Suarez, Chimbolema y Jaramillo 2022, 10; Hofstede et al. 2023, 44). Estas condiciones son representativas en áreas polares del hemisferio norte, donde las bajas temperaturas permiten mantener condiciones de anoxia. Sin embargo, las turberas aparecen también en la región tropical debido a las condiciones climáticas e hídricas que favorecen la presencia de zonas anegadas y materia orgánica parcialmente descompuesta (Ribeiro et al. 2021, 500).

En los Andes del Norte, las turberas se forman en humedales de páramo, a grandes altitudes, donde el contexto climático se caracteriza por una precipitación constante que mantiene la saturación del suelo en el que se desarrolla vegetación adaptada a esta condición. En el contexto andino, estos ecosistemas son de valor socioeconómico y cultural para las comunidades debido a que son el principal medio de provisión de

recursos y funciones necesarias para el sostenimiento de la vida, como la regulación hídrica y abastecimiento de agua potable (García et al. 2019, 2). Además, son espacios aprovechados para la agricultura, ganadería y como medios alternativos de energía a las fuentes fósiles (Buytaert et al. 2006, 53; Suarez et al. 2022, 10).

Las turberas altoandinas se distribuyen de forma dispersa en los humedales del páramo tropical, ecosistema presente desde Venezuela hasta el norte de Perú, cuya importancia ecológica contrasta con las crecientes presiones que enfrenta en toda la región andina (Mosquera et al. 2023, 1). El aumento de la temperatura, las alteraciones en los patrones de precipitación y la frecuencia de eventos extremos sumados a la expansión de la frontera agrícola y ganadera, las quemas, minería y plantaciones forestales aceleran la transformación del paisaje y la degradación de los procesos ecológicos (Buytaert, Sevink, y Cuesta 2014; García et al. 2019; Hofstede, Mena-Vásconez, y Suárez Robalino 2023). Entre 1985 y 2022 se registraron 6 370 km² de áreas quemadas en los páramos sudamericanos, con la mayor superficie afectada en Colombia (Obando-Cabrera et al. 2025). En Ecuador, más del 28 % del páramo andino podría verse afectado por la actividad minera, mientras que alrededor del 7,5 % del páramo no incluido en el Sistema Nacional de Áreas Protegidas se encuentra bajo concesiones de minería metálica (Hofstede et al. 2023). Estas presiones comprometen la regulación hídrica, la biodiversidad y la capacidad de almacenamiento de carbono de estos ecosistemas.

Anualmente, se pierden 5 000 $km^2$ de turberas a nivel mundial, lo que representa el 4 % de las emisiones antrópicas de GEI. En la actualidad, el 12 % del ecosistema desaparece debido a la degradación antrópica (UNEP 2022, 10). Esta degradación tiene relación con los cambios en el régimen hidrológico por la modificación del drenaje natural, conversión o remoción de la cubierta vegetal y quema intencionada (Sinclair et al. 2020, 2). Estas presiones provocan el deterioro del sistema y generan alteraciones en el equilibrio del almacenamiento de carbono, ocasionando que se pierdan reservas a una tasa mayor a la de su acumulación en cortos periodos de tiempo (Patiño-Gutiérrez et al. 2024, 2).

La restauración, conservación y manejo sostenible de turberas representa una solución clave basada en la naturaleza para la reducción de emisiones de GEI (Loisel y Gallego-Sala 2022, 5). La recuperación de este ecosistema permite mitigar el cambio climático, contrarrestar la pérdida de biodiversidad y mantener funciones esenciales que sostienen el desarrollo humano (UNEP 2022, 23). La restauración hidrológica constituye una de las acciones de mayor significancia, puesto que permite recuperar las condiciones

de anoxia del suelo, manteniendo su saturación y limitando la descomposición de materia orgánica (Günther et al. 2020, 4). No obstante, este tipo de iniciativas requieren de estudios basados en la cuantificación de su estado y de las propiedades que favorecen el almacenamiento de carbono.

La cuantificación de turberas se relaciona con la estimación del almacenamiento de carbono a través de la medición de las propiedades del suelo como la densidad aparente. Esta propiedad determina el nivel de compactación del suelo y constituye un indicador de degradación; a mayor compactación, mayor densidad aparente y menor capacidad de almacenar carbono (Loisel y Gallego-Sala 2022, 2). Esta propiedad junto con el carbono orgánico del suelo permite determinar la distribución del almacenamiento en turberas, generando información necesaria para evaluar su estado y establecer comparaciones temporales y espaciales. En Ecuador, Hribljan et al. (2016), Comas et al. (2017) e Hribljan et al. (2017) analizaron el carbono orgánico y densidad aparente en suelos de turberas altoandinas considerando puntos específicos del paisaje; encontraron que turberas sometidas a conservación almacenan cantidades significativas de carbono, 42 % mayores a las reservas de otros ecosistemas tropicales.

El humedal Jatunhuayco en el Área de Conservación Hídrica (ACH) Antisana contiene entre sus ecosistemas, turberas altoandinas, las cuales forman parte de la agenda de conservación del FONAG, debido a su aprovechamiento hídrico como fuentes de abastecimiento de agua potable para la ciudad de Quito (alrededor del 25 % de la población) (FONAG 2025). El humedal es administrado por la Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento (EPMAPS) y el FONAG, instituciones que implementan acciones de conservación y restauración orientadas a recuperar el funcionamiento ecológico del ecosistema. Estas medidas incluyen la exclusión del pastoreo mediante cercados, restauración activa con especies nativas, construcción de diques para bloquear antiguos drenajes y favorecer el rehumedecimiento de las turberas, así como obras para reducir la erosión y aporte de sedimentos hacia el río Jatunhuayco.

Estas intervenciones promueven la recuperación gradual de la cobertura vegetal y de las condiciones hidrológicas que sustentan el funcionamiento de las turberas, proporcionando un escenario adecuado para evaluar el almacenamiento de carbono orgánico más de una década después del inicio de las acciones de restauración. En este sentido, la estimación del almacenamiento de carbono en las turberas de páramo no solo contribuye a la contabilización de las reservas de carbono, sino que constituye un indicador del estado ecológico de estos humedales.

Considerando que los páramos constituyen socioecosistemas estratégicos para el Ecuador debido a su capacidad para regular el agua, almacenar carbono y sostener procesos ecológicos de las comunidades rurales y poblaciones urbanas, estos ecosistemas han sido objeto de programas de restauración y conservación con un enfoque hídrico. Sin embargo, la sostenibilidad de estas iniciativas requiere comprender el funcionamiento ecológico de los humedales y turberas que sustentan los servicios ecosistémicos. En este contexto, el almacenamiento de carbono orgánico del suelo constituye un indicador del estado de conservación y funcionamiento de las turberas, debido a que refleja la integridad de sus condiciones hidrológicas y ecológicas. Su alteración no solo implica la liberación de gases de efecto invernadero hacia la atmósfera, sino también el deterioro de procesos esenciales para la regulación hídrica y la resiliencia del páramo frente al cambio climático.

En este contexto, la presente investigación plantea la siguiente pregunta: ¿cuál es la distribución espacial del carbono orgánico del suelo en las turberas altoandinas del humedal Jatunhuayco? Para responderla, se propone estimar el almacenamiento de carbono a partir del carbono orgánico y la densidad aparente del suelo, así como identificar sus patrones espaciales de distribución dentro del humedal. Los resultados permiten generar una línea base para el monitoreo de turberas restauradas y aportar información para orientar estrategias de conservación y manejo sostenible del páramo, integrando la dimensión ecológica con los desafíos de la seguridad hídrica y la mitigación del cambio climático.

# Capítulo primero
# Enfoque y marco teórico

## 1. Ecología de turberas

Los ecosistemas terrestres constituyen unidades funcionales con características específicas que resultan de la interacción entre procesos físicos, químicos y biológicos. Estos sistemas se interrelacionan entre sí, contribuyendo al equilibrio de la vida en la tierra y proveyendo recursos y funciones necesarias para el desarrollo humano. Las turberas, humedales y páramo conforman un conjunto ecológico con una característica común, la capacidad de almacenar carbono. En esta sección se describen las características y dinámica de estos sistemas en función de su capacidad de retener y almacenar carbono.

### 1.1. Ecosistema páramo: condiciones ambientales

El páramo representa un ecosistema neotropical andino de altitud localizado en las regiones cercanas al ecuador (Hofstede et al. 2023, 23). En los Andes del Norte, este ecosistema se distribuye desde el sur de Venezuela (11 °N) hasta el norte de Perú (8 °S), sobre la línea de bosque y bajo la línea de nieve perpetua, entre 3 000 a 5 000 m sobre el nivel del mar (m s.n.m.) (Mosquera et al. 2023, 1). Ecuador posee el 46,5 % (11 421 $km^2$) de la superficie total del ecosistema en la región (Peyre et al. 2021), proporción que representa el 7 % del territorio nacional (Carrillo-Rojas et al. 2019, 30) (Figura 1).

El paisaje de este ecosistema altoandino resulta del ajuste tectónico de los Andes y del modelamiento asociado a procesos volcánicos, glaciales, periglaciales e intervención humana (White 2013, 890; R. Hofstede et al. 2023, 17; Patiño-Gutiérrez et al. 2024, 1). Debido a estas condiciones, el páramo se constituye como un ambiente único que combina características de ecosistemas de montaña con humedales, siendo fundamental en la provisión de servicios ecosistémicos esenciales para las sociedades de la región andina (Brück et al. 2023). En particular, ciudades como Quito y Bogotá dependen exclusivamente del agua de los páramos para su abastecimiento (Buytaert, Deckers y Wyseure 2006, 208).

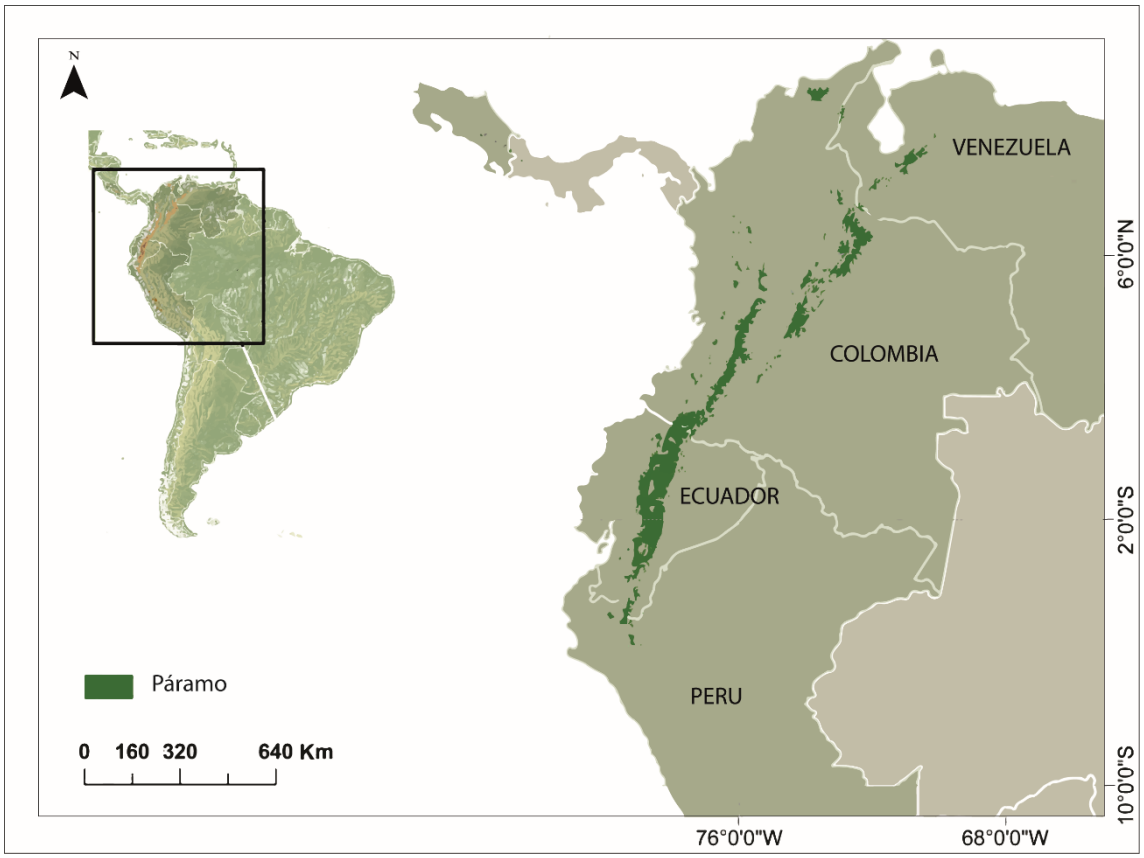



Figura 1. Distribución del páramo en los Andes del Norte
Fuente: Adaptada de Mosquera et al. (2023)

Las condiciones climáticas en el páramo son extremas, variables en espacio y tiempo. Considerando su proximidad a la línea ecuatorial y altitud, estos ecosistemas reciben una alta radiación solar y vientos fuertes que limitan el desarrollo de vegetación arbustiva (Bader et al. 2007, 34; Pérez et al. 2018, 74). Por otra parte, la temperatura presenta una marcada amplitud térmica, llegando a 18 °C durante el día y -2 °C durante la noche (Buytaert et al. 2006, 55; Brück et al. 2023, 4). La humedad atmosférica es elevada con una precipitación frecuente de baja intensidad que puede alcanzar valores de 2 000 mm por año (Crespo et al. 2014, 300).

Los suelos de este ecosistema son de origen volcánico, adaptados a las condiciones climáticas altoandinas. Estos suelos se desarrollan a partir de la meteorización de material volcánico rico en aluminio, sílice y hierro, por lo que presentan una alta capacidad de retención de agua y alto contenido de materia orgánica (Hofstede et al. 2023, 65). Estas propiedades son importantes en la regulación y provisión de agua, así como en el almacenamiento de carbono orgánico (Patiño-Gutiérrez et al. 2024, 238). La combinación de suelos andinos, precipitación elevada y baja evapotranspiración limitan la degradación de materia orgánica, permitiendo la acumulación de grandes

cantidades de carbono en horizontes de varios metros de profundidad (Hribljan et al. 2016, 118).

Una caracterización importante del páramo que combina tanto su disposición geográfica y condiciones climáticas con su evolución es su alto nivel de endemismo y alta tasa de diversificación. Es decir, este ecosistema alberga especies únicas adaptadas al medio, conteniendo un 60 % de especies de plantas endémicas, 27 % con respecto a anfibios (Ron et al. 2025), 53 % en reptiles (Torres-Carvajal et al. 2025), y 36 % en mamíferos, especialmente roedores (Tirira et al. 2023, 6). Esta particularidad convierte al páramo en un ecosistema sensible y prioritario en conservación.

### 1.2. Humedales altoandinos

Los ecosistemas que se desarrollan bajo condiciones de elevada humedad y presentan una saturación constante del suelo, reciben el nombre de humedales. Se caracterizan por disponer de suelos y biota adaptados a un aporte hídrico constante que genera inundaciones permanentes o estacionales (Council et al. 1995, 3). Estos ecosistemas incluyen hábitats de agua dulce (ríos, lagos, lagunas, pantanos) y zonas costeras y marinas (estuarios, manglares y arrecifes) (Gardner y Finlayson 2018, 11).

A nivel mundial, los humedales ocupan un área menor al 9 % (Zedler y Kercher 2005, 41); no obstante, representan el 40,6 % de los servicios ecosistémicos proporcionados por la naturaleza, como regulación y abastecimiento de agua, provisión de alimento, regulación climática y reducción de riesgos naturales (Xu et al. 2020, 1). La disponibilidad de agua y materia orgánica favorecen el desarrollo de estos ecosistemas, convirtiéndolos en sitios estratégicos para la biodiversidad y productividad biológica (Sieben et al. 2018, 441). No obstante, una proporción significativa presenta degradación debido a la contaminación, intervención humana y cambio de uso de suelo (Zedler y Kercher 2005, 48–49), ocasionando una pérdida del 35 % de los humedales en el mundo desde 1970 (Gardner y Finlayson 2018, 20).

Los humedales son importantes sumideros de carbono debido a la alta producción vegetal y condiciones hídricas (Moomaw et al. 2018, 187). El carbono depositado en el suelo por varios metros y miles de años forma turberas que constituyen las mayores reservas de carbono terrestre (600 Pg C o $6x10^{11}$ Mg C). Este almacenamiento y secuestro de carbono es fundamental en la regulación climática, no obstante, cambios en la temperatura y precipitación pueden alterar el equilibrio del sistema, transformándolo en fuente de carbono y metano (Gardner y Finlayson 2018, 36).

En la región tropical, la intensidad de las precipitaciones favorece la formación de humedales (Köchy et al. 2015, 357). En los páramos, estos sistemas se localizan en zonas donde las condiciones topográficas e hidrológicas permiten la acumulación de agua. Geomorfológicamente, estas áreas se desarrollaron durante el Pleistoceno como resultado de la actividad glaciar que modificó la morfología de los valles, creando depresiones topográficas con laderas abruptas, las cuales fueron rellenadas con sedimentos y morrenas (Clapperton 1983, 100). Estos depósitos glaciares crearon barreras que modificaron el drenaje superficial y subterráneo, propiciando la retención y acumulación de agua (Josse et al. 2009, 49) (Figura 2).



Figura 2. Humedal del Antisana
Fuente: Patricio Mena-Vásconez
*Nota:* El humedal está localizado en un valle glaciar con depósitos de morrenas en el lado izquierdo

### 1.3. Turberas

Las turberas son un tipo de humedales con un alto contenido de carbono orgánico. Se constituyen por la acumulación de turba o materia orgánica parcialmente descompuesta bajo condiciones de saturación hídrica y baja disponibilidad de oxígeno (Huang et al. 2021, 619). Estos ecosistemas ocurren en áreas del paisaje con pendientes

suaves o planas, donde el nivel freático o nivel de agua es superficial, favoreciendo la acumulación progresiva de turba durante cientos a miles de años.

A nivel mundial, las turberas ocupan el 2,84 % de la superficie terrestre (Xu et al. 2018, 143), almacenando de 30 % a 40 % del carbono orgánico del suelo a escala global (Gorham 1991, 183). La mayor parte de estos ecosistemas se concentra en la zona circumpolar ártica del hemisferio norte, en Rusia y Canadá. No obstante, las turberas tropicales ocupan el 30 % de la superficie total y se distribuyen en Sudamérica, el Sudeste Asiático y África Central (Ribeiro et al. 2021, 500) (Figura 3). En los Andes tropicales, las turberas altoandinas se encuentran sobre los 3 500 m s.n.m. (Schittek et al. 2018). En Ecuador, estos ecosistemas representan el 22 % de los páramos, con una reserva total de 1 282 Mg C $ha^{-1}$ (Hribljan et al. 2016, 10).

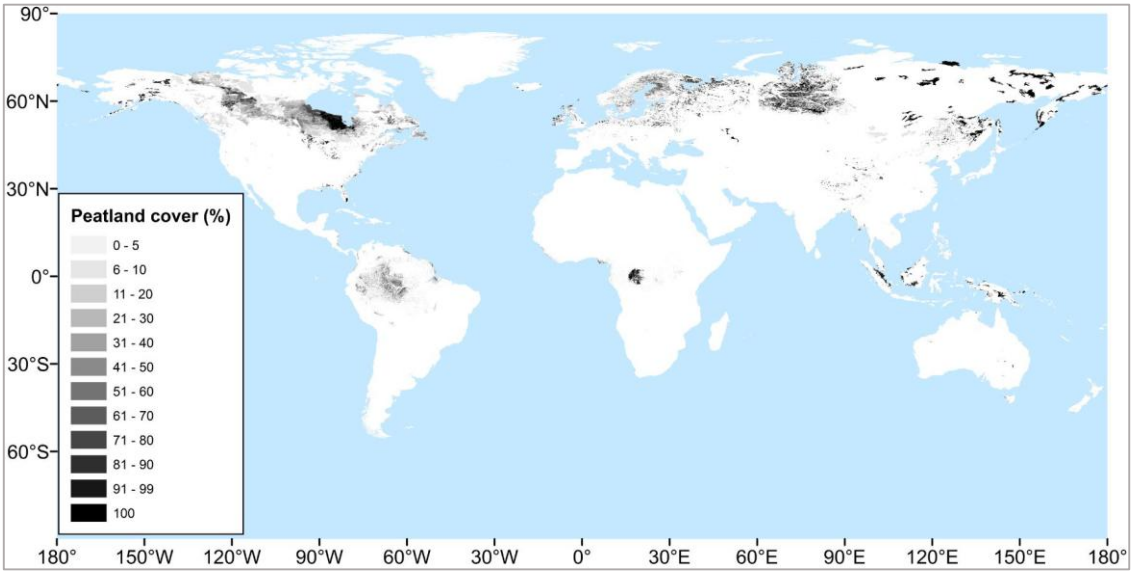



Figura 3. Principales regiones con presencia de turberas
Fuente: Xu et al. (2018)

La formación de turba ocurre cuando la acumulación de materia orgánica excede la tasa de descomposición (Ghezelayagh et al. 2025, 1). El proceso parte de la producción primaria neta de las plantas que incorporan biomasa a través de la fotosíntesis (Dong et al. 2021, 2). Parte de esta producción sirve como alimento para los herbívoros (1 %), otra parte es utilizada por la planta en su crecimiento (80 %), y otra se expone a la acción de organismos descomponedores (5 %). Sin embargo, en ambientes de turbera, las condiciones de saturación permanente de agua y la baja disponibilidad de oxígeno limitan la descomposición, generando la acumulación de residuos orgánicos que representa el 15 % de la producción vegetal (Moore 1987, 8–9).

La hidrología, en especial, las condiciones de saturación del agua son fundamentales en la acumulación de materia orgánica, debido a que determinan la tasa de descomposición y los niveles anaeróbicos en los que la biomasa se integra al sistema (Ghezelayagh et al. 2025, 2). Dependiendo del origen del agua que alimenta estos ecosistemas, las turberas se clasifican en aquellas que son alimentadas por el agua de la precipitación (ombrotróficas) y las que incluyen fuentes procedentes de la escorrentía superficial y subterránea además de la precipitación (minerotróficas) (Lindsay 2018, 1517–18). Este aporte hídrico representa también un suministro de materia inorgánica en forma de sólidos disueltos que sirven como nutrientes. Una vez establecido el proceso, la acumulación de materia orgánica ocurre por acreción vertical y expansión lateral, sin embargo, el volumen final de los depósitos de turba depende de las condiciones climáticas, topográficas, edáficas, hidrológicas y biológicas del terreno en el que ocurren (Dong et al. 2021, 3).

Considerando el contexto de formación, las turberas funcionan como importantes sumideros de dióxido de carbono ($CO_2$) debido a la elevada producción vegetal, actuando también como fuentes de metano (CH4) como resultado de los procesos de descomposición anaeróbica (Mander et al. 2025, 95). El equilibrio entre la captura y almacenamiento de GEI convierte estos ecosistemas en componentes clave en la regulación del clima global (Moomaw et al. 2018, 188).

En el páramo, las condiciones climáticas frías y húmedas favorecen un balance hídrico positivo que junto con la presencia de biota adaptada al ambiente altoandino sostienen una elevada productividad vegetal y favorecen la acumulación y almacenamiento de carbono (Hofstede et al. 2023, 165–67). En los páramos ecuatorianos, las turberas se identifican según las comunidades vegetales dominantes. De acuerdo con Suarez, Chimbolema y Jaramillo (2022, 17-20), se distinguen tres tipos: turberas de almohadilla, turberas de gramíneas y musgos y turberas de juncos y ciperáceas (Figura 4). Sin embargo, esta distinción es referencial, considerando que estos ecosistemas pueden variar según las condiciones locales del paisaje.

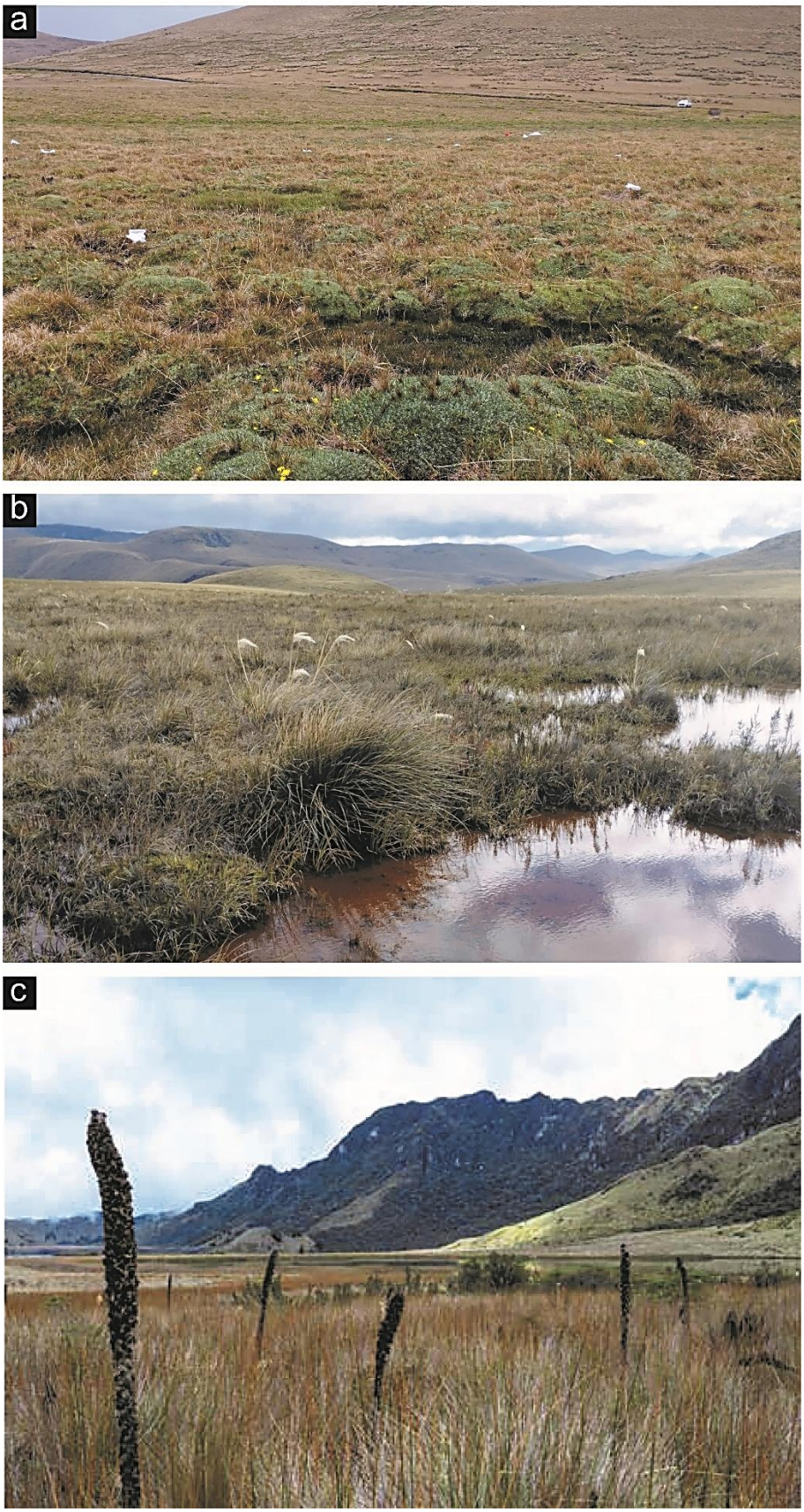



Figura 4. Tipos de turberas de los páramos del Ecuador.
Fuente: Fotografías a y b Gabriela Núñez; fotografía c Ricardo Jaramillo
*Nota:* a) Turberas de almohadilla del humedal Jatunhuayco, Antisana. b) Turberas de gramíneas y musgos. c) Turberas de juncos y ciperáceas en los páramos de Salayambo, Cotopaxi

## 2. Suelo y carbono

El carbono de los ecosistemas terrestres se concentra en el suelo y su calidad define qué tan eficaces son estos sistemas para capturar y retener el carbono de la atmósfera. En condiciones naturales, los suelos son el resultado de la interacción entre las rocas, clima, precipitación y actividad biológica. Estas interacciones confieren al suelo propiedades y características particulares que determinan su estructura y funcionalidad.

### 2.1. Suelos orgánicos

El suelo es la expresión final de las rocas y sedimentos de la corteza terrestre que se exponen a la meteorización ambiental. Los suelos son el resultado de la interacción entre el material parental y factores como el clima e hidrología, geomorfología del terreno, presencia de organismos y tiempo (Paz y Rodríguez 2008, 229; Páez-Bimos et al. 2022, 2). Esta interacción determina las propiedades fundamentales del suelo como textura asociada al tamaño de grano o partícula; mineralogía relacionada con la composición química del suelo que depende del material parental; y materia orgánica que incluye los aportes biológicos y procesos de descomposición (Hans 1941, 16; Huggett 2021, 7).

Los suelos orgánicos se caracterizan por presentar una fracción orgánica significativa, mayor a la fracción mineral. Las condiciones de saturación hídrica y baja disponibilidad de oxígeno permiten la acumulación de agregados orgánicos en diferentes estados de descomposición, incluyendo una fracción viva de microorganismos y raíces y una fracción no viva como restos vegetales y animales (Le Bayon et al. 2021, 84–86; Moore 1987, 10). Los suelos orgánicos son característicos, mas no exclusivos, de turberas y humedales en los que ocurre esta acumulación, alcanzando varios metros de espesor (Silva Neto et al. 2023, 2) (Figura 5).

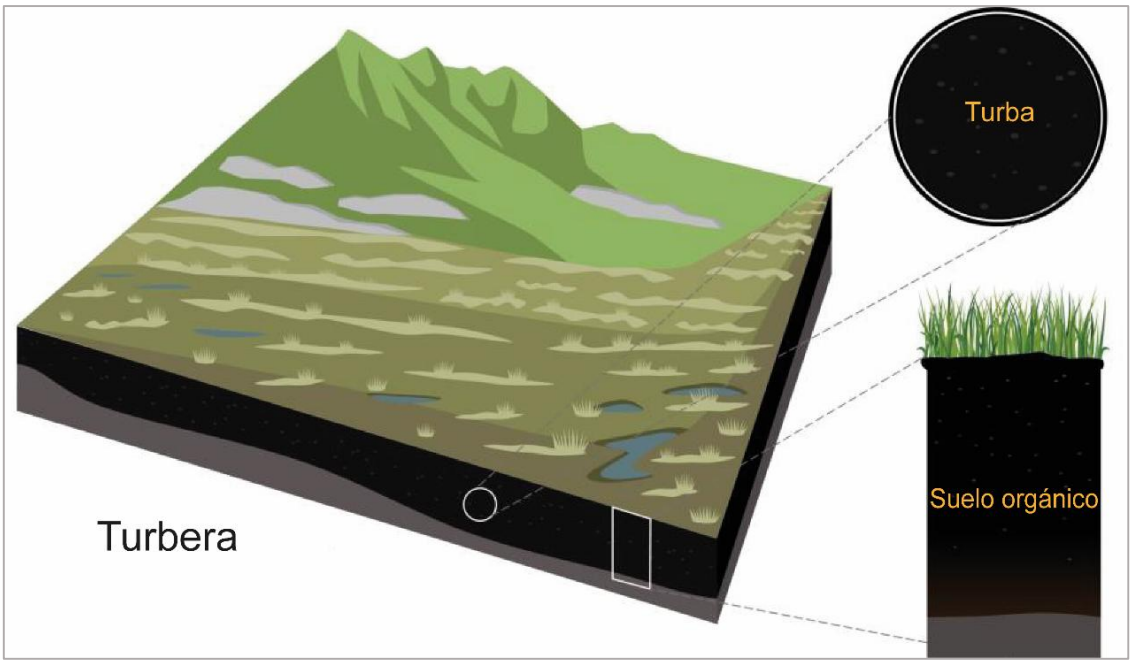



Figura 5. Representación esquemática de los conceptos de turbera, turba y suelo orgánico
Fuente: Adaptada de Silva Neto et al. (2023)

En ecosistemas altoandinos, la formación de suelos está relacionada con la meteorización de cenizas volcánicas que aporta elementos como aluminio y hierro, los cuales favorecen la estabilización de la materia orgánica (Buytaert, Deckers y Wyseure 2006, 215). Los suelos en los páramos son andosoles, asociados con material parental volcánico e histosoles, ligados a la acumulación orgánica; ambos tipos se definen según el sistema de clasificación de la World Reference Base for Soil Resources (WRB) (Deckers et al. 2005, 4).

Los andosoles son suelos porosos negros de textura arenosa, ricos en aluminio, ácidos, con un alto contenido de carbono orgánico (Calispa et al. 2021, 21). Este tipo de suelos presenta baja densidad aparente, alta capacidad de retención de agua y elevados contenidos de materia orgánica que definen el carácter ándico (R. Hofstede et al. 2023, 64–66). Los histosoles comparten estas características, no obstante, se distinguen por presentar un mayor contenido de carbono orgánico y por formarse en ambientes saturados de agua, controlados por la topografía, temperatura y precipitación (61-62). Estos suelos son característicos de turberas y humedales (Figura 6).

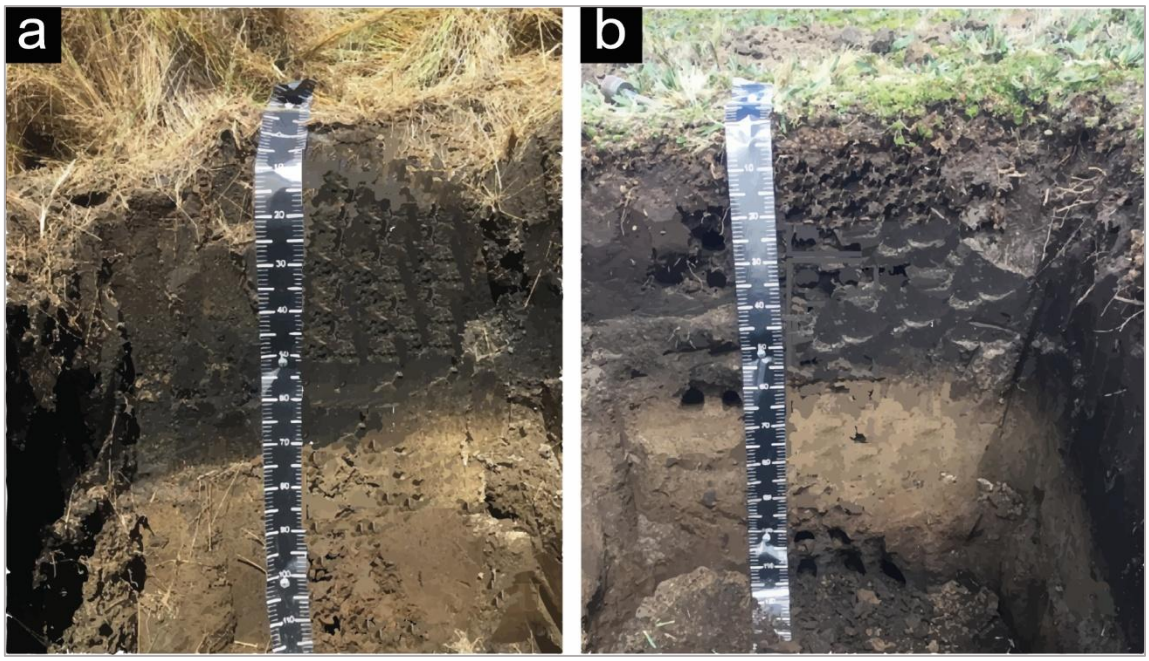



Figura 6. Suelos orgánicos en turberas del Antisana
Fuente: Adaptada de Páez-Bimos et al. (2022)
*Nota:* a) turbera de gramíneas y musgos, b) turberas de almohadilla

### 2.2. Propiedades del suelo relacionadas con el carbono

En esta sección se describe el carbono orgánico del suelo y la densidad aparente, propiedades esenciales en la cuantificación del almacenamiento de carbono y evaluación de sumideros de carbono.

#### 2.2.1. Carbono orgánico del suelo

El carbono orgánico del suelo (SOC, por sus siglas en inglés) es un parámetro porcentual que corresponde a la fracción de carbono contenida en el suelo. El SOC constituye el elemento principal del ciclo global de carbono y representa la mayor reserva de carbono de la biosfera (Le Quéré et al. 2016, 610). Una porción significativa del SOC se almacena por debajo de los 30 cm de profundidad, en especial en turberas, donde puede profundizarse por varios metros (Jackson et al. 2017, 420). Esta particularidad refleja la capacidad del suelo de contener carbono por periodos prolongados de tiempo.

La incorporación de carbono desde la atmósfera hacia el suelo depende de factores como la temperatura, composición y productividad de la vegetación, meteorización del material parental, actividad microbiana y presencia de raíces (Silva y Lambers 2018, 40–41), procesos que favorecen la formación de turba y suelos orgánicos como se describe en las secciones 1.3 y 2.1 (Figura 7). No obstante, estas condiciones son alteradas por la intervención antrópica y el cambio climático que causan modificaciones en el equilibrio

del SOC y, por tanto, en el ciclo global del carbono al acelerar la descomposición de la materia orgánica (Jackson et al. 2017, 441). Estas presiones generan una transformación del carbono orgánico en $CO_2$, que retorna a la atmósfera en periodos más cortos a los de su captura y en magnitudes que superan su tasa de acumulación (Moomaw et al. 2018, 188).

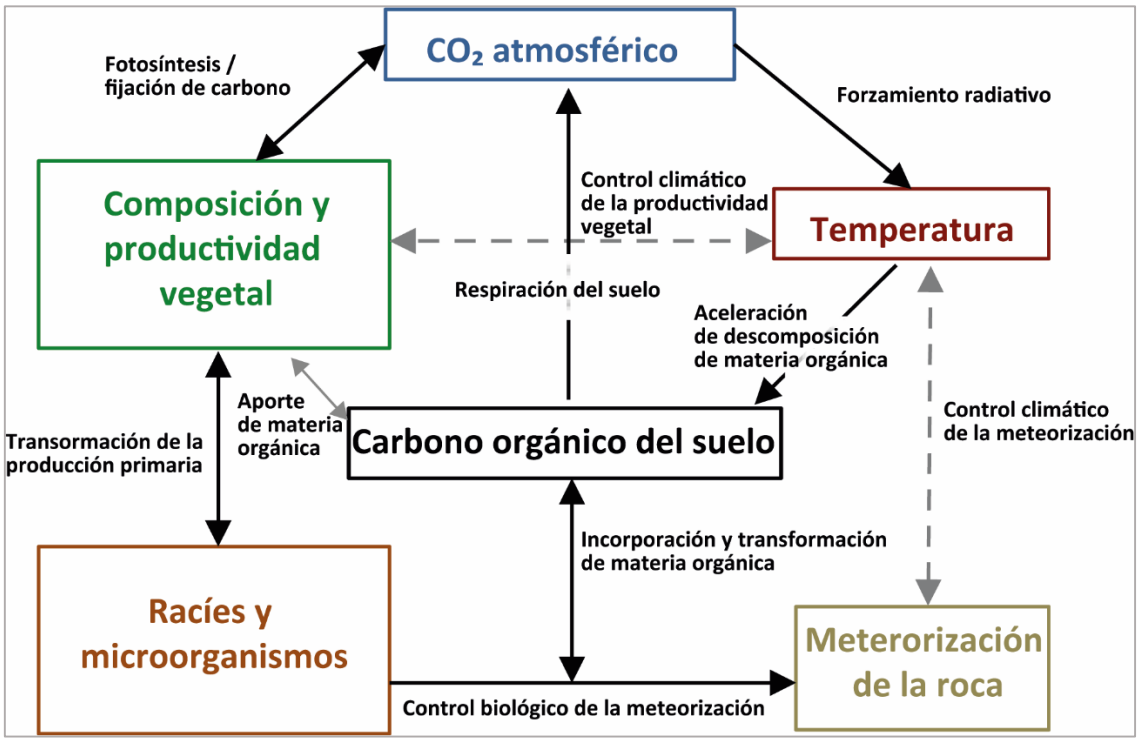



Figura 7. Procesos y factores que controlan el SOC
Fuente: Adaptada de Silva y Lambers (2018)

### 2.2.2. Densidad aparente (BD)

La densidad aparente (BD, por sus siglas en inglés) se define como la masa de suelo seco por unidad de volumen edáfico que comprende sólidos y poros. Esta propiedad es un indicativo de la compactación del suelo, la cual depende de la textura (tamaño de grano o partícula) y el contenido orgánico (Avnimelech et al. 2001, 25). Por lo general, los suelos porosos con alto contenido orgánico presentan baja densidad aparente (Farnham y Finney 1965, 66–67; Robinson et al. 2025, 1).

Esta propiedad sirve como indicativo de la calidad del suelo y su capacidad para sostener funciones esenciales relacionadas con el movimiento de agua y solutos (Indoria et al. 2020, 480). Además, es un insumo para determinar propiedades del suelo que dependen de su volumen como el almacenamiento de carbono orgánico. En este sentido, se utiliza la densidad aparente seca, expresada en $g.cm^{-3}$ (Avnimelech et al. 2001, 26).

Los cambios en la estructura del suelo, en especial los generados por la compactación, producen un incremento de la densidad aparente al reducir su porosidad. Estos cambios pueden ocurrir por procesos naturales de enterramiento del suelo o por la intervención agrícola y ganadera (Buytaert et al. 2006, 53–55; Keller y Håkansson 2010, 398). En este sentido, la densidad aparente no solo refleja las condiciones físicas del suelo, sino también su grado de degradación, constituyéndose en un indicador clave para comprender la dinámica del carbono en sistemas naturales y transformados.

## 3. Carbono, servicios ecosistémicos y socioecosistemas

El almacenamiento de carbono en los sistemas naturales representa un componente clave en la regulación del clima. Durante miles de años, los ecosistemas mantienen el equilibrio entre la emisión y captura de GEI, contribuyendo a la estabilización de las condiciones climáticas que favorecen la reproducción de la vida. No obstante, en los últimos siglos, a partir de la Revolución Industrial, el aumento de GEI en la atmósfera y la intensificación del uso antrópico de los ecosistemas naturales provocaron una alteración en las reservas de carbono a nivel global. En esta sección se analiza la importancia del almacenamiento de carbono como servicio ecosistémico y las presiones que podrían provocar cambios en su equilibrio.

### 3.1. Almacenamiento de carbono como servicio ecosistémico

Los servicios ecosistémicos corresponden a los beneficios que las sociedades humanas obtienen de la naturaleza para el bienestar humano (Díaz et al. 2018, 270) (Figura 8). Considerando un contexto de creciente demanda y deterioro ambiental, este concepto se desarrolló con el objetivo de visibilizar la dependencia de las sociedades de la naturaleza, reducir su degradación y orientar estrategias de conservación en políticas públicas (Chivulescu et al. 2024, 2).

Convencionalmente, se reconocen cuatro categorías de servicios ecosistémicos: aprovisionamiento, que incluye bienes como agua y alimento; regulación, relacionada con procesos como la regulación climática; culturales, asociados a beneficios no materiales; y de soporte, necesarios para mantener el funcionamiento de los ecosistemas (Millennium Ecosystem Assessment 2005, 3–4; Gardner y Finlayson 2018, 325). En general, estos servicios contribuyen a satisfacer necesidades fundamentales y permiten mantener condiciones adecuadas para la vida humana (Figura 8).

Entre los servicios de regulación, el almacenamiento de carbono constituye un componente clave en la mitigación del cambio climático. Los ecosistemas actúan como sumideros de carbono al capturar el dióxido de carbono de la atmósfera y almacenarlo en la biomasa o suelo (Mander et al. 2025, 95). Este proceso reduce la disponibilidad de GEI en la atmósfera y, por tanto, permite moderar el incremento de la temperatura media global (Millennium Ecosystem Assessment 2005, 5). No obstante, se considera un servicio que opera a largo plazo, debido a que la acumulación de carbono requiere escalas temporales de tiempo prolongadas (Makkonen et al. 2015, 154). En este contexto, las turberas son las principales contribuyente de estos servicios al almacenar las reservas más grandes de carbono (Xu et al. 2018, 140; Yi et al. 2026, 10).

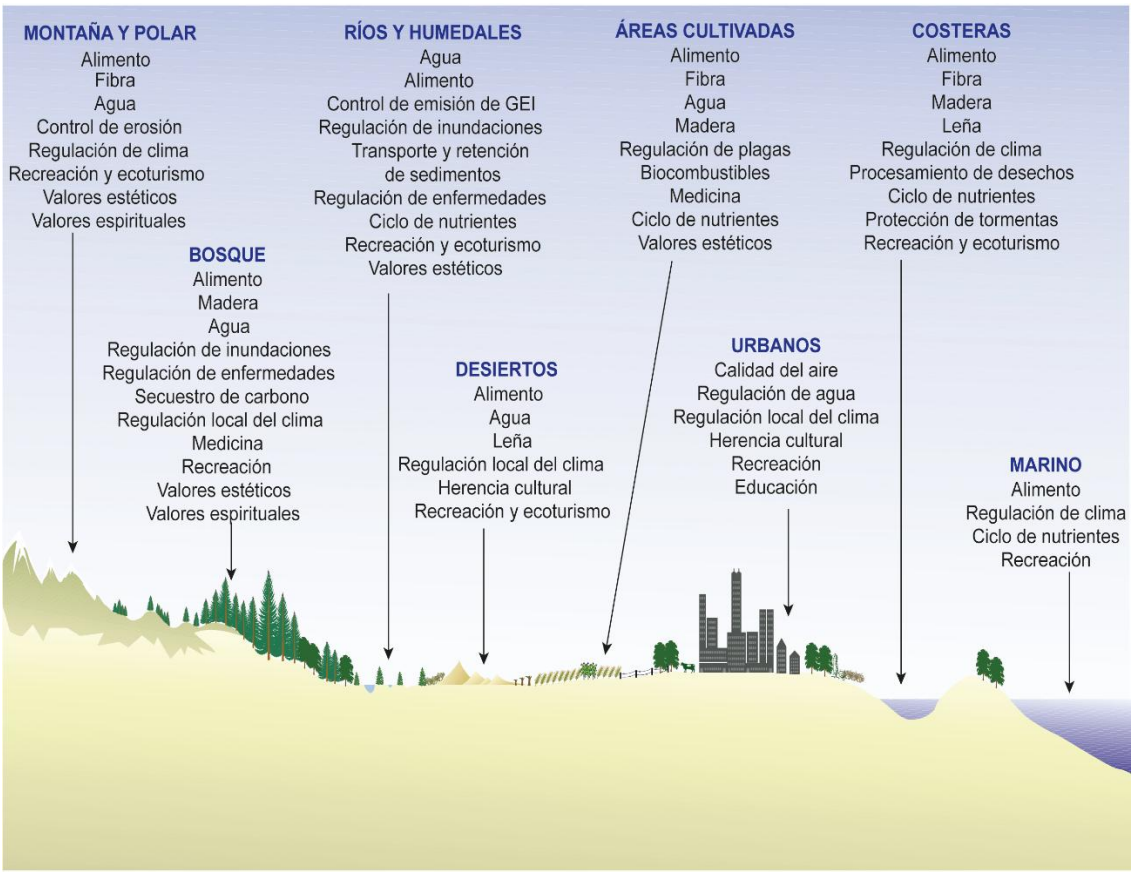


Figura 8. Servicios de la naturaleza por ecosistema
Fuente: Adaptada de Millennium Ecosystem Assessment (2005)

### 3.2. Cambio climático e intervención antrópica

Las presiones de origen antrópico sobre los ecosistemas naturales y el cambio climático incrementan la emisión de gases de efecto invernadero como el dióxido de carbono ($CO_2$), metano ($CH_4$) y óxido nitroso ($N_2O$) (Figura 9.A). De acuerdo con el Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC), la influencia humana es el principal impulsor del calentamiento global, provocando un incremento de 1.1 °C en la

temperatura media del planeta desde 2011 a 2020, con respecto a los niveles preindustriales (IPCC 2023, 43) (Figura 9.B). Este incremento genera alteraciones en el clima global y regional; por ejemplo, en los Andes para 2039, se proyecta un aumento de la temperatura entre 1 °C y 3 °C con un incremento de la precipitación entre 0 % y 10 % (Buytaert y Ramírez-Villegas 2012, 45).

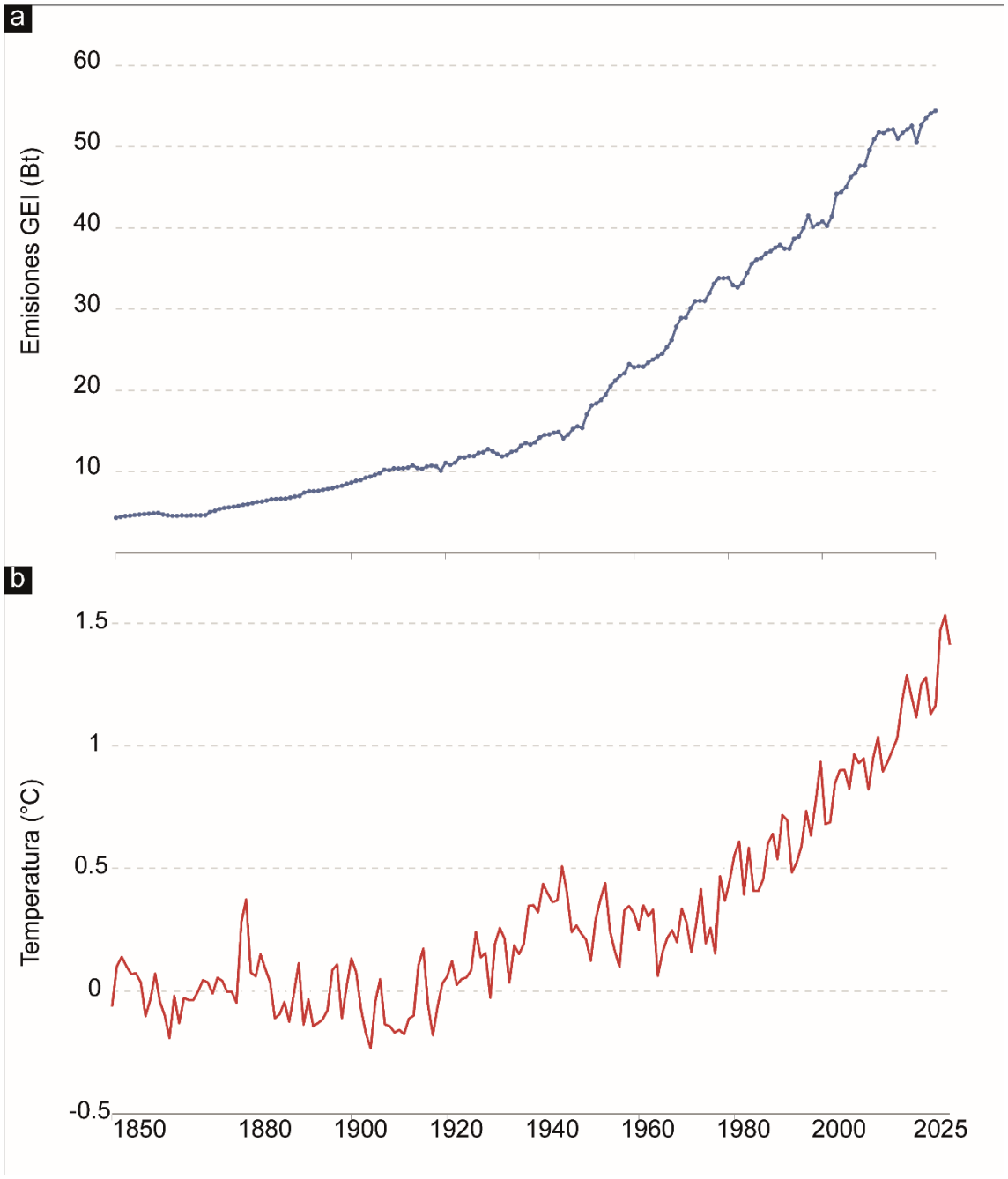



Figura 9. Aumento exponencial de emisiones de GEI y de la temperatura media del planeta a partir de la Revolución Industrial (1850).
Fuente: Adaptada de Morice et al. (2021) y Jones et al. (2025)
*Nota:* a) Emisiones de GEI, incluyendo dióxido de carbono, metano y óxido nitroso en el periodo 1850-2024, b) Cambio de temperatura media global con respecto al período preindustrial

Las transformaciones antrópicas de los ecosistemas guardan procesos históricos ligados al desarrollo de las sociedades agrícolas desde hace 10 000 años (Ellis 2015, 2). Actualmente, más de las tres cuartas partes de la biosfera terrestre han sido transformadas en biomas antropogénicos y un tercio de la superficie libre de hielo en biomas cultivados (Ellis y Ramankutty 2008, 440). Esta transformación indica el cambio de uso de suelo, el cual influye de forma significativa en la alteración del ciclo global del carbono. Como resultado, se genera un aumento de GEI que representa el 35 % del total acumulado en los últimos 150 años (Huang et al. 2023, 163). A la vez, estos cambios son la principal causa del declive global de la biodiversidad, degradación de los suelos y contaminación de los recursos hídricos (Tscharntke et al. 2021, 919).

Los ecosistemas altoandinos son especialmente vulnerables debido a su alta sensibilidad climática, dependencia hidrológica, presencia de suelos orgánicos y vegetación especializada (Buytaert, Sevink, y Cuesta 2014, 509). La intervención agrícola en los suelos de páramo, humedales y turberas genera alteraciones en su funcionamiento. Por ejemplo, los cambios en el régimen hidrológico debido a la reducción de la saturación del suelo, el reemplazo o retiro de la cobertura vegetal, la compactación del suelo debido al pastoreo, entre otros, reducen su capacidad de retener agua, aumentan su erosión y degradación y limitan el almacenamiento de carbono (Patiño-Gutiérrez et al. 2024, 2). En este sentido, los cambios de uso de suelo han provocado la degradación del 12 % de turberas a nivel mundial, lo que representa un incremento del 40 % en las emisiones de GEI (UNEP 2022, 7–8).

### 3.3. Restauración, conservación y manejo sostenible

Las acciones de mitigación del cambio climático consideran acuerdos internacionales para limitar el aumento de la temperatura media del planeta, manteniendo el incremento por debajo de 2 °C para 2050, según el Acuerdo de París. En este contexto, la reducción de las emisiones de GEI considera el fortalecimiento de ecosistemas que tienen la capacidad de capturar y almacenar carbono. Por esta razón, la conservación y manejo sostenible de turberas no degradadas y restauración de las que presentan degradación constituyen soluciones basadas en la naturaleza fundamentales para contribuir al logro de emisiones netas cero (Loisel y Gallego-Sala 2022, 5; UNEP 2022, 24).

La conservación y manejo sostenible de humedales y turberas se enmarcan en el tratado de Convención sobre los humedales, adaptada en 1971 en la ciudad de Ramsar,

Irán. A partir de este tratado se plantean directrices para la restauración y conservación de humedales clave definidos sitios Ramsar. Las partes contratantes se comprometen a establecer políticas para mantener las condiciones ecológicas de los humedales. Ecuador registra 19 sitios de este tipo que representan una superficie de 10 644 $km^2$, equivalente al 4% del territorio nacional (Convención sobre los Humedales 2021).

Los procesos de mayor importancia en la restauración ecológica de humedales y, en particular, turberas, incluyen la rehumidificación y revegetación (Convención sobre los Humedales 2021). De acuerdo con Suarez, Chimbolema y Jaramillo (2022), la restitución de las condiciones hidrológicas representa un componente clave en la recuperación de la saturación del suelo, puesto que permite mantener la turba bajo niveles de agua que propicien la descomposición ralentizada de la materia orgánica y eviten la erosión y oxidación del suelo. La vegetación natural adaptada a las condiciones de anegación puede retornar como cobertura del suelo, sin embargo, dependiendo de la degradación es necesario retirar especies invasivas, limitar presiones como el pastoreo y agricultura y considerar la reintroducción de especies nativas (Convención sobre los Humedales 2021, 10–13).

### 3.4. El páramo como socioecosistema

Durante las últimas décadas, el concepto de socioecosistema ha permitido superar la visión tradicional que separa la naturaleza de la sociedad. Desde este enfoque, los ecosistemas son entendidos como sistemas complejos en los que los procesos ecológicos, sociales, económicos, políticos y culturales interactúan de manera permanente, generando transformaciones mutuas (Ostrom 2009, 2). En consecuencia, los paisajes naturales no constituyen espacios prístinos ajenos a la presencia humana, sino paisajes culturales cuyo estado actual responde a procesos históricos de ocupación, uso y manejo del territorio. En el caso de los páramos andinos, su configuración contemporánea refleja siglos de interacción entre las dinámicas ecológicas y las distintas formas de aprovechamiento desarrolladas por comunidades, haciendas, instituciones estatales y organizaciones de conservación (Manosalvas 2011).

Los páramos constituyen uno de los socioecosistemas más importantes de los Andes debido a la estrecha relación entre sus funciones ecológicas y el bienestar de las poblaciones humanas. Además de albergar una elevada biodiversidad y almacenar importantes reservas de carbono orgánico en el suelo, estos ecosistemas regulan el ciclo hidrológico y abastecen de agua a numerosas ciudades andinas. En Ecuador,

aproximadamente el 78 % de los páramos se encuentra bajo algún mecanismo de protección, resultado de políticas públicas y programas orientados a la conservación de la biodiversidad y los servicios ecosistémicos (Hofstede et al. 2023). Sin embargo, estos territorios también son escenarios de disputas sociales y políticas, donde convergen intereses asociados a la producción agropecuaria, la conservación, el abastecimiento urbano de agua y las formas de vida de comunidades indígenas y campesinas (Wouter Buytaert, Célleri, et al. 2006; Hidalgo et al. 2017; Manosalvas et al. 2025).

La comprensión del páramo como socioecosistema implica reconocer que sus funciones ecológicas no pueden analizarse de forma independiente de las relaciones sociales que las producen y transforman. Manosalvas (2011) señala que los problemas ambientales son inseparables de los procesos sociales, económicos y políticos, por lo que la conservación debe incorporar criterios de equidad, justicia y participación. Desde esta perspectiva, la protección de los páramos no consiste únicamente en restringir actividades humanas, sino en construir formas de gobernanza que integren conocimientos científicos y saberes locales. De manera similar, Hofstede (2011) propone que la gestión de estos ecosistemas debe orientarse al mantenimiento de los servicios ecosistémicos como la regulación hídrica, almacenamiento de carbono, conservación de la biodiversidad y los valores culturales, entendiendo que éstos contribuyen al bienestar humano y dependen tanto de procesos ecológicos como de decisiones sociales sobre el uso del territorio.

En Ecuador, este enfoque da lugar a mecanismos de gobernanza ambiental como los Fondos de Agua, entre ellos el Fondo para la Protección del Agua (FONAG), creado para contribuir a la seguridad hídrica de Quito mediante acciones de conservación y restauración en las cuencas altas (FONAG 2024b). Estas iniciativas articulan instituciones públicas, empresas privadas y organizaciones no gubernamentales para financiar la protección de ecosistemas estratégicos como los páramos. No obstante, diversos autores advierten que estos modelos también plantean desafíos relacionados con la participación efectiva de las comunidades locales, la distribución de los beneficios y las relaciones de poder en la toma de decisiones (Hidalgo et al. 2017; Manosalvas et al. 2025). En consecuencia, el estudio de los páramos como socioecosistemas requiere analizar simultáneamente sus funciones ecológicas, los mecanismos institucionales de conservación y las dinámicas sociales que condicionan su manejo y sostenibilidad.

Desde esta perspectiva, el humedal Jatunhuayco constituye un ejemplo de socioecosistema altoandino en el que el almacenamiento de carbono, la regulación hídrica y la biodiversidad son el resultado de una trayectoria histórica de ocupación,

aprovechamiento ganadero, degradación y restauración. La transición desde el manejo productivo desarrollado por la antigua Hacienda Antisana hacia un modelo de conservación impulsado por el Estado y posteriormente por el FONAG evidencia cómo las decisiones sociales e institucionales modifican las condiciones biofísicas del ecosistema. Por ello, comprender la distribución espacial del carbono orgánico en el humedal requiere considerar no solo las propiedades del suelo y la hidrología, sino también los procesos históricos y las formas de gobernanza que determinan su estado actual.

# Capítulo segundo
# Área de estudio y metodología

## 1. Área de estudio

El análisis se realizó en un área localizada al suroeste del volcán Antisana, en la Cordillera Real, entre 8068604 – 806883 m E y 9944117 – 9944189 m N, a una altitud de 3 987 m s.n.m (Figura 10.A, C). El área se ubica dentro del ACH Antisana, en el humedal Jatunhuayco. A nivel hidrográfico, pertenece a la cuenca del río Antisana, parte de la demarcación hidrográfica Napo; a nivel administrativo, corresponde al cantón Archidona, provincia de Napo (Figura 10.B, C).

El paisaje representa un ecosistema de páramo con presencia de humedales y turberas, drenados por pequeños cauces y vegetación de tipo pajonal y almohadilla (Figura 10.D). Hacia el este se localiza la Reserva Ecológica Antisana, zona de interés ecológico y turístico debido a su diversidad en flora y fauna, presencia de fuentes naturales de agua, incluyendo una superficie glaciar de 15,1 $km^2$ de extensión del volcán Antisana (Ruiz Hernández et al. 2018, 5).

### 1.1. Historia socioecológica

El humedal Jatunhuayco forma parte del ecosistema de páramo del Antisana, un territorio con un contexto social y cultural que resulta de una prolongada interacción entre procesos ecológicos y actividades humanas. El acceso principal a esta zona se realiza desde la parroquia de Píntag, asentamiento humano existente desde el siglo XVI y estrechamente vinculado al aprovechamiento de los recursos del páramo (GADPR Píntag 2012). Los registros documentados indican que desde las expediciones de Alexander von Humboldt y Aimé Bonpland en 1802 ya se registraba la presencia de ganado en la zona, evidencia de un aprovechamiento productivo que posteriormente se consolidó mediante la fundación de haciendas ganaderas en zonas de recarga hídrica (fincas ubicadas sobre los 4 500 m s.n.m.) (Alvarado 2025).

En 1940, cerca de 80 a 100 $km^2$ de páramo del Antisana correspondieron a la Hacienda Antisana, propiedad de la familia Delgado, quienes poseían cerca de 500 caballos, 2 500 cabezas de ganado vacuno y 15 000 cabezas de ganado ovino destinados a la producción pecuaria (Grubb et al. 2020, 250). El funcionamiento de la hacienda

dependía del trabajo de pobladores de comunidades cercanas, principalmente de Píntag y sectores aledaños, quienes desempeñaban labores de arriería y manejo del ganado en los páramos. Estas actividades fortalecieron la figura del chagra, personaje emblemático de la Sierra ecuatoriana, encargado de reunir, marcar, contabilizar y cuidar el ganado en extensos territorios de hacienda, constituyendo una expresión cultural que aún forma parte de la identidad local (Rivadeneira Guachamin 2016).

Durante décadas, el páramo fue manejado bajo una lógica de producción pecuaria que priorizó el aprovechamiento económico de los pastizales altoandinos. Este modelo modificó el funcionamiento ecológico del ecosistema mediante quemas periódicas para favorecer el rebrote de pastos, drenaje de humedales, sobrepastoreo, compactación de los suelos y apertura de caminos, reduciendo la capacidad del páramo para almacenar agua y carbono y afectando la biodiversidad. Como consecuencia, se produjo el desplazamiento y la caza de fauna silvestre, entre ella venados, conejos andinos, zorros y pumas (Alvarado 2025). Aunque no se encontró información documentada sobre el destino comercial de la producción ganadera de la hacienda, esta actividad constituyó durante décadas uno de los principales usos económicos del territorio (GADPR Píntag 2012).

En 1993, se creó la Reserva Ecológica Antisana, incorporando los predios de la Hacienda Antisana a un régimen de protección estatal (Osorio Sánchez 2018). Posteriormente, el desarrollo del sistema de agua potable Mica Quito Sur consolidó el interés por la conservación de las cuencas abastecedoras de Quito. En 2010, el Ministerio del Ambiente adquirió los terrenos ubicados dentro de la reserva, mientras que la Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento (EPMAPS) compró la zona de amortiguamiento occidental por su importancia para el abastecimiento de agua potable de la ciudad.

El FONAG asumió la administración y gestión del Área de Conservación Hídrica Antisana, implementando acciones de restauración como la exclusión del ganado, el cierre de drenajes artificiales, la revegetación con especies nativas y el monitoreo permanente del ecosistema (FONAG 2025). En 2017, adquirió el predio del humedal Jatunhuayco e inicia en 2018 un proceso de restauración hidrológica a través de la colocación de diques de madera y sacos de yute para tapar canales antiguos que tenían el objetivo de drenar y secar el humedal. Este proceso permitió revertir un significativo e intenso estado de degradación del humedal resultado del uso pecuario y de la práctica de quema y retiro de la cobertura vegetal (FONAG 2024b).

Actualmente, la gestión del humedal Jatunhuayco corresponde al FONAG, debido a que el predio es de su propiedad, por lo que las acciones de conservación y restauración son ejecutadas directamente por esta institución. En contraste, la Reserva Ecológica Antisana es administrada por el Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica, que desarrolla actividades de vigilancia y protección con el apoyo de guarda páramos provenientes de comunidades cercanas de la parroquia de Píntag, quienes participan en la prevención de incendios, el monitoreo ambiental y el resguardo del área protegida.

En el entorno del páramo del Antisana persisten diversos usos productivos del territorio bajo administración privada. Entre las principales presiones reportadas para estos ecosistemas se encuentran la ganadería, agricultura, uso de agroquímicos, cacería y otras actividades extractivas, las cuales continúan generando procesos de degradación asociados al aprovechamiento del páramo con fines productivos y comerciales (Osorio Sánchez 2018). En este contexto, el estado actual del humedal Jatunhuayco refleja la transición desde un modelo histórico de explotación hacia uno orientado a la conservación y restauración ecológica, proporcionando un escenario idóneo para evaluar el almacenamiento de carbono orgánico del suelo como indicador del estado de conservación del ecosistema y comprender las condiciones ambientales e hidrológicas descritas en los siguientes apartados.

### 1.2. Clima e hidrología

El área de estudio se caracteriza por un clima húmedo seco tropical, templado en las zonas de mayor altitud con características específicas del ecosistema páramo (Ecuador INAMHI 2017). El FONAG mantiene un monitoreo permanente de las condiciones climáticas del humedal Jatunhuayco a través del registro de variables climáticas en estaciones meteorológicas, hidrológicas y pluviométricas[1] (Figura 11.A). La radiación solar presenta un promedio anual de 169 W/m$^2$, con una humedad atmosférica media de 91 %, variabilidad térmica media de 4 °C con un rango de -6 y 16 °C y velocidad media del viento de 6 m/s (Estación M5126-Jatunhuaycu) (Figura 11.B, C).

La precipitación anual acumulada varía de 759 mm (Estación JTU01PT11-Jatunhuaycu11) a 1 081 mm (Estación JTU01PT91- Pluviométrica Humedal Jatunhuyaco - Pullurima), siendo mayor en los meses de marzo – abril y octubre – noviembre con mínimos en los meses de agosto – septiembre y diciembre – enero (Figura 11.D, E). La

[1] Disponible en: https://sedc.fonag.org.ec/reportes/consultas_periodo?

variabilidad en la precipitación a nivel local se relaciona con variaciones en la dirección y velocidad del viento, tipo de pendiente y topografía, condicionada a mayor escala por vientos alisios del este, perennemente húmedos, procedentes de la Amazonía (Buytaert et al. 2006, 56).

El humedal Jatunhuayco es drenado por el río Jatunhuayco, afluente del río Antisana que contribuye a la captación Mica-Quito Sur, la cual abastece de agua potable a 650 000 habitantes de la ciudad de Quito (Ecuador FONAG 2025). En la estación H5010-Jatunhuaycu-Captación, el caudal medio anual es de 564,1 l/s, lo que representa un volumen de 17,8 millones de m³ de agua al año. Estas condiciones favorecen el desarrollo de humedales y turberas que regulan la disponibilidad de agua en el ecosistema.

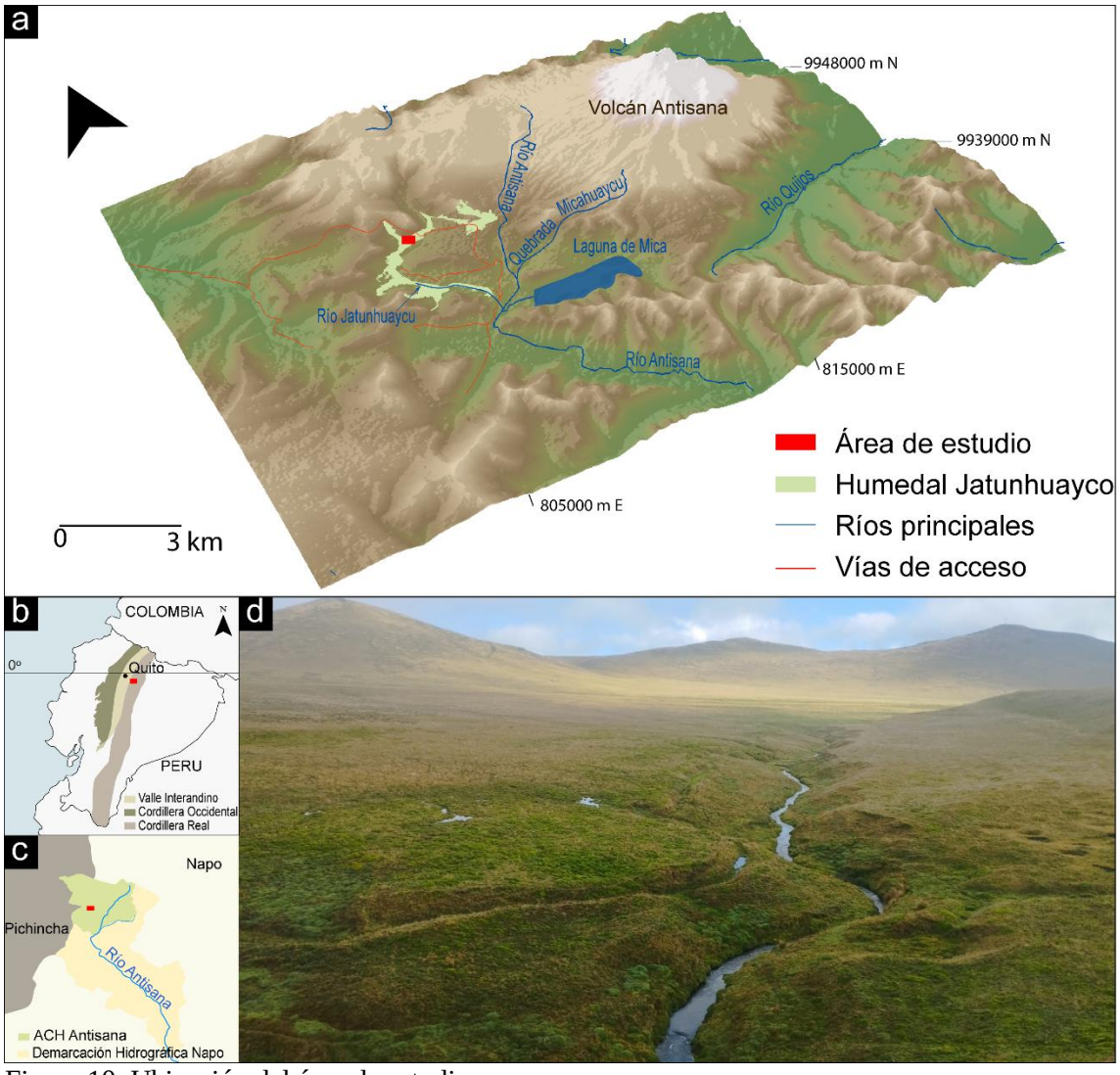



Figura 10. Ubicación del área de estudio.
Elaboración propia
*Nota:* a) Ubicación del área de estudio con respecto al volcán Antisana, laguna Mica y humedal Jatunhuaycu. SR: WGS84 Zona 17S. b) Localización general del área de estudio con respecto a la Cordillera Real. c) Contexto hidrográfico del área de estudio. d) Humedal Jatunhuayco. Fotografía tomada por Gabriela Núñez.

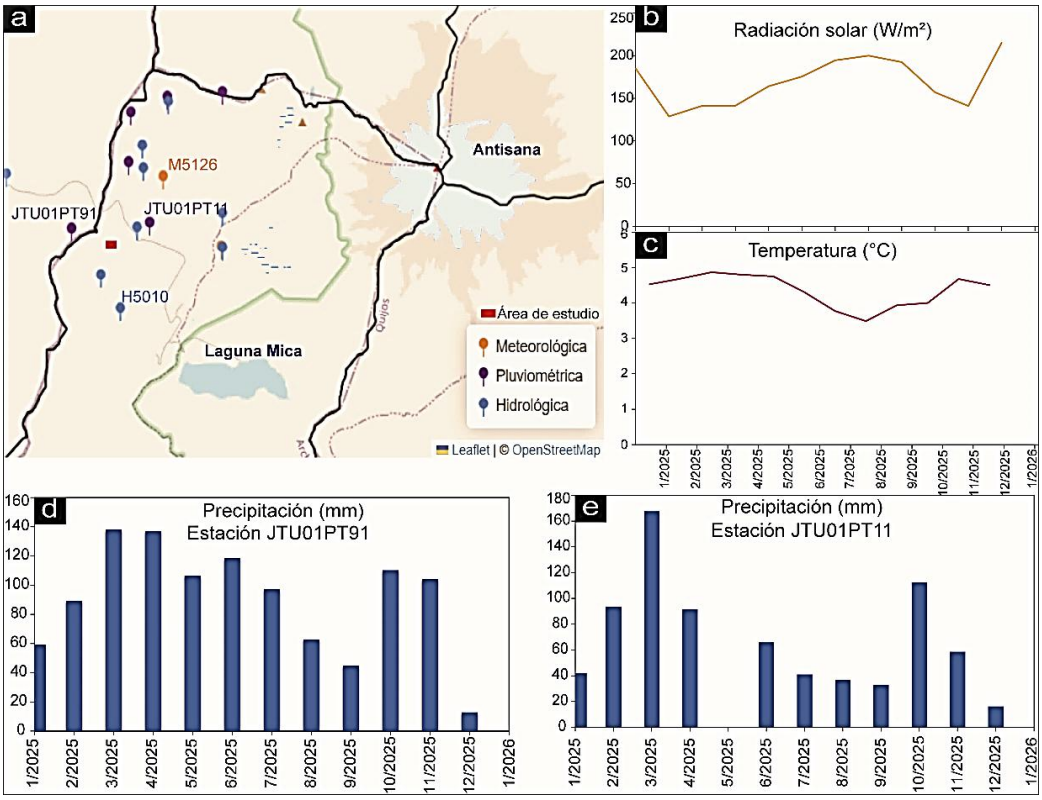



Figura 11. Condiciones climáticas del área de estudio.
Fuente: Adaptada de FONAG (2026)
*Nota:* a) Ubicación de las estaciones meteorológicas, pluviométricas e hidrológicas. b) Radiación solar, estación M5126. c) Temperatura del aire en la estación M5126. d) y e) Precipitación mensual en las estaciones JTU01PT91 y JTU01PT11

### 1.3. Geología

El paisaje andino del Ecuador resulta del control geodinámico de la placa Sudamericana, el cual proviene de la subducción o hundimiento de placa oceánica bajo el continente (Spikings et al. 2024). Estos procesos de subducción dieron paso al levantamiento de los Andes a través de la formación de centros volcánicos que marcan la morfología del país y condicionan su régimen climático y humedad (Boschman 2021, 221). En la región Andina del Ecuador, los Andes corresponden a dos cordilleras, Real u Oriental al este y Occidental al oeste, separadas por el Valle Interandino, sitio que presenta una alta densidad poblacional y alberga la ciudad capital, Quito (Mihai et al. 2023) (Figura 10.B).

El volcán Antisana, localizado al este del área de estudio, corresponde a un estrato volcán activo de 13 km de diámetro con una cumbre de 5 753 m s.n.m. y una superficie glaciar de 15,1 km$^2$ (Ruiz Hernández et al. 2018, 5; Cabrera et al. 2020, 2). El Antisana se construyó desde el Pleistoceno, por un periodo de 400 000 años, consistiendo en la formación y destrucción de dos conos volcánicos antiguos (Hall et al. 2017, 24). Su

volcanismo y dinámica glaciar de la época determinan la litología y morfología del terreno.

En el área de estudio, de acuerdo con el levantamiento geológico de Carranco et al. (2022, 32-35), en la subcuenca del río Jatunhuaycu, las litologías basales corresponden a flujos de lava del Antisana (rocas ígneas masivas) y depósitos de lahar (material volcánico mezclado con agua), sobre los que afloran depósitos glaciares (p.e. morrenas que resultaron del movimiento de glaciar sobre el terreno) (Figura 12). Las litologías más recientes comprenden flujos de lodo, depósitos de caída (ceniza y tefra volcánica) y coluviales (depósitos generados por acción de la gravedad). Sobre estas litologías se desarrollan suelos volcánicos, producto de la meteorización y retrabajamiento de las litologías preexistentes (Figura 12).

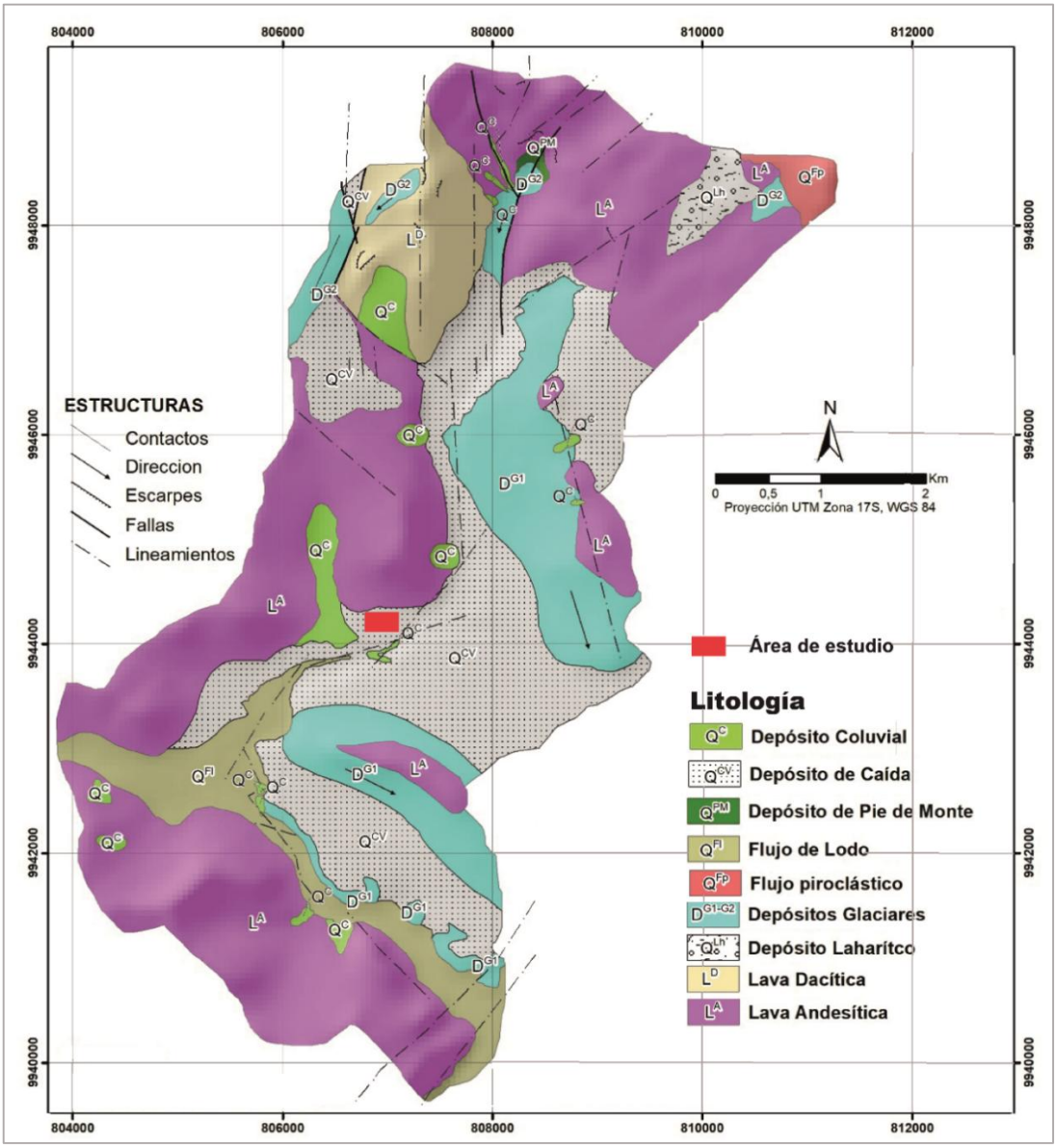



Figura 12. Litologías de la subcuenca del río Jatunhuayco
Fuente: Adaptada de Carranco et al. (2022)

### 1.4. Suelos: Cobertura y uso

El área de estudio se caracteriza por suelos volcánicos desarrollados sobre litologías procedentes del volcanismo andino local y regional. Predominan los andosoles de carácter vítreo intercalados con depósitos de tefra que alcanzan un espesor de 5 a 7 m (Páez-Bimos et al. 2022, 4). Estos horizontes se superponen a estratos más antiguos y profundos de hasta 27 m conformados por escorias volcánicas y sedimentos glaciares y fluviales (Hall et al. 2017, 24).

Con respecto a la cobertura del suelo, el área está condicionada por la presencia de vegetación arbustiva y herbácea de páramo. En el humedal Jatunhuayco, las plantas tipo almohadilla representan el 52 % de la cobertura, mientras que las gramíneas ocupan el 11 %; el área restante está ocupada por ambos tipos (Páez-Bimos et al. 2022, 4). A nivel del ACH Antisana, la cobertura vegetal ocupa el 99,1% del territorio, con una presencia mínima de áreas sin vegetación o arenales (0,89 %) y cuerpos de agua (0,02 %) (FONAG 2024a). Este patrón refleja un uso de suelo predominante natural, debido a las restricciones sobre la actividad antrópica y las acciones de restauración aplicadas en la zona (Figura 13).

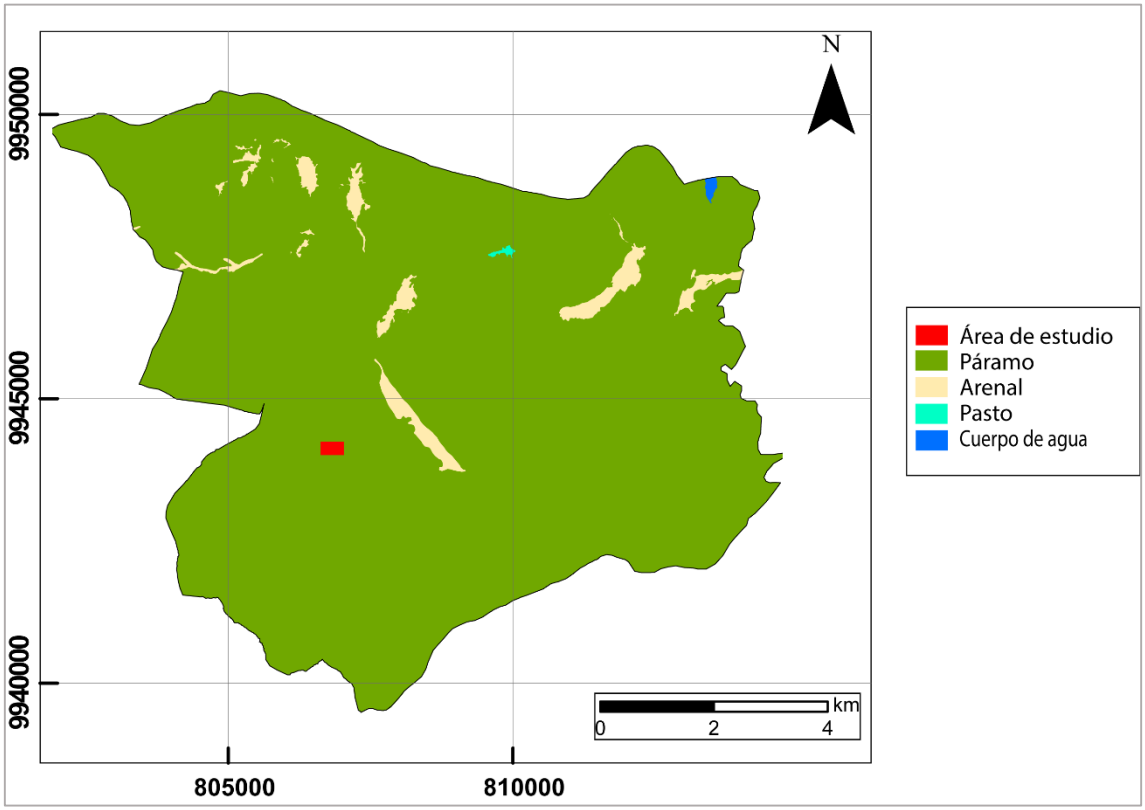



Figura 13. Distribución de la cobertura del suelo en el ACH Antisana
Elaboración propia
*Nota:* La figura se realizó con base en los datos cartográficos del FONAG (2024)

A nivel ecosistémico, el área de estudio se ubica en un herbazal inundable de páramo, un subsistema de humedal altoandino definido en el sistema de clasificación de los ecosistemas del Ecuador continental (Ministerio del Ambiente del Ecuador 2013, 80–87), el cual ocupa el 21,2 % del ACH Antisana. Con fines descriptivos y manteniendo el mismo sistema de clasificación, en el área se identifican ecosistemas de arbustal siempreverde montano del norte (3,2 %), herbazal de páramo (68,2 %), herbazal húmedo subnival de páramo (6,3 %) y herbazal ultrahúmedo subnival de páramo (0,05 %) (FONAG 2014) (Figura 14).

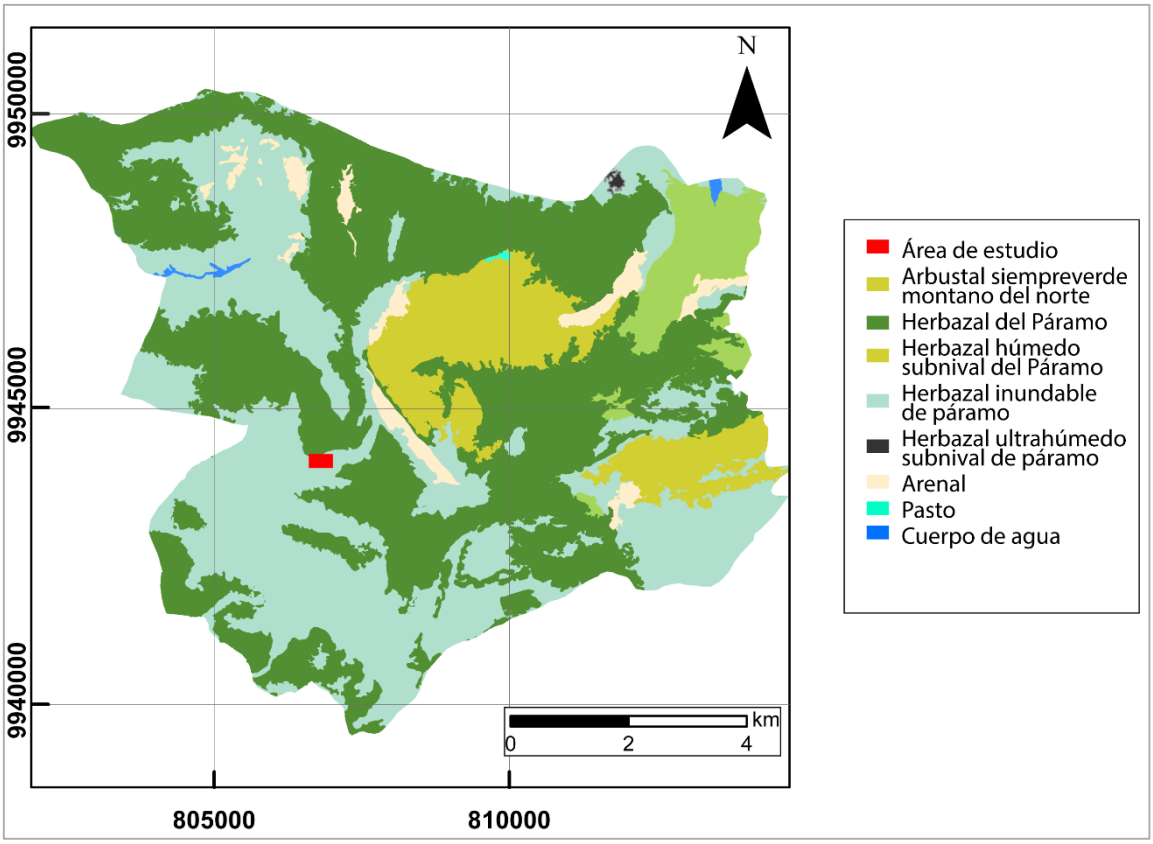



Figura 14. Ecosistemas de páramo en el ACH Antisana y el área de estudio según el sistema de clasificación de ecosistemas del Ecuador continental
*Nota:* La imagen se realizó con base en los datos cartográficos del FONAG (2024)

## 2. Metodología

El presente estudio partió de la recopilación de información previa del área de estudio (Hall et al. 2017; Grubb et al. 2020; Carranco et al. 2022; Torres et al. 2024; FONAG 2025). Esta información se complementó con insumos cartográficos y datos hidrometeorológicos para definir el contexto actual y condiciones climáticas del área. Adicionalmente, se verificaron estudios relacionados al carbono orgánico en el área de estudio y en zonas de humedales con condiciones similares como guía para la ejecución

metodológica (Avnimelech et al. 2001; Hribljan et al. 2016; Comas et al. 2017; Hribljan et al. 2017; Jackson et al. 2017; Calispa et al. 2021; Yi et al. 2026).

La información disponible fue estandarizada a escala uniforme (1:100), definiendo el sistema de proyección UTM WGS84, Zona 17S y unidades métricas, a través del uso del paquete informático de ArcGIS (10.4.1). Adicionalmente, en el procesamiento de los datos se emplearon las versiones de prueba de *Statgraphics* 18 y *Surfer* 31.

### 2.1. Delimitación de la parcela y diseño de muestreo

La delimitación del área de estudio se determinó con base en la extensión del humedal Jatunhuyaco, con el objetivo de definir la cantidad de carbono orgánico almacenado en los primeros 20 a 30 cm del suelo. Esta delimitación se realizó considerando el contexto del humedal que fue sometido a acciones de restauración y conservación después de años de intervención antrópica (Ecuador FONAG 2025, 10). De esta forma, se consideró una parcela de un área de 2 500 $m^2$ (Figura 15).

El diseño de la parcela consideró criterios de accesibilidad desde la vía principal, pendientes bajas (2-6 %) y altitudes entre 3 800-4 000 m s.n.m., seleccionando un lugar en el que las condiciones eran relativamente homogéneas en pendiente, elevación y cobertura vegetal. Sobre esta superficie se estableció una cuadrícula a través de la colocación de estacas guía en los cuatro vértices de la parcela (Figura 15) (Tabla 1). Con base en estas estacas se realizó el tendido de cuerdas marcadas cada 10 m a lo largo y ancho de la parcela (Figura 16.A).

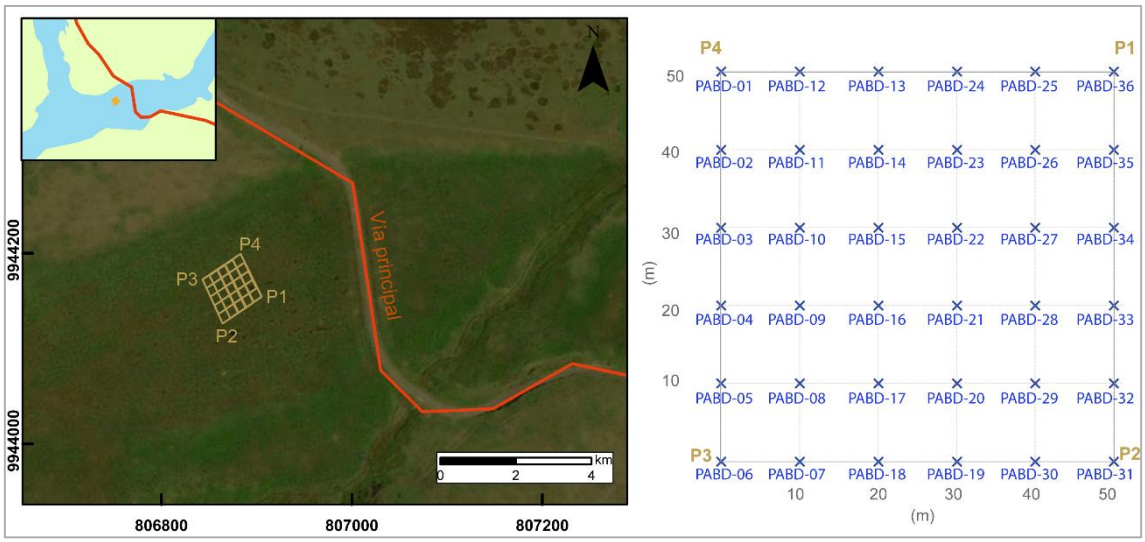



Figura 15. Parcela y diseño de muestreo en el humedal Jatunhuayco (polígono celeste)
Elaboración propia

Tabla 1
**Puntos de control de la parcela de muestreo**

| Punto de control | UTM m E | UTM m N | Altitud (m s.n.m) |
|---|---|---|---|
| P1 | 805374 | 9942557 | 4003 |
| P2 | 805377 | 9942457 | 3996 |
| P3 | 805473 | 9942559 | 3999 |
| P4 | 805476 | 9942459 | 3999 |

Elaboración propia

Este diseño resultó en 36 puntos de recolección de muestras de suelo (Figura 15, Tabla 2). En cada punto se retiró la cobertura vegetal hasta llegar a 20 cm de profundidad (Figura 16.D). Es importante señalar que el muestreo se realizó únicamente en zonas con vegetación de tipo pajonal, evitando áreas con vegetación en almohadilla, debido a que estas requerían la remoción de una mayor masa vegetal (Figura 16.B, D). Además, considerando las condiciones climáticas frías y lluviosas de la jornada de muestreo, se priorizaron sitios de acceso más sencillo. A la vez, se evitaron zonas anegadas por completo, seleccionando zonas donde el nivel freático estaba un poco más bajo; sin embargo, el muestreo se realizó bajo condiciones de saturación generalizada, debido a que el agua llenaba las cavidades excavadas en pocos minutos (Figura 16.D).

En cada punto se extrajo una muestra de suelo para análisis de carbono y una muestra para densidad aparente (Tabla 2). La muestra de carbono se recolectó a través de una pala pequeña, estimando un peso aproximado de 200 gramos (Figura 16.C, F); la muestra correspondiente a la densidad aparente se tomó a través de la inserción de un cilindro metálico de 250 $cm^3$ de volumen, que se introducía por presión con una base de silicona sobre el cilindro y la acción de una fuerza mecánica (Figura 16.C, E) (Rodriguez et al. 2025). Las muestras se colocaron en fundas de plástico etiquetadas y selladas herméticamente (Figura 16.F, G); posteriormente, se almacenaron a temperatura ambiente y fueron trasladadas a los laboratorios para su análisis.

Tabla 2
**Código y ubicación de las muestras de suelo**

| N° | Código BD | Código OC | UTM m E | UTM m N |
|---|---|---|---|---|
| 1 | PABD-01 | PAOC-01 | 806883 | 9944190 |
| 2 | PABD-02 | PAOC-02 | 806875 | 9944184 |
| 3 | PABD-03 | PAOC-03 | 806867 | 9944179 |
| 4 | PABD-04 | PAOC-04 | 806859 | 9944174 |
| 5 | PABD-05 | PAOC-05 | 806851 | 9944168 |
| 6 | PABD-06 | PAOC-06 | 806843 | 9944163 |
| 7 | PABD-07 | PAOC-07 | 806847 | 9944154 |
| 8 | PABD-08 | PAOC-08 | 806855 | 9944159 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 9 | PABD-09 | PAOC-09 | 806863 | 9944165 |
| 10 | PABD-10 | PAOC-10 | 806871 | 9944170 |
| 11 | PABD-11 | PAOC-11 | 806879 | 9944176 |
| 12 | PABD-12 | PAOC-12 | 806887 | 9944181 |
| 13 | PABD-13 | PAOC-13 | 806892 | 9944172 |
| 14 | PABD-14 | PAOC-14 | 806883 | 9944167 |
| 15 | PABD-15 | PAOC-15 | 806875 | 9944161 |
| 16 | PABD-16 | PAOC-16 | 806867 | 9944156 |
| 17 | PABD-17 | PAOC-17 | 806859 | 9944150 |
| 18 | PABD-18 | PAOC-18 | 806852 | 9944145 |
| 19 | PABD-19 | PAOC-19 | 806856 | 9944136 |
| 20 | PABD-20 | PAOC-20 | 806863 | 9944141 |
| 21 | PABD-21 | PAOC-21 | 806872 | 9944147 |
| 22 | PABD-22 | PAOC-22 | 806880 | 9944153 |
| 23 | PABD-23 | PAOC-23 | 806888 | 9944158 |
| 24 | PABD-24 | PAOC-24 | 806896 | 9944164 |
| 25 | PABD-25 | PAOC-25 | 806901 | 9944155 |
| 26 | PABD-26 | PAOC-26 | 806892 | 9944149 |
| 27 | PABD-27 | PAOC-27 | 806884 | 9944144 |
| 28 | PABD-28 | PAOC-28 | 806876 | 9944138 |
| 29 | PABD-29 | PAOC-29 | 806868 | 9944132 |
| 30 | PABD-30 | PAOC-30 | 806860 | 9944127 |
| 31 | PABD-31 | PAOC-31 | 806864 | 9944117 |
| 32 | PABD-32 | PAOC-32 | 806872 | 9944123 |
| 33 | PABD-33 | PAOC-33 | 806881 | 9944129 |
| 34 | PABD-34 | PAOC-34 | 806889 | 9944134 |
| 35 | PABD-35 | PAOC-35 | 806897 | 9944140 |
| 36 | PABD-36 | PAOC-36 | 806905 | 9944145 |

Elaboración propia




Figura 16. Recolección de muestras de suelo.
Fuente: Archivo personal
*Nota:* a) Ubicación de estacas guía y tendido de cuerdas graduadas cada 10 metros. b) Cavidad en almohadilla. c) Cilindro metálico, base de silicona y espátula empleados para la toma de muestras. d) Cavidad en suelo dominado por paja. e) Inserción del anillo metálico y base para la

toma de muestra de densidad aparente. f) Muestra de carbono orgánico. g) Muestra de densidad aparente. Fotografía: Gabriela Núñez

### 2.2. Análisis de laboratorio

Las muestras para el análisis de carbono orgánico fueron enviadas al laboratorio de tratamiento de suelos de la Universidad de las Américas (UDLA) bajo el patrón de código PAOC-N°. La estimación del carbono se realizó por el método de pérdida por ignición (*Loss on Ignition*, LOI), el cual consiste en el secado previo de la muestra, seguido de su calcinación a altas temperaturas (400 °C) para determinar la pérdida de masa asociada a la combustión de la materia orgánica (Nelson y Sommers 1996, 1004). Los resultados fueron presentados, expresando el contenido de carbono orgánico en porcentaje.

El análisis de densidad aparente se realizó en el laboratorio del Centro de Investigación para el Territorio y Hábitat Sostenible (CITEHS) de la Universidad Indoamérica en Quito. El método empleado fue el secado en horno, empleando la mufla de laboratorio marca IVYMEN N-8. Se registró el peso húmedo de cada muestra previo ingreso, colocándolas en recipientes de aluminio. Posteriormente, se secaron a una temperatura de 105 °C por 24 horas. Una vez finalizado el proceso se registró el peso seco en gramos (g) (Sinclair et al. 2020, 10; Bonilla-Bedoya et al. 2022, 5) (Figura 17).

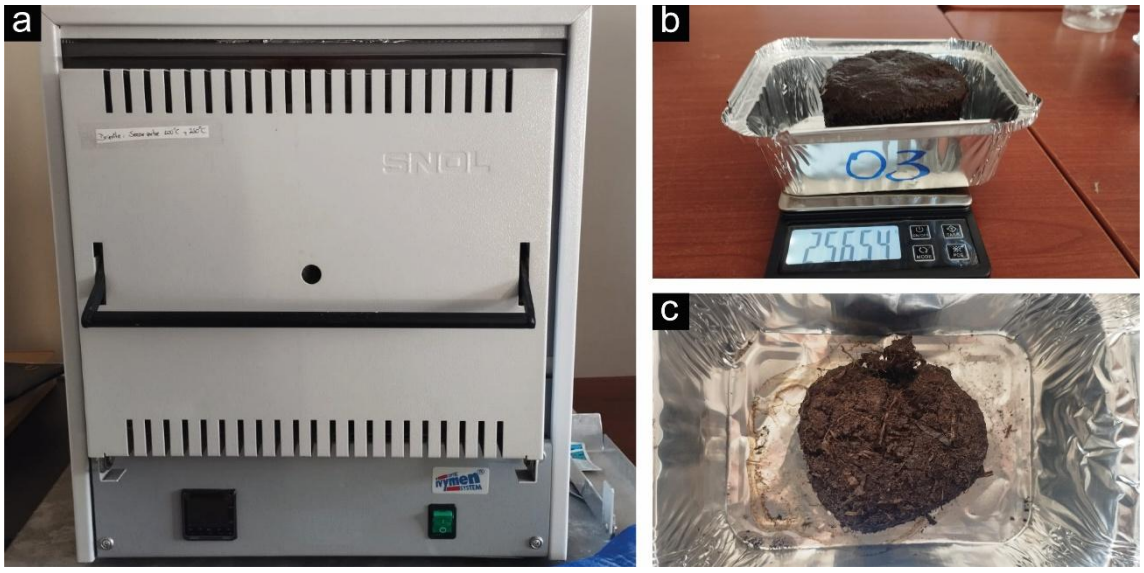



Figura 17. Tratamiento de las muestras de suelo para la determinación de la densidad aparente.
Fuente: Archivo personal
*Nota:* a) Horno IVYMEN N-8L del laboratorio CITEHS. b) Peso húmedo de la muestra antes del proceso de secado. c) Peso seco de la muestra después del tratamiento. Fotografía: Gabriela Núñez

La estimación de la densidad aparente se realizó a través de la aplicación de la relación entre la masa del peso seco y el volumen del cilindro metálico de muestreo, según la ecuación 1.

$$BD\ (g.cm^{-3}) = \frac{peso\ seco\ (g)}{volumen\ cilindro\ (cm^3)} \quad \text{Ecuación 1}$$

El almacenamiento del carbono orgánico del suelo se calculó aplicando el producto de la densidad aparente, la profundidad de muestreo y el porcentaje de carbono orgánico de acuerdo con la ecuación 2 (Hribljan et al. 2017).

$$SOC\ (kg.m^{-2}) = OC(\%) \times BD(g.cm^{-3}) \times profundidad(m) \times 0.1 \quad \text{Ecuación 2}$$

Los valores obtenidos se expresaron en Mg C $ha^{-1}$ (Mega gramos de carbono por hectárea), usando la equivalencia de la ecuación 3.

$$1\ kg.m^{-2} = 10\ Mg\ C\ ha^{-1} \quad \text{Ecuación 3}$$

Finalmente, se analizaron y organizaron los datos mediante estadística descriptiva, incluyendo medidas de tendencia central y dispersión, con el fin de caracterizar la variabilidad del carbono orgánico del suelo y la densidad aparente. La relación lineal entre variables se determinó a través del coeficiente de correlación de Pearson, empleando el programa informático *Statgraphics* 18. Finalmente, se analizó la distribución espacial del almacenamiento de SOC en el área de estudio a través del método de *kriging* ordinario, usando el programa *Surfer* 31.

# Capítulo tercero
# Resultados y discusión

## 1. Resultados

De acuerdo con la revisión teórica, las turberas altoandinas almacenan cantidades significativas de carbono orgánico, constituyéndose importantes reservas a nivel mundial. En el páramo de los Andes, el clima, el régimen de precipitación, forma del terreno, rocas, suelo y cobertura vegetal propician las condiciones de acumulación. En esta sección se analiza la magnitud del almacenamiento de carbono orgánico en las turberas de estudio y los factores de mayor incidencia sobre su distribución a partir de parámetros físicos determinados en laboratorio.

### 1.1. Carbono orgánico

El análisis estadístico de los resultados indica que una turbera de 2 500 $m^2$ en un ambiente de páramo presenta un contenido de carbono orgánico promedio de 47,5 %. Este resultado se obtuvo del análisis de 36 muestras de suelo que presentan una desviación estándar de 10,99 % y un coeficiente de variación de 23,16 %. Estos datos revelan que existe una ligera variabilidad y distribución relativamente heterogénea del carbono almacenado en el suelo (Figura 18.A, B). Además, la presencia de valores mínimos de 22,67 % (PAOC-15) y máximos de 67,14 % (PAOC-02), refleja que en el terreno ocurren zonas de menor y mayor acumulación (Tabla 3).

Tabla 3
**Porcentaje de carbono orgánico de las muestras de suelo**

| N° | Código | CO (%) | N° | Código | CO (%) |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | PAOC-01 | 63,60 | 19 | PAOC-19 | 55,22 |
| 2 | PAOC-02 | 67,14 | 20 | PAOC-20 | 25,42 |
| 3 | PAOC-03 | 50,54 | 21 | PAOC-21 | 43,13 |
| 4 | PAOC-04 | 51,37 | 22 | PAOC-22 | 50,65 |
| 5 | PAOC-05 | 66,90 | 23 | PAOC-23 | 48,01 |
| 6 | PAOC-06 | 55,23 | 24 | PAOC-24 | 40,11 |
| 7 | PAOC-07 | 38,48 | 25 | PAOC-25 | 46,44 |
| 8 | PAOC-08 | 55,46 | 26 | PAOC-26 | 40,57 |
| 9 | PAOC-09 | 61,06 | 27 | PAOC-27 | 51,19 |
| 10 | PAOC-10 | 58,75 | 28 | PAOC-28 | 43,48 |
| 11 | PAOC-11 | 45,73 | 29 | PAOC-29 | 55,41 |
| 12 | PAOC-12 | 44,10 | 30 | PAOC-30 | 45,81 |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| 13 | PAOC-13 | 63,23 | 31 | PAOC-31 | 29,13 |
| 14 | PAOC-14 | 35,05 | 32 | PAOC-32 | 41,73 |
| 15 | PAOC-15 | 22,67 | 33 | PAOC-33 | 36,18 |
| 16 | PAOC-16 | 51,85 | 34 | PAOC-34 | 45,69 |
| 17 | PAOC-17 | 41,94 | 35 | PAOC-35 | 43,48 |
| 18 | PAOC-18 | 59,77 | 36 | PAOC-36 | 35,43 |

Elaboración propia

En general, el sesgo (-0,48) y curtosis (-0,28) de los datos indican una distribución normal, sin presencia de valores extremos (Figura 18.C).

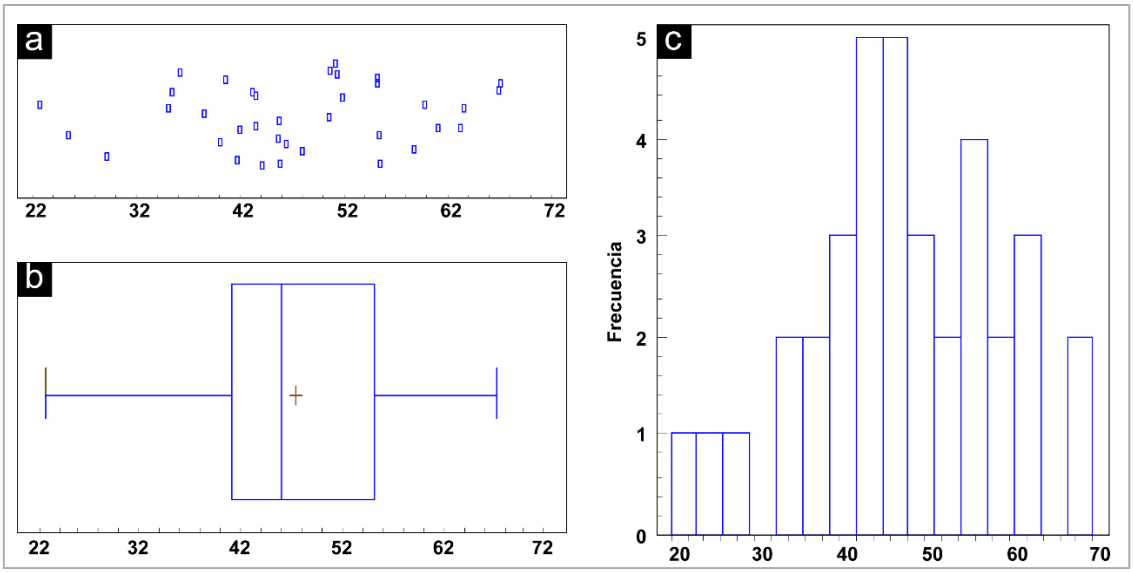



Figura 18. Representación estadística del carbono orgánico de 36 muestras de suelo
Elaboración propia
*Nota:* a) Dispersión de los datos. b) Diagrama de caja y ubicación de la media, sin presencia de valores atípicos. c) Histograma de los datos indicando una distribución aproximadamente normal

### 1.2. Densidad aparente

La densidad aparente se calculó utilizando la ecuación 1 a partir del peso seco de 36 muestras de suelo obtenido en laboratorio. Este valor se dividió para el volumen del cilindro de muestreo, obteniendo los valores de la tabla 4. De acuerdo con la estadística de los datos, el área de estudio tiene una densidad aparente promedio de 0,257 $g.cm^{-3}$ con una desviación estándar de 0,085 $g.cm^{-3}$. Estos valores indican una alta variabilidad entre los puntos de muestreo que se complementa con una distribución heterogénea según el coeficiente de variación (32,94 %) (Figura 19.A). La densidad aparente varía entre 0,12 (PABD-13) y 0,53 $g.cm^{-3}$ (PABD-20), sugiriendo la presencia de suelos con distintos grados de compactación.

La distribución de los datos es asimétrica positiva con un sesgo de 2,18 y una curtosis de 3,05 (Figura 19.C). Esta distribución está marcada por la presencia de extremos y una concentración de los datos en rangos bajos de densidad aparente (Figura 19.B). Es decir, la mayor parte de puntos corresponden a suelos con baja densidad, sin embargo, una pequeña fracción presenta valores que se alejan de la tendencia general (Figura 19.B). Estas diferencias podrían estar asociadas con las variaciones aleatorias de la metodología del estudio durante el proceso de secado de las muestras en el laboratorio. En particular, la limitación de capacidad del horno implicó el procesamiento de las muestras en distintos periodos de tiempo, lo que pudo ocasionar ligeras variaciones en la pérdida de humedad (Anexo 1).

Tabla 4

**Densidad aparente de las muestras analizadas**

| N° | Código | Peso seco (g) | BD (g.cm$^{-3}$) | N° | Código | Peso seco (g) | BD (g.cm$^{-3}$) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | PABD-01 | 45,53 | 0,18 | 19 | PABD-19 | 56,03 | 0,22 |
| 2 | PABD-02 | 46,5 | 0,19 | 20 | PABD-20 | 132,35 | 0,53 |
| 3 | PABD-03 | 52,1 | 0,21 | 21 | PABD-21 | 71,56 | 0,29 |
| 4 | PABD-04 | 40,26 | 0,16 | 22 | PABD-22 | 55,67 | 0,22 |
| 5 | PABD-05 | 37,45 | 0,15 | 23 | PABD-23 | 74,78 | 0,30 |
| 6 | PABD-06 | 63,1 | 0,25 | 24 | PABD-24 | 79,71 | 0,32 |
| 7 | PABD-07 | 67,27 | 0,27 | 25 | PABD-25 | 64,86 | 0,26 |
| 8 | PABD-08 | 48,83 | 0,20 | 26 | PABD-26 | 55,72 | 0,22 |
| 9 | PABD-09 | 52,33 | 0,21 | 27 | PABD-27 | 52,53 | 0,21 |
| 10 | PABD-10 | 37,41 | 0,15 | 28 | PABD-28 | 77,25 | 0,31 |
| 11 | PABD-11 | 57,44 | 0,23 | 29 | PABD-29 | 70,62 | 0,28 |
| 12 | PABD-12 | 34,43 | 0,14 | 30 | PABD-30 | 81,84 | 0,33 |
| 13 | PABD-13 | 30,64 | 0,12 | 31 | PABD-31 | 82,77 | 0,33 |
| 14 | PABD-14 | 49,7 | 0,20 | 32 | PABD-32 | 72,8 | 0,29 |
| 15 | PABD-15 | 74,01 | 0,30 | 33 | PABD-33 | 117,51 | 0,47 |
| 16 | PABD-16 | 72,44 | 0,29 | 34 | PABD-34 | 56,03 | 0,22 |
| 17 | PABD-17 | 78,37 | 0,31 | 35 | PABD-35 | 59,97 | 0,24 |
| 18 | PABD-18 | 80,01 | 0,32 | 36 | PABD-36 | 81,48 | 0,33 |

Elaboración propia

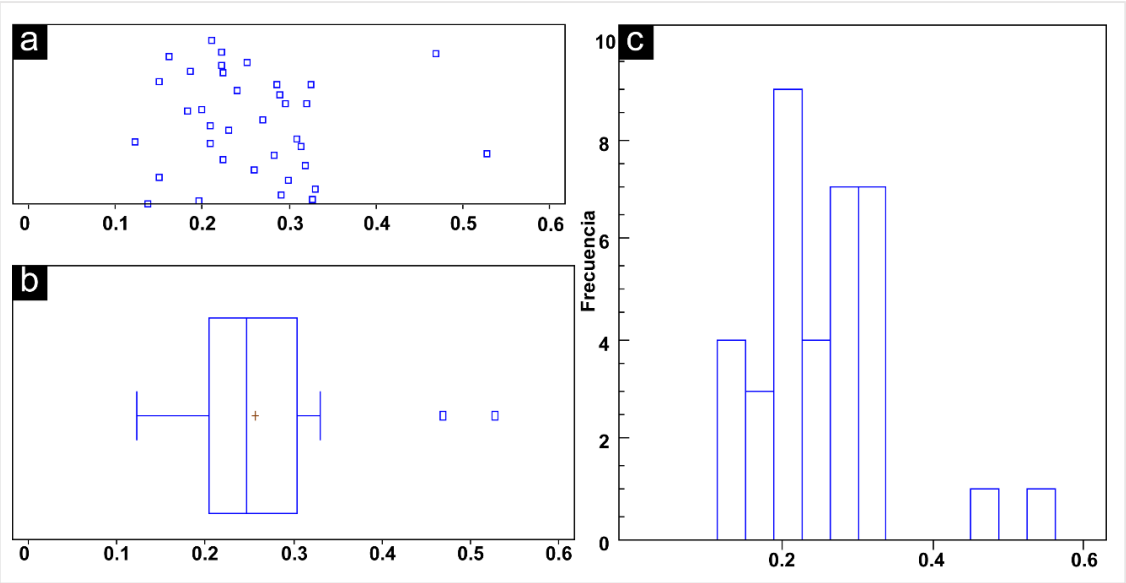



Figura 19. Representación estadística de la densidad aparente de 36 muestras de suelo
Elaboración propia
*Nota:* a) Dispersión de los datos. b) Diagrama de caja y ubicación de la media, con presencia de valores atípicos. c) Histograma de los datos indicando una distribución asimétrica

### 1.3. Carbono orgánico y densidad aparente

De acuerdo con el análisis del coeficiente de correlación de Pearson, las variables presentan una correlación negativa moderada (r = -0,635). Este resultado implica que las tendencias son inversas entre variables; si la densidad aparente aumenta, el carbono orgánico disminuye.

Considerando la densidad aparente como variable independiente y el carbono orgánico como variable dependiente, la relación entre variables se describe por la ecuación CO = -82,55BD +68,7 con un coeficiente de determinación $R^2$ igual a 0,4031. Esta regresión indica que el 40,31 % de la variabilidad del carbono se explica a través de la densidad aparente del suelo (Figura 20).

La relación entre variables no es por completo determinante, indicando que existen otros controles sobre el contenido de carbono en el suelo. Es decir, cerca del 60 % representa la influencia de factores asociados a la formación de las turberas. Sin embargo, la densidad aparente es esencial debido a que controla propiedades derivadas que indican la calidad del suelo como porosidad total, capacidad de retención de agua, infiltración, permeabilidad, resistencia mecánica y compactación.

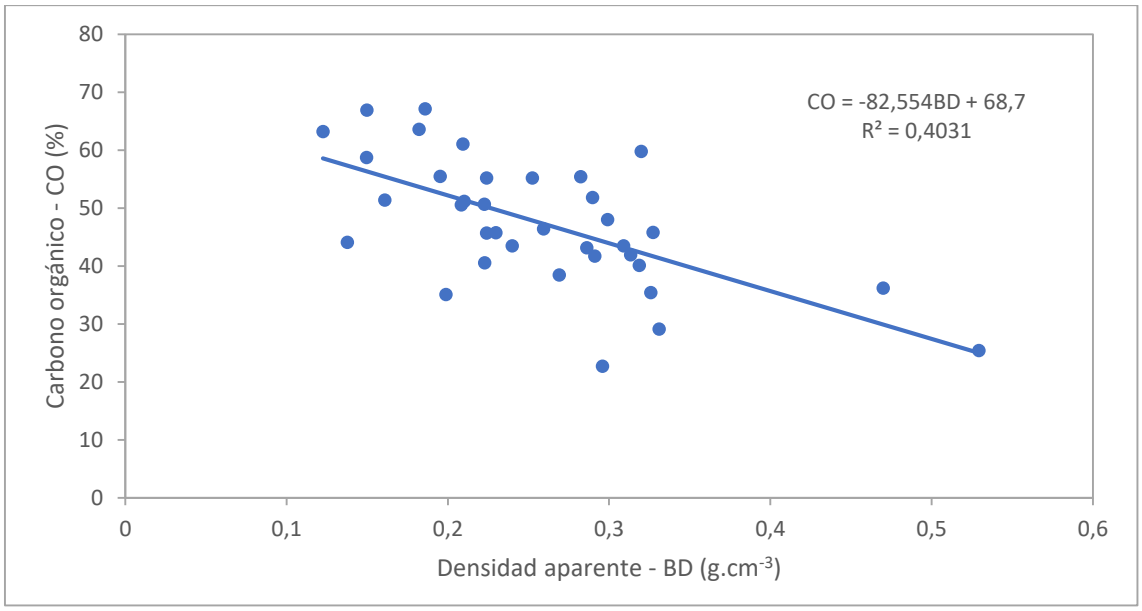



Figura 20. Regresión lineal entre la densidad aparente y carbono orgánico de las muestras analizadas
Elaboración propia

### 1.4. Almacenamiento de SOC

La cantidad de carbono orgánico almacenado en las muestras de suelo se determinó a través de la aplicación de la ecuación 2 y 3 (Tabla 5). En promedio, la parcela almacena un valor de 232,48 Mg C $ha^{-1}$; sin embargo, se evidencia una alta variabilidad relacionada con una desviación estándar de 56,98 Mg C $ha^{-1}$ y un coeficiente de variación de 24,51 % que indica una distribución heterogénea. Estos valores puntualizan diferencias significativas dentro de la parcela con mínimos de 121,47 Mg C $ha^{-1}$ y máximos de 382,56 Mg C $ha^{-1}$ que podrían estar vinculados a factores de control como el tipo de vegetación.

En general, los datos presentan un comportamiento consistente con el observado en el análisis de OC y BD, aunque con una mayor amplitud. El sesgo y curtosis indican una distribución cercana a la normal, con un ligero sesgo positivo y presencia de extremos, no obstante, la mayoría de los datos se concentran cerca del promedio (Figura 21).

Tabla 5
**Almacenamiento de SOC en los 36 puntos de muestreo**

| Punto de muestreo | SOC (Mg C $ha^{-1}$) | Punto de muestreo | SOC (Mg C $ha^{-1}$) |
|---|---|---|---|
| 1 | 231,65 | 19 | 247,50 |
| 2 | 249,75 | 20 | 269,14 |
| 3 | 210,66 | 21 | 246,93 |
| 4 | 165,46 | 22 | 225,59 |
| 5 | 200,44 | 23 | 287,23 |
| 6 | 278,78 | 24 | 255,77 |
| 7 | 207,07 | 25 | 240,97 |

| | | | |
|---|---|---|---|
| 8 | 216,67 | 26 | 180,85 |
| 9 | 255,63 | 27 | 215,13 |
| 10 | 175,83 | 28 | 268,73 |
| 11 | 210,16 | 29 | 313,07 |
| 12 | 121,47 | 30 | 299,91 |
| 13 | 154,99 | 31 | 192,89 |
| 14 | 139,37 | 32 | 243,01 |
| 15 | 134,23 | 33 | 340,09 |
| 16 | 300,47 | 34 | 204,80 |
| 17 | 262,93 | 35 | 208,60 |
| 18 | 382,56 | 36 | 230,95 |

Elaboración propia

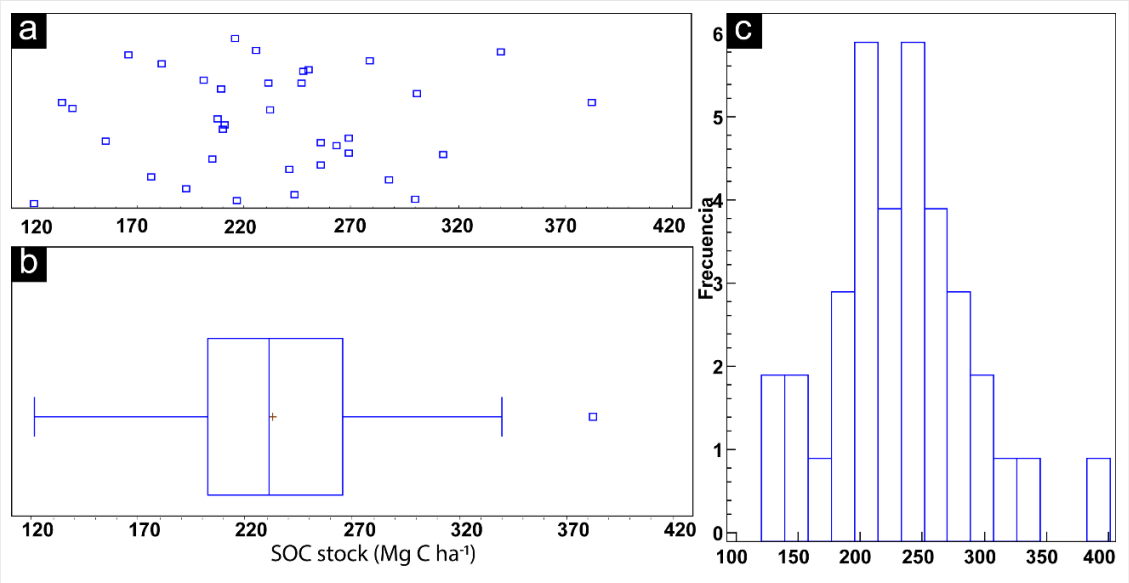



Figura 21. Representación estadística del almacenamiento de SOC
Elaboración propia
*Nota:* a) Dispersión de los datos. b) Diagrama de caja. c) Histograma

### 1.5. Distribución del almacenamiento de SOC

Las variables analizadas presentan una distribución espacial heterogénea en el área de estudio (Figura 22). El carbono orgánico es mayor en la sección noroccidental de la parcela. En contraste, la densidad aparente presenta un comportamiento opuesto, concentrando los valores más bajos en áreas donde el carbono es mayor. Este contraste entre variables coincide con la relación inversa que se determinó en la sección 1.3 del capítulo 3. El almacenamiento de SOC es mayor en la zona sur y suroccidental de la parcela, mostrando valores superiores a 350 Mg C $ha^{-1}$ en áreas donde existe alto CO y baja densidad aparente. En la Figura 22 se muestra que la mayor proporción de carbono retenido en el suelo se concentra en sectores de baja densidad aparente con suelos anegados por periodos prolongados de tiempo que favorecen ambientes anaeróbicos.

Considerando que el muestreo se realizó en áreas donde no existía una capa vegetal espesa y se priorizó suelos cubiertos por pajonal, el almacenamiento de SOC está controlado principalmente por la densidad aparente del suelo que ejerce un mayor control en la capacidad del suelo de acumular carbono. Por esta razón, esta propiedad es determinante para calificar el estado de una turbera como reservorio de carbono, puesto que indica de forma directa el grado de degradación o restauración del sistema. Vinculada a esta propiedad se acompañan las condiciones hidrológicas que indican la saturación del suelo y, por tanto, la velocidad de descomposición y preservación de materia orgánica.

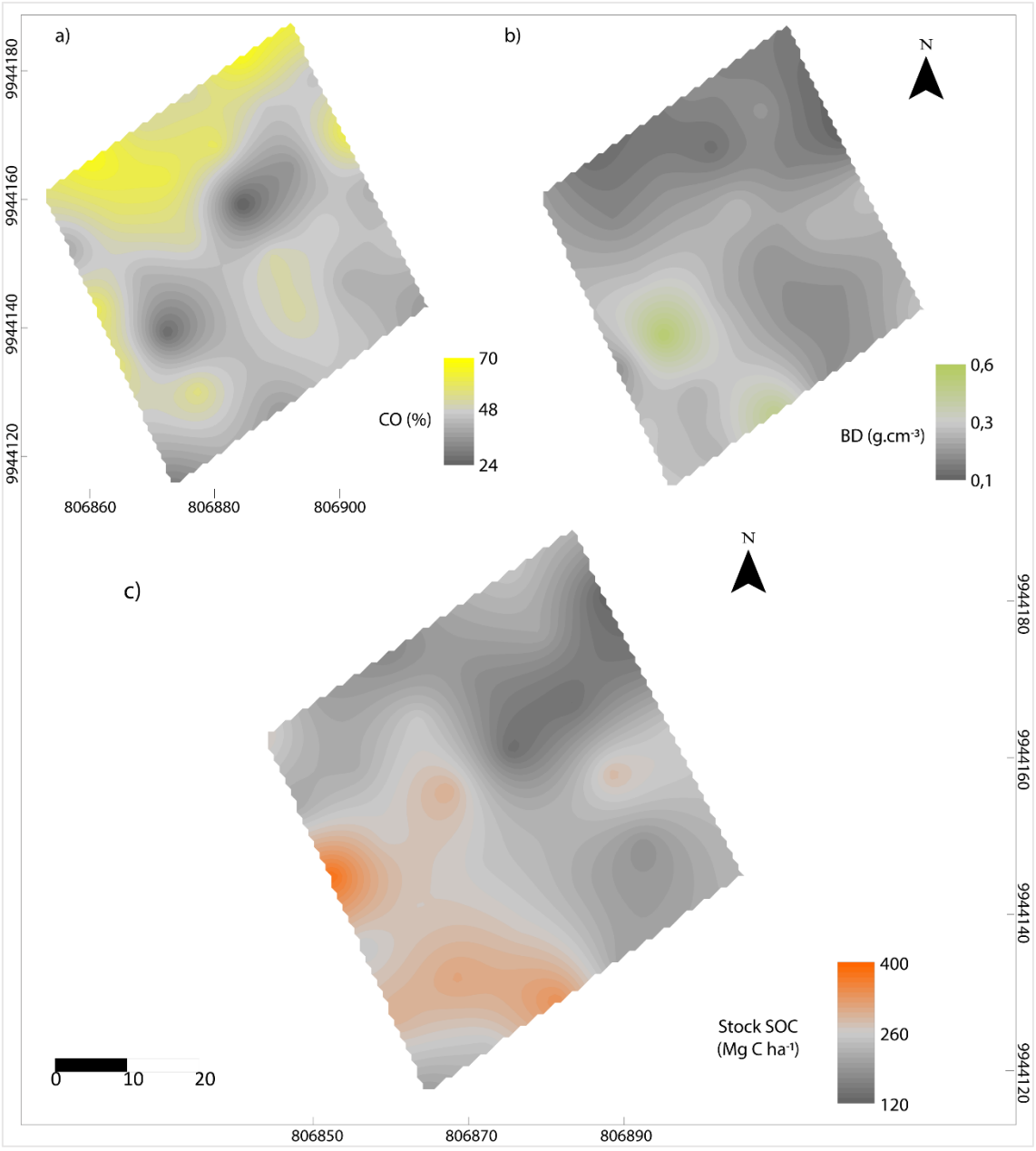



Figura 22. Distribución espacial del carbono orgánico del suelo
Elaboración propia
Nota: a), densidad aparente b) y almacenamiento o stock de SOC con base en los datos obtenidos del análisis de 36 muestras tomadas en la parcela de estudio

## 2. Discusión

Una parcela de 2 500 $m^2$ (0,25 ha) en un ecosistema de turbera almacena en promedio 232,48 Mg C $ha^{-1}$. Este valor representa sistemas altoandinos que se caracterizan por almacenar grandes cantidades de carbono. En un estudio similar, Hribljan et al. (2016,118) estimaron un almacenamiento medio de 128 Mg C $ha^{-1}$ en una turbera joven en la Reserva Ecológica Antisana, tomando muestras de suelo en un solo punto a menos de un metro de profundidad. Comas et al. (2017, 379) obtuvieron valores similares a través del muestreo en un punto medio aproximado de la cuenca correspondiente al humedal Jatunhuayco, usando un radar de penetración y núcleos de suelo.

En contraste con estos estudios, el diseño metodológico empleado en este trabajo permitió caracterizar la fracción superficial de la turbera y disminuir la incertidumbre del muestreo y variabilidad de la distribución lateral. De esta forma, se describieron estadísticamente los datos obtenidos, brindando un marco de comparación y análisis para estudios espaciotemporales futuros. Por otra parte, Jackson et al. (2017, 420) mencionan que las mayores reservas de carbono del suelo se localizan por debajo de los 30 cm de profundidad. Sin embargo, en este estudio, la estimación del carbono almacenado en los primeros 20 cm del suelo se ubica dentro de los rangos reportados para ecosistemas similares, sugiriendo que las acciones de conservación implementadas han permitido mantener las condiciones para la acumulación y estabilidad del carbono en la capa superficial de la turbera.

A escala de detalle (1:100), bajo condiciones topográficas homogéneas en pendiente y altitud, se determinó que la macro topografía no constituye un factor determinante directo en relación con el almacenamiento de carbono. El factor más importante y de mayor incidencia es la densidad aparente del suelo, debido a que controla a través de sus propiedades derivadas, la disponibilidad de espacios del suelo que pueden ser ocupados por el carbono. En la figura 22 se indica que, aunque el porcentaje de carbono es alto en la parte noroccidental de la parcela (Figura 22.A), su almacenamiento no lo es (Figura 22.C). Es decir, el mayor control de la distribución del almacenamiento se ejerce a través de las propiedades del suelo, como se señaló en la sección 1.3 del capítulo 3, a través del coeficiente de determinación ($R^2$ = 0.4031) de la regresión lineal entre densidad aparente y carbono orgánico.

El porcentaje del almacenamiento de carbono (~60%) que no depende de la densidad aparente podría responder al control de la hidrología y cobertura vegetal. La

precipitación en el humedal Jatunhuayco es alta (759-1081 mm por año), por lo que el aporte de agua es significativo y determinante para mantener la saturación del suelo. La vegetación adaptada a estas condiciones de anegación ocurre en todo el humedal, contribuyendo al funcionamiento del sistema como reservorio de carbono. Es importante señalar que la vegetación de pajonal y almohadilla presenta capacidades similares de almacenamiento de carbono (Hribljan et al. 2016, 122). Por esta razón, la decisión de tomar muestras de suelo únicamente bajo vegetación de pajonal no incidiría en el cálculo.

La distribución espacial del carbono orgánico permitió identificar un gradiente de conservación dentro del humedal (Figura 22). Las mayores reservas de carbono se localizaron en los sectores internos y permanentemente saturados, mientras que las menores concentraciones ocurrieron hacia las zonas más próximas a la vía de acceso y al punto de ingreso al humedal. Aunque la distancia a la infraestructura no constituye una variable explicativa por sí misma, este patrón coincide con áreas históricamente más expuestas al tránsito, al pastoreo y a otras intervenciones antrópicas. En consecuencia, los resultados sugieren que la distribución espacial del carbono puede emplearse como un indicador indirecto del estado de conservación de las turberas, debido a que refleja la permanencia de condiciones hidrológicas favorables y un menor nivel de perturbación.

La historia de degradación del humedal evidencia que el almacenamiento de carbono no depende exclusivamente de condiciones biofísicas, sino también de decisiones históricas sobre el uso del territorio (Manosalvas et al. 2025). Desde el enfoque de los socioecosistemas, el estado actual de las turberas refleja la interacción prolongada entre procesos ecológicos y actividades humanas, en este caso representadas por el manejo ganadero de la antigua Hacienda Antisana y, posteriormente, por las acciones de restauración impulsadas con fines de conservación hídrica. En consecuencia, la distribución espacial del carbono observada en este estudio constituye también el resultado de esa trayectoria socioecológica.

La recuperación del humedal confirma que la restauración de los procesos hidrológicos permite recuperar también otros servicios ecosistémicos. Hofstede (2011) sostiene que los páramos deben gestionarse considerando el conjunto de servicios que proveen, entre ellos la regulación hídrica, el almacenamiento de carbono, la conservación de la biodiversidad y la formación del suelo. Aunque las intervenciones implementadas por el FONAG tuvieron como objetivo principal asegurar la regulación hídrica para el sistema Mica-Quito Sur, los resultados obtenidos muestran beneficios adicionales sobre

la conservación del carbono orgánico del suelo, evidenciando la estrecha relación entre servicios ecosistémicos.

Por otra parte, al analizar la conservación del humedal desde la perspectiva de la gestión hídrica, se observa que las acciones implementadas responden a la necesidad de garantizar la seguridad hídrica de los usuarios urbanos de Quito. Sin embargo, las implicaciones de este modelo sobre las dinámicas hidrológicas de la cuenca baja y sobre las poblaciones rurales cercanas reciben menor atención. En la parroquia de Pintag, el abastecimiento de agua potable y de riego se organiza a través de juntas administradoras comunitarias, mientras que solo el casco urbano recibe el servicio de la EPMAPS. A pesar de encontrarse próxima a las fuentes de captación ubicadas en el sistema Antisana–Mica, gran parte de la población local no se abastece de estas fuentes. Adicionalmente, los sistemas administrados por la EPMAPS abastecen no solo a Pintag, sino también a otras parroquias del Distrito Metropolitano de Quito, situación que ha generado problemas de continuidad en el suministro para los habitantes del sector. De acuerdo con Maldonado (comunicación personal 2026) y un reportaje de TVC Ecuador (2026), los moradores manifestaron cortes recurrentes del servicio durante las noches como consecuencia de los racionamientos, además de inconformidad por la calidad del agua distribuida.

Este escenario evidencia que la conservación del humedal Jatunhuayco se encuentra estrechamente vinculada a un modelo de gobernanza orientado a asegurar el abastecimiento hídrico de los centros urbanos, mientras que la participación de las comunidades rurales en la toma de decisiones relacionadas con la gestión del agua y la conservación del páramo continúa siendo limitada. Aunque el Ministerio del Ambiente incorpora guardapáramos provenientes de comunidades de la parroquia de Pintag, estos mecanismos no representan espacios amplios de participación en la planificación y gobernanza del territorio. Desde la perspectiva de justicia hídrica (Hidalgo et al. 2017), esta situación refleja una débil articulación entre quienes conservan los ecosistemas altoandinos y quienes reciben la mayor parte de sus beneficios. En este contexto, la conservación del humedal no debería evaluarse únicamente por su capacidad de garantizar el abastecimiento de agua para Quito, sino también por su contribución al bienestar de las poblaciones que habitan la cuenca alta y que históricamente han mantenido una relación directa con el páramo.

# Conclusiones

Las turberas altoandinas del humedal Jatunhuayco en el ACH Antisana presentan una alta capacidad de almacenamiento de carbono orgánico con un valor medio de 232,48 Mg C $ha^{-1}$ en los primeros 20 cm del suelo. Este resultado confirma el valor de estos ecosistemas como importantes sumideros de carbono a escala local y global.

La distribución espacial del carbono orgánico, densidad aparente y almacenamiento de carbono es heterogénea a escala métrica debido al control de condiciones locales. Los valores más altos de almacenamiento de carbono se registraron en zonas de mayor saturación hídrica, indicando la importancia de la presencia de un nivel freático superficial en la acumulación de carbono.

A escala de detalle, la macro topografía no constituye un factor determinante en la distribución de carbono. Los factores que controlan su acumulación son la hidrología y cobertura vegetal. Además, no depende del tipo de vegetación, sino más bien, de las condiciones que permiten la fijación del carbono.

Los resultados guardan relación con investigaciones previas realizadas en ecosistemas de páramo cercanos al área de estudio, sugiriendo que no han ocurrido cambios significativos en el almacenamiento de carbono en la última década. Al contrario, se han mantenido debido a las acciones de conservación y restauración.

La estimación de carbono a través de la metodología empleada permitió identificar patrones superficiales de almacenamiento de carbono, indicando que incluso a nivel de superficie, las turberas constituyen una importante reserva de carbono.

Este estudio destaca la necesidad de conservar las condiciones hidrológicas y físicas de las turberas, debido a que la alteración de su paisaje natural podría causar perturbaciones en su constitución y funcionamiento, generando un proceso reversible de liberación de carbono hacia la atmósfera, que contribuiría al aumento de GEI y, por tanto, al calentamiento global.

La relación entre Quito y el páramo trasciende el abastecimiento de agua y constituye un vínculo socioecológico fundamental para enfrentar el cambio climático. Mientras la ciudad depende de ecosistemas como el humedal Jatunhuayco para asegurar su disponibilidad hídrica y contribuir a la regulación climática mediante el almacenamiento de carbono, la conservación de estos sistemas depende de decisiones de

gestión que integren los procesos ecológicos con la participación de las comunidades locales. En este sentido, reconocer al páramo como un socioecosistema permite comprender que la sostenibilidad de las ciudades también depende de la conservación de los territorios altoandinos que las abastecen.

# Lista de referencias


Alvarado. 2025. “Cuando el agua volvió a un páramo de Ecuador también regresaron los venados y los pumas”. Environmental News. *Noticias ambientales*, marzo 19. https://es.mongabay.com/2025/03/conservacion-agua-paramo-ecuador-regresaron-venados-pumas/.

Avnimelech, Yoram, Gad Ritvo, Leon E. Meijer, y Malka Kochba. 2001. “Water content, organic carbon and dry bulk density in flooded sediments”. *Aquacultural Engineering* 25 (1): 25–33. doi:10.1016/S0144-8609(01)00068-1.

Bader, Maaike Y., Isabel van Geloof, y Max Rietkerk. 2007. “High Solar Radiation Hinders Tree Regeneration above the Alpine Treeline in Northern Ecuador”. *Plant Ecology* 191 (1): 33–45. doi:10.1007/s11258-006-9212-6.

Bonilla-Bedoya, Santiago, Miguel Ángel Herrera, Angélica Vaca, Laura Salazar, Rasa Zalakeviciute, Danilo Mejía, y Magdalena López-Ulloa. 2022. “Urban soil management in the strategies for adaptation to climate change of cities in the Tropical Andes”. *Geoderma* 417 (julio): 1-12. doi:10.1016/j.geoderma.2022.115840.

Boschman, Lydian M. 2021. “Andean mountain building since the Late Cretaceous: A paleoelevation reconstruction”. *Earth-Science Reviews* 220 (septiembre): 1-40. doi:10.1016/j.earscirev.2021.103640.

Brück, Stefan Alexander, Kevin Toapanta Amán, Paola Buitrón Buitrón, Wendy Pachecho Paredes, Paulina Ríos Quituizaca, y Maria de Lourdes Teixeira de Moraes Polizeli. 2023. “Potential impacts of seasonal and altitudinal changes on enzymatic peat decomposition in the High Andean Paramo region of Ecuador”. *Science of The Total Environment* 890 (septiembre): 1-26. doi:10.1016/j.scitotenv.2023.164365.

Buytaert, Wouter, J. Sevink, y F. Cuesta. 2014. “Cambio Climático: La Nueva Amenaza Para Los Páramos”. En *Avances en investigación para la conservación de los páramos andinos*, editado por Cuesta F., Sevink J., Llambí L.D., De Bièvre B. 505-525. Lima, CONDESAN. https://dare.uva.nl/id/edca1067-1a1f-44cd-ad16-cd52c0fcaeb7.

Buytaert, Wouter, Rolando Célleri, 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 (1): 53–72. doi:https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2006.06.002.

Buytaert, Wouter, Jozef Deckers, y Guido Wyseure. 2006. “Description and classification of nonallophanic Andosols in south Ecuadorian alpine grasslands (páramo)”. *Geomorphology* 73 (3): 207–21. doi:10.1016/j.geomorph.2005.06.012.

Buytaert, Wouter, y Julián Ramírez-Villegas. 2012. “Generación de escenarios desagregados del cambio climático para los Andes Tropicales”. En *Panorama andino de cambio climático: Vulnerabilidad y adaptación en los Andes Tropicales*, editado por Francisco Cuesta, Macarena Bustamante, Maria Teresa Becerra, Julio Postigo, y Manuel Peralvo, 37–57. Lima: CONDESAN, SGCAN.

Cabrera, Marcela, Bryan G. Valencia, Oscar Lucas-Solis, Jaqueline L. Calero, Luis Maisincho, Bruno Conicelli, Gabriel Massaine Moulatlet, y Mariana V. Capparelli. 2020. “A new method for microplastic sampling and isolation in mountain glaciers: A case study of one antisana glacier, Ecuadorian Andes”. *Case*

*Studies in Chemical and Environmental Engineering* 2 (septiembre): 1-7. doi:10.1016/j.cscee.2020.100051.

Calispa, Marlon, Raphaël van Ypersele, Benoît Pereira, Sebastián Páez-Bimos, Veerle Vanacker, Marcos Villacís, Armando Molina, Bert de Bièvre, Teresa Muñoz, y Pierre Delmelle. 2021. "Soil organic carbon stocks under different páramo vegetation covers in Ecuador's northern Andes". Ponencia presentada en EGU General Assembly 2021, online, 19–30 Apr 2021. doi:10.5194/egusphere-egu21-4121.

Carranco, Fausto, Christian Romero Cóndor, Roberto Pulupa Vela, Ana Gramal, Silvia Toainga, y Israel Carranco. 2022. "Caracterización morfológica y litoestratigráfica de la sub-cuenca alta del río Jatunhuaycu, oeste del volcán Antisana, Napo, Ecuador". *Geolatitud* 5 (2): 1–11.

Carrillo-Rojas, Galo, Brenner Silva, Rütger Rollenbeck, Rolando Célleri, y Jörg Bendix. 2019. "The breathing of the Andean highlands: Net ecosystem exchange and evapotranspiration over the páramo of southern Ecuador". *Agricultural and Forest Meteorology* 265 (febrero): 30–47. doi:10.1016/j.agrformet.2018.11.006.

Chivulescu, Serban, Mihai Hapa, Diana Pitar, Adrian Lorenţ, Luminita Marmureanu, Stefan Leca, Raul Radu, Roxana Cazacu, Alexandru Claudiu Dobre, Ionut Silviu Pascu, Cristiana Marcu, Mircea Verghelet, Constantin Vezeanu, Tudor Racoviceanu, Ovidiu Badea. 2024. "Integrating Monetary and Non-Monetary Valuation for Ecosystem Services in Piatra Craiului National Park, Southern Carpathians: A Comprehensive Approach to Sustainability and Conservation". *Frontiers in Forests and Global Change* 7 (marzo): 1-15. doi:10.3389/ffgc.2024.1280793.

Clapperton, C. M. 1983. "The glaciation of the Andes". *Quaternary Science Reviews* 2 (2): 83–155. doi:https://doi.org/10.1016/0277-3791(83)90005-7.

Comas, Xavier, Neil Terry, John A. Hribljan, Erik A. Lilleskov, Esteban Suarez, Rodney A. Chimner, y Randy K. Kolka. 2017. "Estimating Belowground Carbon Stocks in Peatlands of the Ecuadorian Páramo Using Ground-Penetrating Radar (GPR)". *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences* 122 (2): 370–86. doi:10.1002/2016JG003550.

Convención sobre los Humedales. 2021. *Restauración de las turberas drenadas: un paso necesario para alcanzar los objetivos climáticos mundiales. Nota sobre Políticas de Ramsar N.° 5*. Gland, Suiza: Secretaría de la Convención sobre los Humedales. doi:10.69556/strp.pb5.21.eng.

———. 2021. *Restauración práctica de turberas. Nota informativa No. 11*. Gland, Suiza: Secretaría de la Convención sobre los Humedales. doi:10.69556/strp.bn11.21.eng.

Committee on Characterization of Wetlands, National Research Council. 1995. *Wetlands: Characteristics and Boundaries*. Washington, DC: National Academies Press.

Crespo, Patricio, Rolando Célleri, Wouter Buytaert, Boris Ochoa, Irene Cárdenas, Vicente Iñiguez, Pablo Borja, y Bert De Bièvre. 2014. "Impactos del cambio de uso de la tierra sobre la hidrología de los páramos húmedos andinos". En *Avances en investigación para la conservación de los páramos andinos,* editado por Cuesta F, Sevink J, Llambí LD, De Bièvre, 288–304. Quito, CONDESAN.

Díaz, Sandra, Unai Pascual, Marie Stenseke, Berta Martín-López, Robert T. Watson, Zsolt Molnár, Rosemary Hill, et al. 2018. "Assessing nature's contributions to people". *Science* 359: 270–272. doi:10.1126/science.aap8826.

Dong, Yanmin, Hongkai Li, Hongshi He, y Shengzhong Wang. 2021. "Holocene peatland development, carbon accumulation and its response to climate forcing and local

conditions in Laolike peatland, northeast China". *Quaternary Science Reviews* 268 (septiembre): 13-22. doi:10.1016/j.quascirev.2021.107124.

Ecuador FONAG. 2014. "Ecosistemas 2014 - Ámbito FONAG". *Ecosistemas y Usos de Suelo*. Acceso el 10 de marzo. https://geovisor.fonag.org.ec/catalogue/#/?f=dataset&d=5%3Bdataset%3Bvector

———. 2024. "Cobertura y Uso 2022 - DMQ". *Ecosistemas y Usos de Suelo*. Acceso el 10 de marzo. https://geovisor.fonag.org.ec/catalogue/#/?f=dataset&d=27%3Bdataset%3Bvector.

———. 2024. *Portafolio de intervenciones, reposición de la huella hídrica*. FONAG. https://www.fonag.org.ec/web/wp-content/uploads/2024/07/Portafolio-de-Intervenciones-Huella-Hidrica.pdf.

———. 2025. "Características biológicas del Área de Conservación Hídrica Antisana". *FONAG*. s. f. https://www.fonag.org.ec/web/wp-content/uploads/2025/03/Carac-Bio-ACHA_.pdf.

_____ Ministerio del Ambiente. 2013. "Sistema de clasificación de los ecosistemas del ecuador continental". *Subsecretaría de Patrimonio Natural Proyecto Mapa de Vegetación*. Acceso el 1 de diciembre https://archive.org/details/ecosistemas-del-ecuador-2013/page/n7/mode/2up.

_____ INAMHI. 2017. "Geoinformación Hidrometeorológica: Isotermas e Isoyetas medias anuales de la serie histórica 1981-2010". *INAMHI.* Acceso el 1 de marzo. https://www.inamhi.gob.ec/geoinformacion-hidrometeorologica/.

Ellis, Erle C, y Navin Ramankutty. 2008. "Putting People in the Map: Anthropogenic Biomes of the World". *Frontiers in Ecology and the Environment* 6 (8): 439–47. doi:10.1890/070062.

Ellis, Erle C. 2015. "Ecology in an Anthropogenic Biosphere". *Ecological Monographs* 85 (3): 287–331. doi:10.1890/14-2274.1.

Farnham, R. S., y H. R. Finney. 1965. "Classification and Properties of Organic Soils". En Advances in Agronomy, editado por A. G. Norman, n.° 17:115–162. doi:https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60413-7.

GADPR Píntag. 2012. *Plan de desarrollo y ordenamiento territorial de la parroquia de Píntag 2012-2025*. Quito, Ecuador. http://sitp.pichincha.gob.ec/repositorio/diseno_paginas/archivos/PDOT%20PINTAG%202012.pdf.

García, Víctor J., Carmen O. Márquez, Tom M. Isenhart, Marco Rodríguez, Santiago D. Crespo, y Alexis G. Cifuentes. 2019. "Evaluating the conservation state of the páramo ecosystem: An object-based image analysis and CART algorithm approach for central Ecuador". *Heliyon, n.°* 5 (10): 1-12. doi:https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e02701.

Gardner, Royal C., y C. Finlayson. 2018. *Global Wetland Outlook: State of the World's Wetlands and Their Services to People*. Gland, Switzerland: Secretariat of the Convention on Wetlands. DOI: 10.69556/GWO-2018-eng.

Ghezelayagh, Pouya, Mohammad Reza Eini, y Mateusz Grygoruk. 2025. "Assessing carbon accumulation through peat vertical displacement: The influence of climate and land use across diverse peatland characteristics". *Science of The Total Environment* 958 (enero): 1-41. doi:10.1016/j.scitotenv.2024.178132.

Gorham, Eville. 1991. "Northern Peatlands: Role in the Carbon Cycle and Probable Responses to Climatic Warming". *Ecological Applications: A Publication of the Ecological Society of America* 1 (2): 182–95. doi:10.2307/1941811.

Grubb, Peter J., J. Robert Lloyd, Terence D. Pennington, y Sebastián Páez-Bimos. 2020. "A historical baseline study of the páramo of Antisana in the Ecuadorian Andes including the impacts of burning, grazing and trampling". *Plant Ecology & Diversity* 13 (3–4): 225–256. doi:10.1080/17550874.2020.1819464.

Günther, Anke, Alexandra Barthelmes, Vytas Huth, Hans Joosten, Gerald Jurasinski, Franziska Koebsch, y John Couwenberg. 2020. "Prompt Rewetting of Drained Peatlands Reduces Climate Warming despite Methane Emissions". *Nature Communications* 11 (1): 1-5. doi:10.1038/s41467-020-15499-z.

Hall, Minard L., Patricia A. Mothes, Pablo Samaniego, Annemarie Militzer, Bernardo Beate, Patricio Ramón, y Claude Robin. 2017. "Antisana volcano: A representative andesitic volcano of the eastern cordillera of Ecuador: Petrography, chemistry, tephra and glacial stratigraphy". *Journal of South American Earth Sciences* 73 (enero): 50–64. doi:10.1016/j.jsames.2016.11.005.

Hans Jenny. 1941. *Factors of Soil Formation. A System of Quantitative Pedology*. New York: Dover Publications, INC. http://archive.org/details/in.ernet.dli.2015.233498.

Hidalgo, Juan Pablo, Rutgerd Boelens, y Jeroen Vos. 2017. "De-Colonizing Water. Dispossession, Water Insecurity, and Indigenous Claims for Resources, Authority, and Territory". *Water History* 9 (1): 67–85. https://doi.org/10.1007/s12685-016-0186-6.

Hofstede, Robert. 2011. *Los servicios del ecosistema páramo: Una visión desde la evaluación de ecosistemas del milenio*. Mena Vásconez, Patricio, Anabel Castillo, Saskia Flores, Robert Hofstede, Carmen Josse, Sergio Lasso B., Galo Medina, Nadya Ochoa y Doris Ortiz. Páramo. Abya-Yala / EcoCiencia / ECOBONA. http://hdl.handle.net/10469/24689.

Hofstede, Robert, Patricio Mena-Vásconez, y Esteban Suárez Robalino, eds. 2023. *Los páramos del Ecuador: Pasado, presente y futuro*. Quito: USFQ Press. doi:10.18272/USFQPRESS.71.

Hribljan, John A., Esteban Suarez, Laura Bourgeau-Chavez, Sarah Endres, Erik A. Lilleskov, Segundo Chimbolema, Craig Wayson, Eleanor Serocki, y Rodney A. Chimner. 2017. "Multidate, multisensor remote sensing reveals high density of carbon-rich mountain peatlands in the páramo of Ecuador". *Global Change Biology* 23 (12): 1-43. doi:10.1111/gcb.13807.

Hribljan, John, Esteban Suarez, Katherine Heckman, Erik Lilleskov, y Rod Chimner. 2016. "Peatland carbon stocks and accumulation rates in the Ecuadorian páramo". *Wetlands Ecology and Management* 24 (abril): 113-127. doi:10.1007/s11273-016-9482-2.

Huang, Shansong, Samane Ghazali, Hossein Azadi, Saghi Movahhed Moghaddam, Ants-Hannes Viira, Kristina Janečková, Petr Sklenička, David Lopez-Carr, Michael Köhl, y Alishir Kurban. 2023. "Contribution of agricultural land conversion to global GHG emissions: A meta-analysis". *Science of The Total Environment* 876 (junio): 1-23. doi:10.1016/j.scitotenv.2023.162269.

Huang, Yuanyuan, Phillipe Ciais, Yiqi Luo, Dan Zhu, Yingping Wang, Chunjing Qiu, Daniel S. Goll, et al. 2021. "Tradeoff of CO2 and CH4 Emissions from Global Peatlands under Water-Table Drawdown". *Nature Climate Change* 11 (7) 618–622. doi:10.1038/s41558-021-01059-w.

Huggett, Richard J. 2021. "Soil as a System". En *Hydrogeology, Chemical Weathering, and Soil Formation*, American Geophysical Union (AGU) 1–20. doi:10.1002/9781119563952.ch1.

Indoria, Ashok Kumar, Kishori Lal Sharma, y Kotha Sammi Reddy. 2020. “Chapter 18 - Hydraulic properties of soil under warming climate”. En *Climate Change and Soil Interactions*, editado por Majeti Narasimha Vara Prasad y Marcin Pietrzykowski, 473–508. Elsevier. doi:https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818032-7.00018-7.

IPCC. 2023. *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Geneva: Intergovernmental Panel on Climate Change. doi:10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.

Jackson, Robert B., Kate Lajtha, Susan E. Crow, Gustaf Hugelius, Marc G. Kramer, y Gervasio Piñeiro. 2017. “The Ecology of Soil Carbon: Pools, Vulnerabilities, and Biotic and Abiotic Controls”. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics* 48: 419–445. doi:10.1146/annurev-ecolsys-112414-054234.

Jones, Matthew W., Glen P. Peters, Thomas Gasser, Robbie M. Andrew, Clemens Schwingshackl, Johannes Gütschow, Richard A. Houghton, Pierre Friedlingstein, Julia Pongratz, y Corinne Le Quéré. 2025. “National Contributions to Climate Change Due to Historical Emissions of Carbon Dioxide, Methane and Nitrous Oxide”. Sci Data 155 (10): 1-23. doi:10.5281/zenodo.16640595.

Josse, Carmen, Francisco Cuesta, Gonzalo Navarro, Víctor Barrena, Edersson Cabrera, Eulogio Chacón-Moreno, Wanderley Ferreira, Manuel Peralvo, y Antonio Tovar. 2009. *Ecosistemas de los Andes del Norte y Centro. Bolivia, Colombia, Ecuador, Perú y Venezuela*. Lima, Perú: Secretaría General de la Comunidad Andina, Programa Regional ECOBONA-Intercooperation, CONDESAN Proyecto Páramo Andino, Programa BioAndes, EcoCiencia, NatureServe. IAvH, LTAUNALM, ICAE-ULA, CDC-UNALM, RUMBOL SRL. https://www.natureserve.org/sites/default/files/publications/files/josseetal2009.pdf.

Keller, Thomas, y Inge Håkansson. 2010. “Estimation of reference bulk density from soil particle size distribution and soil organic matter content”. *Geoderma* 154 (3): 398–406. doi:10.1016/j.geoderma.2009.11.013.

Köchy, M., R. Hiederer, y A. Freibauer. 2015. “Global Distribution of Soil Organic Carbon – Part 1: Masses and Frequency Distributions of SOC Stocks for the Tropics, Permafrost Regions, Wetlands, and the World”. *SOIL* 1 (1): 351–65. doi:10.5194/soil-1-351-2015.

Le Bayon, Renée-Claire, Géraldine Bullinger, Andreas Schomburg, Pascal Turberg, Philip Brunner, Rodolphe Schlaepfer, y Claire Guenat. 2021. “Earthworms, Plants, and Soils”. En *Hydrogeology, Chemical Weathering, and Soil Formation*, 81–103, editado por Allen Hunt, Markus Egli, Boris Faybishenko. Washington: American Geophysical Union/ John Wiley and Sons, Inc doi:10.1002/9781119563952.ch4.

Le Quéré, Corinne, Robbie M. Andrew, Josep G. Canadell, Stephen Sitch, Jan Ivar Korsbakken, Glen P. Peters, Andrew C. Manning, et al. 2016. “Global Carbon Budget 2016”. *Earth System Science Data* 8 (2): 605–649. doi:10.5194/essd-8-605-2016.

Lindsay, Richard. 2018. “Peatland Classification”. En *The Wetland Book*, 1515–28, editado por Max Finlayson, Mark Everard, Kenneth Irvine, Robert J. McInnes, Beth A. Middleton. Dordrecht: Springer. doi:10.1007/978-90-481-9659-3_341.

Loisel, Julie, y Angela Gallego-Sala. 2022. “Ecological Resilience of Restored Peatlands to Climate Change”. *Communications Earth & Environment* 3 (1): 1-8. doi:10.1038/s43247-022-00547-x.

Makkonen, Marika, Suvi Huttunen, Eeva Primmer, Anna Repo, y Mikael Hildén. 2015. "Policy coherence in climate change mitigation: An ecosystem service approach to forests as carbon sinks and bioenergy sources". *Forest Policy and Economics* 50 (enero): 153–62. doi:10.1016/j.forpol.2014.09.003.

Mander, Ülo, Maarja Öpik, y Mikk Espenberg. 2025. "Global Peatland Greenhouse Gas Dynamics: State of the Art, Processes, and Perspectives". *New Phytologist* 246 (1): 94–102. doi:10.1111/nph.20436.

Manosalvas, Rossana. 2011. "Introducción: El páramo habitado". En *Páramo: paisaje estudiado, habitado, manejado e institucionalizado*, Mena Vásconez, Patricio, Anabel Castillo, Saskia Flores, Robert Hofstede, Carmen Josse, Sergio Lasso B., Galo Medina, Nadya Ochoa y Doris Ortiz. Páramo. Abya-Yala : EcoCiencia : ECOBONA. https://doi.org/http://hdl.handle.net/10469/24689.

Manosalvas, Rossana, Jaime Hoogesteger, Juan Pablo Hidalgo Bastidas, y Rutgerd Boelens. 2025. "Producing conservation territories: Transforming páramos in Ecuador". *Environment and Planning E: Nature and Space* 8 (julio): 1606–25. https://doi.org/10.1177/25148486251353634.

Mantel, Stephan, Stefaan Dondeyne, Seppe Deckers. 2023. "World Reference Base for Soil Resources (WRB)". *Encyclopedia of Soil Science* 4(2): 206-217. doi.org/10.1016/B978-0-12-822974-3.00161-0

Mihai, Raluca A., Erly J. Melo Heras, Vanessa A. Terán Maza, Iván A. Espinoza Caiza, Eliza A. Pinto Valdiviezo, y Rodica D. Catana. 2023. "The Panoramic View of Ecuadorian Soil Nutrients (Deficit/Toxicity) from Different Climatic Regions and Their Possible Influence on the Metabolism of Important Crops". *Toxics* 11 (2): 1-21. doi:10.3390/toxics11020123.

Millennium Ecosystem Assessment. 2005. "Ecosystems and Human Well-Being, Synthesis Report. Opportunities and Challenges for Business and Industry". *World Institute Resources*. s. f. https://millenniumassessment.org/documents/document.353.aspx.pdf.

Moomaw, William R., G. L. Chmura, Gillian T. Davies, C. M. Finlayson, B. A. Middleton, Susan M. Natali, J. E. Perry, N. Roulet, y Ariana E. Sutton-Grier. 2018. "Wetlands in a Changing Climate: Science, Policy and Management". *Wetlands* 38 (2): 183–205. doi:10.1007/s13157-018-1023-8.

Moore, PD. 1987. "Ecological and hydrological aspects of peat formation". *Geological Society, London, Special Publications* 32 (1): 7–15. doi:10.1144/GSL.SP.1987.032.01.02.

Morice, C. P., J. J. Kennedy, N. A. Rayner, J. P. Winn, E. Hogan, R. E. Killick, R. J. H. Dunn, T. J. Osborn, P. D. Jones, y I. R. Simpson. 2021. "An Updated Assessment of Near-Surface Temperature Change From 1850: The HadCRUT5 Data Set". *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 126 (3): 1-28. doi:10.1029/2019JD032361.

Mosquera, Giovanny M., Robert Hofstede, Leah L. Bremer, Heidi Asbjornsen, Aldemar Carabajo-Hidalgo, Rolando Célleri, Patricio Crespo, Germain Esquivel-Hernández, Jan Feyen, Rossana Manosalvas, Franklin Marín, Patricio Mena-Vásconez, Paola Montenegro-Díaz, Ana Ochoa-Sánchez, Juan Pesántez, Diego A. Riveros-Iregui, y Esteban Suárez. 2023. "Frontiers in páramo water resources research: A multidisciplinary assessment". *Science of The Total Environment* 892 (septiembre): 1-22. doi:10.1016/j.scitotenv.2023.164373.

Nelson, Donald., y Lyle E. Sommers. 1996. "Total Carbon, Organic Carbon, and Organic Matter". En *Methods of Soil Analysis*, editado por Donald Sparks, Andrew Page, Philip Helmke, Robert Loeppert, P. N. Soltanpour, Mohammad Tabatabai, C. T.

Johnston, Michel. Sumner, 961–1010. Madison: John Wiley & Sons, Ltd. doi:10.2136/sssabookser5.3.c34.

Obando-Cabrera, Laura, Jhonatan Julián Díaz-Timoté, Aitor Bastarrika, Nathalia Celis, y Stijn Hantson. 2025. "The Paramo Fire Atlas: Quantifying Burned Area and Trends across the Tropical Andes". *Environmental Research Letters* 20 (5): 1-11. https://doi.org/10.1088/1748-9326/adc8ba.

Osorio Sánchez, Rafael Alberto. 2018. *Estrategias de gestión del recurso hídrico para Quito y su contribución a la disponibilidad: análisis de los casos Oyacachi y Antisana desde la economía ecológica*.Tesis de posgrado. Facultad Latinoamericana de Ciencias Sociales, FLACSO Ecuador http://hdl.handle.net/10469/13001.

Ostrom, Elinor. 2009. "A General Framework for Analyzing Sustainability of Social-Ecological Systems". *Science* 325 (5939): 419–22. https://doi.org/10.1126/science.1172133.

Páez-Bimos, Sebastián, Marcos Villacís, Oscar Morales, Marlon Calispa, Armando Molina, Silvia Salgado, Bert de Bievre, Pierre Delmelle, Teresa Muñoz, y Veerle Vanacker. 2022. "Vegetation Effects on Soil Pore Structure and Hydraulic Properties in Volcanic Ash Soils of the High Andes". *Hydrological Processes* 36 (9): 1-20. doi:10.1002/hyp.14678.

Patiño-Gutiérrez, Sebastián Elías, Isabel Cristina Domínguez-Rivera, Martha Constanza Daza-Torrez, Boris F. Ochoa-Tocachi, y Edgar Ricardo Oviedo-Ocaña. 2024. "Effects of rainfall seasonality and land use change on soil hydrophysical properties of high-Andean dry páramo grasslands". *CATENA* 238 (abril): 1-20. 107866. doi:10.1016/j.catena.2024.107866.

Paz, Carlota Garcia, y Teresa Taboada Rodríguez. 2008. "Factors of Soil Formation". En *Encyclopedia of Soil Science*, 229–30. Dordrecht: Springer. doi:10.1007/978-1-4020-3995-9_207.

Pérez, Mario, Estefanía Chávez, Magdy Echeverría, Rafael Córdova, y Celso Recalde. 2018. "Assessment of natural background radiation in one of the highest regions of Ecuador". *Radiation Physics and Chemistry* 146 (mayo): 73–76. doi:10.1016/j.radphyschem.2018.01.002.

Peyre, Gwendolyn, Diego Osorio, Roman François, y Fabien Anthelme. 2021. "Mapping the páramo land-cover in the Northern Andes". *International Journal of Remote Sensing* 42 (20):1-22. doi:10.1080/01431161.2021.1964709.

Ribeiro, Kelly, Felipe S. Pacheco, José W. Ferreira, Eráclito R. de Sousa-Neto, Adam Hastie, Guenther C. Krieger Filho, Plínio C. Alvalá, Maria C. Forti, y Jean P. Ometto. 2021. "Tropical Peatlands and Their Contribution to the Global Carbon Cycle and Climate Change". *Global Change Biology* 27 (3): 489–505. doi:10.1111/gcb.15408.

Rivadeneira Guachamin, Cindy Paola. 2016. "Memoria histórica del Rodeo Chacarero de Píntag". Tesis de pregrado, Universidad Politécnica Salesiana Sede Quito. https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/13304.

Robinson, D. A., S. P. Friedman, A. Thomas, D. Hirmas, P. L. Sullivan, y A. Nemes. 2025. "Soil bulk density and porosity connecting macro- and micro-scales through geometry." *Earth-Science Reviews* 268 (septiembre): 1-20. doi:10.1016/j.earscirev.2025.105173.

Rodríguez, Leonardo, Mike Bastidas, Mayesse Da Silva, Juliana Arias, Javier M. Martín-López, Natalia Matiz-Rubio, Sandra Loaiza, Idupulapati Rao, Jacobo Arango, y Ciniro Costa Junior. 2025. "Comparative Assessment of Soil Bulk Density Measurements Using Core Metal Ring and Power Probe Methods in Acidic Soils

of Colombian Pasturelands". *Frontiers in Soil Science* 5 (mayo): 1-9. doi:10.3389/fsoil.2025.1527807.

Ron, S. R., A Merino-Viteri, y D. A. Ortiz. 2025. "Anfibios Ecuador". *bioWeB*. Quito, Ecuador: Museo de Zoología, Pontificia Universidad Católica del Ecuador. Acceso el 15 de marzo. https://bioweb.bio/faunaweb/amphibiaweb/.

Ruiz Hernández, Jean Carlos, Thomas Condom, Marcos Villacís, Antoine Rabatel, Jean Emmanuel Sicart, Luis Maisincho, Clementine Junquas, Rubén Basantes, y Pierre Ribstein. 2018. "Glacio-hydrological modeling under inner tropical conditions: Implications for water resources planning and management at the Antisana massif in Ecuador". *EGU General Assembly 2018* 20 (abril): 1.

Sieben, Erwin J. J., Skhumbuzo P. Khubeka, Simangele Sithole, Nancy M. Job, y Donovan C. Kotze. 2018. "The Classification of Wetlands: Integration of Top-down and Bottom-up Approaches and Their Significance for Ecosystem Service Determination". *Wetlands Ecology and Management* 26 (3): 441–58. doi:10.1007/s11273-017-9585-4.

Silva, Lucas C. R., y Hans Lambers. 2018. "Chapter Two - Soil–Plant–Atmosphere Interactions: Ecological and Biogeographical Considerations for Climate-Change Research". En *Climate Change Impacts on Soil Processes and Ecosystem Properties*, editado por William R. Horwath y Yakov Kuzyakov, 35:29–60. Developments in Soil Science. Elsevier. doi:https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63865-6.00002-8.

Silva Neto, Eduardo Carvalho, Marcondes Geraldo Coelho-Junior, Ingrid Horák-Terra, Thamyres Sabrina Gonçalves, Lúcia Helena Cunha Anjos, y Marcos Gervasio Pereira. 2023. "Organic Soils: Formation, Classification and Environmental Changes Records in the Highlands of Southeastern Brazil". *Sustainability* 15 (4): 1-15. doi:10.3390/su15043416.

Sinclair, Amanda L., Laura L. B. Graham, Erianto I. Putra, Bambang H. Saharjo, Grahame Applegate, Samantha P. Grover, y Mark A. Cochrane. 2020. "Effects of distance from canal and degradation history on peat bulk density in a degraded tropical peatland". *Science of The Total Environment* 699 (enero): 1-12. doi:10.1016/j.scitotenv.2019.134199.

Spikings, Richard, Sebastian Betancur, Cristian Vallejo, Massimo Chiaradia, Alexey Ulianov, Antoine de Haller, Stephen Forti, Wilfried Winkler, y Bernardo Beate. 2024. "New constraints on the tectonic history of the basement of the Western Cordillera and coastal forearc of Ecuador". *Lithos* 488–489 (diciembre): 1-40. doi:10.1016/j.lithos.2024.107821.

Suarez, Esteban, Segundo Chimbolema, y Ricardo Jaramillo. 2022. *Turberas de páramo en el Ecuador: notas sobre ecología, conservación, y restauración de un ecosistema estratégico*. Quito: Instituto BIOSFERA / Universidad San Francisco de Quito.

Tirira, Diego, Jorge Brito, Santiago Burneo, C. Pinto, Jaime Salas, y Comisión AEM. 2023. *Mamíferos del Ecuador: lista oficial actualizada de especies / Mammals of Ecuador: official updated species checklist. Version 2023.2*.

TVCEcuador. 2026. Vecinos de Pintag denuncian que existen cortes constantes del servicio de agua potable. Vídeo, 6:53. Facebook. https://www.facebook.com/watch/?v=1353862753177251

Torres, Wendy, Alejandra Torres, Esteban Valencia, Paul Pinchao, Kenny Escobar-Segovia, y Edgar Cando. 2024. "Experimental Validation of the Remote Sensing Method for River Velocity Measurement Using an Open-Source PIV Scheme—

Case Study: Antisana River in the Ecuadorian Andes". *Water* 16 (22): 1-13. doi:10.3390/w16223177.

Torres-Carvajal, O., G. Pazmiño-Otamendi, F. Ayala-Varela, y D. Salazar-Valenzuela. 2025. "Reptiles del Ecuador". *bioWeB*. Acceso el 15 de marzo. https://bioweb.bio/faunaweb/reptiliaweb/.

Tscharntke, Teja, Ingo Grass, Thomas C. Wanger, Catrin Westphal, y Péter Batáry. 2021. "Beyond organic farming – harnessing biodiversity-friendly landscapes". *Trends in Ecology & Evolution* 36 (10): 919–930. doi:10.1016/j.tree.2021.06.010.

UNEP. 2022. *Global Peatlands Assessment: The State of the World's Peatlands - Evidence for Action toward the Conservation, Restoration, and Sustainable Management of Peatlands*. Nairobi: Global Peatlands Initiative: Assessing, Measuring and Preserving Peat Carbon project (GPI project), International Climate Initiative (IKI), United Nations Environment Programme. doi:10.59117/20.500.11822/41222.

White, Stuart. 2013. "Grass Páramo as Hunter-Gatherer Landscape". *The Holocene* 23 (6): 1-19. SAGE Publications Ltd: 898–915. doi:10.1177/0959683612471987.

Xu, Jiren, Paul J. Morris, Junguo Liu, y Joseph Holden. 2018. "PEATMAP: Refining estimates of global peatland distribution based on a meta-analysis". *CATENA* 160 (enero): 134–140. doi:10.1016/j.catena.2017.09.010.

Xu, Xibao, Minkun Chen, Guishan Yang, Bo Jiang, y Ji Zhang. 2020. "Wetland ecosystem services research: A critical review". *Global Ecology and Conservation* 22 (junio): 1-10. doi:10.1016/j.gecco.2020.e01027.

Yi, Zekun, Donghe Li, y Min Lu. 2026. "Ecological compensation for national parks based on carbon sink and ecosystem services". *Journal of Environmental Management* 397 (enero): 1-25. doi:10.1016/j.jenvman.2025.128294.

Zedler, Joy B., y Suzanne Kercher. 2005. "WETLAND RESOURCES: Status, Trends, Ecosystem Services, and Restorability". *Annual Review of Environment and Resources* 30: 39–74. doi:10.1146/annurev.energy.30.050504.144248.

# Anexos

**Anexo 1. Registro de peso húmedo y porcentaje de pérdida previo secado de la muestra**

| N° | Código | Peso húmedo (g) 09/07/2025 | Peso húmedo (g) pre-ingreso | Peso seco (g) | BD ($g.cm^{-3}$) | Pérdida peso húmedo | % de pérdida |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | PABD-01 | 251.57 | 234.76 | 45.53 | 0.18 | 16.81 | 6.68 |
| 2 | PABD-02 | 263.39 | 247.69 | 46.5 | 0.19 | 15.7 | 5.96 |
| 3 | PABD-03 | 269 | 256.54 | 52.1 | 0.21 | 12.46 | 4.63 |
| 4 | PABD-04 | 272.63 | 252.86 | 40.26 | 0.16 | 19.77 | 7.25 |
| 5 | PABD-05 | 264.46 | 253.66 | 37.45 | 0.15 | 10.8 | 4.08 |
| 6 | PABD-06 | 287.16 | 205.8 | 63.1 | 0.25 | 81.36 | 28.33 |
| 7 | PABD-07 | 260.12 | 200.99 | 67.27 | 0.27 | 59.13 | 22.73 |
| 8 | PABD-08 | 259.32 | 180.68 | 48.83 | 0.20 | 78.64 | 30.33 |
| 9 | PABD-09 | 267.5 | 177.81 | 52.33 | 0.21 | 89.69 | 33.53 |
| 10 | PABD-10 | 270.37 | 178.27 | 37.41 | 0.15 | 92.1 | 34.06 |
| 11 | PABD-11 | 285.01 | 270 | 57.44 | 0.23 | 15.01 | 5.27 |
| 12 | PABD-12 | 257.48 | 241.53 | 34.43 | 0.14 | 15.95 | 6.19 |
| 13 | PABD-13 | 255.06 | 244.7 | 30.64 | 0.12 | 10.36 | 4.06 |
| 14 | PABD-14 | 276.53 | 265.32 | 49.7 | 0.20 | 11.21 | 4.05 |
| 15 | PABD-15 | 291.13 | 279.11 | 74.01 | 0.30 | 12.02 | 4.13 |
| 16 | PABD-16 | 288.03 | 276.68 | 72.44 | 0.29 | 11.35 | 3.94 |
| 17 | PABD-17 | 293.45 | 280.98 | 78.37 | 0.31 | 12.47 | 4.25 |
| 18 | PABD-18 | 298 | 284.11 | 80.01 | 0.32 | 13.89 | 4.66 |
| 19 | PABD-19 | 278.32 | 271.41 | 56.03 | 0.22 | 6.91 | 2.48 |
| 20 | PABD-20 | 341.54 | 328.74 | 132.35 | 0.53 | 12.8 | 3.75 |
| 21 | PABD-21 | 303.03 | 212.58 | 71.56 | 0.29 | 90.45 | 29.85 |
| 22 | PABD-22 | 287.86 | 196.57 | 55.67 | 0.22 | 91.29 | 31.71 |
| 23 | PABD-23 | 284.73 | 192.47 | 74.78 | 0.30 | 92.26 | 32.40 |
| 24 | PABD-24 | 292.2 | 201.03 | 79.71 | 0.32 | 91.17 | 31.20 |
| 25 | PABD-25 | 278.78 | 191.89 | 64.86 | 0.26 | 86.89 | 31.17 |
| 26 | PABD-26 | 274.01 | 254.58 | 55.72 | 0.22 | 19.43 | 7.09 |
| 27 | PABD-27 | 262.78 | 245.99 | 52.53 | 0.21 | 16.79 | 6.39 |
| 28 | PABD-28 | 294.77 | 277.97 | 77.25 | 0.31 | 16.8 | 5.70 |
| 29 | PABD-29 | 283.44 | 263.14 | 70.62 | 0.28 | 20.3 | 7.16 |
| 30 | PABD-30 | 284.02 | 267.64 | 81.84 | 0.33 | 16.38 | 5.77 |
| 31 | PABD-31 | 294.84 | 270.66 | 82.77 | 0.33 | 24.18 | 8.20 |
| 32 | PABD-32 | 299.72 | 275.05 | 72.8 | 0.29 | 24.67 | 8.23 |
| 33 | PABD-33 | 303.26 | 281.23 | 117.51 | 0.47 | 22.03 | 7.26 |
| 34 | PABD-34 | 284.69 | 262.02 | 56.03 | 0.22 | 22.67 | 7.96 |
| 35 | PABD-35 | 293.17 | 270.86 | 59.97 | 0.24 | 22.31 | 7.61 |
| 36 | PABD-36 | 293.02 | 268.55 | 81.48 | 0.33 | 24.47 | 8.35 |

**Anexo 2. Datos empleados en el cálculo del almacenamiento de SOC en Mg C ha$^{-1}$**

| N° | BD (g.cm$^{-3}$) | OC (%) | Profundidad (cm) | SOC (Mg C ha$^{-1)}$ |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 0.18212 | 63.59705734 | 20 | 231.65 |
| 2 | 0.186 | 67.13703918 | 20 | 249.75 |
| 3 | 0.2084 | 50.54317093 | 20 | 210.66 |
| 4 | 0.16104 | 51.37202835 | 20 | 165.46 |
| 5 | 0.1498 | 66.90382385 | 20 | 200.44 |
| 6 | 0.2524 | 55.22559738 | 20 | 278.78 |
| 7 | 0.26908 | 38.47770309 | 20 | 207.07 |
| 8 | 0.19532 | 55.46430588 | 20 | 216.67 |
| 9 | 0.20932 | 61.06313324 | 20 | 255.63 |
| 10 | 0.14964 | 58.75082779 | 20 | 175.83 |
| 11 | 0.22976 | 45.7337265 | 20 | 210.16 |
| 12 | 0.13772 | 44.10179395 | 20 | 121.47 |
| 13 | 0.12256 | 63.23062515 | 20 | 154.99 |
| 14 | 0.1988 | 35.05385208 | 20 | 139.37 |
| 15 | 0.29604 | 22.67082596 | 20 | 134.23 |
| 16 | 0.28976 | 51.84877777 | 20 | 300.47 |
| 17 | 0.31348 | 41.93796158 | 20 | 262.93 |
| 18 | 0.32004 | 59.76793289 | 20 | 382.56 |
| 19 | 0.22412 | 55.21684885 | 20 | 247.50 |
| 20 | 0.5294 | 25.41897011 | 20 | 269.14 |
| 21 | 0.28624 | 43.13415599 | 20 | 246.93 |
| 22 | 0.22268 | 50.65389252 | 20 | 225.59 |
| 23 | 0.29912 | 48.01268005 | 20 | 287.23 |
| 24 | 0.31884 | 40.10932159 | 20 | 255.77 |
| 25 | 0.25944 | 46.4395752 | 20 | 240.97 |
| 26 | 0.22288 | 40.57062912 | 20 | 180.85 |
| 27 | 0.21012 | 51.19232941 | 20 | 215.13 |
| 28 | 0.309 | 43.48361588 | 20 | 268.73 |
| 29 | 0.28248 | 55.41443634 | 20 | 313.07 |
| 30 | 0.32736 | 45.80765915 | 20 | 299.91 |
| 31 | 0.33108 | 29.13108253 | 20 | 192.89 |
| 32 | 0.2912 | 41.72532654 | 20 | 243.01 |
| 33 | 0.47004 | 36.1767807 | 20 | 340.09 |
| 34 | 0.22412 | 45.69081497 | 20 | 204.80 |
| 35 | 0.23988 | 43.4800415 | 20 | 208.60 |
| 36 | 0.32592 | 35.43083572 | 20 | 230.95 |

**Anexo 3. Parámetros estadísticos para el cálculo de los modelos de distribución de las variables**

Densidad aparente ($g.cm^{-3}$)

| | |
|---|---|
| Minimum: | 0.12 |
| Maximum: | 0.53 |
| | |
| Mean: | 0.256944444444 |
| Median: | 0.245 |
| Geometric Mean: | 0.244433655739 |
| Harmonic Mean: | 0.232558114181 |
| Root Mean Square: | 0.270221102885 |
| Trim Mean (10%): | 0.246363636364 |
| Interquartile Mean: | 0.247894736842 |
| Midrange: | 0.325 |
| Winsorized Mean: | 0.248611111111 |
| TriMean: | 0.245 |
| | |
| Variance: | 0.00719896825397 |
| Standard Deviation: | 0.0848467339028 |
| Interquartile Range: | 0.1 |
| Range: | 0.41 |
| Mean Difference: | 0.0914444444444 |
| Median Abs. Deviation: | 0.05 |
| Average Abs. Deviation: | 0.0641666666667 |
| Quartile Dispersion: | 0.2 |
| Relative Mean Diff.: | 0.355891891892 |
| | |
| Standard Error: | 0.0141411223171 |
| Coef. of Variation: | 0.33021431573 |
| Skewness: | 1.050 |
| Kurtosis: | 4,69 |
| Sum: | 9.25 |
| Sum Absolute: | 9.25 |
| Sum Squares: | 26.287 |
| Mean Square: | 0.0730194444444 |

Análisis ANOVA

| | df | Sum of Squares | Mean Square | F |
|---|---|---|---|---|
| Regression: | 2 | 0.0936919085131 | 0.0468459542566 | 9,76747 |
| Residual: | 33 | 0.158271980376 | 0.00479612061745 | |
| Total: | 35 | 0.251963888889 | | |

Carbono orgánico (%)

| | |
|---|---|
| Mean: | 47.49861111 |
| Median: | 46.125,00000000 |
| Geometric Mean: | 46.13471349 |
| Harmonic Mean: | 44.61101925 |
| Root Mean Square: | 48.72089003 |
| Trim Mean (10%): | 47.06787879 |
| Interquartile Mean: | 47.16631579 |
| Midrange: | 44.90500000000 |
| Winsorized Mean: | 47.812500000000 |
| TriMean: | 46.85500000000 |
| | |
| Variance: | 12.09672694 |
| Standard Deviation: | 10,99851215 |
| Interquartile Range: | 14.66 |
| Range: | 44.47 |
| Mean Difference: | 12.60185714 |
| Median Abs. Deviation: | 6.83 |
| Average Abs. Deviation: | 87.13611111 |
| Quartile Dispersion: | 0.153027139875 |
| Relative Mean Diff.: | 0.265310013242 |
| | |
| Standard Error: | 18.33085358 |
| Coef. of Variation: | 0.231554394741 |
| Skewness: | -0.179959070319 |
| Kurtosis: | 2.49749350 |
| | |
| Sum: | 1709.95 |
| Sum Absolute: | 1709.95 |
| Sum Squares: | 85454.10450000 |
| Mean Square: | 2373.72512500 |

Análisis ANOVA

| | df | Sum of Squares | Mean Square | F |
|---|---|---|---|---|
| Regression: | 2 | 111.524158684 | 557.620793422 | 590.053562436 |
| Residual: | 33 | 311.861284371 | 945.034195064 | |
| Total: | 35 | 423.385443056 | | |

Almacenamiento de SOC (Mg C $ha^{-1}$)

| | |
|---|---|
| Minimum: | 121.47 |
| Maximum: | 382.56 |
| | |
| Mean: | 232.48 |
| Median: | 231.3 |
| Geometric Mean: | 22.548606772 |
| Harmonic Mean: | 21.818.408.266 |
| Root Mean Square: | 239.173785434 |
| Trim Mean (10%): | 228.035151515 |
| Interquartile Mean: | 229.695263158 |
| Midrange: | 252.015 |
| Winsorized Mean: | 230.628611111 |
| TriMean: | 2.313175 |
| | |
| Variance: | 324.735350286 |
| Standard Deviation: | 569.855552123 |
| Interquartile Range: | 62.49 |
| Range: | 261.09 |
| Mean Difference: | 64.444031746 |
| Median Abs. Deviation: | 31.245 |
| Average Abs. Deviation: | 43.86 |
| Quartile Dispersion: | 0.134859831236 |
| Relative Mean Diff.: | 0.27720247654 |
| | |
| Standard Error: | 949.759253539 |
| Coef. of Variation: | 0.245120247816 |
| Skewness: | 0.271861854576 |
| Kurtosis: | 301.270054442 |
| | |
| Sum: | 8369.28 |
| Sum Absolute: | 8369.28 |
| Sum Squares: | 2059347.587 |
| Mean Square: | 57204.0996389 |

Análisis ANOVA

| | df | Sum of Squares | Mean Square | F |
|---|---|---|---|---|
| Regression: | 2 | 25951.4438997 | 12975.7219499 | 488.221070903 |
| Residual: | 33 | 87705.9287003 | 2657.75541516 | |
| Total: | 35 | 113657.3726 | | |

## Anexo 4. Registro fotográfico



Condiciones climáticas durante la jornada de muestreo del 19 de julio de 2025.
Fuente: Archivo personal



Don Isidro Bautista, guarda páramo del Antisana, retirando la cobertura vegetal del suelo para tomar las muestras
Fuente: Archivo personal



Remoción de vegetación de almohadilla junto a un punto de control
Fuente: Archivo personal



Toma de muestra de prueba en almohadilla
Fuente: Archivo personal



Muestreo en puntos de pajonal: En casos en los que la referencia métrica indicaba el punto a cavar en almohadillas, se buscaba áreas entre almohadillas de menor altura de la vegetación y menor masa, de esta forma el proceso de cavado era menos demandante y se podía tomar las muestras con mayor accesibilidad, considerando que los suelos de turbera son densos y con presencia de agua, tienden a volverse plásticos
Fuente: Archivo personal



Ubicación y tendido de estaca como punto de referencia
Fuente: Archivo personal