

**CARBONO ALMACENADO EN BIOMASA AÉREA Y SUELO EN EL
ECOSISTEMA DE PÁRAMO.**

MONOGRAFIA

ABEL EFREN CASTAÑEDA MARTIN

**UNIVERSIDAD NACIONAL ABIERTA Y A DISTANCIA - UNAD.
ESCUELA CIENCIAS AGRÍCOLAS PECUARIAS Y DEL MEDIO AMBIENTE –
INGENIERÍA AGROFORESTAL
Bogotá, D.C.**

**CARBONO ALMACENADO EN BIOMASA AÉREA Y SUELO EN EL
ECOSISTEMA DE PÁRAMO.**

MONOGRAFÍA

ABEL EFREN CASTAÑEDA MARTIN

**Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de
Ingeniero Agroforestal**

DIRECTORA

CARMEN ROSA MONTES P.

**UNIVERSIDAD NACIONAL ABIERTA Y A DISTANCIA - UNAD.
ESCUELA CIENCIAS AGRÍCOLAS PECUARIAS Y DEL MEDIO AMBIENTE**

BOGOTÁ, D.C.

2016

APROBADO

CARMEN ROSA MONTES PULIDO

Ingeniera Forestal (Msc, PhD)

Directora

Jurado 1

Jurado 2

CONTENIDO

1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	2
2. OBJETIVOS	2
2.1. Objetivo General	2
2.2. Objetivos Específicos	3
3. JUSTIFICACIÓN	3
4. METODOLOGÍA	4
5. ESTADO DEL ARTE	4
5.1. Ciclo del carbono	5
5.2. Dióxido de carbono	7
5.3. ¿Qué es el cambio climático?	11
5.4. Mayores reservas de carbono en el planeta	14
5.5. Métodos de cuantificación de carbono en biomasa aérea y suelo	17
5.5.1. Métodos empleados para estimar biomasa	17
5.5.2. Métodos para estimar carbono en suelo.	19
5.6. Páramo	20
5.7. Suelos en páramos	25
5.8. Carbono almacenado en la biomasa aérea del páramo	27
5.9. Carbono almacenado en suelo	30
5.10. Actividades agropecuarias que afectan el carbono del suelo almacenado en el páramo. 32	
6. RECOMENDACIONES PARA GESTIÓN DEL CARBONO EN PÁRAMOS	35
7. LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN	38
8. CONCLUSIONES	40
9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	42

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Carbono orgánico almacenado en biomasa aérea en paramos de Suramérica	28
Tabla 2. Carbono orgánico del suelo, bajo vegetación natural y bajo cultivos en trópico suramericano	31

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ciclo del Carbono.	7
Figura 2. Ciclo del dióxido de carbono.	8
Figura 3. Comportamiento temporal de las concentraciones de CO ₂ en el planeta.	10
Figura 4 Ciclo global del carbono en los años 1990. Las unidades son Petagramos de carbono (PgC) por año.	15
Figura 5. Vista general de páramo de Sumapaz, Bogotá D.C., Cundinamarca.	20
Figura 6. Vegetación típica de páramo.	21
Figura 7. Localización de páramos en centro y Suramérica	23
Figura 8. Suelos ricos en materia orgánica en el páramo de Sumapaz	26
Figura 9. a y b. Uso agropecuario del suelo en páramo de Usme y Sumapaz	33
Figura 10. Ciclo general de manejo de suelos en páramo	35

LISTA DE ABREVIATURAS UTILIZADAS

C	Carbono
CID	Carbono Inorgánico Disuelto
CMCC	Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático
COS	Carbono orgánico del suelo
Co ₂	Dióxido de Carbono
ECM	Error Cuadrático Medio
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura
Gt	Gigatoneladas
H	Hidrógeno
ha	Hectáreas
INE	Instituto Nacional de Ecología
IPCC	Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático
LIBS	Espectroscopia de plasma inducida por laser
mm/año	Milímetros por metro durante un año
N	Nitrógeno
NIR	Reluctancia infrarroja cercana
O	Oxígeno
P	Fósforo
Pg	Pentágramos
PgC	Pentágramos de Carbono
PPB	Producción Primaria Bruta
PPN	Producción Primaria Neta
Ppmv	Partes por millón por volumen
PRESS	Suma de los cuadrados de los residuos de los predichos
RES	Error residual estándar
R _h	Respiración heterótrofa
S	Azufre
SEE	Error estándar de la estimación
t	Toneladas
TMA	Temperatura media anual
UNEP	Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente
UNFCC	Convención Marco sobre Cambio Climático
ZCIT	Zona de convergencia intertropical

INTRODUCCIÓN

Ecosistemas tropicales de alta montaña, como el páramo, tienen una importancia trascendental en la dinámica del carbono. Sin embargo, son escasos los estudios que se han realizado para cuantificarlo tanto en la biomasa aérea, como el almacenado en el suelo. El presente estudio pretende integrar los aspectos fundamentales que determinan el carbono almacenado en el ecosistema de páramo, al igual que resaltar los factores que benefician o perjudican el proceso de captura de carbono a la luz de las diversas intervenciones antrópicas realizadas en estos ecosistemas. Se alcanza este propósito a través de la revisión de artículos científicos provenientes de revistas de alto impacto en el tema que cuantifican el carbono almacenado en la biomasa aérea y en el suelo, examinan las actividades antrópicas que afectan las reservas de carbono y mencionan algunas prácticas agrícolas para mitigar las emisiones. Finalmente, se plantean futuros estudios que contribuyen a incrementar el conocimiento de la dinámica del carbono en el páramo. El documento se estructura a partir de la presentación del problema de investigación, luego el planteamiento de objetivo general y específico y una justificación. Posteriormente se explica la metodología seguida para la revisión de artículos seleccionados; seguidamente se expone un rápido marco general sobre el ciclo del carbono, cambio climático, mayores reservas de carbono en el planeta, métodos para cuantificación de carbono en biomasa aérea y suelo. Se cierra este marco conceptual con una caracterización del ecosistema de páramo. Después se analiza el carbono almacenado en biomasa aérea y suelo, así como la incidencia de las actividades antrópicas en el carbono. En consecuencia, se esbozan algunas recomendaciones para la gestión del carbono en páramos y líneas futuras de investigación. El documento finaliza mencionando como conclusión que es necesario definir políticas claras para la delimitación, conservación y restauración de los

páramos a fin de evitar la degradación de estos ecosistemas y por ende la liberación de cantidades perjudiciales incrementando los efectos del cambio climático en nuestro país.

1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

El ecosistema de páramo está integrado principalmente por gramíneas cespitosas entre las que crecen hierbas y arbustos en forma de rosetas acaulescentes, musgos y líquenes (Hofstede, 2001). Bajo esta cobertura natural los suelos tienen altos contenidos de materia orgánica. El clima frío y húmedo y la baja presión atmosférica favorecen la acumulación de materia orgánica en el suelo. En sitios húmedos (>900 mm/año), es frecuente el contenido de carbono orgánico mayor a 40%. (Buytaert *et al.*, 2007). A pesar de la importancia de este ecosistema en el ciclo global de carbono (Ward et al, 2014) no se dispone de una síntesis las estimaciones que permitan diferenciar si la biomasa vegetal o el suelo almacenan mayor cantidad de carbono en el páramo. Esta revisión pretende responder a dos preguntas que inquietan a los tomadores de decisiones para definir la gestión del territorio en este ecosistema 1) ¿Cuál de los componentes del páramo es más eficaz en el almacenamiento de carbono? y 2) Qué implicaciones tienen las actividades agropecuarias en el carbono almacenado en páramo?

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo General

Describir los aspectos fundamentales relacionados con el carbono almacenado en el ecosistema de páramo, su función en el proceso de captura de carbono y su contribución a la mitigación del cambio climático.

2.2. Objetivos Específicos

1. Recopilar referencias bibliográficas actualizadas, artículos científicos, tesis de grado y textos generados en el contexto nacional e internacional para establecer la importancia del proceso desarrollado a través de la captura de carbono, en los ecosistemas de páramo de Colombia.
2. Revisar las estimaciones de carbono en biomasa aérea y suelo reportadas por la literatura para el ecosistema de páramo.
3. Identificar las prácticas que reducen el contenido de carbono almacenado en el páramo, como lo son las actividades agrícolas.

3. JUSTIFICACIÓN

La medición y monitoreo de carbono en ecosistemas de alta montaña se ha tornado un importante tópico de investigación en los años recientes, como resultado del cambio climático. Particularmente, es importante su cuantificación para disponer de datos empíricos en las negociaciones para reducir las emisiones de gases efecto de invernadero asociadas a deforestación y degradación forestal (REED) (Goetz & Dubayah, 2011). Así mismo, contribuye a conocer y mejorar la cuantificación de sumideros y flujos de carbono en estos entornos (Hall et al., 2011; Houghton, 2007; Herold & Skutsch, 2011).

Aunque los ecosistemas tropicales de alta montaña se distinguen por su provisión de servicios hidrológicos (Martínez et al., 2009) y la protección de la biodiversidad (Martínez et al., 2009; Gentry, 1992) mientras que la capacidad de almacenamiento de carbono ha sido menos explorada. Así que disponer de una síntesis del carbono almacenado en el páramo podría contribuir a destacar la función de este ecosistema en la política internacional de cambio climático. Por lo que puede ayudar a fundamentar la adopción de incentivos

económicos para apoyar un mejor manejo de los recursos naturales en estos ecosistemas (Ward et al., 2014).

4. METODOLOGÍA

Como primera actividad se realizó la revisión de bases de datos como *Science direct*, *Springerlink*, *Willey online library* y *google scholar*, para lo cual se utilizaron como palabras clave: *paramo aboveground biomass*, *high andes aboveground biomass*, *high andean carbon soil*, *tropical montane cloud forest*, *carbón stocks*, *soil organic carbon*, *puna*, *tillage carbón andes*, *paramo grassland*. De esta búsqueda resultaron cerca de 120 artículos en los que se encontró información que permitió responder a las preguntas planteadas en el problema de investigación, al igual que inferir algunas recomendaciones prácticas para disminuir las emisiones de carbono en el páramo por actividades agrícolas: posteriormente se realizó la lectura crítica de estos artículos y se extrajeron cerca de 90 referencias bibliográficas con las cuales se tuvo un acercamiento al estado actual del tema de investigación. Finalmente, se proponen algunas recomendaciones frente al abordaje e importancia que debe tener el páramo como ecosistema captador de carbono y reductor de los gases de efecto invernadero, se plantean algunas líneas futuras de investigación sobre fijaciones de carbono en páramo; para que desde este ejercicio académico, propuesto por la UNAD, se contribuya a la actualización temática y construcción del conocimiento.

5. ESTADO DEL ARTE

A lo largo de este capítulo se presentan algunas definiciones que permiten comprender los aspectos fundamentales relacionados con el carbono y el ecosistema de páramo:

5.1. Ciclo del carbono

Según Mojica (2013) “el carbono (C) es un elemento fundamental de los compuestos orgánicos, en los que se combina con nitrógeno (N), fósforo (P), azufre (S), oxígeno (O) e hidrógeno (H) para constituir las moléculas más importantes para la vida”. Uno de los procesos fundamentales en la función de los ecosistemas es el flujo de carbono, el cual es integrado por las plantas a través de la fotosíntesis, una parte de este es capitalizada como carbohidrato en la biomasa vegetal o en su estructura ecológica oxidándose a CO₂ a través de la respiración o persistiendo durante mucho tiempo (esqueletos, madera, humos, hojarasca, petróleo, etc) (García, 2003); este ciclo se puede sintetizar como lo especifica Vásquez y Buitrago (2011):

El carbono que se encuentra en forma de gas en la atmósfera es absorbido por las plantas verdes a través de la fotosíntesis. Mediante este proceso, producen alimento y liberan el oxígeno necesario para la vida. El carbono pasa a otros seres vivos como alimento en las redes tróficas y retorna a la atmósfera naturalmente, en forma de gas, por medio de la respiración. Cuando la materia orgánica que lo contiene queda sepultada y sin contacto con el oxígeno se forman los depósitos fósiles, donde el carbono se puede convertir en carbón, petróleo o gas natural. Su aprovechamiento para la industria y transporte, principalmente, genera una sobrecarga de dióxido de carbono (CO₂) en la atmósfera, lo que acelera los efectos del cambio climático en el planeta. (p. 100)

Según el Instituto Nacional de Ecología – INE (2004) “el movimiento de C ocurre a diferentes escalas y espacio-temporales, que van desde el nivel molecular, pasando por el organismo hasta el global” (p.13). Según este mismo autor el C al unirse con la molécula de oxígeno constituyen el bióxido de C (CO₂) y este es fundamental para la regulación de la temperatura del planeta debido a sus propiedades como gas invernadero el cual ha compuesto

la atmosfera desde hace millones de años. La importancia del CO₂ y del vapor de agua en la atmosfera se basa en la regulación de la temperatura del planeta y por lo tanto la ausencia de estos dos componentes la temperatura promedio actual del planeta sería aproximadamente 33°C más fría y, por lo tanto, el planeta estaría congelado (Schlesinger, 1997).

A través de los estomas de las plantas superiores se capta el dióxido de carbono (CO₂) el cual es procesado a través de la fotosíntesis y es fijado a través de los carbohidratos que a su vez se incorpora a los tejidos vegetales (hojas, raíces, tejidos leñosos); es conocido como Producción Primaria Bruta (PPB) la cual se ha estimado de forma global en 120 PgC/año (1Pg [Petagramo] = 10¹⁵ g). De este proceso se libera, a través de la respiración autotrófica (R_a) generada por los tejidos vegetales, cierta cantidad de CO₂ que regresa a la atmosfera y se estima que es la mitad de la PPB (60 PgC/año) al cual se le conoce como Producción Primaria Neta (PPN). El crecimiento anual de las plantas es la diferencia entre el carbono fijado y el respirado. Se considera que en un periodo determinado de tiempo casi todo el C fijado por PPN es regresado a la atmosfera a través de procesos como respiración heterótrofa (R_h), que incluye descomponedores de materia orgánica, y a los herbívoros; además se tiene la combustión por fuegos naturales o antropogénicos. La biomasa muerta es incorporada al detritus y a la materia orgánica del suelo, convirtiendo este en un gran contenedor de carbono, que es liberado a la atmosfera a través de la respiración a diferentes velocidades, proceso que depende de sus características químicas. La diferencia entre carbono fijado por la PPN y las perdidas por R_h es conocida como producción neta del ecosistema PNE. Todo el conjunto de carbono determinado por perdidas a nivel global por acción del fuego, la cosecha o la remoción, el transporte por los ríos hasta el océano y la erosión es conocido como producción neta del bioma PNB (INE, 2004). En la **mientos de** los procesos del C.

Figura 1 se puede identificar las diferentes variables y comportamientos de los procesos del C.

Figura 1. Ciclo del Carbono.

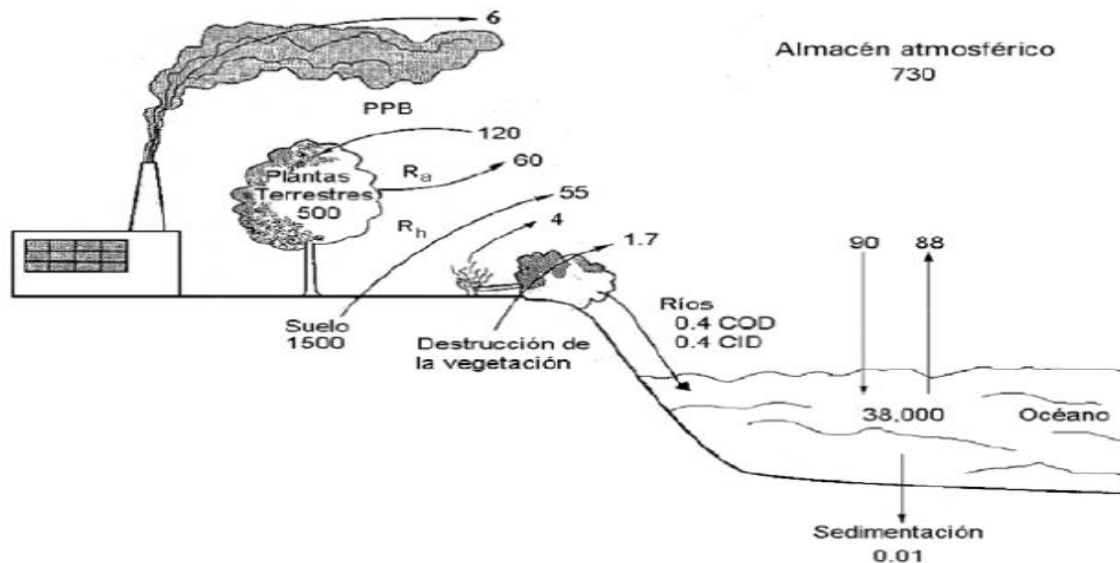


Figura 1. El ciclo global del carbono en la actualidad. Los almacenes están expresados en Pg C y los flujos en Pg C/año. PPB = producción primaria bruta; R_a = respiración autótrofa; R_h = respiración heterótrofa; COD = carbono orgánico disuelto; CID = carbono inorgánico disuelto. Fuente: Esquema modificado de Schlesinger 1997, y actualizado con información de IPCC 2001.

Fuente: Instituto Nacional de Ecología – INE (2004)

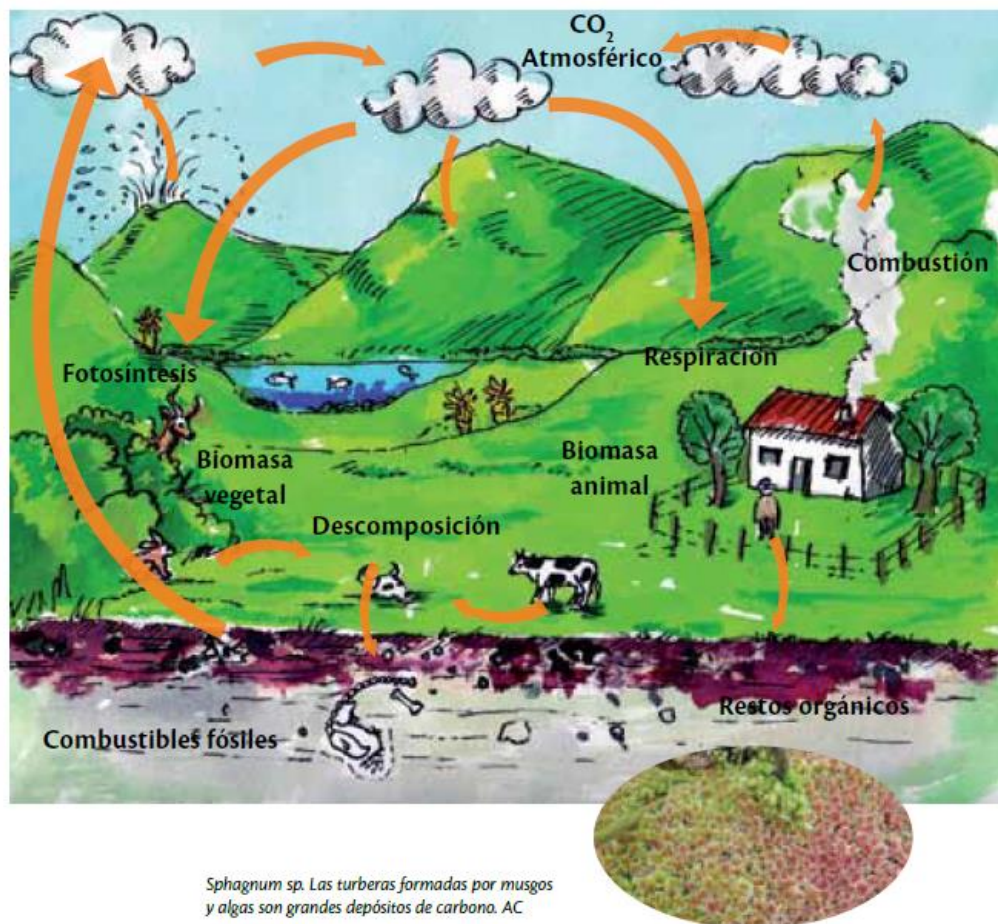
5.2. Dióxido de carbono

Según IPCC (2013) define el dióxido de carbono CO_2 como:

(...) gas de origen natural, subproducto también de la combustión de combustibles fósiles procedentes de depósitos de carbono fósil, como el petróleo, el gas o el carbón, de la quema de biomasa, y de los cambios de uso del suelo y otros procesos industriales (por ejemplo, producción de cemento). Es el principal gas de efecto invernadero antropógeno que afecta al equilibrio radiativo de la Tierra. Es el gas utilizado como referencia para medir otros gases de efecto invernadero, por lo que su potencial de calentamiento global es igual a 1. (p. 190)

Por su parte el INE (2004) establece que “en la naturaleza, billones de toneladas de carbono en forma de CO_2 son emitidas a la atmósfera anualmente por medio de los procesos naturales (fuentes) y son absorbidas por los océanos y la biomasa viviente (sumideros)”. Este gas forma parte del ciclo global de carbono y por lo tanto su función se restringe a procesos geoquímicos y biológicos. Se considera que el CO_2 puede estar en la atmósfera entre 5 a 200 años (Ibid, 2004). En la **Figura 2** se puede observar el comportamiento del dióxido de carbono.

Figura 2. Ciclo del dióxido de carbono.



Fuente: Vásquez y Buitrago (2011).

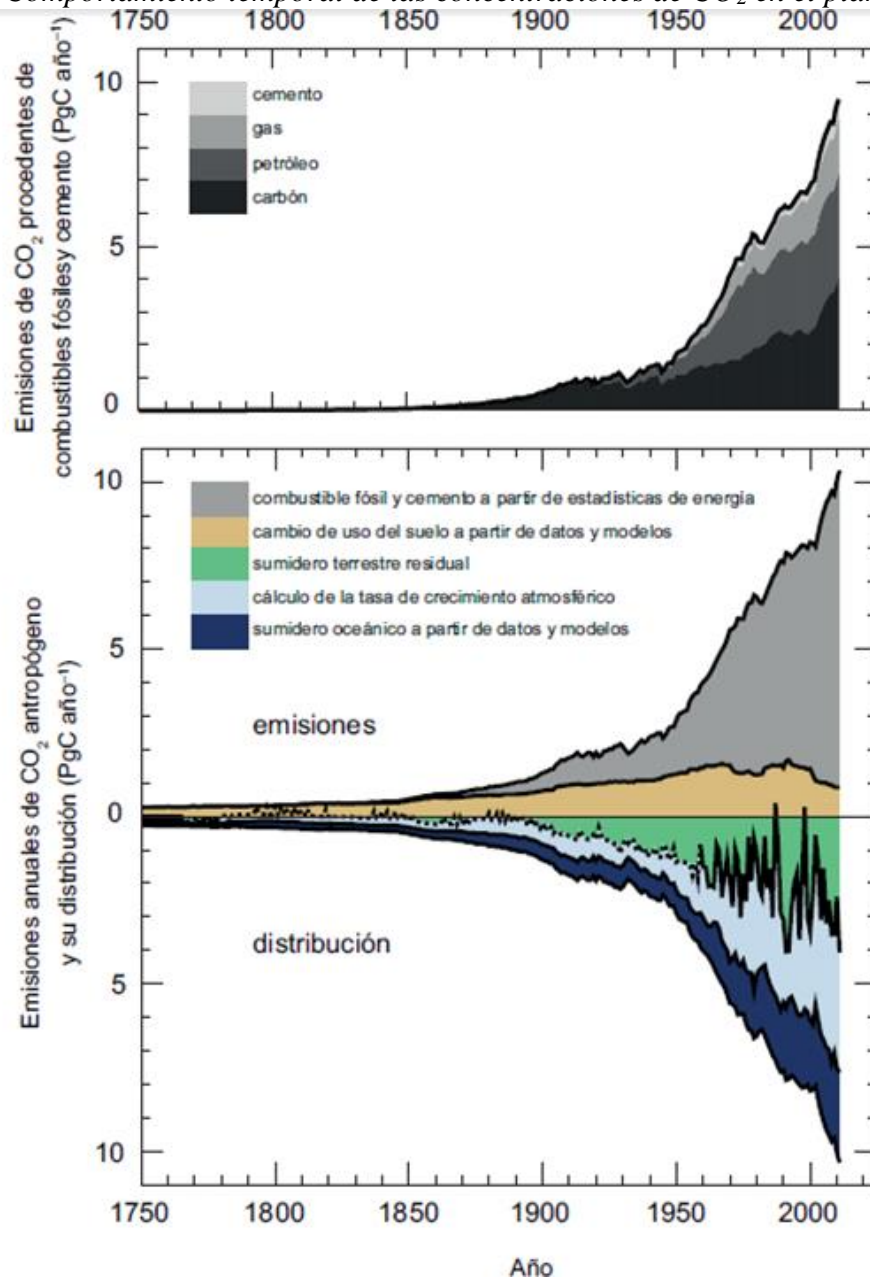
Por otra parte, el grupo intergubernamental de expertos sobre cambio climático IPCC, ha determinado que en el último milenio se han incrementado las concentraciones de CO_2 a

causa de las acciones antropogénicas ligadas a la industrialización fomentada, principalmente, desde 1750, como se puede observar en la **Figura 3** “El CO₂ se encuentra bien mezclado en la atmósfera, y su concentración refleja las emisiones desde fuentes situadas en todas partes del mundo.” (IPCC, 2002, p. 6).

En la **Figura 3** se puede identificar la influencia de las actividades antropógenas en relación con la producción y acumulación de CO₂, como lo determina IPCC (2013):

De los 555 [470 a 640] PgC liberados a la atmósfera por las emisiones derivadas de combustibles fósiles y del uso del suelo entre 1750 y 2011, 240 [230 a 250] PgC se acumularon en la atmósfera, tal como se estimó con mucha precisión a partir del aumento observado de las concentraciones de CO₂ en la atmósfera de 278 [273 a 283] ppm₁₀ en 1750 a 390,5 [390,4 a 390,6] ppm en 2011. La cantidad de CO₂ en la atmósfera aumentó 4,0 [3,8 a 4,2] PgC año⁻¹ en la primera década del siglo XXI. La distribución del incremento de CO₂ atmosférico observado aumenta con la latitud, lo que demuestra de forma clara que el incremento está impulsado por emisiones antropógenas ocurridas principalmente en los países industrializados al norte del ecuador. (p. 51)

Figura 3. Comportamiento temporal de las concentraciones de CO₂ en el planeta.



Fuente: IPCC, 2013.

El IPCC (2001) estableció que el aumento en la concentración de dióxido de carbono está directamente relacionado con las actividades humanas, específicamente las relacionadas con la combustión combustibles fósiles, la deforestación, la quema de biomasa y los que consumen energía como la producción de cemento. La mayor parte de las emisiones durante los últimos 20 años provienen de la quema de combustibles fósiles y el resto (10 a 30%)

proviene de cambios en los usos de la tierra, especialmente deforestación. Determinan que el ritmo medio de aumento de emisiones anuales es del 0.4%. De la misma forma el IPCC calcula que:

Para el año 2100, los modelos de ciclo de carbono proyectan concentraciones de CO₂ en la atmósfera entre 540 y 970 ppm; para los escenarios ilustrativos del informe Especial sobre Escenarios de Emisiones (IE-EE), estas concentraciones son mayores en 90 y 250%, respectivamente, que la registrada en 1750 (IPCC 2001, p. 6).

Las elevadas concentraciones de gases efecto invernadero ha generado cambios en el clima reflejados en aumento de las temperaturas, cambios en las precipitaciones, la elevación del nivel del mar y la creciente frecuencia de los fenómenos climáticos extremos que producen mayor variabilidad climática (IPCC, 2002, p. 6).

5.3. ¿Qué es el cambio climático?

El clima involucra “un conjunto de variables complejas característica de un sistema conformado por atmósfera, hidrosfera, criosfera, biosfera y superficie de la tierra” (IPCC, 2007) y es concebido por el IPCC (2013) en un sentido amplio como “[...] el estado del sistema climático en términos tanto clásicos como estadísticos”. En sentido restringido, el IPCC (2013), lo define como:

(...) el estado promedio del tiempo y, más rigurosamente, como una descripción estadística del tiempo atmosférico en términos de los valores medios y de la variabilidad de las magnitudes correspondientes durante períodos que pueden abarcar desde meses hasta millares o millones de años. (p. 189)

Por su parte el cambio climático hace referencia a los regímenes climáticos irregulares, como la elevación del nivel del mar, desertificación y sequía,

incremento de inundaciones, alteración de regímenes climáticos regionales (el niño y la niña), intensificación de fenómenos meteorológicos (ciclones, tifones y huracanes), deshielo de regiones polares, alteración de ecosistemas (blanqueamiento de arrecifes y la acidificación de los océanos) y a los eventos extremos que pueden ser atribuidos a las emisiones de gases efecto invernadero producto de actividades humanas que originan el calentamiento del planeta. Constituye una crisis mundial, sin embargo, las respuestas aportadas están enmarcadas en soluciones científicas y económicas más que en dimensiones humanas (Skinner, 2012; Ortega, 2011).

Es importante precisar que el IPCC (2014) resalta que “La influencia humana en el sistema climático es clara, y las emisiones antropógenas recientes de gases de efecto invernadero son las más altas de la historia. Los cambios climáticos recientes han tenido impactos generalizados en los sistemas humanos y naturales”. Según IDEAM (2014) estos gases:

(...) absorben de manera eficaz la radiación infrarroja emitida por la superficie de la Tierra, por las nubes y por la propia atmósfera debido a los mismos gases. La atmósfera emite radiación en todas direcciones, incluida la descendente hacia la superficie de la Tierra. De este modo, los gases de efecto invernadero atrapan el calor en el sistema superficie-tropósfera.

El cambio climático se puede deber a procesos naturales internos o a cambios del forzamiento externo, o bien a cambios persistentes *antropogénicos* en la composición de la *atmosfera* o en el *uso de las tierras*. Se debe tener en cuenta que la *Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático* (CMCC), en su Artículo 1, define “cambio climático” como: “un cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmosfera mundial y que se suma a la variabilidad

natural del clima observada durante periodos IPCC de tiempo comparables”. La CMCC distingue entre “cambio climático” atribuido a actividades humanas que alteran la composición atmosférica y “variabilidad climática” atribuida a causas naturales (IPCC, 2002, p. 70).

Sobre el tema se han creado varias iniciativas y organizaciones para abordar y tomar decisiones internacionales, tanto científicas, como políticas y económicas: la Convención Marco sobre Cambio Climático (UNFCCC, por sus siglas en ingles), el programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (UNEP) y el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés). Dentro de las más importantes medidas de mitigación se incluyen la fijación de carbono, los mecanismos de desarrollo limpio y aplicación conjunta y el uso de fuentes renovables y no contaminantes de energía como la solar, eólica y geotérmica (VijayaVenkataRaman, 2012).

Han pasado casi 25 años, desde la conferencia de Rio de Janeiro en junio de 1992, donde se llegó a un acuerdo internacional para: 1) preservar un bien colectivo como el clima, así como compartir el esfuerzo de reducir las emisiones de gases que producen el efecto invernadero, esencialmente el carbono, y 2) promover una política de precios para modificar los comportamientos de productores y consumidores en dirección de tecnologías y bienes que contenga menos carbono. Hoy los debates, más que sobre emisiones de CO₂, se centran en la producción, los bosques, energía, industria, transporte, ciudades, agricultura y adaptación. (Damian, 2012).

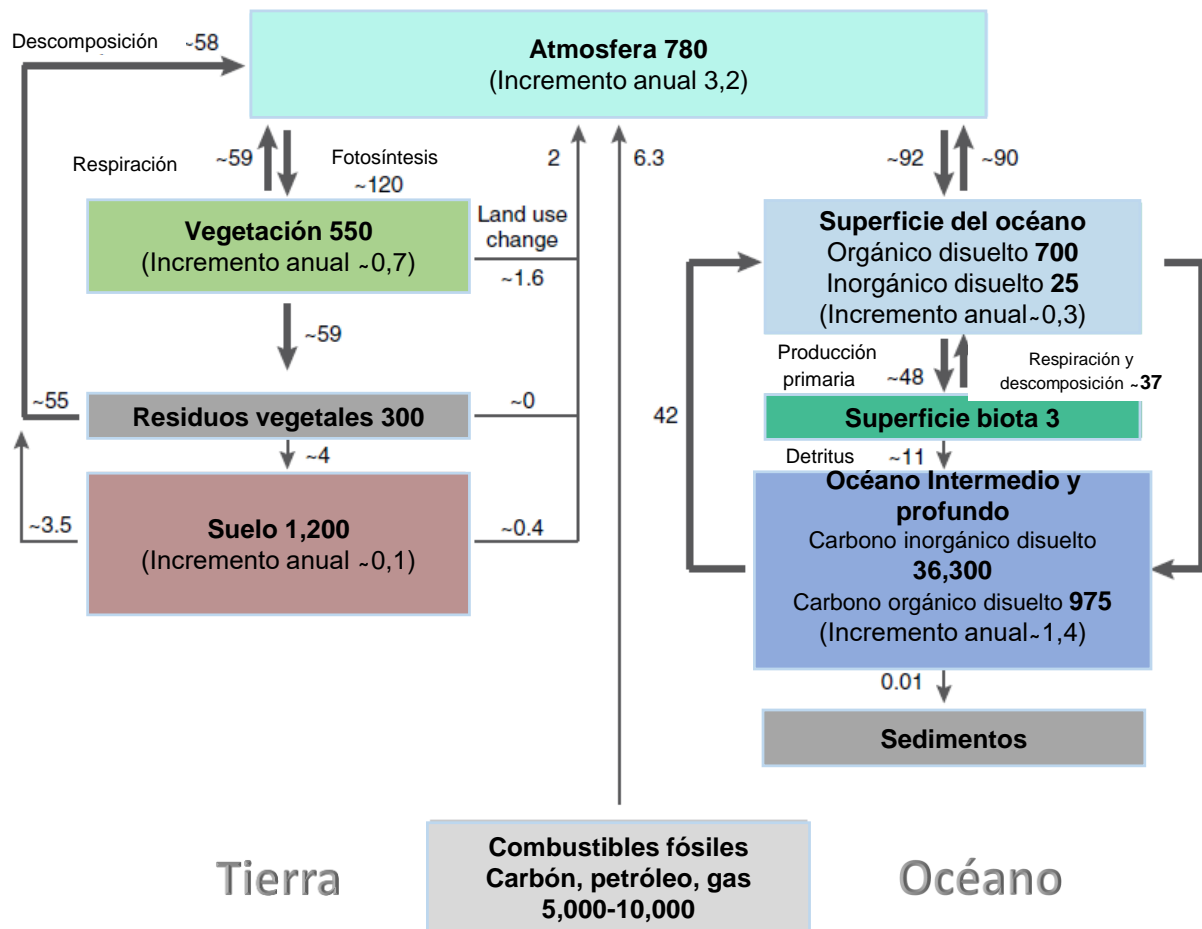
Sin embargo, es evidente que falta más trabajo orientado a la participación decidida de países productores de gases efecto invernadero, hacia la implementación de políticas públicas en todos los niveles del desarrollo, hacia un cambio significativo en el modelo económico y de producción extractivista y hacia una transformación permanente del

pensamiento de las personas que desde sus actividades cotidianas consideran que no hacen un aporte significativo en la degradación del planeta; el cambio climático es real y es responsabilidad de todos.

5.4. Mayores reservas de carbono en el planeta

El ciclo global del carbono se presenta de manera simplificada en la **Figura 4** las cuatro mayores reservas son la atmósfera, océanos, existencias de combustibles fósiles, ecosistemas terrestres, incluyendo vegetación y suelos. Las cantidades anuales de carbono intercambiadas por procesos como erosión, vulcanismo y formación de rocas sedimentarias durante milenios, han sido pequeñas y generalmente ignoradas en las existencias de carbono cuantificadas (Sundquist & Visser, 2004).

Figura 4 Ciclo global del carbono en los años 1990. Las unidades son Petagramos de carbono (PgC) por año.



Fuente: Houghton, 2007.

La atmosfera. En el 2005 el promedio global de concentración de carbono (CO_2) estuvo cercano a $0,0380\%$ ppmv (partes por millón por volumen), equivalente a aproximadamente 805 Petagramo de carbono (PgC) ($1 \text{ Pg} = 1 \text{ petagramo} = 10^{15} \text{ g} = 10^9$ toneladas métricas). El metano ($\sim 1,7$ partes por millón) (ppm), monóxido de carbono ($\sim 0,1$ ppm) y metanos los cuales son gases que, aunque contienen carbono, desde el punto de vista de equilibrio de carbono global pueden ser ignorados (Houghton, 2007).

Los océanos. La cantidad total de carbono en los océanos del mundo es aproximadamente 38000 Pentagramos de carbono (PgC). Es decir, cerca de 50 veces más carbono que en la atmósfera. La mayoría del carbono del océano se encuentra en aguas intermedias y profundas. Únicamente entre 700-1000 PgC están en la superficie del océano en contacto directo con la atmósfera. También 6000 PgC de carbono reactivo se encuentra en los sedimentos del océano. A pesar que este último es importante en la determinación de concentración de CO₂ a largo plazo en la atmósfera y océanos, es menos importante en el ciclo del carbono en el corto plazo (Houghton, 2007).

La mayoría de los gases no son solubles en agua por lo cual predominan en la atmósfera. Por ejemplo, solo cerca del 1% del oxígeno del planeta está en el océano y el 99% está en la atmósfera. Sin embargo, la distribución de carbono entre el aire y el mar está invertido: 98.5% del carbono del sistema océano-atmósfera está en el mar, debido a la química del agua de mar. Casi todo el carbono existe como carbono inorgánico disuelto (CID) y la mayoría del CID se encuentra en forma de bicarbonato y iones de carbonato. Menos del 1% del CID está en forma de CO₂ disuelto (Sarmiento et al, 1993). Aproximadamente 1000 PgC del CID es orgánico. La mayoría de este último se encuentra en forma disuelta y aproximadamente 3 PgC está en los organismos vivientes (Houghton, 2007).

Ecosistemas terrestres: Vegetación y suelo. El carbono integra cerca de 0.27% de la masa de los elementos de la corteza terrestre (Kempe, 1979), aun cuando representa aproximadamente el 5% de la materia seca. La cantidad de carbono contenida en la vegetación terrestre es del orden de 550±100 Pg. La materia orgánica en suelos es dos a tres veces esta cantidad (1500-2000 PgC en el primer metro del suelo y 2300 Pg en los primeros tres metros (Jobágyy & Jackson, 2000). Los bosques son particularmente importantes como

reservorios de carbono porque los árboles almacenan más carbono por unidad de área que otros tipos de vegetación (Houghton, 2007).

Los combustibles fósiles. El carbono, petróleo y gas natural son los residuos de materia orgánica formada hace millones de años por las plantas verdes. La cantidad de carbono almacenado en combustibles fósiles se estima entre 5000-10000 PgC. Mayor que cualquier otro reservorio, excepto al de la profundidad del mar y aproximadamente 10 veces el contenido de carbono de la atmósfera (Houghton, 2007).

5.5. Métodos de cuantificación de carbono en biomasa aérea y suelo

5.5.1. Métodos empleados para estimar biomasa.

La biomasa forestal definida como la cantidad total de materia orgánica viva de árboles, (expresada en toneladas secas por unidad de área), permite estimar el carbono almacenado en los bosques, dado que el 50% de la biomasa está integrada por carbono (Brown, 1997). Dentro de las mediciones se incluye la biomasa aérea y subterránea de la masa viva, como árboles, arbustos, hierbas, raíces y la masa muerta de la hojarasca y residuos gruesos y finos asociados con el suelo (Lu, 2006). En el bosque húmedo tropical el estudio de la biomasa es dispendioso debido a su complejidad expresada en su estructura y variada composición de especies (Lu et al., 2005).

Hay dos formas de abordar las estimaciones de biomasa de acuerdo al tipo de método utilizado: Métodos de mediciones directas en parcelas y métodos indirectos. Los primeros implican medir por parcela el diámetro, la altura y la densidad de la madera. A partir de allí hay dos opciones: la extracción y fraccionamiento del árbol para tomar el peso húmedo de tronco, ramas, flores y frutos (Klinge et al., 1975) o el desarrollo de ecuaciones alométricas con los valores obtenidos en campo (Nelson et al., 1999). Para el primer caso, una vez

seccionado el árbol se registra in situ el peso húmedo de sus partes, se lleva al laboratorio para deshidratarlas y obtener su peso seco. Esta información posteriormente se utiliza para predecir la biomasa por árbol, mediante regresiones que generan un modelo.

Un método indirecto consiste en utilizar la información de volumen de madera obtenida a partir de inventarios de bosque para convertirlos a biomasa (Brown & Lugo, 1992). Este método es preciso para zonas específicas, aunque tiene como desventajas el ocupar mucho tiempo, alto costo y ser poco práctico para niveles de análisis de país (Feldspausch et al., 2012).

De manera directa o indirecta, con los datos de campo se construyen modelos mediante uso de programas estadísticos. Para seleccionar la ecuación de mejor ajuste se comprueban los supuestos de análisis de regresión (normalidad, independencia y homogeneidad de varianzas). Aquellos que no cumplen los supuestos son eliminados. Seguidamente se calculan indicadores de ajuste como coeficiente de determinación ajustado (R^2) el error estándar de la estimación (SEE) y la suma de los cuadrados de los residuos de los predichos (PRESS). También se calcula la capacidad predictiva de los modelos mediante el error cuadrático medio (ECM) y la diferencia agregada. Para modelos con transformaciones logarítmicas se aplica un factor de corrección (Fonseca et al., 2009). En otros casos el mejor modelo se elige mediante la aplicación del criterio de información Akaike, el error residual estándar (RES) y el error relativo estimado (Álvarez et al., 2012).

5.5.2. Métodos para estimar carbono en suelo.

El carbono orgánico del suelo (COS) es una medida de la cantidad total de carbono orgánico en el suelo. El interés en COS se fundamenta en que esta medida es un indicador de calidad de suelo. En consecuencia, su variación puede tener implicaciones en procesos ambientales como fertilidad de suelo, erosión y flujos de gases efecto invernadero (Stolbovoy et al., 2007).

Determinar el carbón en el suelo con alta precisión es esencial para cuantificar el secuestro de carbón. Se han desarrollado métodos *ex situ* e *in-situ* que incrementan la precisión y costo-efectividad. Los métodos *ex situ* involucran coleccionar muestras representativas de suelo para medir la concentración de carbón mediante técnicas de combustión seca o húmeda. Este último proceso involucra la oxidación de material orgánica mediante una mezcla de ácidos y la medición del CO₂ por métodos gravimétricos o manométricos (Chatterjee et al., 2009).

Existen varios métodos automatizados denominados analizadores de carbono total. Estos se fundamentan en la medición de conductividad térmica de los gases emitidos (Tabatabai et al., 1991). Igualmente existen otros como las cámaras de cuantificación espectrofotométricas o cromatografías des gases, las cuales son más recientes y brindan diversos elementos de análisis.

Los métodos *in situ* plantean alta precisión sin ocupar mucho tiempo en el procesamiento y análisis de muestras están basados en sensores remotos y mediciones espectroscópicas en campo. Los métodos espectroscópicos incluyen reluctancia infrarroja cercana (NIR, por sus siglas en inglés) e intermedia y espectroscopia de plasma inducida por láser (LIBS, por sus siglas en inglés). El potencial de estos métodos se evalúa comparando

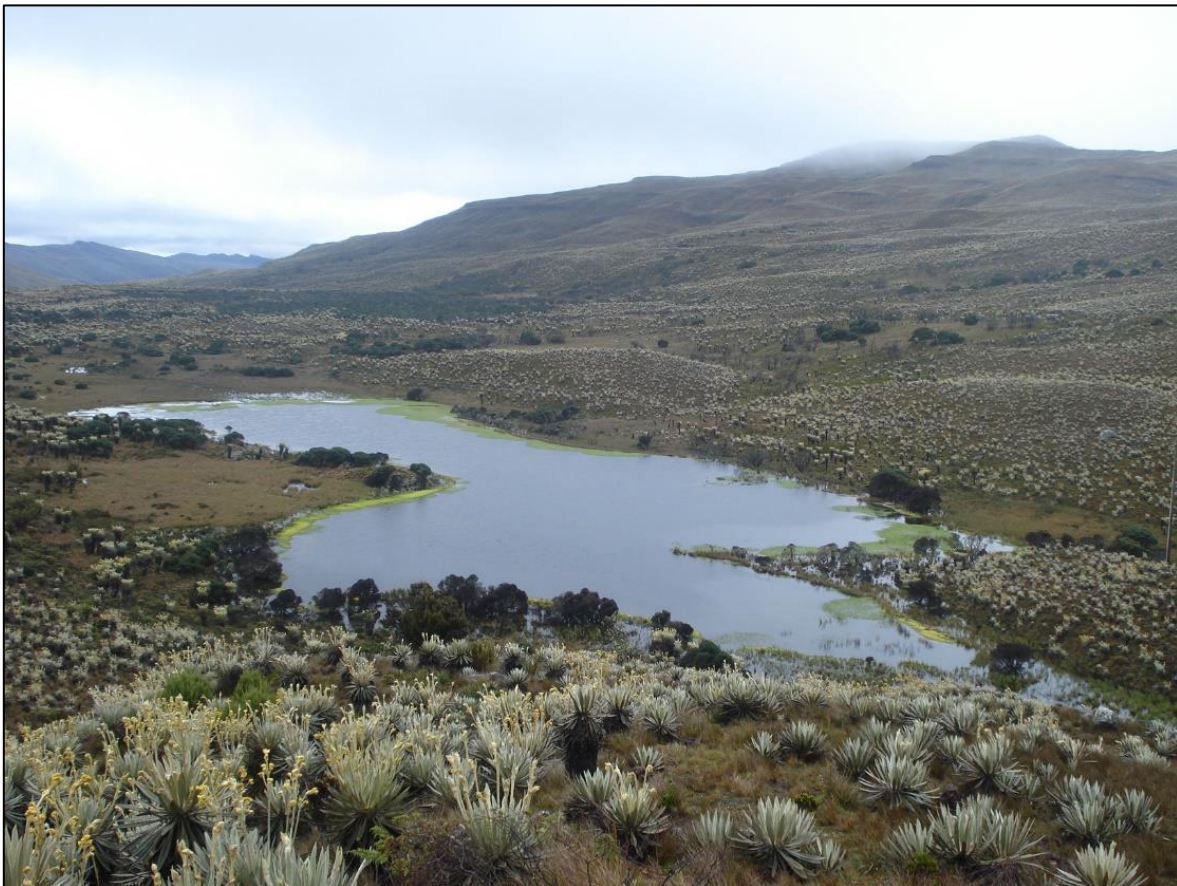
los resultados con los obtenidos mediante análisis de las muestras de suelo por el método de combustión seca. (Chatterjee et al., 2009).

5.6. Páramo

Los páramos son paisajes bioclimáticos desarbolados y fríos, localizados entre los 3.200 y 3800 m de altitud (

Figura 5) (Cuatrecasas, 1989). Son propios de las montañas neotropicales de Costa Rica, Panamá y los Andes de Venezuela, Colombia, Ecuador y el norte del Perú (Luteyn, 1999). Los páramos de la cordillera de los Andes son ecosistemas de la parte alta de la montaña, con una gran variedad de lagos y turberas.

Figura 5. Vista general de páramo de Sumapaz, Bogotá D.C., Cundinamarca.



Autor: Castañeda, 2014.

La vegetación está integrada mayoritariamente por vastas áreas de gramíneas naturales como *Calamagrostis effusa*, grandes plantas arroquetadas como el frailejón (*Espeletia*, sp.) (Figura 6) (Hofstede, 1995), mezcladas con matorrales, donde predominan arbustos de los géneros *Castilleja*, *Diplostephium*, *Hipericum* y *Pentacalia* y parches de bosque que pueden alcanzar hasta los 10 m de altura como el *Polylepis quadrijuga*, *Escallonia myrtelloides* y *Hesperomeles obtusifolia* (Pedraza et al., 2005).

Figura 6. Vegetación típica de páramo.



a.) Vegetación arbustiva



b) Bryophyta



c) Grandes plantas arroquetadas (*Fraylejon* sp)

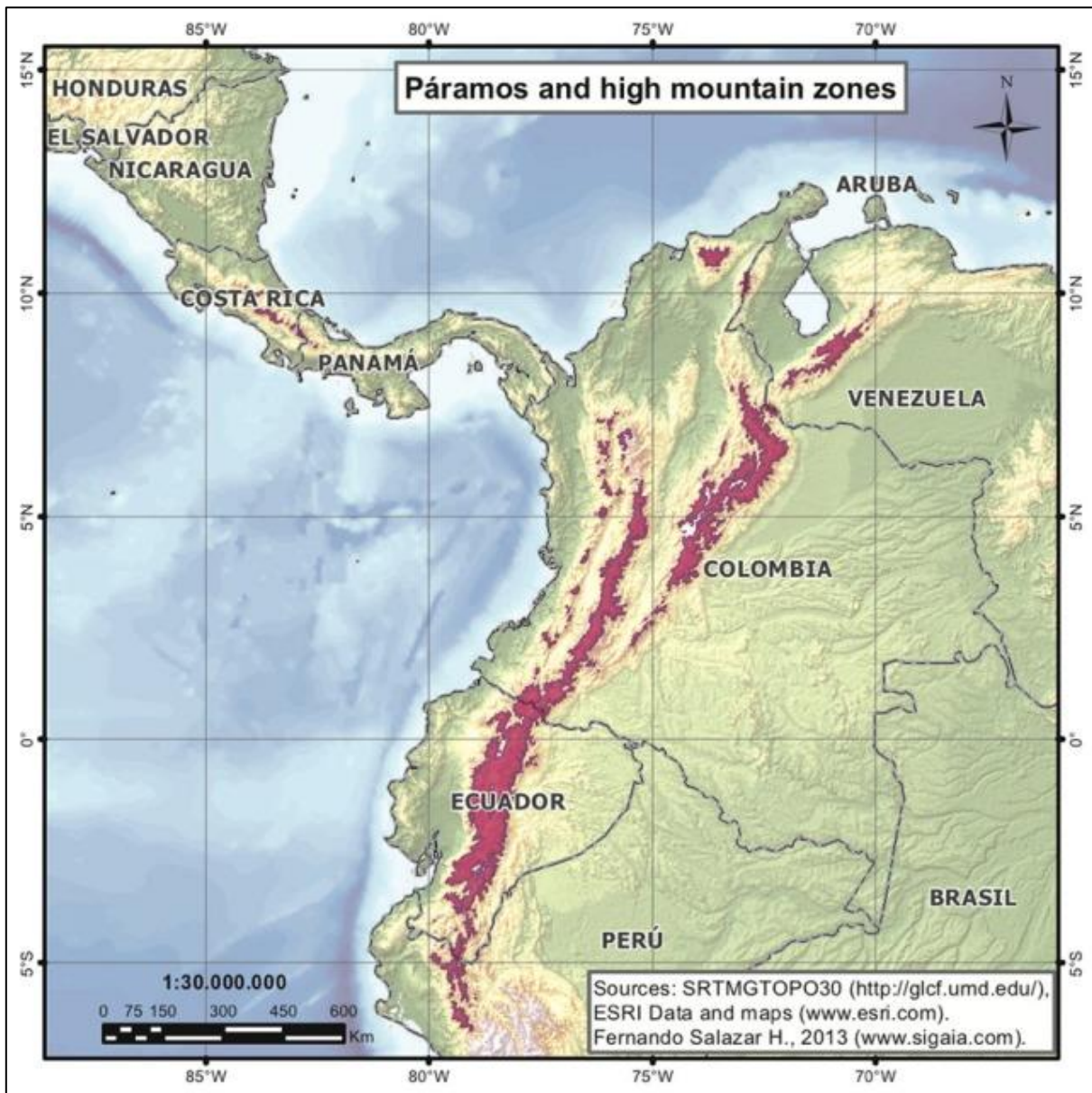


d) *Fraylejon* sp y *Calamagrostis effusa*

Autor: Montes, 2015; Castañeda, 2014.

Cubren las partes altas de los Andes entre los 11° N y 8° latitud S., formando una banda discontinua entre la Cordillera de Mérida, en Venezuela y la depresión de Huancambaba en el norte del Perú (Figura 7) . Además, existen dos páramos complejos separados. Uno en Costa Rica y el otro en la Sierra Nevada de Santa Marta, Colombia (Hofstede *et al.*, 2003). Ecosistemas similares se encuentran en otros continentes. Vegetación herbácea dominada por macollas de gramíneas o pajonales naturales, semejantes a la del páramo están presentes en el cinturón afroalpino desde Etiopia y Uganda hasta Kenya, Tanzania y Sur África (Hedberg, 1992). Una pequeña extensión ocurre en Nueva Guinea e Indonesia (Hofstede *et al.*, 2003). Los páramos de Sur América cubren entre 35000 km² y 77.000 km². Esta discrepancia se debe a incertidumbres relacionadas con el límite inferior del páramo, el cual estaría situado sobre los 3.800 m de altitud (Dinerstein *et al.*, 1995; (Hofstede *et al.*, 2003).

Figura 7. Localización de páramos en centro y Suramérica



Fuente: Madriñan et al., 2013

La ocurrencia aislada y fragmentada de páramo en el altiplano andino promueve alta especialización y gran endemismo. Alberga cerca de 5000 especies diferentes de plantas. Cerca del 60% son endémicas, adaptadas a las condiciones físico-químicas de suelo y a las condiciones climáticas, tales como baja presión atmosférica, intensa radiación ultravioleta y los efectos de secamiento del viento (Hofstede, 1995).

El clima del páramo es típico de trópico de alta montaña. En general, es frío y húmedo, acompañado de súbita niebla, llovizna y cambios rápidos de temperatura y radiación solar en el transcurso del día. Por su cercanía a la línea del Ecuador la radiación solar es casi constante durante todo el año. Esta constancia contrasta con el ciclo diario. Durante el día las variaciones de temperatura son mayores a 20°C presentándose “un verano durante el día e invierno en la noche” (Hedberg, 1964). La variación local de la temperatura depende del gradiente altitudinal y de la humedad del aire. La tasa altitudinal a la cual cambia la temperatura promedio es de 0,65°C por cada 100 metros (van der Hammen & Hooghiemstra, 2000). La humedad del aire también afecta a la temperatura diaria. En temporadas con alta nubosidad la radiación solar total a nivel del suelo es baja durante el día; mientras que la humedad relativa alta en la noche hace que la temperatura no baje tanto la temperatura, debido a la salida de radiación de calor desde el suelo y la vegetación (Buytaert *et al.*, 2006).

La precipitación en el páramo es variable, desde 700 mm a 3000 mm/año (Luteyn, 1992), con algunos extremos en áreas que alcanzan los 6000 mm (Rangel, 2000). Su variabilidad a pequeña escala está determinada por cambios en la dirección y la velocidad del viento, que a su vez están controladas por la pendiente y la topografía. A gran escala el patrón de precipitación está afectado por las cuencas Pacífico y Amazónica. En los Andes del norte de Venezuela, Colombia y Costa Rica, los vientos del noreste causan una marcada estación seca. Las laderas occidentales de Colombia y norte del Ecuador están afectadas por la zona de convergencia intertropical (ZCIT) sobre el Pacífico Este (Vuille *et al.*, 2000). La ZCIT es responsable de humedad continua en forma de lluvia, nubes y niebla, producto de la elevación orográfica. Finalmente, los páramos de ladera occidental del sur del Ecuador y norte de Perú están afectados por las masas frías y secas de la corriente de Humboldt y por

lo tanto son más secas, excepto durante el fenómeno del Niño (Luteyn, 1999). En general el clima del páramo es frío y húmedo, acompañado de súbita niebla, llovizna y cambios rápidos de temperatura y radiación solar en el transcurso del día.

5.7. Suelos en páramos.

A pesar de la compleja geología y topografía de los Andes los suelos del páramo son bastante homogéneos (Buytaert *et al.*, 2006). Muchos suelos de páramo son de origen volcánico. Ellos forman una capa uniforme que cubre el lecho de roca terciaria en las cordilleras andinas. Dependiendo de la ubicación, el espesor del suelo oscila de unos pocos centímetros a varios metros. Los suelos más comunes son los Andisoles, Entisoles e Inceptisoles en la clasificación de taxonomía de suelos (Soil Survey Staff, 1998) o Andosoles e Histosoles en la base de recursos del suelo de la FAO (1998). En los Andes los suelos localizados a elevaciones mayores a 2.700m son catalogados como Andisoles. Mientras que los localizados por debajo de 2.700m pueden ser clasificados como Entisoles o Inceptisoles (Zehetner *et al.*, 2003), dependiendo del contenido de arcilla (Zehetner *et al.*, 2006). El Entisol no muestra desarrollo de perfiles, está expuesto a menor precipitación y alta evapotranspiración. Como resultado los materiales amorfos están ausentes y la fracción coloidal está dominada por haloisita, o mineral de arcilla con aluminosilicatos (Zehetner *et al.*, 2006). El Inceptisol, más desarrollado que el Entisol, está expuesto a altas precipitaciones y baja evapotranspiración tiende a ser más lixiviado. Esto favorece la formación de materiales amorfos como la alófana en el suelo superficial (Wada, 1980).

El clima frío y húmedo y la baja presión atmosférica favorecen la acumulación de materia orgánica en el suelo. Esta acumulación se mejora por la formación de complejos organometálicos, entendidos como una asociación entre materia orgánica y partículas

minerales de suelo (Al^{3+} ; Fe^{3+}) (Wagai *et al.*, 2015). Esta asociación tiende a ser estable y resistente a la descomposición microbiana. El aluminio y hierro de estos complejos proviene de la descomposición de la ceniza volcánica y roca. Los suelos resultantes son oscuros y húmicos y tienen una estructura porosa (Nanzyo *et al.*, 1993).

Desde el punto de vista físico, los suelos de páramo tienen características comunes con los de turba en zonas altas. Contienen cantidades elevadas de materia orgánica (figura 5) la cual está cerca de 100 g/kg. En sitios húmedos (>900 mm/año), es frecuente el contenido de carbono orgánico mayor a 40%. (Buytaert *et al.*, 2006). Lugares con depósitos de cenizas se caracterizan por presentar suelos jóvenes con contenido de carbono orgánico de 4-10% (Zehetner *et al.*, 2003).

Figura 8. Suelos ricos en materia orgánica en el páramo de Sumapaz



Autor: Montes, 2015.

5.8. Carbono almacenado en la biomasa aérea del páramo

Los bosques cubren globalmente 4.03 billones de hectáreas. Es decir, aproximadamente el 30% de la superficie total de la tierra (FAO, 2010). Estos cuentan con el 80% del total de biomasa vegetal del planeta (Kindermann et al. 2008). Los bosques se distribuyen a lo largo del globo. En Asia, incluyendo el área Rusa, se encuentra el 31% del total de bosques del planeta, seguido por el 21% en Sudamérica, 17% en África, 17% en Norte y Centroamérica, 9% en Europa y 5% en Oceanía (FAO, 2010).

En bosques naturales no alterados de alta montaña tropical (entre 1000m y 3600 m de altitud) la biomasa aérea está entre 77t/ha y 785t/ha. Esta variación puede deberse en parte a los cambios de altitud, topografía, temperatura y precipitación (Spracklen et al., 2014).

En páramos de Suramérica el carbono en biomasa varía entre 13,21 y 183 t/ha. (*Tabla 1*). Algunos estudios sugieren que esta diferencia puede deberse a variaciones ambientales. Por ejemplo, se reportan correlaciones positivas y débiles entre biomasa aérea con la temperatura media anual, precipitación media anual, altitud y ángulo de pendiente (Spracklen et al., 2014). Sin embargo, otros estudios indican ausencia de correlación de biomasa aérea con variables climáticas y topográficas (Slik et al., 201).

Parámetros ambientales como disponibilidad de nutrientes, propiedades del suelo, exposición a luz ultravioleta, exposición a la luz, nubosidad o velocidad del viento pueden ser importantes en el carbono almacenado en la biomasa. Incremento en la limitación de nitrógeno y disminución en las limitaciones de fosforo frente a aumento de rango altitudinal en los Andes peruanos podrían incidir en la cantidad de biomasa aérea del páramo (Fischer et al., 2013). Estudios de productividad primaria neta a lo largo de transectos altitudinales

arrojaron cambios abruptos a elevaciones específicas. Estos cambios pueden estar relacionados con la frecuencia de nubosidad que a su vez controla la cantidad de luz y la humedad del sitio (Girardin et al., 2010, 2014b). Por ejemplo, la productividad primaria neta en dos sitios montañosos de los Andes estuvo asociada a la radiación solar y nubosidad (Girardin et al., 2014b). Lo que podría indicar que estas variables son importantes en el almacenamiento de carbono en la biomasa aérea. También cambios en la riqueza de especies maderables, que con frecuencia disminuye con el incremento de elevación, tiene potenciales implicaciones en el almacenamiento de carbono (Girardin et al., 2014b).

Tabla 1. Carbono orgánico almacenado en biomasa aérea en paramos de Suramérica

Localización	Altitud	Biomasa aérea (t/ha)	tC/ha	TMA (°C)	Precipitación (mm/año)	Tamaño de parcela (ha)	Ecuación	Referencia
Bosque de Aliso de Oyacachi, Cayambe-Coca,	3200	241	120,5	10,5	2250	0,3	Feshe et al. (2002)	Feshe et al. (2002)
Bosque de <i>Polylepis</i> sp Provincia de Pichincha, Ecuador	3600	366	183	8	1500	0,3	Feshe et al. (2002)	Feshe et al. (2002)
Bosque tropical de montaña, SE Peru	3020	94	47	11,8	1776	1	Chave et al. (2005) ¹	Girardin et al. (2010)
Bosque tropical de montaña, SE Peru	3025	130	65	12,5	1706	1	Chave et al. (2005) ¹	Girardin et al. (2010)

Localización	Altitud	Biomasa aérea (t/ha)	tC/ha	TMA (°C)	Precipitación (mm/año)	Tamaño de parcela (ha)	Ecuación	Referencia
Parque nacional Podocarpus, Ecuador	3060	100	50	8,6	4500	0,16	Chave et al. (2005) ¹	Moser et al. (2011);
Parque nacional Manu, Challabamba, Perú	3100	198	99	-	-	0,1	Román- Cuesta et al (2011) ²	Román- Cuesta et al (2011)
Parque nacional Manu, laguna- Acjanaco, Perú	3400	169	84,5	-	-	0,1	Román- Cuesta et al (2011) ²	Román- Cuesta et al (2011)
Bosque Polylepis , Parque nacional Nor Yauyos Cochas, Perú	4200	38	19	-	-	0,1	Vásquez et al., (2014) ³	Vásquez et al., (2014)
Bosque de <i>Chusquea</i> sp en Parque nacional Chingaza, Cundinamarca, Colombia	3650	26,25	13,12	6	1850	0,0016	Método destrutivo	Tol et al. 1994

Abreviaciones: TMA: Temperatura media anual

$${}^1\text{BA} = 0,0776 (pD^2H)^{0,94}$$

$${}^2\text{BA} = 0,07D^{2,417}$$

$${}^3\text{BA} = -16.51 + 40.269 * H (\log 10) + 9.309 * D (\log 10)$$

p: densidad de la madera

D: diámetro a la altura del pecho

H: altura del árbol

5.9. Carbono almacenado en suelo

El suelo global, en los primeros 3 metros, contiene aproximadamente 2344 GT (1 gigatonelada= 1 billón de toneladas) de carbón orgánico, Es el mayor reservorio terrestre de carbono orgánico. Del total, en el primer metro se acumula el 54% (1500 Gt), y cerca de 615 Gt en los primeros 20 cm (Jobbágy and Jackson, 2000; Guo and Gifford, 2002). En regiones tropicales se estima que el carbono almacenado en suelo entre 0 y 1 metro de profundidad está entre 354 y 403 GT (Batjes, 1996).

En el ecosistema de páramo, entre 0 y 40 cm de profundidad el carbón almacenado en el suelo puede variar entre 119 y 397 t/ha, bajo vegetación natural (Tabla 2). En turberas (bofedales o peatland, en inglés) a profundidad de 6 metros se alcanzan en promedio 1573 t/ha (Tabla 2). Posiblemente los valores más elevados de COS bajo vegetación natural se deban a la mayor protección de la superficie del suelo propiciada por el tipo de cobertura vegetal. Por ejemplo, sitios con densas coberturas como las briofitas y especies arbustivas que aíslan el suelo de factores como precipitación e incidencia directa de radiación solar, pueden presentar mayor cantidad de carbono orgánico, porque hay menor descomposición de materia orgánica. Así mismo, la mayor densidad de raíces característica de estos vegetales puede influir en los valores altos de COS. Mientras que suelos bajo coberturas más dispersas como pastos naturales de las familias Asteraceae, Poaceae, Pterydophyta posiblemente aporten menor cantidad de biomasa subterránea al suelo y faciliten mayor descomposición de materia orgánica (Zimmermann, 2010).

Tabla 2. Carbono orgánico del suelo, bajo vegetación natural y bajo cultivos en trópico suramericano

Localización	Tipo de uso	Altitud (metros)	Precipitación media anual (mm)	Profundidad (cm)	Media de COS (t/ha)	Referencia
Parque nacional; Manu; (Perú)	Páramo Pasturas naturales	3348-3860	1422	20	119	Zimmermann, <i>et al.</i> , 2010.
Estación biológica Guandera, Ecuador	Vegetación natural	3790-3990	1900	30	220	Tonneijck <i>et al.</i> , 2010
				82	530	
				160	870	
Apolobamba, Bolivia	Vegetación natural	3800-6040	505	0-5	210	Muñoz, 2013
				5-15	260	
Cuenca rio Chimbo, Ecuador Alto Guanujo	Cultivo central: anual	3387-3709	2000	5-100	707	Henry <i>et al.</i> , 2013.
	Vegetación natural	3615-3584		5-100	806	
Bosque Parque nacional natural Nor Yauyos Cochabamba, Perú	Polylepis nacional	4200	ND	0-40	397	Vásquez <i>et al.</i> , 2014
Parque nacional Cayambe-Coca	Turbera	3919-4880	1066-1401	0-600	1573	Hribljan <i>et al.</i> , 2016

Abreviación: ND: no disponible

En turberas la alta acumulación de carbono puede deberse a dos factores: la vegetación adaptada al ambiente alpino y las condiciones de suelo saturado disminuyen la descomposición de la materia orgánica. A pesar de las bajas temperaturas del páramo las plantas permanecen fotosintéticamente activas durante todo el año (Beck 1994). En consecuencia, la vegetación está en capacidad de proveer materia orgánica de manera continua lo que incrementa los contenidos de carbono (Squeo *et al.* 2006).

De otro lado, los valores de carbono en suelos de páramo son altos comparados, por ejemplo, con oxisoles bajo vegetación natural de sabana tropical denominada Cerrado, donde se almacena 53 T C/ha a 30 cm de profundidad (Maia *et al.*, 2010). Las bajas tasas de mineralización y de ciclaje de nutrientes en el páramo, ocasionadas por bajas temperaturas y alta humedad pueden favorecer una lenta descomposición de materia orgánica y la presencia de suelos negros y húmedos que almacenan altas tasas de carbono (Hofstede, 1999). No obstante, la actividad antrópica en los ecosistemas andinos, cultivos y pastizales, disminuye la cobertura natural y/o protección física del suelo y puede reducir significativamente los niveles de carbono orgánico en los mismos (Post & Known, 2000). Terrenos actualmente ocupados con pastos dedicados a ganadería extensiva y minifundios poseen menor contenido de COS, respecto a suelos con vegetación natural, debido a la ausencia de fertilización, combinada con altos niveles de erosión de los mismos (Dercon *et al.*, 2007).

5.10. Actividades agropecuarias que afectan el carbono del suelo almacenado en el páramo.

En el trópico, el cambio en el uso de la tierra es responsable de 12-20% de las emisiones de gases efecto de invernadero (IPCC, 2007, van der Werf *et al.*, 2009). La conversión de coberturas naturales a sistemas agrícolas alcanza tasas de deforestación de 13 millones de ha por año (FAO, 2006). La destrucción de bosques primarios causa una rápida pérdida de carbono de la biomasa y está acompañada por pérdida de carbono del suelo (Don, *et al.*, 2011). Si el suelo es usado para propósitos agrícolas, las prácticas de preparación del suelo para la siembra determinarán la cantidad de carbono secuestrado (Figura 9) .

Figura 9. *a y b.* Uso agropecuario del suelo en páramo de Usme y Sumapaz



a) Frontera agrícola, Localidad de Sumapaz / Bogotá



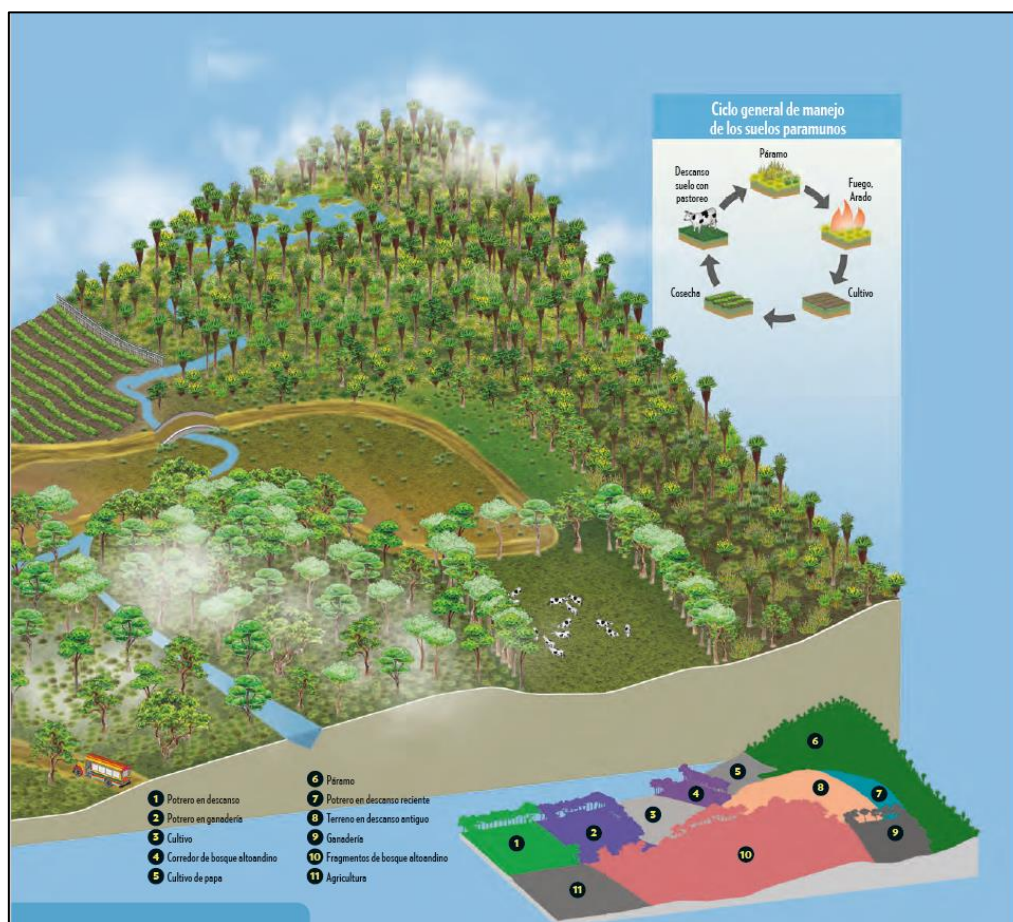
b) Afectación del ecosistema de páramo, Localidad de Usme / Bogotá

Autor: Castañeda, 2015.

Respecto a la actividad pecuaria en páramo, en suelos del páramo de Anaime, Tolima, Colombia, (entre 0 y 30 cm de profundidad) las pasturas en uso almacenaron COS de 34,4 tC/ha, mientras que pasturas sin uso durante 20 años almacenaron 22 t/ha (Castañeda et al., 2014). Una explicación a la mayor presencia de carbono en suelo de pasturas es el posible incremento de biomasa en las raíces finas que al descomponerse proporcionan mayor contenido de carbono al suelo (Andrade et al., 2008; Maia et al., 2009). Mientras que para las pasturas sin uso probablemente la falta de renovación de los pastizales, por lo que no hay una importante contribución de las raíces senescentes (Castañeda et al., 2014). Sin embargo, este aspecto requiere mayor estudio para alcanzar conclusiones general (**Figura 10**).

En general el COS es bajo en la mayoría de agrosistemas (Lal, 2004) debido a procesos de degradación de suelo (Lal, 2011) y a prácticas de manejo como deforestación, quema y labranza (Searchinger *et al.*, 2008). La erosión afecta al contenido de COS debido al rompimiento de la estructura del suelo que facilita la liberación de CO₂. Este hecho produce la pérdida de la capacidad del suelo para garantizar el crecimiento de la planta (van de Koppel, *et al.*, 1997).

Figura 10. Ciclo general de manejo de suelos en páramo



Fuente: Rivera, D. y Rodríguez, C. 2011

6. RECOMENDACIONES PARA GESTIÓN DEL CARBONO EN PÁRAMOS

En esta revisión se encontró que en el ecosistema de páramo las reservas de carbono se disminuyen cuando se cambia el uso de suelo de cobertura natural a cultivos. Probablemente la eliminación de la vegetación natural que protege el suelo disminuye el ingreso de materia orgánica al suelo e incrementa la tasa de descomposición de los residuos vegetales. Por lo tanto, esta transformación está causando una rápida pérdida de carbono de la biomasa, acompañada de pérdida de carbono del suelo (Don, *et al.*, 2011).

Ante tal situación la primera recomendación es delimitar y respetar la frontera agrícola, implementar prácticas agrícolas que reduzcan el laboreo, mantener el suelo permanentemente cubierto y realizar rotación de cultivos evitando el monocultivo y la sobreexplotación del suelo. Se sugiere el uso de agricultura sin labranza, en la cual las semillas son sembradas directamente en los residuos de cosecha, sin realizar arado del terreno. Con este tipo de manejo del suelo se busca disminuir la intensidad de alteración del suelo y ayuda a evitar la erosión, mantiene la fertilidad del suelo y la materia orgánica del suelo (Horowitz *et al.*, 2010). Así mismo proteger el suelo con cultivos de leguminosas, como trébol, entre periodos de cultivo, aporta materia orgánica fresca al suelo e incrementa los niveles de COS (Post *et al.*, 2012). Finalmente, rotar cultivos implica cambiar de especie producida, una vez se recoge una cosecha. Para este caso sería necesario identificar cual es la combinación ideal de cultivos tanto para disminuir pérdidas de carbono en el suelo (Yang *et al.*, 2014) como para responder a las demandas del mercado.

La segunda alternativa para mantener e incrementar el carbono almacenado en páramos es realizar programas de restauración del ecosistema de páramo con la conservación y plantación de especies vegetales nativas de este ecosistema. La alteración de los ecosistemas con frecuencia disminuye su capacidad de mantener la biota nativa o entregar servicios ecosistémicos (Seastedt *et al.*, 2008) como almacenamiento de carbono o regulación hídrica. En este contexto, la restauración ecológica intenta llevar el ecosistema afectado desde una condición de degradación hacia una condición totalmente funcional (Hobbs & Cramer, 2008). En consecuencia, para que el páramo recupere y mantenga el servicio de secuestro de carbono en el suelo y en la biomasa aérea se recomienda adelantar un programa de restauración. Para lograrlo sería necesario investigaciones previas de propagación de especies vegetales que integran diferentes estados sucesionales en este ecosistema. Una vez se reproduzcan varias de

las especies autóctonas se procederá a establecerlas en sitios donde se desarrollaron cultivos intensivos, como el de papa. Sería necesario hacer un seguimiento y evaluación quinquenal para determinar la respuesta del sitio degradado ante el restablecimiento de las especies nativas. Según el resultado obtenido, será necesario definir nuevas estrategias para continuar con el proceso de recuperación del ecosistema.

Cualquiera de estas dos opciones tiene probabilidad de alcanzarse siempre y cuando se superen barreras económicas, institucionales, educativas, culturales y sociales (Eglin *et al.*, 2010). Se requiere un programa de gobierno a un plazo de por lo menos 10 años que informe y asesore técnicamente al agricultor sobre los beneficios y métodos para trabajar el suelo con agricultura de conservación y en procesos de restauración de ecosistemas, se debe además incluir varias restricciones sobre el uso del páramo para ganadería. El mismo programa debe incorporar una financiación para respaldar los costos por incremento de mano de obra al proceso productivo debido a que se reemplaza el uso de maquinaria por obreros cualificados. Por otro lado, la rotación de cultivos es factible cuando las instituciones del Estado garantizan al agricultor un mercado para sus variados productos con volúmenes y precios que le permitan recuperar la inversión y obtener excedentes. En síntesis, las perspectivas del suelo como reservorio de carbono pueden ser alentadoras, en la medida en que los estados fomenten técnica y económicamente estrategias de conservación de suelos. Al mismo tiempo, los gobiernos deben apoyar los procesos de medición de carbono al igual que el mercadeo de carbono de productos agropecuarios de pequeños y medianos productores, para que el agricultor tenga la posibilidad de aplicar prácticas agrícolas que disminuyen la pérdida de carbono del suelo. Actualmente, se viene implementando sellos de confianza, sellos de carbono cero, certificaciones de agricultura limpia y amigable con el

ambiente, los cuales son un respaldo para continuar con la transformación de pensamiento tanto del productor como del consumidos.

7. LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN

Los ecosistemas de alta montaña mantienen servicios ecosistémicos que benefician a las poblaciones humanas. Por ejemplo, el ecosistema de páramo andino almacena carbono orgánico en el suelo, también abastece y regula el agua. Estas funciones ecológicas mancomunadas propician la irrigación de cultivos, procesos industriales, generación de energía y agua para consumo doméstico de centros urbanos de Colombia, Venezuela, Perú y Ecuador (Buytaert *et al.*, 2006). En Colombia se han identificado 48 páramos en la cordillera de los Andes (Montes, 2001). Sin estos ecosistemas la supervivencia de millones de habitantes estará en riesgo. Sin embargo, este ecosistema se está degradando debido a la influencia de factores antrópicos. La intensificación agrícola, la explotación minera, la urbanización y el cambio climático (Buytaert *et al.*, 2006; Marquis *et al.*, 2012). La alteración del suelo por cambio de uso trae serias consecuencias socioeconómicas, incluyendo la desertificación, incremento de la pobreza y de conflictos (Ariza *et al.*, 2013; Korner *et al.*, 2005). Esta transformación tiene impacto significativo sobre el carbono secuestrado. Así que cuantificar carbono en páramos colombianos puede contribuir a definir prioridades de manejo de recursos naturales en este ecosistema y a soportar proyectos que incentiven la fijación de carbono en ecosistemas de alta montaña.

Futuros estudios pueden evaluar factores que controlan la distribución regional y vertical del COS. Por ejemplo, identificar y analizar posibles relaciones entre el COS, su distribución vertical y factores ambientales y pedológicos en diversos páramos del país. Se propone analizar el contenido de COS entre 0-100 cm de profundidad, en relación con:

factores abióticos (clima, tipos de material parental, pendiente); factores bióticos (cantidad de carbono en raíces y hojarasca) y características pedológicas (tipo de suelo y sus propiedades, textura y pH). Con esta información es factible modelar y predecir la distribución vertical de COS bajo diferentes tipos de suelo y para los ecosistemas de páramo colombianos.

Un segundo estudio puede responder a las incertidumbres que se tienen sobre el almacenamiento de carbono por turberas. Se sabe que las turberas almacenan la mayor cantidad de carbono en su biomasa subterránea y su dinámica tiene importantes implicaciones para el ciclo global del carbono (Yu, 2012). Estimaciones de reservas de carbono se disponen para regiones como Norteamérica, Finlandia y Rusia (Botch et al., 1995; Turunen et al., 2002; Bridgham et al., 2006). Sin embargo, para ecosistemas de páramo son escasos y se puede convertir en un campo de investigación. Para estimar carbono en las turberas se tienen 3 aproximaciones: volumen de turba, densidad del carbono y comportamiento en el tiempo. El volumen de turba busca conocer la profundidad media de la turbera, la densidad aparente y la concentración de carbono para finalmente estimar el carbono en el suelo (Gorham, 1991). La aproximación de densidad de carbono requiere datos similares, pero se enfoca en la estimación del contenido total de carbono por unidad de área, conocido como densidad de carbono del suelo. Luego deriva la existencia total de carbono multiplicando el área de la turbera por la densidad del carbono (Armentano y Menges, 1986). La aproximación de tiempo utiliza múltiples edades de turberas individuales. Analiza tasas de acumulación y la variación del área de la turbera con el fin de estimar cambios en el tiempo de las reservas de carbono (Yu et al., 2010). Así mismo, es importante entender los procesos de la turbera y establecer relaciones empíricas entre sus propiedades (área, profundidad y edad) para generar estimaciones más robustas de las existencias de carbono (Yu, 2012).

8. CONCLUSIONES

Luego de la revisión literaria realizada y frente a la pregunta:

¿Cuál de los componentes del páramo es más eficaz en el almacenamiento de carbono? La literatura disponible en bases de datos indica que en el páramo es el suelo el componente que almacena mayor cantidad de carbono, respecto a la biomasa aérea. A profundidades entre 0 y 40 cm, bajo vegetación natural se almacena entre 119 y 397 t/ha. Estas diferencias pueden deberse tanto a la densidad de la cobertura natural como a la cantidad de raíces por unidad de área.

¿Qué implicaciones tienen las actividades agropecuarias en el carbono almacenado en páramo?: Las actividades agrícolas disminuyen el contenido de carbono almacenado en el páramo. Por un lado, la eliminación de la vegetación nativa debido al cambio de coberturas y cambio del uso del suelo, reduce el ingreso de materia orgánica al suelo e incrementa la tasa de descomposición de residuos vegetales. Por otro, la labranza propicia desintegración y emisión de carbono almacenado en el suelo. También la adición de enmiendas como cal agrícola y dolomita liberan CO₂ a la atmósfera. Se requiere entonces disminuir la intensidad de las actividades agrícolas, así como reducir de laboreo, mantener entre periodos de cultivo el suelo cubierto con leguminosas y rotar los cultivos ayuda a retener carbono almacenado en el suelo.

En general los estudios de carbono en páramo son escasos, a pesar de su alta importancia en la dinámica del carbono del planeta. Sería interesante explorar la distribución vertical de carbono en la profundidad, así como realizar estimaciones de carbono en las turberas para abrir posibilidades que este ecosistema se tenga en cuenta en los programas de

reducción de emisiones de gases efecto de invernadero asociadas a deforestación y degradación forestal.

9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Álvarez, E., Duque, A., Saldarriaga, J., Cabrera, K., De las Salas, G., del Valle I., Lema, A., Moreno, F., Orrego, S. & Rodríguez, L. (2012). Tree above-ground biomass allometries for carbon stocks estimation in the natural forest of Colombia. *Forest Ecology and Management* 267: 297-308
- Andrade, H., R. Brook and M. Ibrahim. (2008). Growth, production and carbon sequestration of silvopastoral systems with native timber species in the dry lowlands of Costa Rica. *Plant and Soil*, 308 (1-2): 11-22.
- Ariza, C., Maselli, D., & Kohler, T. (2013). Mountains: Our Life, Our Future. Progress and Perspectives on Sustainable Mountain Development. Swiss Agency for Development, Cooperation, Centre for Development and Environment, Bern Armentano, T. V., and Menges, E. S.: *Patterns of change in the carbon balance of organic soil-wetlands of the temperate zone*, *J. Ecol.*, 74, 755–774.
- Armentano, TV., Menges, ES. (1986). Los patrones de cambio en el balance de carbono de la orgánica del suelo y los humedales de la zona templada. *Journal of Ecology*. 74 (3), 755-774.
- Batjes, N.H., (1996). Total carbon and nitrogen in the soils of the world. *Eur. J. Soil Sci.* 47, 151–163.
- Botch, M. S., Kobak, K. I., Vinson, T. S., & Kolchugina, T. P. (1995). Carbon pools and accumulation in peatlands of the Former Soviet Union, *Global Biogeochem* 9, 37 – 46.

- Bridgham, S. D., Megonigal, J. P., Keller, J. K., Bliss, N. B., & Trettin, C. (2006). The carbon balance of North American wetlands. *Wetlands*, 26, 889–916.
- Brown, S. (1997). Estimating Biomass and Biomass Change of Tropical Forests: A Primer. *FAO*. Rome. Italy.
- Buytaert, W., Célleri, R., De Bièvre, B., Cisneros, F., Wyseure, G., Deckers, J., & Hofstede, R. (2006). Human impact on the hydrology of the Andean páramos. *Earth-Science Reviews*, 79(1), 53-72.
- Buytaert, W., Iñiguez, V., De Bièvre, B. (2007). The effects of afforestation and cultivation on water yield in the Andean paramo. *Forest Ecology and Management*, 9.
- Castañeda, H., & Hernán Jair Andrade. (2014). Impact of grazing on soil organic carbon in high lands in Anaimé, Tolima, Colombia. *Zootecnia Tropical*, 32(1), 7-21.
- Chatterjee, Kasturi Bhattacharjee, & Amit Konar. (2009). Métodos y Avances. *Biotechnology*, 4 (9), 1230-1364.
- Cuatrecasas, J. O. S. E. (1989). Aspectos de la vegetación natural en Colombia. *Perez-Arbelaezia*, 2 (8), 155-283.

- Damian, M. (2012). Repenser l'économie du changement climatique *Economie Appliquée. Questions pour Rio+20*, 65 (2), 9-46.
- Dercon, G., Govers, G., Poesen, J., Rombaut, K., Vandebroek, E., Sánchez, H., Loaiza, G., & Deckers, J. (2007). Animal-powered tillage erosion assessment in the Southern Andes region of Ecuador. *Geomorphology*, 87, 4–15.
- Dinerstein, E., Olson, D. M., Graham, D. H., Webster, A. L., Primm, S. A., Bookbinder, M. P., & Ledec, G. (1995). A Conservation Assessment of the Terrestrial Ecoregions of Latin America and the Caribbean. World Wildlife Fund and World Bank, Washington DC, USA. FAO (2006). *FAO Forestry Paper*, 147, 350.
- Don, A., Schumacher, J., & Freibauer, A. (2011). Impact of tropical land-use change on soil organic carbon stocks—a meta-analysis. *Global Change Biology*, 17 (4), 1658-1670.
- Eglin, T., Ciais, P., Piao, S.L., Barre, P., Bellassen, V., Cadule, P., Chenu, C., Gasser, T., Koven, C., Reichstein, M., & Smith, P. (2010)— Historical and future perspectives of global soil carbon response to climate and land-use changes. — *Tellus Series B-Chemical and Physical Meteorology*, 62, 700-718.
- Feldpausch, T. R., Lloyd, J., Lewis, S. L., Brienen, R. J., Gloor, M., Monteagudo Mendoza, A. & Alexiades, M. (2012). Tree height integrated into pantropical forest biomass estimates. *Biogeosciences*, 3381-3403.

Fonseca, W., Alice, F., & Rey, J. M. (2009). Modelos para estimar la biomasa de especies nativas en plantaciones y bosques secundarios en la zona Caribe de Costa Rica. *Bosque (Valdivia)*, 30(1), 36-47.

Food and Agriculture Organization. (FAO). (2010). Global forest resources assessment. *FAO*. 163.

Fisher, J. B., Malhi, Y., Torres, I. C., Metcalfe, D. B., van de Weg, M. J., Meir, P., Silva-Especjo, & Huasco, W. H.(2013) Nutrient limitation in rainforests and cloud forests along a 3000m elevation gradient in the Peruvian Andes. *Oecologia*, 172, 889–902.

Garcia Portilla, J. (2003). Análisis del potencial de emisión de dióxido de carbono del páramo de Chingaza y lineamientos para su conservación en el contexto de mecanismo de desarrollo limpio. Bogotá D.C.

Gentry, A. H.: Tropical forest biodiversity: distribution patterns and their conservation significance, *Oikos*, 63, 19 - 28.

Girardin, C. A. J., Malhi, Y., Aragão, L. E. O. C., Mamani, M., Huaraca Huasco, W., Durand, L., Feeleys, K. J., Rapp, J., Silva- Espejo, J. E., Silman, M., Salinas, N., & Whittaker, R. J. (2010). Net primary productivity allocation and cycling of carbon along a tropical forest elevational transect in the Peruvian Andes, *Glob. Change Biol.*, 16, 3176–3192.

Girardin, C. A. J., Espejob, J. E. S., Doughty, C. E., Huasco, W. H., Metcalfe, D. B., Durand-Baca, L., Marthews, T. R., Aragao, L. E. O. C., Farfàn-Rios, W., García-Cabrera, K., Halladay, K., Fisher, J. B., Galiano-Cabrera, D. F., Huaraca-Quispe, L. P., Alzamora-Taype, I., Eguiluz-Mora, L., Salinas-Revilla, N., Silman, M. R., Meir, P., & Malhi, Y. (2014b.) Productivity and carbon allocation in a tropical montane cloud forest of the Peruvian Andes, *Plant Ecol. Divers.*, 7, 107–123.

Goetz, S. J., & Dubayah, R. O. (2011). Advances in remote sensing technology and implications for measuring and monitoring forest carbon stocks and change. *Carbon Management*, 2(3), 231–244.

Gorham, E.: (1991) Northern peatlands: Role in the carbon cycle and probable responses to climatic warming, *Ecol. Appl.*, 1, 182–195.

Guo, L. B., & Gifford, R. M. (2002). Soil carbon stocks and land use change: a meta-analysis. *Global change biology*, 8 (4), 345-360.

Hall, F. G., Bergen, K., Blair, J. B., Dubayah, R., Houghton, R., Hurtt, G., et al. (2011). Characterizing 3D vegetation structure from space: Mission requirements. *Remote Sensing of Environment*, 115, 2753–2775.

Hedberg, O. (1964). Afroalpine plant ecology. *Almqvist & Wiksell*.

- Hedberg, O. (1992). Afroalpine vegetation compared to paramo: convergent adaptations and divergent differentiation. In: Balslev, H., Luteyn, J.L. (Eds.), *Paramo: An Andean Ecosystem under Human Influence*. *Academic Press*. 15– 30.
- Hobbs & Cramer. (2008). *Ecología de la Restauración: los estudios de intervención para restaurar y mantener la función de los ecosistemas en un contexto de rápido cambio ambiental*. Facultad de Ciencias del Medio Ambiente, Universidad de Murdoch, Murdoch, Australia Occidental 6150, Australia.
- Hofstede, R. G. (1995). The effects of grazing and burning on soil and plant nutrient concentrations in Colombian paramo grasslands. *Plant and Soil*, 173(1), 111-132.
- Hofstede, R. (2001). El impacto de las actividades humanas sobre el páramo. Los páramos del Ecuador. Particularidades, problemas y perspectivas. *Abya Yala/Proyecto Páramo, Quito, Ecuador*. 161-185.
- Hofstede, R. & Mena, P. (2003). *Los beneficios escondidos del páramo: servicios ecológicos e impacto humano*. Ecociencia Foundation; Mountain Institute; University of Amsterdam, Quito.
- Horowitz J, Ebel R, & Ueda K. (2010). “No-till” farming is a growing practice. Washington, DC: USDA Economic Research Service. www.ers.usda.gov/publications/eib-economic-information-bulletin/eib70.aspx. Viewed 7 Nov 2015

Houghton, R. A. (2007). Balancing the global carbon budget. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 35, 313-347.

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM. (2014). Participación Ciudadana. Obtenido de Cambio Climático: <http://www.ideam.gov.co/web/atencion-y-participacion-ciudadana/cambio-climatico>

Instituto Nacional de Ecología. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2004). *Cambio Climático: Una visión desde México*. Coyoacán, México D.F.: Instituto Nacional de Ecología.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), G. I. (2001). *Cambio climático 2001: Informe de síntesis*. Ginebra, Suiza.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), G. I. (2002). *Cambio climático 2002: Informe de síntesis*. Ginebra, Suiza.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2007). *Special Report on Land Use, Land-Use Change And Forestry*. University Press, Cambridge.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2013). *Cambio Climático 2013. Bases físicas*. [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y.

Xia., V. Bex., & P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, NY, Estados Unidos de América.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), G. I. (2014). *Cambio climático 2014, informe síntesis*. Ginebra, Suiza.

Jobbágy, E.G., Jackson, R.B. (2000). The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. *Ecol. Appl.* 10, 423–436.

Klinge, H., Rodrigues, W. A., Brunig, E., & Fittkau, E. J. (1975). Biomass and structure in a central Amazonian rain forest. *In Tropical ecological systems*, 115-122.

Lal, R. (2004). Soil carbon sequestration to mitigate climate change. *Geoderma*, 123, 1-22.

Lal, R. (2011). Sequestering carbon in soils of agro-ecosystems. *Food Policy*, 36, S33-S39.

Lu, D. (2006). The potential and challenge of remote sensing-based biomass estimation. *International journal of remote sensing*, 27(7), 1297-1328.

Luteyn, J. L., & Churchill, S. P. (1999). *Paramos: a checklist of plant diversity, geographical distribution, and botanical literature*. New York: New York Botanical Garden Press.

- Maia, S. M. F., S. M. Ogle, C. E. P. Cerri & C. C. Cerri. (2009). Effect of grassland management on soil carbon sequestration in Rondônia and Mato Grosso states, Brazil. *Geoderma*, 149, 84–91.
- Maia, S. M., Ogle, S. M., Cerri, C. C., & Cerri, C. E. (2010). Changes in soil organic carbon storage under different agricultural management systems in the Southwest Amazon Region of Brazil. *Soil and Tillage Research*, 106 (2), 177-184.
- Martínez, M. L., Pérez-Maqueo, O., Vázquez, G., Castillo-Campos, G., García-Franco, J., Mehlreter, K., Equihua, M., & Landgrave, R. (2009.) Effects of land use change on biodiversity and ecosystem services in tropical montane cloud forests of Mexico, *Forest Ecol. Manag*, 258, 1856–1863.
- Marquis, G., Baldassarri, T., Hofer, T., Romeo, R., & Wolter, P. (2012). FAO's Current Engagement in Sustainable Mountain Development. *Mountain Research and Development*, 32 (2), 226-230.
- Mojica Sanchez, C. A. (2013). *Caracterización, almacenamiento de carbono y emisiones evitadas en bosques nativos en areas de influencia del páramo de Anaime Tolima, Colombia*. 66. Ibagué, Colombia.
- Montes, Veira, S. (Edit.) (2001). *Páramos de Colombia*. Cali, Colombia, Editorial Banco de Occidente.

Nanzyo, M., Shoji, S. & Dahlgren, R. (1993). Volcanic Ash Soils: Genesis, Properties and Utilization. *Developments in Soil Science. Elsevier, Amsterdam, 21*, 145-187.

Nelson, B. W., Mesquita, R., Pereira, J. L., De Souza, S. G. A., Batista, G. T., & Couto, L. B. (1999). Allometric regressions for improved estimate of secondary forest biomass in the central Amazon. *Forest ecology and management, 117*(1), 149-167.

Ortega, G. A., (2011) *Cambio climático y justicia climática: análisis del caso Zenu*. Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de Magister en Medio Ambiente y Desarrollo, Facultad de Ciencias Económicas. Instituto de Estudios Ambientales, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, D.C

Post, W. M., & Kwon, K. C. (2000). Soil carbon sequestration and land use change: processes and potential. *Global change biology, 6* (3), 317-327.

Post, W. M., Izaurralde, R. C., West, T. O., Liebig, M. A., & King, A. W. (2012). Management opportunities for enhancing terrestrial carbon dioxide sinks. *Frontiers in Ecology and the Environment, 10*(10), 554-561

Rangel –Ch. 2000. *La Biodiversidad de Colombia*. Universidad Nacional de Colombia.

Rivera, D. y Rodríguez, C. 2011. *Guía divulgativa de criterios para la delimitación de páramos de Colombia*. 2011. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial e Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. 68 págs.

Schlesinger, W. H. (1997). *Biogeochemistry an analysis of global change*. Durham, North Carolina: Academic press.

Searchinger, T., Heimlich, R., Houghton, R. A., Dong, F., Elobeid, A., Fabiosa, J., & Yu, T. H. (2008). Use of US croplands for biofuels increases greenhouse gases through emissions from land-use change. *Science*, 319 (5867), 1238-1240.

Skinner, E. (2012). *Genre et changement climatique; Panorama*. Institute of development studies. Bridge developmeny-gender 114

Slik, J.W. F., Aiba, S. I., Brearley, F. Q., Cannon, C. H., Forshed, O., Kitayama, K., Nagamasu, H., Nilus, R., Payne, J., Paoli, G., Poulsen, A. D., Raes, N., Sheil, D., & Sidiyasa, (2010)

Soul Survery Staff. (1998). *Keys to soil taxonomy*. United States Departament of Agriculture & Natural Resources Conservation Service. Washington, DC.

Spracklen, D. V., & Righelato, R. (2014). Tropical montane forests are a larger than expected global carbon store. *Biogeosciences*, 11(10), 2741-2754.

Squeo FA, Warner BG, Aravena R, Espinoza D (2006) Bofedales: high altitude peatlands of the central Andes. *Rev Chil Hist Nat*, 79, 245–255

Stolbovoy V, Montanarella L, Filippi N, Jones A, Gallego J, & Grassi G (2007) *Soil Sampling Protocol to Certify the Changes of Organic Carbon Stock in Mineral Soil of the European Union*. Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg.

Seastedt T, Hobbs R, & Suding K. 2008. Management of novel ecosystems: are novel approaches required?. *The Ecological Society of America*. 6 (10) 547 - 553

Sundquist ET, Visser K. 2004. *The geological history of the carbon cycle*. In

Tabatabai, M. A., and Bremner, J.M. 1991. Automated instruments for determination of total carbon, nitrogen, and sulfur in soils by combustion techniques. In: *Soil Analysis*, 261–286.

Turunen, J., Tomppo, E., Tolonen, K., and Reinikainen, A. (2002) Estimating carbon accumulation rates of undrained mires in Finland– application to boreal and subarctic regions, *Holocene*, 12, 69–80

van der Hammen, T., & Hooghiemstra, H. (2000). Neogene and Quaternary history of vegetation, climate, and plant diversity in Amazonia. *Quaternary Science Reviews*, 19 (8), 725-742.

van de Koppel, J., Rietkerk, M. & Weissing, F. L. (1997). Catastrophic vegetation shift and soil degradation in terrestrial grazing system. *Trends in Ecology & Evolution*, 12, 352-356.

- van der Werf G. R, Morton DC, & De Fries R. S., (2009). CO2 emissions from forest loss. *Nature Geoscience*, 2, 737-738.
- Vásquez Cerón, A., & Buitrago Castro, A. C. (2011). *El gran libro de los páramos*. Bogotá D. C.: Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.
- Vuille, M., Bradley, R. S., & Keimig, F. T. (2000). Interannual climate variability in the Central Andes and its relation to tropical Pacific and Atlantic forcing. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 105 (10), 12447-12460
- VijayaVenkataRaman, S, Iniyan, S., Ranko Goic,(2012) A review of climate change, mitigation and adaptation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16, 878– 897
- Wagai, R., Kajiura, M., Asano, M., & Hiradate, S. (2015). Nature of soil organo-mineral assemblage examined by sequential density fractionation with and without sonication: Is allophanic soil different? *Geoderma*, 241, 295-305
- Yang, X., Gao, W., Zhang, M., Chen, Y., & Sui, P. (2014). Reducing agricultural carbon footprint through diversified crop rotation systems in the North China Plain. *Journal of Cleaner Production*, 76, 131-139
- Yu, Z. C., Loisel, J., Brosseau, D. P., Beilman, D. W., and Hunt, S.J. (2010). Global peatland dynamics since the Last Glacial Maximum. *Geophys. Res. Lett.*, 37, L13402.

- Yu, Z. C. (2012). Northern peatland carbon stocks and dynamics: a review. *Biogeosciences*, 9(10), 4071-4085.
- Zehetner, F., Miller, W.P., & West, L.T., (2003). Pedogenesis of volcanic ash soils in Andean Ecuador. *Soil Science Society of America Journal*, 67, 1797–1809.
- Zehetner, F., & Miller, W. P. (2006). Soil variations along a climatic gradient in an Andean agroecosystem. *Geoderma*, 137 (1), 126-134.
- Zimmermann M, Meir P, Silman MR, Fedders A, Gibbon A, Malhi Y, Urrego DH, Bush MB, Feeley KJ, Garcia KC, Dargie GC, Farfan WR, Goetz BP, Johnson WT, Kline KM, Modi AT, Rurau NMQ, Staudt BT, & Zamora F. (2010). No differences in soil carbon stocks across the tree line in the Peruvian Andes. *Ecosystems*, 13, 62–74.