

Páramos de Colombia

**Cambio de cobertura vegetal y su potencial
de mitigación del cambio climático**

Páramos de Colombia:

Cambio de cobertura vegetal y su potencial de mitigación del cambio climático

The Nature Conservancy Colombia:

Daniel Avella Castro, Deissy Arango González, Camila Rodríguez Vargas, Sonia Pardo Gutiérrez, Leonardo Albornoz Villarraga, Jesús Vera Guerrero.

The Nature Conservancy Global:

Sara Leavitt, Peter Benham, Miguel Castro.

Pontificia Universidad Javeriana:

Armando Sarmiento y Leonardo Segura.

4D Elements:

Milton Romero, Adriana Sarmiento

Fotografía, diseño y diagramación:

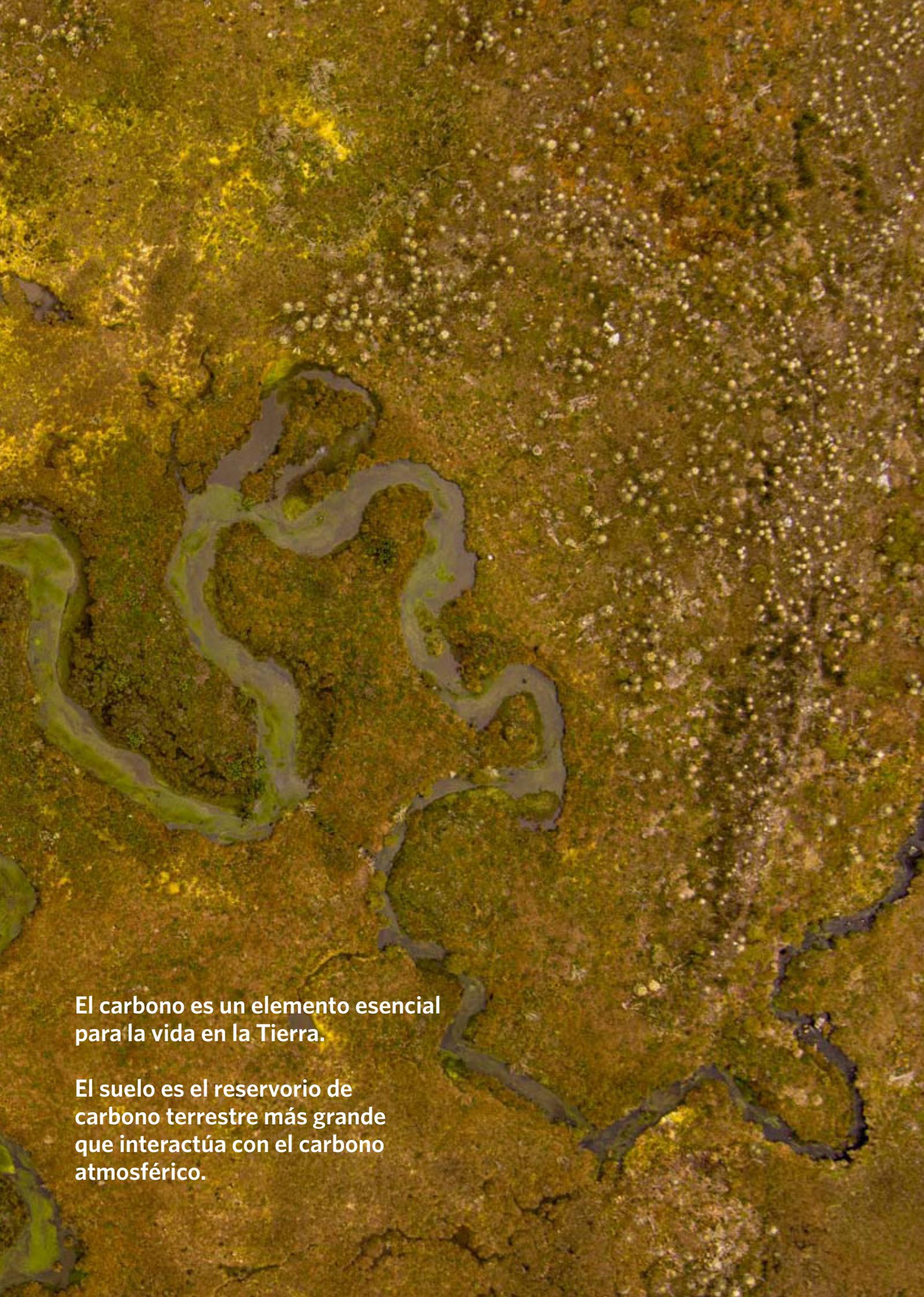
Shots de ciencia, Nataly Salazar, Juanita Zambrano, Santiago Monroy.

Agradecimiento a todo el equipo que trabajó en este esfuerzo.

Este proyecto fue realizado gracias al financiamiento de la Fundación Bezos Earth Fund.
This project is supported by a grant from the Bezos Earth Fund.

00	Introducción	07
01	El ciclo del carbono	14
	Ciclo rápido del carbono	16
	Ciclo corto del carbono	17
	El desbalance	18
02	El potencial de los ecosistemas para mitigar el cambio climático	24
03	El páramo	28
	Las coberturas del páramo	34
04	Los páramos en Colombia	38

05	Resultados & conclusiones	46
	Fase 1: El potencial del páramo para almacenar carbono orgánico en el suelo	48
	<ul style="list-style-type: none">• Etapa 1 ¿Donde se recogieron las muestras?• Etapa 2 ¿Cuáles fueron las variables más determinantes en el contenido de COS• Etapa 3: ¿Cómo se ve el modelo de COS en los páramos de Colombia?	
	Fase 2: ¿Cuánto carbono orgánico hay en la biomasa aérea?	58
	Fase 3: Escenarios futuros de contenido de carbono en los páramos de Colombia	64
	<ul style="list-style-type: none">• Etapa 1 ¿El carbono en el suelo y la biomasa en escenario business as usual (BAU)• Etapa 2 ¿Cómo se ven los modelos de carbono bajo diferentes escenarios de restauración de los páramos?	66 74
07	Bibliografía	80

An aerial photograph of a wetland landscape. The terrain is covered in dense, low-lying vegetation, primarily in shades of green and brown. Several winding, narrow water channels or ditches are visible, creating a complex, meandering pattern across the land. The water in these channels appears dark, possibly due to the surrounding vegetation or the depth of the water. The overall scene depicts a natural, undisturbed ecosystem.

El carbono es un elemento esencial para la vida en la Tierra.

El suelo es el reservorio de carbono terrestre más grande que interactúa con el carbono atmosférico.

Introducción

El carbono es un elemento esencial para la vida en la Tierra. Circula entre los seres vivos, la atmósfera, el océano y los suelos. Es fundamental para la estructura del ADN y las proteínas, la alimentación de las plantas, la regulación de la temperatura del planeta y la producción de energía que impulsa la economía y la sociedad moderna. Entender y predecir su comportamiento nos permite comprender los cambios y procesos ecológicos actuales y los del futuro.

El suelo es el reservorio de carbono terrestre más grande que interactúa con el carbono atmosférico. Se estima que las reservas de carbono orgánico en el suelo (COS), almacenadas en el primer metro de profundidad, contienen el equivalente a más de 200 años de emisiones actuales de carbono fósil ^[1]. Por lo tanto, la evolución y dinámica del clima depende directamente del balance actual y futuro del COS. Por lo anterior, el intercambio de carbono entre el suelo y la atmósfera se considera como un proceso ecológico clave en el cambio climático ^[2].

A su vez, la necesidad global de reducir los Gases de Efecto Invernadero (GEI) provenientes de los combustibles fósiles, la deforestación y la degradación han impulsado

avances en tecnologías para identificar y conservar ecosistemas clave por su capacidad de almacenamiento de carbono ^[3,4]. Así, han sido importantes los avances para conocer la distribución y el mapeo del carbono orgánico en el suelo, un paso necesario para comprender y predecir el potencial de un ecosistema para mitigar el cambio climático.

Las estimaciones del carbono se han representado a través de mapas digitales que proporcionan una base de conocimiento que sirve para identificar los factores, variables o acciones que determinan las reservas de carbono en los ecosistemas, y así proponer acciones de mitigación apropiadas para cada uno ^[5]. También, servirían de insumo para la implementación de actividades de conservación y a enfocar proyectos que busquen priorizar ecosistemas que acumulen grandes cantidades de carbono, como los páramos ^[5].

En la última década, los páramos se han destacado como ecosistemas estratégicos gracias a los servicios que ofrecen: desde la regulación del clima, almacenamiento de carbono y provisión de agua, ^[7-10] hasta la riqueza cultural y la biodiversidad que alberga.

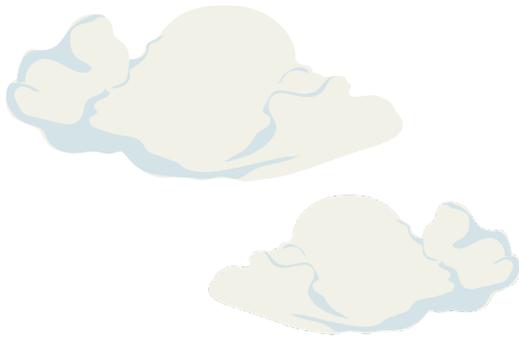
Así, conocer los registros de carbono en páramo puede mejorar la cuantificación de sumideros de carbono que existen a nivel nacional. Esto es importante porque facilita priorizar acciones que mitiguen los efectos de los GEI en línea con los proyectos de Contribuciones Determinadas a Nivel Nacional (NDC), una serie de compromisos adquiridos en el Acuerdo de París que cada país hace para reducir sus emisiones de gases de efecto invernadero ^[11].

De esta manera, el presente documento se enfocará en una aproximación para estimar el carbono en uno de los ecosistemas más representativos, diversos y frágiles de Colombia: el páramo. Este ecosistema se distribuye sobre las tres cordilleras del país y sobre la Sierra Nevada de Santa Marta y cubre casi el tres por ciento del territorio continental nacional. Según la literatura, estos ecosistemas almacenan las mayores reservas de carbono atmosférico en el suelo, con capacidad de acumular entre 119 y 397 toneladas de carbono por hectárea (tC/ha) en el metro más superficial del suelo ^[9]. Por otro lado, la biomasa aérea - o sea los árboles y plantas (tronco, ramas, corteza, hojas, etc.) que crecen sobre el suelo - es otro sumidero importante de carbono atmosférico, con la capacidad de contener entre 13,21 y 128 tC/ha ^[9]. No obstante, la cantidad de carbono en estos dos compartimentos (suelos y biomasa) depende del lugar, pues el clima, la topografía y la vegetación determinan la captura y acumulación de carbono ^[7,10,12].

Las condiciones ambientales de los páramos, como las bajas temperaturas, la alta precipitación, la elevada humedad, los suelos saturados de agua, el mal drenaje y la vegetación densa pero baja hacen que la pérdida de carbono orgánico por descomposición sea notablemente menor que en otros ecosistemas tropicales ^[9,13]. Por eso, es importante considerar estos factores y sus diferencias en distintas áreas para estimar el carbono orgánico contenido en el suelo (COS) y en la biomasa aérea ^[5,14,15].



Venado cola blanca
(*Odocoileus virginianus*)



Entre las variables más usadas para construir estos mapas de contenido de carbono están el clima, la topografía y la vegetación:



Puya nitida Mez

El clima

Las características tridimensionales del paisaje, como la profundidad del suelo, el grado de pendiente y la altitud, son cruciales para entender el contenido de COS ^[25-27]. Estos factores afectan las propiedades fisicoquímicas del suelo, incluyendo el pH, la porosidad, la saturación, la textura y la conductividad; todos importantes para el almacenamiento de carbono ^[17]. Además, la topografía influye en la hidrología del paisaje, lo que a su vez afecta la lixiviación y oxidación del carbono. ^[26,28,29].

Topografía del paisaje

Las características tridimensionales del paisaje, como la profundidad del suelo, el grado de pendiente y la altitud, son cruciales para entender el contenido de COS ^[25-27]. Estos factores afectan las propiedades fisicoquímicas del suelo, incluyendo el pH, la porosidad, la saturación, la textura y la conductividad; todos importantes para el almacenamiento de carbono ^[17]. Además, la topografía influye en la hidrología del paisaje, lo que a su vez afecta la lixiviación y oxidación del carbono. ^[26,28,29].

Vegetación

Juega un papel directo en la acumulación de carbono orgánico, ya que captura carbono atmosférico mediante la fotosíntesis y aporta con la hojarasca y restos de madera que se descomponen en el suelo ^[29,30]. La biomasa de la vegetación, que es la cantidad total de materia orgánica viva, también acumula carbono ^[9]. La deforestación y el cambio de uso del suelo reducen la capacidad del ecosistema para capturar carbono atmosférico, afectando negativamente el contenido de carbono orgánico en el suelo y en la biomasa.

En Colombia, los usos del suelo más comunes en ecosistemas de páramo se pueden agrupar en 3 prácticas: agricultura, ganadería y silvicultura [7,9,10,32,33]. Estas poseen diferentes impactos sobre el contenido de COS en cuanto a su intensidad y el contexto biótico (seres vivos) y abiótico (condiciones ambientales como el clima y el suelo) del área [7,10]. No obstante, se asemejan en que reducen el contenido de carbono en suelo y en biomasa en comparación con ecosistemas conservados, es decir que sus suelos mantienen coberturas naturales. [9,34].

Por lo tanto, prever y proyectar las reservas de carbono en los suelos y en la biomasa es esencial para desarrollar estrategias que ayuden a conservar, restaurar y aumentar estas reservas en el corto y en el largo plazo. Así, la predicción de los niveles de carbono depende del análisis de futuros escenarios de uso del suelo y de proyecciones climáticas.

Según un estudio de Crowther y colaboradores [4], se espera que para el año 2050 la temperatura global aumente al menos 2 °C, lo que podría desencadenar diversos procesos que impacten las reservas de carbono en el suelo, como un aumento en la descomposición de la materia orgánica o una mayor productividad. Sin embargo, la vulnerabilidad de estas reservas no solo está influenciada por la temperatura, sino también por factores como la precipitación, la cobertura vegetal y el volumen total de carbono almacenado.

En la actualidad, sabemos de la capacidad del ecosistema de páramo para almacenar carbono orgánico tanto en el suelo como en la biomasa, bajo diferentes usos del suelo y tipos de cobertura vegetal. Sin embargo, no conocemos con certeza cuánto carbono almacenan los páramos en Colombia ni cómo podría cambiar esta capacidad en el futuro.

**Este estudio
tiene el objetivo
de estimar el
potencial de los
ecosistemas
de páramo
para ayudar a
mitigar el cambio
climático.**

Este estudio tiene el objetivo de estimar el potencial de los ecosistemas de páramo para ayudar a mitigar el cambio climático. Para alcanzarlo, se utilizó un modelo de aprendizaje de máquinas o machine learning (Random Forest) con muestras y datos recopilados de diferentes socios y proyectos relacionados, para predecir y mapear los niveles actuales de carbono orgánico contenido en los suelos de los páramos colombianos, en los primeros 40 cm de profundidad del suelo. Además, se seleccionaron proyecciones climáticas para la temperatura y la precipitación, y en diferentes escenarios de uso del suelo, para el año 2050. Con esto se evaluó cómo podría comportarse el carbono orgánico frente al cambio climático y a los cambios en el uso del suelo.

La investigación también incluyó la distribución espacial del carbono en la biomasa aérea. Así se cuantificó el almacenamiento de carbono tanto en el suelo como en la biomasa, tanto en la actualidad como en 2050.

Este proyecto es parte de una Red Global de Prototipos donde The Nature Conservancy está aprovechando su experiencia para activar el potencial de las Soluciones Naturales del Clima, probando y evaluando rutas de alto impacto que puedan ser escaladas y replicadas en todo el mundo. Esperamos que esta información pueda apoyar al Gobierno colombiano en los próximos procesos de actualización de sus NDC.



“ El intercambio de carbono entre el suelo y la atmósfera se considera como un proceso ecológico clave en el cambio climático ”



Semillero de frailejones

Cap.

01

El ciclo del carbono

¿Qué tienen en común las plantas, los animales, las conchas del mar, las rocas y la atmósfera?

La respuesta está en el carbono, un elemento esencial para la vida en la Tierra.

Pero ¿qué tiene de especial el elemento número 14 de la tabla periódica?

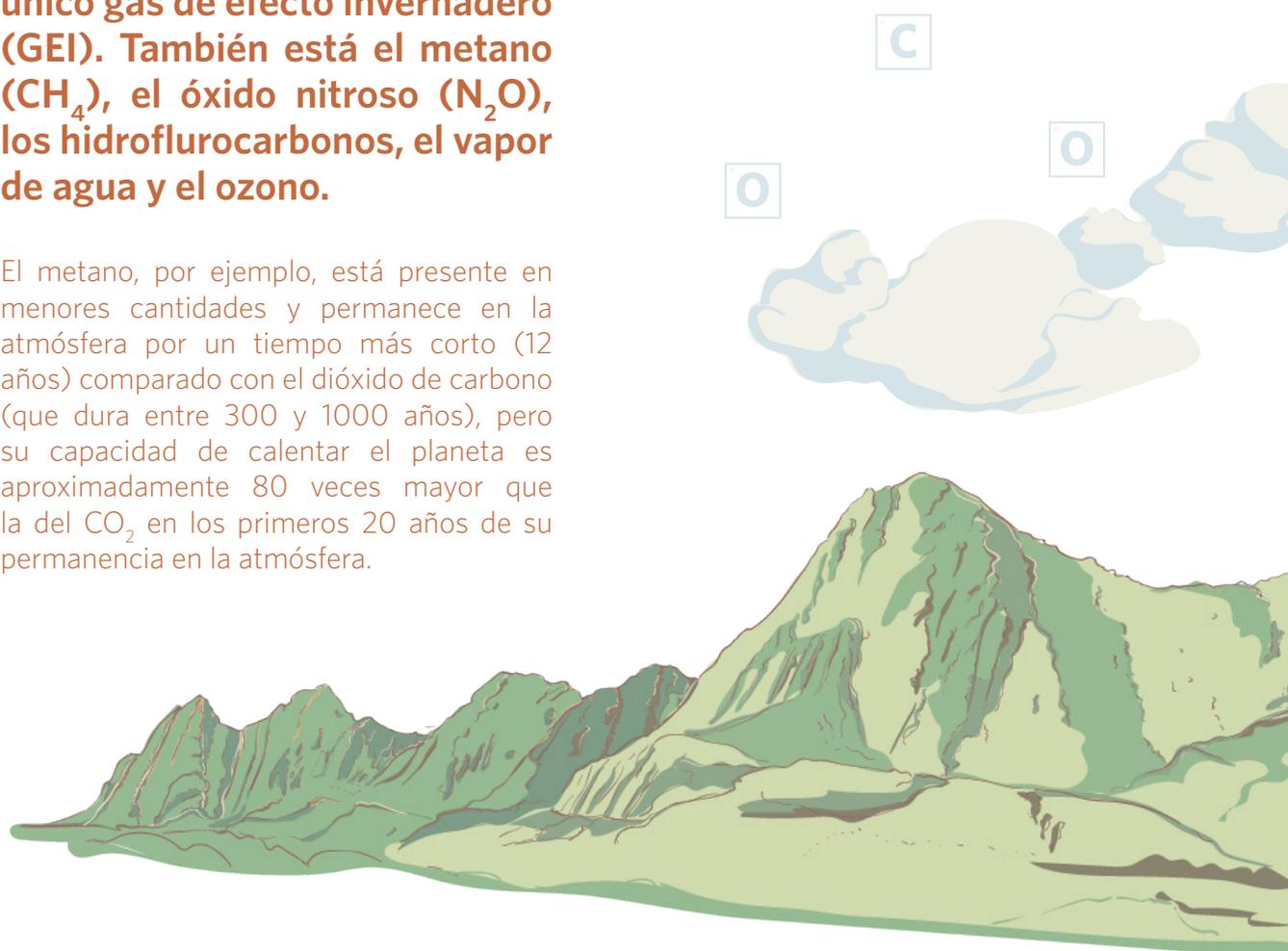
Para sobrevivir, los organismos necesitamos de los átomos de este elemento. Son esenciales para armar piezas como el ADN o las proteínas, componentes indispensables para la vida. Todos nuestros órganos están hechos en parte de carbono. Es la fuente que utilizan las plantas para alimentarse y obtener energía. Está presente en varios de los gases que componen la atmósfera terrestre, y su presencia se relaciona con la regulación de la temperatura de todo nuestro planeta. Y, no menos importante, ha sido determinante para producir la energía que mueve la economía mundial y la sociedad humana moderna a través de combustibles como la gasolina, el diesel, el carbón o el gas natural.

Al igual que otros elementos como el nitrógeno, el oxígeno, el fósforo y el azufre, el carbono se recicla y está en constante movimiento entre los organismos, el suelo, los océanos y la atmósfera -de hecho, de esta última proviene casi todo el carbono de los organismos vivos-. La manera en la que el carbono circula en la tierra, no siempre es igual. Se reconocen dos tipos de ciclo: el biológico o "rápido" y el geológico o "lento". Como quien dice, el de los seres vivos y el de las rocas.

El metano, por ejemplo, está presente en menores cantidades y permanece en la atmósfera por un tiempo más corto (12 años) comparado con el dióxido de carbono (que dura entre 300 y 1000 años), pero su capacidad de calentar el planeta es aproximadamente 80 veces mayor que la del CO_2 en los primeros 20 años de su permanencia en la atmósfera.

Aunque el dióxido de carbono es el principal gas emitido por actividades humanas, no es el único gas de efecto invernadero (GEI). También está el metano (CH_4), el óxido nitroso (N_2O), los hidrofluorocarbonos, el vapor de agua y el ozono.

El metano, por ejemplo, está presente en menores cantidades y permanece en la atmósfera por un tiempo más corto (12 años) comparado con el dióxido de carbono (que dura entre 300 y 1000 años), pero su capacidad de calentar el planeta es aproximadamente 80 veces mayor que la del CO_2 en los primeros 20 años de su permanencia en la atmósfera.



Ciclo "rápido" del carbono



Ocurre principalmente entre los seres vivos y depende de su ritmo de vida. Es captado por las plantas y algunas bacterias (los autótrofos) mediante la fotosíntesis. Luego, otros organismos, como nosotros (los heterótrofos), se los comen para obtener energía. Y, así, mediante la respiración - y también otros procesos como la digestión, la descomposición o los incendios de plantas-, **una buena parte** del carbono regresa a la atmósfera como dióxido de carbono (CO_2).

Se calcula que, en promedio, este ciclo mueve de 10^{16} a 10^{17} gramos de carbono al año - Esa cantidad está en el orden de las 10 mil millones de toneladas métricas. Solo para que lo tengan en cuenta, la masa de una ballena azul es, en promedio, 110 toneladas métricas- El efecto de este ciclo se puede ver en el cambio de concentración de CO_2 en la atmósfera: en el invierno del hemisferio norte, cuando pocas plantas crecen y otras mueren, dicha concentración aumenta, pero, durante la primavera, las plantas crecen nuevamente y la cantidad de CO_2 atmosférico disminuye.

La notación científica se usa para escribir números o cantidades que resultan muy grandes, utilizando exponentes.

Por ejemplo

10^6 es la manera de escribir 1'000.000.

Para indicar números muy pequeños se usa la misma notación pero el exponente es negativo **10^{-1}** es lo mismo que 0.1.

Para hablar de las emisiones de dióxido de carbono, frecuentemente se usa el término "gigatonelada".

Esto equivale a 10^9 (o sea 1'000.000.000) toneladas.

Ciclo "lento" del carbono

El carbono también puede tardar mucho tiempo –¡incluso millones de años!– en circular entre la atmósfera, el océano, el suelo y las rocas. El ciclo inicia cuando el carbono de la atmósfera reacciona con el agua lluvia y forma el ácido carbónico (H_2CO_3) que cae en la superficie y poco a poco disuelve las rocas. En este proceso se liberan iones como los de calcio, que son arrastrados por los ríos hasta el océano.

Allí reaccionan con el carbono diluido en otros compuestos como el bicarbonato de calcio ($CaCO_3$) que forma la concha de algunos animales y le da rigidez a los corales. Cuando mueren, se depositan en el fondo de los océanos: capas y capas de conchas y sedimentos se compactan y forman roca o piedra caliza. Después, mediante procesos que involucran el movimiento tectónico, el carbono puede retornar a la atmósfera a través de erupciones volcánicas.

La cantidad de gramos de carbono que circula anualmente de esta manera es menor (entre 10^{13} entre 10^{14} veces) que la del ciclo rápido.

Pero esa no es toda la historia. Un 80% del carbono en rocas es producido de esa manera.

El 20 restante está almacenado en organismos que murieron y quedaron enterrados entre capas de tierra.

Millones de años, presiones y temperaturas altas son suficientes para que este carbono se convierta en roca sedimentaria.

A mayor profundidad, y en ausencia de oxígeno, el carbono orgánico de aquellos seres vivos se transforma en combustible fósil: carbón, gas natural o petróleo, que cuando es quemado por los humanos retorna a la atmósfera.



El desbalance

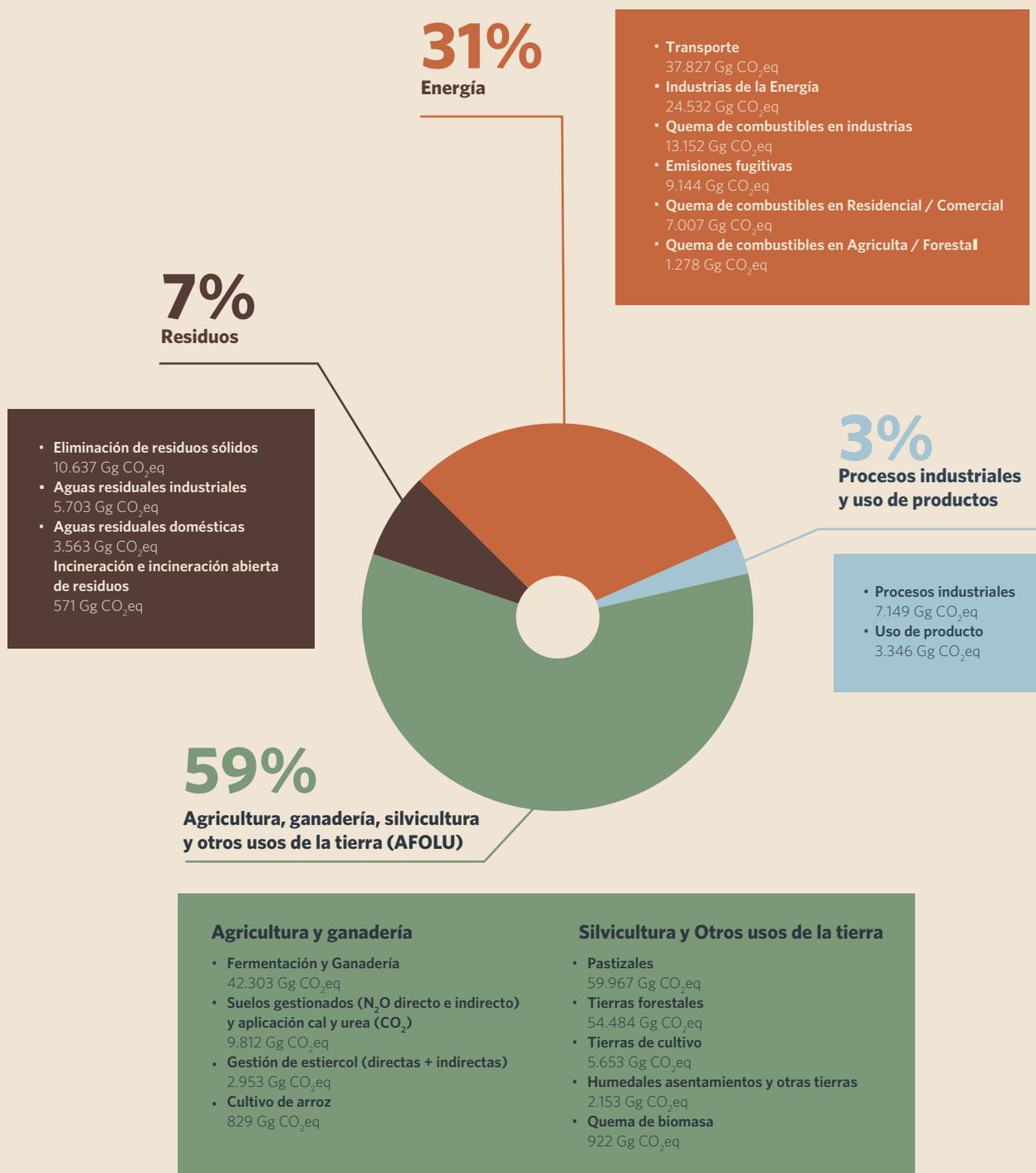
Como vimos, el carbono ha estado en constante movimiento entre depósitos: ha pasado por las hojas y los troncos de las plantas, se ha sepultado en las rocas e incluso ha salido de nuestros pulmones a la atmósfera -Algunos reservorios tienden a preservar más cantidad de carbono que otros-.

Especialmente, el movimiento del carbono hacia la atmósfera se había mantenido en cierto equilibrio hasta mediados del siglo XVIII. Desde que comenzó la Revolución Industrial (1750), la cantidad de CO₂ en la atmósfera ha ido en aumento por la extracción y quema de combustibles fósiles.

La evidencia científica sugiere que los seres humanos han alterado este sistema y, anualmente, la actividad humana hace que el dióxido de carbono se acumule en la atmósfera mucho más rápido de lo que puede ser absorbido.

En la siguiente gráfica, se pueden ver las emisiones cuantificadas de distintos sectores en el país. La cantidad total es de 302.974 GgCO₂ eq.

Inventario Nacional de GEI



Emisiones
302.974 Gg CO₂eq

Gráfica 1. Informe del inventario nacional de gases de efecto invernadero 1990 - 2018 y carbono Negro 2010 -2018 de Colombia

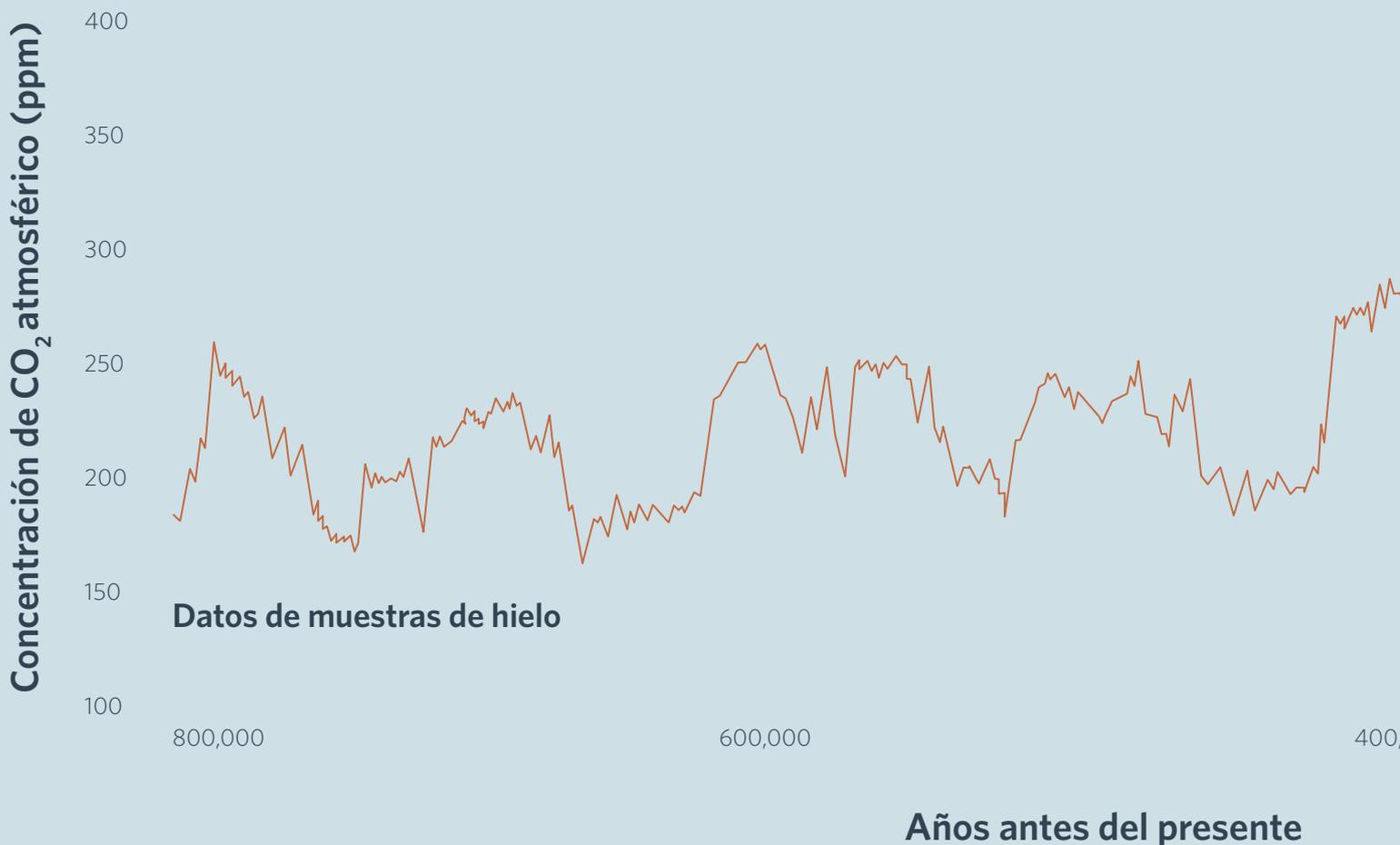
IDEAM. Fundación. PNUD. MADS. DNP. Cancillería. [Internet]. Bogotá; 2022. Disponible en: <https://unfccc.int/sites/default/files/resource/Annex%20BUR3%20COLOMBIA.pdf>

Los combustibles fósiles contienen el carbono que se ha almacenado en el subsuelo durante millones de años. Sin embargo, hoy está regresando a la atmósfera rápidamente. Como se puede ver en la gráfica, según la evidencia paleoclimática, la concentración de CO₂ atmosférico en los últimos 800.000 años nunca había superado las 300 ppm. Hoy los niveles de este gas son los más altos que cualquier otro momento en la historia de la humanidad.

Junto a la concentración creciente del dióxido de carbono, y el efecto de otros gases de efecto invernadero (GEI) como el metano (CH₄), el óxido nitroso (NO_x) o los clorofluorocarburos (CFC), hay también un aumento de la temperatura global promedio de la Tierra.

Según el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), esta alteración "ya está produciendo muchos fenómenos meteorológicos y climáticos extremos en todas las regiones del planeta. Esto ha provocado efectos adversos generalizados y las consiguientes pérdidas y daños para la naturaleza y las personas."

Esta alteración, reflejada en la crisis climática que atravesamos, nos ha puesto en la tarea de buscar alternativas diversas para abordar este problema. ¿Cómo hacer frente al cambio climático? Claro, no hay una única respuesta, la variedad pasa por el cambio de nuestro comportamiento y consumo, la transformación de la industria para que use fuentes de energía limpia, hasta las soluciones que aporta la naturaleza. Desde las costas y los océanos hasta los bosques, las soluciones basadas en la naturaleza podrían contribuir a más de un tercio de las reducciones de emisiones requeridas para el año 2030.

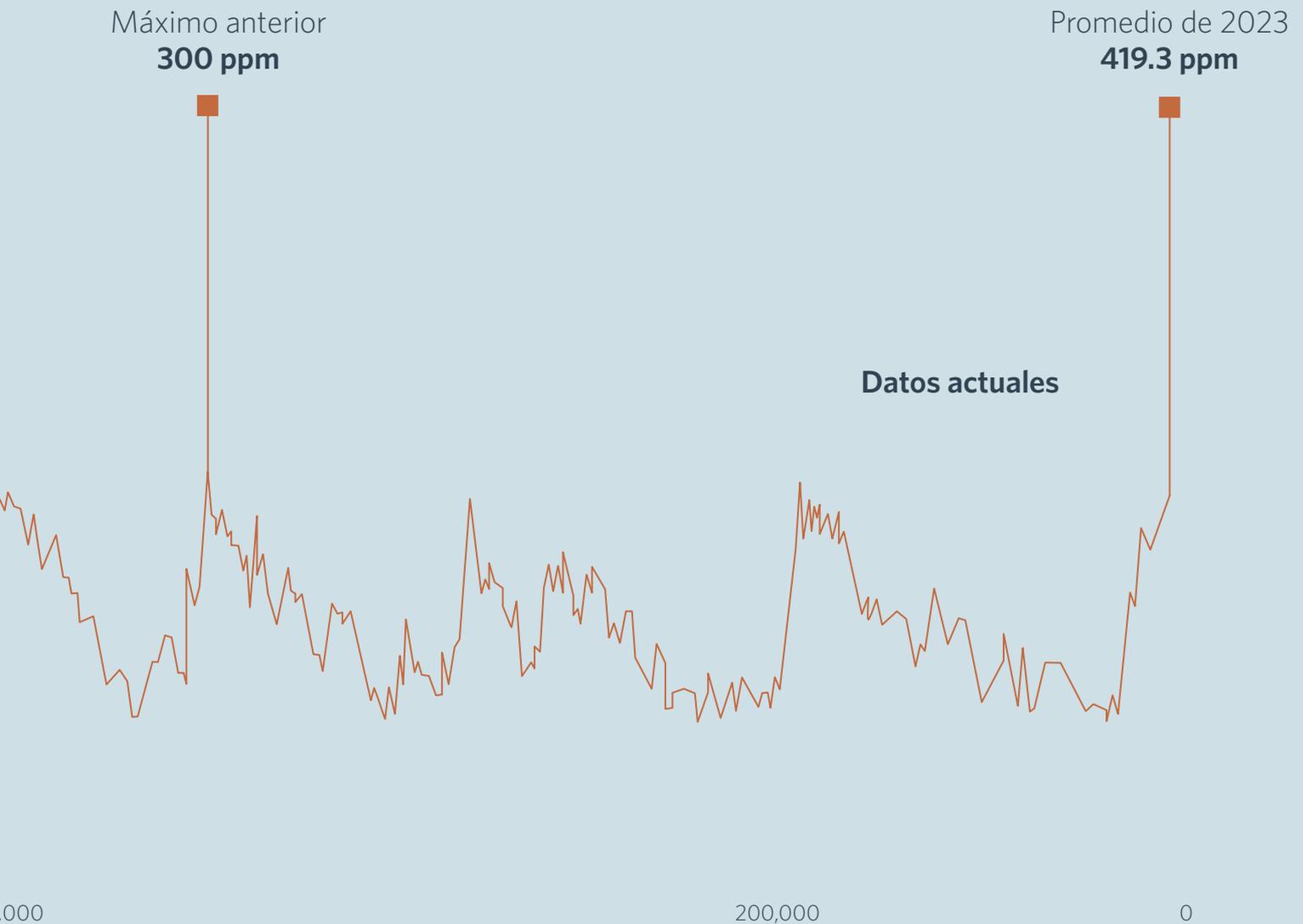


Ese es el caso de los suelos del planeta.

Ellos resultan ser el reservorio terrestre más grande que interactúa con el carbono de la atmósfera.

Se estima que en el primer metro de profundidad, contienen entre 2.000 a 2.400 Gt de carbono ^[1]. Estas reservas de carbono orgánico en suelo (COS) son tan grandes que representan el equivalente a más de 200 años de emisiones actuales de carbono fósil ^[2].

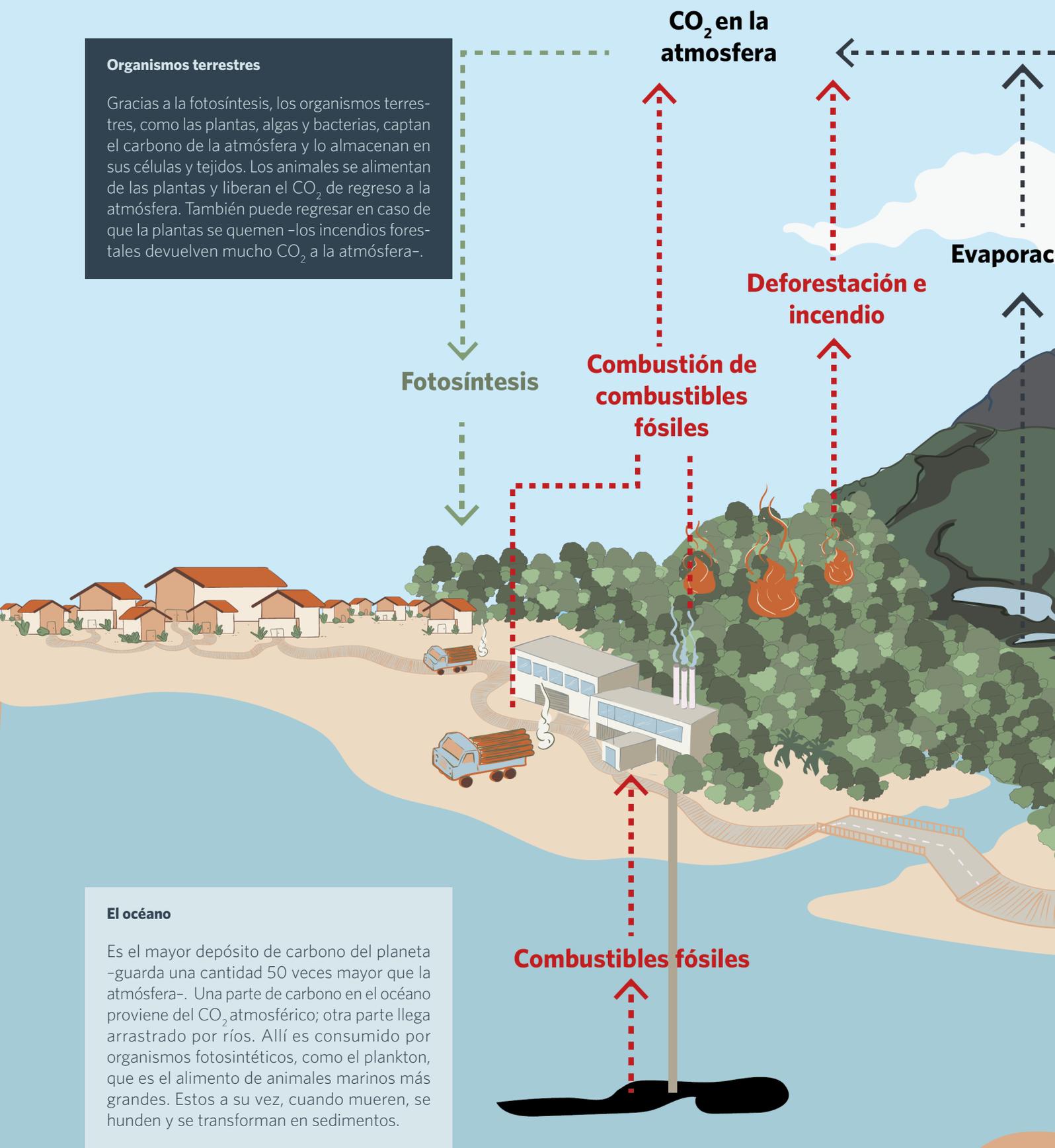
El futuro del clima, en parte, podría verse afectado dependiendo de la salud de los suelos, que están directamente asociados a la producción de materia orgánica muerta y a la respiración de animales como nosotros. Así, el intercambio de carbono entre el suelo, donde se sostiene la vida, y la atmósfera resulta un proceso ecológico clave para mitigar los efectos del cambio climático.



El ciclo del carbono

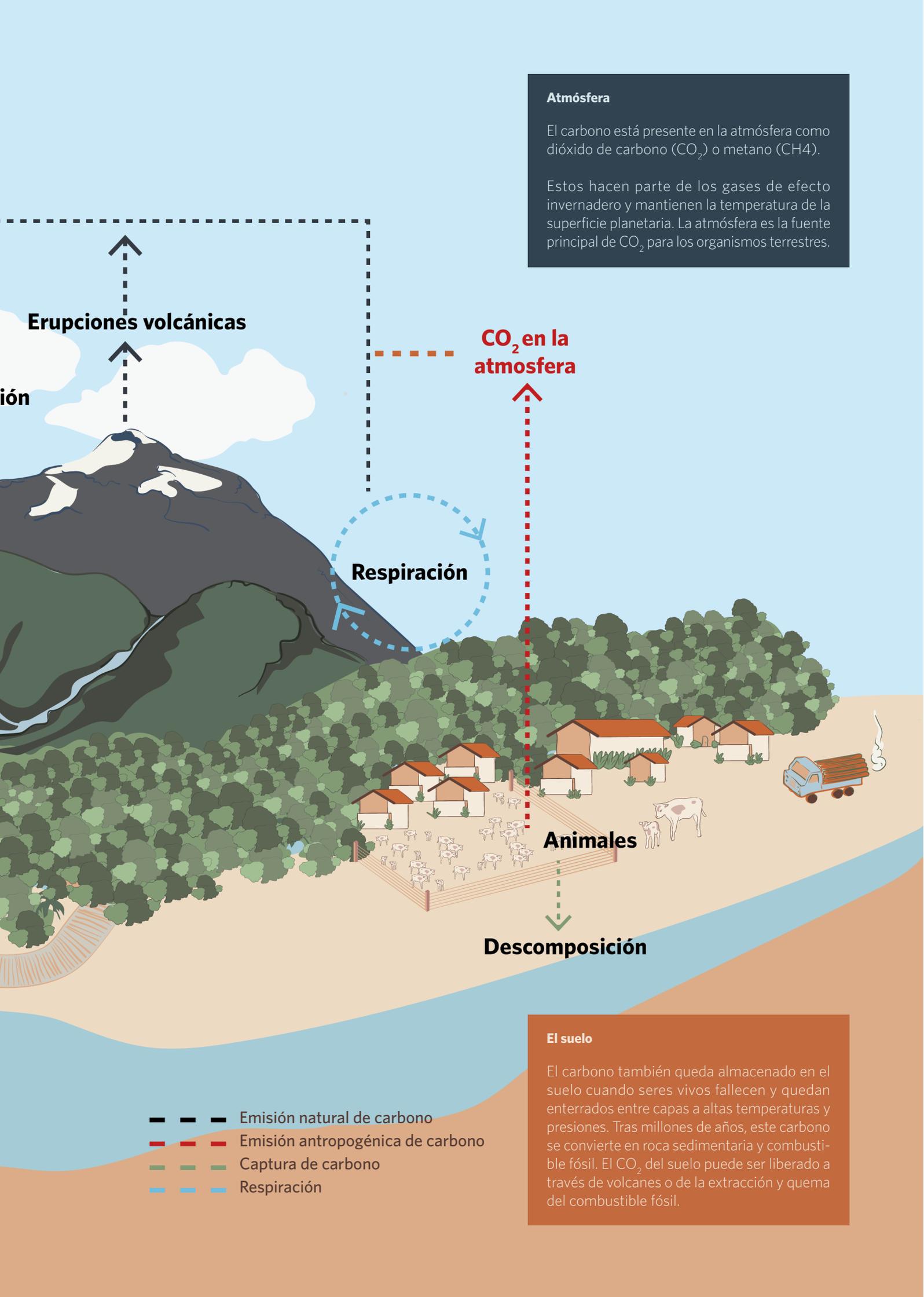
Organismos terrestres

Gracias a la fotosíntesis, los organismos terrestres, como las plantas, algas y bacterias, captan el carbono de la atmósfera y lo almacenan en sus células y tejidos. Los animales se alimentan de las plantas y liberan el CO_2 de regreso a la atmósfera. También puede regresar en caso de que las plantas se quemen -los incendios forestales devuelven mucho CO_2 a la atmósfera-.



El océano

Es el mayor depósito de carbono del planeta -guarda una cantidad 50 veces mayor que la atmósfera-. Una parte de carbono en el océano proviene del CO_2 atmosférico; otra parte llega arrastrado por ríos. Allí es consumido por organismos fotosintéticos, como el plankton, que es el alimento de animales marinos más grandes. Estos a su vez, cuando mueren, se hunden y se transforman en sedimentos.



Atmósfera

El carbono está presente en la atmósfera como dióxido de carbono (CO₂) o metano (CH₄).

Estos hacen parte de los gases de efecto invernadero y mantienen la temperatura de la superficie planetaria. La atmósfera es la fuente principal de CO₂ para los organismos terrestres.

El suelo

El carbono también queda almacenado en el suelo cuando seres vivos fallecen y quedan enterrados entre capas a altas temperaturas y presiones. Tras millones de años, este carbono se convierte en roca sedimentaria y combustible fósil. El CO₂ del suelo puede ser liberado a través de volcanes o de la extracción y quema del combustible fósil.

- — — Emisión natural de carbono
- — — Emisión antropogénica de carbono
- — — Captura de carbono
- — — Respiración

Cap.

02

El potencial de los ecosistemas para mitigar el cambio climático



¿Cómo mitigar los efectos del cambio climático?

No hay una única respuesta a todos los problemas, menos aún si son complejos como la crisis climática. La mejor manera de abordarla es desde distintas aproximaciones a gran escala.

Como lo ha evidenciado el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC), es necesario reducir las emisiones de gases que hacen que se caliente la atmósfera, como el CO₂. Un primer paso sería la reducción de la dependencia de nuestros sistemas productivos en los combustibles fósiles, gestionar de manera sostenible el uso de las tierras para uso agropecuario y migrar a energías limpias.

Pero esta es solo una parte. Los ecosistemas poseen capacidades para enfrentar el cambio climático:

- 1** **Primero, pueden reducir las emisiones de Gases de Efecto Invernadero, como el CO₂, que están relacionadas con el uso y cambio del uso del suelo.**
- 2** **Segundo, funcionan como sumidero de CO₂ por su capacidad de captura y almacenamiento de este gas.**
- 3** **Y tercero, la resiliencia de los ecosistemas permitiría la adaptación de comunidades a la inundaciones, sequías y otros impactos relacionados con el cambio climático.**







Esta investigación, hecha por The Nature Conservancy Colombia, se ocupa principalmente del páramo. Su papel en la regulación del ciclo del agua, el almacenamiento de carbono, la provisión de hábitat para distintas especies, su importancia sociocultural, y muchos otros factores, lo hacen un ecosistema estratégico en Colombia.

Esto, sumado a su particular vulnerabilidad ante el cambio climático, lo ha convertido en objeto de interés para la conservación y manejo sostenible.

El páramo

Definir un “páramo” **no es fácil**. Puede llegar a ser un tema hasta polémico, porque sus límites son, frecuentemente, difíciles de determinar y han variado históricamente principalmente por actividades humanas.

Pero entonces ¿qué es un páramo?

Un ecosistema ubicado en montañas **inter-tropicales**, que por lo general se encuentra entre los **2900-4000 msnm**, entre el límite superior del bosque andino y el inferior de las nieves perpetuas. Comprenden una

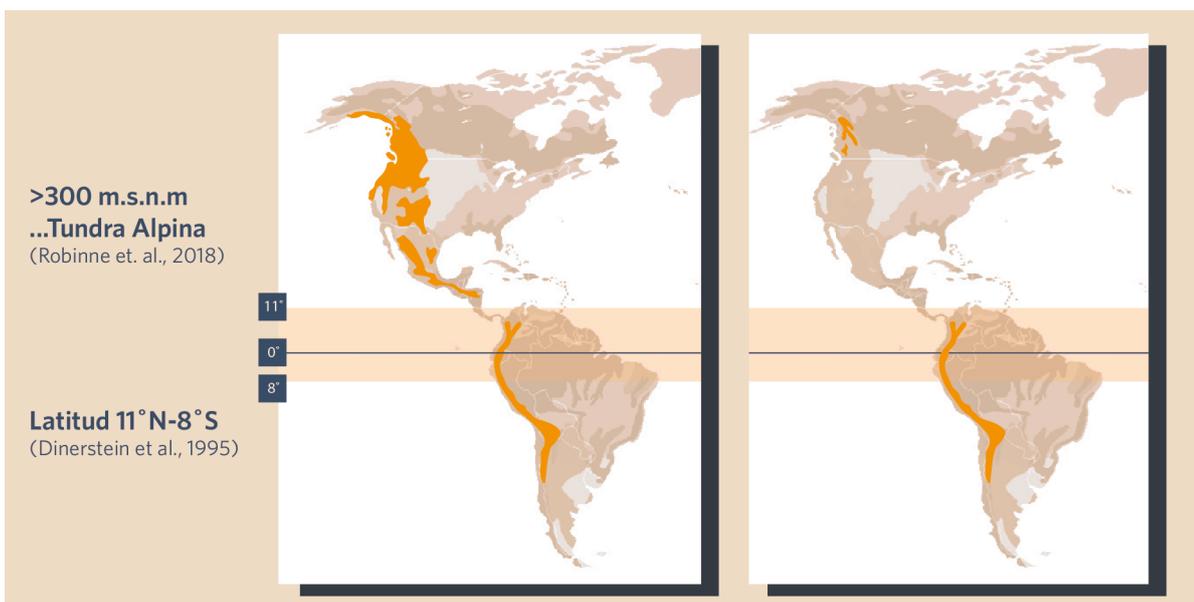
gran variabilidad climática, topográfica y de vegetación, producto de los gradientes de elevación, procesos orográficos y de cambio en el uso del suelo.

Por lo general, comprenden sistemas fríos y húmedos, con alta radiación y nubosidad. No obstante, las condiciones climáticas de los páramos son muy variadas.

Los países que los incluyen en Latinoamérica son Ecuador, Venezuela, Costa Rica y Perú.

El clima del páramo cambia drásticamente a lo largo de un día: La temperatura mínima está entre 9°C y 3°C pero puede tener variaciones de más de 20°C en 24 horas.

Herbazales Arbustales y turberas de alta montaña



Mapa 1. Herbazales Arbustales y turberas de alta montaña Colombia



Cosecha de cebolla



Oso de anteojos
(*Tremarctos ornatus*)

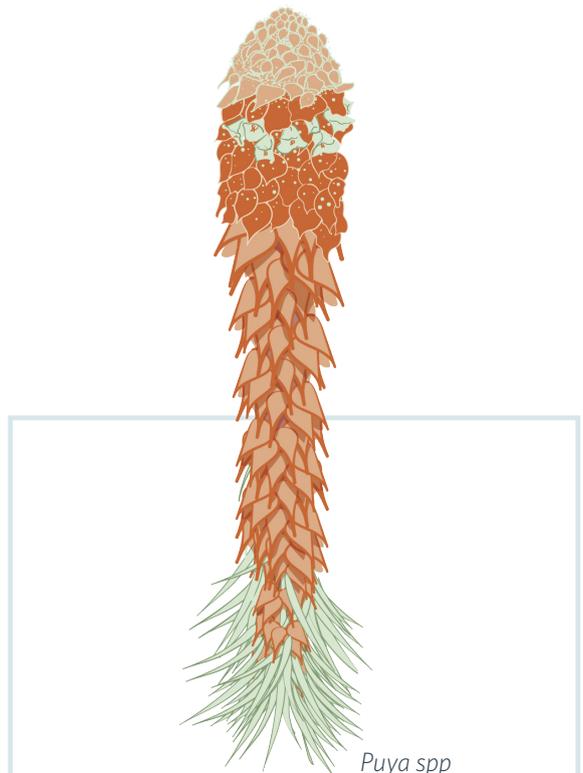
Fauna

Se han registrado más de **70 especies de mamíferos**, **15 de reptiles**, **87 de anfibios**, **154 de aves** y **130 de mariposas y polillas**.

Hay páramos más húmedos que otros.

La humedad relativa suele ser muy alta, entre 80 y 95%. Sin embargo, puede variar mucho según su ubicación topográfica específica, pues entre las vertientes de las cordilleras hay diferencias en los vientos.

También en precipitación hay una gran variedad: en los páramos secos puede llover entre 600 mm y 1600 mm al año. Por el contrario, en los más lluviosos, puede superar incluso los 4000 mm.



Puya spp

Vegetación

Se estima que hay unas **4.700 especies** en los páramos de Colombia.

El páramo

1 **45%**

Herbazal

área total

2 **23%**

Bosque

área total

3 **12%**

Arbustal

área total

4 Turbera

5 Glaciares

6 Roca desnuda

7 Quebradas y ríos

8 Lagunas, lagos

9 Actividades agropecuarias



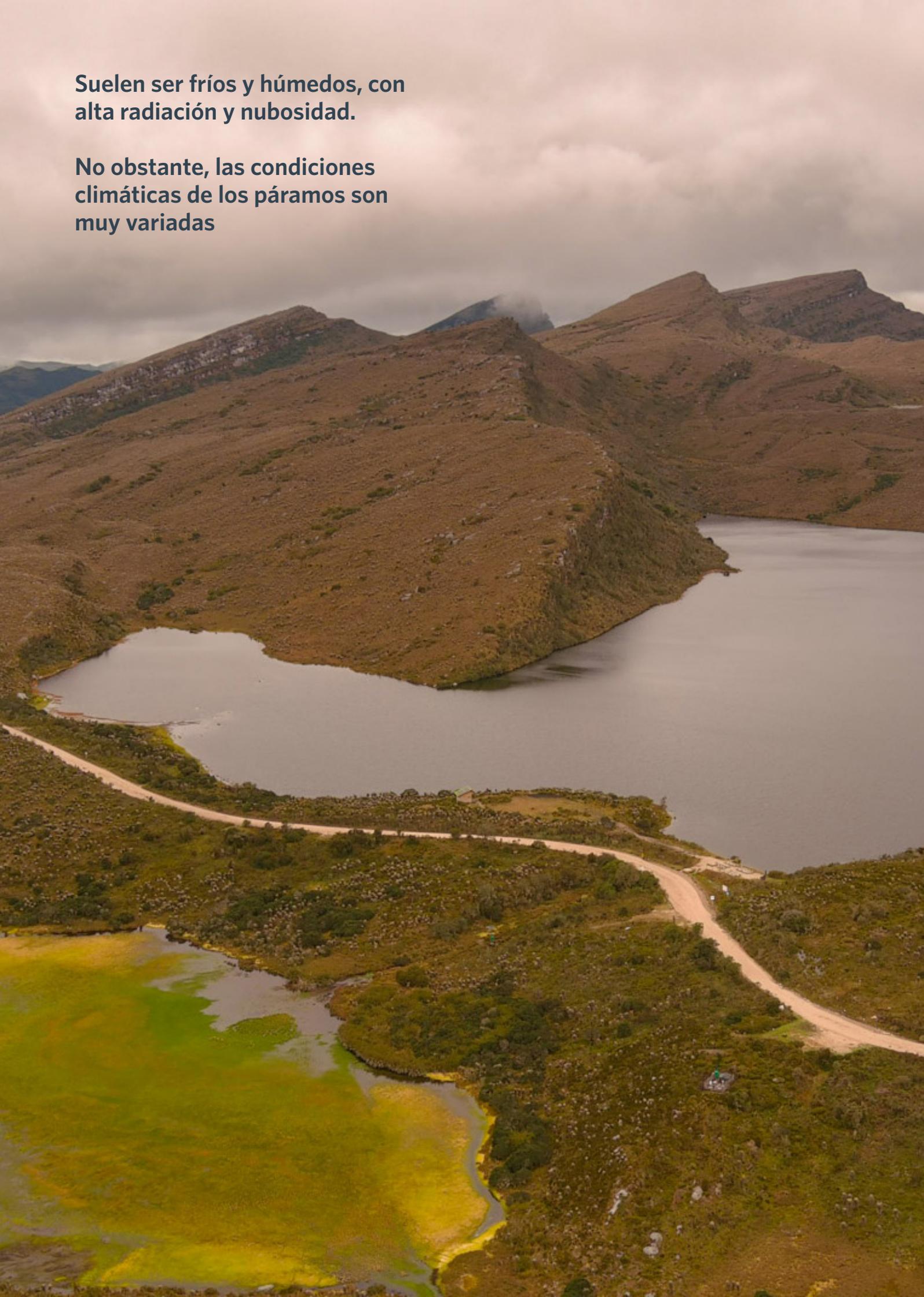
Los herbazales, bosques y arbustales son las coberturas más representativas en los páramos.

No son excluyentes, con mucha frecuencia se ven paisajes con elementos de más de una cobertura.



Suelen ser fríos y húmedos, con alta radiación y nubosidad.

No obstante, las condiciones climáticas de los páramos son muy variadas





Archipiélagos terrestres:

En los páramos pasa algo similar a lo que sucede en las islas, aunque pueden estar relativamente cerca unas a otras, su biodiversidad es muy diferente por la barrera que representa el mar. Con el paso del tiempo, las poblaciones se van haciendo cada vez más particulares y diferenciándose entre sí.

En el caso de los páramos, no es el mar lo que separa las poblaciones, sino las zonas bajas. Los páramos son como “islas” de tierras altas, por eso hay tanta diversidad en áreas relativamente pequeñas.

Las condiciones del páramo favorecen el **endemismo**, una especie es **endémica** si está limitada a una zona geográfica específica y que no se encuentra de forma natural en ninguna otra parte del mundo.

Según el Instituto Humboldt de las 3.500 especies de plantas vasculares (que tienen tallo y flor) que viven en los páramos Andinos, el 60% de ellas son endémicas.

La cobertura del suelo es una herramienta útil para la caracterización de los ecosistemas y representa lo que está en la superficie terrestre. Las coberturas vegetales de los páramos se pueden dividir en diferentes categorías. Es importante resaltar que estas distinciones no son absolutas, por el contrario, con frecuencia las categorías se encuentran superpuestas y conformando complejos mosaicos.

Esta superposición no es exclusiva de las coberturas naturales: es común encontrar coberturas asociadas a la actividad humana intercaladas con áreas conservadas.

Las condiciones del páramo favorecen el endemismo, una especie es endémica si está limitada a una zona geográfica específica.

Las coberturas del páramo

Cobertura de la tierra	Área (Hectárea)
Tuberas y otras zonas pantanosas	981
Otras actividades antrópicas	1848
Actividades forestales	4009
Otras zonas naturales	59685
Actividades agropecuarias	128106
Actividades ganaderas	140237
Mixtas en espacios naturales	195009
Arbustales	361112
Bosques	674665
Herbazales	1291026
Total	2.856.678

El área de turberas puede estar subestimada, ya que el método del mapa oficial coberturas en Colombia no contempla otras variables como el relieve o humedad del suelo que permiten una identificación más precisa

Gráfica 3. Reclasificación de las coberturas de la tierra, basado en Coberturas Corine Land Cover 2018 del IDEAM

Herbazal:

Es la cobertura emblemática del páramo y ocupa casi la mitad del área total (45%).

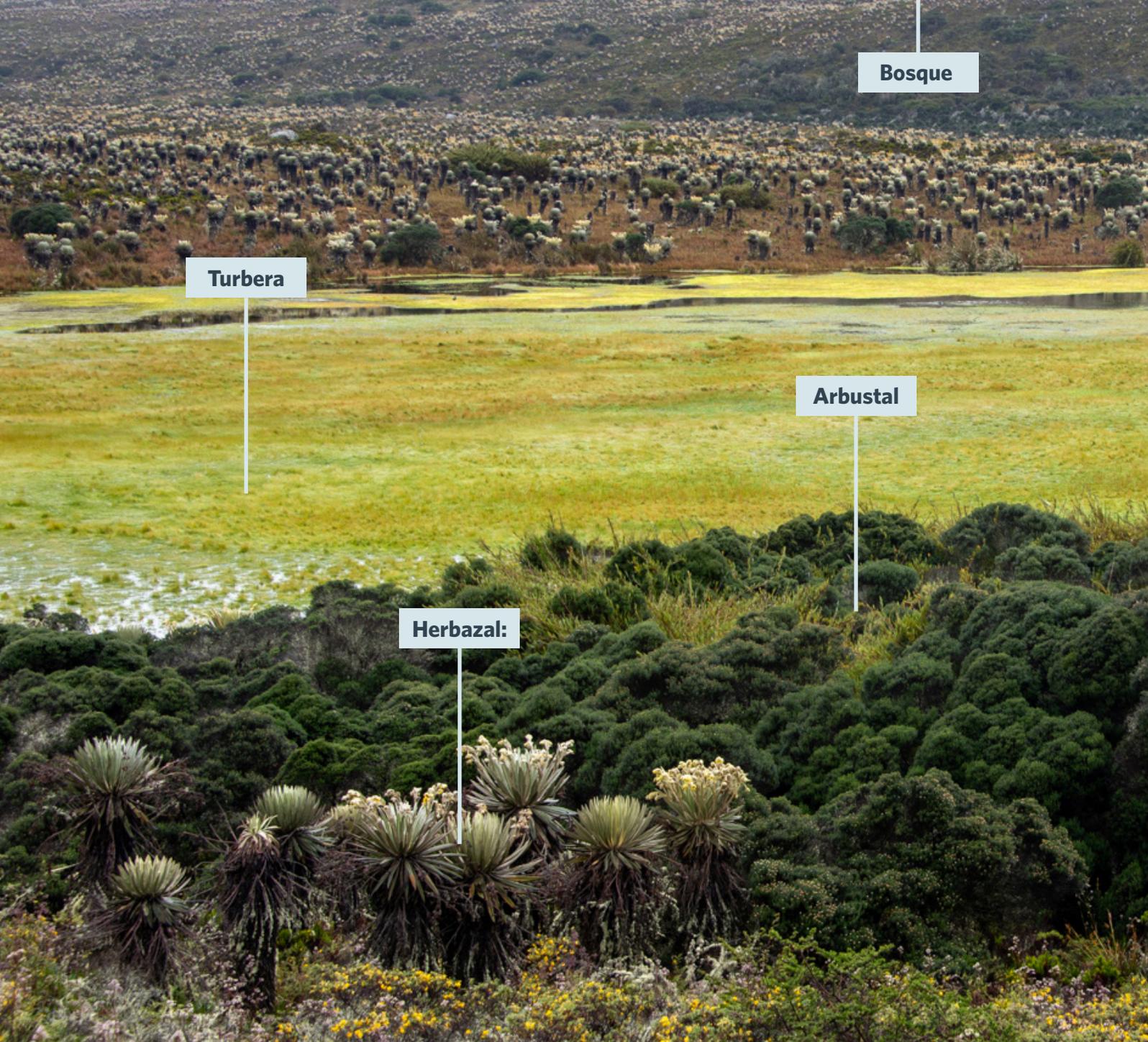
Está constituido por una comunidad vegetal natural, dominada por elementos herbáceos.

- ¿Qué es una herbácea? La característica que las define es la **ausencia de tallos leñosos**, como los que tienen los arbustos y árboles.
- Muchas de las especies más representativas de la flora paramuna (ej. frailejones, puyas y helechos) son herbáceas.

Arbustal:

Es un grupo de coberturas vegetales naturales, cuyo hábito de crecimiento es arbustivo. Ocupan aproximadamente un 12% del área total de páramos en Colombia.

- ¿Qué es un **arbusto**? Es una planta con un ciclo de vida de más de dos años, con estructura de tallo leñoso, una altura entre 0,5 y 5 m, fuertemente ramificado en la base y sin una copa definida.



Turbera:

Son zonas inundables, terrenos en los cuales el nivel del agua (nivel freático) está a la altura del suelo.

Son terrenos bajos y pantanosos, de textura esponjosa, compuestos principalmente por musgos y materias orgánicas en descomposición.

Se encuentran frecuentemente en áreas andinas, situados por encima de los 3.200msnm.

Bosque:

Comprende las áreas naturales constituidas principalmente por árboles de especies nativas. Son la segunda cobertura más predominante dentro de los páramos (23%).

La altura del dosel ayuda a caracterizar un bosque. En los bosques paramunos, las coberturas suelen ser más bajas que en otros ecosistemas boscosos. Dado que una gran mayoría de los árboles de páramo no superan los 15 metros de altura, casi todos entran en la categoría de “bosques bajos”.

Quebradas y ríos:

Las corrientes naturales de agua surcan los paisajes paramunos: la condensación de las nubes y la precipitación, sumada al deshielo de los glaciares, dan origen a buena parte del recurso hídrico de Colombia.

Roca desnuda:

Son áreas en las cuales la superficie del terreno está constituido por capas de rocas expuestas, sin vegetación. Generalmente formando escarpes y acantilados.

Lagunas, lagos:

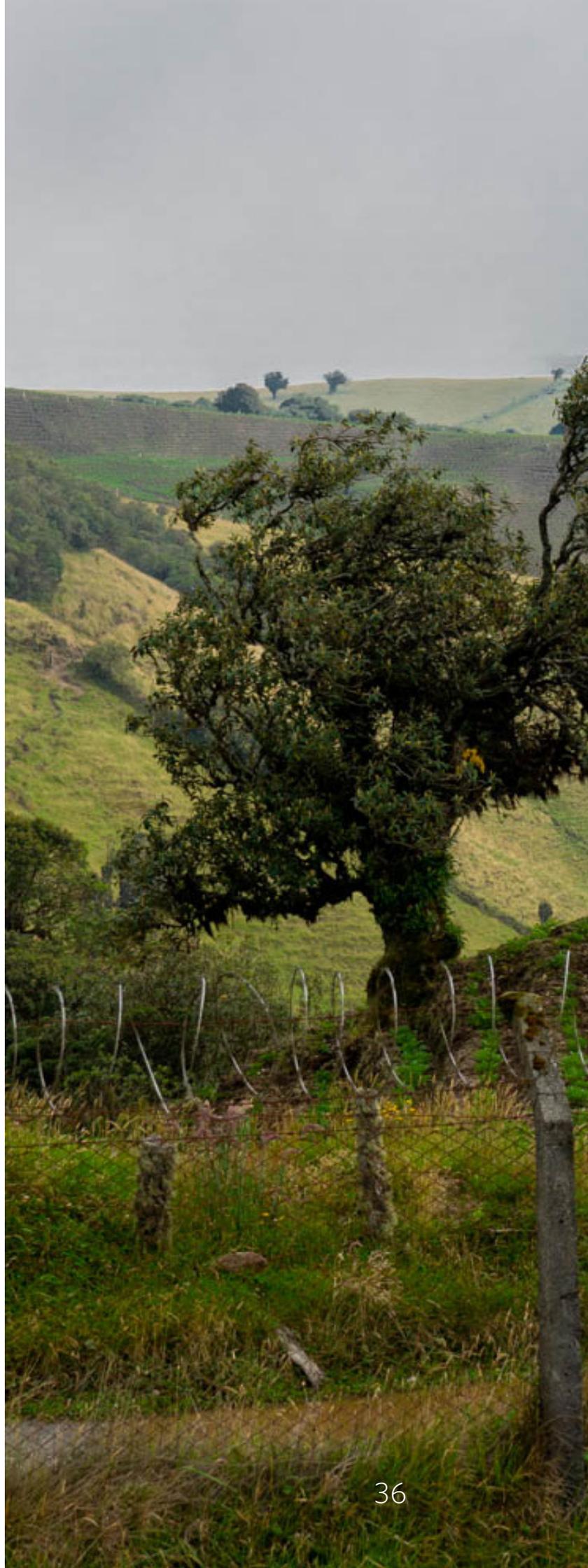
Superficies o depósitos naturales de agua. En la zona andina hay varios lagos y lagunas de alta montaña donde nacen ríos.

Glaciares:

Áreas cubiertas por hielo y ocasionalmente por nieve. Se localizan en la cima y las laderas de algunas de las montañas más altas de los Andes colombianos, por encima de los 4900 msnm.

Históricamente, las coberturas del páramo han cambiado, en particular por prácticas productivas humanas.

Miles de familias campesinas han habitado y siguen habitando estas tierras (y las coberturas vegetales lo reflejan).





Para esta investigación se definieron tres principales coberturas asociadas a la actividad humana en el páramo:

1

Pastos para ganadería:

Los páramos han sido crecientemente explotados a través de la ganadería, en particular para la leche. Esta actividad se suele asociar con la transformación de grandes extensiones de cobertura natural en potreros para ganado.

Hace parte fundamental de la economía campesina de varios páramos del país.

2

Áreas agrícolas:

Terrenos dedicados principalmente a la producción de alimentos. En los páramos del país se produce una diversidad de productos agrícolas como las hortalizas, la cebolla de rama y la zanahoria, pero el producto agrícola más emblemático del páramo es, sin lugar a duda, la papa.

3

Actividades forestales:

Coberturas constituidas por plantaciones de vegetación arbórea, realizada por la intervención directa de la mano humana.

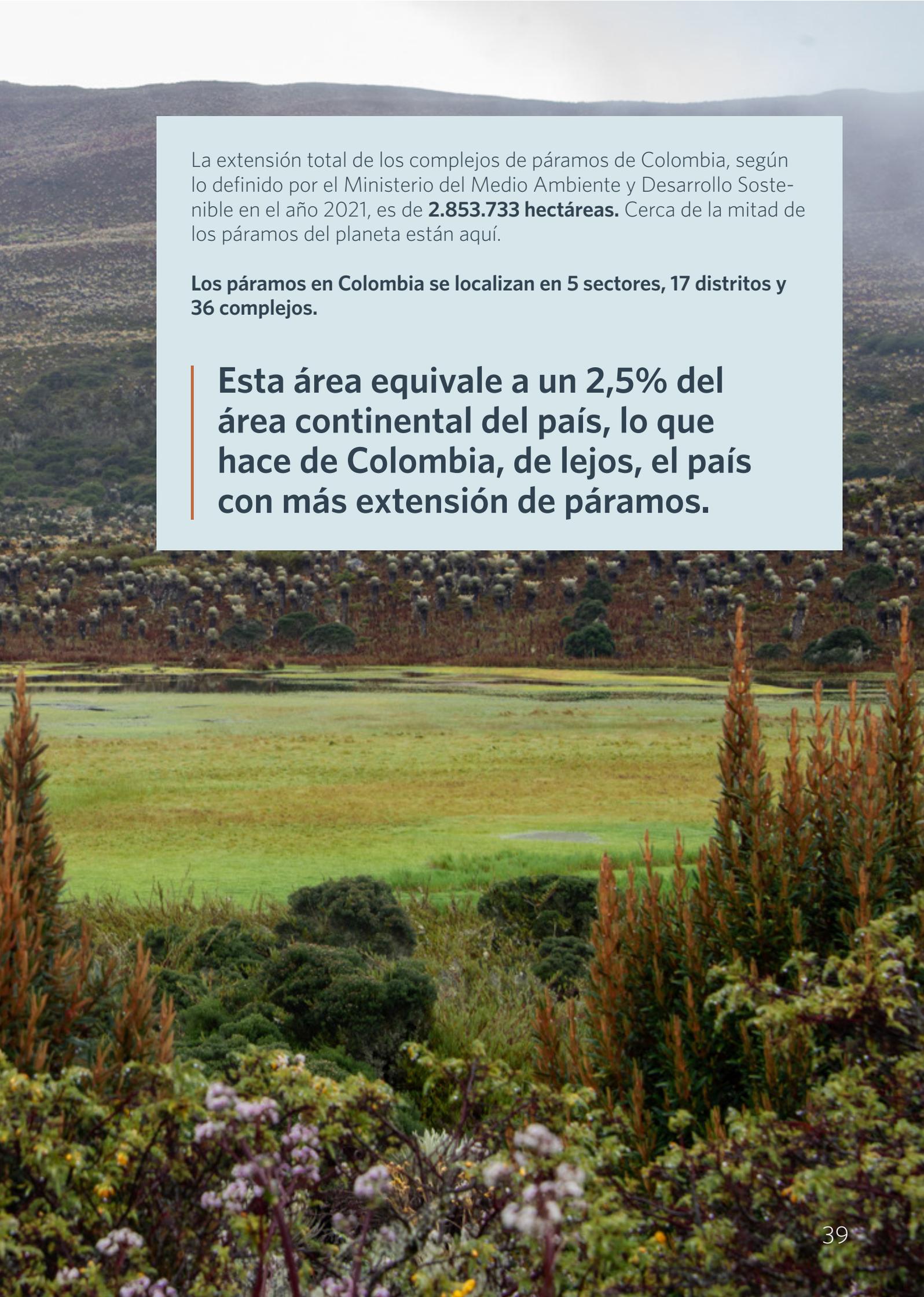
Como mencionamos antes, es común encontrar coberturas asociadas a la actividad humana intercaladas y formando complejos mosaicos con coberturas naturales.

Cap.

04

Los páramos en Colombia





La extensión total de los complejos de páramos de Colombia, según lo definido por el Ministerio del Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible en el año 2021, es de **2.853.733 hectáreas**. Cerca de la mitad de los páramos del planeta están aquí.

Los páramos en Colombia se localizan en 5 sectores, 17 distritos y 36 complejos.

Esta área equivale a un 2,5% del área continental del país, lo que hace de Colombia, de lejos, el país con más extensión de páramos.

Sector Sierra Nevada de Santa Marta

Son los páramos ubicados más al norte de Colombia y ocupan una extensión de 147.838 ha (5,2% de los páramos)

Complejos de Páramo 2021

- Cordillera Central
- Cordillera Occidental
- Cordillera Oriental
- Nariño - Putumayo
- Sierra Nevada de Santa Marta

Sector Cordillera Central:

Con una extensión de 792.894 ha equivale al 27,8% del total de complejos de Páramo.

Sector Cordillera oriental:

Cuenta con la mayor extensión de páramos. Sus 1.564.625 ha equivalen al 54,8% de la extensión total.

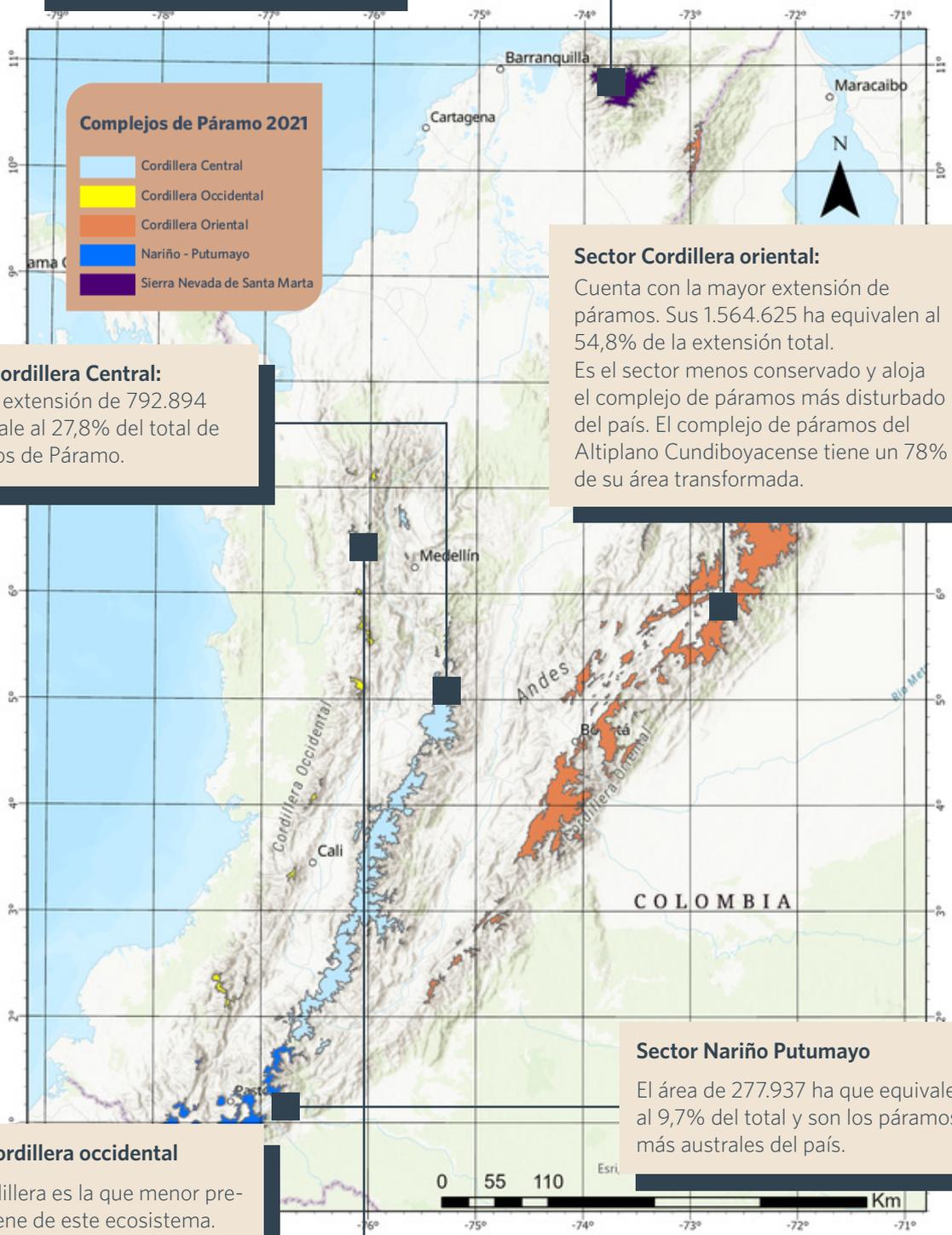
Es el sector menos conservado y aloja el complejo de páramos más disturbado del país. El complejo de páramos del Altiplano Cundiboyacense tiene un 78% de su área transformada.

Sector cordillera occidental

esta cordillera es la que menor presencia tiene de este ecosistema. Sus 70.439 ha corresponden a apenas 2,47% de los páramos.

Sector Nariño Putumayo

El área de 277.937 ha que equivale al 9,7% del total y son los páramos más australes del país.



Mapa 1. Complejos de Páramo de Colombia

*Las áreas de cada sector son aproximadas debido a la complejidad de su delimitación.

Los páramos más húmedos se encuentran en la vertiente oriental de la cordillera Oriental y la vertiente occidental de la cordillera Occidental. Los más secos en áreas del interior de la cordillera Oriental.

El censo de páramos de 2018 encontró que más de 76.000 colombianas y colombianos, mayoritariamente campesinos, viven en los páramos del país.

Se cree que la ocupación humana del páramo, a escalas como las actuales, es un fenómeno que inició apenas en el siglo XIX. De hecho, no había una ocupación indígena tradicional de los páramos. Aunque en la actualidad haya reservas indígenas que incluyen páramos, comunidades como las del Cauca han manifestado que “Los páramos son nuestras áreas sagradas, pero no nos dejaron otra cosa”.

En cámara lenta:

Las condiciones de altura hacen que muchas de las especies del páramo se establezcan y crezcan muy lentamente, algunas crecen apenas un centímetro al año. Por eso, el reemplazo de las coberturas naturales por coberturas como los pastos o los cultivos agrícolas tiene efectos a largo plazo sobre la diversidad y el estado de conservación del páramo.

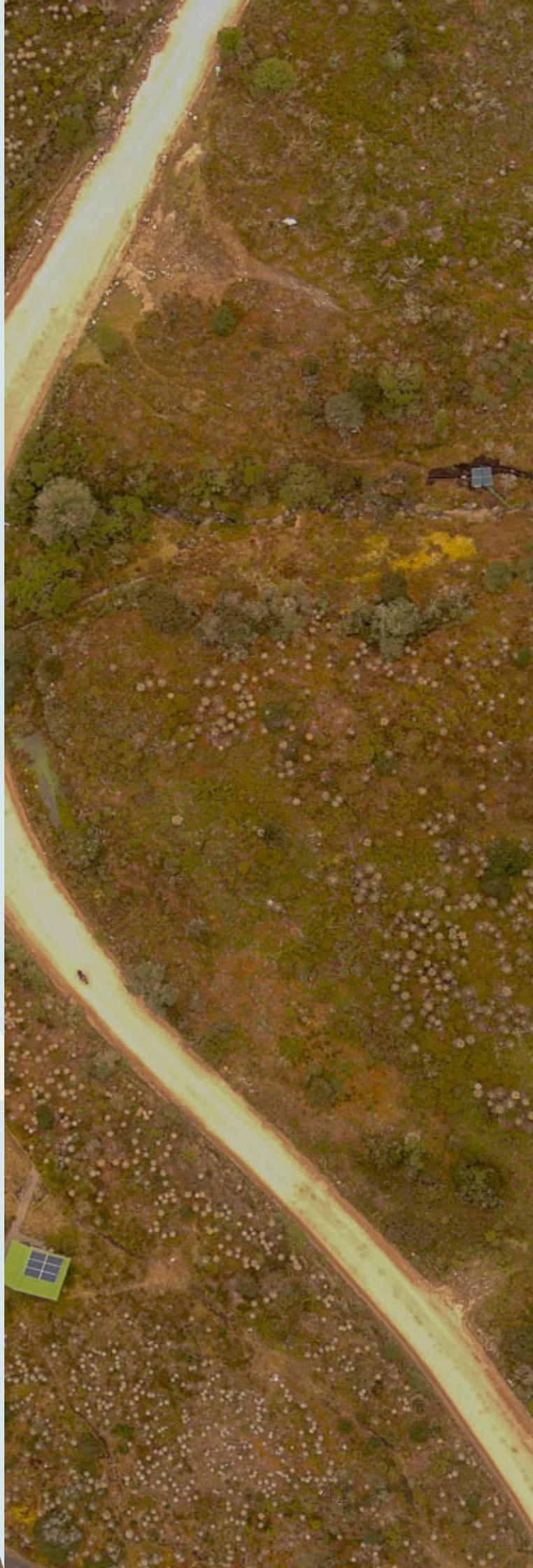
Con los avances en tecnología agrícola, el cultivo de la papa ha alcanzado altitudes cada vez mayores. Originalmente eran cultivos de rotación, que permitían que el terreno se recuperara por años entre cosecha y cosecha. Con la llegada de los agroquímicos y variedades mejoradas del tubérculo, este periodo se ha reducido radicalmente. Además, se ha extendido la siembra de pastos introducidos, convirtiendo la vegetación de páramo, poco a poco, en potrero.



En Colombia en las últimas décadas los páramos han sido afectados por procesos de degradación asociados principalmente a:

- Incremento de actividades ganaderas
- Avance de la frontera agrícola
- Tala de los recursos arbustivos
- Aprovechamiento descontrolado de flora y fauna silvestre
- Explotación minera
- Erosión por escorrentía
- Extinción de especies endémicas
- Contaminación con residuos sólidos y líquidos por abonos y herbicidas
- Deterioro del suelo y la pérdida de biodiversidad;
- El calentamiento global

Todo esto ha ocasionado una disminución progresiva de la regulación natural del ciclo del agua y una subsecuente alteración de la funcionalidad propia del ecosistema y la pérdida de su biodiversidad.





Se calcula que cerca de un

16%

de los páramos colombianos se encuentran en algún grado de deterioro.

Los complejos de páramos de la cordillera oriental son los más afectados.



“ La actividad humana, en particular la agrícola y ganadera, ha tenido fuertes impactos sobre los páramos del país. ”

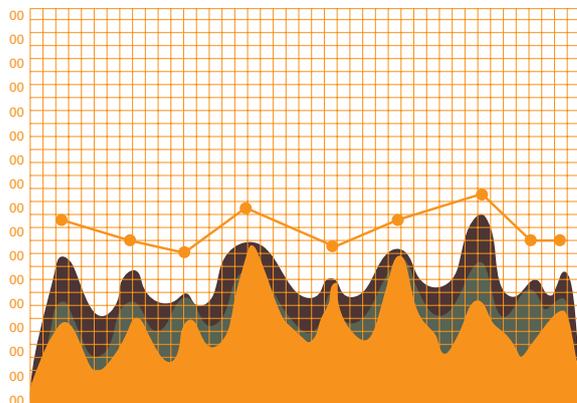
Resultados & conclusiones

Ya vimos que el suelo juega un rol clave en el ciclo del carbono; es el reservorio terrestre más grande que interactúa con el carbono de la atmósfera.

Para comprender la capacidad de los suelos de los páramos colombianos para almacenar el carbono, **esta investigación delimitó el área de estudio como se muestra en el mapa 1.**

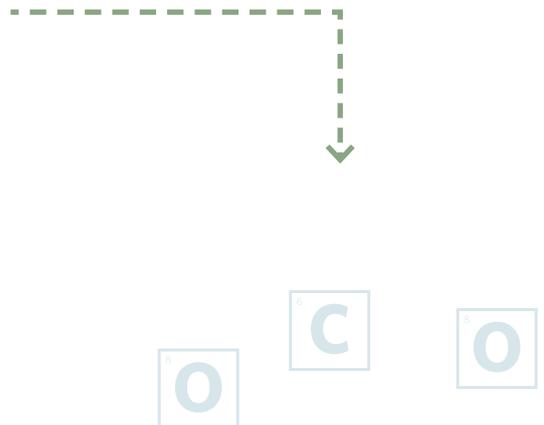


Luego, siguió una serie de pasos que fueron abordados en tres fases:

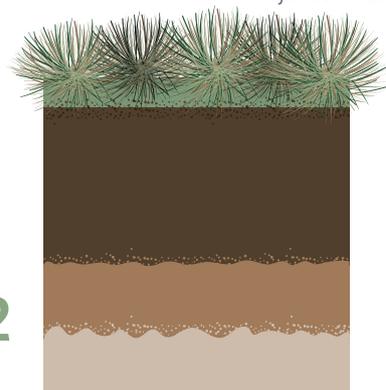


Fase 1

Crear un modelo estadístico para **estimar contenido de Carbono orgánico en suelo.**



- Frailejones XYZ



Fase 2

Estimar contenidos de Carbono en biomasa aérea.



Fase 3

Proyectar contenidos de carbono a futuro.





Fase 1

El potencial del páramo para almacenar carbono orgánico en el suelo



Para saber cuál es el potencial del páramo para almacenar carbono orgánico en el suelo (COS) fue necesario crear un modelo que nos permita predecir cómo se altera la cantidad de carbono almacenado a partir del cambio de otros factores ambientales como el clima y características del entorno (pendiente, temperatura, precipitación, topografía, cobertura de la tierra).

Este proceso contó con tres etapas:

- 1** Recopilar, revisar y analizar datos de campo sobre el contenido de carbono en el suelo, provenientes de 18 páramos.”
- 2** Analizar las correlaciones entre la cantidad de carbono orgánico en el suelo entre 0 y 40 cm, y otros datos como la pendiente, temperatura, precipitación, topografía, cobertura de la tierra entre otros.
- 3** Generar un mapa con los resultados finales de contenido de carbono en todos los páramos de Colombia en 2022.



Etapa 1:

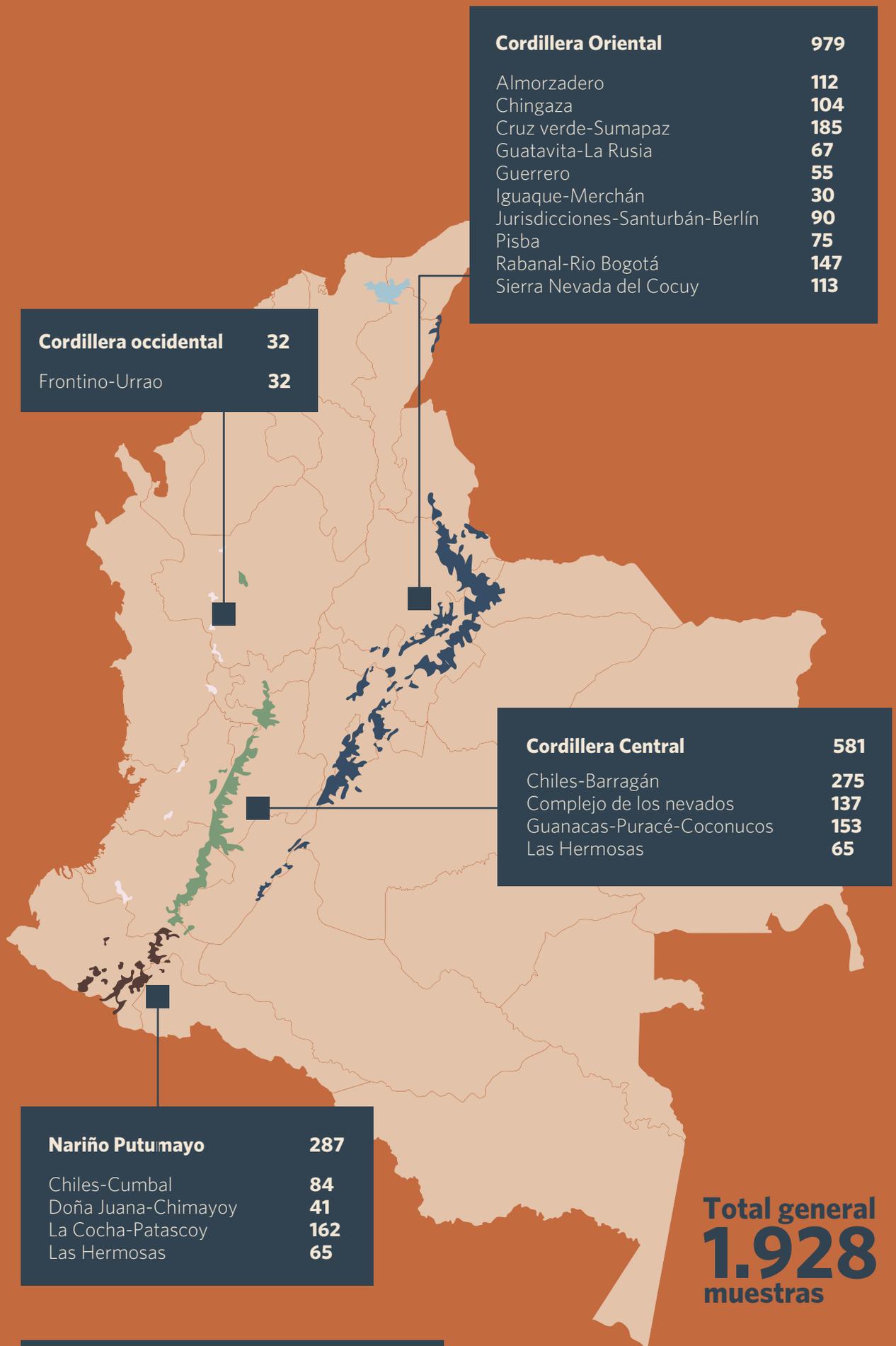
¿Dónde se recogieron las muestras?

Los ecosistemas de páramo del país presentan diferentes condiciones climáticas, topográficas, de vegetación y de usos del suelo, producto de las diferencias en su ubicación y elevación en nuestras montañas.

Por esto, fue necesario tomar y procesar datos de muchos lugares diferentes a lo largo de estos páramos.

Se usaron 1.928 muestras de suelo de 18 áreas de páramos diferentes tomadas entre los 0 y 40 cm de profundidad.

Estas muestras fueron recopiladas por diferentes entidades e instituciones a través de varios proyectos y en diferentes páramos del país.



Mapa 2. Localización de las muestras recolectadas.

Etapa 2:

¿Cuáles fueron las variables más determinantes en el contenido de COS?

Se evaluó cómo diferentes características del relieve y del clima explican las diferencias de contenidos de COS en diferentes zonas de los páramos. A esas características las llamamos “covariables” y se describen en la siguiente tabla:



Pendiente

Representa la inclinación del terreno en el relieve.



Precipitación

La precipitación media anual (mm/año)



Cobertura de la tierra

Representa las clasificaciones de la cobertura de la tierra. Utiliza los resultados de la investigación “Proyecciones de cobertura de la tierra para los páramos hacia los años 2025, 2030 y a 2050, a través de un modelo espacialmente explícito” (2022).

Coberturas como actividades ganaderas, actividades agropecuarias, coberturas naturales como bosques, arbustales, turberas, actividades forestales, y otras actividades antrópicas, entre otros.

Índice de posición topográfica (TPI)

Describe los aspectos morfológicos del terreno a través del cálculo y sectorización de las pendientes. El TPI compara la elevación de cada celda de los Modelos Digitales de Elevación (DEM) con la elevación media del vecindario de la celda. Los valores positivos del TPI representan ubicaciones más elevadas que el promedio de sus alrededores (crestas). Por el contrario, Los valores negativos representan ubicaciones más bajas que sus alrededores (valles). Los valores cercanos a cero representan áreas planas o de pendiente constante [25].



Temperatura

Representa la temperatura media anual en °C





Etapa 3:

¿Cómo se ve el modelo de COS en los páramos de Colombia?

A partir de los resultados de la etapa anterior, para las áreas de páramos donde se habían tomado datos en campo, se usó el modelo de regresión denominado Random Forest. Este organiza los datos de carbono basándose en las covariables que explican el COS (pendiente, temperatura precipitación, topografía, cobertura de la tierra) en el páramo. Y así le asigna valores de COS a todas las áreas de páramo del país, más allá de las muestreadas en los 18 páramos.

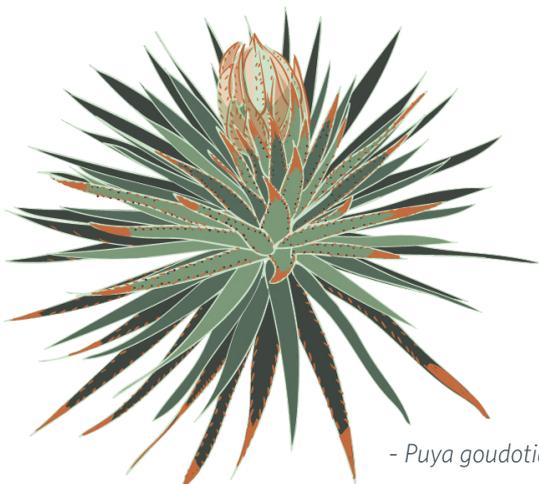
Se evaluaron varios métodos de modelación (ej. regresiones, redes neuronales, etc.), para encontrar el que mejor se ajustara a la naturaleza del conjunto de datos.

Se determinó que **el método más apropiado para construir el modelo de COS en los páramos de Colombia era el denominado método Random forest**, lo que coincidió con la revisión previa que se hizo en la literatura.

Los modelos utilizan fórmulas matemáticas para expresar la relación entre diferentes variables y son frecuentemente utilizados para entender y describir fenómenos naturales. Son muy útiles para predecir valores sin la necesidad de medirlos directamente, sino usando variables relacionadas.

Por esta razón es necesario conocer la naturaleza de los datos y la influencia que tienen las variables para predecir un valor o clasificación. Esto se realiza a través de distintas pruebas estadísticas.

¿Qué es el método Random forest para construir el modelo de COS?



- *Puya goudotiana*

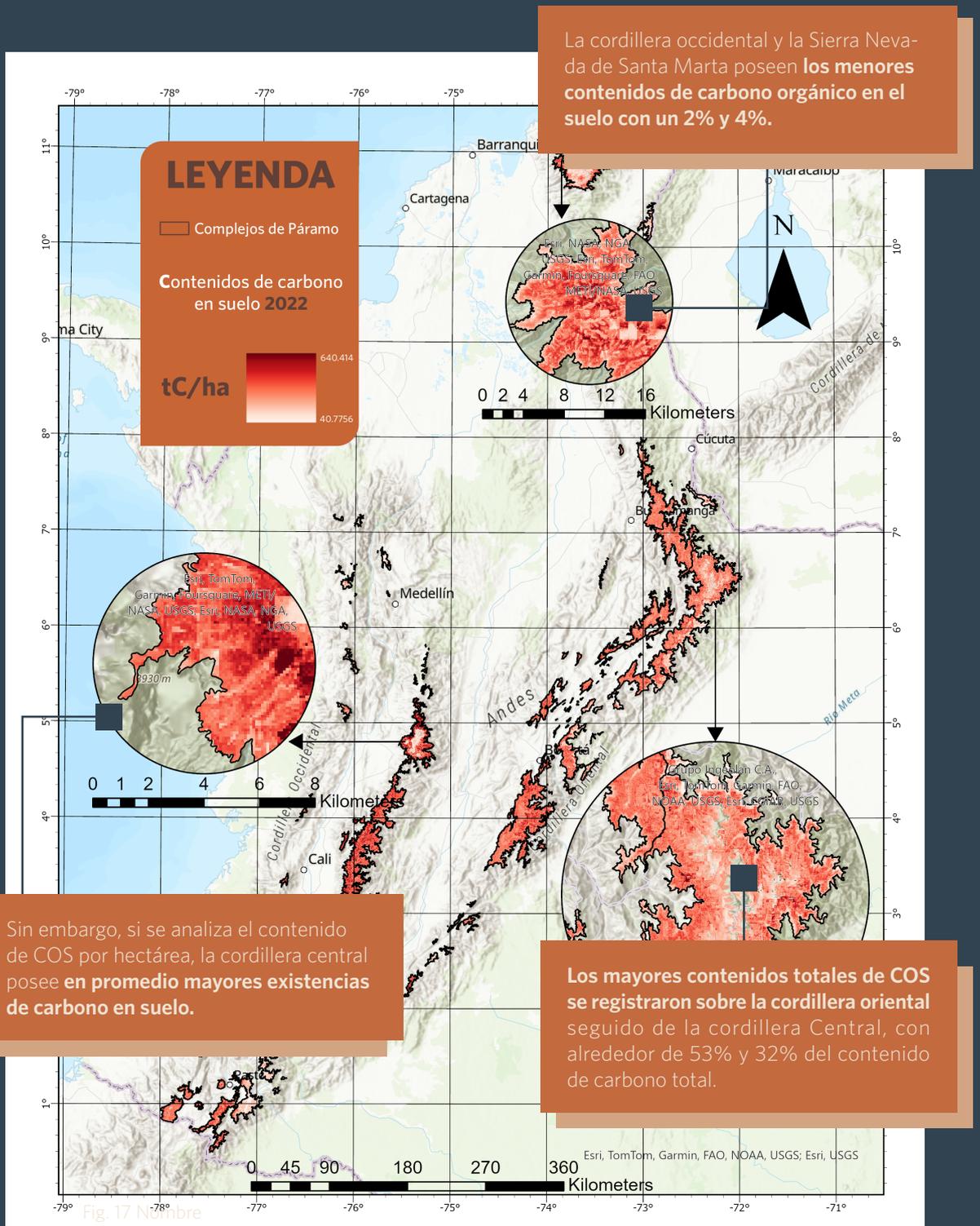
Un ecosistema ubicado en montañas **inter-tropicales**, que por lo general se encuentra entre los **2900-4000 msnm**, entre el límite superior del bosque andino y el inferior de las nieves perpetuas. Comprenden una gran variabilidad climática, topográfica y de vegetación, producto de los gradientes de elevación, procesos orográficos y de cambio en el uso del suelo.

Por lo general, comprenden sistemas fríos y húmedos, con alta radiación y nubosidad. No obstante, las condiciones climáticas de los páramos son muy variadas.

Los países que los incluyen en Latinoamérica son Ecuador, Venezuela, Costa Rica y Perú.

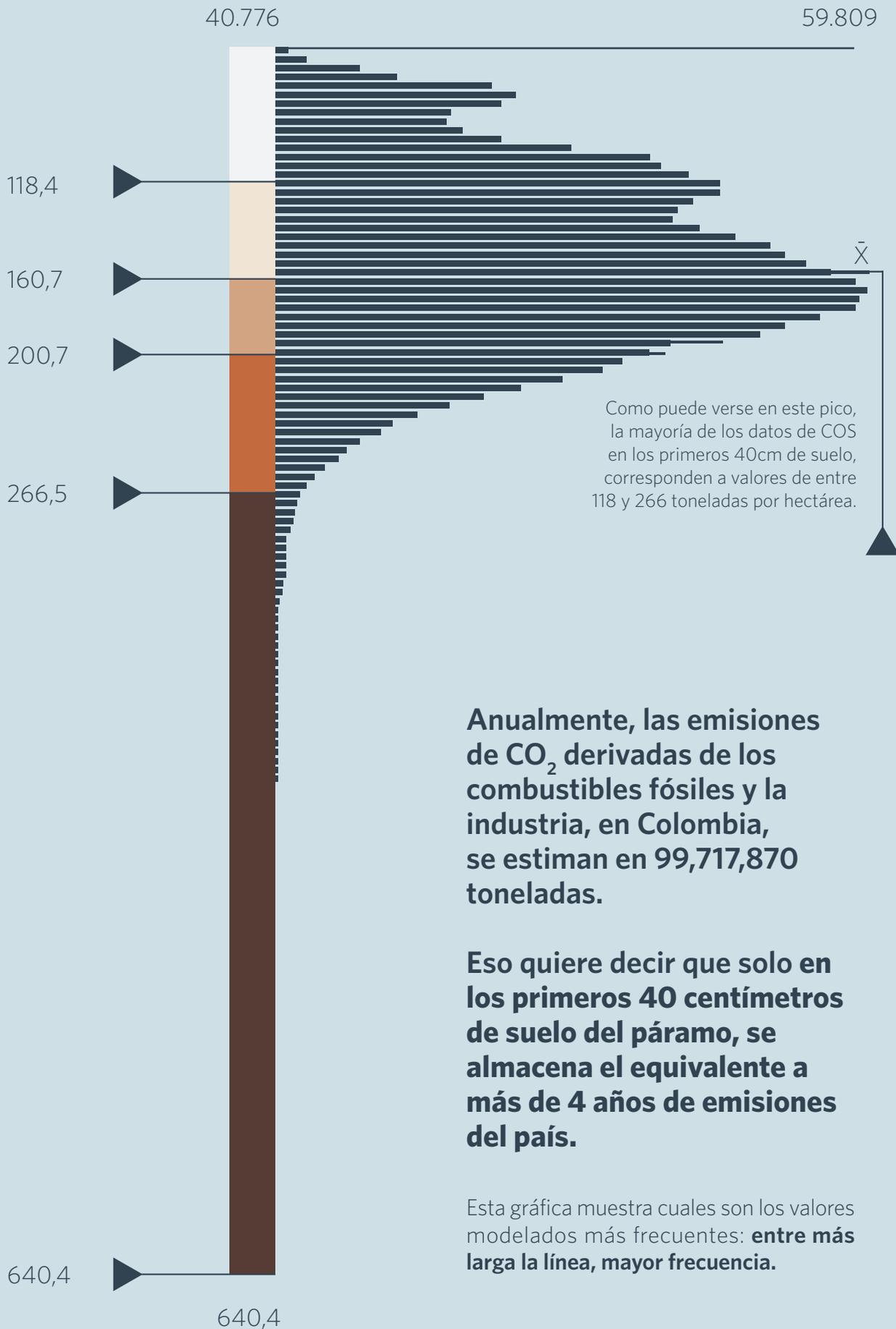
Una vez se construyó el modelo, se creó un mapa que permite visualizar el contenido de carbono en los primeros 40 cm del suelo para el 2022.

Se estimó que en los primeros 40 cm de suelo de las 2.777,606 hectáreas de Páramo de Colombia, hay contenidas 446.879.542 toneladas de carbono.



Mapa 3. contenidos de carbono en suelos 2022

Cada píxel tiene una resolución de 100 metros. Entre más oscuro el píxel, mayor contenido de CO₂.



Anualmente, las emisiones de CO₂ derivadas de los combustibles fósiles y la industria, en Colombia, se estiman en 99,717,870 toneladas.

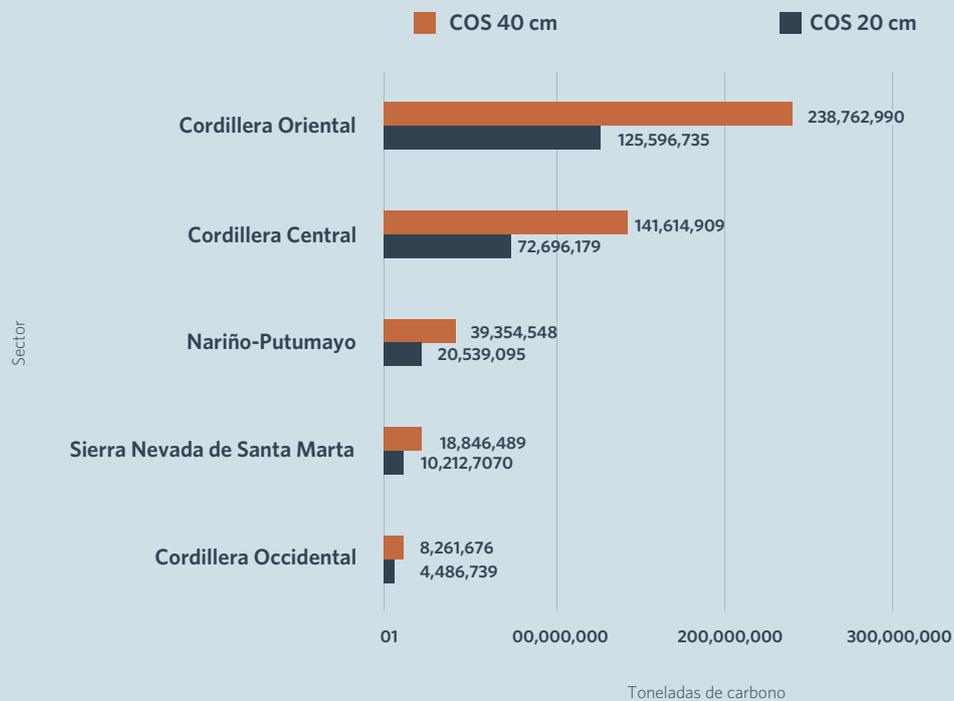
Eso quiere decir que solo en los primeros 40 centímetros de suelo del páramo, se almacena el equivalente a más de 4 años de emisiones del país.

Esta gráfica muestra cuales son los valores modelados más frecuentes: **entre más larga la línea, mayor frecuencia.**

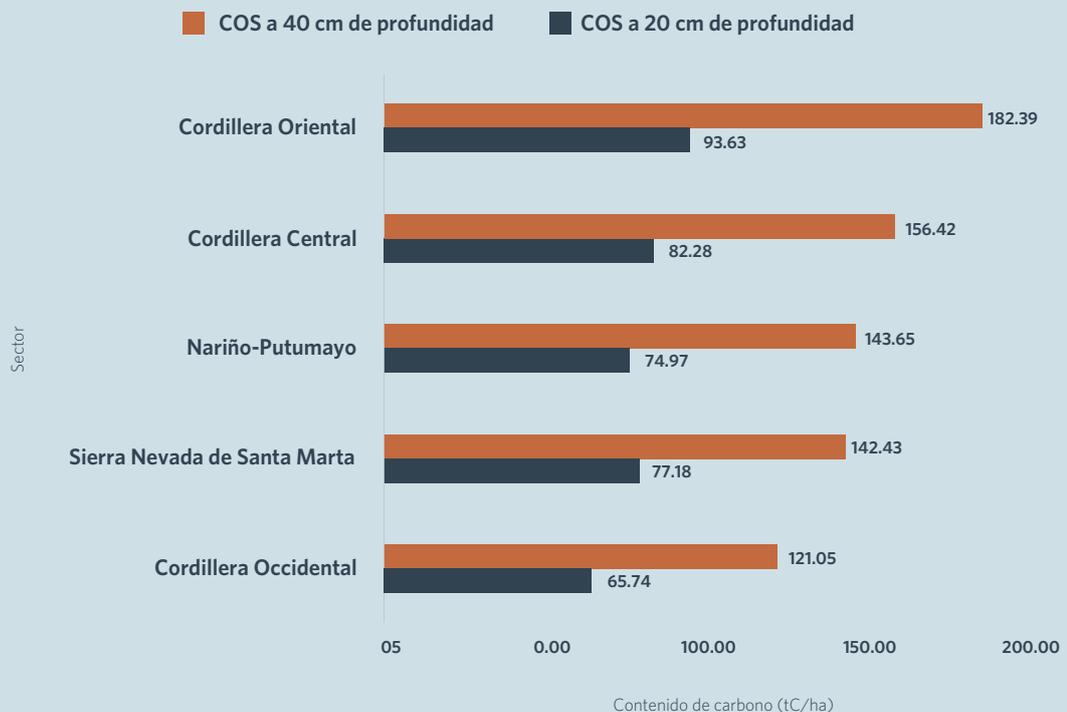
Gráfica 4. Histograma predicción contenido COS

En cuanto a complejos de páramo específicos, el de Cruz Verde-Sumapaz y el de la Sierra Nevada del Cocuy, **muestran los mayores contenidos totales de COS**, con un 12% y 8% de COS.

Los mayores contenidos de COS por hectárea se encontraron en el páramo de las Hermosas (198 tC/ha) seguido de los Nevados (197tC/ha).



Gráfica 5. Toneladas de carbono totales registradas dentro de los sectores de las cordilleras Andes y SNST



Gráfica 6. Contenidos de carbono ya registradas dentro de los sectores de las cordilleras Andes y SNSM



Fase 2

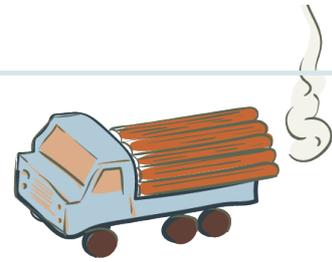
¿Cuánto carbono hay en la biomasa aérea?

Para saber cuánto carbono orgánico hay en la biomasa aérea – o sea los árboles y plantas (tronco, ramas, corteza, hojas, etc.) – que está sobre el suelo, se usó la información recopilada en campo para determinar un valor promedio de carbono para diez coberturas de la tierra:



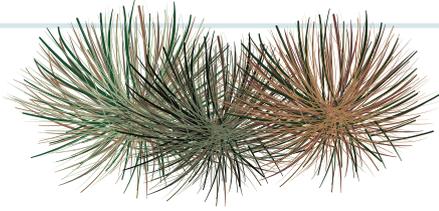
Bosques

*t C/ha 95,90



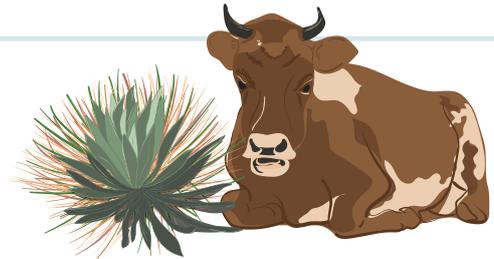
Actividades forestales

*t.C/ha 27,90



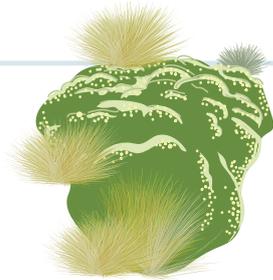
Arbustales

*t.C/ha 9,50



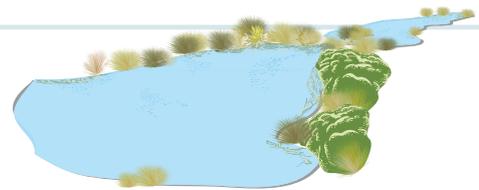
Mixtas en espacios naturales

*t.C/ha 4,40



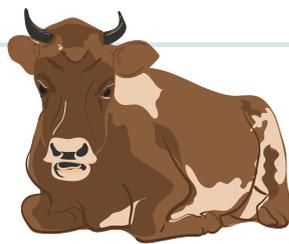
Herbazales

*t.C/ha 2,54



Turberas y otras zonas pantanosas

*t.C/ha 2,54



Actividades ganaderas

*t.C/ha 0,88



Actividades agropecuarias

*t.C/ha 0,09

Otras zonas naturales

*t.C/ha 0,00

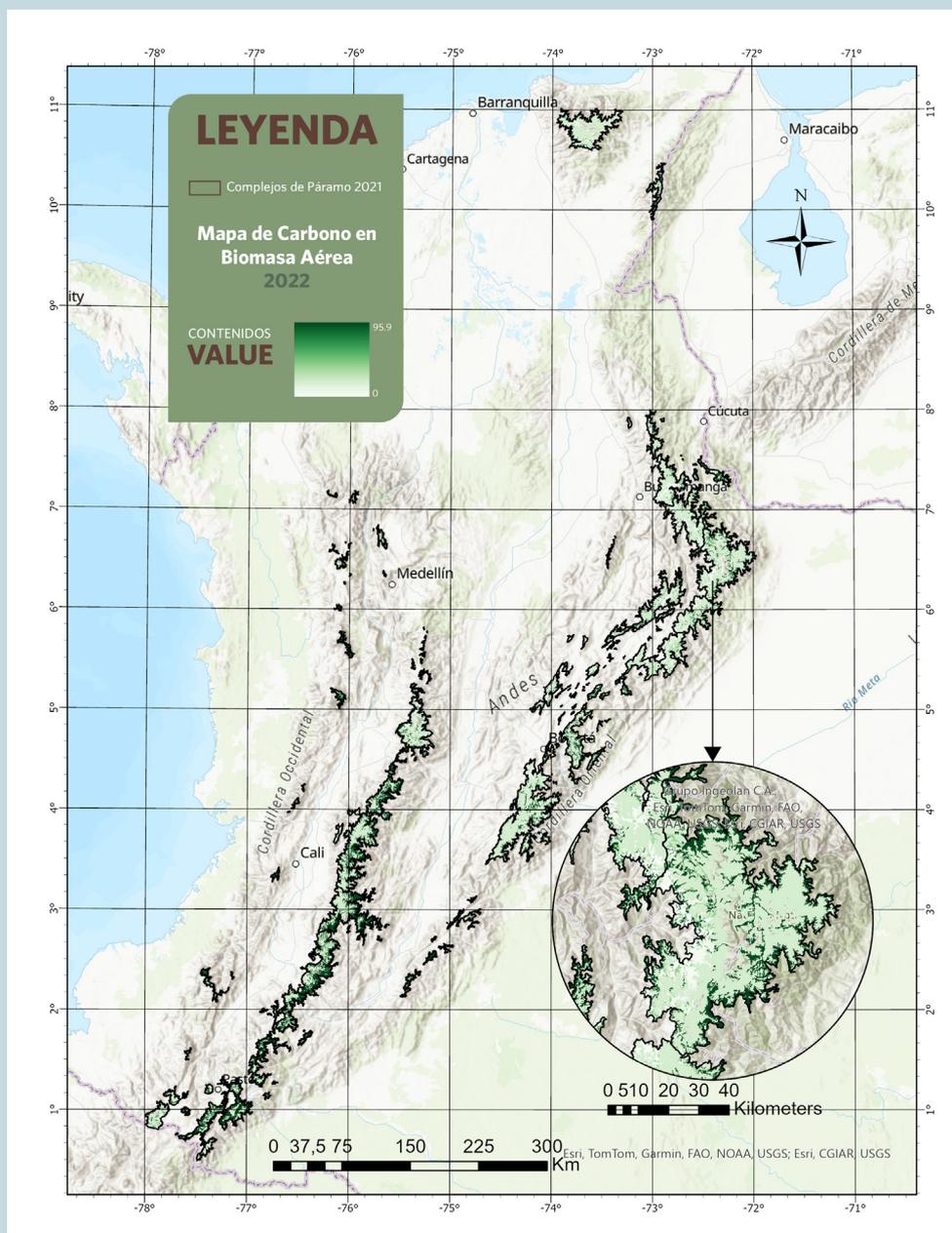
Otras actividades antrópicas

*t.C/ha 0,00

*Contenido de Carbono en promedio de toneladas por hectárea.

Esto permite asignar el número de toneladas de carbono por hectárea (tC/ha) contenido en la biomasa para cada cobertura, no solamente en los lugares muestreados sino para todos los páramos del país. Así se creó un mapa que permite **visualizar el contenido de carbono en la biomasa aérea de los páramos para el 2022**.

El mapa de contenido de carbono en biomasa aérea para los páramos de Colombia resultante es este:



Mapa 4. Carbono biomasa aérea 2020

Los contenidos de carbono en la biomasa aérea de páramo registraron en promedio 39 tC/ha y un total de 70.582.198 tC en las 2.853.733 ha de complejos de páramos.

Complejo de páramos



Es llamativo que tanto en contenido de carbono en biomasa aérea total, como en el contenido por hectárea, los complejos de páramo del altiplano cundiboyacense son los que tienen valores más bajos.

Este fenómeno puede estar relacionado con que son los complejos más intervenidos por actividad humana en el país, lo que suele implicar el reemplazo de coberturas naturales por pastos o cultivos.

Carbono 2022

Gráfica 7. Contenidos de Carbono sobre la biomasa aérea totales (tC) para el 2022 por complejo de páramo.

Elaboración propia.

¿Y si sumamos el carbono de la biomasa aérea con el del suelo?

13.6%

Contenido total biomasa aérea:
70.582.198 tC*

86.4%

Contenido total COS:
446.879.542 tC*

Contenido total
COS +
Biomasa aérea
= 517'461.740 tC*
en todos los páramos de
Colombia*

Aunque con frecuencia nos imaginamos los almacenes de carbono como exuberantes selvas y bosques, este resultado resalta la importancia del suelo en las reservas de carbono y en particular en los páramos.

Los páramos de Cruz Verde - Sumapaz, Las Hermosas y la Sierra Nevada del Cocuy registraron las mayores existencias de carbono totales, lo que no es sorprendente dado que eran también los mayores almacenes en suelo y, como vimos, la biomasa aérea contribuye apenas un 13.6% del total.

Tanto en contenido total de carbono como en carbono por hectárea, las coberturas naturales superaron a las antropizadas.

A close-up photograph of a hummingbird perched on a mossy branch. The bird has iridescent green feathers on its head and neck, and a dark, almost black body. Its long, slender beak is curved upwards. The background is a soft, out-of-focus green, suggesting a forest or garden setting.

Colibrí aterciopelado
(*Lafresnaya lafresnayi*)

Fase 3

Escenarios futuros de contenido de carbono en los páramos de Colombia

*Pato paramuno
(Anas andium)*



Para poder anticipar los posibles cambios en el uso del suelo en los páramos del país, resulta esencial comprender cómo estos cambios, en términos espaciales, estructurales y funcionales, pueden ser influenciados por diversos factores biofísicos, sociales, económicos y políticos.

La actual normativa y la dinámica propia del territorio colombiano acentúan estos efectos. La preocupación por la pérdida de ecosistemas y la consiguiente afectación de los servicios ecosistémicos y de las comunidades humanas resalta la necesidad de modelar estas variaciones.

Así, se podrá entender mejor las tendencias y los posibles cambios en este ecosistema estratégico, crucial tanto para la naturaleza como para las personas.

A partir de los mapas de COS y de biomasa aérea resultantes de las Fases I y II, era necesario proyectar cómo cambiarían esos contenidos de carbono a futuro en los páramos bajo diferentes escenarios.

Entonces, se proyectaron los cambios en el COS hasta 2050 a partir del comportamiento a futuro del clima (temperatura y precipitación) y los cambios esperados en las coberturas de la tierra.

Mientras que los contenidos de carbono en la biomasa aérea se proyectaron únicamente a partir de los cambios esperados en las coberturas de la tierra.





Etapas 1:

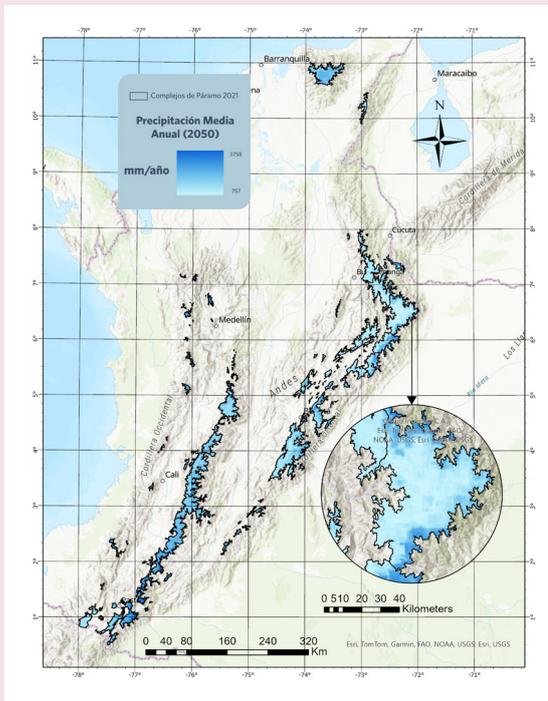
El carbono en el suelo y la biomasa en escenario Business As Usual (BAU)

El primer escenario que quisimos evaluar fue el escenario tendencial o Business as Usual (BAU). Este quiere predecir cómo cambiarán los niveles del contenido de carbono en el suelo y en la biomasa aérea en los páramos en el futuro, si los cambios de coberturas de la tierra y la temperatura y la precipitación se siguieran comportando con las tendencias que lo han hecho históricamente.

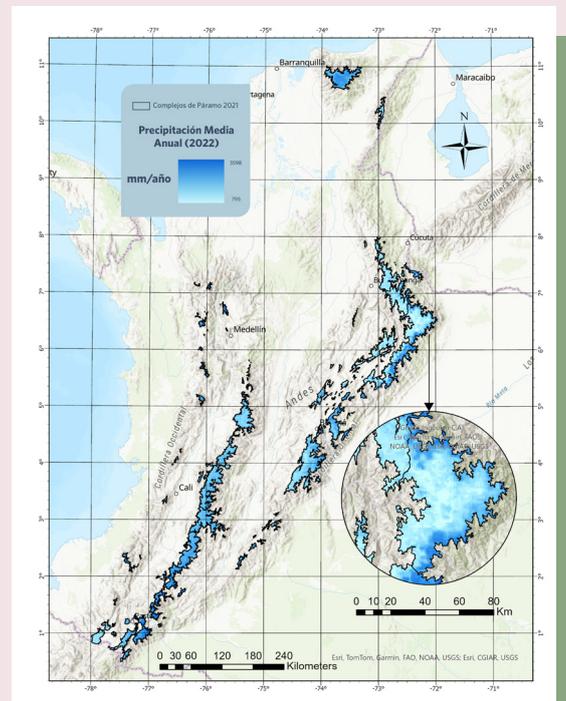
Para esto se proyectó cómo cambiaría la cobertura de la tierra para los páramos entre el 2019 y el 2050.

¿Cómo serán los páramos en 2050?

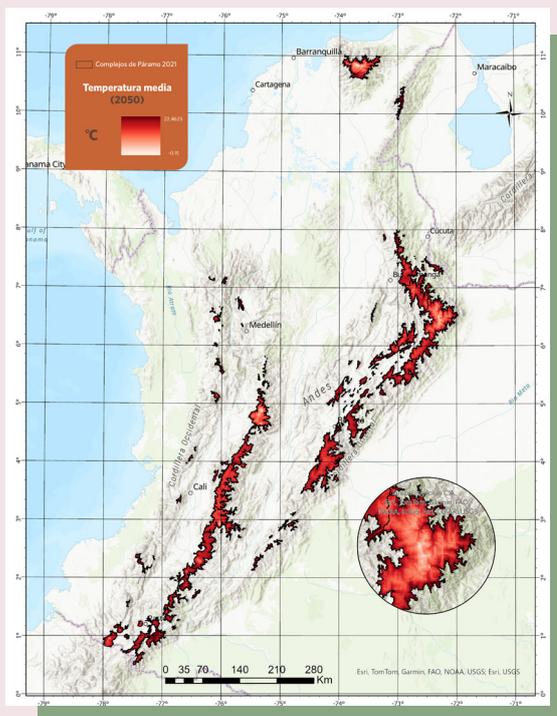
Se predice que para la región de los complejos de páramos en Colombia, la precipitación máxima **aumente de 3.626 mm/año a 3.758 mm/año** (Mapa 5 A y B). También se espera que la temperatura promedio **suba de 20,2 °C a 22.4 °C** (Mapa 5 C y D).



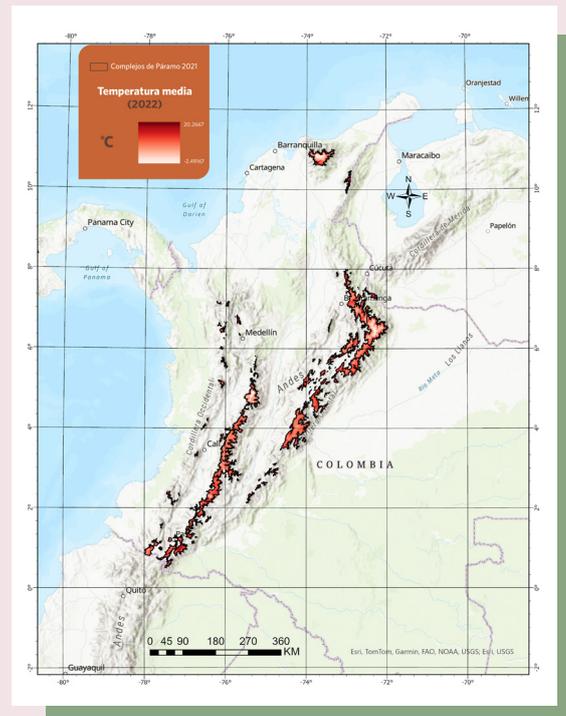
Mapa 5A. Mapa de precipitación 2050



Mapa 5B. Mapa precipitación actual



Mapa 5C. Mapa de temperatura 2050



Mapa 5D. Mapa de temperatura actual

Por otra parte, con respecto al escenario futuro de las coberturas de la tierra para el año 2050, se supone una disminución en las coberturas naturales de 112.947 ha y de coberturas mixtas en espacios naturales de 42.115 ha.

A su vez, se prevé un aumento en las actividades ganaderas con cerca de 117.750 ha y actividades agropecuarias con 37.312 ha.

Las otras 2 clases de coberturas permanecerían estables.

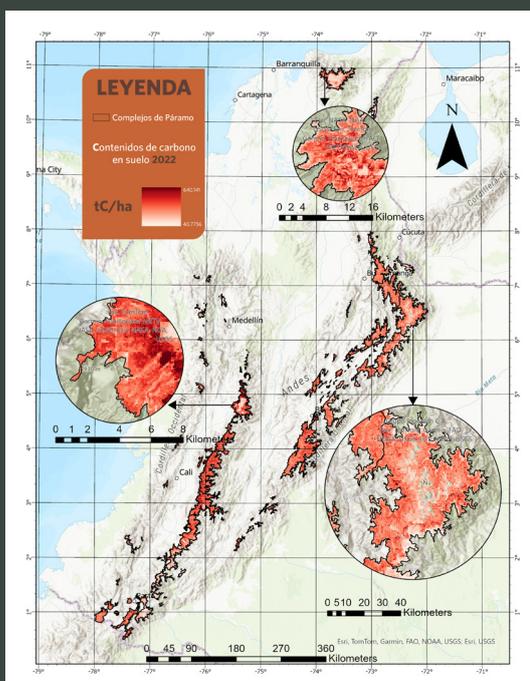
	2018	2050
 Coberturas naturales	2.385.299ha	2.272.352ha
 Mixtas en espacios naturales	194.715ha	152.600ha
 Actividades forestales	3.981ha	3.981ha
 Actividades agropecuarias	127.885ha	165.197ha
 Actividades ganaderas	140.008ha	257.758ha
 Otras actividades antrópicas	1.845ha	1.845ha
Total	2.853.733ha	2.853.733ha

Área en hectáreas y porcentaje de cobertura para el año 2018 y la proyección a 2022. Adaptada del tercer informe "Proyecciones de cobertura de la tierra para los páramos hacia los años 2025, 2030 y a 2050, a través de un modelo espacialmente explícito" (2022).

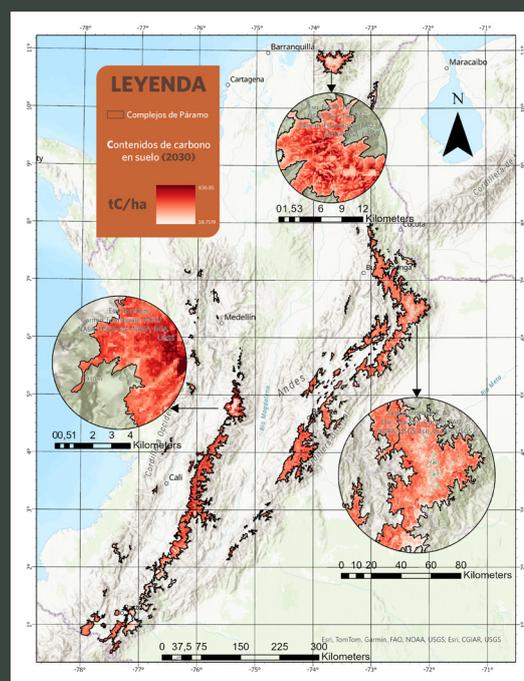
¿Cómo se ve el modelo de COS en los páramos de Colombia en un escenario futuro Business as usual (BAU)?

La proyección de los contenidos de carbono en los primeros 40 cm de suelo presenta un promedio de 146 tC/ha y un total de 459.890.644 tC. Esto refleja un incremento de 13.011.119 tC en las reservas de COS de los páramos en Colombia con respecto al 2020, considerando los escenarios de cambio climático y de cambios de coberturas proyectados.

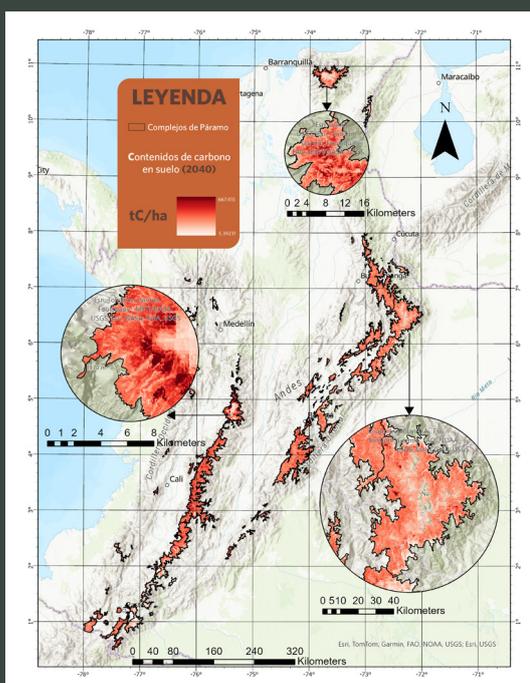
Cabe mencionar que aunque el promedio muestra un incremento, hubo una reducción en los valores máximos de COS.



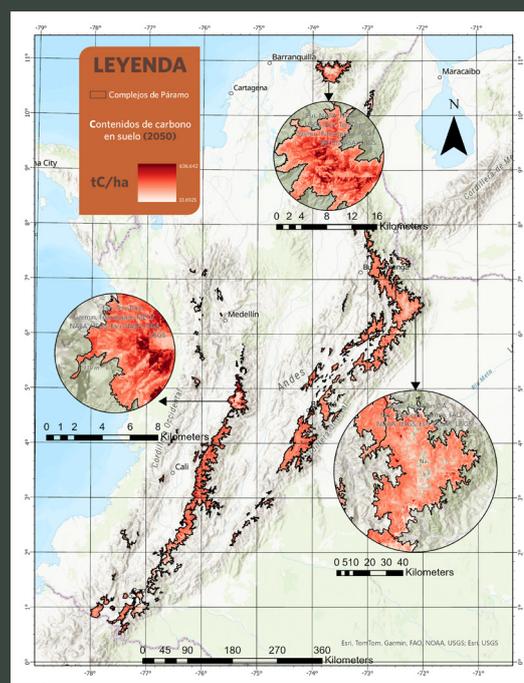
Mapa 6A. 2022



Mapa 6B. 2030



Mapa 6C. 2040



Mapa 6D. 2050



En general, se destaca que para gran parte de los complejos de páramos **hay un cambio positivo hacia el almacenamiento de carbono en el suelo**, a excepción de algunos complejos de páramos en la cordillera Occidental y el complejo de Altiplano Cundiboyacense con -7,8%.

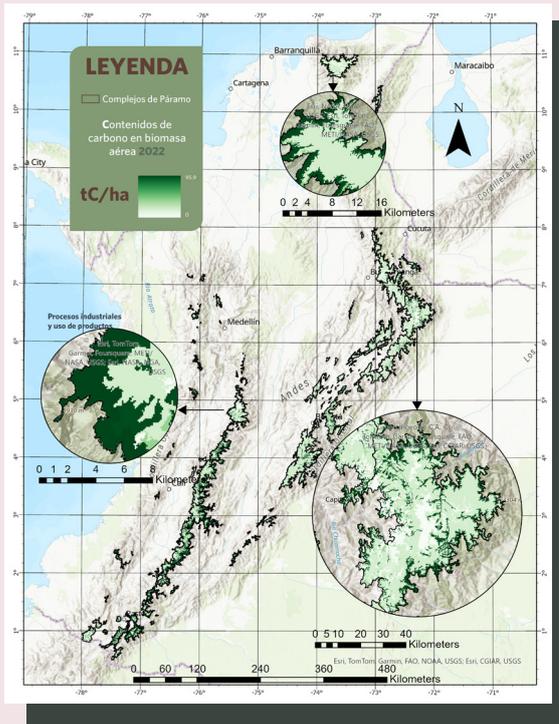
La mayor ganancia se espera que se presente en los complejos de Sierra Nevada de Santa Marta (24,6%); Tamá (22,7%), Chingaza (9,2%); Páramo de Pisba (8,1%); Miraflores (8%); Guanacas-Puracé-Coconucos (7,6%); Sotará (7,3%).

¿Cómo se ve el modelo de carbono en biomasa aérea en los páramos de Colombia en un escenario futuro Business As Usual (BAU)?

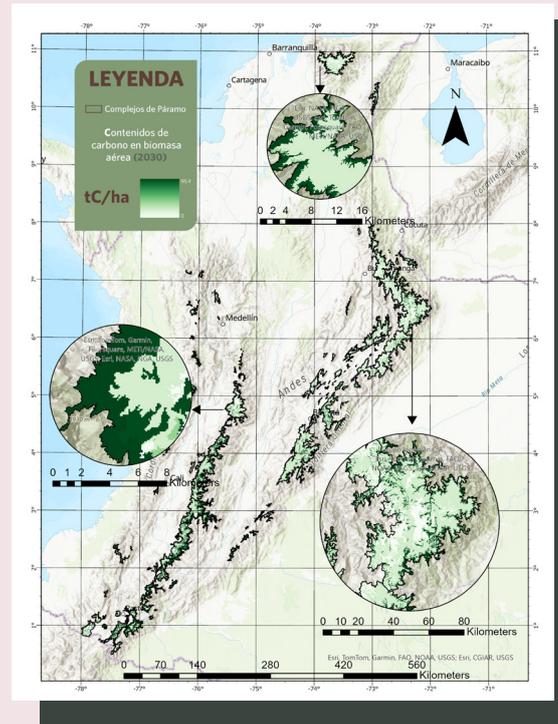
En el modelo de simulación se observa que gran parte del complejo de páramos tienden a tener una pérdida de biomasa a 2050 con respecto al 2022, basado en las proyecciones de cambios de coberturas.

Igualmente, el modelo identifica que la mayoría de los complejos del sector de la Cordillera Occidental no tienen pérdidas y para la Cordillera central se espera una mayor estabilidad en la biomasa

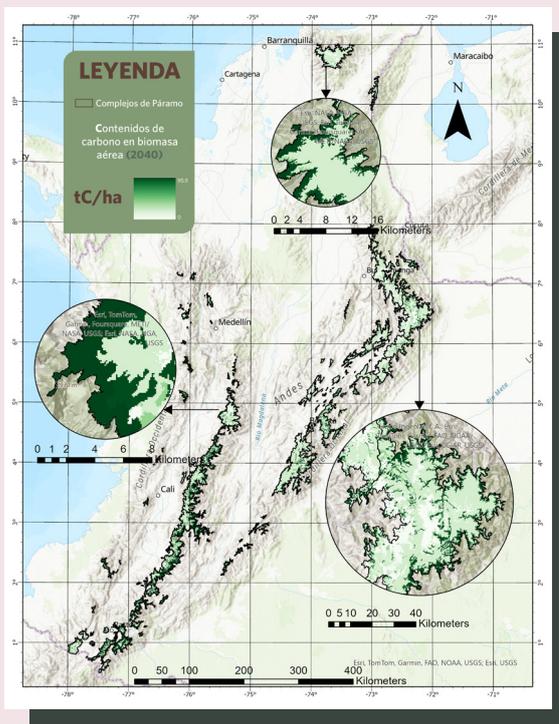
Se presentarían mayores pérdidas de carbono en la cordillera Oriental y en el distrito de Nariño-Putumayo el complejo de Chiles-Cumbal.



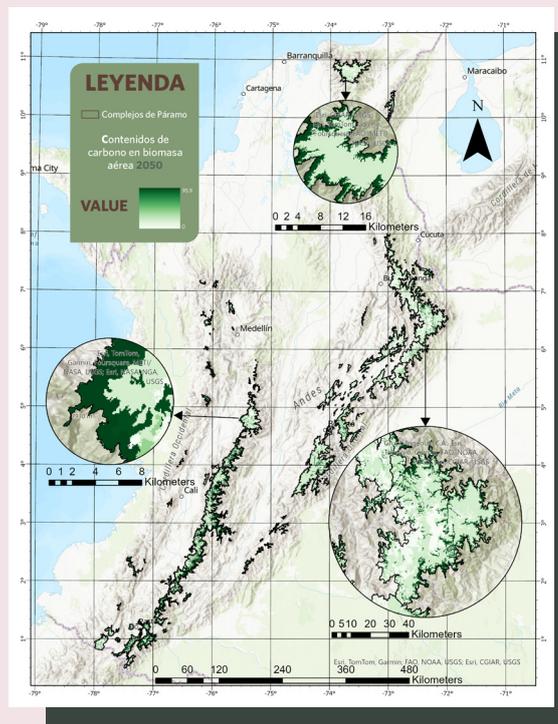
Mapa 7A. 2022



Mapa 7B. 2030



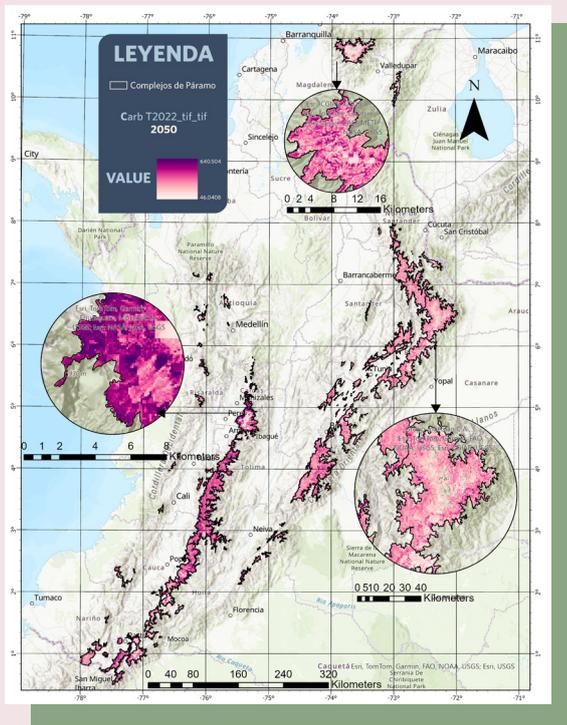
Mapa 7C. 2040



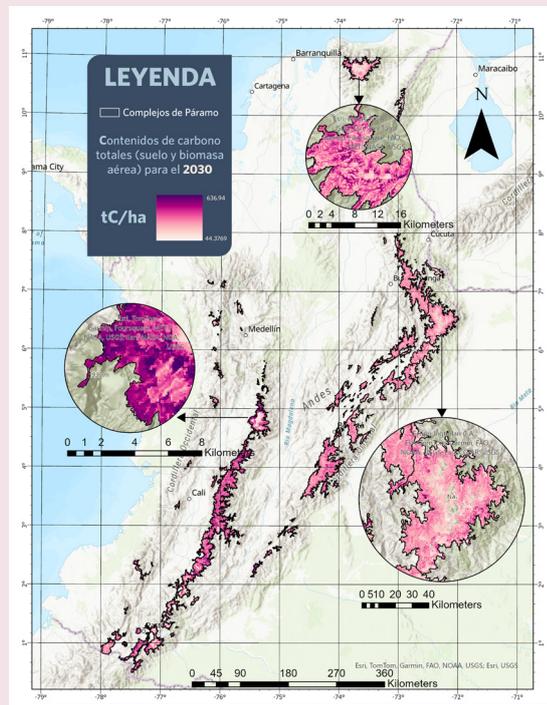
Mapa 7D. 2050

Mapa 7. Simulación contenida de carbono biomasa aerea para a) 2022; b) 2030; c) 2040 y d) 2050

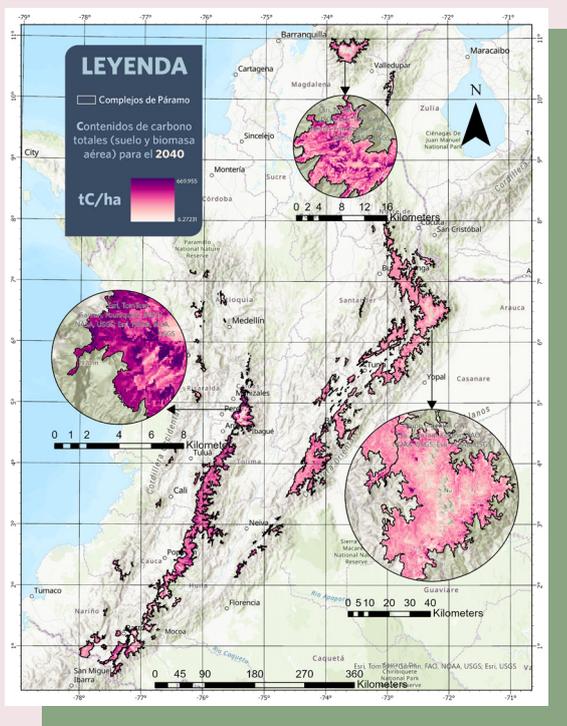
¿Y si sumamos COS y carbono en biomasa aérea, cómo cambiará el contenido de carbono en los páramos de Colombia en un escenario futuro Business as usual (BAU)?



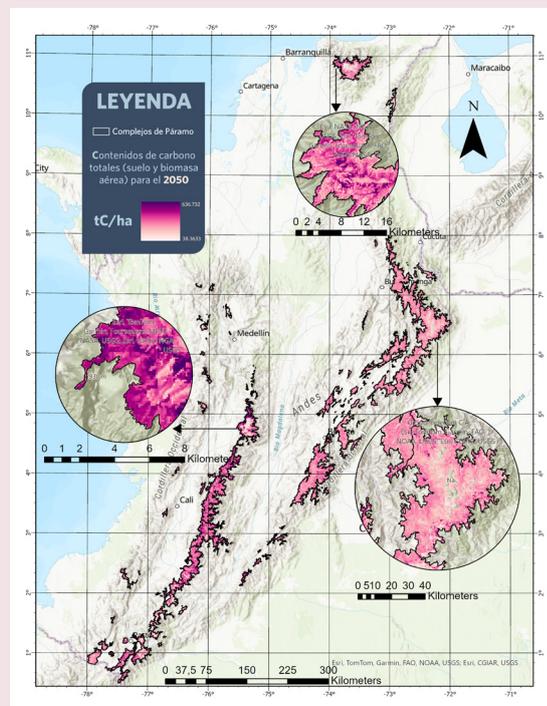
Mapa 8A. Mapa de precipitación 2050



Mapa 8B. Mapa precipitación actual



Mapa 8C. Mapa de temperatura 2050



Mapa 8D. Mapa de temperatura actual

Mapa 8. Simulación contenida de carbono total a)2022; b) 2030; c) 2040 y d)2050.

Se destaca que únicamente los siguientes* complejos de páramos muestran un escenario tendencial a **la pérdida de carbono total a 2050 con respecto al 2022.**

Sector cordillera Oriental	
Citará	-8,7%
Cerro Plateado	-8,4%
Frontino-Urrao	-7,76%
Tatamá	-7,68%
Paramillo	-2,49%
Doña Juana y Chimayoy	-0,7%
Altipano Cundiboyacense	-8,9%

Sector cordillera Central	
Belmira Santa Inés	-4,54%
Las Baldías	-0,72%
Sonson	-1,6%

Gráfica 8.

Este escenario contrasta con los demás complejos de páramos donde es de destacar **los mayores aumentos en:**

23% Sierra Nevada de Santa Marta

15,2% Tamá

7,4% Chingaza

6,9% Páramo de Pisba

5,5% Guanaca, Puracé, Coconucos

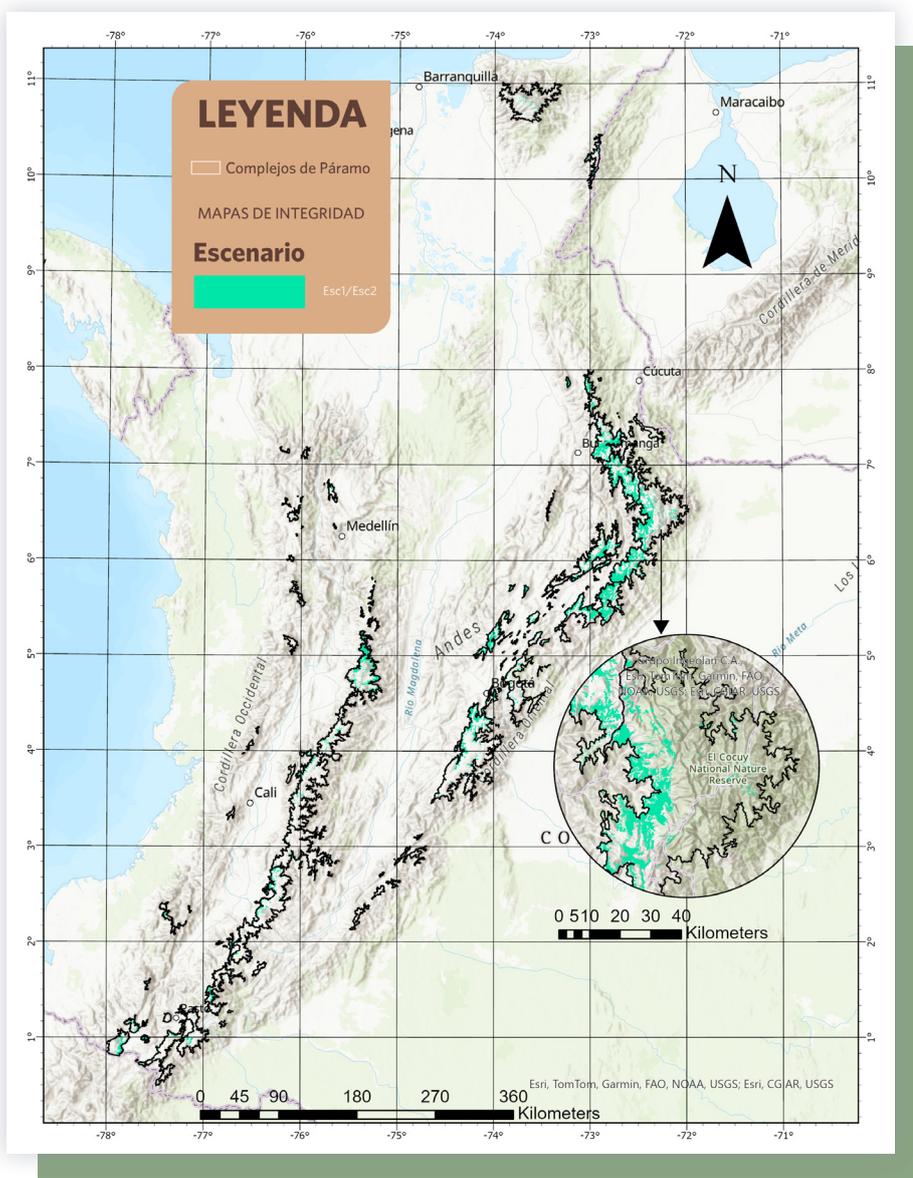
5,19% Tota, Bijagual, Mamapacha

Etapa 2:

¿Cómo se ven los modelos de carbono, bajo diferentes escenarios de restauración de los páramos?

Se construyeron dos escenarios de mitigación a partir de procesos de restauración de páramos. Esto se hizo para determinar cuál es el potencial de mitigación o de reducción de gases efecto invernadero que podría aportar el suelo por procesos de restauración.

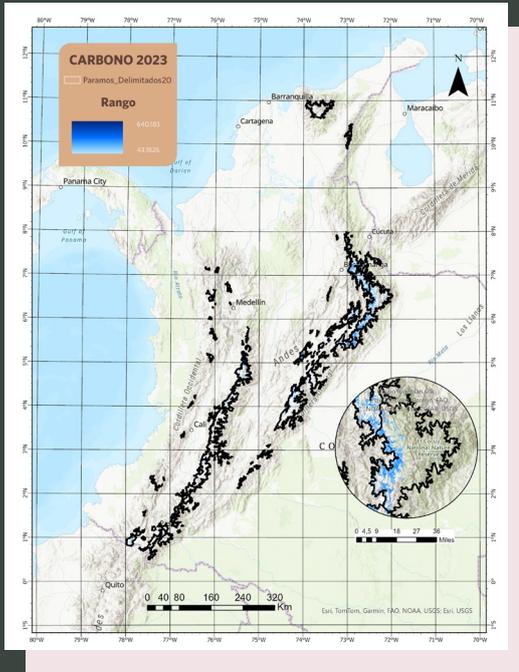
El **primer escenario** tuvo en cuenta las áreas recomendadas para la restauración según un índice de integridad acorde al Instituto Alexander Von Humboldt (IAvH, 2023). Es decir, este escenario enfocaría los esfuerzos de restauración en las zonas de los páramos con integridad ecológica baja y muy baja de acuerdo con la clasificación hecha por el Instituto Humboldt en 2023.



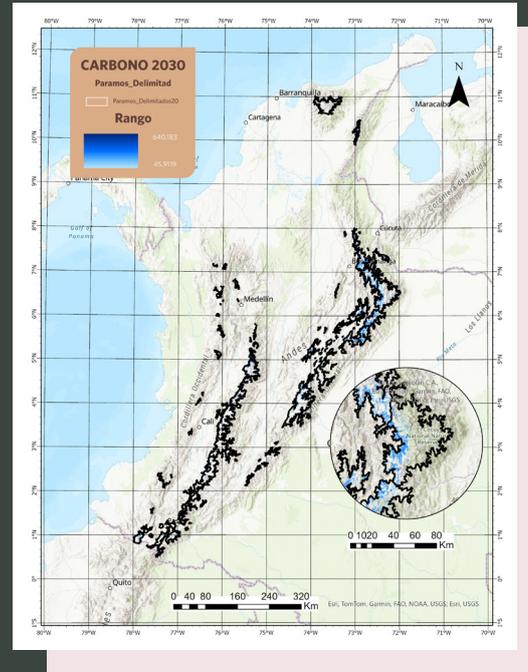
Mapa 9. Mapa de integridad distribuida por complejo de páramo (IAvH, 2023)

Para este escenario 0.416 millones tienen valores de integridad baja y muy baja, lo que significa cerca de un 15% del área total de los complejos de páramos.

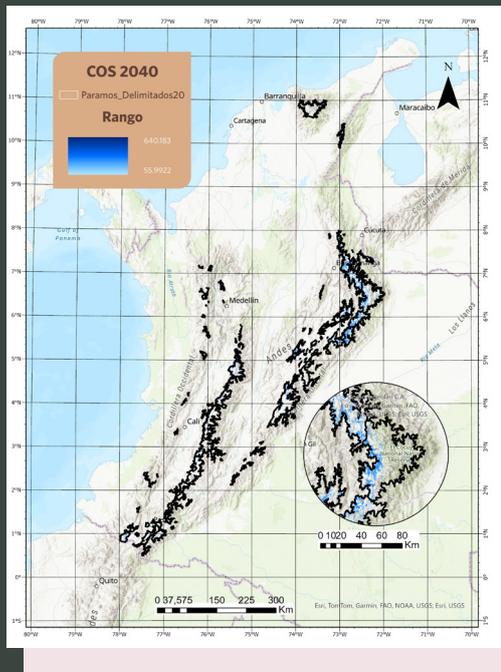
Se encontró que si se implementara restauración pasiva –Es decir permite que los ecosistemas se recuperen generalmente con aislamiento, con mínima intervención– en el 15% del área de los páramos a la misma tasa de acumulación y para el mismo periodo de tiempo, se tendría un potencial máximo de mitigación de 10.6 millones de toneladas de Carbono Mt C..



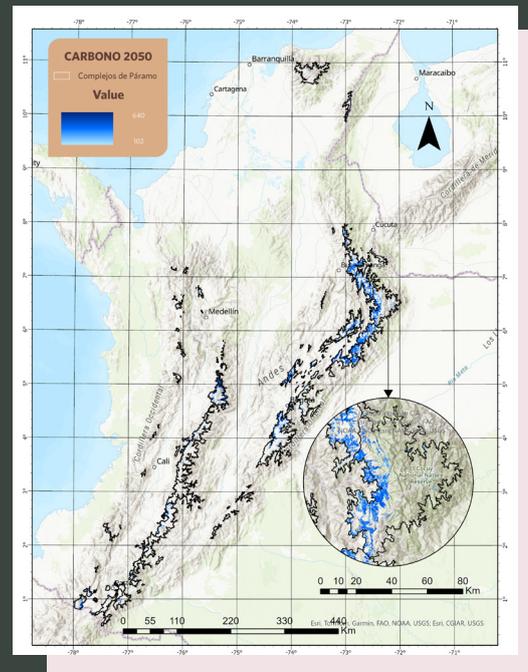
Mapa 10A. 2022



Mapa 10B. 2030



Mapa 10C. 2040

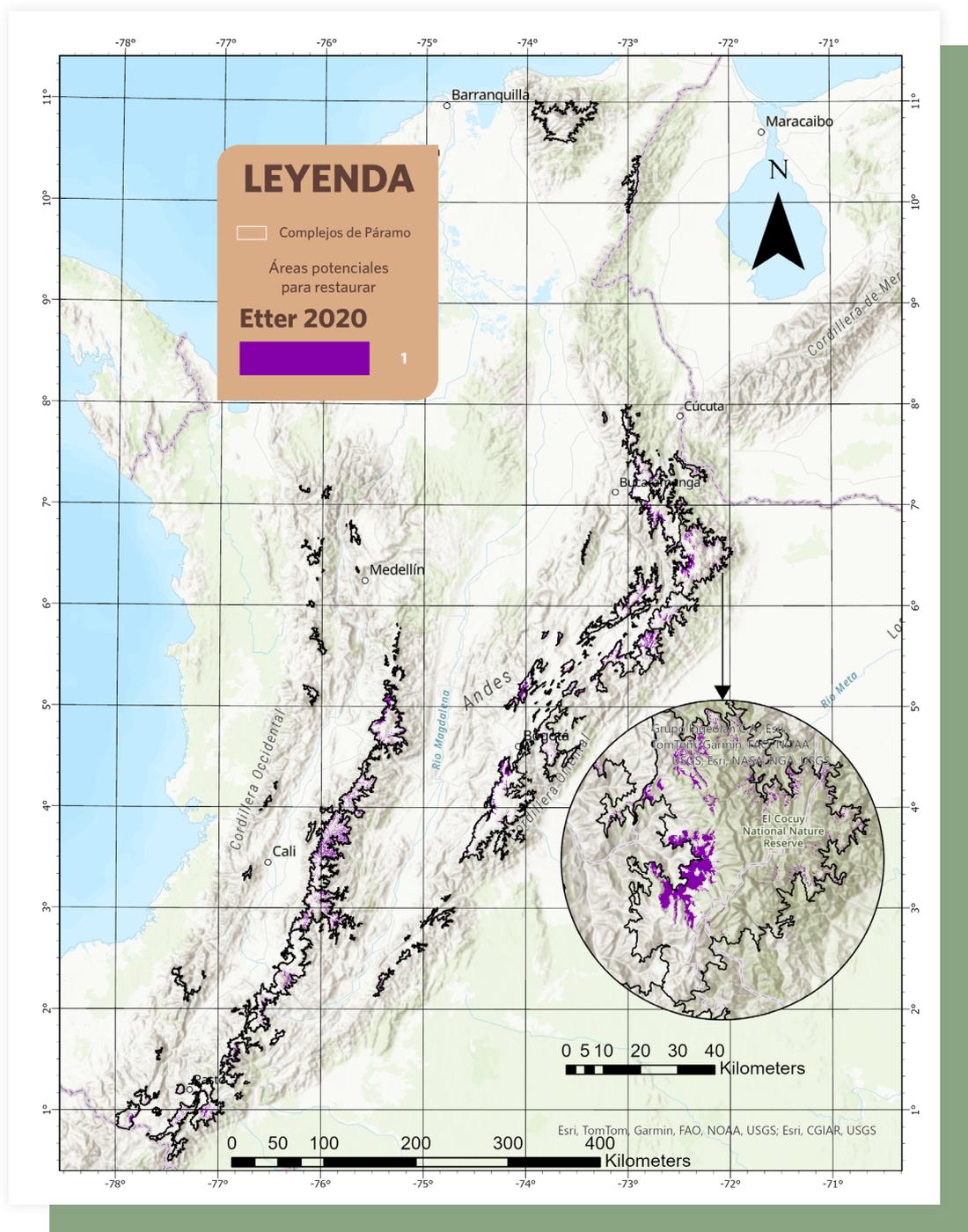


Mapa 10D. 2050

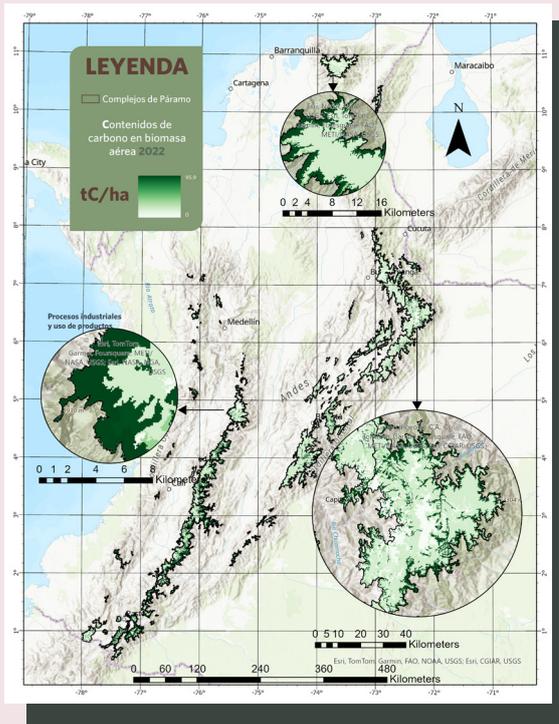
Mapa 10. Mapa de potencial de acumulación a 2023 - 2050 de carbono en el suelo para el escenario de integridad

El segundo escenario se basó en las áreas priorizadas para la restauración de áreas transformadas a partir de la lista roja de ecosistemas (Etter et al., 2020) entre el 2022 y 2050 y bajo un escenario pesimista de de cambio climático para el 2050. Es decir, este escenario enfocaría los esfuerzos de restauración en las zonas más transformadas e intervenidas y de baja productividad agrícola en los páramos de acuerdo con el estudio de Etter en 2020.

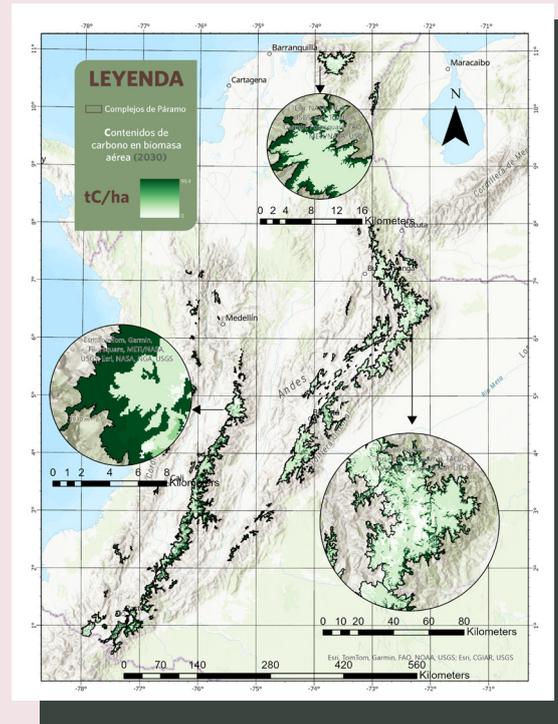
Si en este escenario se implementara restauración pasiva en el 8% del área de los páramos de Colombia a una tasa máxima de acumulación de 1.5 t C ha⁻¹ se tendría un potencial máximo de mitigación de 5.7 Mt C en 28 años, en el periodo desde 2023 hasta 2050.



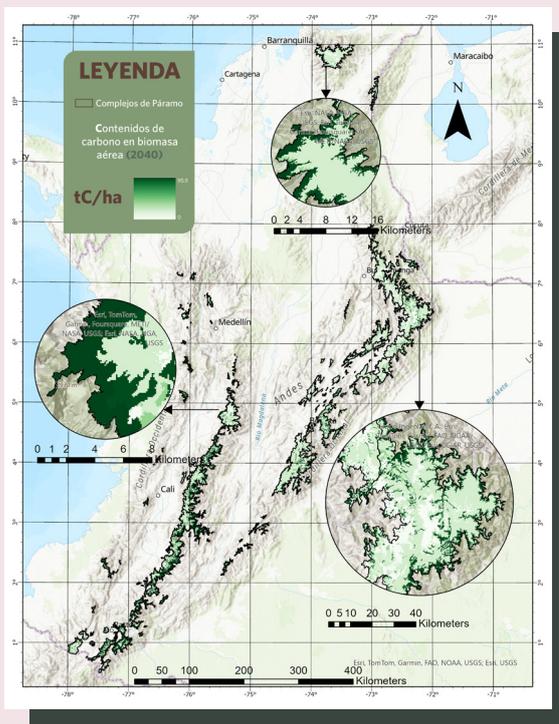
Mapa 11. Mapa de complejo de páramo escenario Etter, 2020



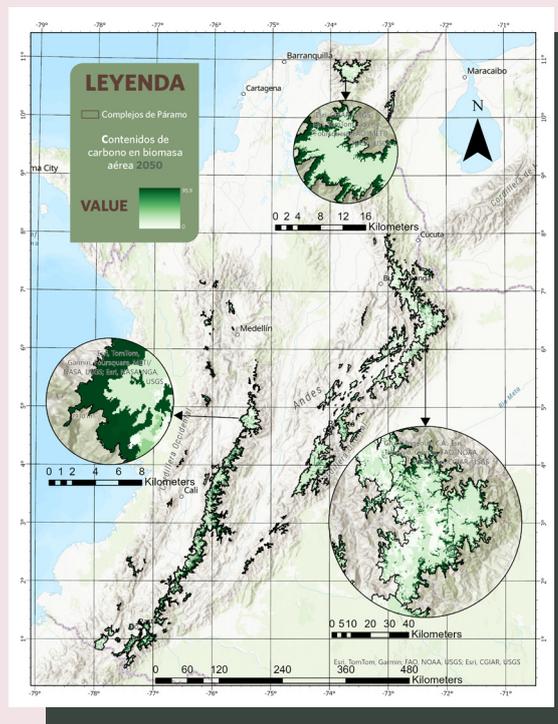
Mapa 12A. 2022



Mapa 12B. 2030



Mapa 12C. 2040



Mapa 12D. 2050

Mapa 12. Mapa de potencial de acumulación a 2023 a 2023, 2030, 2040 y 2050 de carbono en el suelo por complejo de páramo escenario Etter, 2020

No solo se trata del carbono



Macho de Chaetocercus mulsant

Los resultados detallados de todo el estudio pueden ser consultados en el siguiente enlace:

Las Soluciones Naturales para el Clima no solo ayudan a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y fortalecer la resiliencia frente al cambio climático, también traen consigo una serie de beneficios adicionales. Entre ellos está la **protección de la biodiversidad y la regulación del ciclo hidrológico**, que se traduce en la mejora de la disponibilidad de agua y la recarga de acuíferos. Por tanto, se han analizado estos beneficios adicionales en relación con la protección y restauración de los páramos.

La restauración en zonas de páramo logra ser efectiva en todos los complejos para la regulación del ciclo hídrico ya que podría reducir la escorrentía en un promedio del 1.5% en comparación con el escenario de referencia y se evidencia un aumento en la disponibilidad de agua subterránea en un promedio del 2% para todos los escenarios.

Se realizó un análisis de costo-efectividad de la implementación de actividades de protección y restauración de los páramos. Este puede permitir tener información de base para tomar decisiones para asegurar que se maximicen los beneficios climáticos por cada unidad de inversión, también contar con información para comparar opciones y mejorar la eficiencia en la implementación de soluciones naturales del clima en los páramos de Colombia.

Cap.

07

Bibliografía

Lagartija collareja
(*Stenocercus trachycephalus*)



1. Mathieu JA. Hatté C. Balesdent J. Parent É. Deep soil carbon dynamics are driven more by soil type than by climate: A worldwide meta-analysis of radiocarbon profiles. *Glob Chang Biol*. 2015 Nov 1;21(11):4278–92.
2. Crowther TW. Todd-Brown KEO. Rowe CW. Wieder WR. Carey JC. MacHmuller MB. et al. Quantifying global soil carbon losses in response to warming. *Nature*. 2016 Nov 30;540(7631):104–8.
3. IPCC. Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability Working Group II contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Portner HO. Roberts DC. Tignor MM. Poloczanska E. Mintenbeck K. Alegria A. et al., editors. Working Group II contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press; 2022.
4. IDEAM. Fundación. PNUD. MADS. DNP. Cancillería. INFORME DEL INVENTARIO NACIONAL DE GASES DE EFECTO INVERNADERO 1990 - 2018 Y CARBONO NEGRO 2010 -2018 DE COLOMBIA [Internet]. Bogotá; 2022. Available from: www.cambioclimatico.
5. Lamichhane S. Kumar L. Wilson B. Digital soil mapping algorithms and covariates for soil organic carbon mapping and their implications: A review. Vol. 352. *Geoderma*. Elsevier B.V.; 2019. p. 395–413.
6. Hofstede R. Calles J. López V. Polanco R. Torres F. Ulloa J. et al. LOS PÁRAMOS ANDINOS ¿Qué Sabemos? ESTADO DE CONOCIMIENTO SOBRE EL IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN EL ECOSISTEMA PÁRAMO [Internet]. Quito: UICN; 2014. Available from: www.uicn.org/sur
7. Castaño Uribe C. páramos y Ecosistemas Alto Andinos de Colombia en condición de HotSpot & Global Climatic Tensor. Vol. 1. IDEAM. 2002. 1–387 p.
8. Castañeda-Martín AE. Montes-Pulido CR. Carbono almacenado en páramo andino. *ENTRAMADO* [Internet]. 2017;13(1):210–21. Available from: <https://revistas.unilibre.edu.co/index.php/entramado/article/view/427>
9. Aguilar-Garavito M. Ramírez Hernandez W. EVALUACIÓN Y SEGUIMIENTO DE LA RESTAURACIÓN ECOLÓGICA EN EL PÁRAMO ANDINO. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. Bogotá: Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.; 2021.
10. Samaniego J. Alatorre JE. Reyes O. Ferrer J. Muños L. Arpia L. Panorama de las contribuciones determinadas a nivel nacional en América Latina y el Caribe. 2019: Avances para el Cumplimiento del Acuerdo de París. Santiago; 2019.
11. USAID. INFORME SOBRE EL ANÁLISIS DEL CONTENIDO DE CARBONO ORGÁNICOS EN SUELOS DE TURBERAS DE PÁRAMO. 2020.
12. Hribljan JA. Suárez E. Heckman KA. Lilleskov EA. Chimner RA. Peatland carbon stocks and accumulation rates in the Ecuadorian páramo. *Wetl Ecol Manag*. 2016 Apr 9;24(2):113–27.

13. Yigini Y. Olmedo GF. Vargas R. SOIL ORGANIC CARBON MAPPING. 2nd ed. Vol. 1. FAO; 2018.
14. Minasny B. McBratney AB. Digital soil mapping: A brief history and some lessons. *Geoderma*. 2016 Feb 15;264:301–11.
15. Adhikari K. Owens PR. Libohova Z. Miller DM. Wills SA. Nemecek J. Assessing soil organic carbon stock of Wisconsin, USA and its fate under future land use and climate change. *Science of the Total Environment*. 2019 Jun 1;667:833–45.
16. Jenny H. *Factors of soil formation : a system of quantitative pedology*. Dover; 1994. 281 p.
17. Du Preez CC. Van Huyssteen CW. Mkeni PNS. Du Preez C. Land use and soil organic matter in South Africa 1: A review on spatial variability and the influence of rangeland stock production. *S Afr J Sci [Internet]*. 2011;107(5). Available from: <http://www.sajs.co.za>
18. FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. CARBONO ORGANICO DEL SUELO : el potencial oculto. FOOD & AGRICULTURE ORG; 2017.
19. Conant RT. Ryan MG. Ågren GI. Birge HE. Davidson EA. Eliasson PE. et al. Temperature and soil organic matter decomposition rates - synthesis of current knowledge and a way forward. Vol. 17. *Global Change Biology*. 2011. p. 3392–404.
20. Jobbágy EG. Jackson RB. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. *Ecological Applications*. 2000;10(2):423–36.
21. Nielsen UN. Ball BA. Impacts of altered precipitation regimes on soil communities and biogeochemistry in arid and semi-arid ecosystems. *Glob Chang Biol*. 2015 Apr 1;21(4):1407–21.
22. Caplan JS. Giménez D. Hirmas DR. Brunsell NA. Blair JM. Knapp AK. Decadal-scale shifts in soil hydraulic properties as induced by altered precipitation. *Geology [Internet]*. 2019; Available from: <https://www.science.org>
23. Jones C. McConnell C. Coleman K. Cox P. Falloon P. Jenkinson D. et al. Global climate change and soil carbon stocks; predictions from two contrasting models for the turnover of organic carbon in soil. *Glob Chang Biol*. 2005 Jan;11(1):154–66.
24. Andrew D W. *Topographic Position and Landforms Analysis*. 2006.
25. Stewart GA. Kottkamp AI. Williams MR. Palmer MA. Setting a reference for wetland carbon: the importance of accounting for hydrology, topography, and natural variability. *Environmental Research Letters*. 2023 Jun 1;18(6).
26. Román-Sánchez A. Vanwalleggem T. Peña A. Laguna A. Giráldez J V. Controls on soil carbon storage from topography and vegetation in a rocky, semi-arid landscapes. *Geoderma*. 2018 Feb 1;311:159–66.

27. Leifeld J. Wüst-Galley C. Page S. Intact and managed peatland soils as a source and sink of GHGs from 1850 to 2100. *Nat Clim Chang* [Internet]. 2019;9(12):945–7. Available from: <http://dx.doi.org/10.1038/s41558-019-0615-5>
28. Page S. Mishra S. Agus F. Anshari G. Dargie G. Evers S. et al. Anthropogenic impacts on lowland tropical peatland biogeochemistry. *Nat Rev Earth Environ*. 2022;3(7):426–43.
29. Hirano T. Jauhiainen J. Inoue T. Takahashi H. Controls on the carbon balance of tropical peatlands. *Ecosystems*. 2009 Sep;12(6):873–87.
30. Guillaume T. Makowski D. Libohova Z. Bragazza L. Sallaku F. Sinaj S. Soil organic carbon saturation in cropland-grassland systems: Storage potential and soil quality. *Geoderma*. 2022 Jan 15;406.
31. Sesquile Escobar E. Aguilar-Garavito M. Santacruz S. Monitoreo de experiencias de restauración ecológica en páramos afectados por plantaciones forestales de *Pinus patula*. Un estudio de caso en el páramo de Rabanal. Boyacá-Colombia. *Biodiversidad EN La Practica* [Internet]. 2021;6. Available from: <http://revistas.humboldt.org.co/index.php/BEP/article/view/919>
32. Sarmiento Pinzón CE. Cadena Vargas CE. Sarmiento Giraldo MV. Zapata Jiménez JA. Aportes a la conservación estratégica de los páramos de Colombia : actualización de la cartografía de los complejos de páramo a escala 1:100.000. 2013. 87 p.
33. Cabrera M. Samboni-Guerrero V. Duivenvoorden JF. Non-destructive allometric estimates of above-ground and below-ground biomass of high-mountain vegetation in the Andes. *Appl Veg Sci*. 2018 Jul 1;21(3):477–87.
34. The Atmosphere: Getting a handle on carbon dioxide - NASA Science. (n.d.). <https://science.nasa.gov/earth/climate-change/greenhouse-gases/the-atmosphere-getting-a-handle-on-carbon-dioxide/>
35. Methane: A crucial opportunity in the climate fight. (n.d.). Environmental Defense Fund. <https://www.edf.org/climate/methane-crucial-opportunity-climate-fight>
36. NASA Earth Observatory. (n.d.). The carbon cycle. <https://earthobservatory.nasa.gov/features/CarbonCycle/page2.php>
37. NASA Earth Observatory. (n.d.-b). The carbon cycle. <https://earthobservatory.nasa.gov/features/CarbonCycle/page3.php>
38. Inman, M. Carbon is forever. *Nature Clim Change* 1, 156–158 (2008). <https://doi.org/10.1038/climate.2008.122>
39. IDEAM, Fundación Natura, PNUD, MADS, DNP, CANCELLEERÍA. 2021. Tercer Informe Bienal de Actualización de Colombia a la Convención Marco de las Naciones Unidas para el Cambio Climático (CMNUCC). IDEAM, Fundación Natura, PNUD, MADS, DNP, CANCELLEERÍA, FMAM. Bogotá D.C., Colombia

40. Lüthi, D., Floch, M. L., Bereiter, B., Blunier, T., Barnola, J., Siegenthaler, U., Raynaud, D., Jouzel, J., Fischer, H., Kawamura, K., & Stocker, T. F. (2008). High-resolution carbon dioxide concentration record 650,000–800,000 years before present. *Nature*, 453(7193), 379–382. <https://doi.org/10.1038/nature06949>
41. IPCC, 2023: Summary for Policymakers. In: *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* [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 1-34, doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001
42. Manual de Acción Climática. (n.d.). The Nature Conservancy. <https://www.nature.org/es-us/que-hacemos/nuestra-vision/perspectivas/manual-de-accion-climatica/>
43. IPCC, 2022: *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 3056 pp., doi:10.1017/9781009325844.
44. Páramos -. (2022, January 14). <https://www.minambiente.gov.co/direccion-de-bosques-biodiversidad-y-servicios-ecosistemicos/paramos/>
45. Isaacs Cubides, P. (2023). Mapa prioridades y oportunidades de restauración para Colombia. Propuesta metodologica. Bogotá.
46. Etter , A., Andrade, A., Nelson, C., Cortes, J., & Saavedra, K. (2020). Assessing restoration priorities for high-risk ecosystems: An application of IUCN red list of ecosystems. *Land Use Policy*.

