

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR

FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES

ESCUELA DE CIENCIAS BIOLÓGICAS

**Comparación de los contenidos de carbono entre la Amazonía y los
páramos del Ecuador**

**Monografía previa a la obtención del título de Licenciado
en Ciencias Biológicas**

CAROLINA GRANJA VIZCAINO

Quito, 2015

LISTA DE ABREVIATURAS

GEI	Gases de efecto invernadero
PPB	Producción primaria bruta
PPN	Producción primaria neta
PNE	Producción neta del ecosistema
PNB	Producción neta del bioma
Pg	Petagramo
C	Carbono
Gt	Gigatonelada
PPNA	Producción primaria neta aérea
Mg	Megagramo
ha	Hectárea
MOS	Materia orgánica del suelo

TABLA DE CONTENIDOS

1. RESUMEN
2. ABSTRACT
3. INTRODUCCIÓN
4. DESARROLLO TEÓRICO
 - 4.1. El ciclo del carbono y el cambio climático
 - 4.2. Carbono en el Ecuador
 - 4.3. Ecosistemas del Ecuador continental
 - 4.3.1. Amazonía
 - 4.3.2. Páramos
5. CONCLUSIONES
6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS
7. FIGURAS

8. TABLAS

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. El ciclo global del carbono en la actualidad.

Figura 2. Alteraciones inducidas por el ser humano sobre la biósfera terrestre.

Figura 3. Distribución de reservas de carbono en la biomasa en Ecuador en áreas de diferente densidad de carbono en la biomasa.

Figura 4. Mapa actualizado del carbono en la biomasa de la República del Ecuador basado en datos de cobertura de vegetación y estimados de biomasa de fuentes nacionales e internacionales.

Figura 5. Densidad de carbono total en Ecuador.

Figura 6. Carbono en biomasa y suelo en los tipos de cobertura terrestre en Ecuador.

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Distribución de reservas de carbono terrestre en Ecuador en las principales regiones continentales.

1. RESUMEN

Desde la época preindustrial las concentraciones de gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera han incrementado drásticamente. Las concentraciones de dióxido de carbono (CO₂), por ejemplo, incrementaron en un 30%, durante los últimos 100 años, lo que ha provocado un aumento de la temperatura media ambiental del planeta de hasta 0.8°C en países del norte de los Andes. Estos cambios del clima están relacionados a recurrentes eventos ambientales extremos como sequías, tormentas, deshielo acelerado de glaciares, inundaciones que afectan cada vez más a la humanidad (mayor incidencia de enfermedades, hambrunas, y de más). En este sentido, ha surgido la necesidad de encontrar alternativas de mitigación y adaptación a los procesos del cambio del clima para reducir los efectos del mismo sobre los ecosistemas y las poblaciones más vulnerables del planeta. Con esta finalidad, primero es necesario desarrollar técnicas que nos permitan evaluar el efecto del calentamiento climático sobre los ecosistemas terrestres, así como generar medidas de mitigación, como la forestación, reforestación y restauración de ecosistemas orientadas al manejo sostenible de la tierra, y direccionadas al secuestro y aumento de los sumideros de carbono. La dinámica del carbono en los ecosistemas terrestres varía, y estas variaciones se deben a las características específicas de los tipos de bosque. En este sentido, el presente documento realiza una revisión de dos ecosistemas terrestres: los bosques de tierras bajas de la Amazonía y los páramos o ecosistemas altoandinos del Ecuador, así como estudios realizados en el país acerca del monitoreo y cuantificación de los contenidos carbono almacenados en los principales reservorios, como la biomasa aérea y el carbono orgánico del suelo con el objetivo de aportar con ideas que contribuyan a preservar áreas

claves para el mantenimiento de estos ecosistemas y sus servicios ambientales asociados.

Palabras claves: Amazonía, biomasa, cambio climático, carbono, CO₂, páramo.

2. ABSTRACT

Since pre-industrial times, concentrations of greenhouse gases in the atmosphere have increased dramatically. Concentrations of carbon dioxide (CO₂), for example, increased 30% over the last 100 years, which has caused an increment in the average environmental temperature of the planet of 0.8°C in countries of the northern Andes. These climate changes are related to recurrent extreme environmental events like droughts, storms, accelerated glacier melting, floods, etc., which are increasingly affecting humanity (higher incidence of disease, famine, and more). In this regard, it has become necessary to find alternative processes of mitigation and adaptation to climate change to reduce its effects on ecosystems and the most vulnerable populations on the planet. That is why it is first necessary to develop techniques that allow us to evaluate the effect of global warming on terrestrial ecosystems and generate mitigation measures, such as afforestation, reforestation and restoration of ecosystems aimed at sustainable land management, and addressed to sequestration and increased carbon sinks. Carbon dynamics in terrestrial ecosystems varies, and these variations are due to the specific characteristics of forest types. In this sense, this paper makes a review of two terrestrial ecosystems: the lowland forests of the Amazon and Andean ecosystems of Ecuador, and briefly discusses research done in the country on monitoring and quantification of stored carbon content in major reservoirs, such as biomass and soil organic carbon, with the aim of contributing ideas for preserving key areas to protect these ecosystems and their associated environmental services.

Key words: Amazonia, biomass, carbon, climate change, CO₂, paramo.

3. INTRODUCCIÓN

El cambio climático ha sido un tema recurrente en los últimos años. Se ha observado una reducción de los glaciales, fuertes y prolongadas sequías, una mayor frecuencia e intensidad de tormentas y precipitaciones, así como un aumento del nivel del mar, por lo que la humanidad se ha visto en la necesidad de buscar explicaciones a estos cambios climáticos.

Existe información de incrementos en la temperatura del planeta de forma natural; a lo largo de la historia, el planeta ha pasado por diferentes períodos glaciares e interglaciares independientemente de la actividad humana, en los cuales la temperatura, la humedad y los niveles de precipitaciones fueron diferentes a los actuales, dando a la Tierra una fisonomía completamente diferente a la actual. Sin embargo, el problema no radica en que el clima cambie si no en la velocidad a la que lo está haciendo (Gallardo y Merino, 2007). Desde los inicios de la agricultura hasta la actualidad, la actividad antrópica ha provocado efectos considerables sobre los cambios en la temperatura media global, generando un incremento acelerado de la misma en un lapso de tiempo corto (100 años). Este aumento de la temperatura ha cambiado la composición natural de la atmósfera deteriorándola a niveles alarmantes.

La atmósfera actúa como una capa protectora de la Tierra, manteniendo su temperatura constante. Algunos de los componentes gaseosos de la atmósfera permiten pasar las radiaciones de onda corta provenientes del sol a la Tierra, pero también absorben algunas de las radiaciones de onda larga que son emitidas desde la Tierra hacia la atmósfera. Estos gases actúan como un invernadero, haciendo que la atmósfera y, por lo tanto, la Tierra, mantengan su temperatura, por lo que se los ha denominado “gases de efecto invernadero (GEI)”, entre los

que destacan el dióxido de carbono (CO₂), el metano (CH₄), el óxido nitroso (N₂O), entre otros (Gallardo y Merino, 2007). Los GEI forman parte natural de la atmósfera, siempre y cuando se mantengan en sus niveles normales; y un aumento en sus concentraciones hace que la propiedad protectora de la atmósfera se pierda, desequilibrando y aumentando así la temperatura global (Gallardo y Merino, 2007).

El CO₂ es el GEI más importante, ya que es el causante de aproximadamente el 50% del calentamiento global. Su concentración en la atmósfera ha incrementado considerablemente en un 30% desde de la revolución industrial, hasta llegar a 400 ppm a la actualidad (Francou *et al.*, 2003; Easterling *et al.*, 2000). Las principales causas de este aumento han sido el uso desmedido de combustibles fósiles, la deforestación y degradación de ecosistemas (bosques, páramos, entre otros), y la transformación de áreas naturales a otras formas de uso de la tierra como agricultura, ganadería, minería y construcción de viviendas.

Los ecosistemas terrestres proveen una gran cantidad de servicios ambientales: funcionan como reguladores de recursos hídricos, son el hábitat de innumerables formas de vida y contribuyen a la mitigación de los efectos del cambio climático a través de la captación, fijación y almacenamiento de carbono en la vegetación y los suelos. Los bosques actúan como sumideros de carbono; almacenan hasta un 50% del carbono en la biomasa vegetal, mientras que en otros estratos no forestales como las praderas y sistemas agrícolas se acumula entre el 33% y el 17% del carbono, respectivamente (Gallardo y Merino, 2007). Sin embargo, estas concentraciones están sujetas a cambios debido a fluctuaciones ambientales y edáficas; a la variación altitudinal o la estacionalidad del ecosistema o reservorio de almacenamiento evaluado. En este sentido, es

necesario incrementar y llevar a cabo estudios más detallados sobre los contenidos y flujos de carbono en los diferentes biomas, con la finalidad de contribuir y reducir el grado de incertidumbre acerca del ciclo y dinámica del carbono.

4. DESARROLLO TEÓRICO

4.1 EL CICLO DEL CARBONO Y EL CAMBIO CLIMÁTICO

La Tierra está compuesta de biósfera (el conjunto de seres vivos y componentes inertes que conforman el planeta tierra); hidrósfera, o abasto total de agua (líquida y congelada); atmósfera (capa gaseosa); y litósfera, la cual es la más abundante y constituye la parte de nuestro planeta en donde se ha asentado la vida (Martin del Campo Amezcua *et al.*, 2004). Las condiciones no vivas del planeta se ven influenciadas por la biósfera a pesar de que todos los constituyentes de la biósfera se originan de la litósfera (Villem *et al.*, 1992).

La biosfera está representada en la litósfera por una delgada capa. Esta capa es la parte del planeta capaz de sostener la vida, y se ve influenciada por los rayos solares. La biosfera no está distribuida de manera uniforme en la tierra; es muy pobre en las regiones polares, en las cimas de altas montañas y en los desiertos, y es rica en las zonas tropicales y subtropicales (Martin del Campo Amezcua *et al.*, 2004).

Debido a que la tierra y la biósfera son un sistema cerrado, los materiales que utilizan los organismos no pueden perderse pero sí pueden terminar en sitios que no son asequibles para los organismos. Sin embargo, por lo general, los materiales son reutilizados, y con frecuencia son reciclados dentro y entre los organismos. Los compuestos o estados gaseosos comunes de una sustancia (por ejemplo, el carbono o el nitrógeno) pueden reciclarse con relativa facilidad. Sin embargo, los compuestos importantes no gaseosos (por ejemplo, el fósforo) solamente se reciclan efectivamente dentro de la comunidad (Villem *et al.*, 1992).

El carbono es un elemento fundamental de los compuestos orgánicos en los que se combina con nitrógeno, fósforo, azufre, oxígeno e hidrógeno para formar las moléculas más importantes para la vida. Así como sucede con todos los elementos, la disponibilidad de carbono no es infinita en el planeta, y por lo tanto, el carbono circula entre la materia orgánica y el ambiente físico-químico de manera constante. En vista de que la vida orgánica está basada en las propiedades del átomo del carbono, es necesario que el mismo esté siempre disponible para los seres vivos (Villemet *et al.*, 1992). El flujo de carbono ocurre a diferentes escalas de espacio y de tiempo que van desde el nivel molecular, pasan por el nivel de organismo, y van hasta el nivel global. Cuando el carbono se une molecularmente con el oxígeno se forma el CO_2 , el cual es el gas resultante tanto de procesos bioquímicos como biológicos, y su presencia en la atmósfera es fundamental en la regulación de la temperatura del planeta (Jaramillo, 2004).

Los cambios a corto plazo del CO_2 atmosférico se compensan por amortiguación química simple en el agua de mar; sin embargo, el aumento en el depósito de carbono por procesos químicos a largo plazo es más importante y permanente. El contenido de CO_2 podría mantenerse más o menos constante por tiempo indefinido mediante la acción de un ciclo activo de fijación y depósito de CO_2 ; sin embargo, esta compensación requiere de miles e incluso millones de años para ser efectiva. Las grandes emisiones de CO_2 desde el planeta hacia la atmósfera pueden producir grandes cambios en el clima que podrían ser permanentes en la escala humana de tiempo (Villemet *et al.*, 1992).

El CO_2 ha sido un componente importante de nuestra atmósfera desde hace miles de millones de años. La atmósfera primitiva del planeta era más rica en CO_2 y éste evitaba la salida de la radiación, produciendo, junto con el vapor de

agua, un calentamiento global en el planeta (Lovelock, 1988). El agua y el CO₂ en la atmósfera son de suma importancia para la regulación de la temperatura del planeta. La ausencia de estos dos compuestos significaría una baja en la temperatura promedio actual del planeta de aproximadamente 35 grados centígrados y, por lo tanto, el planeta estaría congelado (Schlesinger, 2013).

Las plantas juegan un papel muy importante en la captación y fijación del CO₂ atmosférico mediante el proceso de fotosíntesis, y este proceso es fundamental para mantener el equilibrio de la concentración de CO₂ en la atmósfera. El CO₂ atmosférico es adquirido por las plantas superiores mediante difusión a través de los estomas, y éste es transportado a los cloroplastos. Cierta cantidad de este gas regresa a la atmósfera, pero la cantidad que se fija y se convierte en carbohidratos durante la fotosíntesis se conoce como producción primaria bruta (PPB). Se ha estimado que la PPB global es 120 PgC/año (1 Pg [Petagramo] = 10¹⁵ g). La mitad de la PPB (60 PgC/año) se incorpora en los tejidos vegetales, y la otra mitad regresa a la atmósfera como CO₂ debido a la respiración autotrófica. El crecimiento anual de las plantas resulta de la diferencia entre el carbono fijado y el respirado, y se le conoce como producción primaria neta (PPN). A nivel global, se ha estimado una PPN de 60 PgC/año. Con el transcurso de los años, casi todo el carbono fijado vía PPN ha regresado a la atmósfera por medio de dos procesos: la respiración heterótrofa (R_h), que incluye a los descomponedores de materia orgánica (bacterias y hongos) y a los herbívoros, y por la combustión en los fuegos naturales o antropogénicos. Una gran parte de la biomasa muerta se incorpora a la materia orgánica del suelo donde es respirada a diferentes velocidades, dependiendo de sus características químicas, y es de esta manera que se producen los depósitos de carbono en el

suelo los cuales posteriormente regresan el carbono a la atmósfera mediante diferentes procesos y en distintos períodos. La diferencia entre la fijación de carbono por la PPN y las pérdidas por la R_h , en ausencia de otras perturbaciones que producen pérdidas de carbono (por ejemplo, la quema o la cosecha), se conoce como la producción neta del ecosistema (PNE). Al contabilizar todas las pérdidas de carbono por procesos como el fuego, la cosecha o la remoción, el transporte por los ríos a los océanos y la erosión, lo que queda es el carbono que la biosfera acumula a nivel global, y esto se conoce como producción neta del bioma (PNB). La PNB se ha calculado en 0.2 ± 0.7 PgC/año para la década de los ochenta, y en 1.4 ± 0.7 PgC/año para la de los noventa (Jaramillo, 2004).

El “cambio climático global” es el fenómeno que engloba las perturbaciones al ciclo global del carbono, el mismo que incluye varios procesos y fenómenos íntimamente relacionados y amenaza de distintas formas el funcionamiento del planeta. Hay dos fenómenos a partir de los cuales se define un cambio global: 1) el que altera las capas de fluidos del sistema del planeta, y 2) el que ocurre en sitios discretos pero está tan ampliamente distribuido que su efecto constituye un cambio global (Vitousek, 1992). Todos los componentes del cambio climático global tienen en común al ser humano y sus actividades, las cuales son de proporciones enormes en relación a los flujos de energía y materiales a nivel global. Por ejemplo, solamente el ser humano consume directamente cerca del 2% de la PPN de los ecosistemas terrestres, y al hacerlo utiliza o destruye cerca del 40% del total (Vitousek *et al.*, 1986). Los flujos de carbono generados por el ser humano son pequeños si se los compara con los que ocurren naturalmente entre la atmósfera, los ecosistemas terrestres y los océanos (Figura 1), pero son

suficientes para modificar los flujos netos y aumentar el contenido de CO₂ de la atmósfera (Jaramillo, 2004).

De acuerdo al informe emitido en el año 2007 por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), las emisiones a nivel mundial de GEI aumentaron en un 70% entre los años 1970 y 2004; particularmente, las emisiones mundiales de CO₂ aumentaron en un 80% anualmente. Estos aumentos se deben, principalmente, al uso excesivo de combustibles fósiles y, en menor proporción, al cambio del uso de la tierra. Adicionalmente, se proyecta un aumento de entre 25% y 90% para el año 2030 en las emisiones mundiales, suponiendo que el uso de combustibles fósiles mantenga su dominancia como fuente de energía (IPCC, 2007).

El incremento de las emisiones de GEI tiene un impacto importante sobre el clima global. El cambio en la temperatura del planeta tiene, a su vez, impactos sobre varios sistemas, regiones y sectores, como son ecosistemas terrestres, costeros y marinos; la región ártica, África, islas pequeñas y los deltas de Asia y África; y recursos hídricos, la agricultura y la salud humana (IPCC, 2007).

En cuanto al impacto que el cambio climático abrupto tiene sobre los ecosistemas terrestres, éste afecta los depósitos de carbono de los mismos mediante pérdidas de carbono por erosión o mineralización. La biósfera terrestre se ha visto afectada desde el nacimiento de la agricultura desde hace alrededor de 12-14 milenios. El uso de la tierra, por ejemplo, el cambio de ecosistemas naturales a ecosistemas manejados para la crianza de animales y cultivo de plantas tiene una fuerte influencia sobre los depósitos de carbono en la biomasa aérea y subterránea, y en el suelo (Lal *et al.*, 2012).

Los depósitos de carbono en la biomasa y en el suelo se encuentran en los principales biomas del planeta. Cualquier cambio sobre los ecosistemas naturales alteran los depósitos de carbono. Las principales alteraciones sobre los reservorios de carbono observadas son de origen antropogénico, las cuales incluyen el cambio del uso de la tierra a tierras de cultivo, tierras de pastoreo, plantaciones forestales, asentamientos urbanos y comunidades rurales, y el desarrollo industrial e infraestructural. Los depósitos de carbono también se han visto afectados mediante la oxidación de la turba en los humedales (Lal *et al.*, 2012).

Las estimaciones realizadas con respecto a la afectación del cambio del uso de la tierra sobre los ecosistemas terrestres muestran cifras significativas. Previo a la revolución industrial en 1700, casi la mitad de la biosfera terrestre era silvestre, y alrededor del 45% se encontraba en estado seminatural. Sin embargo, en el año 2000, se observó que solamente el 25% de la biósfera terrestre permaneció en estado silvestre, menos del 20% estaba en estado seminatural, y el remanente había sido convertido a biomas antropogénicos (antromas) o biomas drásticamente alterados por el humano. La expansión y la intensificación de la agricultura en particular, son los principales causantes del cambio del uso de la tierra y la cobertura del suelo. Del total de la superficie terrestre, el área global para tierra de cultivo aumentó drásticamente del 11% al 25%. A inicios del siglo XXI, el 39% de la superficie terrestre total había sido convertida en tierra para la agricultura y asentamientos humanos, y un 37% adicional había sido embebido dentro de los biomas manejados por el ser humano. Los antromas han sido altamente decarbonizados, generando un aumento en la concentración de CO₂ y

otros GEI y, por lo tanto, mayores riesgos de cambio climático abrupto (Lal *et al.*, 2012).

El cambio del uso de la tierra y la creación de antropomas han influenciado drásticamente al ciclo global del carbono. Se estima que desde 1850, alrededor del 35% de la emisión antropogénica de CO₂ resultó del cambio del uso de la tierra. Es posible que en los años 50 se generaran relativamente más emisiones antropogénicas debido al cambio del uso de la tierra que a la combustión de combustibles fósiles. La creación de antropomas no solamente afecta al ciclo global del carbono, sino que también tiene grandes efectos sobre otros procesos químicos y biológicos importantes como el equilibrio de la energía y del agua, la biodiversidad, los hábitats naturales, y genera una degradación relacionada a la calidad del suelo y los recursos hídricos (Figura 2) (Lal *et al.*, 2012).

Actualmente, el ciclo global de carbono no está en equilibrio. El carbono que se ha ido acumulando en reservorios fósiles por millones de años está siendo movilizado a la atmósfera desde hace ya algunos siglos, y está siendo distribuido en los océanos y la tierra. El manejo de la tierra por parte del ser humano ha contrarrestado hasta cierto punto el consumo terrestre de fósiles de carbono, pero el sumidero terrestre neto de carbono acumulado durante décadas podría estar cambiando (Lal *et al.*, 2012).

Los cambios observados en los depósitos terrestres de carbono son causados, principalmente, por: 1) los procesos naturales, 2) los procesos directos del manejo humano, y 3) los efectos indirectos de la actividad humana. Los procesos naturales incluyen la decarbonización y recarbonización de los bosques, humedales, tundras y praderas, los cuales muestran las densidades más altas de carbono en el suelo. Dentro de estos procesos, hay dos aspectos que son

importantes. Primero, la mayor parte de la acumulación de carbono en estos sitios se ha dado por siglos o milenios, y segundo, las tasas actuales de acumulación de carbono en los ecosistemas mencionados son generalmente bajas. A pesar de que las tasas de acumulación de carbono en estos biomas son bajas, las áreas que estos ocupan son amplias, y el carbono acumulado total puede ser globalmente significativo.

El segundo causante de los cambios en los reservorios de carbono son los procesos directos del manejo humano de ecosistemas. Estos ecosistemas ricos en carbono han sido sumideros en el pasado y pueden ser sumideros hoy en donde sea que existan. Sin embargo, los efectos directos del manejo humano como el drenaje y la explotación de humedales para tierras de cultivo, el manejo forestal y para combustibles, han emitido hacia la atmósfera mucho del carbono acumulado en estos ecosistemas a lo largo de años. Además, la desaparición de estos ecosistemas ha eliminado el potencial de los mismos de ser importantes sumideros de carbono (Lal *et al.*, 2012).

Finalmente, el tercer causante de los cambios en el almacenamiento de carbono terrestre es el efecto indirecto de la actividad humana, como las crecientes concentraciones de CO₂ en la atmósfera y el aumento en las tasas de emisión de nitrógeno reactivo. Estos factores ambientales pueden afectar las tasas de fotosíntesis y respiración, por lo tanto, pueden, potencialmente, cambiar el almacenamiento de carbono en la tierra (Lal *et al.*, 2012).

El Ecuador es una de las zonas más biodiversas del planeta, y tiene dentro de su territorio importantes ecosistemas que funcionan como sumideros de carbono en la biomasa y en el suelo. Con el fin de saber la capacidad de los ecosistemas ecuatorianos de fijar y almacenar carbono, se han realizado estudios

que compilan información sobre la cantidad de carbono almacenado (tanto en biomasa como en suelo) en las regiones Sierra, Costa y Oriente del país.

4.2 CARBONO EN EL ECUADOR

En 2008, se generó un mapa de carbono forestal para el territorio continental del Ecuador. El mapa está basado en la estratificación actualizada de la vegetación y en estimados de biomasa aérea. Los datos fueron compilados de fuentes nacionales, e incluyen carbono subterráneo y aéreo. En términos globales se ha estimado que hay mayores cantidades de carbono almacenadas en la materia orgánica del suelo que en la biomasa, y estas reservas pueden estar distribuidas de manera muy diferente a las reservas de carbono en la biomasa. Según el mapa resultante de esta compilación, existen 1.63 gigatoneladas (Gt) de carbono almacenado en biomasa en Ecuador. Más del 50% del carbono almacenado en la biomasa se encuentra en zonas clasificadas como áreas con alta o muy alta capacidad de almacenamiento de carbono de acuerdo a su composición vegetal y características edafológicas (Figura 3). Estas zonas están principalmente ubicadas en la región amazónica o en el pie de monte de los Andes (Figura 4) El mapa también muestra que existen casi 3.6 Gt de carbono almacenado en los suelos del Ecuador (Bertsy *et al.*, 2010). Si se suman ambos valores (1.63 Gt de carbono en la biomasa y 3.6 Gt de carbono en el suelo), el resultado es que en el Ecuador hay un estimado nacional de reserva de carbono de 5.2 Gt (Figura 5) (Bertsy *et al.*, 2010).

El 58% de la biomasa total de carbono del país se encuentra almacenado en la región amazónica, la cual cubre alrededor de la tercera parte de la superficie continental del país. La región de los Andes cubre un poco menos de la mitad de

la superficie continental del país y almacena 28% de la biomasa total del carbono, y la región de la Costa cubre alrededor de la cuarta parte de la superficie continental del país y almacena 13% de la biomasa total del carbono del país (Tabla 1). Sin embargo, si se incluye la cantidad de carbono del suelo, las contribuciones de las reservas de carbono por región cambia; el porcentaje de carbono total almacenado en la región amazónica es mucho menor que el almacenado en la región andina (Bertsky *et al.*, 2010).

La inclusión del carbono del suelo a la cantidad total de carbono almacenado también afecta la distribución de las reservas de carbono a lo largo de los tipos de bosque. El 46% de la biomasa de carbono del Ecuador está almacenada en los bosques amazónicos siempre verdes de tierras bajas, pero esta vegetación, la cual ocupa 25% de la superficie del área, contiene solamente un 27% del almacenamiento de carbono nacional total cuando se toma en cuenta el carbono del suelo. El bosque siempre verde del pie de monte andino almacena alrededor del 11% de la biomasa de carbono del país y 7% de su carbono total, y los moretales y el bosque montano andino almacenan 9% y 8% de biomasa de carbono, y 10% y 5% de la reserva de carbono total, respectivamente (Figura 6) (Bertsky *et al.*, 2010).

Es importante recalcar que las tierras cultivadas, las cuales cubren alrededor del 28% de la superficie continental del país, solamente almacena alrededor del 2% de la biomasa de carbono del mismo, pero alojan suficiente carbono del suelo como para representar el 20% de la reserva de carbono total (Bertsky *et al.*, 2010).

Las regiones de los Andes y Oriente, principalmente, cuentan con varios tipos de ecosistemas que representan importantes sumideros de carbono en el

país. Los ecosistemas se diferencian unos de otros por el tipo de vegetación presente en los mismos, variables ambientales y ubicación geográfica. A continuación se presenta una breve descripción de los ecosistemas del país.

4.3 ECOSISTEMAS DEL ECUADOR CONTINENTAL

El Ecuador es reconocido a nivel mundial por su riqueza de flora y fauna. Esta riqueza está asociada a una serie de variables ambientales, como el bioclima, el relieve, el suelo, regímenes de inundación, entre otros factores, los cuales interactúan y dan origen a diferentes ecosistemas naturales que conviven con varios tipos de vegetación (MAE, 2013).

Un ecosistema está definido como un grupo de organismos que interactúan entre sí y con su entorno físico, y que engloba características fisionómicas y taxonómicas de la vegetación, las cuales dictan en gran medida la composición faunística. Además, el concepto de ecosistema incluye aspectos relacionados con la interacción entre los organismos y los factores abióticos, como ciclos de materia y nutrientes, y dinámicas sucesionales (MAE, 2013).

Los estudios de la vegetación del Ecuador fueron iniciados hace casi 200 años. Desde la época de Alexander Von Humboldt, varios botánicos han publicado descripciones de la vegetación y fitogeografía del Ecuador continental; entre ellos están Harling (1979), Cañadas (1983), Sierra *et al.* (1999) y Josse (2003).

El sistema de clasificación de ecosistemas de Ecuador continental más actual es el propuesto por el MAE. Dicho sistema permite agrupar ecosistemas a diferentes escalas espaciales en relación a los factores diagnósticos, como

bioclima, biogeografía, geomorfología, y al mismo tiempo usa criterios de clasificación homologables con otras iniciativas generadas en la región (MAE, 2013).

Para la realización del sistema de clasificación propuesto por el MAE, se establecieron seis niveles de clasificación en base al orden jerárquico en el que los factores diagnósticos definen las unidades ambientales a diferentes escalas espaciales. En este sistema de clasificación, los niveles I y II identifican variaciones florísticas a escalas espaciales globales ($>10,000 \text{ km}^2$), mientras que los niveles III, IV, V y VI, caracterizan variaciones a escalas más finas, sean estas continentales ($2,000$ a $10,000 \text{ km}^2$), regionales (200 a $2,000 \text{ km}^2$), de paisaje (10 a 200 km^2), locales (1 a 10 km^2) o de sitio (10 a $1,000 \text{ m}^2$) (MAE, 2013). Los factores diagnósticos utilizados en este sistema de clasificación cubren las dimensiones ambientales principales que han sido asociadas con la distribución de ecosistemas en diversos contextos geográficos. Estas dimensiones incluyen: fisionomía, bioclima, biogeografía, geofoma, inundabilidad general, fenología y pisos bioclimáticos. De esta manera, se definieron 91 ecosistemas existentes para el Ecuador continental, de los cuales 24 fueron identificados y descritos para la región Costa, 45 para la región de los Andes y 22 para la región Oriente (MAE, 2013).

En este documento se describen las características más importantes de dos ecosistemas en general, los páramos y los bosques de la Amazonía, se analizan los servicios ambientales que estos dos ecosistemas prestan, y se comparan los contenidos de carbono tanto en biomasa como en suelo de dichos tipos de bosque.

4.3.1. AMAZONÍA

La Cuenca Amazónica cubre un área de alrededor de 700 Mha y ocupa grandes porciones de los territorios nacionales de Venezuela, Colombia, Perú, Guyana, Bolivia, Ecuador y Brasil. La longitud de la cuenca es de más de 3,000 km de oeste a este, y su ancho va desde 300 km en el oeste hasta 800 km en el este. La parte central de la Cuenca Amazónica está casi en su totalidad ubicada en el territorio brasilero. En general, la Amazonía presenta un clima caliente y húmedo, y está caracterizada por pequeñas variaciones en las temperaturas diurnas y nocturnas. Sin embargo, debido a su gran tamaño y heterogeneidad geomorfológica, esta región representa un amplio rango de climas locales, con distribución de lluvias anuales diferentes, y a menudo, temperaturas extremas diferentes (Cerri *et al.*, 2012).

De acuerdo al Sistema de Clasificación de los Ecosistemas del Ecuador continental (MAE, 2013), la región amazónica cuenta con aproximadamente 82,120 km² y representa alrededor del 30% del territorio nacional, pero en el contexto regional solamente representa el 2% de la Cuenca Amazónica. Esta región abarca un rango altitudinal que varía entre la región norte y sur pero que en promedio va de 180-190 msnm en la parte más baja de la llanura amazónica y 2,900 en las cumbres de las cordilleras amazónicas. La región amazónica incluye tanto las planicies de inundación de los ríos de origen andino y de origen amazónico y sus interfluvios, así como el área de piedemonte de la cordillera Oriental y las cordilleras subandinas o amazónicas que se levantan hacia el sur.

Al norte, la región amazónica está caracterizada por la presencia de bosques de tierra firme sobre una serie de colinas disectadas o muy disectadas, zonas de pantanos, moretales o bosques de palmas y los sistemas lacustres de

aguas negras. La Amazonía central y sur del Ecuador está dominada por un complejo de mesas de arenisca y colinas, las cuales están interrumpidas por terrazas aluviales asociadas con los valles de inundación de ríos de aguas blancas y negras, y un relieve homogéneo (MAE, 2013).

En cuanto a su geomorfología, la Amazonía baja está definida por la presencia de llanuras y penillanuras conformadas por una serie de colinas, valles y mesetas. La Amazonía baja se ha definido como toda la región que está por debajo de los 300 msnm. La variación florística de la Amazonía ecuatoriana es muy alta, y la composición y abundancia dentro de las comunidades de árboles pueden cambiar drásticamente en distancias muy cortas a medida que se aleja de la base de los Andes hacia el este, hacia el norte y hacia el sur (MAE, 2013).

En la Amazonía se distinguen cuatro grandes tipos de vegetación: los bosques de tierra firme, los bosques inundables por ríos de origen amazónico y andino, comúnmente llamados varzeas, los bosques inundados localmente llamados moretales o pantanos, y los bosques en sistemas lacustres de aguas negras, comúnmente llamados igapós (MAE, 2013).

Adicionalmente, la Amazonia ecuatoriana ha sido catalogada como una de las regiones más diversas en términos de flora y fauna en el mundo, sino la más diversa. Esta diversidad se ve reflejada en las más de 5,000 especies de plantas vasculares, lo que equivale al 35% de la riqueza total de especies descritas para el Ecuador (MAE, 2013).

El bosque húmedo tropical tiene una biomasa de hasta 500 toneladas de materia seca por hectárea, lo que es equivalente a 250 toneladas de carbono. En el bosque tropical, el suelo casi no contiene carbono debido a que la descomposición de la hojarasca es tan rápida que los restos vegetales son, en la

mayoría de los casos, totalmente oxidados antes de poder ser incorporados en el suelo. Es por esta razón que el suelo orgánico del bosque tropical no es más profundo que 10 cm y el contenido de carbono elemental es máximo 5%. Así, si se tiene una densidad aparente del suelo de 1 kg/litro, obtenemos una cantidad de carbono en el suelo de 50 toneladas por hectárea (Hofstede, 1999).

Los bosques tropicales juegan un rol muy importante en el ciclo del carbono global: ellos abarcan más de la tercera parte de las reservas de carbono terrestre, y contribuyen aproximadamente con el 30% de la producción primaria neta terrestre. Se pensaba que los bosques no intervenidos y maduros estaban en un estado estable en términos del flujo de CO₂, existiendo un equilibrio entre la captación de CO₂ por fotosíntesis y las emisiones de CO₂ de la respiración y el pudrimiento de la biomasa. Sin embargo, existe fuerte evidencia que sugiere que los bosques intactos están en realidad respondiendo al aumento en los niveles de CO₂ en la atmósfera, proceso conocido como “efecto de fertilización del CO₂”, el cual consiste en el exceso de CO₂ en el ambiente, generando un mejor desarrollo o productividad por parte de las plantas (Cerri *et al.*, 2012). Existen modelos que sugieren que las plantas, en general, y los bosques tropicales en particular, son sensibles a cambios ambientales como el aumento de la concentración de CO₂ atmosférico, la deposición de nitrógeno, la temperatura, la frecuencia de sequías y la radiación solar (Chave *et al.*, 2008).

La sensibilidad de los bosques al CO₂ atmosférico podría tener grandes implicaciones en el futuro de uno de los ecosistemas más importantes de la tierra. Tras la realización de varios estudios, las posibles respuestas hipotéticas al cambio global son: aumentos en las reservas de carbono de la biomasa aérea, aumentos en la producción primaria neta aérea (PPNA), cambios en la dinámica

de los árboles y en la dominancia de especies de crecimiento rápido. Sin embargo, estos patrones y los mecanismos propuestos han sido muy debatidos (Chave *et al.*, 2008).

La PPN de los bosques de la Amazonia tiende a ser mayor en la porción occidental de la Cuenca Amazónica que en la porción oriental. Esta variación está relacionada a una mayor fertilidad en el suelo aluvial más joven de la Amazonia occidental en comparación con la Amazonia oriental (Quesada *et al.*, 2009). En la Amazonía, el patrón de PPN está fuertemente relacionado con la disponibilidad y textura del suelo. La PPN más alta de los bosques de la Amazonía occidental indica que estos bosques son capaces de asimilar y fijar en su biomasa más carbono atmosférico a lo largo del tiempo que en las áreas del flanco oriental (Aragao *et al.*, 2014).

Un estudio realizado en el Parque Nacional Yasuní mostró que la biomasa de bosque maduro aumentó 0.13 y 0.24 $\text{Mg ha}^{-1} \text{y}^{-1}$ (1 Mg [Megagramo] = 10^6 g) en el valle y pie de monte, respectivamente, en un período de 6 años. Esto se debió completamente a un aumento en el número de árboles grandes ($\text{dap} \geq 10$ cm). Las categorías de diámetro pequeño ($\text{dap} < 10$ cm) perdieron 0.1 Mg ha^{-1} de biomasa (Valencia *et al.*, 2009). El bosque estudiado también mostró un aumento en la biomasa en pie, aunque bastante más baja que el promedio de la Amazonia (Valencia *et al.*, 2009).

Los cambios en la biomasa y el flujo de carbono en los bosques tropicales han creado controversia entre ecologistas durante los últimos 15 años aproximadamente. El aumento en las reservas de la biomasa permanece desconocido. Sin embargo, una hipótesis para los bosques de la Amazonía es que ellos se están recuperando de una intervención humana del pasado. La

presencia de poblaciones de nativos americanos en los bosques eran más altas antes del intercambio Colombino que 200 años después, y esto hace posible la hipótesis de que grandes áreas de tierra para la agricultura en 1500 hayan reforestado desde entonces (Valencia *et al.*, 2009). Sin embargo, la evidencia etnohistórica, así como el polen de plantas cultivadas o el carbón no son compatibles con asentamientos densos en Yasuní. Esto se debe a que el polen y carbón en tres lagos de estudio en el Parque Nacional Yasuní sugieren actividad humana localizada cerca de un pantano pero no en dos lagos de estudio cercano, lo cual es interpretado como una señal de que los asentamientos humanos en el área eran pocos. La evidencia sugiere que el área estudiada tenía bajas densidades de poblaciones antes de la conquista española (~ 0.3 personas/km² (Newson, 1996)).

El aumento total de la biomasa que mostró el estudio puede deberse completamente al aumento en el número de árboles grandes, por lo tanto, a un cambio en el diámetro promedio. La gravedad específica de la madera cambió muy poco en el bosque maduro. La disminución en la población de tamaño pequeño se esperaría si es que los árboles de dosel se hicieran más abundantes, y la luz menos disponible en el sotobosque. Es por eso que es razonable pensar que el aumento en el número de árboles grandes es un factor importante para explicar los cambios observados en las dinámicas del bosque estudiado (Valencia *et al.*, 2009).

Otro sitio estudiado dentro del Parque Nacional Yasuní fue un parche de un viejo helipuerto. Este parche fue ampliamente despejado 15 años antes del primer censo del estudio; sin embargo, su biomasa es cerca de 60% de aquella en el bosque maduro del borde superior vecino, y aumentó aproximadamente en un

22%. Al ritmo actual, ese parche de bosque secundario obtendría una biomasa similar a la del bosque maduro de los alrededores en alrededor de 20–60 años. Esto no apoya la noción de una recuperación a largo plazo (Valencia *et al.*, 2009).

El pie de monte y el valle del bosque de Yasuní son notablemente diferentes en biomasa; el pie de monte presenta una biomasa 35% mayor que el valle. La diferencia se debe casi en su totalidad al alto número de árboles grandes en la estribación, y en menor medida a la alta densidad de la madera en la misma. En la parcela estudiada, el valle amazónico mostró mayor dinámica que el pie de monte de los alrededores, teniendo mayor crecimiento absoluto y tasas de mortalidad. El mayor dinamismo y las reservas relativamente bajas de biomasa parecen haber sido causadas por condiciones ambientales naturales. Los suelos de los valles son mucho más húmedos que los de los pies de monte debido a que el agua superficial drena hacia abajo, y cierta proporción de agua absorbida en la estribación corre horizontalmente debajo del suelo y llega, eventualmente, a ciertas partes del pie de monte (Valencia *et al.*, 2009).

Se sugiere que los bosques de tierra firme son una combinación de tipos de hábitats naturales, y que esta variación de hábitats es en parte responsable de la variación observada en las reservas de biomasa en los bosques amazónicos (Valencia *et al.*, 2009).

Se cree que el cambio en la distribución del diámetro y la biomasa del bosque de Yasuní se debe más probablemente a algún evento reciente y no a una sucesión de largo plazo. Esto es consistente con ideas relacionadas a cambios climáticos o atmosféricos (Lewis *et al.*, 2004): CO₂ más alto o cambios en la precipitación que cambian el equilibrio en el tamaño de los árboles, favoreciendo el aumento en la densidad de árboles más grandes. Es muy

probable que a lo largo de décadas, la estructura del bosque sea raramente estable, incluso en la ausencia de la intervención humana (Valencia *et al.*, 2009). Eventos u oscilaciones climáticas discretas en la precipitación pueden hacer que la estructura del bosque cambie (Condit *et al.*, 2004).

4.3.2 PÁRAMOS

El páramo es un ecosistema que se encuentra ubicado entre el límite del bosque cerrado y las nieves perpetuas. En los trópicos de América, este ecosistema se encuentra distribuido discontinuamente entre las latitudes 11°N y 8°S (MOBOT). Se localiza a altitudes comprendidas entre los 3,000 y los 5,000 msnm aproximadamente y se extiende desde Costa Rica hasta Perú (León-Yáñez, 2000).

La vegetación dentro del páramo comprende un conjunto de formaciones vegetales diferentes. Esta zona presenta características geográficas, geológicas, climáticas, fisonómicas y florísticas, las cuales hacen que sea un ecosistema muy diverso. En el Ecuador, el páramo está distribuido en un callejón casi ininterrumpido sobre la línea de bosque de la cordillera occidental y oriental de los Andes sobre los 3,300 y 3,500 msnm respectivamente (León-Yáñez, 2000). Sin embargo, las condiciones geológicas, climáticas y antrópicas de ciertas zonas del país hacen que el límite altitudinal de los páramos varíe mucho y que este ecosistema se encuentren a veces desde los 2,800 msnm o hasta por sobre los 4,000 m (Mena y Medina, 2001).

Se estima que los páramos ocupan el 5% del territorio nacional y que está presente en 18 de las 24 provincias. Ecuador es el país que más páramos tiene en relación a su extensión total (León-Yáñez, 2000).

Los páramos ecuatorianos presentan un clima frío y húmedo. Hay cambios diarios en la temperatura de este ecosistema, por ejemplo, a 3,900 m de altitud ésta varía desde 30-1°C hasta temperaturas bajo 0-1°C (León-Yáñez, 1993). Las noches heladas también están presentes en los páramos de Ecuador, y la distribución y frecuencia de las mismas influyen sobre la vegetación de este ecosistema. También existen diferencias climáticas en sentido norte-sur. En la parte norte y central del país, el clima es húmedo durante casi todo el año, mientras que en el sur el clima es más seco (León-Yáñez, 2000).

Un factor ambiental importante sobre los páramos es la precipitación. La cantidad y distribución de la misma varía mucho con la elevación, la orientación de los flancos de las cordilleras y la ubicación geográfica del bioma (León-Yáñez, 2000). Muchos páramos reciben más de 2,000 mm de lluvia en sus pendientes expuestas (MOBOT).

Otro factor importante sobre el ecosistema páramo es el suelo. La geología de los Andes es muy variable, por lo tanto, también lo son sus suelos (MOBOT). Típicamente, los suelos de los páramos son húmedos, negros, tienen pH ácido, y su contenido de materia orgánica es alto. El tipo de suelo varía dependiendo de su ubicación geográfica (norte, centro o sur de los Andes) y del tipo de páramo, ya que éste se ve influenciado por el clima. Es así que los suelos de las zonas más altas son poco delgados, ásperos, presentan mucha roca y arena, y tienen poca materia orgánica, por lo tanto, su capacidad de retención de agua es muy baja. En zonas medias, los suelos del páramo son relativamente profundos, contienen humus, son negros o café oscuros, y están humedecidos o saturados de agua. En la zona más baja del páramo, los suelos son oscuros, tienen contenido orgánico alto, y una alta capacidad de retención de agua (León-Yáñez, 2000; MOBOT).

Existen otros factores climáticos, como es la radiación solar, que junto a factores ambientales como las bajas temperaturas, la precipitación y los cambios drásticos de temperatura a lo largo del día han generado una diversidad especial de plantas en este ecosistema. Las plantas han desarrollado adaptaciones que les permiten adaptarse y sobrevivir a las condiciones ambientales de los páramos, y algunas de estas son la vellosidad, los colores oscuros, la pequeñez y dureza en las hojas y la disminución de su metabolismo en las horas de más frío (León-Yáñez, 1993).

A lo largo de los años se han propuesto varios sistemas para clasificar a los páramos, pero la clasificación más simple y más usada es la que clasifica a los páramos en tres: subpáramo, páramo y superpáramo. Esta clasificación está basada en características fisionómicas y taxonómicas (León-Yáñez, 2000).

El subpáramo es la zona más baja, y es el área de transición entre el bosque andino y el páramo. El rango altitudinal de esta zona empieza tan bajo como a los 2,800 msnm y va tan alto como hasta los 3,500 msnm, y tiene la mayor diversidad de las tres zonas de páramo. El páramo se encuentra desde los 3,500 msnm hasta los 4,400 msnm, y su vegetación es continua y tiene una cobertura vegetal del 100%. El superpáramo es la parte de vegetación que crece en las cumbres de las montañas más altas desde los 4,000 msnm hasta por los 5,000 msnm bajo el límite de las nieves perpetuas. Esta zona presenta la temperatura, precipitación, capacidad de retención de agua y contenido de nutrientes más bajos de los tres tipos de páramo (MOBOT).

Como ya se ha mencionado a lo largo de este documento, los páramos, específicamente los del Ecuador, son de suma importancia en lo que se refiere a ecosistemas con gran capacidad de acumulación de carbono. Debido a que este

bioma incluye grandes áreas sin bosques y con relativamente baja productividad agrícola, los páramos se prestan para hacer actividades de forestación a gran escala, con el objetivo de fijar CO₂ atmosférico (Hofstede, 1999).

Los suelos de los páramos son típicamente negros y muy húmedos, y estas características combinadas con las bajas temperaturas y la alta humedad de este ecosistema hacen que la descomposición de materia orgánica sea muy lenta. Es por esta razón que existe una gran cantidad de carbono almacenado en el suelo; en el caso de los páramos de El Ángel, la capa de materia orgánica del suelo es de hasta 2 metros de profundidad. Si se considera este caso, en donde los 2 metros de materia orgánica tienen una concentración de 17% de carbono en el suelo, con una densidad aparente de 0,5 kg/litro, se puede decir que estos suelos tienen la capacidad de almacenar hasta 1,700 toneladas de carbono por hectárea. La descomposición de la materia orgánica de los páramos puede aumentar si es que se deja la tierra expuesta al aire, ya que el suelo superficial se seca y ocurre oxidación de la materia orgánica, emitiendo así CO₂ a la atmósfera. Es así que la erosión es una fuente importante de emisiones de CO₂ a la atmósfera. El cambio del uso de la tierra en el páramo hace que se pierda materia orgánica del suelo, y esta pérdida no es compensada por una entrada de nueva hojarasca (Hofstede, 1999).

Debido a que los suelos de los páramos contienen los depósitos más grandes de carbono orgánico terrestre en la forma de materia orgánica del suelo (MOS), estos son fuentes o sumideros de carbono. Que los suelos se conviertan en una fuente o sumidero neto de carbono con el clima y/o con el cambio del uso de la tierra depende de la estabilidad de la MOS, mediante su protección contra descomposición debido a varios constituyentes del suelo y condiciones

ambientales. Los suelos de ceniza volcánica contienen depósitos de carbono muy grandes por unidad de área. Ellos cubren aproximadamente 0.84% de la superficie de la tierra, pero contienen aproximadamente 5% del carbono global del suelo (Tonneijck, 2009).

En un estudio realizado por Tonneijck (2009) se observó que las reservas de carbono orgánico contenidas en los suelos de ceniza volcánica debajo del bosque montano alto y páramo naturales en el norte del Ecuador fueron excepcionalmente altas, doblando la cantidad promedio de carbono global para este tipo de suelo. También se concluyó que tanto la vegetación de páramo como la de bosque contribuyó a la transformación de suelos de ceniza volcánica alofánicos a suelos de ceniza volcánica no alofánicos, aumentando así la acumulación de materia orgánica de suelo, e induciendo resultados positivos.

Ramsay y Oxley (2001) realizaron un estudio en los sistemas de valles de tierras altas de Alao y Daldal (alrededor de 20-30 km de Riobamba), y sus hallazgos les permitieron agrupar a los sitios de muestreo en tres, tomando en cuenta su biomasa en pie inicial y su productividad aérea espontánea: gramíneas introducidas para pastoreo (3,100 msnm), claros de bosque montano (3,250 y 3,450 msnm), y el páramo (3,750 y 4,000 msnm).

El primer grupo mostró una productividad neta de cerca de 1400 g/m²/año. Las parcelas fueron intensamente pastadas antes de empezar el estudio, y eso explica la baja biomasa en pie inicial y el hecho de que no hubo diferencia en la productividad subsecuente entre las parcelas talada y no taladas, ya que todas fueron taladas o pastadas cerca del suelo al inicio (Ramsay y Oxley, 2001).

Los pastizales en el bosque montano despejado mostraron niveles muy bajos de productividad: 70 y 110 g/m²/año. La biomasa en pie también fue muy

baja, lo cual es sorprendente porque la temperatura en esos pastizales era apenas 1 o 2 grados centígrados más frío que el sitio en Alao, el cual es 10-20 veces más productivo. El sobrepastoreo parece ser la explicación más acertada para la baja productividad en este tipo de vegetación (Ramsay y Oxley, 2001).

Las parcelas de páramo mostraron los valores mayores de biomasa en pie con $794 \text{ g/m}^2/\text{año}$ y $837 \text{ g/m}^2/\text{año}$. La mayor parte de la biomasa en pie aérea en las parcelas de páramo consistía de hojas muertas de *Calamagrostis intermedia*. Sin embargo, la presencia de las hojas muertas probablemente inhibía la fotosíntesis y, por lo tanto, la productividad (Ramsay y Oxley, 2001). La característica climática del páramo “verano en el día, invierno en la noche” es probablemente el principal factor que determina la productividad de las plantas que viven ahí (Ramsay y Oxley, 2001).

Por otro lado, un trabajo realizado en la parte central de los Andes a aproximadamente 100 km al sureste de Quito en la hacienda Antisana y sus alrededores cerca de la Laguna Micacocha, en parcelas planas con inclinación moderada entre los 4,000 y 4,500 msnm cerca del volcán Antisana, se enfocó en los tipos de vegetación de páramo que dominan el área. Estos incluyen un ecosistema herbáceo dominado por hierbas, un ecosistema dominado por arbustos (*Chuquiragua*) y un ecosistema herbáceo bajo dominado por almohadillas. El muestreo también se enfocó en áreas que han experimentado actividades pesadas de pastoreo (WLT, 2008).

Los resultados obtenidos de este estudio mostraron que, generalmente, la comunidad herbácea baja moderadamente pastada tenía el mayor almacenamiento total de carbono y del suelo. Estas áreas herbáceas bajas moderadamente pastadas se encontraban en las cuencas de drenaje más

amplias en la parte más baja de los valles. También presentaron una acumulación gruesa de hojarasca debajo de la superficie de las plantas vivas. Adicionalmente, es probable que estos suelos tengan ceniza volcánica, lo cual puede significar resultados altamente variables en la concentración de carbono (WLT, 2008).

El segundo nivel de carbono más alto se encontró en el estrato de páramo moderadamente pastado (ecosistema herbáceo); el siguiente nivel más alto de carbono se encontró en el estrato intensamente pastado; y por último, la comunidad arbustiva moderadamente pastada tuvo el nivel más bajo de carbono total y del suelo (WLT, 2008).

Los resultados observados en el estudio, combinados con la literatura existente con respecto a la capacidad de almacenamiento de carbono de los páramos, sugieren que, bajo ciertas circunstancias, hay cierto beneficio para el almacenamiento de carbono debido al pastoreo. El uso y los efectos de la quema como herramienta de forrajeo también justifica mayor investigación en esta región. Otros estudios también sugieren que ocurre un cambio marcado en la alocaación de carbono subterráneo a mayor altitud. Debido a las diferencias entre los tipos de vegetación y el historial de pastoreo, no hay una manera clara de asegurar si las diferencias entre los depósitos de carbono se deben al pastoreo o solamente a características ecológicas naturales (WLT, 2008).

5. CONCLUSIONES

- El carbono y los compuestos orgánicos en los que se combina son de gran importancia para la vida y sostenibilidad de todos los organismos de la biósfera. La disponibilidad de este elemento en el planeta no es finita, se encuentra en constante circulación, y cualquier alteración en su equilibrio puede afectar directa e indirectamente los ecosistemas terrestres de formas variables.
- El CO₂ es esencial en la regulación de la temperatura del planeta. Las concentraciones de este gas han fluctuado en la atmósfera desde los inicios de la vida en la Tierra, y han estado en estabilidad mediante procesos químicos y biológicos que permiten la captación, fijación y acumulación de carbono de manera constante y por tiempo indefinido. Sin embargo, el aumento dramático en las emisiones de CO₂ desde la Tierra hacia la atmósfera causa un cambio en el clima global, produciendo eventos de gran impacto sobre los diferentes biomas terrestres, como inundaciones o sequías.
- El principal causante del cambio en los niveles de CO₂ en el planeta es el ser humano. Las actividades humanas relacionadas a la agricultura, ganadería e infraestructura que han venido teniendo lugar en el planeta desde hace miles de años han desequilibrado el ciclo global del carbono, haciendo sonar una alarma en la comunidad científica en cuanto a la importancia de estudiar más a fondo la dinámica del carbono, las propiedades de los ecosistemas como mitigadores del cambio climático, y las distintas contribuciones que los ecosistemas brindan para reducir los efectos del aumento del CO₂ atmosférico.

- Los principales biomas del planeta actúan como reservorios de carbono, el cual se almacena tanto en la biomasa como en el suelo. La deforestación y el uso de la tierra con fines agrícolas o ganaderos afectan la capacidad de los ecosistemas de acumular carbono, por lo tanto, la conservación y el manejo adecuado de los bosques es esencial para reducir las emisiones de CO₂ hacia la atmósfera.
- La reserva de carbono en Ecuador es de 5.2 Gt., y ésta se encuentra almacenada en los diferentes ecosistemas presentes en el país. Tanto los bosques de la Amazonía como los páramos juegan un papel muy importante en el ciclo global del carbono. Ambos ecosistemas acumulan grandes cantidades de carbono tanto en su biomasa como en el suelo; sin embargo, las cantidades de este elemento que ambos tipos de bosques pueden captar, fijar y acumular varían. Es así que la biomasa de los bosques bajos de la Amazonía ecuatoriana almacenan significativamente más carbono que la de los páramos, pero los suelos de los páramos del Ecuador almacenan mucho más carbono que la Amazonía.
- Las tierras bajas de la Amazonía están cambiando en cuanto a la cantidad de biomasa presente y sus flujos de carbono. Estos cambios pueden deberse a que los bosques estén respondiendo a cambios ambientales o atmosféricos recientes.
- Poco se conoce con respecto a los cambios en la biomasa y contenidos de carbono en los páramos a lo largo de los años, pero es claro que este ecosistema representa un importante reservorio de carbono en el suelo.
- En vista del alto contenido de carbono almacenado en los ecosistemas continentales de Ecuador, es necesario enfatizar la importancia de la

conservación de los mismos, así como de los ecosistemas a nivel mundial que funcionan como sumideros de carbono. La conservación de ecosistemas naturales aporta de manera relevante a la reducción de emisiones de GEI hacia la atmósfera, frenando así el cambio climático.

- La Amazonía ecuatoriana, además de ser una de las áreas más biodiversas a nivel mundial y de actuar como un importante reservorio de carbono en su biomasa, tiene bajo tierra cerca de mil millones de barriles de petróleo. La extracción del mismo representaría, además de la deforestación de una vasta área de bosque, la producción de hasta 407 millones de toneladas métricas de CO₂ debido a la quema de este combustible (Larrea y Warnars, 2009). Por esta razón, es vital que el petróleo de la Amazonía se mantenga bajo tierra.
- La importancia de la conservación de los páramos radica en la capacidad de los mismos de acumular carbono en el suelo, además de ser importantes fuentes de agua. La intervención humana en este ecosistema debe ser evitada, ya que las actividades antropogénicas relacionadas a la agricultura, ganadería y minería tienen efectos devastadores sobre los páramos, por ejemplo, la perturbación de los procesos biológicos de especies de plantas y animales, las grandes pérdidas de carbono almacenado en el suelo debido a la transformación de los páramos a tierras agrícolas, y los impactos ambientales relacionados con la minería.
- En vista de la escasa información disponible en cuanto a la dinámica del carbono en los diferentes ecosistemas terrestres, es necesario establecer protocolos estandarizados que permitan estudiar y cuantificar la cantidad de carbono que los distintos biomas del planeta están en la capacidad de

reservar, para de esta manera realizar estudios comparativos más detallados sobre este tema.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acosta-Solís, M. **Los Páramos Andinos del Ecuador**. Quito. Publicaciones Científicas MAS, 1984. 220 p.
- Aragao, L.E.O.C., Poulter, B., Barlow, J.B., Anderson, L.O., Malhi, Y., Saatchi, S., Phillips, O.L., Gloor, E. Environmental change and the carbon balance of Amazonian forests. **Biological Reviews**, 89(4): 913-931, 2014.
- Bertzky, M., Ravilious, C., Araujo Navas, A.L., Kapos, V., Carrión, D., Chiu, M., Dickson, B. **Carbon, biodiversity and ecosystem services: Exploring co-benefits**. Ecuador. UNEP-WCMC, Cambridge, UK, 2010. 24 p.
- Cerri, C.C., Bernoux, M., Feigl, B.J., Pellegrino Cerri, C.E. **Carbon Cycling in the Amazon**. En: Rattan, L., Lorenz, K., Hüttl, R.F., Schneider, B.U., Von Braun, J. **Recarbonization of the Biosphere - Ecosystems and the Global Carbon Cycle**. Springer Science+Business Media B.V., 2012. p. 253-273.
- Chave, J., Condit, R., Muller-Landau, H.C., Thomas, S.C., Ashton, P.S. *et al.* (). Assessing evidence for a pervasive alteration in tropical tree communities. **PLoS Biol**, 6(3), 2008.
- Cleef, A.M. **The phytogeographical position of the neotropical vascular páramo flora with special reference to the Colombian Cordillera Oriental**. En: Larsen, K., Holm-Nielsen, L. **Tropical Botany**. Londres. AcademicPress. 1979. p. 175-184.
- Condit, R., Salomon, A., Hernández, A., Pérez, R., Lao, S., Angehr, G., Hubbell, S.P., & Foster, R.B. Tropical forest dynamics across a rainfall gradient and the impact of an El Niño dry season. **Journal of Tropical Ecology**, 20: 51-72, 2004.
- Coppus, R., Endara, L., Nonhebel, M., Mera, V., León Yáñez, S., Mena Vásconez, P., Wolf J., Hofstede, R.G.M. **El estado de salud de algunos páramos del Ecuador: Una metodología de campo**. En: Los páramos del Ecuador. Quito Proyecto Páramo y Abya Yala. 2001. p. 219-240.
- Cuatrecasas, J. Aspectos de la vegetación natural de Colombia. **Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas y Físicas**, 10(40): 221-264, 1958.
- Easterling, D.R., Evans, Groisman P.Ya., Karl T.R., Kunkel K.E., Ambenje P. Observed variability and trends in extreme climate events: a brief review. **Bulletin of the American Meteorological Society**, 81(3): 417-426, 2000.
- FAO (Food and Agriculture Organisation of the United Nations). World reference base for soil resources. A framework for international classification, correlation and communication. FAO/ISRIC/IUSS. Roma. **World Soil Resources Reports**, 2006.

- Francou, B., Vuille, M., Wagon P., Mendoza J., Sicart J.E. Tropical climate change recorded by a glacier in the central Andes during the last decades of the twentieth century: Chacaltaya, Bolivia. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, 18 (D5): 10-1029, 2003.
- Gallardo, J.F. y Merino, A. **El ciclo del carbono y la dinámica de los sistemas forestales**. En: Alloza, J.A., Bogino, S.M., Bravo, F., Bravo-Oviedo, A., Broto, M., Cámara, A., Libano, E.C., Díaz Balterio, L., Fernández, Nieto, M.J., Gallardo, Lancho, J.F., Gómez, C., Herrero, C., Lizarralde, I., Menendez Míguez, M., Merino, A., Montero, G., Moro, O., Navarro, R.M., Ordoñez, C., Osorio Vélez, F.L., del Peso, C., Roca, N., Rodríguez, F., Romanyá, J., Romero, C., Rovira, P., Rubio, A., Ruiz-Peinado, R., Segur, M., Vallejo, R. El papel de los bosques españoles en la mitigación del cambio climático. Primera edición, Barcelona: Fundación Gas Natural, 2007. p. 43-64.
- Hedberg, I., Hedberg, O. Tropical-alpine lifeforms of vascular plants. **Oikos**, 33: 297-307, 1979.
- Hofstede, R. **El Páramo como espacio para la fijación de carbono atmosférico**. En: El Páramo como espacio de mitigación de carbono atmosférico. Serie Páramo 1: Quito. GTP/ Abya Yala, 1999. p. 7-10.
- IPCC. **Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático** [Equipo de redacción principal: Pachauri, R.K. y Reisinger, A. (directores de la publicación)]. IPCC, Ginebra, Suiza, 2007. 104 p.
- Jaramillo, V.J. **El ciclo global del carbono**. En: Martínez, J., Fernández Bremauntz, A. **Cambio climático: Una visión desde México**. Primera edición: México D.F. Instituto Nacional de Ecología. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2004. 525 p.
- Lal, R., Lorenz, K., Hüttl, R.F., Schneider, B.U., Von Braun, J. **Terrestrial Biosphere as a Source and Sink of Atmospheric Carbon Dioxide**. En: Rattan, L., Lorenz, K., Hüttl, R.F., Schneider, B.U., Von Braun, J. **Recarbonization of the Biosphere - Ecosystems and the Global Carbon Cycle**. Springer Science+Business Media B.V., 2012. p. 1-15.
- Larrea, C., Warnars, L. Ecuador's Yasuni-ITT Initiative: Avoiding emissions by keeping petroleum underground. **Energy for Sustainable Development**, 13: 219-223, 2009.
- León-Yáñez, S. **Estudio ecológico y fitogeográfico de la vegetación del páramo de Guamaní, Pichincha - Napo, Ecuador**. Tesis de Licenciatura en Ciencias Biológicas. Quito, Ecuador, Pontificia Universidad Católica del Ecuador, 1993.
- León-Yáñez, S. **La flora de los Páramos ecuatorianos**. En La Biodiversidad de los Páramos. Serie Páramo 7. Quito. GTP/ Abya Yala. 2000. p. 7-20.

- Lewis, S.L., Mahli, Y.R., Phillips, O.L. Fingerprinting the impacts of global change on tropical forests. **Philosophical Transactions of the Royal Society**, 359: 437-462, 2004 en Valencia, R., Condit, R., Muller-Landau, H.C., Hernandez, C., Navarrete, H. Dissecting biomass dynamics in a large Amazonian forest plot. **Journal of Tropical Ecology**, 25: 473–482, 2009.
- Lovelock, J.E. **The Ages of Gaia**. Primera edición: New York. W.W. Norton and Co., 1988. 156 p.
- Luteyn, J. L. Páramos: a checklist of plant diversity, geographical distribution, and geobotanical literature. **Memoirs of the New York Botanical Garden**, 84: 1-278, 1999.
- Martin del Campo Amezcua, J., Chagollán Amaral, F.A., Martín del Campo Becerra, I.B., López Aguilar, I., González Reynoso, F., Romo Ríos, L.A., Almaguer Ramirez, R. **Geografía**. Edición 2004: Zapopan. Umbral Editorial S.A. de C.V., 2004. 155 p.
- Mena, P., Balslev, H. Comparación entre la Vegetación de los Páramos y el Cinturón Afroalpino. **Reports from the Botanical Institute**, University of Aarhus. No. 12. 1986. 54 p.
- Mena, P., Medina G. **La biodiversidad de los páramos del Ecuador**. En: Los Páramos del Ecuador. Quito. Proyecto Páramo y Abya Yala. 2001. p. 23-48.
- Ministerio del Ambiente del Ecuador (MAE). **Sistema de Clasificación de los Ecosistemas del Ecuador Continental**. Quito. Subsecretaría de Patrimonio Natural, 2013. 235 p.
- Missouri Botanical Garden (MOBOT)**. MO Projects: Páramo [en línea]. Disponible en: http://www.mobot.org/mobot/research/paramo_ecosystem/introduction.shtml [fecha de consulta: 16 de marzo de 2015].
- Newson, L. The population of the Amazon basin in 1492: a view from the Ecuadorian headwaters. **Transactions of the Institute of British Geographers, New Series**, 21: 5-26, 1996 en Valencia, R., Condit, R., Muller-Landau, H.C., Hernandez, C., Navarrete, H. Dissecting biomass dynamics in a large Amazonian forest plot. **Journal of Tropical Ecology**, 25: 473–482, 2009.
- Quesada, C.A., Lloyd, J., Schwarz, M., Patino, S., Baker, T.R., Czimczik, C., Fyllas, N.M., Martinelli, L., Nardoto, G.B., Schmerler, J., Santos, A. J. B., Hodnett, M.G., Herrera, R., Luizao, F.J., Arneeth, A., et al. Chemical and physical properties of Amazon forest soils in relation to their genesis. **Biogeosciences**, 7: 1515–1541, 2009.
- Ramsay, P.M., Oxley, R. B. An Assessment of Aboveground Net Primary Productivity in Andean Grasslands of Central Ecuador. **Mountain Research and Development**, 21(2): 161–167, 2001.

- Schlesinger, W.H. **Biogeochemistry: An Analysis of Global Change**. Tercera edición: New York. National Academic Press, 2013.
- Tonneijck, F.H. **Volcanic ash soils in Andean ecosystems- Unravelling organic matter distribution and stabilization**. Tesis, Amsterdam, Holanda, Universidad de Amsterdam, 2009, p.183.
- Valencia, R., Condit, R., Muller-Landau, H.C., Hernandez, C., Navarrete, H. Dissecting biomass dynamics in a large Amazonian forest plot. **Journal of Tropical Ecology**, 25: 473–482, 2009.
- Villee, C.A., Solomon, E.P., Martin, C.E., Martin, D.W., Berg, L.R., Davis, P.W. **Biología**. Segunda edición: México D.F. Nueva Editorial Interamericana S.A. de C.V., 1992. 1404 p.
- Vitousek, P.M., Ehrlich, P.R., Ehrlich, A.H., Matson, P.A. Human appropriation of the products of photosynthesis. **BioScience**, 36: 368-373, 1986.
- Vitousek, P.M. Global environmental change: An introduction. **Annual Review of Ecology and Systematics**, 23: 1-14, 1992.
- World Land Trust (WLT). **Preliminary Assessment and Field Data Collection Procedures for the Páramo Ecosystem – Antisana, Ecuador**. Massachusetts: Winrock International, 2008. 26 p.

7. FIGURAS

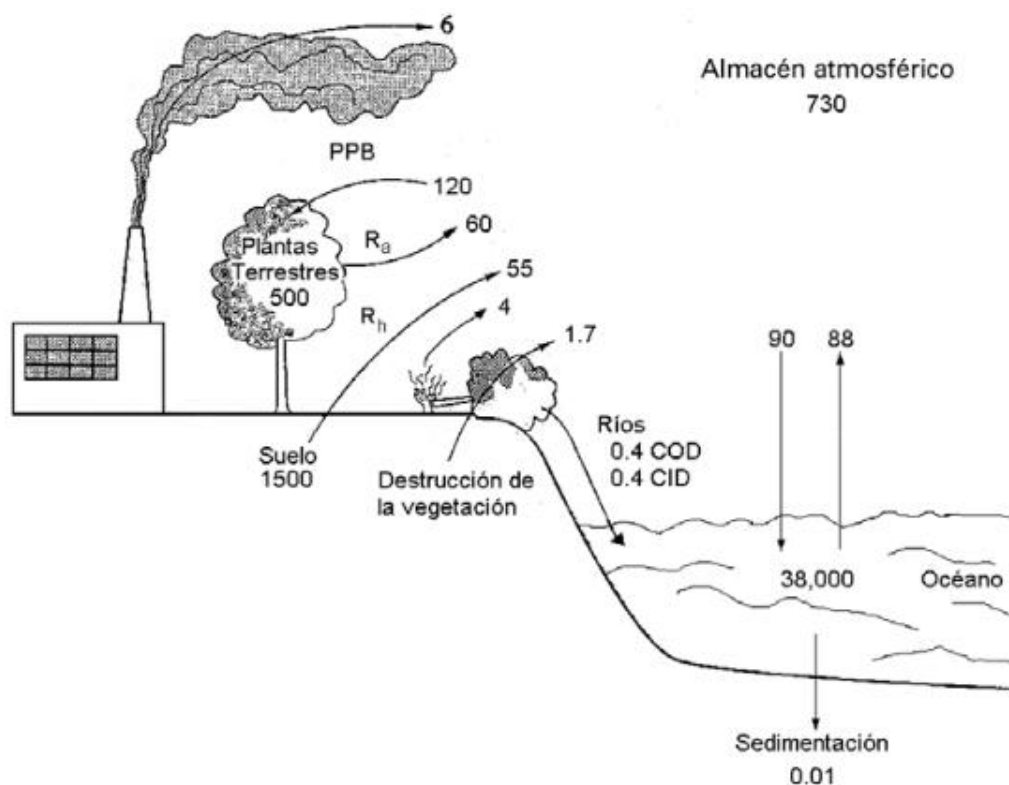


Figura 1. El ciclo global del carbono en la actualidad. Los almacenes están expresados en PgC y los flujos en PgC/año. PPB=Producción Primaria Bruta; R=Respiración autótrofa; R_h =Respiración heterótrofa; COD=Carbono Orgánico Disuelto; CID=Carbono Inorgánico Disuelto (Jaramillo, 2004).

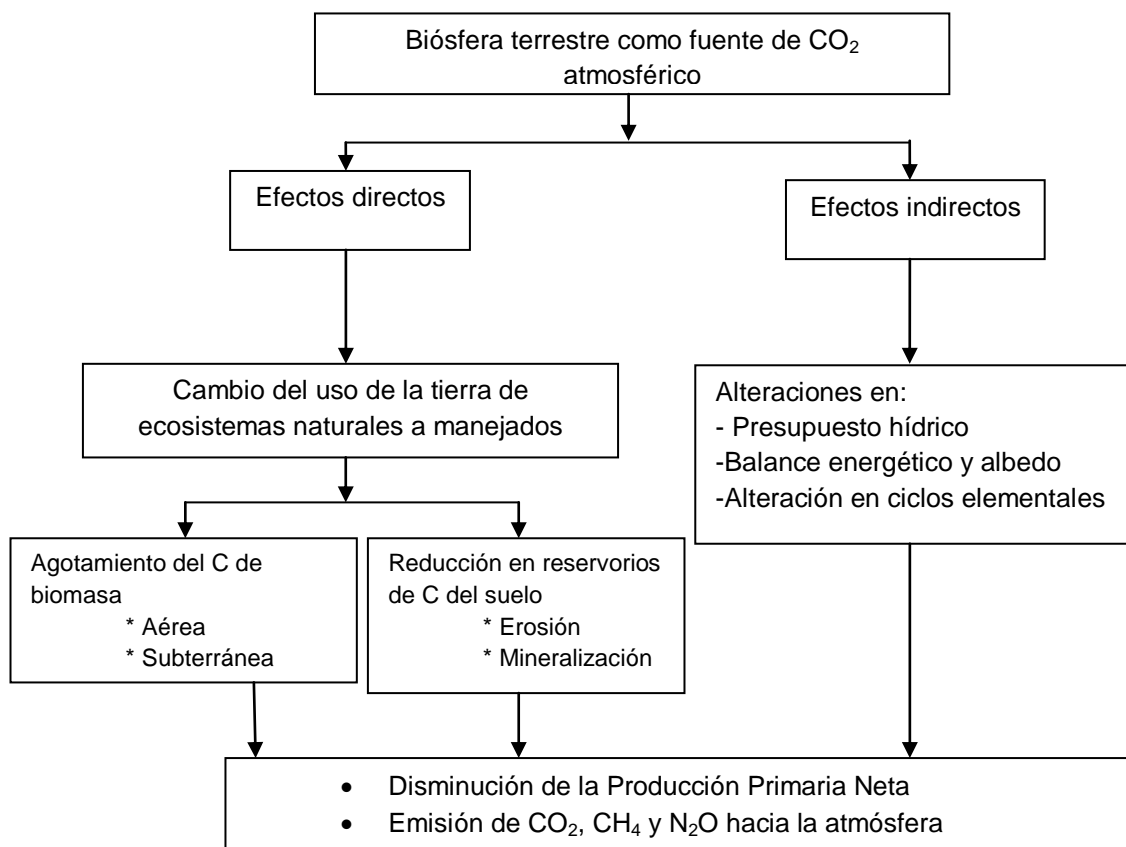


Figura 2. Alteraciones inducidas por el ser humano sobre la biósfera terrestre (Lal *et al.*, 2012).

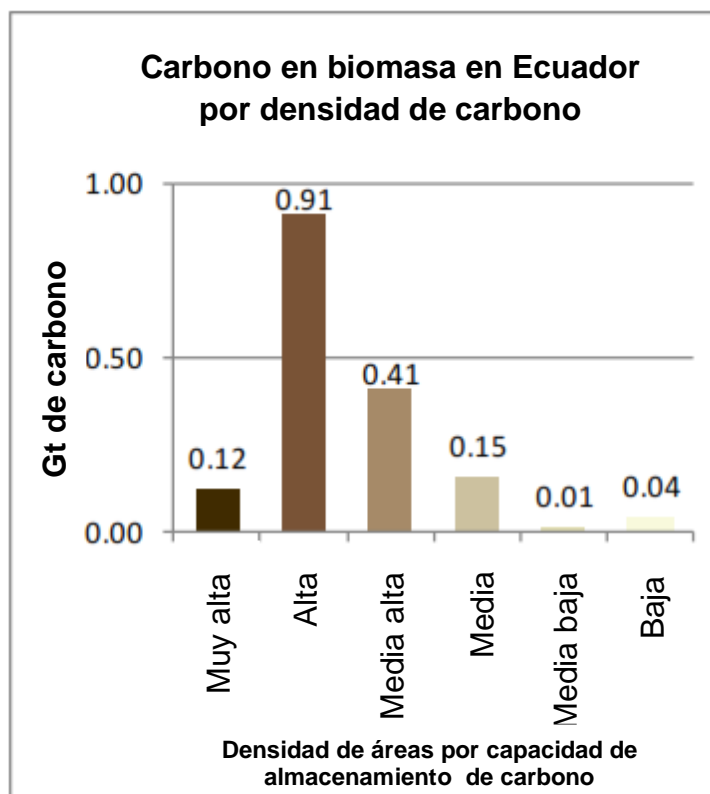


Figura 3. Distribución de reservas de carbono en la biomasa en Ecuador en áreas de diferente capacidad de almacenamiento de carbono en la biomasa (Bertsy, 2010).

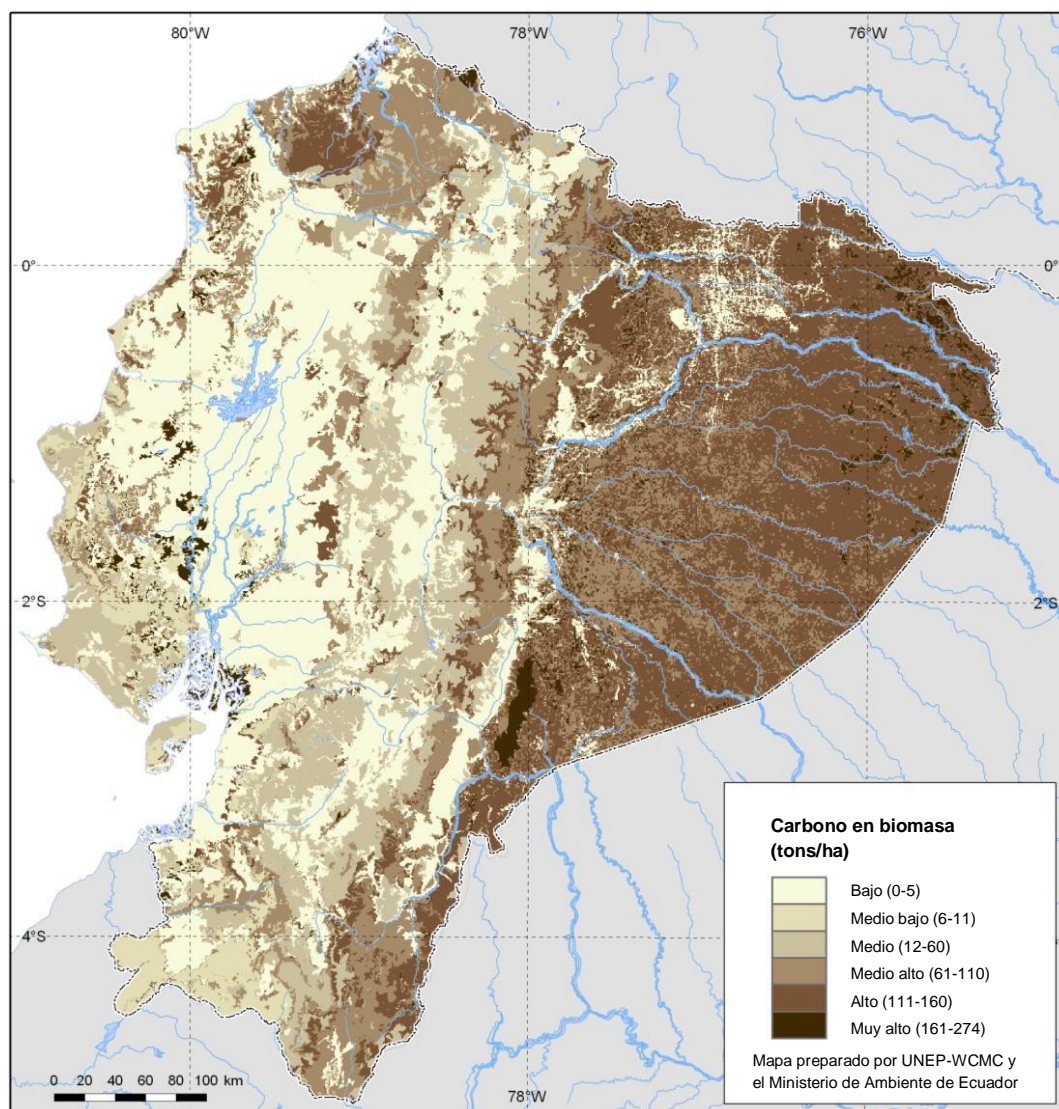


Figura 4. Mapa actualizado del carbono en la biomasa de la República del Ecuador (1.63 Gt) basado en datos de cobertura de vegetación y estimados de biomasa de fuentes nacionales e internacionales (Bertsy, 2010).

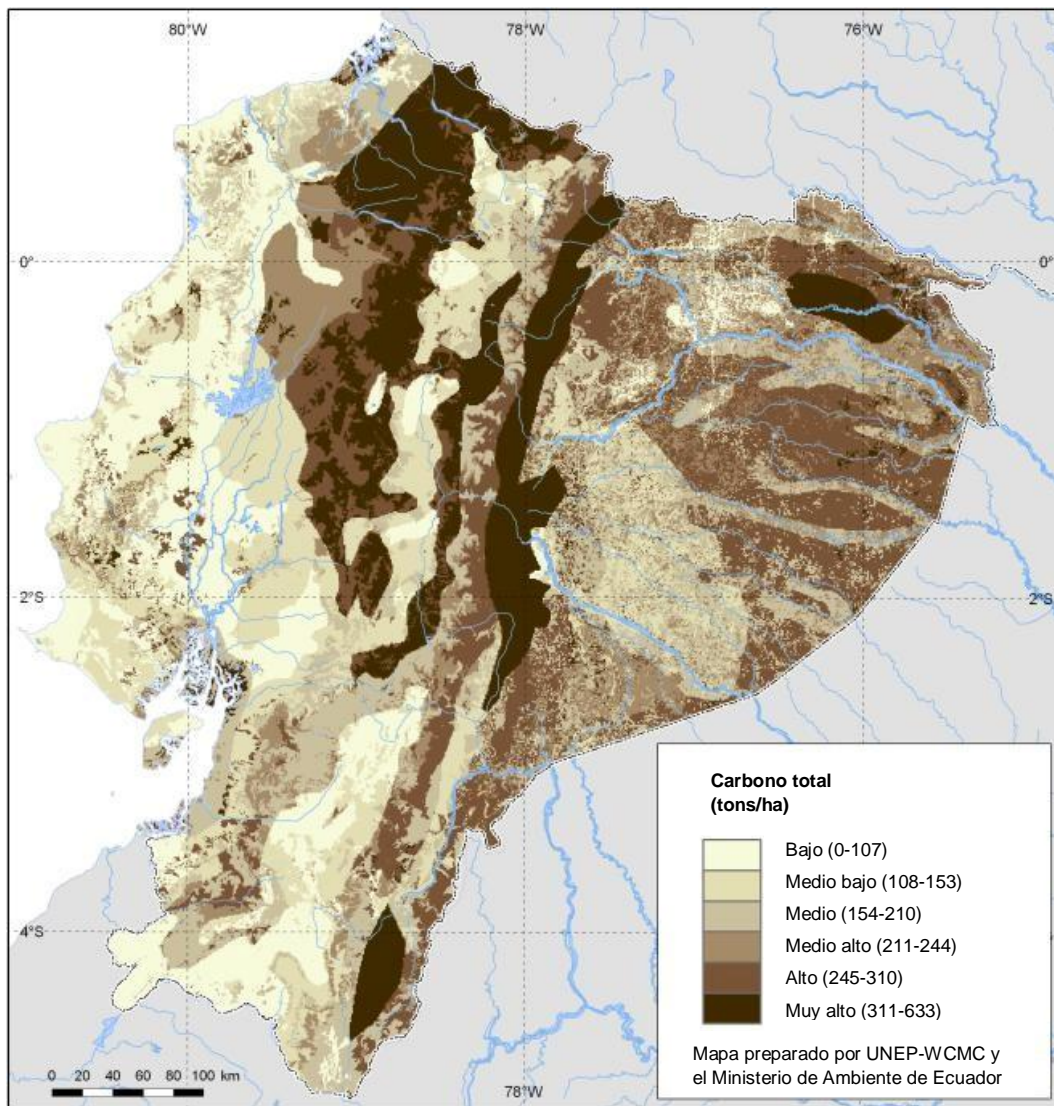


Figura 5. Densidad de carbono total en Ecuador (5.2 Gt) (Bertschy, 2010).

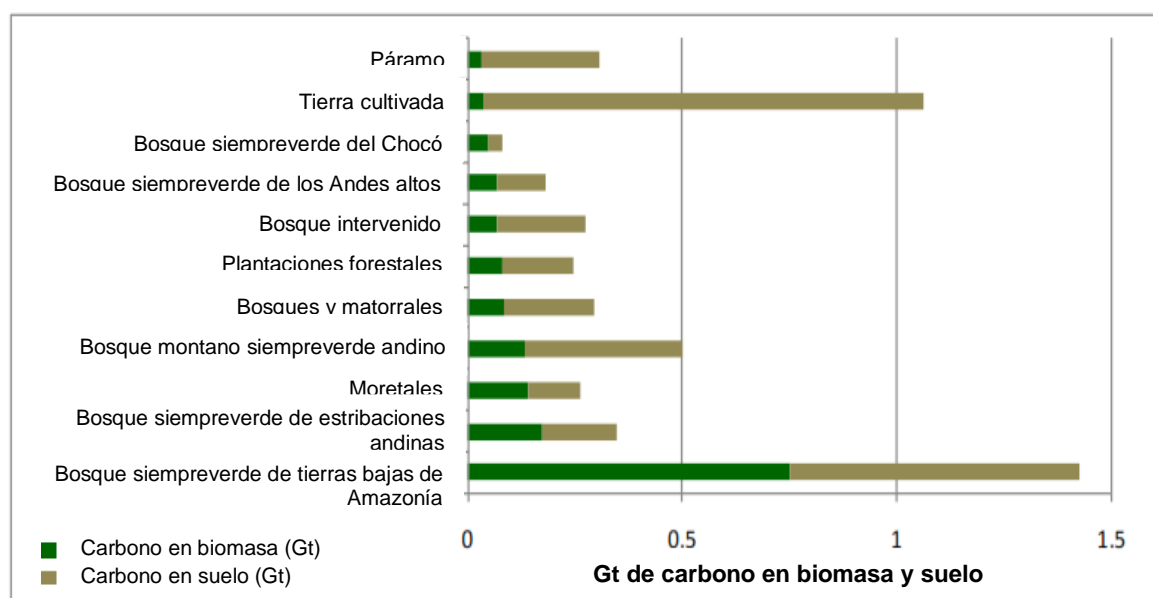


Figura 6. Carbono en biomasa y suelo en los tipos de cobertura terrestre en Ecuador (Bertsky, 2010).

8. TABLAS

Tabla 1. Distribución de reservas de carbono terrestre en Ecuador en las principales regiones continentales (Bertsky, 2010).

Región	% del área total	% carbono total en biomasa	% total de carbono
Oriente	33	58	36
Sierra	41	28	46
Costa	26	13	18