

**Estimación del contenido de carbono en una turbera del Parque Nacional Natural
Chingaza, Colombia.**

Diego Enrique Reyes Guerra

Trabajo presentado como requisito para optar al título de Biólogo

Director:

Juan Carlos Benavides Duque

Ph.D. en Botánica y Patología de Plantas

Codirector:

Björn Reu

Ph.D. en Biología

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ciencias

Escuela de Biología

Bucaramanga

2020

Dedicatoria

A la gran incertidumbre: la vida.

Agradecimientos

Mis más sinceros agradecimientos a todas las personas que de alguna forma permitieron que este trabajo se hiciera posible, a toda mi familia, especialmente a mi madre. A mis directores Juan Carlos Benavides y Björn Reu por su confianza y aportes en mi formación como investigador, al profesor Felipe que me permitió el uso del herbario de la UIS, a los técnicos de los laboratorios de Biología y Química de la UIS que me colaboraron desinteresadamente, y, desde luego, a todos mis amig@s que ayudaron.

Contenido

	Pág.
Introducción	12
1. Marco Teórico.....	14
1.1 Contexto general	14
1.2 Reservas de carbono	15
1.3 Páramo, características generales.....	18
1.4 Turberas	21
1.4.1 Carbono en Turberas.....	22
1.4.2 Turberas: funciones ecológicas y servicios ecosistémicos	23
1.5 Amenazas para los ecosistemas de turbera	25
1.6 Método para determinar carbono en turberas	26
2. Materiales y Métodos.....	27
2.1 Área de estudio	27
2.2 Cálculo del área y el volumen de la turbera.....	30
2.3 Caracterización Hidrológica.	31
2.3.1 Análisis del agua.....	31
2.3.2. Nivel freático.	31
2.3.3. Contenido de humedad del suelo (Hs).....	31
2.3.4. Estimación de la capacidad de retención de agua de la turbera.....	32

2.4 Caracterización de suelo.	33
2.4.1 Extracción de núcleos.	33
2.4.2 Cálculo de la densidad aparente.....	33
2.4.3 Estimación del contenido de carbono.	34
2.5 Análisis de los datos.....	36
3. Resultados.....	37
3.1 Cálculo del área y el volumen de la turbera.....	37
3.2 Estimación de la capacidad de retención de agua de la turbera.	38
3.3 Estimación del contenido de carbono orgánico de la turbera.	41
4. Discusión.....	48
5. Conclusiones.....	58
Referencias Bibliográficas.....	60
Apéndices.....	67

Lista de Tabla

	Pág.
Tabla 1. Depósito de Carbono en la turbera.	46
Tabla 2. Comparación de depósitos de Carbono en diferentes turberas de Páramo Andino.	55

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Ciclo global del carbono.....	17
Figura 2. Turbera minerotrófica.....	22
Figura 3. Ciclo de Carbono en una turbera con fases aeróbica y anaeróbica.	25
Figura 4. Localización geográfica del sitio de estudio en el PNN Chingaza.	29
Figura 5. Sensor de profundidad extensible para tomar datos de la profundidad de la turbera... 31	
Figura 6. Muestras de suelo secadas en horno a 105 ± 5 °C.....	34
Figura 7. Imagen 3D del contorno de la base de la turbera.	37
Figura 8. Porcentaje de agua del suelo y el porcentaje de materia orgánica del perfil en función de la profundidad de la turbera.	39
Figura 9. Porcentaje de agua y la densidad aparente del suelo en función de la profundidad de la turbera.	40
Figura 10. Regresión lineal: Contenido de COS Vs. profundidad de la turbera.....	43
Figura 11. Regresión lineal: Contenido acumulado de COS Vs. densidad aparente del suelo....	43
Figura 12. Carbono orgánico y la densidad aparente del suelo en función de la profundidad de la turbera, a la derecha los núcleos extraídos cada 50 cm.	44

Resumen

TÍTULO: ESTIMACIÓN DEL CONTENIDO DE CARBONO EN UNA TURBERA DEL PARQUE NACIONAL NATURAL CHINGAZA, COLOMBIA*

AUTOR: DIEGO ENRIQUE REYES GUERRA**

PALABRAS CLAVES: Páramo, Turbera, Núcleos de Suelo, Carbono Orgánico del Suelo, COS, Densidad aparente, Pérdida de peso por ignición, LOI.

DESCRIPCIÓN

En la presente investigación se realizó una estimación del contenido de carbono orgánico del suelo (COS) en una turbera ubicada en el Valle de los Frailejones, dentro del parque nacional natural Chingaza (PNN Chingaza). Se hizo una caracterización del suelo, a partir de núcleos extraídos que fueron divididos en longitudes de 10 cm desde la superficie hasta la base rocosa del humedal, se calculó la densidad aparente (D_a) y se estimó su contenido de materia orgánica (MO) por medio del método de pérdida de peso por ignición (LOI), el factor de conversión de 1,724 se empleó para determinar el COS a partir de la MO. Se llevó a cabo una prueba ANCOVA para determinar la homogeneidad espacial de la turbera. Se calculó el coeficiente de Pearson. Finalmente se llevó a cabo un análisis de regresión entre las variables COS y D_a en función de la profundidad de la turbera. El volumen de la turbera se estimó en 118.802,78 m³, con un área de 13,1 ha. El nivel freático estuvo siempre por sobre la superficie, la capacidad de R_w se estimó en 4.003.686 litros. La D_a estuvo entre 0,057 y 0,319 g cm³ -1, el contenido de carbono orgánico entre 59,62 y 435,77 g C kg⁻¹. El stock de COS de la turbera se estimó en 1536,98 Mg C ha⁻¹. El ANCOVA: asumimos homogeneidad espacial. El coeficiente de Pearson: profundidad, D_a y MO presentan una fuerte relación. La prueba de regresión nos arrojó que los valores COS dependerán de la D_a que presenta el terreno y de la profundidad de donde se extrae la muestra. Finalmente, las reservas de carbono halladas dan cuenta del buen estado de conservación de la turbera, pues estas son altas al compararlas con trabajos en ecosistemas altoandinos nacionales y de otros países de la región.

* Proyecto de grado

** Facultad de Ciencias Escuela de Biología Director: Juan Carlos Benavides Duque Biólogo, Ph.D. Codirector: BJÖRN Reu Geocólogo, Ph.D.

Abstract

TITLE: ESTIMATION OF COAL CONTENT IN A PEATLAND OF THE CHINGAZA NATIONAL NATURAL PARK, COLOMBIA*

AUTHOR: DIEGO ENRIQUE REYES GUERRA**

KEY WORDS: Páramo, Peatland, Soil Cores, Organic Soil Carbon, COS, Bulk Density, Ignition Weight Loss, LOI.

DESCRIPTION

In the present research an estimation of the organic carbon content of the soil (COS) was carried out in a peatland located in the Frailejones Valley, within the Chingaza National Natural Park (PNN Chingaza). A soil characterization was made, which consisted of the extraction of nuclei by means of a Russian perforator, these were divided into lengths of 10 cm from the surface to the rocky base of the wetland, the apparent density (D_a) was calculated and it was estimated its organic matter content (MO) by means of the ignition weight loss method (LOI), the conversion factor of 1,724 was used to determine the COS from the MO. An ANCOVA test was carried out to determine the spatial homogeneity of the peatland. Pearson's coefficient was calculated. Finally, a regression analysis was carried out between the COS and D_a variables based on the depth of the peatland. The volume of the peatland was estimated at 118.802,78 cubic meters, with an area of 13,1 hectares. The water table was always above the surface, the R_w capacity was estimated at 4.003.686 liters. The D_a was between 0.057 and 0,319 g cm³ -1, the organic carbon content between 59,62 and 435,77 g C kg⁻¹. The stock of COS of peatland was estimated at 1536,98 Mg C ha⁻¹. The ANCOVA: we assume spatial homogeneity. Pearson's coefficient: depth, D_a and MO have a strong relationship. The regression test showed us that COS values will depend on the D_a that the terrain presents and the depth from which the sample is extracted. Finally, the carbon reserves found account for the good state of conservation of the peatland, since these are high when compared with works in high Andean ecosystems of national and other countries in the región.

* Proyecto de grado

** Facultad de Ciencias Escuela de Biología Director: Juan Carlos Benavides Duque Biólogo, Ph.D. Codirector: BJÖRN Reu Geocólogo, Ph.D.

Introducción

En las zonas de alta elevación en los andes tropicales, conocidas como páramos, es común encontrar amplias áreas cubiertas por turberas. Las turberas son ecosistemas especiales ya que son suelos con un alto contenido de humedad, por consiguiente, son enmarcados dentro de la categoría de humedales según la convención Ramsar (Ramsar, 1971), además, deben su nombre a los elevados depósitos de material orgánico llamado turba resultado de la acumulación durante años de restos poco descompuestos de animales y plantas, que pueden llegar incluso hasta varios metros de profundidad. A estos humedales se les conoce por su función como sumideros de carbono atmosférico y por su capacidad de retención hídrica.

Las turberas tropicales sólo representan aproximadamente el 0,3 % de los humedales del planeta, no obstante, pueden llegar a acumular hasta 10 veces más carbono que sus homologas en regiones más templadas que ocupan áreas mucho más extensas (Page, Rieley, & Banks, 2011; Ruidiyanto *et al.*, 2016). Dentro de los páramos, las áreas de turberas son pequeñas pero frecuentes y regulan la acumulación y salida de agua, en estos sitios ellas interceptan los flujos de escorrentía superficial y en muchas ocasiones sub-superficial (Benavides, 2015). En todo el planeta estos humedales pueden llegar a almacenar hasta un 10 % del agua dulce y acumular hasta 35 veces su peso en agua, que es liberada a las corrientes cercanas de manera gradual previniendo sequías, aumentando el flujo base y regulando las crecientes de los ríos (Holden, 2005). Las turberas tropicales de los Andes están dentro de los ecosistemas con mayores riesgos de desaparecer por

causa del cambio climático. El riesgo es aún más alto si se tiene en cuenta la acción de actividades humanas y el poco conocimiento que se tiene acerca de las dinámicas de estos humedales.

La medición y el monitoreo de carbono en ecosistemas de alta montaña viene siendo de interés en los últimos años dada la amenaza del cambio del clima mundial, por lo tanto, es perentorio entender sus dinámicas y sus aportes en la mitigación de los efectos del calentamiento global y lo valioso de estos ecosistemas catalogados como *hotspots* (James Leonard Luteyn, 1999; Myers, Mittermeier, Da Fonseca, & Kent, 2000). Puntualmente, es importante hacer una cuantificación de los valores de carbono orgánico depositados en la turbera y el efecto de variables como el contenido hídrico y la densidad aparente del suelo en la magnitud de estos valores, esto con el fin de tener a disposición datos empíricos que permitan acciones encaminadas a la reducción de emisiones de gases efecto de invernadero relacionadas con la degradación de los ecosistemas de humedales de páramo.

El objetivo de la presente investigación es estimar el contenido de carbono orgánico contenido en una turbera de páramo en el Parque Nacional Natural Chingaza (PNN Chingaza). La información obtenida en este trabajo permitirá delinear investigaciones más profundas en esta área de la biología que aporten y robustezcan las bases de datos sobre los ecosistemas de páramo y la importancia de su conservación.

1. Marco Teórico

1.1 Contexto general

Ha sido desde siempre un reto para la ciencia comprender la complejidad de las funciones globales de los procesos biológicos, ecológicos, químicos y físicos que en el suelo suceden. El 2015 fue declarado el año internacional de los suelos por parte de Asamblea general de las Naciones Unidas, a partir de este evento, se ha reconocido con mucha más importancia este recurso para la humanidad y la prioridad en su conservación (Stockmann *et al.*, 2015)

Los cambios sustanciales del suelo y sus procesos de degradación están íntimamente relacionados con varios de los procesos antes mencionados, el conocimiento de estos permite establecer indicadores importantes para la medición de las condiciones en las que el suelo se encuentra (Stockmann *et al.*, 2015). Un indicador de significativa importancia es el carbono orgánico del suelo (COS) por su relación con diferentes funciones, como: la retención de agua, capacidad de intercambio catiónico, porosidad, estructura, entre otras. Características que propician suelos altamente fértiles, productivos y mitigadores del cambio climático global por su función como reservorios de CO₂ (FAO, 2017).

El fenómeno del cambio climático del planeta es según varios informes y estudios científicos, sin precedentes, de suma gravedad y complejidad con respecto a la escala a la que está sucediendo (Bäckstrand & Lövbrand, 2015; Fyke & Matthews, 2015; Solomon, Plattner, Knutti, & Friedlingstein, 2009). Desde 1750 el aumento en la concentración de dióxido de carbono en la

atmósfera se estima en alrededor de 31% (Lal, 2004), esto debido a la quema de combustibles fósiles y al cambio en el uso del suelo (Lal, 2004; Le Quéré *et al.*, 2015). En el trópico, el cambio en el uso de la tierra es responsable del 12 a 20% de las emisiones de gases efecto invernadero y la conversión de coberturas naturales a sistemas agrícolas alcanza tasas de deforestación de 13 millones de hectáreas por año (Van der Werf *et al.*, 2009; FAO, 2017). Los incrementos en el CO₂ y de los gases de efecto de invernadero en la atmósfera han sido drásticos, por lo tanto, se hace necesario estimar y monitorear los depósitos de carbono en los diferentes ecosistemas para poder entender la importancia del carbono dentro de la dinámica del cambio climático y su comportamiento a corto y largo plazo.

1.2 Reservas de carbono

En la historia de la tierra dos han sido las principales formas de carbono en la atmósfera, el dióxido de carbono (CO₂) y el metano (CH₄), con roles distintos, pero de gran importancia ambos para el desarrollo de todas las formas de vida y la configuración del entorno de la superficie de la Tierra. El CO₂ es el componente principal del proceso fotosintético, el metabolismo y la descomposición orgánica (Sundquist & Visser, 2003). Por medio de su transformación en el clima y la precipitación de carbonatos, suministra una gran parte de las rocas sedimentarias de la Tierra (Sundquist & Visser, 2003). El CH₄ es la parte anaeróbica del ciclo de carbono, resultado de los procesos metabólicos microbianos (Sundquist & Visser, 2003). A través de la atmósfera las principales transferencias de masa en el ciclo del carbono están generalmente relacionadas al CO₂. Sin embargo, tanto el CO₂ y el CH₄ son los compuestos principales a través de los cuales el ciclo del

carbono en todas las escalas de tiempo ha influido en la superficie de la Tierra (Sundquist & Visser, 2003).

La dinámica del ciclo del carbono está determinada por la escala de tiempo que se use como referencia, en escalas de tiempo relativamente cortas (cientos de años), el intercambio de C entre la atmósfera, los océanos, los combustibles fósiles y los ecosistemas terrestres (vegetación y los suelos) son los de mayor impacto (Sundquist & Visser, 2003). Para escalas de tiempo de miles y millones años el intercambio está controlado no solo por el ciclo de carbono en la superficie de la Tierra, si no también por el equilibrio entre procesos como erosión, vulcanismo y la formación de rocas sedimentarias (Sundquist & Visser, 2003). Estos intercambios pueden ocurrir en solo unos segundos (glucosa a partir de fijación de CO₂ en la fotosíntesis) o a través de miles de años a través de la deposición y diagénesis de la materia orgánica dando origen a los combustibles fósiles ver Figura1.

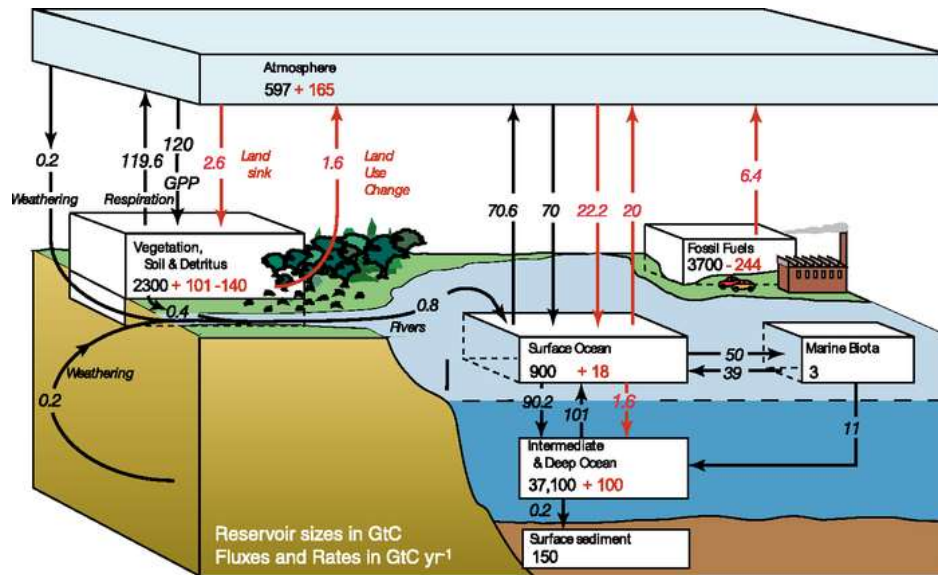


Figura 1. Ciclo global del carbono. Muestra los principales flujos anuales en GtC año^{-1} : flujos "naturales" preindustriales en negro y flujos "antropogénicos" en rojo. La pérdida terrestre neta de -39 GtC se infiere de las emisiones acumuladas de combustibles fósiles menos el aumento atmosférico menos el almacenamiento en el océano. La pérdida de -140 GtC del compartimento "vegetación, suelo y detritos" representa las emisiones acumulativas del cambio de uso del suelo, y requiere un sumidero en la biosfera terrestre de 101 GtC . 'GPP' es producción primaria bruta anual (terrestre). El contenido de carbono atmosférico y todos los flujos acumulativos desde 1750 a finales de 1994. Tomado de IPCC (2007)

La atmósfera. Para el 2005, la concentración promedio mundial de CO_2 fue de aproximadamente $0,0380\%$, o 380 ppmv (partes por millón por volumen), equivalente a 805 petagramos de carbono (PgC) ($1 \text{ Pg} = 1 \text{ petagramo} = 10^{15} \text{ g} = 10^9 \text{ toneladas métricas}$). El metano ($\sim 1,7 \text{ ppm}$) y el monóxido de carbono ($\sim 0,1 \text{ ppm}$) (Houghton, 2007).

Los océanos. La cantidad total de carbono es casi 50 veces más que en la atmósfera, aproximadamente 38000 PgC . La mayor parte se encuentra en aguas intermedias y profundas; solo entre 700 a 1000 PgC están en la superficie del océano en contacto directo con la atmósfera. Casi todo este carbono existe como carbono inorgánico disuelto (DIC), y la mayor parte del DIC está en forma de iones de bicarbonato y carbonato. Menos del 1% del DIC está en forma de CO_2 disuelto (Sarmiento, 1993). Aproximadamente 1000 PgC del DIC es orgánico, en su mayoría se

encuentra en forma disuelta y aproximadamente 3 PgC está en los organismos vivientes (Houghton, 2007).

Ecosistemas terrestres: vegetación y suelos. Aproximadamente, cerca del 0.27% de la masa de los elementos de la corteza terrestre corresponden a carbono, y en la materia seca esta cifra puede llegar a ser el 50%. En la vegetación terrestre el contenido de carbono (550 ± 100 Pg) está en orden de la cantidad contenida en la atmósfera (800 Pg). En el primer metro del suelo, la cantidad de materia orgánica está aproximadamente entre 1500 a 2000 Pg, y en los tres primeros está cerca a los 2300 Pg (Jobágy & Jackson, 2000). Los árboles almacenan más carbono por unidad de área que otros tipos de vegetación, por consiguiente, los bosques son particularmente importantes como reservorios de carbono (Houghton, 2007).

Combustibles fósiles. Los residuos de materia orgánica de plantas y animales depositados hace millones de años es lo que conocemos en la actualidad como combustibles fósiles: carbón, petróleo y gas natural. Estas reservas se estiman aproximadamente entre 5000 a 10000 PgC, alcanzando a ser hasta 10 veces más grande que la reserva de carbono de la atmósfera, de todos los reservorios de carbono solo es superado por el de las aguas profundas del océano (Houghton, 2007).

1.3 Páramo, características generales

Los páramos son ecosistemas de alta montaña en el trópico húmedo, se encuentran en los andes, la zona afroalpina, Indonesia y Papúa Nueva Guinea (Wouter Buytaert, Cuesta-Camacho, & Tobón, 2011). El páramo consiste de planicies y valles accidentados de origen glacial con una gran variedad de lagunas, pantanos y praderas húmedas (Wouter Buytaert *et al.*, 2006). Abarcan un área

total de 35.000 km² aproximadamente (Hofstede *et al.*, 2003). Este ecosistema se caracteriza por un clima frío y húmedo, baja presión atmosférica, con alta intensidad de radiación solar y nubes, con una temperatura que puede variar desde los 0 ° C en las zonas más altas a más de 15 ° C en las áreas de menor elevación, su precipitación anual varía entre 700 mm y 3000 mm año⁻¹ (Llambí *et al.*, 2012; James Leonard Luteyn, 1999).

En América se ubican sobre las cadenas montañosas de los andes de Colombia, Venezuela, Ecuador, el Norte de Perú, Costa Rica y Panamá, entre los 3.200 y 4.800 m.s.n.m. (Wouter Buytaert, Wyseure, De Bievre, & Deckers, 2005). La vegetación está integrada en su mayoría por extensas áreas de gramíneas naturales como *Calamagrostis effusa*, plantas arrosetadas de gran tamaño como el frailejón (*Espeletia*, sp.) (Hofstede, 1995), mezclada con matorrales, donde predominan arbustos de los géneros *Castilleja*, *Diplosteghium*, *Hypericum* y *Pentacalia* y parches de bosque que pueden alcanzar hasta los 10 m de altura como *Polylepis quadrijuga*, *Escallonia myrtelloides* y *Hesperomeles obtusifolia* (Pedraza-Peñalosa & Betancur, 2004; Schmidt-Mumm & Vargas Ríos, 2012). Los ecosistemas de páramo de los Andes neotropicales encabezan la lista de *hotspots* a nivel mundial en biodiversidad, endemismo y relación especies/área con alrededor de 60% de especies endémicas de plantas vasculares (James Leonard Luteyn, 1999; Myers *et al.*, 2000; Salvador, Monerris, & Rochefort, 2014).

El clima frío y húmedo, y la baja presión atmosférica favorecen la acumulación de la materia orgánica en el suelo. Esta acumulación es además reforzada por la formación de complejos organometálicos fuertemente resistentes a la descomposición microbiana (W. Buytaert, Sevink, De Leeuw, & Deckers, 2005). Poseen gran contenido de material volcánico, resultando en suelos oscuros y húmicos con una estructura porosa y abierta. Se clasifican generalmente como Andisoles o Andosoles en la *Soil Taxonomy*, sin embargo, en áreas con mayor saturación de agua o zonas con

menor influencia volcánica, se desarrollan Histosoles (Wouter Buytaert *et al.*, 2011). Los suelos de páramo contienen alrededor de 10% de carbono orgánico (CO) (Poulenard, Podwojewski, & Herbillon, 2003). En condiciones de humedad relativa (HR >80%) y con precipitaciones por encima de 900 mm al año, el CO puede alcanzar más del 40%, el carbono en biomasa puede variar entre 13,21 y 183 t/ha, diferencias que pueden ser debidas a las variaciones ambientales que presentan los páramos (Wouter Buytaert *et al.*, 2006; Podwojewski, Poulenard, Zambrana, & Hofstede, 2002). La densidad aparente del suelo está fuertemente correlacionada con el contenido de carbono orgánico, además, puede ser común encontrarse una correlación negativa entre la altitud y el COS (Zehetner, Miller, & West, 2003).

Resultado de la baja densidad aparente y de la estructura abierta y porosa, los suelos del páramo tienen una elevada conductividad hidráulica y una capacidad de retención de agua muy alta. Cuando están saturados, los contenidos de agua pueden exceder $0,95 \text{ g cm}^{-3}$, disminuyendo hasta cerca de $0,3 \text{ g cm}^{-3}$ a -1500 kPa , lo cual sigue siendo más alto que en muchos otros suelos (Wouter Buytaert *et al.*, 2006). La elevada capacidad de retención de agua en los Andosoles se atribuye mayormente a la alta presencia de microporos del suelo como consecuencia de la cantidad de carbono orgánico que este contiene. A la elevada precipitación en el páramo, y que es retenida dada las características del suelo que actúa como esponja, hay que sumarle la “lluvia horizontal” representada por la constante presencia de niebla, el rocío y la interceptación por la vegetación que añaden una cantidad desconocida de agua al sistema hidrológico (Buytaert *et al.*, 2006). Por lo anterior, y como resultado de la baja evapotranspiración, hay un gran excedente de agua, alimentando los ríos que descienden hacia las regiones costeras y a la cuenca Amazónica (Buytaert *et al.*, 2006).

1.4 Turberas

Las turberas son ecosistemas únicos que se desarrollan en regiones del planeta caracterizadas por bajas temperaturas y abundante precipitación durante todo el año (Wouter Buytaert *et al.*, 2011), sin embargo, se ha descrito la existencia de turberas en ecosistemas de elevada sequía al norte de Chile y Bolivia, donde este tipo de ecosistemas subsiste por el aporte de flujos subterráneos de agua proveniente del derretimiento de glaciares (Alzérreca, Laura, Loza, Luna, & Ortega, 2006; Squeo, Warner, Aravena, & Espinoza, 2006). Aproximadamente el 7 % de la superficie terrestre está cubierta por humedales, de este porcentaje el 3,3 % corresponde a humedales tipo turbera y solo el 0,3 % a turberas tropicales (Bao, Yu, Jia, & Wang, 2010). A pesar de la diferencia en el área que ocupan estas últimas almacenan hasta 10 veces más carbono que sus homologas en regiones templadas (Page *et al.*, 2011; Rudiyanto *et al.*, 2016). En general estos humedales juegan un papel clave en el ciclo global del carbono y en la regulación de agua apta para consumo humano Figura 2 y 3 (W. Buytaert *et al.*, 2005; Chimner, R. A., & Karberg, 2008). Los depósitos de turba se caracterizan por un alto contenido en C, lo que equivale a aproximadamente el 50 % de la materia orgánica seca, y el almacenamiento de C en turberas representa casi un tercio del C terrestre del planeta, que corresponde al 75% de almacenamiento de C en la atmósfera (Gorham, 1991). La tasa de captura de carbono en las turberas es un elemento crucial en la comprensión del ciclo global del C, y se ha estimado en diferentes escalas de tiempo para determinar el papel de las turberas en el calentamiento global dentro del contexto del aumento de CO₂ atmosférico (Beilman, MacDonald, & Yu, 2010).

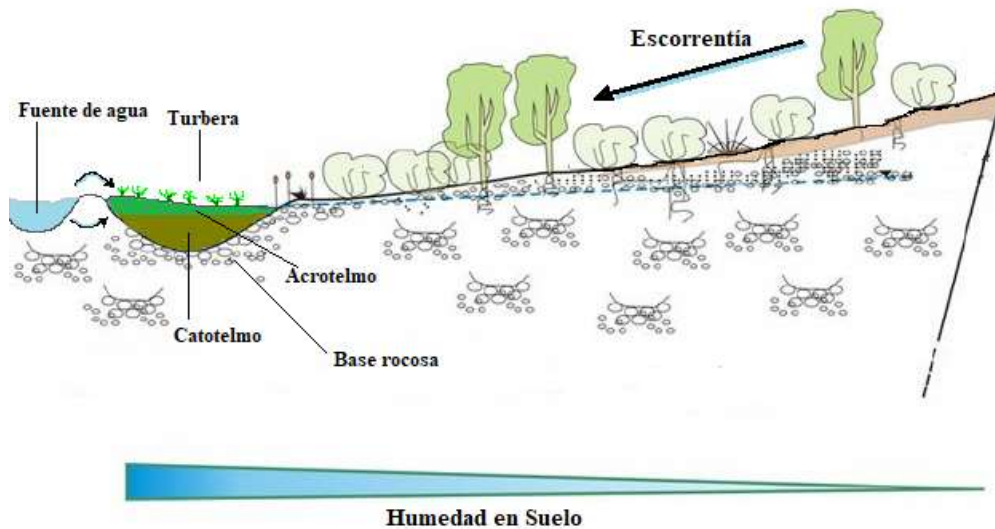


Figura 2. Turbera minerotrófica. La turbera es alimentada por fuentes de agua cercanas y por escorrentía que transporta minerales.

Entre la vegetación asociada a las turberas de alta montaña, el musgo *Sphagnum* es el elemento dominante, este musgo presenta propiedades químicas y biológicas que lo convierten en un género muy especial dentro del reino vegetal (Benavides, Vitt, & Wieder, 2013; Clymo & Hayward, 1982), pues constituye ambientes de turba caracterizados por una alta acidez y anoxia debidas al anegamiento superficial, bajas temperaturas y la presencia de “*sphagnol*”, compuesto fenólico inhibidor del crecimiento de otras plantas (Aerts, Verhoeven, & Whigham, 1999). Al ascender en elevación estas turberas dominadas por *Sphagnum* pasan a ser dominadas por cojines de plantas vasculares como *Plantago rigida* y *Distichia muscoides* (Benavides *et al.*, 2013; Bosman, Hooghiemstra, & Cleef, 1994).

1.4.1 Carbono en Turberas. En suelos de páramo el carbono almacenado puede variar entre 119 Mg/ha (Zimmermann *et al.*, 2010) y 397 Mg/ha (Vásquez, Ladd, & Borchard, 2014) en los primeros 50 cm de profundidad bajo vegetación natural. En turberas de este ecosistema se ha

reportó hasta 2097 Mg/ha (Comas *et al.*, 2017), a una profundidad de 6 metros (Tabla 2). Los suelos con cubierta vegetal tipo briófitas y especies arbustivas, que aíslan la superficie de las condiciones climáticas como la precipitación y la incidencia directa de la radiación solar, presentan una menor descomposición de la materia orgánica, como consecuencia los contenidos de carbono orgánico son más altos. Además, la presencia de una alta densidad de raíces característica de estas plantas puede influir en los valores altos de COS (Tonneijck *et al.*, 2010; Zimmermann *et al.*, 2010). En estos humedales de alta montaña, pueden ser tres los factores que propician la alta acumulación de COS: a) la vegetación adaptada al ambiente de páramo, ya que están fotosintéticamente activa durante todo el año, proveyendo materia orgánica de manera continua al suelo (Squeo *et al.*, 2006); b) la alta saturación de los suelos y c) las bajas temperaturas, tanto “a” como “b” propician la disminución de las tasas de mineralización y de ciclaje de la materia orgánica, dando origen a la presencia de suelos negros y húmicos con alto contenido de carbono (Buytaert *et al.*, 2006).

1.4.2 Turberas: funciones ecológicas y servicios ecosistémicos Más de 100 millones de personas necesitan y utilizan múltiples servicios ambientales ofrecidos por los paisajes naturales de los páramos (Buytaert *et al.*, 2011). En estas zonas de alta elevación tropicales, las turberas no ocupan áreas tan extensas como sus contrapartes del norte o del sur del planeta, sin embargo, ellas se desarrollan en depresiones topográficas localizadas en los valles y mesetas de los páramos y ocasionalmente en los bosques altoandinos (Benavides, 2015). Dentro de los páramos, las áreas de turberas son pequeñas pero frecuentes y regulan la acumulación y salida de agua, en estos sitios ellas interceptan los flujos de escorrentía superficial y en muchas ocasiones sub-superficial ver figura 2 (Benavides *et al.*, 2013). Las turberas almacenan hasta un 10% del agua dulce mundial y

pueden acumular hasta 35 veces su peso en agua, que es liberada a las corrientes cercanas de manera gradual previniendo sequías, aumentando el flujo base y regulando las crecientes de |

Las condiciones particulares de los ecosistemas de turberas: su constante anegación, las bajas temperaturas, el empobrecimiento de nutrientes de sus aguas, hace que la descomposición de la materia orgánica depositada se torne muy lenta (Scheffer *et al.*, 2001). Bajo estas circunstancias, la acumulación de materia orgánica puede ocurrir durante miles de años, formando una matriz ideal para la conservación de micro y microfósiles, tales como restos óseos animales y restos vegetales, incluyendo granos de polen (Clymo & Hayward, 1982; Zúñiga-Escobar, Cuero-Guependo, Peña-Óspina, Peña-Salamanca, & Torres-González, 2013). El depósito y la conservación de grandes cantidades de materia orgánica posicionan a las turberas entre los ecosistemas más importantes para el ciclo global del carbono Figura 3. Estas, almacenan en todo el mundo más de 600 Pg de carbono, que equivale a casi un tercio del carbono global del suelo. (Yu *et al.*, 2011). Las turberas han jugado un papel muy importante en el modelamiento del clima global, Frohking & Roulet (2007) han sugerido incluso que el secuestro de carbono (CO₂) de la atmósfera por turberas ha resultado en un efecto de enfriamiento global desde el comienzo del Holoceno (alrededor de 11.500 años).

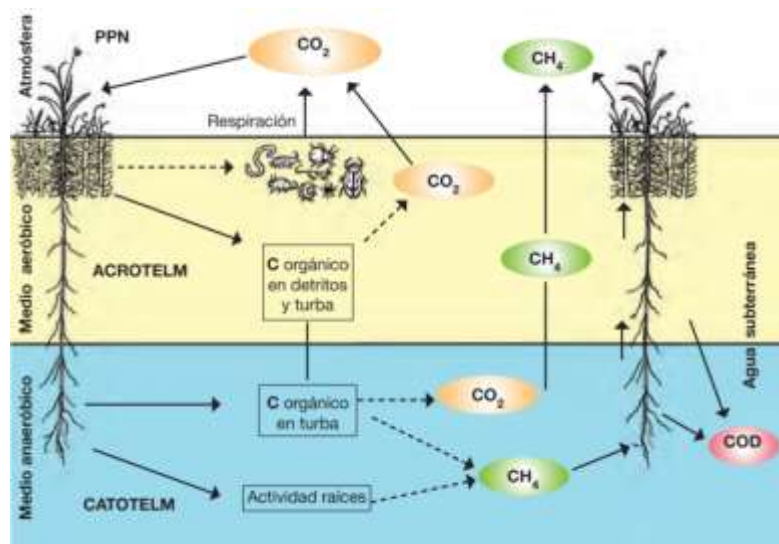


Figura 3. Ciclo de Carbono en una turbera con fases aeróbica y anaeróbica. En el estrato aeróbico es más activa la descomposición y la liberación de CO₂. El ascenso temporal del nivel freático disminuye su emisión e incrementa la de metano (CH₄). El excedente del balance de carbono en el acrotelmo pasa a formar luego de muchos años parte superior del catotelmo. Los símbolos circulares corresponden a fases gaseosas. Las flechas punteadas representan procesos bacterianos. PPN: Producción Primaria Neta. COD: Carbono Orgánico Disuelto transferido al flujo subterráneo. Tomado de Iturraspe, R. (2010).

1.5 Amenazas para los ecosistemas de turbera

Las principales amenazas a los humedales de páramos son las actividades antrópicas, cultivos, extracción minera y el pastoreo disminuyen la cobertura vegetal natural que protege del clima estos ecosistemas. El pisoteo del ganado aumenta la compresión del suelo, rompe la capa vegetal que protege la turba aumentando la entrada de aire que promueve la descomposición aeróbica del material orgánico. El uso de fertilizantes para el mejoramiento de los cultivos aumenta los contenidos de nutrientes en el agua aumentando la descomposición en la turba. Estas actividades pueden reducir significativamente los niveles de CO₂ de estos ecosistemas comparados con aquellos no perturbados (Wouter Buytaert *et al.*, 2011; Dercon *et al.*, 2007; James L Luteyn *et al.*, 1999). El calentamiento global del clima y el cambio en el uso del suelo es tal vez la mayor

amenaza para los ecosistemas de turbera, interrumpiendo su función como sumideros C y convirtiéndolas a emisoras de CO₂.

En este estudio se estimó el porcentaje de carbono orgánico acumulado en una turbera ubicada en el Valle de los Frailejones en el parque nacional natural (PNN) Chingaza y que está en el área inundable del proyecto Chingaza II, acción que podría generar a corto y mediano plazo una liberación considerable a la atmosfera de gases de efecto de invernadero como CO₂ y CH₄. Por tanto, se hace urgente conocer cuales ecosistemas funcionan como sumideros de CO₂ y cuánto de este gas podría liberarse de ser perturbada la turbera. Este trabajo servirá para el monitoreo a largo plazo del humedal, y de esta forma encender nuevas luces sobre cómo son las dinámicas de carbono de estos ecosistemas de alta montaña de vital importancia para la ecología de diversas especies de animales y plantas, así como para las poblaciones que rodean estos ecosistemas paramunos.

1.6 Método para determinar carbono en turberas

Por medio de un nucleador o barreno se extraen muestras de suelo del humedal, que luego se analizan para estimar sus contenidos de carbono orgánico del suelo (COS). El método de calcinación o pérdida por ignición (loss on ignition, LOI) consiste en estimar el valor del contenido de materia orgánica (MO) y se basa en cuantificar cuanto es la pérdida de peso que sufre una muestra de suelo al ser sometida a elevadas temperaturas con rangos de 250 - 600 °C siendo las más apropiadas de 350 - 400 °C en una mufla por periodos de tiempos estimados de 2-24 horas, en el cual también se incluye como pre-tratamiento el secado de la muestra a 105 °C por 24 horas; cabe mencionar que al ser sometidos a temperaturas mayores a 500 °C pueden implicar importantes

errores en la estimación de MO ya que puede existir una pérdida de dióxido de carbono de los carbonatos, agua estructural de los minerales de arcilla, oxidación del ión ferroso, descomposición de sales hidratadas y óxidos. También si se desea cuantificar el carbono orgánico total (COT) a partir de la MO se debe utilizar el factor Van Bemmelen el cual puede variar para distintos tipos de suelos (Eyherabide, Sainz Rozas, Barbieri, & Echeverría, 2014).

2. Materiales y Métodos

2.1 Área de estudio

La investigación se llevó a cabo en el mes de noviembre del año 2017 en una turbera dentro del área conocida como el Valle de los Frailejones a 3190 msnm, en jurisdicción del Parque Nacional Natural Chingaza (PNN Chingaza) ubicado en la cordillera oriental de los Andes Colombianos, al nororiente de Bogotá, entre los 73°30' y los 73°55' de longitud oeste y los 4°20' y 4°50' de latitud norte, en jurisdicción de los departamentos Cundinamarca y Meta. Limita al norte con los municipios de Guasca, Junín y Gachalá, al oriente con el municipio de Medina, al sur con los municipios de Restrepo, Cumaral, El Calvario y San Juanito y por el occidente con los municipios de Fómeque, Choachí y La Calera.

Las categorías ecológicas en las que se encuentra el parque son: páramo semihúmedo, húmedo y muy húmedo; en relación con la temperatura, presenta variaciones entre 4°C hasta los 21,5 °C alcanzando valores de -2°C. La humedad relativa se mantiene generalmente en el año entre el 85%

y 90%. En noviembre y febrero se presentan los meses más radiantes y, de junio a julio los meses más nublados; los vientos no son tan intensos en páramo varían generalmente entre 1 y 2 m/s, se pueden alcanzar velocidades de 16 m/s en las cuchillas (Vargas Ríos & Pedraza Paola, 2004). El PNN Chingaza hace parte de un gran complejo desarrollado a partir de movimientos de masas glaciares, areniscas y pizarras; son suelos con alto contenido de materia orgánica y sin cenizas volcánicas. Se encuentra en un estado de conservación óptimo y está protegido dentro del Sistema de Parques Naturales Nacionales (PNN) de Colombia, desde 1977 (Lora-Gómez, 2005).

Algunos estudios realizados en el PNN Chingaza indican no solo su importancia ecológica y biodiversidad florística con 89 especies (Udo Schmidt-Mumm & Orlando Vargas Ríos 2012), sino, es de resaltar su importancia económica y social, ya que el 80% del agua potable que se consume en Bogotá y algunos municipios aledaños depende de los reservorios hídricos del PNN Chingaza (Schmidt-Mumm & Vargas Ríos, 2012; Vargas Ríos & Pedraza, 2004). El área de estudio de este trabajo está ubicada dentro del municipio de Fómeque, departamento de Cundinamarca, y corresponde a un área de humedal a un costado de la laguna de Chingaza (Figura 4)

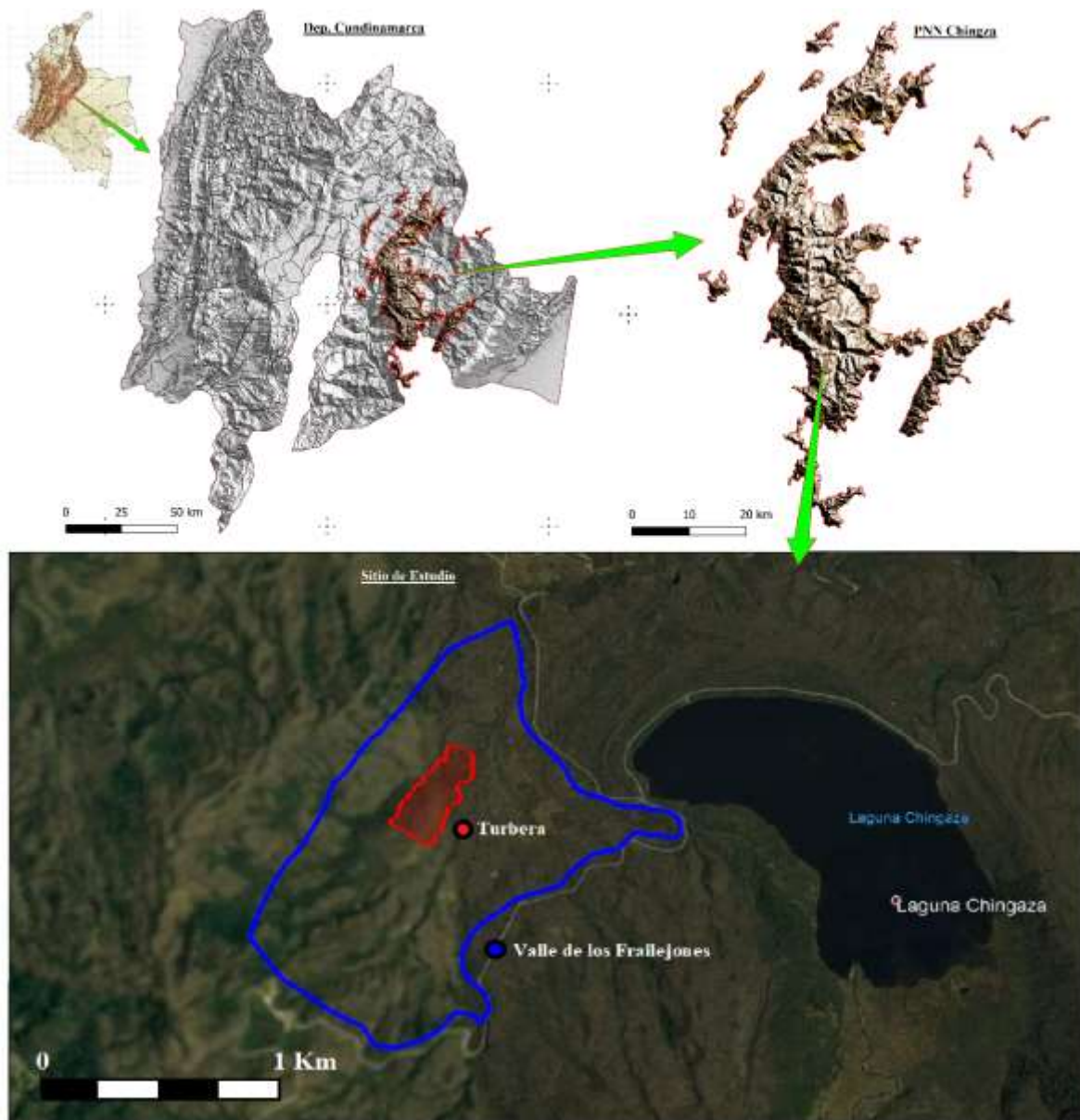


Figura 4. Localización geográfica del sitio de estudio en el PNN Chingaza. Indicado con borde azul el Valle de los Frailejones y con borde rojo la turbera muestreada (mapas: Colombia, Cundinamarca a escala de 1:100 mil; Imagen: PNN Chingaza, Imagen Satelital área de estudio. Fuente: Google Earth).

2.2 Cálculo del área y el volumen de la turbera

En la zona conocida como el Valle de los Frailejones se realizó un recorrido por el perímetro de la turbera seleccionada marcando los puntos con un GPS (Garmin GPSMAP 64s), los datos de posición obtenidos con el GPS se introdujeron en el programa QGIS (QGIS Development Team, 2019. QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project. <https://qgis.org>.) para el cálculo del área. Para el cálculo del volumen de la turbera se tomaron mediciones de la profundidad con un sensor de profundidad extensible (Figura 5) en varios puntos aleatorios del humedal que fueron referenciados con el GPS, esta medida se obtuvo introduciendo el sensor en el humedal hasta hacer contacto con la base rocosa del suelo, se procedió a marcar en el sensor la profundidad hasta donde ésta se enterró, se extrajo y se midió con un flexómetro desde la punta del sensor hasta la marca puesta. Los puntos de registro de la profundidad se ingresaron en una tabla Excel y se importaron en QGIS donde se convirtieron a formato *Shapefile*. A partir éstos, se creó un mapa de profundidades de la turbera y se calculó en QGIS el contorno de la base con la herramienta *contour* a intervalos de 10 cm, cada línea de contorno se extrajo aparte, en total se crean 50 polígonos de las líneas de contorno. Luego se creó un modelo digital de elevación del terreno (MDT) con los puntos de elevación (profundidad) de toda la turbera. Los polígonos de los contornos también convirtieron a MDT, luego, se superpusieron el MDT de profundidad de toda la turbera y el MDT creado a partir del polígono del contorno con la cota a la que se le desea calcular el área y el volumen, esto se realizó para todas las 50 capas creadas.

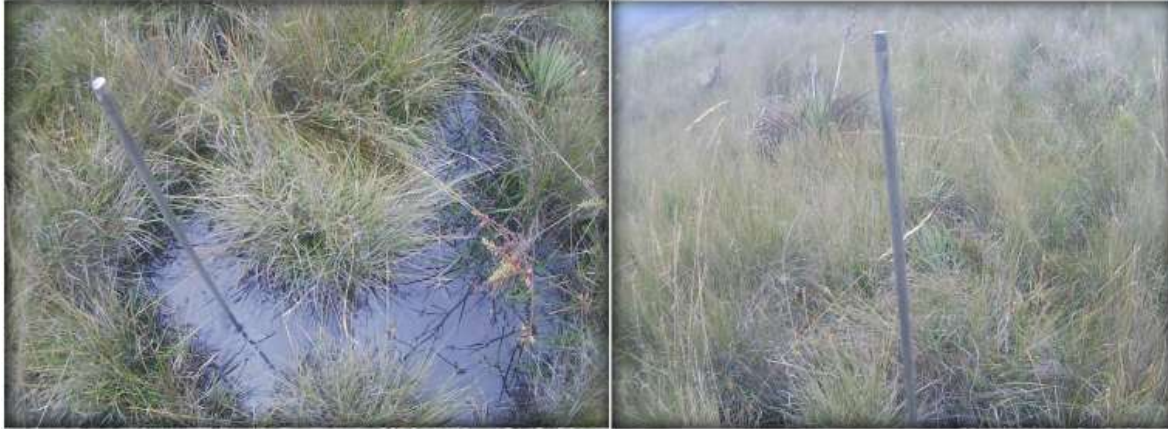


Figura 5. Sensor de profundidad extensible para tomar datos de la profundidad de la turbera. (Fotografía: Diego Reyes-Guerra, 2017).

2.3 Caracterización Hidrológica.

2.3.1 Análisis del agua. Los datos se tomaron de un pozo de monitoreo de 10 x 10 cm por 20 cm de profundidad, que se cavó con una pala de jardín en la turbera de estudio. Se realizó por medio de un termómetro la toma de datos de temperatura del agua. En un frasco sellado herméticamente se tomó una muestra de agua que se transportó a las instalaciones de química de la Universidad Industrial de Santander (UIS), donde se tomaron los datos de pH.

2.3.2. Nivel freático. De la excavación hecha (pozo de monitoreo) en la turbera, se hizo la medición del nivel freático, tomando la medida con un flexómetro desde la superficie de la turbera, hasta la altura alcanzada por el nivel del agua dentro del pozo.

2.3.3. Contenido de humedad del suelo (Hs). Las submuestras de suelo de 10 cm de espesor se pesaron en fresco en una balanza electrónica, luego se llevaron a secado en un horno a 105° C hasta obtener un peso constante, las diferencias en los pesos, antes y después del secado, se

compararon para obtener el contenido de humedad de cada una de las muestras de suelo. La ecuación utilizada para obtener el porcentaje de agua retenida por el suelo fue la siguiente:

$$\% Hs = \frac{m_h - m_d}{m_d} \times 100$$

Donde,

%Hs = Contenido de humedad del suelo

m_h = Peso del suelo húmedo

m_d = Peso del suelo drenado

2.3.4. Estimación de la capacidad de retención de agua de la turbera. Se procedió a estimar la capacidad de retención de agua de toda la turbera multiplicando volumen total del humedal por el promedio del contenido de humedad de todas las muestras de suelo:

$$\bar{x}_{\%Hs} = \sum_{i=1}^n x_i = \frac{x_1 \% m_1 + x_2 \% m_2 + x_3 \% m_3 \dots}{n}$$

$$VRW_{Turbera} = \bar{x}_{\%CC} * Vol_t$$

Donde,

$\bar{x}_{\%Hs}$ = Media del contenido de humedad de la turbera

$X_i \% m_i$ = Porcentaje de agua de la muestra

Vol_t = Volumen de la turbera

$VRW_{turbera}$ = Volumen total de agua que puede retener la turbera

2.4 Caracterización de suelo.

2.4.1 Extracción de núcleos. El perforador ruso usado con un diámetro de 2.5 cm minimiza la compactación y distorsión de la muestra (Tan, 2005). Una vez determinados los puntos donde se tomarán las muestras (tres puntos en toda la turbera, como criterio de escogencia se tuvieron en cuenta aquellos puntos ubicados hacia el centro del humedal y que presentasen los mayores valores de profundidad tomados por el sensor), se procedió a retirar la capa vegetal (la capa vegetal retirada no se colectó, se volvió a dejar en la turbera), y se dejó descubierta la turba. El perforador se presionó contra la turba y así llenó por completo la cámara del equipo con el volumen de la muestra (50 cm de alto por 2.5 cm de diámetro). Las muestras se recolectaron dividiendo el núcleo madre (50 cm) en fragmentos de a 10 cm, el procedimiento se llevó a cabo hasta llegar a la base rocosa de la turbera con el fin de abarcar todo el perfil vertical del humedal, las sub-muestras de 10 cm se rotularon y preservaron a 4 °C en una nevera portátil de icopor hasta su llegada al laboratorio (laboratorios de la UIS) para su correspondiente procesamiento y análisis. Este procedimiento se realizó para cada uno de los tres puntos.

2.4.2 Cálculo de la densidad aparente. En el herbario de la escuela de biología de la UIS se procedió al secado de los núcleos extraídos de la turbera en una estufa a 105 ± 5 °C hasta alcanzar un peso constante. Se calculó la densidad aparente en seco, dividiendo la masa de cada muestra de suelo secada en estufa a 105 ± 5 °C por el volumen original de la muestra, determinado, a partir del volumen del nucleador/barrena rusa utilizada para la extracción de los núcleos. La ecuación utilizada para determinar la densidad aparente del suelo (D_a) fue la siguiente:

$$D_a = \frac{m_s}{v_t}$$

Donde,

D_a = Densidad aparente del suelo

m_s = Masa suelo seco

v_t = Volumen total



Figura 6. Muestras de suelo secadas en horno a 105 ± 5 °C. (Fotografía: Diego Reyes-Guerra, 2017).

2.4.3 Estimación del contenido de carbono. Para estimar el contenido de carbono orgánico del suelo (COS) primero se estimó el contenido de materia orgánica (MO) del suelo extrayendo y pesando aproximadamente de 2 gramos (g) de la sub-muestra de cada muestra de suelo de 10 cm, esto se hizo para todas las secciones de los núcleos (0-10, 10-20, 20-30, 30-40, 40-50 cm... hasta la base de la turbera y así cubrir todo el perfil vertical), el método utilizado para estimar el porcentaje de MO del suelo fue el de pérdida por ignición (LOI) (Nelson & Sommers, 1996): Las muestras se secaron cada una en recipientes separados dentro del horno del herbario de la escuela

de biología (Figura 6) a una temperatura de 105 ± 5 °C. Después de este tiempo las sub-muestras fueron maceradas y pasadas por un tamiz de 2 mm. Luego se colocaron en crisoles de pesos conocidos y fueron quemadas a 550 °C por 14 horas, al finalizar este tiempo se retiraron de la mufla, se pesó las cenizas y la diferencia de los pesos: antes de la quema en la mufla y después de ésta, se utilizó para determinar el porcentaje de contenido de materia orgánica del suelo (Chambers, Beilman, & Yu, 2011; Sparks *et al.*, 1996). La ecuación fue la siguiente:

$$\%MO = \frac{\text{peso } 105^{\circ}C - \text{peso } 550^{\circ}C}{\text{peso } 105^{\circ}C} \times 100$$

Donde,

%MO = Porcentaje de materia orgánica del suelo

Peso 105°C = Peso de la muestra secada en horno a 105° C

Peso 550°C = Peso de la muestra calcinada en mufla a 550° C

Para la determinación del % CO se utilizó el factor Van Bemmelen de (1.724) (Nelson & Sommers, 1996; Soil Survey Staff, 2014), siendo este uno de los métodos más utilizados para este tipo de cálculo, el cual hace referencia a que el 58% de la MO está compuesta por C orgánico. Por lo tanto, utilizó la siguiente ecuación:

$$\%CO = \frac{\%MO}{1.724}$$

Donde,

%CO = Porcentaje de carbono orgánico del suelo

%MO = Porcentaje de materia orgánica del suelo

2.5 Análisis de los datos

Se realizó análisis descriptivo de las variables: densidad aparente del suelo (D_a), materia orgánica del suelo (MO) y el porcentaje de retención de agua del suelo (R_w). Se evaluó si los datos presentan distribución normal, u homogeneidad de varianza, mediante la prueba Kolmogoroff-Smirnov y prueba Levene, respectivamente (Anexo 1). Se estimó el coeficiente de correlación de Pearson para determinar la asociación entre las variables MO, D_a , R_w y la profundidad del humedal (anexo2).

Posteriormente y con el fin de determinar si existe homogeneidad espacial en la turbera, se evaluó si los valores de D_a y COS en los 3 núcleos de suelo extraídos presentaban diferencias significativas entre sí mediante un análisis de covarianza ANCOVA (Anexo 3). En donde se tomó los valores de COS y D_a de una muestra a una profundidad determinada del núcleo A y se las comparó con los valores de COS y D_a de muestras a esa misma profundidad de los núcleos B y C; así como muestras del núcleo C contra muestras de los núcleos A y B.

Finalmente, se llevó a cabo un análisis de regresión para evaluar la relación lineal entre las variables COS y D_a en función de la profundidad, y de esta forma poder hacer inferencias del contenido de COS a partir de los contenidos de la D_a que pueda presentar cualquier muestra de suelo tomada aleatoriamente en cualquier perfil de profundidad de la turbera. Todos los tratamientos y análisis estadísticos se realizaron mediante el software libre RStudio (R Core Team 2019).

3. Resultados

3.1 Cálculo del área y el volumen de la turbera

La turbera de estudio se encuentra ubicada en el Valle de los Frailejones con 13,1 hectáreas, es decir el 8,9 % del área del valle. El fondo del humedal presenta un patrón irregular con valores entre 5 m y 0,59 m, con una profundidad promedio de 1,52 m (Figura 7). El volumen total del humedal que se estimó en 118.802,78 metros cúbicos ver Tabla 1.

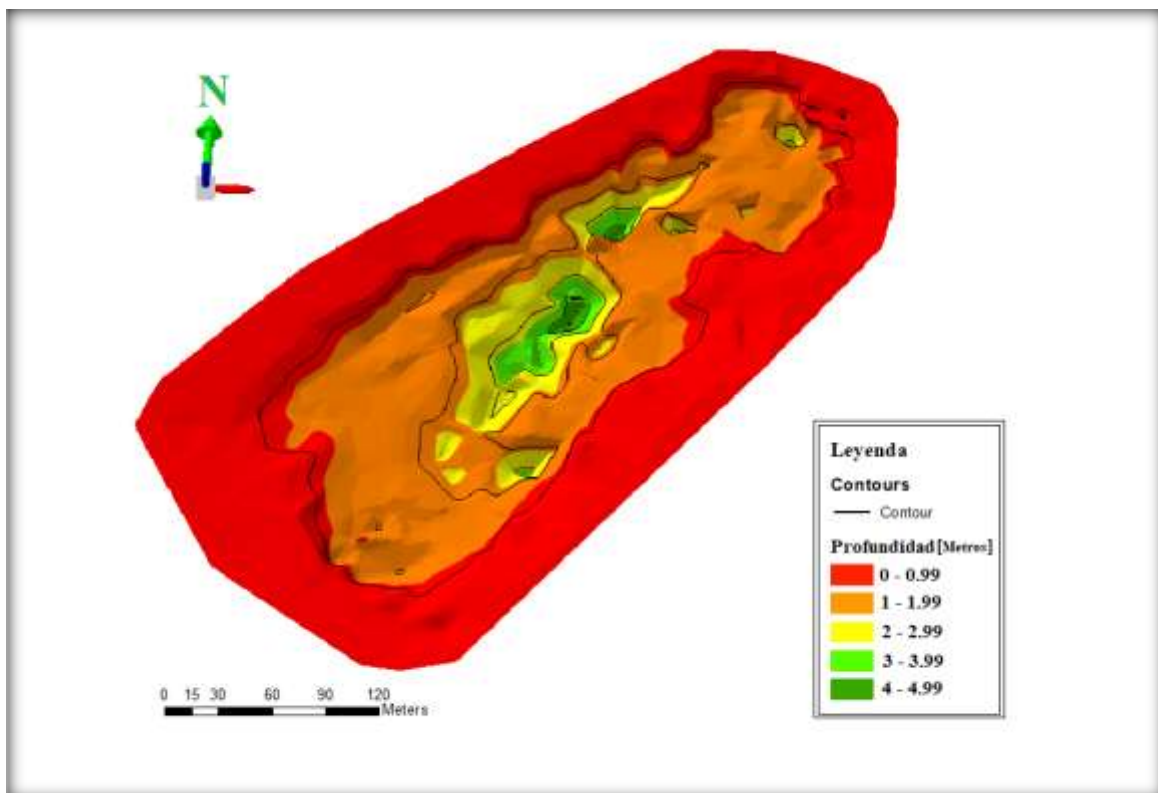


Figura 7. Imagen 3D del contorno de la base de la turbera. Las líneas corresponden a las curvas de nivel cada metro, los colores corresponden a los intervalos de profundidad.

3.2 Estimación de la capacidad de retención de agua de la turbera.

El nivel freático en los tres puntos para la temporada de extracción de los núcleos estuvo en mayoría de los casos a nivel de la superficie, con un pH promedio del agua de 4,1, datos tomados de los pozos de monitoreo. El PNN Chingaza tiene un registro de precipitación anual promedio de 4000 mm (IDEAM). La turbera, se estimó que puede retener un volumen de agua máximo aproximado de 4.003.686 litros, este valor corresponde a los datos obtenidos al momento del muestreo (principios de noviembre, hacia finales de la temporada de lluvias), valor que puede fluctuar según la temporada del año.

Los porcentajes de retención de agua como se muestra en las Figura 8 y Figura 9 están relacionados con la profundidad de la turbera, como con los valores de la densidad aparente y el contenido de materia orgánica del suelo. Se calculó el coeficiente de Pearson para estimar la fuerza de esta relación donde cor: -0,82, P-valor: 2,588e-13; cor: -0,73, P-valor: 1,545e-09; cor: 0,78, P-valor: 3,523e-11, corresponden a los valores de profundidad, D_a y MO de la turbera respectivamente, indicando una fuerte relación entre la retención hídrica del suelo y las variables: profundidad, densidad aparente y materia orgánica.

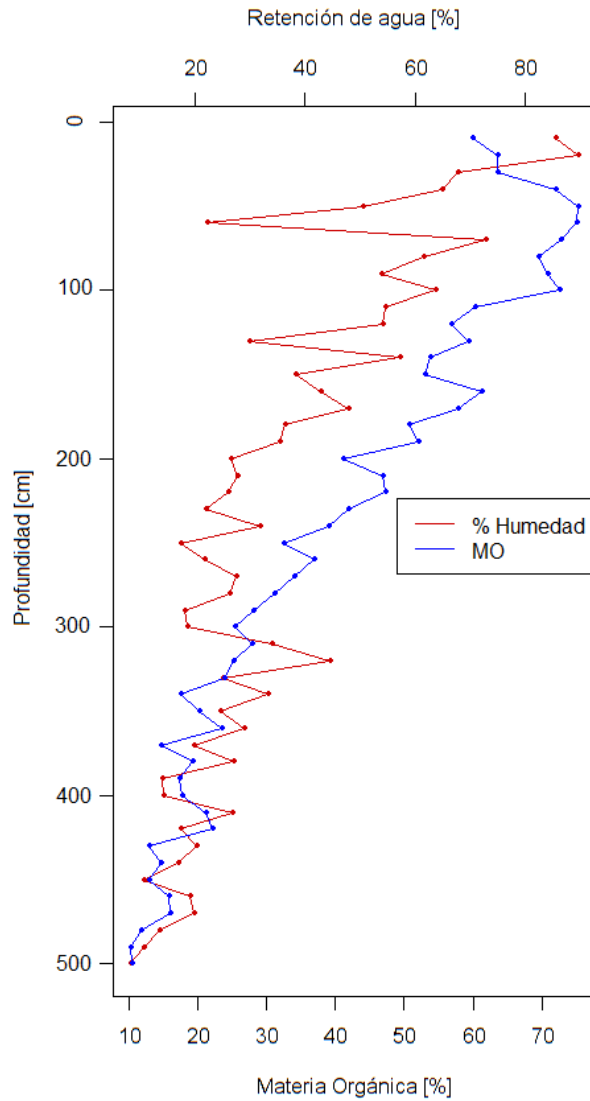


Figura 8. Porcentaje de agua del suelo (línea roja) y el porcentaje de materia orgánica del perfil (línea azul) en función de la profundidad de la turbera.

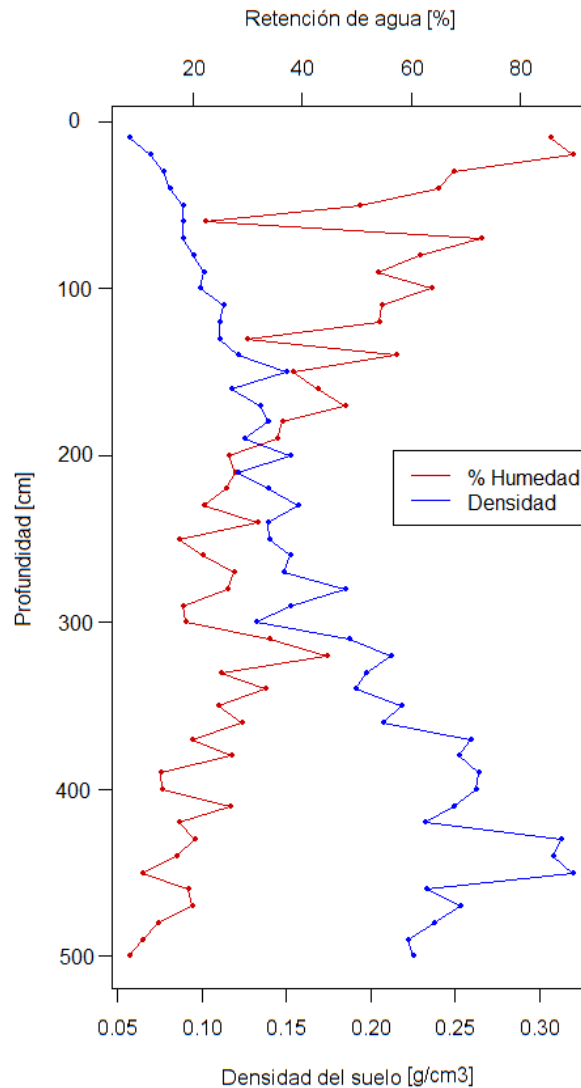


Figura 9. Porcentaje de agua (línea roja) y la densidad aparente del suelo (línea azul) en función de la profundidad de la turbera.

Los valores de retención agua disminuyen con respecto aumenta la profundidad de la turbera, un comportamiento similar presenta con respecto a la densidad aparente del suelo, a medida que esta aumenta el contenido hídrico del suelo disminuye, en decir, existe una relación inversa entre la densidad aparente del suelo y la capacidad del suelo para retener agua. La materia orgánica del

suelo presenta una relación positiva con respecto a la humedad del suelo, a mayor porcentaje de MO en el suelo, la capacidad de este de retener agua aumenta.

3.3 Estimación del contenido de carbono orgánico de la turbera.

Los resultados del análisis de covarianza (ANCOVA) para determinar la homogeneidad espacial en los diferentes horizontes de profundidad de la turbera, arrojaron que las diferencias no eran significativas (P-valor > 0,05) (ver anexo 3): las interacciones entre punto A y B (Multiple R-squared: 0,7721; P-valor: 0,21349), A y C (Multiple R-squared: 0,7721; P-valor: 0,61498), B y C (Multiple R-squared: 0,7721; P-valor: 0,15566), por lo que podemos inferir que los valores de D_a en los tres núcleos se comporta de manera similar en sus diferentes horizontes de profundidad, por lo tanto, sus valores se pueden extrapolar a todo el perfil de la turbera. De igual forma se realizó una prueba para determinar qué tan significativa son las diferencias en el COS en función de la profundidad de la turbera, el modelo arrojó que las diferencias no son significativas, puntos A y B (Multiple R-squared: 0,8572; P-valor: 0,4298), A y C (Multiple R-squared: 0,8572; P-valor: 0,3346), B y C (Multiple R-squared: 0,8572; P-valor: 0,1420), por lo tanto, asumimos que el comportamiento tanto de la D_a como COS en cada perfil de profundidad es similar en la totalidad de la turbera, presenta homogeneidad espacial.

La Densidad aparente del suelo está relacionada con la profundidad de la que proceda cada muestra del humedal, los valores más bajos de D_a se presentan cerca de la superficie en los primeros 100 cm (0,057 a 0,095 g/cm³) y los más altos están alrededor de los últimos 100 cm (0,222 a 0,312 g/cm³) hacia el fondo de la turbera, el promedio para todas las columnas fue 0,168 g/cm³, ver Tabla 1.

La regresión lineal nos permite estimar el contenido de carbono de la turbera, en nuestro modelo el contenido de COS presentó una fuerte relación con la profundidad de la turbera ($R_s: 0,93$; P-valor: $2,2e-16$), dado que a medida que aumenta la profundidad, el contenido de COS disminuye, de manera similar es el comportamiento con la D_a , a valores altos de esta, los valores de contenido de COS se hacen más pequeños ($R_s: 0,81$; P-valor: $2,2e-16$), por tanto, el contenido de carbono orgánico se podrá inferir partiendo de la D_a que presenta el terreno y de la profundidad de donde se extrae la muestra ver Figura 10 y Figura 11.

Los suelos en la turbera de estudio presentan los porcentajes más altos de materia orgánica en los perfiles verticales más próximos a la superficie por lo que el porcentaje de COS es igualmente más alto en estos horizontes de profundidad; la densidad aparente del suelo, por el contrario, disminuye conforme las muestras están más próximas a la superficie característica que se refleja en los núcleos de suelo ya que presentan menor compactación y su textura es más fibrosa, su densidad va aumentando a medida que avanza en profundidad la muestra tornándose menos fibrosa al tacto y presentando mayor compactación (Figura 12).

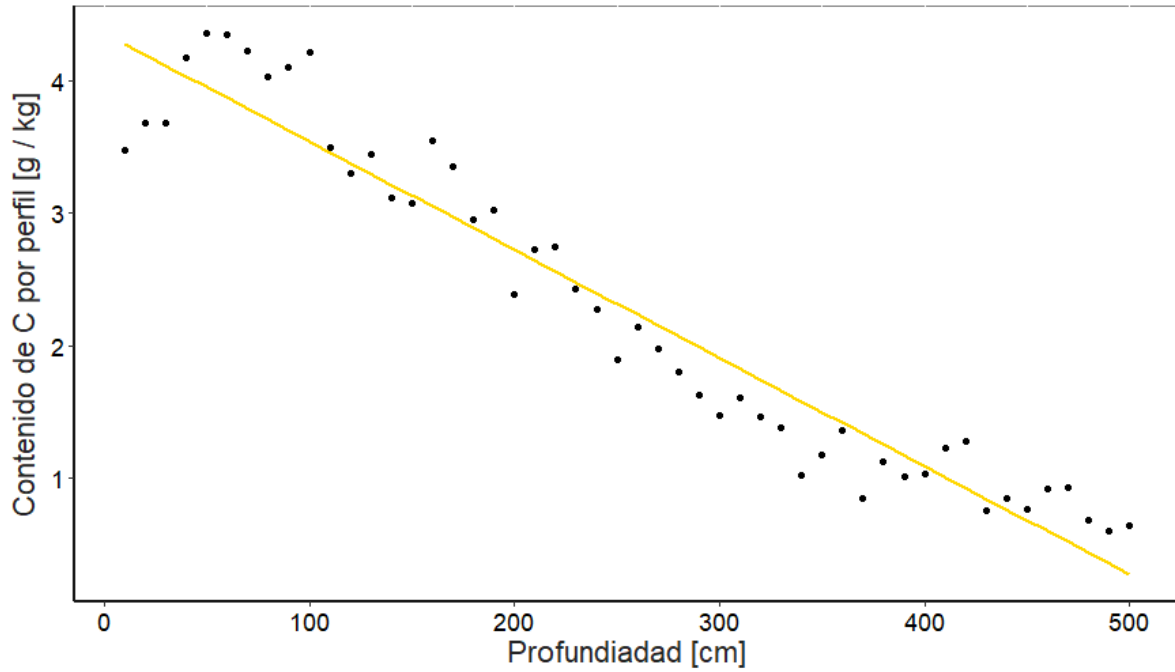


Figura 10. Regresión lineal: Contenido de COS Vs. Profundidad de la turbera.

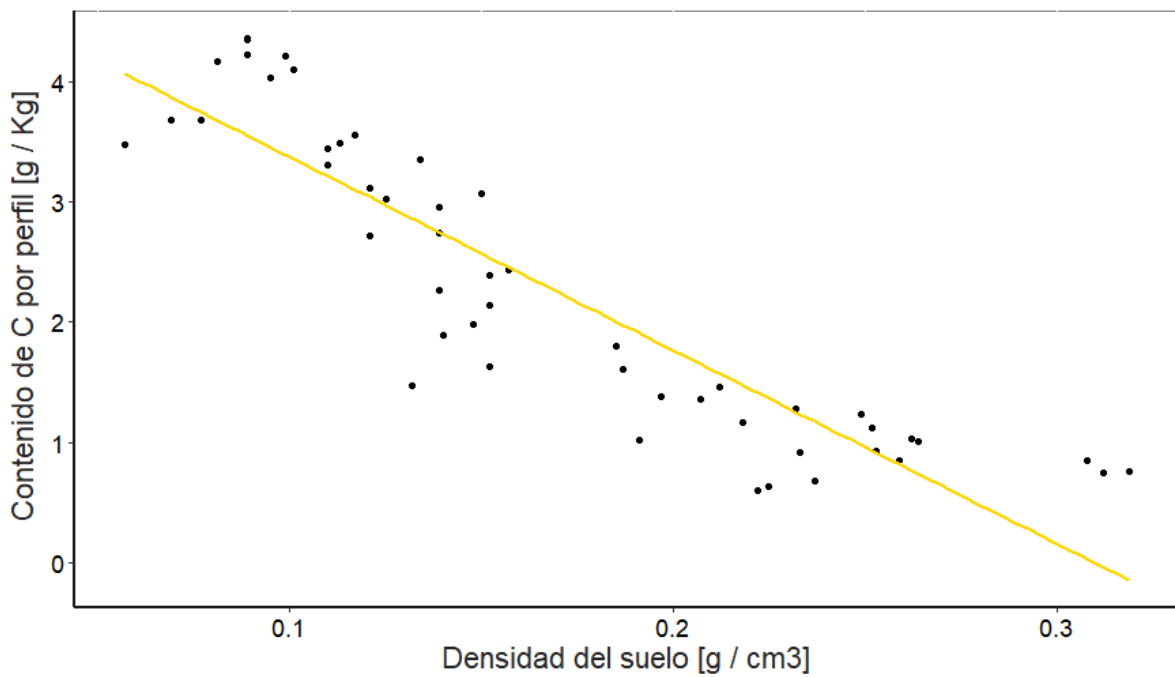


Figura 11. Regresión lineal: Contenido acumulado de COS Vs. densidad aparente del suelo.

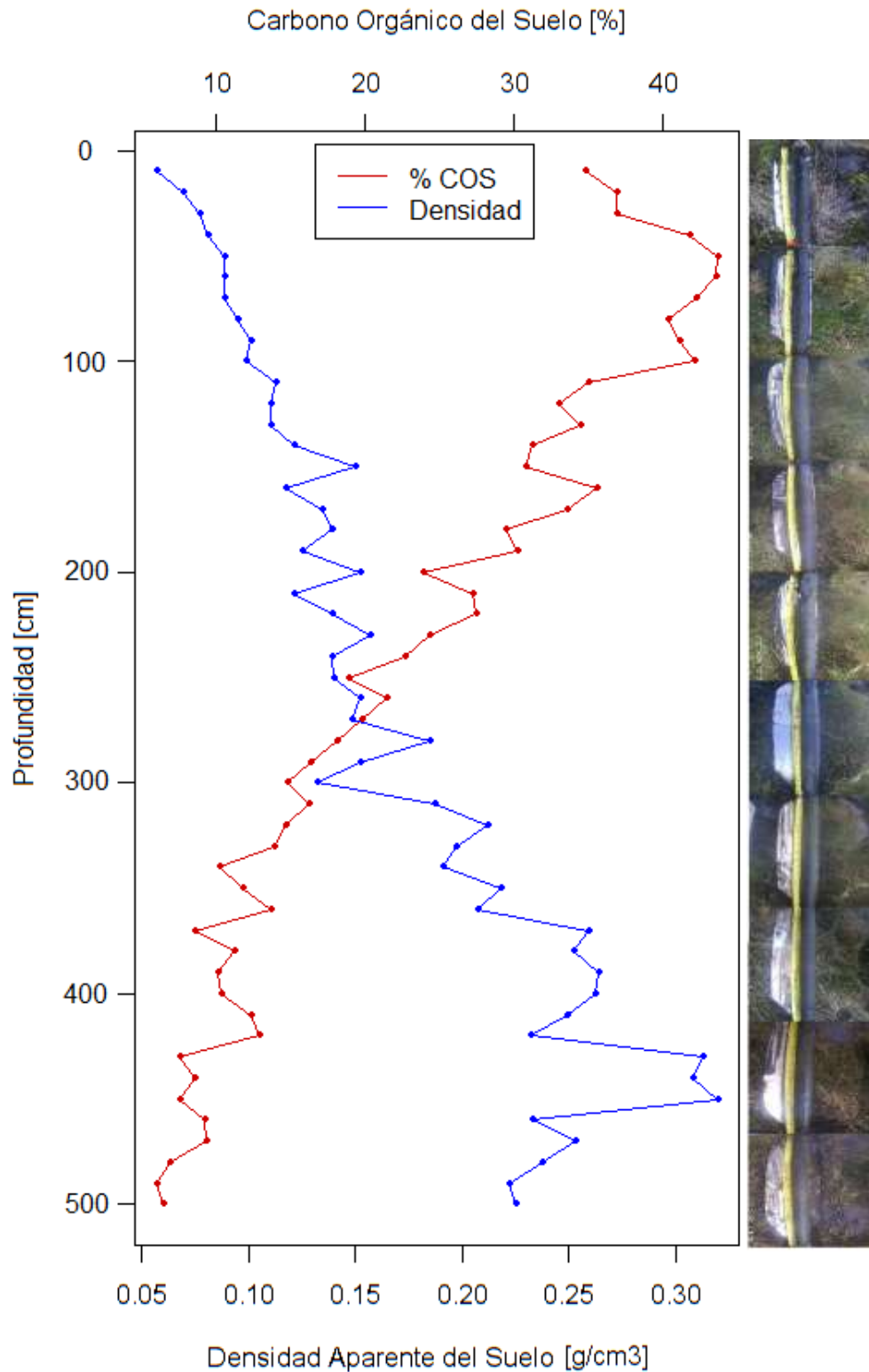


Figura 12. Carbono orgánico y la densidad aparente del suelo en función de la profundidad de la turbera, a la derecha los núcleos extraídos cada 50 cm. (Fotografías: Diego Reyes-Guerra, 2017)

La turbera de estudio contiene un stock total de 1536,98 Mg C ha⁻¹ de carbono orgánico en su suelo, los valores de contenido de carbono son más altos en los primeros 2 metros de profundidad, luego disminuyen a medida que se acerca la base de la turbera Tabla 1.

Tabla 1.

Depósito de Carbono en la turbera.

Profundidad capa cm	Esesor capa m	Volumen por capa m ³	Densidad apa Mg/m ³	COS %	C stock por capa Mg/ha	Profundidad acumulada m	Reservas de C Mg/ha	Contenido de C g/kg
0-10	0,1	11883,462	0,057	34,740	19,72	0-0,1	19,72	347,40
10-20	0,1	10321,124	0,069	36,794	25,47	0-0,2	45,18	367,94
20-30	0,1	9675,339	0,077	36,802	28,47	0-0,3	73,65	368,02
30-40	0,1	8530,102	0,081	41,710	33,62	0-0,4	107,28	417,10
40-50	0,1	7548,556	0,089	43,578	38,73	0-0,5	146,00	435,78
50-60	0,1	6708,575	0,089	43,535	38,72	0-0,6	184,72	435,35
60-70	0,1	6173,529	0,089	42,202	37,43	0-0,7	222,15	422,02
70-80	0,1	5891,014	0,095	40,286	38,28	0-0,8	260,42	402,86
80-90	0,1	5620,535	0,101	41,019	41,63	0-0,9	302,05	410,19
90-100	0,1	5411,750	0,099	42,116	41,87	0-1	343,92	421,16
100-110	0,1	5192,046	0,113	34,920	39,49	0-1,1	383,41	349,20
110-120	0,1	4938,038	0,110	32,951	36,32	0-1,2	419,74	329,51
120-130	0,1	4556,700	0,110	34,351	37,76	0-1,3	457,50	343,51
130-140	0,1	4065,560	0,121	31,135	37,55	0-1,4	495,04	311,35
140-150	0,1	3541,507	0,150	30,716	45,93	0-1,5	540,98	307,16
150-160	0,1	2948,920	0,117	35,501	41,53	0-1,6	582,51	355,01
160-170	0,1	2367,688	0,134	33,508	44,89	0-1,7	627,40	335,08
170-180	0,1	1921,907	0,139	29,455	40,95	0-1,8	668,35	294,55
180-190	0,1	1583,754	0,125	30,209	37,78	0-1,9	706,13	302,09
190-200	0,1	1385,544	0,152	23,851	36,17	0-2	742,30	238,51
200-210	0,1	1187,350	0,121	27,219	32,93	0-2,1	775,23	272,19
210-220	0,1	1012,102	0,139	27,418	38,21	0-2,2	813,45	274,18
220-230	0,1	877,730	0,157	24,317	38,11	0-2,3	851,56	243,17
230-240	0,1	767,073	0,139	22,671	31,41	0-2,4	882,97	226,71
240-250	0,1	674,018	0,140	18,862	26,43	0-2,5	909,40	188,62
250-260	0,1	583,861	0,152	21,439	32,60	0-2,6	941,99	214,39
260-270	0,1	517,804	0,148	19,767	29,33	0-2,7	971,33	197,67
270-280	0,1	459,084	0,185	18,037	33,39	0-2,8	1004,72	180,37
280-290	0,1	400,409	0,152	16,342	24,82	0-2,9	1029,55	163,42
290-300	0,1	342,947	0,132	14,706	19,45	0-3	1049,00	147,06
300-310	0,1	294,380	0,187	16,133	30,11	0-3,1	1079,10	161,33

Profundidad capa cm	Espesor capa m	Volumen por capa m ³	Densidad apa Mg/m ³	COS %	COS por unidad de volumen Mg/m ³	C stock por capa Mg/ha	Profundidad acumulada m	Reservas de C Mg/ha	Contenido de C g/Kg
310 - 320	0,1	253,490	0,212	14,616	0,031	30,95	0 - 3,2	1110,06	146,16
320 - 330	0,1	216,120	0,197	13,806	0,027	27,14	0 - 3,3	1137,19	138,06
330 - 340	0,1	180,302	0,191	10,223	0,020	19,53	0 - 3,4	1156,72	102,23
340 - 350	0,1	149,842	0,218	11,709	0,025	25,49	0 - 3,5	1182,21	117,09
350 - 360	0,1	124,737	0,207	13,609	0,028	28,23	0 - 3,6	1210,43	136,09
360 - 370	0,1	102,981	0,259	8,497	0,022	21,98	0 - 3,7	1232,41	84,97
370 - 380	0,1	85,053	0,252	11,177	0,028	28,20	0 - 3,8	1260,61	111,77
380 - 390	0,1	69,559	0,264	10,071	0,027	26,56	0 - 3,9	1287,17	100,71
390 - 400	0,1	56,714	0,262	10,340	0,027	27,10	0 - 4	1314,27	103,40
400 - 410	0,1	46,778	0,249	12,293	0,031	30,57	0 - 4,1	1344,84	122,93
410 - 420	0,1	38,164	0,232	12,818	0,030	29,74	0 - 4,2	1374,58	128,18
420 - 430	0,1	30,524	0,312	7,521	0,023	23,49	0 - 4,3	1398,08	75,21
430 - 440	0,1	23,505	0,308	8,523	0,026	26,23	0 - 4,4	1424,31	85,23
440 - 450	0,1	17,375	0,319	7,555	0,024	24,07	0 - 4,5	1448,38	75,55
450 - 460	0,1	11,958	0,233	9,201	0,021	21,39	0 - 4,6	1469,77	92,01
460 - 470	0,1	7,417	0,253	9,330	0,024	23,59	0 - 4,7	1493,36	93,30
470 - 480	0,1	3,948	0,237	6,807	0,016	16,11	0 - 4,8	1509,47	68,07
480 - 490	0,1	1,593	0,222	5,963	0,013	13,21	0 - 4,9	1522,68	59,63
490 - 500	0,1	0,322	0,225	6,365	0,014	14,30	0 - 5	1536,98	63,65
Total	5	118802,788	0,168	22,734	0,031	1536,98	5	1536,98	227,34

4. Discusión

Retención de agua en la turbera

Dentro de los resultados obtenidos se encontró que el porcentaje de humedad de la turbera está por encima del 50% llegando casi a los dos metros de profundidad (Figuras 8 y 9), y que el nivel freático por lo general se encuentra por encima del nivel del suelo o muy cerca de este. Lo anterior, concuerda con las características que presenta el PNN Chingaza que es considerado un páramo muy húmedo en donde la mayor parte del año (8 meses) recibe carga hídrica por precipitación (Maria Fernanda Cárdenas, Tobón, & Buytaert, 2017), incluso en los meses más secos (diciembre a marzo) la precipitación oculta puede mantener elevados los valores de humedad relativa, por efecto de las corrientes de aire que cargan significativas cantidades de vapor de agua procedentes de zonas más bajas que propician la formación de niebla y nubes bajas (Ruiz, Martinson, & Vergara, 2012), contribuyendo a que el nivel freático no cambie drásticamente en la turbera. Nuestros resultados están en relación con los reportados por Cárdenas *et al.* (2017), que encontró que los valores de humedad de Chingaza son mayores al compararlos con otros ecosistemas de alta montaña.

Las características del suelo, particulares de cada turbera, influyen significativamente en los valores de retención hídrica que ésta presente. En este trabajo la profundidad, el contenido de materia orgánica (MO) y la densidad aparente del suelo (Da), afectaron los valores de retención hídrica de la turbera (Figuras 8 y 9). En los perfiles de profundidad con mayor contenido de MO,

el porcentaje de retención de agua era mayor, por consiguiente, a medida que los valores de MO disminuían en las capas de profundidad, también lo hacían los valores de humedad.

La relación de la materia orgánica con el contenido mineral del suelo imprime las propiedades físicas que afectarán la proporción de humedad que este podrá contener, esta relación entre las partes orgánicas y minerales determina el tamaño y la distribución de los poros del sistema, aumentos en el nivel de la parte orgánica genera aumentos en la cantidad de micro y mesoporos resultando en cantidades más altas de agua disponible para plantas (W. Buytaert *et al.*, 2005; Wouter Buytaert *et al.*, 2011; Poulenard *et al.*, 2003; Walczak, Rovdan, & Witkowska-Walczak, 2002). A medida que la descomposición de la MO avanza los valores de humedad del suelo varían, disminuyendo conforme aumenta el grado de descomposición del material orgánico (Benavides, JC., 2014), la capacidad de retención de agua es mayor en las capas más superficiales donde la materia orgánica no presenta alto grado de descomposición, que a su vez aumenta en las capas más profundas de la turbera (Rocha Campos, Silva, Fernandes, Ferreira, & Silva, 2011).

Los valores bajos de densidad aparente del suelo como los encontrados en este trabajo son típicos de andosoles, con altos porcentajes de MO característicos de suelos de páramo andino (Wouter Buytaert *et al.*, 2006). La compactación altera las características físicas del suelo, ya sea por pisoteo de ganado o también como consecuencia de suelos drenados en donde la acumulación de MO se ve afectada por tasas altas de pudrición del material orgánico depositado, ocasionando el aumento de la densidad aparente del suelo, lo que influye considerablemente en la capacidad de este para retener humedad (W. Buytaert *et al.*, 2005; Campos, Silva, & Vidal-Torrado, 2012), suelos poco compactados presentan bajas magnitudes de D_a , y son indicadores de porcentajes altos de MO, que, a su vez permiten porcentajes altos de retención de agua. Los valores del contenido de humedad del suelo (H_s : 0,64 a 70 cm de profundidad) encontrados en este trabajo son

comparables a los reportados por Cárdenas *et al.* (2017b), para tres suelos de páramo con diferente grado de conservación, páramo de Chingaza (conservado) (CC: 0,56 a 47,9 cm de profundidad), páramo de Belmira (recuperado) (CC: 0,60 a 41,4 cm de profundidad), y páramo de Romerales (alterado) (CC: 0,55 a 71,7 cm de profundidad), y que dan cuenta de un ecosistema de turbera conservado.

Estimación del contenido de Carbono

Se encontró que los valores en el porcentaje de carbono orgánico del suelo (COS) dependían de los niveles de profundidad del cual procedían. En las capas más superficiales (<100cm, > 30 cm) el contenido de carbono orgánico presenta los valores más altos de todo el perfil, sin embargo, en los primeros 30 cm el contenido de COS es menor (Tabla 1), con valores más cercanos a los encontrados en profundidades mayores a 100 cm. Una posible causa de estos resultados es que una considerable parte del COS se pierde en forma de carbono orgánico disuelto (COD) (Fraser, Roulet, & Moore, 2001; Wallage, Holden, & McDonald, 2006) como consecuencia de actividades metabólicas autótrofas y heterótrofas y la lisis del material muerto, algunas posibles causas de incrementos en el COD pueden estar relacionados con los aumentos de la temperatura (Freeman, Evans, Monteith, Reynolds, & Fenner, 2001), los niveles de pH (Kang, H., 2018) y al ser el COD una parte importante de la materia orgánica disuelta (MOD) ésta última puede verse afectada también por procesos endógenos derivados particularmente del alto nivel del agua (Álvarez, 2005). Finalmente, esta pérdida de contenido de COS en las capas más superficiales, es decir, más expuestas al medio externo, puede deberse a los cambios climáticos (Wouter Buytaert *et al.*, 2006; Freeman *et al.*, 2001).

La concentración de carbono en el humedal varía entre 59,63 gr C kg⁻¹ y los 435,78 gr C kg⁻¹ en las profundidades de 490 cm y 50 cm respectivamente (Tabla 1), las diferencias como se

observa dependen del nivel de profundidad, a mayores profundidades, contenidos más bajos de COS y a profundidades más cerca de la superficie contenidos más altos de COS, no obstante, entre las profundidades > 40 cm y < 240 cm se encuentran los valores más altos de contenido de COS de la turbera que luego empiezan a decaer. En este intervalo de profundidad podemos ubicar una zona anóxica, saturada y humificada de la turba: el catotelmo (Figura 3), que se caracteriza por bajas a nulas tasas metabólicas de los microorganismos descomponedores, y que por consiguiente permite elevadas tasas de acumulación de MO (Clymo & Hayward, 1982). De modo que los contenidos de COS registrados a estas profundidades pueden deberse a las condiciones anóxicas y de baja actividad metabólica de los descomponedores más que a la producción primaria de MO.

Los aumentos en el contenido de MO a mayor profundidad están relacionados con otros factores como la densidad aparente del suelo y el nivel de saturación de agua. Como en este trabajo, otros estudios han demostrado que los valores en el contenido de MO de la turbera están influenciados por los valores de D_a que presente el suelo (Aitkenhead, Hope, & Billett, 1999; Freeman *et al.*, 2001; Wallage *et al.*, 2006), suelos con una densidad baja se ha observado que presentan valores de contenido de MO altos, y a medida que aumenta la densidad los contenidos de MO disminuyen. La densidad del suelo depende del nivel de compresión al que éste esté sometido, por consiguiente, a medida que la profundidad del suelo aumenta hay mayor compresión, por lo tanto, la densidad aumenta, resultando en menor contenido de MO (Benavides, 2015) conclusiones que concuerdan con los resultados observados en este trabajo Figura 11, donde los valores del contenido de COS están relacionados con la densidad aparente del suelo.

El depósito de materia orgánica en el suelo y su descomposición dependen en gran medida de las condiciones de saturación que éste presente. Los suelos saturados presentan valores de descomposición de MO menores en comparación con aquellos poco saturados (Roa-García, 2016).

Los valores altos de MO encontrados en la turbera se deben en gran medida a que la capa freática de la turbera estuvo siempre durante este trabajo sobre la superficie o muy cerca a esta, evitando la exposición de la MO a las condiciones óxicas que aceleran su descomposición, por eso los contenidos de COS que se registraron son relativamente altos si los comparamos con otros trabajos donde se midió el contenido de carbono orgánico en humedales de páramo ver Tabla 2.

El contenido de COS encontrado en la turbera del Valle de los Frailejones del PNN Chingaza en los primeros 50 centímetros de profundidad fue de 387 g C kg^{-1} , valor más alto a los encontrados por Cárdenas *et al.* (2017a) a una profundidad similar en turberas con diferente grado de conservación en Chingaza, Belmira y Romerales con valores de 152 g C kg^{-1} ; 82 g C kg^{-1} y 85 g C kg^{-1} respectivamente. En este mismo sentido, las reservas de COS reportadas por Zúñiga *et al.* (2013) para una turbera conservada y otra alterada en el PNN Chingaza presentan valores más bajos, $173,6 \text{ Mg ha}^{-1}$ y $67,5 \text{ Mg ha}^{-1}$, a un metro de profundidad, comparado con los encontrados en este trabajo, $343,92 \text{ Mg ha}^{-1}$ a igual profundidad, que también es más alto a los reportados en ese mismo estudio en turberas conservadas y alteradas en el PNN Los Nevados ver Tabla 2. Las reservas de carbono reportadas por Kuhry (1988) en su trabajo realizado en el páramo de Peña Negra con un stock de C de 180 Mg ha^{-1} de 0 a 50 cm de profundidad, es un valor cercano al encontrado en este estudio, 146 Mg ha^{-1} en el mismo intervalo de profundidad, sin embargo, otros reportes del trabajo de Kuhry, 403 Mg ha^{-1} ; 659 Mg ha^{-1} ; 1007 Mg ha^{-1} y 1251 Mg ha^{-1} , a las profundidades de 0 a 80, 0 a 120, 0 a 170 y de 0 a 220 respectivamente, frente a los encontrados en este trabajo, $260,4 \text{ Mg ha}^{-1}$; $419,7 \text{ Mg ha}^{-1}$; $627,4 \text{ Mg ha}^{-1}$ y $813,4 \text{ Mg ha}^{-1}$, son significativamente más altos en los mismos intervalos de profundidad. Las reservas de C en el Valle de los frailejones son también más altas al compararlas con reportes de otras regiones, por ejemplo, en la reserva ecológica Antisana y en el Parque Nacional Cayambe-Coca en Ecuador,

Hribljan *et al.* (2016) encontró en turberas de páramo valores que van de los 723 Mg ha⁻¹ a los 1347 Mg ha⁻¹ en profundidades cercanas a las de la turbera del Valle de los Frailejones. No obstante, en el trabajo que llevaron a cabo Segnini *et al.*, (2010) reportaron en los primeros 30 cm de profundidad 253,5 Mg ha⁻¹ y 337,3 Mg ha⁻¹, en dos turberas de páramo en Huayllapata, Perú, valores mucho más altos a los 73,7 Mg ha⁻¹ de este trabajo en los primeros 30 cm, sin embargo, nuestros resultados de stock de COS son más altos a los publicados por Comas *et al.* (2017) para cuatro turberas en la reserva ecológica Antisana y en el Parque Nacional Cayambe-Coca en Ecuador, en dos de ellas nuestros reportes son evidentemente superiores, ellos reportaron 426,1 Mg ha⁻¹ de 0 a 430 cm y 164 Mg ha⁻¹ de 0 a 350 cm, frente a 1398,1 Mg ha⁻¹ y 1182,2 Mg ha⁻¹ a iguales profundidades, en otra, las reservas de COS son de similar magnitud a las encontradas en este trabajo 1049 Mg ha⁻¹ frente a 1003,7 Mg ha⁻¹ para un intervalo de profundidad de 0 a 300 cm. En otro trabajo publicado por Hribljan *et al.* (2015) para dos turberas conservadas de páramo en Manasaya y Tuni, Bolivia, reportaron 1040 Mg ha⁻¹ y 572 Mg ha⁻¹ en profundidades de 500 cm y 550 cm respectivamente, en ambos casos sus resultados de reservas de carbono son menores a los 1536,9 Mg ha⁻¹ de este estudio, con una evidente diferencia para el caso del sitio ubicado en Tuni, ver Tabla 2. Nuestro hallazgo confirma que la turbera ubicada en el Valle de los Frailejones en el PNN Chingaza se encuentra en un buen estado de conservación que garantiza su función como sumidero de carbono. Sus reservas de COS estuvieron en varias ocasiones por encima o muy cercanos a los valores promedio al compararlos con otros trabajos en ecosistemas de páramo y en todos los casos los niveles COS hallados en nuestro estudio estuvieron siempre por encima de las áreas de turberas poco conservadas o alteradas.

Al igual que lo encontrado en este trabajo, se observó que los contenidos de carbono orgánico del suelo están relacionados con la profundidad de la turbera (Wouter Buytaert *et al.*, 2006; Maria

Fernanda Cárdenas *et al.*, 2017; Hribljan *et al.*, 2015; Poulénard *et al.*, 2003), que a su vez, afecta dramáticamente la densidad aparente del suelo (Hribljan *et al.*, 2015; Poulénard *et al.*, 2003), y que, hilado a este último factor, dependen los valores que tome el porcentaje de retención hídrica de la turbera (Wouter Buytaert *et al.*, 2011; Poulénard *et al.*, 2003; Walczak *et al.*, 2002).

De los resultados de este trabajo quedan algunas preguntas que podrían robustecer el análisis y la comprensión de los factores que determinan la captura de carbono en el humedal, como por ejemplo incluir la diversidad y la composición florística del área de estudio, y si esto afecta la capacidad y la cantidad de carbono orgánico que puede retener la turbera, evaluando macrofósiles de los núcleos de suelo podría hacerse un análisis cronológico de los cambios en la composición de plantas del humedal y si estos cambios afectan drásticamente el contenido de carbono de la turbera.

Tabla 2.

Comparación de depósitos de Carbono en diferentes turberas de Páramo Andino.

Sitio	Tipo ecosistema	Estado	Promedio COS %	Stock C Mg/ha	Contenido de C g/kg	Densidad Mg/m ³	Profundidad cm	Altitud m	Fuente		
Valle de los Frailejones PNN Chingaza - Colombia	Turbera de Páramo	Conservado	38,72	270,3	387	0,07	0 - 50	3200	Este estudio		
			37,32	197,4	373	0,11	60 - 150				
			27,30	57,1	273	0,14	160 - 250				
			15,68	9,6	157	0,18	260 - 350				
			9,34	1,1	93	0,26	360 - 500				
Reserva Ecológica Antisana - Ecuador	Turbera de Páramo	Conservado	29,9	128	299	0,16	100	4881	Hribljan (2016)		
			23,9	963	239	0,27	535	4064			
Parque Nacional Cayambe-Coca - Ecuador	Turbera de Páramo	Recuperado	20,3	598	203	0,27	294	3920			
			30	245	300	0,14	70	4270			
		Conservado	19,3	535	193	0,17	390	4270			
			19,1	723	191	0,26	491	4254			
		Conservado	23,8	1111	238	0,21	340	4250			
			19,5	1347	195	0,18	605	4136			
		Conservado	22,1	1006	221	0,19	565	3919			
			15,2		152	0,43	47,9	3570	Cardenas (2017a)		
		Belmira - Colombia	Turbera de Páramo	Recuperado	8,2		82	0,63	41,4	3118	
					8,5		85	0,61	71,4	3840	
Rómerales - Colombia	Turbera de Páramo	Alterado	14,2		142		6 a 19	3300	Buytaert <i>et al.</i> (2006)		
			2,3		23		19 - 58	3300			
			1,7		17		58 - 137	3300			
Río Paute Basin - Ecuador	Turbera de Páramo	Recuperado	0,8		8		> 137	3300			
							0 - 30	3881	Segnini <i>et al.</i> (2010)		
Huayllapata - Perú	Turbera de Páramo	Conservado		253,5		0,46					

Sitio	Tipo ecosistema	Estado	Promedio COS %	Stock C Mg/ha	Contenido de C g/Kg	Densidad Mg/m ³	Profundidad cm	Altitud m	Fuente
El Ángel - Ecuador	Turbera de Páramo	Conservado	21,2	337,3	212	0,6	0 - 30	3881	Poulenard <i>et al.</i> (2003)
					92	0,42	30 - 85		
					150	0,6	85 - 140		
					73	0,9	140 - 165		
					8		165 - 200		
Cuenca - Ecuador	Turbera de Páramo	Conservado	23,3		233	0,35	0 - 30	3700	
					194	0,4	30 - 45		
					54		45 - 60		
					16		60 - 70		
Azogues - Ecuador	Turbera de Páramo	Conservado	18		180	0,33	0 - 15	3250	
					156	0,33	15 - 50		
					87	0,65	50 - 65		
					43		65 - 80		
					21	0,27	80 - 105		
					71		105 - 170		
Páramo Peña Negra - Colombia	Turbera de Páramo	Conservado	6,7		67		170 - 195	3500 - 3750	Kuhry (1988)
					180,0		0 - 50		
					403,0		0 - 80		
					659,0		0 - 120		
					1007		0 - 170		
					1251		0 - 220		
					299,6		0 - 100		
PNN Chingaza - Colombia	Turbera de Páramo	Conservado			0,4			3600	Zúñiga <i>et al.</i> (2013)
					0,8				
					1,5				

Sitio	Tipo ecosistema	Estado	Promedio COS %	Stock C Mg/ha	Contenido de C g/Kg	Densidad Mg/m ³	Profundidad cm	Altitud m	Fuente
PNN Chingaza - Colombia	Turbera de Páramo	Alterado		121,9		0,7	0 - 100	3280	
				13,2		1,7			
PNN Nevados - Colombia	Turbera de Páramo	Conservado		49		0,7	0 - 100	4200	
				49,4		1			
				37,5		1,1			
				134,4		0,9			
				67		1			
				35,8		0,9			
PNN Nevados - Colombia	Turbera de Páramo	Alterado		51,9		0,7	0 - 100	3900	
				39,6		1			
				50		1,1			
				60		0,8			
Manasaya - Bolivia	Turbera de Páramo	Conservado		77,2		1			Hribljan (2015)
				44,9		0,8			
				32,7		0,9			
				1040	239	0,17	500	4496	
				572	478	0,05	550	4615	
Parque Nacional Cayambe-Coca- Ecuador	Turbera de Páramo	Conservado		426,1	108	0,35	0 - 430	5790	Comas <i>et al.</i> (2017)
				164,0	217	0,27	0 - 350	5790	
				2099,6	150	0,31	0 - 640	5790	
				11,3	113	0,73	0 - 300	5704	

5. Conclusiones

El stock de carbono orgánico hallado en la turbera del Valle de los Frailejones fue de 1536,98 Mg C ha⁻¹ en las 13,1 hectáreas que ocupa el humedal, con un contenido de C promedio de 227,34 g C Kg⁻¹, y con un volumen aproximado de 118.802,7 m³ que contiene un aproximado de 4.003.686 litros de agua.

Los valores altos en la capacidad de retención de agua de la turbera del Valle de los Frailejones se deben en gran medida a la alta precipitación que presenta el PNN Chingaza (María Fernanda Cárdenas & Tobón, 2017), sumado a esto, el grado de conservación que presenta facilita que los porcentajes de materia orgánica sean elevados, aumentando la porosidad del suelo, permitiendo una elevada saturación de agua. Por consiguiente, las bajas magnitudes encontradas de densidad aparente del suelo se relacionan estrechamente con los porcentajes altos de materia orgánica que a su vez propician en la turbera su función de reservorio y regulador de agua.

De igual forma, el comportamiento de la Da de suelo está determinado por el grado de compactación, en turberas conservadas, como en este caso, la compactación se debe a la profundidad de la que proceda la muestra de suelo y por las dinámicas de la materia orgánica, suelos orgánicos como el de la turbera del Valle, presentan densidades bajas y altos porcentajes de COS, por consiguiente, la relación entre la densidad aparente del suelo y el carbono orgánico del suelo son inversamente proporcionales.

Finalmente, las reservas de carbono halladas en este trabajo para una turbera de páramo son altas si las comparamos con otros trabajos en ecosistemas similares altoandinos nacionales y de

otros países de la región y dan cuenta del buen estado de conservación que presenta (Tabla 2). Esto evita, al menos, que en el mediano plazo el humedal se convierta en fuente de CO₂ y CH₄, garantizando su función como sumidero de carbono atmosférico.

Se sugiere para posteriores estudios con la finalidad de comprender más detalladamente la dinámica de secuestro de carbono, la inclusión de otras variables como la diversidad y la composición florística del área de estudio, y si esto afecta la capacidad y la cantidad de carbono orgánico que puede retener la turbera evaluando microfósiles de los núcleos de suelo.

Referencias Bibliográficas

- Aerts, R., Verhoeven, J. T. A., & Whigham, D. F. (1999). Plant-mediated controls on nutrient cycling in temperate fens and bogs. *Ecology*, *80*(7), 2170–2181.
- Aitkenhead, J. A., Hope, D., & Billett, M. F. (1999). The relationship between dissolved organic carbon in stream water and soil organic carbon pools at different spatial scales. *Hydrological Processes*, *13*(8), 1289–1302.
- Álvarez, S. (2005). La descomposición de materia orgánica en humedales: la importancia del componente microbiano. *Revista Ecosistemas*, *14*(2).
- Alzérreca, H., Laura, J., Loza, F., Luna, D., & Ortega, J. (2006). Importance of carrying capacity in sustainable management of key high-Andean Puna Rangelands (Bofedales) in Ulla Ulla, Bolivia. *Land Use Change and Mountain Biodiversity*, 167.
- Bäckstrand, K., & Lövbrand, E. (2015). *Research handbook on climate governance*. Edward Elgar Publishing.
- Bao, K., Yu, X., Jia, L., & Wang, G. (2010). Recent carbon accumulation in Changbai Mountain peatlands, northeast China. *Mountain Research and Development*, *30*(1), 33–42.
- Beilman, D., MacDonald, G. M., & Yu, Z. (2010). The northern peatland carbon pool and the Holocene carbon cycle. In *PAGES news* (Vol. 18, pp. 22–24). <https://doi.org/10.22498/pages.18.1.22>
- Benavides, J. C. (2015). The effect of drainage on organic matter accumulation and plant communities of high-altitude peatlands in the Colombian tropical Andes. *Mires and Peat*, *15*, 1–15.

- Benavides, J. C., Vitt, D. H., & Wieder, R. K. (2013). The influence of climate change on recent peat accumulation patterns of *Distichia muscoides* cushion bogs in the high-elevation tropical Andes of Colombia. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, *118*(4), 1627–1635.
- Bosman, A. F., Hooghiemstra, H., & Cleef, A. M. (1994). Holocene mire development and climatic change from a high Andean *Plantago rigida* cushion mire. *The Holocene*, *4*(3), 233–243.
- Bradley, R. S., Vuille, M., Diaz, H. F., & Vergara, W. (2006). Threats to water supplies in the tropical Andes. *Science*, *312*(5781), 1755–1756.
- Buytaert, W., Sevink, J., De Leeuw, B., & Deckers, J. (2005). Clay mineralogy of the soils in the south Ecuadorian páramo region. *Geoderma*, *127*(1–2), 114–129. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.11.021>
- Buytaert, Wouter, 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*(1–2), 53–72.
- Buytaert, Wouter, Cuesta-Camacho, F., & Tobón, C. (2011). Potential impacts of climate change on the environmental services of humid tropical alpine regions. *Global Ecology and Biogeography*, *20*(1), 19–33.
- Buytaert, Wouter, Wyseure, G., De Bievre, B., & Deckers, J. (2005). The effect of land-use changes on the hydrological behaviour of Histic Andosols in south Ecuador. *Hydrological Processes: An International Journal*, *19*(20), 3985–3997.
- Campos, J. R. da R., Silva, A. C., & Vidal-Torrado, P. (2012). Mapping, organic matter mass and water volume of a peatland in Serra do Espinhaço Meridional. *Revista Brasileira de Ciência Do Solo*, *36*(3), 723–732. <https://doi.org/10.1590/s0100-06832012000300004>
- Cárdenas, María Fernanda, & Tobón, C. (2017). Recuperación del funcionamiento hidrológico de ecosistemas de páramo en Colombia. *Revista UDCA Actualidad & Divulgación Científica*, *20*(2), 403–412.

- Cárdenas, Maria Fernanda, Tobón, C., & Buytaert, W. (2017). Contribution of occult precipitation to the water balance of páramo ecosystems in the Colombian Andes. *Hydrological Processes*, 31(24), 4440–4449. <https://doi.org/10.1002/hyp.11374>
- Chambers, F. M., Beilman, D. W., & Yu, Z. (2011). - Methods for determining peat humification and for quantifying peat bulk density. *Mires and Peat*, 7(7), 1–10. Retrieved from <http://www.mires-and-peat.net/pages/volumes/map07/map0707.php>
- Chimner, R. A., & Karberg, J. M. (2008). Long-term carbon accumulation in two tropical mountain peatlands, Andes Mountains, Ecuador. *Mires & Peat*, 3.
- Clymo, R. S., & Hayward, P. M. (1982). The ecology of Sphagnum. In *Bryophyte ecology* (pp. 229–289). Springer.
- Comas, X., Terry, N., Hribljan, J. A., Lilleskov, E. A., Suarez, E., Chimner, R. A., & Kolka, R. K. (2017). Estimating belowground carbon stocks in peatlands of the Ecuadorian páramo using ground-penetrating radar (GPR). *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 122(2), 370–386. <https://doi.org/10.1002/2016JG003550>
- Dercon, G., Govers, G., Poesen, J., Sánchez, H., Rombaut, K., Vandebroek, E., ... Deckers, J. (2007). Animal-powered tillage erosion assessment in the southern Andes region of Ecuador. *Geomorphology*, 87(1–2), 4–15.
- Eyherabide, , Sainz Rozas, H., Barbieri, P., & Echeverria, H. (2014). Comparación de métodos para determinar carbono orgánico en suelo. *Ciencia Del Suelo*, 32(1), 13–19.
- Fraser, C. J. D., Roulet, N. T., & Moore, T. R. (2001). Hydrology and dissolved organic carbon biogeochemistry in an ombrotrophic bog. *Hydrological Processes*, 15(16), 3151–3166.
- Freeman, C., Evans, C. D., Monteith, D. T., Reynolds, B., & Fenner, N. (2001). Export of organic carbon from peat soils. *Nature*, 412(6849), 785.
- Frolking, S., & Roulet, N. T. (2007). Holocene radiative forcing impact of northern peatland carbon accumulation and methane emissions. *Global Change Biology*, 13(5), 1079–1088.

- Fyke, J., & Matthews, H. D. (2015). A probabilistic analysis of cumulative carbon emissions and long-term planetary warming. *Environmental Research Letters*, 10(11), 115007.
- Gorham, E. (1991). Northern peatlands: role in the carbon cycle and probable responses to climatic warming. *Ecological Applications*, 1(2), 182–195.
- Hofstede, R. G. M. (1995). The effects of grazing and burning on soil and plant nutrient concentrations in Colombian páramo grasslands. *Plant and Soil*, 173(1), 111–132.
- Holden, J. (2005). Peatland hydrology and carbon release: Why small-scale process matters. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 363(1837), 2891–2913. <https://doi.org/10.1098/rsta.2005.1671>
- Houghton, R. A. (2007). Balancing the global carbon budget. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 35, 313–347.
- Hribljan, J. A., Cooper, D. J., Sueltenfuss, J., Wolf, E. C., Heckman, K. A., Lilleskov, E. A., & Chimner, R. A. (2015). Carbon storage and long-term rate of accumulation in high-altitude Andean peatlands of Bolivia. *Mires and Peat*, 15(12), 1–14. Retrieved from <http://www.mires-and-peat.net/>,
- Lal, R. (2004). Soil carbon sequestration to mitigate climate change. *Geoderma*, 123(1–2), 1–22.
- Le Quéré, C., Moriarty, R., Andrew, R. M., Peters, G. P., Ciais, P., Friedlingstein, P., ... Arneeth, A. (2015). Global carbon budget 2014. *Earth System Science Data*, 7(1), 47–85.
- Llambí, L. D., Soto, A., Borja, P., Ochoa, B., Celleri, R., & Bievre, B. (2012). Páramos Andinos: Ecología, hidrología y suelos de páramos. *Los Suelos Del Páramo*, (May), 292. Retrieved from <https://biblio.flacsoandes.edu.ec/libros/digital/56477.pdf>
- Luteyn, James L, Churchill, S. P., Griffin, D., Gradstein, S. R., Sipman, H. J. M., & A., M. R. G. (1999). *Páramos: a checklist of plant diversity, geographical distribution, and botanical literature* (Vol. 84). New York Botanical Garden Press Bronx, New York, USA.

- Luteyn, James Leonard. (1999). Paramos: A checklist of plant diversity, geographical distribution, and botanical literature. Páramos: Lista de diversidad de plantas, distribución geográfica y literatura botánica. *Memoirs of the New York Botanical Garden.*, 84, 1–278.
- Myers, N., Mittermeier, R. A., Mittermeier, C. G., Da Fonseca, G. A. B., & Kent, J. (2000). Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature*, 403(6772), 853.
- Page, S. E., Rieley, J. O., & Banks, C. J. (2011). Global and regional importance of the tropical peatland carbon pool. *Global Change Biology*, 17(2), 798–818. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2010.02279.x>
- Pedraza-Peñalosa, P., & Betancur, J. (2004). *Chisacá, un recorrido por los páramos andinos*. Instituto de Ciencias Naturales e Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.
- Podwojewski, P., Poulénard, J., Zambrana, T., & Hofstede, R. (2002). Overgrazing effects on vegetation cover and properties of volcanic ash soil in the páramo of Llangahua and La Esperanza (Tungurahua, Ecuador). *Soil Use and Management*, 18(1), 45–55.
- Poulénard, J., Podwojewski, P., & Herbillon, A. J. (2003). Characteristics of non-allophanic Andisols with hydric properties from the Ecuadorian páramos. *Geoderma*, 117(3–4), 267–281. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(03\)00128-9](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(03)00128-9)
- Rocha Campos, J. R. da, Silva, A. C., Fernandes, J. S. C., Ferreira, M. M., & Silva, D. V. (2011). Water retention in a peatland with organic matter in different decomposition stages. *Revista Brasileira de Ciência Do Solo*, 35(4), 1217–1227. <https://doi.org/10.1590/s0100-06832011000400015>
- Rudiyanto, Minasny, B., Setiawan, B. I., Arif, C., Saptomo, S. K., & Chadirin, Y. (2016). Digital mapping for cost-effective and accurate prediction of the depth and carbon stocks in Indonesian peatlands. *Geoderma*, 272, 20–31. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.02.026>
- Ruiz, D., Martinson, D. G., & Vergara, W. (2012). Trends, stability and stress in the Colombian Central Andes. *Climatic Change*, 112(3–4), 717–732.

- Salvador, F., Monerris, J., & Rochefort, L. (2014). Peatlands of the Peruvian Puna ecoregion: types, characteristics and disturbance. *Mires and Peat*, 15(03), 1–17.
- Sarmiento, J. L. (1993). Ocean carbon cycle. *Chemical and Engineering News*, 71(22), 30–43.
- Schmidt-Mumm, U., & Vargas Ríos, O. (2012). Comunidades vegetales de las transiciones terrestre-acuáticas del páramo de Chingaza, Colombia. *Revista de Biología Tropical*, 60(1), 35–64.
- Segnini, A., Posadas, A., Quiroz, R., Milori, D. M. B. P., Saab, S. C., Neto, L. M., & Vaz, C. M. P. (2010). Spectroscopic assessment of soil organic matter in wetlands from the high andes. *Soil Science Society of America Journal*, 74(6), 2246–2253. <https://doi.org/10.2136/sssaj2009.0445>
- Solomon, S., Plattner, G.-K., Knutti, R., & Friedlingstein, P. (2009). Irreversible climate change due to carbon dioxide emissions. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106(6), 1704–1709.
- Sparks, D. L., Page, A. L., Helmke, P. A., Loeppert, R. H., Nelson, D. W., & Sommers, L. E. (1996). *Total Carbon, Organic Carbon, and Organic Matter*. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.3.c34>
- Squeo, F. A., Warner, B. G., Aravena, R., & Espinoza, D. (2006). Bofedales: high altitude peatlands of the central Andes. *Revista Chilena de Historia Natural*, 79(2), 245–255.
- Stockmann, U., Padarian, J., McBratney, A., Minasny, B., de Brogniez, D., Montanarella, L., ... Field, D. J. (2015). Global soil organic carbon assessment. *Global Food Security*, 6, 9–16. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2015.07.001>
- Tonneijck, F. H., Jansen, B., Nierop, K. G. J., Verstraten, J. M., Sevink, J., & De Lange, L. (2010). Towards understanding of carbon stocks and stabilization in volcanic ash soils in natural Andean ecosystems of northern Ecuador. *European Journal of Soil Science*, 61(3), 392–405. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2010.01241.x>

- Van der Werf, G. R., Morton, D. C., DeFries, R. S., Olivier, J. G. J., Kasibhatla, P. S., Jackson, R. B., ... Randerson, J. T. (2009). CO₂ emissions from forest loss. *Nature Geoscience*, 2(11), 737.
- Vargas Ríos, O., & Pedraza, P. (2004). *El Parque Nacional Natural Chingaza*. 226.
- Vásquez, E., Ladd, B., & Borchard, N. (2014). Carbon storage in a high-altitude *Polylepis* woodland in the Peruvian Andes. *Alpine Botany*, 124(1), 71–75.
- Walczak, R., Rovdan, E., & Witkowska-Walczak, B. (2002). Water retention characteristics of peat and sand mixtures. *International Agrophysics*, 16(2), 161–166.
- Wallage, Z. E., Holden, J., & McDonald, A. T. (2006). Drain blocking: an effective treatment for reducing dissolved organic carbon loss and water discolouration in a drained peatland. *Science of the Total Environment*, 367(2–3), 811–821.
- Yu, Z., Beilman, D. W., Frohling, S., MacDonald, G. M., Roulet, N. T., Camill, P., & Charman, D. J. (2011). Peatlands and their role in the global carbon cycle. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 92(12), 97–98.
- Zehetner, F., Miller, W. P., & West, L. T. (2003). Pedogenesis of volcanic ash soils in Andean Ecuador. *Soil Science Society of America Journal*, 67(6), 1797–1809.
- Zimmermann, M., Meir, P., Silman, M. R., Fedders, A., Gibbon, A., Malhi, Y., ... Zamora, F. (2010). No differences in soil carbon stocks across the tree line in the Peruvian Andes. *Ecosystems*, 13(1), 62–74. <https://doi.org/10.1007/s10021-009-9300-2>
- Zúñiga-Escobar, O., Cuero-Guependo, R., Peña-Óspina, J. A., Peña-Salamanca, E. J., & Torres-González, A. M. (2013). Assessment of the impact of anthropic activities on carbon storage in soils of high montane ecosystems in Colombia. *Agronomia Colombiana*, 31(1), 112–119.

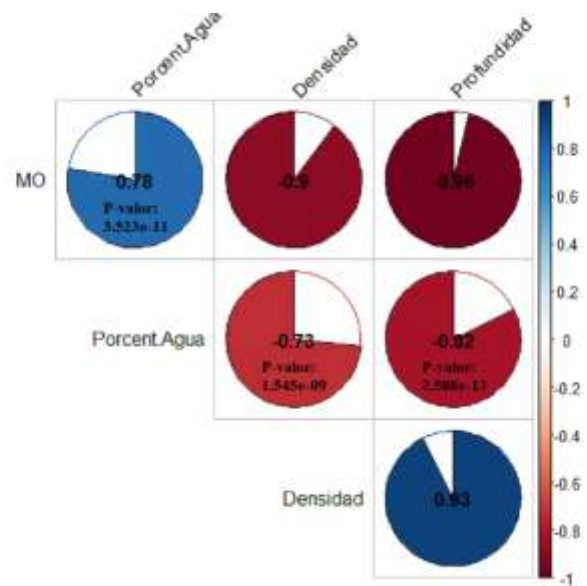
Apéndices

Apéndice A. Pruebas de Normalidad y Homogeneidad de varianza de las variables Densidad aparente del suelo, porcentaje de Materia orgánica del suelo y porcentaje de Retención de agua del suelo.

Prueba de Normalidad/Homogeneidad	Kolmogorov-Smirnov		Levene	
	Estadístico	P-valor	Estadístico	P-valor
Densidad aparente del suelo	0,0561	0,4426	1,7012	0,1868
Porcentaje de Materia orgánica del suelo	0,0724	0,1138	1,8049	0,1689
Porcentaje de Retención de agua del suelo	0,0641	0,2423	0,1105	0,8955

H_0 : Se acepta que la muestra proviene de una distribución normal y las varianzas de las poblaciones son iguales, Toma de decisión: $P > 0,05$, se acepta la H_0 .

Apéndice B. Coeficientes de correlación de Pearson para las variables porcentaje de Materia Orgánica del suelo, Densidad aparente del suelo, porcentaje de retención de agua y Profundidad de la turbera.



Apéndice C. Modelo ANCOVA para evaluar la interacción Profundidad/Punto de las variables Densidad aparente y Carbono Orgánico de los tres núcleos de suelo con respecto a la profundidad de la turbera.

Variable	Interacción/Puntos	R²	P-valor
Densidad Apa.	A y B	0,7721	0,2134
	A y C	0,7721	0,6149
	B y C	0,7721	0,1556
COS	A y B	0,8572	0,4298
	A y C	0,8572	0,3346
	B y C	0,8572	0,1420

H₀: La interacción Profundidad/Punto no es significativa, los datos se comportan de manera similar en cada perfil de profundidad en toda la turbera; H_a: La interacción Profundidad/Punto es significativa, los datos se comportan de manera independiente en cada núcleo extraído, Toma de decisión: P>0,05, se acepta la H₀.

Apéndice D. Tabla de pesos de las muestras a 105 °C y luego de LOI a 550 °C.

Núcleo de suelo	Profundidad	Peso muestra a 105°C	Peso crisol	Peso crisol + ceniza	Peso ceniza a 550°C	Pesos MO evaporada a 550°C
a	0 – 10	2,219	17,061	17,537	0,476	1,743
a	10 – 20	2,12	14,64	15,048	0,408	1,712
a	20 – 30	2,12	15,117	15,544	0,427	1,693
a	30 – 40	2,109	14,799	15,207	0,408	1,701
a	40 – 50	2,063	19,784	20,162	0,378	1,685
a	50 – 60	2,198	24,174	24,534	0,36	1,838
a	60 – 70	2,162	17,889	18,368	0,479	1,683
a	70 – 80	2,247	19,786	20,291	0,505	1,742
a	80 – 90	2,125	15,166	15,48	0,314	1,811
a	90 – 100	2,097	20,647	20,915	0,268	1,829
a	100 – 110	2,129	17,892	18,597	0,705	1,424
a	110 – 120	2,139	12,095	13,077	0,982	1,157
a	120 – 130	2,315	14,666	15,479	0,813	1,502
a	130 – 140	2,104	21,698	22,908	1,21	0,894
a	140 – 150	2,069	23,322	24,138	0,816	1,253
a	150 – 160	2,181	21,796	22,622	0,826	1,355
a	160 – 170	2,145	19,927	20,726	0,799	1,346
a	170 – 180	2,045	19,927	20,826	0,899	1,146
a	180 – 190	2,129	24,175	24,866	0,691	1,438
a	190 – 200	2,194	19,964	21,511	1,547	0,647
a	200 – 210	2,098	19,999	20,947	0,948	1,15
a	210 – 220	2,101	20,017	21,185	1,168	0,933
a	220 – 230	2,133	17,898	19,032	1,134	0,999
a	230 – 240	2,244	15,17	16,249	1,079	1,165
a	240 – 250	2,124	14,639	15,967	1,328	0,796
a	250 – 260	2,112	15,116	16,442	1,326	0,786
a	260 – 270	2,097	12,098	13,467	1,369	0,728
a	270 – 280	2,109	14,776	16,053	1,277	0,832
a	280 – 290	2,127	17,061	18,478	1,417	0,71
a	290 – 300	2,128	20	21,245	1,457	0,671
a	300 – 310	2,178	15,09	16,559	1,469	0,709
a	310 – 320	2,1	17,062	18,556	1,494	0,606
a	320 – 330	2,113	23,324	24,74	1,416	0,697
a	330 – 340	2,172	24,171	25,694	1,523	0,649
a	340 – 350	2,12	16,898	18,366	1,468	0,652
a	350 – 360	2,066	16,899	18,298	1,399	0,667
a	360 – 370	2,13	19,785	21,533	1,748	0,382
a	370 – 380	2,164	19,465	20,975	1,51	0,654
a	380 – 390	2,284	19,784	21,567	1,783	0,501

Núcleo de suelo	Profundidad	Peso muestra a 105°C	Peso crisol	Peso crisol + ceniza	Peso ceniza a 550°C	Pesos MO evaporada a 550°C
a	390 – 400	2,182	23,322	25,115	1,793	0,389
a	400 – 410	2,208	14,84	16,58	1,74	0,468
a	410 – 420	2,077	12,096	13,714	1,618	0,459
a	420 – 430	2,167	15,707	17,593	1,886	0,281
a	430 – 440	2,164	20,03	21,876	1,846	0,318
a	440 – 450	2,119	14,8	16,643	1,843	0,276
a	450 – 460	2,137	15,846	17,644	1,798	0,339
a	460 – 470	2,182	19,973	21,804	1,831	0,351
a	470 – 480	2,096	17,06	18,91	1,85	0,246
a	480 – 490	2,033	14,42	16,244	1,824	1,824
b	0 – 10	2,032	21,795	22,465	0,67	1,362
b	10 – 20	2,212	14,668	15,45	0,782	1,43
b	20 – 30	2,104	19,732	20,695	0,963	1,141
b	30 – 40	2,109	20,649	21,333	0,684	1,425
b	40 – 50	2,103	16,9	17,404	0,504	1,599
b	50 – 60	2,128	19,978	20,448	0,47	1,658
b	60 – 70	2,062	15,573	15,993	0,42	1,642
b	70 – 80	2,177	14,667	15,456	0,789	1,388
b	80 – 90	2,112	19,733	20,55	0,817	1,295
b	90 – 100	2,016	19,958	20,659	0,701	1,315
b	100 – 110	2,15	14,84	15,853	1,013	1,137
b	110 – 120	2,097	20,034	21,043	1,009	1,088
b	120 – 130	2,047	20,084	20,859	0,775	1,272
b	130 – 140	2,213	19,972	20,718	0,746	1,467
b	140 – 150	2,053	23,323	24,454	1,131	0,922
b	150 – 160	2,177	15,707	16,546	0,839	1,338
b	160 – 170	2,05	15,846	16,846	1	1,05
b	170 – 180	2,107	14,841	15,932	1,091	1,016
b	180 – 190	2,178	15,707	16,903	1,196	0,982
b	190 – 200	2,106	15,846	16,795	0,949	1,157
b	200 – 210	2,092	21,794	22,821	1,027	1,065
b	210 – 220	2,183	15,117	16,124	1,007	1,176
b	220 – 230	2,111	20,649	21,593	0,944	1,167
b	230 – 240	2,14	19,785	21,137	1,352	0,788
b	240 – 250	2,034	14,64	15,978	1,338	0,696
b	250 – 260	2,061	20,103	21,294	1,191	0,87
b	260 – 270	2,055	12,095	13,373	1,278	0,777
b	270 – 280	2,084	14,775	16,179	1,404	0,68
b	280 – 290	2,026	19,731	21,191	1,46	0,566
b	290 – 300	2,047	19,926	21,488	1,562	0,485
b	300 – 310	2,07	19,955	21,452	1,497	0,573
b	310 – 320	2,121	16,9	18,628	1,728	0,393
b	320 – 330	2,149	15,574	17,448	1,874	0,275
b	330 – 340	2,112	19,925	21,819	1,894	0,218
b	340 – 350	2,057	21,706	23,44	1,734	0,323

Núcleo de suelo	Profundidad	Peso muestra a 105°C	Peso crisol	Peso crisol + ceniza	Peso ceniza a 550°C	Pesos MO evaporada a 550°C
b	350 – 360	2,117	14,775	16,582	1,807	0,31
b	360 – 370	2,129	15,09	16,977	1,887	0,242
b	370 – 380	2,031	19,402	21,264	1,862	0,169
b	380 – 390	2,142	20,023	21,891	1,868	0,274
c	0 – 10	2,096	20	21,381	1,381	0,715
c	10 – 20	2,113	19,786	20,95	1,164	0,949
c	20 – 30	2,179	17,294	18,247	0,953	1,226
c	30 – 40	2,109	14,775	15,46	0,685	1,424
c	40 – 50	2,216	16,13	16,846	0,716	1,5
c	50 – 60	2,041	17,281	18,023	0,742	1,299
c	60 – 70	2,169	14,838	15,688	0,85	1,319
c	70 – 80	2,106	17,295	17,988	0,693	1,413
c	80 – 90	2,057	15,091	15,798	0,707	1,35
c	90 – 100	2,147	24,174	24,917	0,743	1,404
c	100 – 110	2,074	14,801	15,613	0,812	1,262
c	110 – 120	2,102	21,793	22,54	0,747	1,355
c	120 – 130	2,14	15,167	16,223	1,056	1,084
c	130 – 140	2,143	19,999	21,022	1,023	1,12
c	140 – 150	2,084	17,295	18,266	0,971	1,113
c	150 – 160	2,017	17,295	18,101	0,806	1,211
c	160 – 170	2,108	15,573	16,43	0,857	1,251
c	170 – 180	2,15	21,705	22,821	1,116	1,034
c	180 – 190	2,187	21,703	22,936	1,233	0,954
c	190 – 200	2,111	19,994	21,283	1,289	0,822
c	200 – 210	2,136	20,65	22,037	1,387	0,749
c	210 – 220	2,058	19,972	21,134	1,162	0,896
c	220 – 230	2,088	15,116	16,71	1,594	0,494
c	230 – 240	2,17	14,642	16,193	1,551	0,619
c	240 – 250	2,161	19,971	21,573	1,602	0,559
c	250 – 260	2,19	17,894	19,395	1,501	0,689
c	260 – 270	2,1	19,73	21,206	1,476	0,624
c	270 – 280	2,074	14,667	16,301	1,634	0,44
c	280 – 290	2,236	19,786	21,503	1,717	0,519
c	290 – 300	2,116	15,573	17,248	1,675	0,441
c	300 – 310	2,141	15,091	16,735	1,644	0,497
c	310 – 320	2,077	14,799	16,29	1,491	0,586
c	320 – 330	2,025	20,032	21,538	1,506	0,519
c	330 – 340	2,122	15,098	16,951	1,853	0,269
c	340 – 350	2,077	15,256	17,04	1,784	0,293

ACUERDO DE CONFIDENCIALIDAD

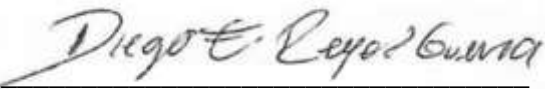
Yo, Diego Enrique Reyes Guerra, identificado con cedula de ciudadanía No. 91530450, expedida en Bucaramanga y código de estudiante UIS No. 2030191, en mi condición de estudiante de la Universidad Industrial de Santander, me comprometo expresamente con ésta a:

1. Reconocer que todas las invenciones o innovaciones tecnológicas de procesos, productos e información resultantes de mi actividad o con mi intervención con ocasión de la labor en la que participe para (dependencia o proyecto) son de propiedad de la Universidad Industrial de Santander, sin perjuicio de los derechos morales que me corresponden como autor o coautor.
2. No divulgar, ni difundir, ni usar, por ningún medio, sin consentimiento escrito de la Universidad Industrial de Santander, la información que conozca o haya conocido desde mi vinculación con el (dependencia o proyecto), desarrolle o resulte de los trabajos que me sean encomendados y que puedan constituir materia de patente, secreto comercial (know-how), modelo de utilidad, diseño industrial o derechos de autor.
3. No adquirir o aprovecharme en beneficios mío o ajeno de las invenciones, informaciones e innovaciones tecnológicas efectuadas por mi, con mi intervención o que conozca durante la vigencia de mi participación o posterior a ella, de propiedad de la Universidad Industrial de Santander.

En consecuencia, manifiesto expresamente conocer la responsabilidad tanto civil y/o penal que se genere por cualquier violación o alguno de los compromisos que adquiero mediante este acuerdo con la Universidad Industrial de Santander, consagrada en:

1. **La Ley 23 de 1982 y Decisión 351 de la Comisión del Acuerdo de Cartagena sobre Derechos de Autor y Derechos Conexos**
2. Ley 190 de 1995 o Estatuto Anticorrupción, por incurrir en el delito de Utilización Indevida de Información Privilegiada.
3. Ley 256 de 1996, por incurrir en Actos de Competencia Desleal como la divulgación o explotación, sin autorización de su titular de secretos industriales o cualquier otra clase de secretos empresariales.

En señal de aceptación suscribo el presente documento, en Bucaramanga a los 11 días del mes de Septiembre de 2019.

Firma: 

Nombre: Diego Enrique Reyes Guerra

Cedula de ciudadanía: 91530450