

Capítulo III

Captura de carbono en suelos de páramo Línea base a partir de escenarios de intervención



1. INTRODUCCIÓN

Los suelos de páramo tienen un gran potencial de captura de carbono, ya que son capaces de retener tres veces más carbono orgánico que la vegetación. Esta característica convierte al páramo en un escenario de mitigación ante el efecto del cambio climático, especialmente mediante la reducción de gases efecto invernadero (GEI), dióxido de carbono (CO_2); las bajas temperaturas hacen que el ecosistema tenga bajas tasas de mineralización y reciclaje de nutrientes, lo cual favorece una lenta pero continua absorción neta de carbono atmosférico que es acumulado como parte de la materia orgánica en sus suelos (García, 2003).

Esto implica que desde el punto de vista del carbono en los páramos, la comprensión de los factores o las actividades humanas que deterioran el suelo y desestabilizan la materia orgánica es de gran importancia. Se debe tener en cuenta que los contenidos de carbono orgánico en el suelo (COS) dependen de los principales factores a largo plazo relacionados con la formación del suelo (Martínez, Fuentes & Acevedo, 2008); sin embargo pueden ser fuertemente modificados –degradados o mejorados–, por los cambios en el uso y manejo del suelo.

Dada la importancia de este ecosistema, es necesario contar con información que indique las tendencias del impacto de cambios en el uso del suelo sobre las reservas de carbono. Desde esta perspectiva, en este capítulo se presenta un análisis espacial de la variabilidad del carbono orgánico y la alteración de las reservas de éste en el suelo, como resultado de cambios en el uso del suelo y tipo de cobertura. Así mismo, se muestra un análisis de características espectrales que permiten determinar patrones de comportamiento en la zona, mediante una descripción de series temporales de datos espectrales recopiladas de imágenes MODIS en las bandas azul, rojo, infrarrojo cercano, infrarrojo medio, índice de vegetación –NDVI– e índice de vegetación –EVI–.

Dentro del análisis espacial de carbono orgánico, y teniendo en cuenta su variabilidad en el área de estudio, se establece la línea base sobre el potencial de captura de carbono asociado al componente edáfico. Para ello se ubicaron parcelas de muestreo

en diferentes condiciones de uso del suelo, no intervenido (*vegetación de páramo (Vp)*), en recuperación (*vegetación herbácea muy rala sobre afloramientos rocosos (Pe)*) e intervenido (*cultivos transitorios (Cu)*), con el fin de observar la alteración en las reservas ($\text{t ha}^{-1}\text{C}$) de carbono orgánico, como resultado del cambio de cobertura y uso del suelo. Finalmente se relacionó la inclusión de esquemas de pago por servicios ambientales (PSA), como una posible estrategia para la conservación del páramo de La Cortadera.

Esta información será útil a la hora de establecer planes de manejo y conservación, asociados a la disminución de GEI, especialmente CO_2 , en ecosistemas vulnerables de alta montaña, como el páramo de La Cortadera.

2. MARCO DE REFERENCIA

2.1 SUELOS DE PÁRAMO

En ecosistemas como los páramos, los suelos tienen la capacidad de almacenar más carbono que en la vegetación, ya que existe una fijación neta con el proceso de humificación. La vegetación tiene una capacidad considerablemente rápida de absorción, pero no cuenta con un proceso de fijación (Asher, 2001).

Tanto las condiciones de los suelos de páramos (alta susceptibilidad al deterioro, fuerte acidez, temperatura edáfica baja, pedregosidad, muy alta retención de humedad, escaso desarrollo genético, evolución muy lenta), como las del ambiente exterior (relieve muy quebrado a escarpado en amplios sectores, procesos erosivos, vientos fuertes, temperaturas inferiores a $10\text{ }^{\circ}\text{C}$, días muy fríos, heladas frecuentes, lloviznas periódicas, alta nubosidad, niebla densa y poca luminosidad) indican que la mayor parte de las tierras de los páramos no tienen vocación agropecuaria (Cortés, 1994).

2.1.1 Importancia de la materia orgánica. La materia orgánica (MO) en el suelo de los páramos juega un papel fundamental en el mantenimiento de su integridad ecológica, su funcionamiento y en su capacidad de proveer servicios ambientales. No solo provee el sustrato y los nutrientes necesarios para el desarrollo de la vegetación, sino que además proporciona la estructura que permite que muchos suelos de páramo acumulen grandes cantidades de agua y regulen su abastecimiento para millones de personas a lo largo de los Andes del norte (Cammaraat & Bouten, 2009). A escala global, esto significa que los páramos andinos contienen hasta un 5% del total mundial de materia orgánica en el suelo, en un área correspondiente a menos del 1% de toda la superficie continental en la Tierra (Sevink, 2009).

2.2 IMPACTOS DE CAMBIOS EN EL USO DEL SUELO SOBRE EL PÁRAMO

El mayor impacto sobre todos los páramos es, sin lugar a dudas, la agricultura: cultivos, ganadería (bovino y ovino) y las quemadas asociadas. No es muy extraño considerar que un 60% de todos los páramos están bajo uso continuo.

Casi todos los páramos tienen una presión de cultivos de papa principalmente desde menores altitudes. Las áreas de mayor producción se encuentran en Mérida, Santander, Boyacá, Antioquia, Nariño-Carchi y Chimborazo. Los tipos e intensidad de cultivos varían por zona. En áreas con demasiada presencia de minifundio (Boyacá, Chimborazo), el cultivo tiende a ser más tradicional y más variado, pero igual muy intensivo por las técnicas inadecuadas.

La ganadería es probablemente el uso de suelos que más superficie ocupa en los páramos. Aparte de las áreas más remotas, más húmedas y más protegidas, no hay páramo sin influencia de ganadería. Esto se basa en que el páramo es un espacio abierto y que su uso para ganadería es fácil: no hay que tumbarlo como un bosque para usarlo. Sin embargo, para abastecer el ganado con retoños frescos, se incendian grandes cantidades de páramo cada época seca, convirtiendo esta práctica de manejo en la mayor amenaza para la biodiversidad de los páramos (Hofstede, 2002).

El pastoreo del ganado en los páramos aumenta la compactación de los suelos y disminuye la permeabilidad de los mismos, con lo cual se altera el ciclo normal de las aguas, que naturalmente fluyen a través de ellos hacia la zona de recarga hídrica, que en la parte baja de la cuenca va a alimentar los nacimientos de las quebradas (Avellaneda, 2002).

2.3 EL SUELO DE PÁRAMO COMO SUMIDERO DE CARBONO

El color negro de los suelos de páramo debido a la alta concentración de compuestos húmicos favorece la absorción de la radiación solar. La acción simultánea de estos factores, genera un aumento en la temperatura del suelo, que unida al propio aumento de la temperatura del ambiente, acelera los procesos microbiológicos de descomposición. La consecuencia será la oxidación de la materia orgánica, liberando grandes cantidades de CO₂ a la atmósfera. Los suelos de páramo han sido sumideros muy eficientes de carbono atmosférico, pero como resultado de la intervención antrópica, podrían devolver rápidamente sus reservas de nuevo a la atmósfera, contribuyendo con el calentamiento global y creando un sistema de retroalimentación positiva en el que se acortaría el tiempo de vida de este ecosistema (Rondón, 2000).

Tabla 3.1 Carbono acumulado suelo versus vegetación.

Compartimento	t·ha ⁻¹ C	
	Páramo	Selva tropical
Vegetación	20	250
Suelo	1700	50
Total	1720	300

Fuente: adaptado de Hofstede (1999).

2.4 SENSORES REMOTOS

El número y tipo de fuentes disponibles de sensores remotos simplifica el procesamiento de información de campo. Una vez se establecen las características que determinan la naturaleza de la información que puede extraerse de una imagen, de acuerdo con las diferentes porciones del espectro electromagnético, se pueden explorar procesamientos que permitan satisfacer los requerimientos necesarios de información. Esencialmente se utilizan las bandas del espectro del visible y del infrarrojo para obtener información de coberturas vegetales mediante sensores remotos, las cuales pueden combinarse algorítmicamente en un índice de vegetación, para resaltar elementos de discriminación de estado y variedad vegetal en la superficie terrestre.

2.4.1 Caracterización biofísica de coberturas vegetales mediante sensores remotos. Los análisis de información recopilada mediante sensores remotos han jugado un papel importante en el estudio de la vegetación de la superficie terrestre, permitiendo proveer información del comportamiento de la radiación electromagnética reflejada, absorbida y transmitida (comportamiento espectral) en el espacio y el tiempo, como indicadores biofísicos de la sanidad de las plantas. Las técnicas cuantitativas pueden ser aplicadas a los datos espectrales, fundamentados en la adquisición de imágenes que provienen de plataformas aéreas y sistemas satelitales, de forma tal, que se puedan determinar las condiciones de estado de las coberturas vegetales. Los sensores remotos permiten obtener la siguiente información:

Fracción de cobertura vegetal. Los sensores remotos ofrecen, mediante el trabajo de colección de datos multitemporales, la capacidad de monitorear cambios en la fracción de la cobertura vegetal asociados a la fenología de una especie. En la Figura 3.1 se aprecian los detalles coligados con el crecimiento de un cultivo sobre el tiempo, obtenidos por Lupo, Linderman, Vanacker, Bartholomé y Lambin (2005), quienes usan operaciones entre bandas espectrales denominadas índices espectrales

2.4.3 Respuesta vegetal a la radiación del espectro del visible. La porción del espectro electromagnético del visible está influenciada por la pigmentación de las plantas (especialmente la clorofila a y b) y corresponde a longitudes de onda entre 400-700 nm. Estos pigmentos presentan alta reflectancia en la porción de las longitudes de onda del verde (500 nm) y absorbancia en el azul (450 nm) y el rojo (670 nm) (Hoffer, 1978); además existen otros pigmentos que también influyen en la absorción y reflectancia de esta región del espectro como lo son: los carotenos y la xantofila. La información de los pigmentos, especialmente de la clorofila, ha sido usada en aplicaciones de agricultura y estudios de vegetación, debido a que los pigmentos hacen parte integral en la función fisiológica de una hoja y pueden ser usados como indicadores de su estado fisiológico.

2.4.4 Respuesta vegetal a la radiación del espectro infrarrojo cercano. El infrarrojo cercano (NIR Near Infrared por sus siglas en inglés) es la porción del espectro electromagnético entre 700 a 1.200 nm. La vegetación se caracteriza por su alta reflectancia en el NIR, debido a la interacción de la radiación electromagnética con las células y las interfaces entre el aire y agua de las hojas, es decir, está controlada principalmente por la estructura de la hoja (Slaton, Hunt & Smith, 2001). En una curva de respuesta espectral (o firma espectral), el “final del rojo” (Red Edge, en su traducción en inglés) es la porción de radiación reflejada por la vegetación, que está en la transición entre las longitudes de onda del rojo al infrarrojo y cuya pendiente puede indicar el estrés de la planta y la concentración de clorofila (Carter & Knapp, 2001). En estudios realizados por Zarco *et ál.* (2004) para la medición de contenido de clorofila en viñedos, se encontró que el mejor indicador espectral del contenido de clorofila se halla en las razones calculadas en el rango de 700 a 750 nm de imágenes hiperespectrales (imágenes con cientos de bandas espectrales), lo que corresponde al final del espectro del rojo e inicios del infrarrojo. El final del rojo es seguido por una meseta del infrarrojo cercano, y esta porción del espectro está asociada a los cambios a nivel celular, incluyendo hidratación y daños (Rock, Veogelman, Williams, Vogelmann & Hoshizaki, 1986).

2.4.5 Respuesta vegetal a la radiación del espectro infrarrojo de onda corta. La porción del infrarrojo de onda corta (SWIR Short Wave Infrared, por sus siglas en inglés) corresponde a los valores entre 1.300 a 2.400 nm y es fuertemente influenciado por la absorción de agua. La humedad contenida entre las hojas absorbe la radiación del infrarrojo de onda corta; este rango del espectro es útil en estimación del contenido de agua en las plantas (Ustin, Roberts, Gamon, Asner & Green, 2004). El contenido de agua en la vegetación es importante cuando se trata de determinar riesgos de incendios forestales (Maki, Ishiara & Tamura, 2004) y para establecer la deficiencia hídrica en cultivos agrícolas. Tian, Tong, Pu, Guo y Zhao (2001) usan la reflectancia en el infrarrojo de onda corta (entre 900-1.850 y 1.700-2.500 nm) en hojas de trigo para determinar estrés hídrico.

2.4.6 Índices espectrales. Los índices espectrales son combinaciones entre bandas espectrales que intentan enfatizar alguna variable de interés: vegetación, agua, mineral, basándose en el comportamiento de la radiación en el parámetro, de forma tal que se maximice y se pueda separar del resto. Para determinar un índice espectral se debe analizar el comportamiento espectral de la variable objetivo mediante programas de simulación o librerías espectrales, analizando el espacio de variación espectral más idóneo y construyendo una función con un amplio rango de tipos de datos sensados remotamente, para integrar múltiples rangos de longitudes de onda que entreguen información acerca de las características de interés. En el caso de la vegetación existen relaciones evidentes entre las bandas del visible y el infrarrojo.

Para estudiar la dinámica de la vegetación se utilizan los llamados índices de vegetación (VI), que consisten en la combinación de dos o más bandas espectrales, partiendo del hecho de que el análisis multibanda podría proporcionar más información que el monobanda. Existe gran cantidad de índices de vegetación, pero la mayoría utiliza la radiancia, la reflectividad a nivel del suelo, o la reflectividad aparente al exterior de la atmósfera. Las bandas del rojo (R) y del infrarrojo cercano (NIR) son las que resaltan una mayor relación con parámetros relativos a la vegetación, tales como: biomasa verde, concentración de clorofila, índice de área foliar, defoliación, actividad fotosintética y otros. También han demostrado su utilidad para diferentes tipos de análisis sobre las imágenes, como clasificación de cultivos, fenología, cubierta verde y detección de cambios (Ormeño, 2006).

Los índices de vegetación más ampliamente utilizados son: el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI: Normalized Difference Vegetation Index, por sus siglas en inglés), (Rouse et ál., 1974), que se expresa por:

$$NDVI = (\rho_{NIR} - \rho_{RED}) / (\rho_{NIR} + \rho_{RED}) \quad (2)$$

Y el índice de vegetación mejorado (EVI: Enhanced Vegetation Index, por sus siglas en inglés), (Huete, 1997) calculado como:

$$EVI = G X \frac{(\rho_{NIR} - \rho_{RED})}{\rho_{NIR} + c_1 * \rho_{RED} - c_2 * \rho_{BLUE} + L} \quad (3)$$

En donde ρ_{NIR} es la reflectancia en el infrarrojo cercano, ρ_{RED} es la reflectancia en el rojo, ρ_{BLUE} es la reflectancia en el azul, c_1 y c_2 son coeficientes de resistencia a los aerosoles, G es un factor de ganancia y L es el ajuste del fondo de la cobertura, que para el algoritmo de MODIS equivalen a:

$$L = 1, c_1 = 6, c_2 = 7.5 \text{ y } G = 2.5$$

Estos índices, al igual que sus modificaciones, se basan en la diferencia entre la máxima absorción de radiación en el rojo a causa de los pigmentos clorofílicos y la máxima reflexión de radiación en el NIR (Ormeño, 2006). Mientras el NDVI es más sensible a la clorofila, el EVI es más sensible a las variaciones estructurales de la superficie vegetal. Estos dos índices de vegetación han sido adoptados por la NASA como productos estándar en los datos suministrados por imágenes MODIS (Huete et ál., 2002).

2.4.7 Respuesta espectral del suelo. Los suelos terrestres forman componentes esenciales de los ecosistemas naturales y la base para la producción de comida, combustibles y fibra. El uso y preservación de estos recursos requiere el seguimiento y manejo efectivo mediante la preparación de mapas precisos de distribuciones y monitoreo de las variaciones espaciotemporales en los cambios en el estado del suelo. En este contexto, las imágenes de sensores remotos forman una herramienta esencial para adquirir datos que representan la distribución del suelo y para almacenar información asociada a las variaciones temporales y espaciales de las propiedades del mismo (Campbell, 2009).

Con solo algunas excepciones, las técnicas de sensores remotos son útiles para determinar las características de la superficie del suelo, siempre y cuando las propiedades de la subsuperficie sean valoradas, por lo cual es conveniente tener cierta información acerca del perfil del suelo. Aunque el enlace entre las propiedades de la superficie del suelo y su subsuelo se puede establecer, tales conexiones dependen generalmente de información derivada de datos de sensores remotos. Sin embargo, se puede reconocer que las aplicaciones de los sensores remotos están usualmente dirigidas a propiedades de la superficie, en vez del suelo y su amplio contexto pedológico.

3. METODOLOGÍA

3.1 MUESTREO DE SUELOS

Se realizó un muestreo de suelos para establecer la variabilidad espacial del contenido de carbono orgánico (CO) bajo diferentes condiciones de uso del suelo, así mismo se tomaron muestras para determinar densidad aparente (ρ_b) por medio del método del cilindro de volumen conocido, con el fin de cuantificar las toneladas de carbono presentes en el suelo (Figura 3.2).



(a)



(b)

Figura 3.2 Toma de muestras para CO (a) y ρ_b (b).

El muestreo se efectuó de forma aleatoria simple. Se ubicaron 150 puntos dentro del área de estudio –500 ha–, en cada uno de estos se tomaron muestras a dos profundidades, 0-15 cm y de 15-30 cm para CO y ρ_b . El número total de muestras de suelo fue de 600, 300 para CO y 300 para ρ_b ; dichas muestras fueron llevadas al Laboratorio de Suelos y Aguas de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia-UPTC, con el fin de ser procesadas e iniciar los análisis correspondientes. Para CO se empleó el método de Walkley Black y para ρ_b , el método del cilindro de volumen conocido. La información obtenida de los análisis de laboratorio fue procesada y agrupada en un sistema de información geográfico –SIG–.

3.2 ANÁLISIS ESPACIAL

3.2.1 Procesamiento de información. Para realizar los procedimientos de interpolación y mapeo de los datos recopilados en campo de contenido de CO y ρ_b para 150 muestras y a dos profundidades: 0-15 cm y 15-30 cm, se empleó el *software* QGIS. En la Figura 3.3 se observa la imagen SPOT de la zona de estudio cargada en el *software*, y en la Figura 3.4 se aprecian los puntos de muestreo de carbono orgánico para las 150 muestras a profundidades de 0-15 cm y 15-30 cm, respectivamente.

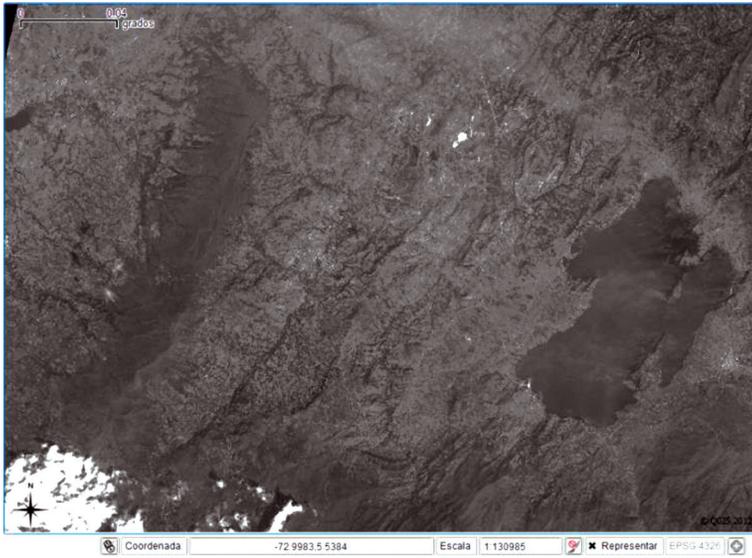


Figura 3.3 Imagen SPOT del área de estudio.



Figura 3.4 Imagen SPOT con puntos de muestreo para determinación CO y ρ_b .

3.3 ESTUDIO DE FACTORES BIÓTICOS

Con el fin de establecer sitios estratégicos para la ubicación de parcelas permanentes de muestreo (PPM) útiles en el monitoreo del comportamiento de carbono orgánico del suelo, se caracterizaron factores relacionados con la vegetación y el tipo del suelo presentes en áreas del páramo de La Cortadera, ya que estos se consideran como indicadores importantes a la hora de evaluar diferentes estados de intervención en ecosistemas estratégicos.

3.3.1 Caracterización de suelos. Se llevó a cabo un levantamiento de suelos de tipo semidetallado (escala 1:25 000), a fin de conocer la distribución de los suelos del páramo de La Cortadera relacionados en su génesis, morfología y propiedades fisicoquímicas. Toda esta información es útil al momento de realizar recomendaciones acerca de la delimitación, uso y manejo de dichos suelos; cabe resaltar que el componente edáfico en un páramo cumple funciones indispensables para mantener en equilibrio el ecosistema, ya sea como regulador del ciclo hidrológico o como sumidero de carbono debido a elevados contenidos de materia orgánica.

Para realizar el levantamiento semidetallado se ejecutaron dos etapas:

1. *Reconocimiento de suelos e indicadores de campo.* Se llevó a cabo la recolección de la información, el establecimiento de la leyenda preliminar y la selección de las áreas piloto o transectos; para este último paso se tomaron como base imágenes SPOT y referencias de salidas de campo, estableciendo de esta manera el área que comprende los diferentes tipos de relieve, así como el nivel de intervención en el cual se encuentra el ecosistema: intervenido, no intervenido y en recuperación (Figura 3.5).

El trabajo de campo se desarrolló en dos periodos de tiempo, el primero para hacer la identificación (cajuelas) y comprobación (barrenadas), y el segundo con el fin de realizar calicatas para descripción de perfiles modales.

La distribución de los puntos de muestreo se hizo por medio de mapeo aleatorio simple, ubicando 44 puntos en total para las 500 ha (8 observaciones x 100 ha), se realizaron 17 cajuelas (50 cm x 50 cm) y 27 barrenadas; con esta información se logró determinar qué posibles tipos de suelo se presentaban en el área y de esta manera lograr ubicar los puntos donde se realizarían las calicatas para completar el estudio semidetallado.

2. *Laboratorio.* Los análisis de laboratorio –físico, químico y mineralógico–, fueron hechos en el Laboratorio de Suelos y Aguas de la UPTC y en el Laboratorio Nacional de Suelos del Instituto Geográfico Agustín Codazzi –IGAC–; las pruebas realizadas son indispensables para clasificar el suelo hasta nivel de familia.

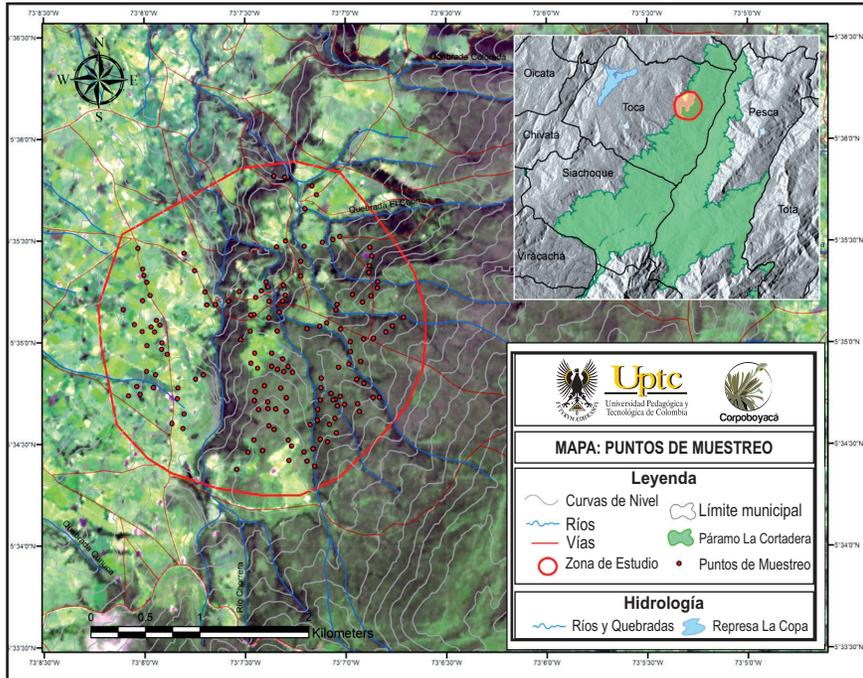


Figura 3.5 Puntos de muestreo para toma de muestras de CO y pH .

3.3.2 Caracterización vegetal. Se revisaron detalladamente las comunidades y los tipos de vegetación característicos de la sucesión del bosque altoandino al ecosistema de páramo. Los sitios de muestreo se escogieron de acuerdo con la cobertura vegetal predominante, procurando que estos abarcaran la variedad florística de las diferentes unidades fisiográficas de páramo. Mediante imágenes satelitales y visitas previas se establecieron parcelas de 100 m² (10 m x 10 m) y para el muestreo de herbáceas subparcelas de 1 m² (1m x 1m), evaluando variables de presencia, frecuencia y densidad de población.

3.4 CUANTIFICACIÓN DE LAS RESERVAS DE CARBONO EN EL SUELO

La identificación, seguimiento y notificación de las tierras puede hacerse mediante información geográfica y estadística. Las variaciones del carbono almacenado a lo largo del tiempo pueden estimarse con una combinación de mediciones directas, datos sobre las actividades, y modelos basados en principios aceptados de análisis estadísticos, inventarios de bosques, técnicas de teledetección, mediciones de flujo y muestreo de suelos (IPCC, 2001).

En este caso se utilizaron mediciones directas, datos de actividades que se desarrollan en la zona, muestreo de suelos e información de sensores remotos.

3.4.1 Métodos de campo

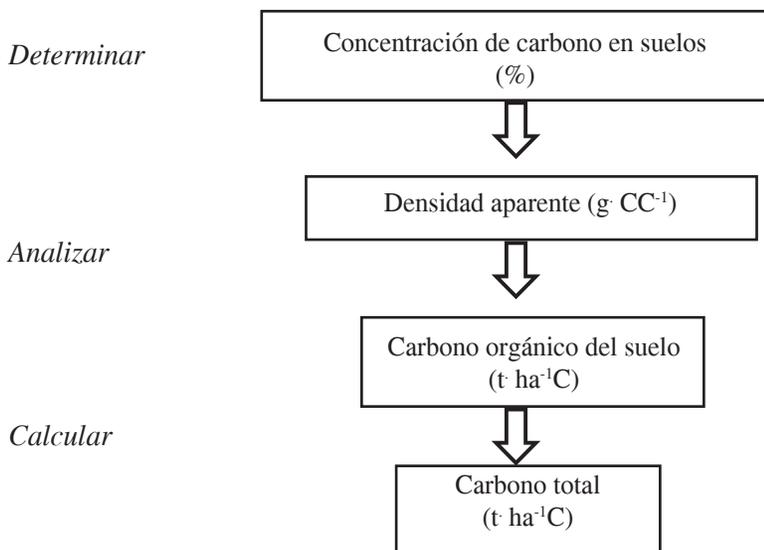


Figura 3.6 Método para determinar el contenido de Carbono Orgánico en el Suelo (COS).

Fuente: adaptado de Mac Dicken (1997).

Para cuantificar el carbono presente en el suelo se recolectó la información local sobre factores esenciales, considerando las siguientes variables (Delgadillo & Montalvo, 2006):

- Tipo de uso del suelo (bosques, plantaciones forestales, cultivos, pasturas, entre otros).
- Tipo de vegetación (especies, grupos ecológicos, entre otros).
- Tipo de suelo y topografía (arcilloso o arenoso; ondulado o plano).
- Historia del área (tiempo de uso del suelo, tipo de preparación y fertilización).
- Ocurrencia de áreas protegidas por ley (área natural protegida), entre otras.
- División del terreno en parcelas de acuerdo con las condiciones geomorfológicas de la zona y del tipo de uso del suelo, con el fin de facilitar el muestreo y obtener datos más confiables.
- Determinación de los sitios de muestreo, que para este caso fueron PPM.
- Toma de muestras para estimación de densidad aparente y carbono orgánico.

Parcelas permanentes de muestreo (PPM): con el fin de establecer la línea base sobre el potencial de captura de carbono asociado al componente edáfico,

se establecieron tres PPM, bajo diferentes condiciones de uso del suelo. Dichas parcelas son una herramienta estadística importante para evaluar los cambios temporales, principalmente porque proveen datos más reales y fácilmente verificables (MacDicken, 1997). Se considera muestreo temporal cuando las parcelas permanentes seleccionadas en el primer momento son las mismas utilizadas (medidas) en el segundo y en los momentos siguientes (Silva, 1984).

El tamaño de la parcela debe representar un equilibrio entre la exactitud, la precisión y el tiempo de la medición. Para este caso se establecieron tres parcelas de 10 x10 m (100 m²) en un área de 500 ha.

En cuanto al número de parcelas, hay que tener en cuenta que va directamente relacionado con el tipo de uso de suelo que se presente en el área de estudio. En este caso se consideró conveniente establecer una parcela para cada condición de uso de suelo. Cada parcela se georreferenció con GPS en uno de los vértices previamente definido (Figura 3.7), se demarcó y señaló para favorecer su localización en monitoreos posteriores.

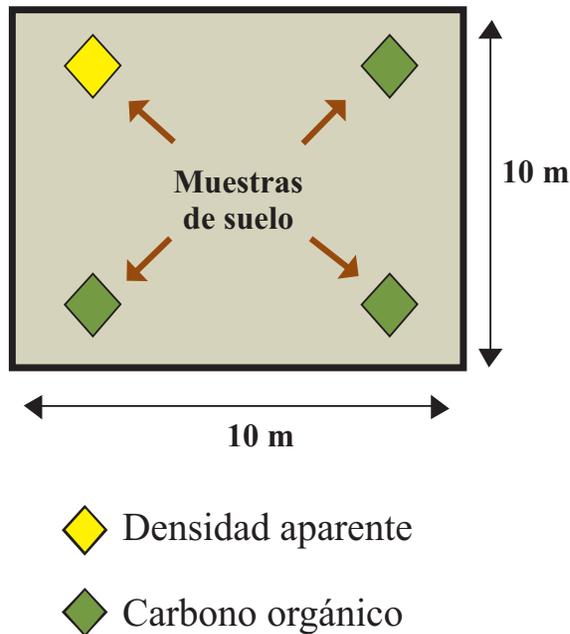


Figura 3.7 Diseño de toma de muestras en PPM 10 m X 10 m.

Fuente: adaptado de Rügnitz et ál. (2009).

Para CO se recomienda tomar la muestra en varios puntos dentro de la parcela. La elección de los puntos se hace de forma sistemática. Se separan por diferencia de profundidad, que para el estudio fueron de 0-15 cm y de 15-30 cm, ya que el cambio de uso del suelo ejerce el mayor efecto en las capas superiores (IPCC, 1996). Las muestras obtenidas en cada uno de los tres puntos se mezclan para obtener una muestra compuesta por cada una de las dos profundidades. Respecto a la pb, se utilizaron cilindros de volumen conocido, tomando una muestra por cada parcela, para cada profundidad.

Recolección y almacenamiento de las muestras: cada muestra retirada se colocó en una bolsa plástica debidamente etiquetada (identificada). A su vez, esta identificación debe coincidir con los datos de origen de la muestra y describir el tipo de análisis por realizar. Esta información se registró en un formulario de campo, enviado junto con las muestras al laboratorio, como sugieren Rüginitz, Chacón y Porro (2009).

En las figuras 3.8, 3.9 y 3.10, se muestran imágenes de la zona de estudio con cada uno de los tipos de cobertura y uso del suelo. La Figura 3.11 corresponde a la zonificación establecida según la condición de uso.



Figura 3.8 Sitio de muestro para PPM 1 - Área no intervenida.

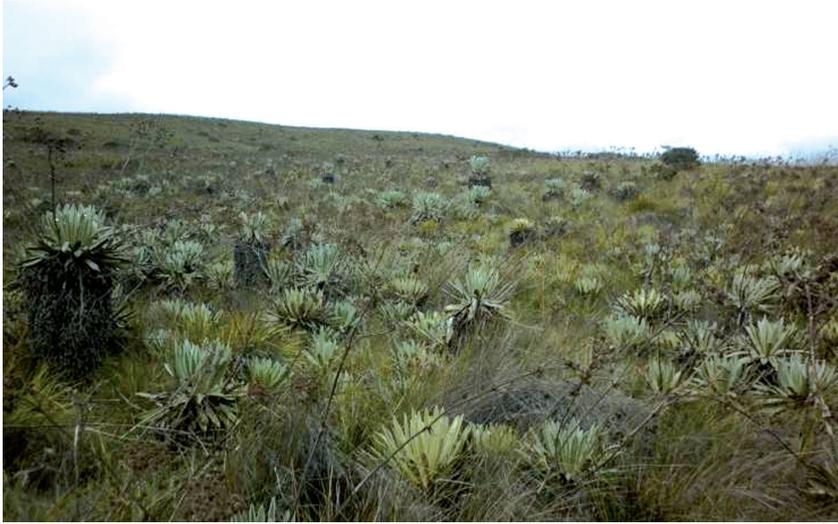


Figura 3.9 Sitio de muestro para PPM 2 - Área en recuperación.



Figura 3.10 Sitio de muestro para PPM 3 - Área intervenida.

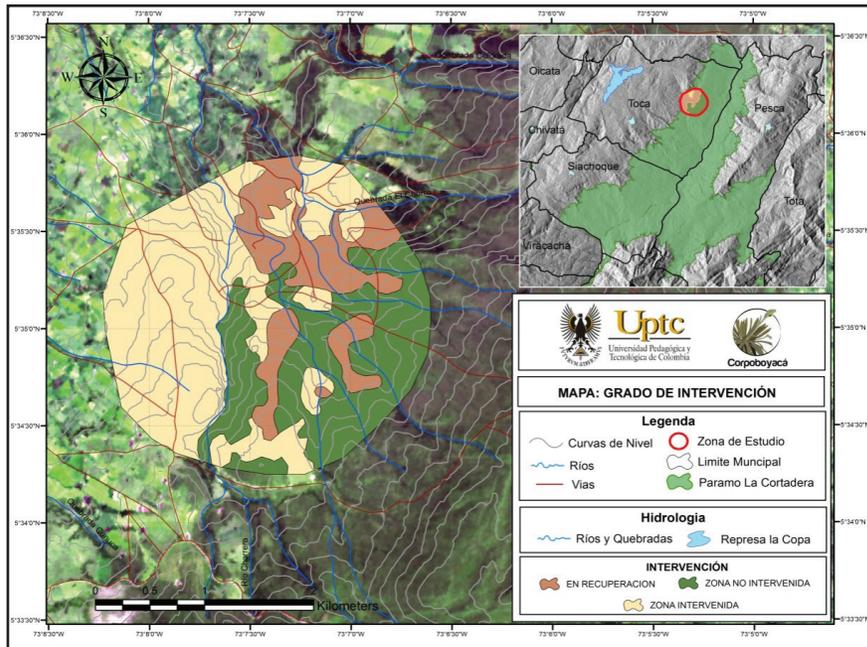


Figura 3.11 Zonificación de áreas de muestreo.

3.4.2 Métodos de laboratorio

Cálculo de carbono orgánico. El Ministerio de Ambiente de Perú (2009) recomienda el método de Walkley Black (método de oxidación húmeda), por ser el más utilizado en laboratorios debido a que no demanda equipos sofisticados. La implicancia de seleccionar el método es que no incluya la cuantificación de carbonatos. El método recomienda el muestreo mediante el uso de barrenos, dado que el establecimiento de calcatas es muy costoso. La determinación consiste en la oxidación de carbono orgánico que contiene el suelo con un exceso de dicromato potásico en medio fuertemente ácido, valorando el exceso de dicromato con sal de hierro.

Cálculo de densidad aparente. Para determinar el contenido de carbono por unidad de volumen de suelo, es necesario conocer la densidad aparente del suelo. Para esto se utiliza el método del cilindro de volumen conocido descrito por MacDicken (1997), como se presenta a continuación:

- a. Pesar los cilindros e identificarlos como peso 1 (P1).
- b. Preparar la superficie del suelo (que esté lisa) a una profundidad de 15 cm.
- c. Introducir el cilindro en el suelo sin comprimir.

- d. Colocar la muestra en horno a 105 °C por 72 horas.
- e. Después de secar, pesar el cilindro más el suelo y registrarlo como peso 2 (P2).
- f. Calcular la densidad aparente, por medio de la siguiente formula:

$$(\rho b \cdot g \cdot cm^3) = \frac{P1 - P2}{Volumen \ del \ cilindro}$$

Cálculo de carbono orgánico del suelo. La metodología descrita por el IPCC (2006) ha sido actualizada con estudios realizados por Rüginitz et ál., (2009) y el Ministerio del Ambiente de Perú (2009), y se considera como una de las más completas. Indica que el carbono almacenado en el suelo es calculado por medio de la sumatoria del carbono almacenado en cada profundidad definida:

$$COS = [Cos] \times \rho b \times Profundidad \times (1 - frag) \times 10$$

COS= contenido de carbono orgánico del suelo, representativo del tipo de uso del suelo (t·ha⁻¹C).

[COS] = concentración de carbono orgánico del suelo para una determinada masa de suelo obtenida del análisis de laboratorio (g·kg⁻¹de suelo).

ρb = densidad aparente, masa de suelo por volumen de muestra (t·m⁻³).

Profundidad= profundidad del horizonte o espesor de la capa de suelo, en metros (m).

Frag= volumen porcentual de fragmentos gruesos/100, sin dimensiones.

Obs: se utiliza el multiplicador final 10 para convertir las unidades en t·ha⁻¹ C. Para saber la cantidad de CO₂ emitido o almacenado a partir de la cantidad de carbono de un determinado depósito, se debe multiplicar esta por 3.67.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 ANÁLISIS ESPACIAL

4.1.1 Procesamiento de información de carbono orgánico. Se realizaron procedimientos de interpolación de la información recopilada en campo usando el método de ponderación inversa a la distancia (IDW). En la Figura 3.12 se observa la variabilidad espacial de carbono orgánico para las mediciones a profundidades de 0 a 15 cm, y en la Figura 3.13 para profundidades de 15 y 30 cm.

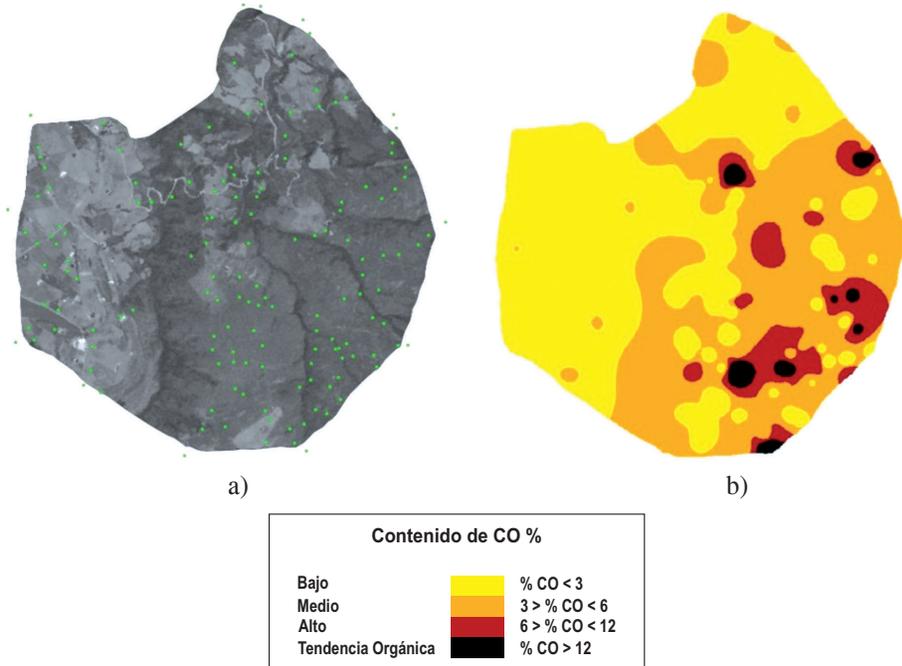


Figura 3.12 Interpolación de datos de carbono orgánico a profundidades de 0 a 15 cm. a) Imagen pancromática y muestras de campo, b) Ponderación Inversa a la Distancia (IDW).

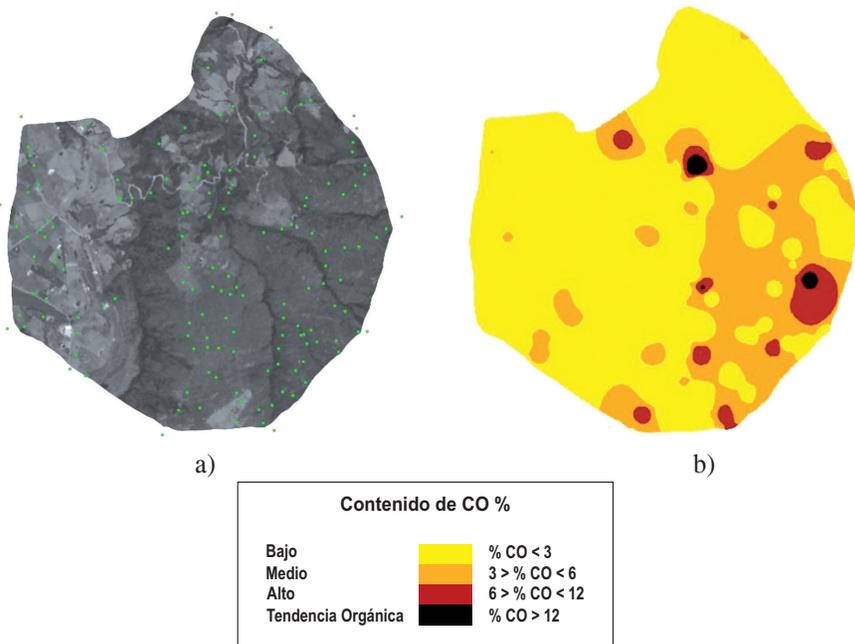


Figura 3.13 Interpolación de datos de carbono orgánico a profundidades de 15 a 30 cm. a) Imagen pancromática y muestras de campo, b) Ponderación Inversa a la Distancia (IDW).

En las figuras 3.12 y 3.13 se puede observar la interpolación de datos a dos profundidades, de 0-15 cm y de 15-30 cm. Las figuras se encuentran divididas en tres zonas de izquierda a derecha -intervenido, en recuperación y no intervenido-. Se observa que la zona denominada no intervenido, es la que presenta mayores porcentajes de CO, seguida por la de en recuperación y por último la zona intervenido. Estos porcentajes están relacionados con el uso que se le ha dado al suelo durante los últimos años; es decir, para la zona que se encuentra en mayor estado de conservación, los valores de CO van a ser más altos que en una zona donde hubo o hay intervención antrópica directa.

Cabe resaltar la importancia del uso y manejo de los suelos en el páramo de La Cortadera; resulta imprescindible establecer un uso que procure la conservación de dicho ecosistema, para que de esta manera pueda seguir siendo un potencial sumidero de CO₂ mediante la captura de carbono por parte del suelo.

4.1.2 Procesamiento de información de sensores remotos. Se procesan las imágenes del producto MODIS para un día asociado a los de la adquisición de datos en campo, en los meses de junio (13, 27, 29) y julio (23 y 26), la cual corresponde a las imágenes que se extraen del producto:

MOD13Q1.A2012193.h10v08.005.2012212121841_16DAY_250m

La información satelital corresponde a los índices de vegetación NDVI (índice de vegetación diferencial normalizado), EVI (índice de vegetación mejorado) y a las bandas espectrales del azul, rojo, infrarrojo cercano (NIR) e infrarrojo medio (MIR) del día 193 del 2012. Estas imágenes se procesaron para determinar si existía alguna relación entre los datos espectrales y los de porcentaje de carbono orgánico. Los mapas espectrales de las bandas: azul, roja, infrarroja cercana e infrarroja media se aprecian en las figura 3.14 y 3.15; se muestran los índices de vegetación NDVI, EVI, junto con los datos de carbono orgánico adquiridos.

En las figuras 3.14 (a) y 3.14 (b) se aprecian los mapas de la banda espectral azul y roja correspondientes a valores bajos, con un aumento en los valores en el infrarrojo cercano (Figura 3.14 (c)) y un nuevo descenso en el infrarrojo medio (Figura 3.14 (d)), lo cual caracteriza regiones amplias de vegetación.

Como se muestra en la Figura 3.14, hacia la zona no intervenida, los valores de índices de vegetación son más bajos que en una zona donde hay intervención debido al establecimiento de cultivos. Esto se debe principalmente a que los cultivos presentan espectros de reflectancia más alta respecto a la banda azul, roja, infrarrojo cercano e infrarrojo medio.

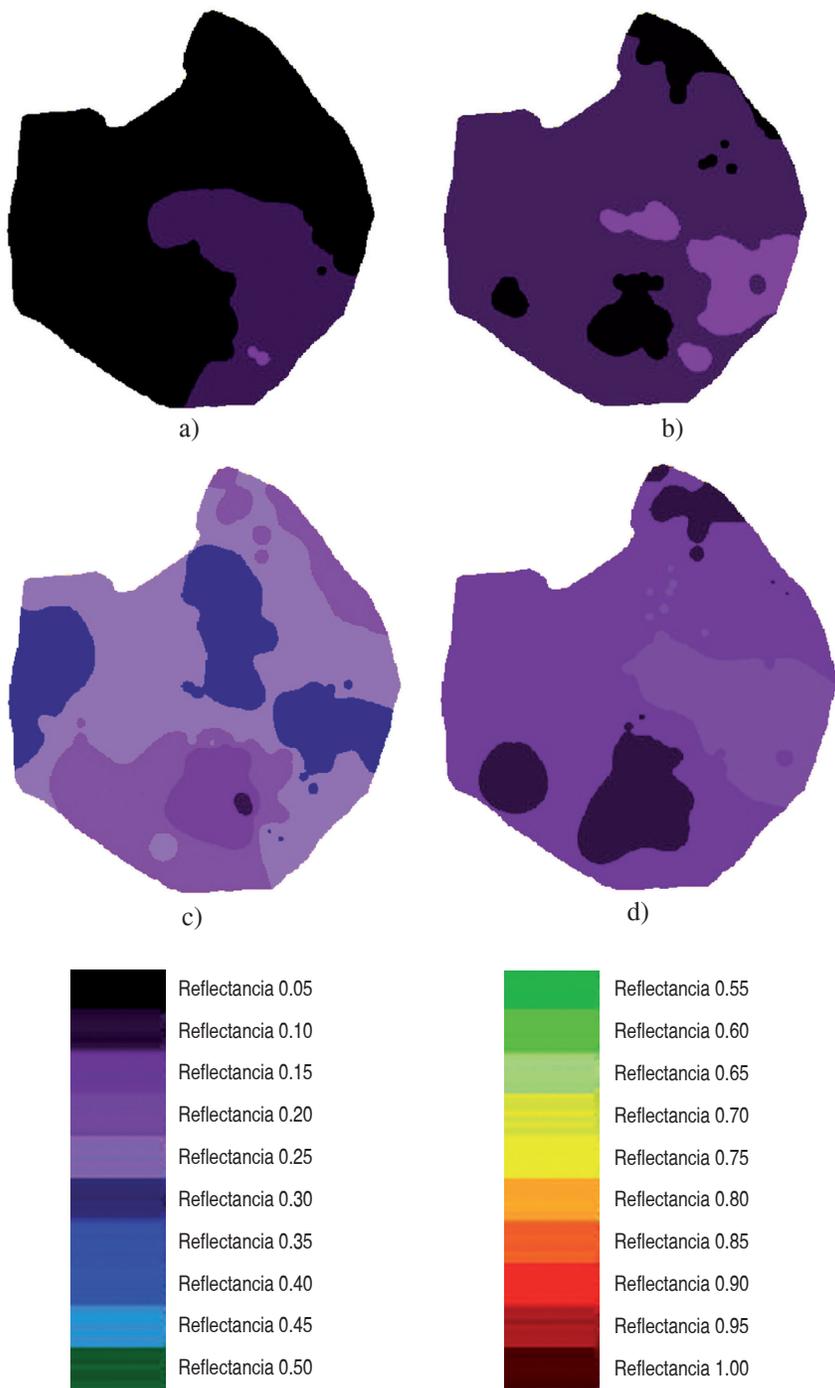


Figura 3.14 Bandas espectrales del producto MODIS. a) Banda espectral azul, b) banda espectral roja, c) banda espectral del infrarrojo cercano y d) banda espectral del infrarrojo medio.

La respuesta espectral en la longitud de onda de las bandas azul y roja hace referencia al color de las plantas. Cuando se presenta una reflectancia azul baja indica que hay vegetación en la zona, si hay una reflectancia alta indica que la planta puede presentar color café o amarillo, ya sea por presencia de factores climáticos adversos, plantas enfermas o simplemente porque se ha removido la cobertura.

La banda espectral NIR se relaciona con el estado de la estructura de las plantas, especialmente la presencia de tonalidad de colores más fuertes, puede ser por la aplicación frecuente de insumos con el fin de que la planta desarrolle mayor estructura y por consiguiente haya una producción más elevada (cultivos).

El MIR hace referencia al nivel de humedad de las plantas. Se puede apreciar mayor estabilidad en la cobertura de cultivos, probablemente como resultado de riego continuo.

Los índices de vegetación NDVI y EVI son indicadores muy importantes en la clasificación del tipo de cobertura. Los mapas de estos dos índices de vegetación (figuras 3.15 (a) y 3.15 (b) respectivamente) se comparan gráficamente con los de carbono orgánico, y se caracterizan zonas de bajo contenido de carbono orgánico con zonas de valores mayores de índice de vegetación, y las zonas de mayor contenido de carbono orgánico con valores menores de índice, lo cual representa una relación inversa.

Aunque parecen tener un valor de correlación alto, visualmente se hizo un análisis más significativo mediante una matriz de correlación. Los valores de correlación se muestran en la Tabla 3.2. Estos valores expresan una correlación inversa (aunque muy pequeña) entre los datos de carbono orgánico y los índices de vegetación estudiados.

Tabla 3.2 Matriz de correlación lineal de los datos espectrales y el contenido de carbono orgánico

	Carbono orgánico 0-15cm	AZUL	RED	NIR	MIR	NDVI	EVI
Carbono Orgánico 0 - 15cm	1.000	0.26	0.167	-0.045	0.15	-0.26	-0.197
AZUL	0.260	1.00	0.820	0.179	0.54	-0.85	-0.328
RED	0.167	0.82	1.000	0.569	0.76	-0.73	-0.038
NIR	0.045	0.18	0.569	1.000	0.71	0.14	0.784
MIR	0.152	0.54	0.759	0.712	1.00	0.33	0.322
NDVI	0.256	0.85	-0.725	0.139	-0.33	1.00	0.697
EVI	0.197	0.33	-0.038	0.784	0.32	0.70	1.000

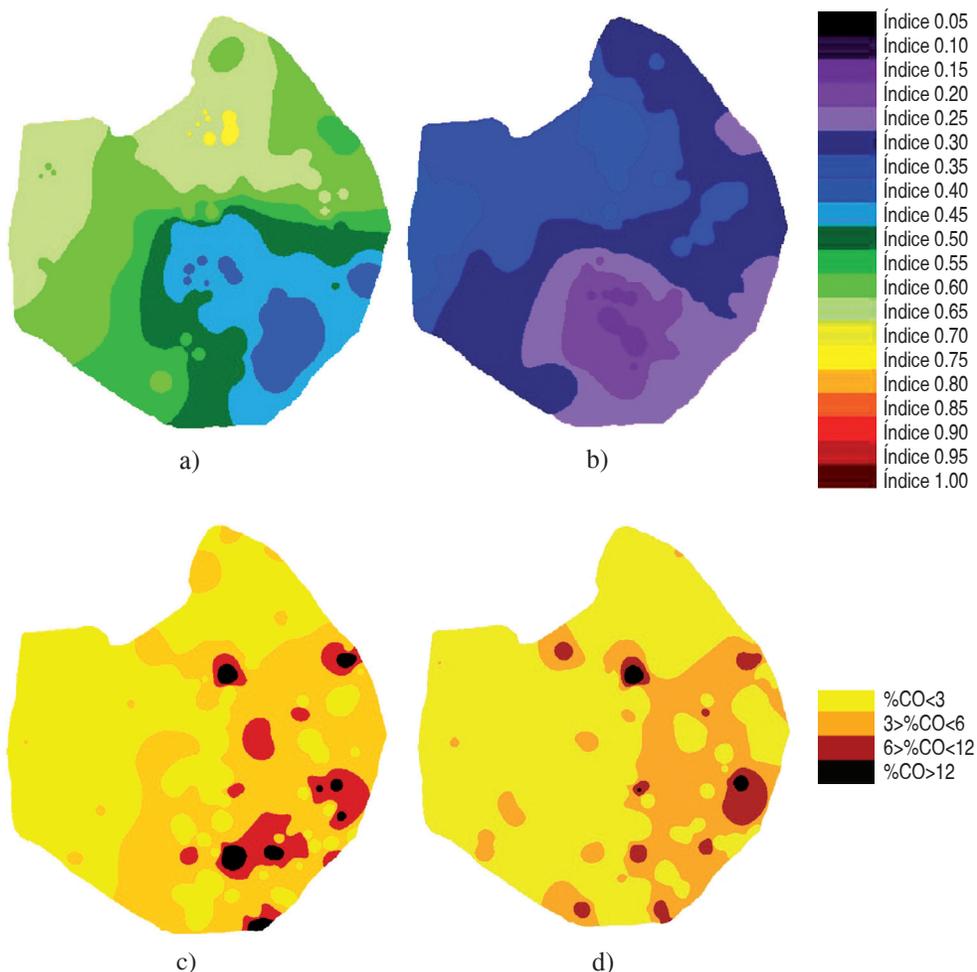


Figura 3.15 Índices de vegetación del producto MODIS. a) Índice de vegetación NDVI, b) índice de vegetación para coberturas boscosas EVI, c) mapa de carbono orgánico 0-15cm, d) mapa de carbono orgánico 15-30cm.

El NDVI tiene en cuenta el rojo y el infrarrojo y está directamente relacionado con la pendiente entre estos dos, es decir, un color fuerte indica que las plantas están produciendo más o que su estado fenológico es mejor; colores claros sugieren que seguramente las plantas se encuentran enfermas o en mal estado.

Este comportamiento concuerda con estudios realizados por Salgado (2005), donde expresa que el vigor de la biomasa vegetal presente en la época estival (Uruguay), muestra una respuesta espectral de la siguiente manera: blanco, zonas en donde no hay vegetación, verde pálido, vegetación rala, y verde intenso representa zonas con altos niveles de biomasa.

El EVI contempla el rojo, el infrarrojo y el azul. Este índice fue mejorado para que no se presentara saturación. Generalmente, el EVI es utilizado a la hora de estudiar coberturas boscosas y complejas.

4.2 ESTUDIO DE FACTORES BIÓTICOS

4.2.1 Caracterización de suelos. Con el levantamiento, muestreo y análisis realizado se definieron cuatro perfiles modales, que representan las características propias de evolución de los suelos del páramo sometidos a las variaciones en condiciones climáticas propias de este ecosistema. A continuación se presenta la descripción de cada uno de los perfiles identificados:

1. Humic Dystrustepts. Familia Arcillosa, Kaolinítica, Semiactiva e Isofrígida

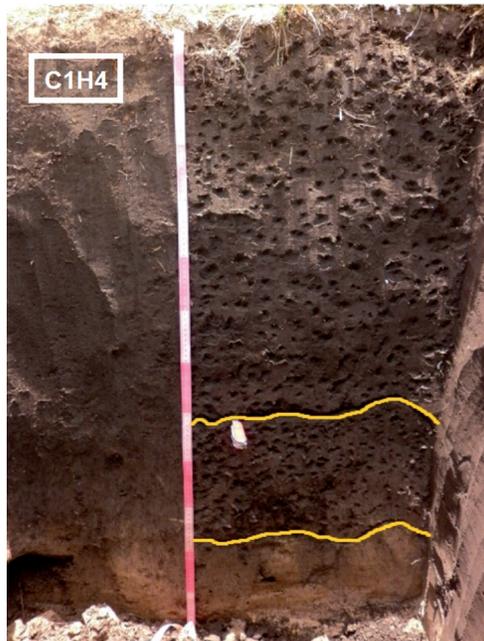


Figura 3.16 Perfil modal del Humic Dystrustepts.

Tabla 3.3 Descripción general del Humic Dystrustepts

HUMIC DYSTRUSTEPTS	
Taxonomía	Humic Dystrustepts
Número de perfil	C1H4
Localización	Departamento: Boyacá, municipio: Toca
Sitio:	Vereda Chorrera
Altitud:	3.004 msnm
Latitud:	N 05.58967 W 073.11538
Paisaje:	Montaña estructural erosional
Posición geomorfológica:	Ladera
Relieve:	Laderas cóncavas y montañoso estructural
Litología o material parental:	Rocas sedimentarias clásticas mixtas
Longitud de la pendiente:	Larga
Gradiente de la pendiente:	4-16%
Clima ambiental:	Frío seco
Clima edáfico:	Humedad:ústico; temperatura: isofrígido
Encharcamiento:	Ocasional
Nivel freático:	Profundo, superior a 120 cm
Erosión:	No evidenciada
Drenaje:	Bien drenado por pendiente
Profundidad efectiva:	Profunda (> 90 cm)
Limitante de la profundidad:	Horizonte arcilloso
Características diagnósticas:	Epipedón: umbrico. endopedón: cámbico
Uso actual:	Vegetación de páramo en estado de recuperación
Limitantes del uso:	Reacción muy fuertemente ácida, altos niveles de aluminio, fertilidad moderada
Descrito por:	Germán Eduardo Cely Reyes, Laura Sofía Palacios Pacheco, Fabián Leonardo Barragán Reyes 22 de septiembre de 2012

Nota: la tabla es una descripción realizada directamente en campo y aparece por quien fue descrita.

Tabla 3.4 Morfología del Humic Dystrustepts.

HUMIC DYSTRUSTEPTS	
Ap 0–72 cm.	Color en húmedo negro (10 YR-2/1); textura francolimosa; estructura tipo-bloques, clase-subangulares, grado-fuerte; consistencia seca-ligeramente dura, húmedo-muy friable, mojado-no pegajosa, ligeramente plástico; resistencia a la ruptura firme; abundantes raíces muertas hasta 46 cm; pH 4.73, reacción débil frente a H ₂ O ₂ y negativa a HCl, fuerte reacción a NaF; límite gradual, ondulado.
Bw 72–98 cm.	Color en húmedo negro (7.5 YR 2.5/1); textura francolimosa; estructura tipo- bloques subangulares, clase-media, grado-fuerte; consistencia seca-ligeramente dura, húmeda- friable, mojada-no pegajosa, ligeramente plástica, en húmedo firme, en mojado pegajosa y plástica; resistencia a la ruptura firme; poca presencia de raíces; pH 4.93; reacción ligera a H ₂ O ₂ , a HCl y fuerte a NaF; nitidez de horizonte abrupta.
C 98-130 X	Color en húmedo café grisáceo claro (10 YR-6/2); textura arcillosa; estructura tipo-bloques subangulares, clase-media y gruesa, grado-fuerte; consistencia seca- ligeramente dura, húmedo-firme, mojado- pegajosa-plástico; firme; sin presencia de raíces; pH 5.20; Acumulación de arcillas; reacción ligera a H ₂ O ₂ , a NaF y negativa a HCl; nitidez de horizonte abrupta.

Nota: la tabla es una descripción realizada directamente en campo y aparece por quien fue descrita.

Características fisicoquímicas y mineralógicas de clasificación de los Humic Dystrustepts. Otros Dystrustepts que tienen un valor del color, húmedo, de 3 o menos y un valor del color, seco, de 5 o menos (muestra molida y homogeneizada) ya sea a través de los 18 cm superiores del suelo mineral (sin mezclar) o entre la superficie del suelo mineral y una profundidad de 18 cm después de mezclados (USDA, 2010).

A nivel general, estos suelos son profundos y de baja evolución, moderadamente bien drenados y de texturas finas, reacción fuertemente ácida, baja saturación de bases y P, contenidos medio de Ca, Mg y K, alta capacidad de intercambio catiónico, niveles medios a bajos de Al y fertilidad moderada.

Tabla 3.5 Características fisicoquímicas de los Humic Dystrustepts

Horizonte espesor (cm)	$\rho_{bg} c^{-1}$	Arcilla %	MO %	pH	SAI %	Fe $mg\ kg^{-1}$	CE $dS\ m^{-1}$	PSI %	AIC*
Ap 0-72	1.05	43.12	0.84	4.7	61.9	60.5	0.02	4.21	0.28
Bw 72-98	1.25	33.12	1.06	4.9	60.6	62.2	0.01	.82	0.26
C 98-130	1.37	27.12	0.34	5.2	32.6	1.72	0.01	7.40	0.19

* Actividad de intercambio catiónico para definir criterios de familia. >0.6 superactiva; 0.4-0.6 activa; 0.24-0.4 semiactiva, <0.24 subactiva.

Potencial de hidrogeniones –pH–. La reacción del suelo se evalúa por el potencial de hidrogeniones, más conocido como pH, cuyo rango de variabilidad es de 0 a 14, lo que indica su grado de acidez o de basicidad, así como la disponibilidad de nutrientes y actividad de microorganismos, entre otras propiedades (IGAC, 2005).

Con base en tablas de clasificación donde se muestra información relacionada con rangos de acidez, se logra interpretar los resultados reportados en los análisis de suelos. Los valores encontrados en este perfil se encuentran en la clasificación de muy fuertemente ácido en los primeros horizontes, lo cual indica que la disposición de los elementos químicos esenciales para la nutrición vegetal se ve comprometida debido al grado de acidez.

Tabla 3.6 Clasificación del grado de acidez o basicidad

APRECIACIÓN	pH
Extremadamente ácido	<4.5
Muy fuertemente ácido	4.6 a 5.0
Fuertemente ácido	5.1 a 5.5
Medianamente ácido	5.6 a 6.0
Ligeramente ácido	6.1 a 6.5
Neutro	6.6 a 7.3
Ligeramente alcalino	7.4 a 7.8
Medianamente alcalino	7.9 a 8.4
Fuertemente alcalino	8.5 a 9.0
Muy fuertemente alcalino	> 9.0

Fuente: adaptado de IGAC (2005).

Porcentaje de saturación de aluminio – % SAI. El aluminio. Dentro de los primeros horizontes de este perfil, hasta una profundidad de 98 cm, se encontró un porcentaje de saturación de aluminio superior a 60%, lo que evidencia las condiciones

inapropiadas para la explotación agrícola, debido a que es el principal responsable de la acidez del suelo y es un elemento tóxico para las plantas, interfiere en la absorción y fijación de otros elementos, así como en la división celular.

Porcentaje de materia orgánica – % MO. Los contenidos de materia orgánica son el principal indicador de fertilidad del suelo debido a los nutrientes que proporciona. Además, presenta una fuerte influencia y beneficios sobre las condiciones físicas, químicas y biológicas del mismo.

Estos contenidos se evalúan de acuerdo con la presencia de carbono orgánico, el cual se ve comprometido por el clima, el material parental, el relieve, la vegetación y el uso del suelo; estos factores determinan la velocidad de descomposición de los residuos orgánicos y la dinámica de pérdidas versus ganancias (IGAC, 2005).

Tabla 3.7 Contenidos de carbono orgánico de acuerdo con los pisos térmicos

Piso térmico	Contenido de carbono orgánico (%)				
	Ideal	Conveniente	Moderado	Inconveniente	Muy Inconveniente
Frío	5.3 a 6.5	4.1 a 5.2; 8.0 a 6.6	2.7 a 4.0; 8.1 a 10.0	1.4 a 2.6; >10.0	<1.3
Medio	4.2 a 5.3	3.0 a 4.1; 5.4 a 6.5	1.8 a 2.9; 6.5 a 7.6	0.6 a 1.70; >7.6	<0.5
Cálido	>3.0	1.7 a 2.9	0.51 a 1.7	0.2 a 0.5	<0.2

Fuente: adaptado de IGAC (2005).

De acuerdo con los resultados de contenido de carbono orgánico evaluados en laboratorio, estos suelos se encuentran en la clasificación muy inconveniente al presentar valores inferiores a 1.3, lo que indica que las condiciones, especialmente biológicas en términos agronómicos, no son las óptimas.

Tabla 3.8 Caracterización fisicoquímica del Humic Dystrustepts

H. Espesor (cm)	Ca (meq/100 gr ⁻¹)	Mg (meq/100 gr ⁻¹)	K (meq/100 gr ⁻¹)	Na (meq/100 gr ⁻¹)	P (meq/100 gr ⁻¹)	Arena %	Limo %	Textura
Ap 0-72	1.13	0.83	0.1	0.28	7.95	26.88	30	Arcilloso
Bw 72-98	0.57	0.79	0.07	0.28	13.41	50.88	16	Franco-arcillo-arenoso
C 98-130	1.29	0.84	0.07	0.28	8.43	40.88	32	Franco-arcilloso

Bases intercambiables (Na⁺, K⁺, Ca⁺⁺, Mg⁺⁺). La saturación de las bases intercambiables depende del pH del suelo, siendo baja en medios fuertemente ácidos donde predomina la saturación de aluminio e hidrógeno y aumenta a medida que disminuye la acidez (IGAC, 2005).

Debido a las condiciones de pH bajo y alta saturación de aluminio, la presencia de bases intercambiables es baja en los suelos de la zona para este perfil.

Propiedades mineralógicas. Las propiedades mineralógicas de los suelos se analizan para conocer las condiciones de los suelos para la agricultura, diagnosticar el comportamiento físico, dirimir la clasificación taxonómica de los mismos y para establecer los procesos pedogenéticos (IGAC, 2005).

Respecto al componente mineralógico del Humic Dystrustepts, está dominado por la caolinita (Figura 3.17), la cual es producto de meteorización ácida, tiene baja capacidad de intercambio catiónico y área superficial reducida; en menor proporción por micas, precursor de minerales arcillosos tipo 2:1, e interestratificados.

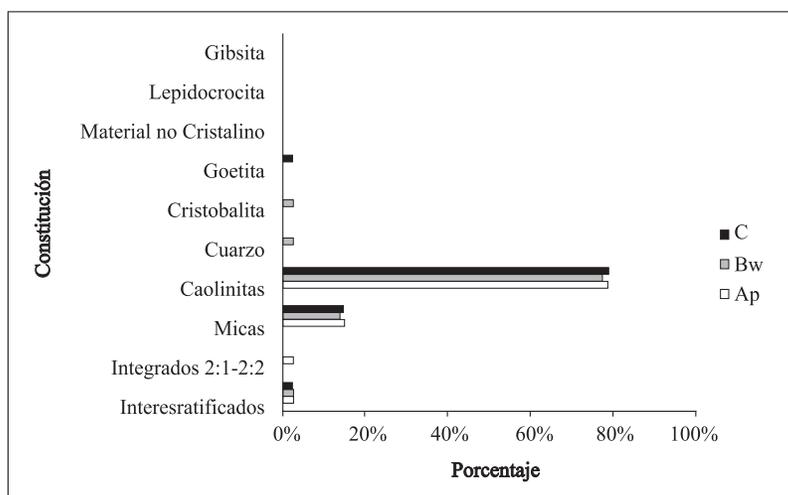


Figura 3.17 Representación semicuantitativa de la fracción mineral arcillosa (Difracción de rayos X) del Humic Dystrustepts.

2. Oxic Humustepts. Familia Arcillosa, Kaolinitica, Semiactiva e Isofrígida

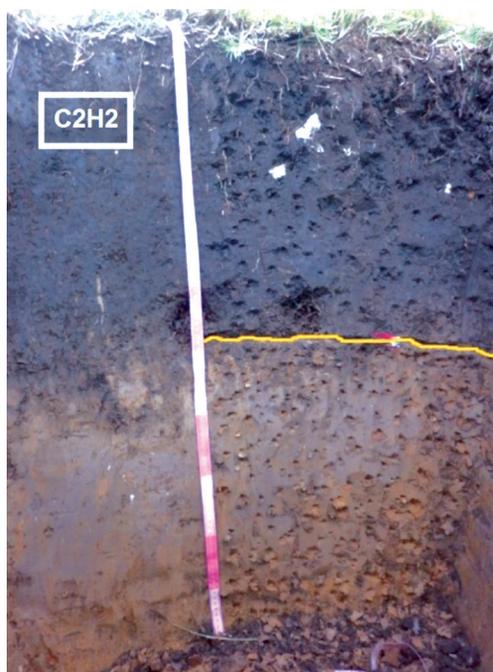


Figura 3.18 Perfil modal del Oxic Humustepts.

Tabla 3.9 Descripción general del Oxic Humustepts

OXIC HUMUSTEPS	
Taxonomía:	Oxic Humustepts
Número de perfil:	C2H2
Localización:	Departamento: Boyacá, municipio: Toca
Sitio:	Vereda Cunuca
Altitud:	3.054 msnm
Latitud:	N 05.58643 W 73.12810
Paisaje:	Montaña erosional estructural
Posición geomorfológica:	Ladera
Relieve:	Laderas cóncavas y montañoso estructural
Litología o material parental:	Depósitos superficiales clásticos hidrogravigénicos
Longitud de la pendiente:	Larga
Gradiente de la pendiente:	7-12%
Clima ambiental:	Frío seco
Clima edáfico:	Humedad: ústico; temperatura: isofrígido
Encharcamiento	No
Nivel freático:	Profundo, superior a 120 cm
Erosión:	No evidenciada
Drenaje:	Bien drenado por pendiente
Profundidad efectiva:	Profunda (> 90 cm)
Límitante de la profundidad:	Horizonte arcilloso
Características diagnósticas:	Epipedón: úmbrico. Endopedón: argílico
Uso actual:	Pastos
Límitantes del uso:	Reacción extremadamente ácida, altos niveles de aluminio, fertilidad baja
Descrito por:	Germán Eduardo Cely Reyes, Laura Sofía Palacios Pacheco, Fabián Leonardo Barragán Reyes. 22 de septiembre de 2012

Nota: la tabla es una descripción realizada directamente en campo y aparece por quien fue descrita.

Tabla 3.10 Morfología del Oxic Humustepts

OXIC HUMUSTEPS	
Ap 0–47 cm	Color en húmedo café muy oscuro (7.5 YR-2.5/2); textura francoarcillosa; estructura tipo-bloques subangulares, clase- fina, agrado- fuerte; consistencia seca-muy dura, húmedo- firme, mojado-pegajosa- ligeramente plástico; resistencia a la ruptura firme; abundantes raíces muertas; pH 4.54, reacción ligera frente a H ₂ O ₂ y negativa a HCl y a NaF; límite gradual del horizonte.
Btw 48–110 X	Color en húmedo matriz, café amarillento (10 YR 5/4), moteados, amarillo marrón (10 YR 6/8) moteado abundante, superior a 20%, clase por tamaño pequeño, menor a 15 mm, con forma de machas; textura arcillosa; estructura tipo-bloques subangulares, clase- fina, grado- fuerte; consistencia seco-muy duro, húmedo-firme, mojado-pegajoso; resistencia a la ruptura firme; poca presencia de raíces muertas; pH 4.91; reacción ligera frente a H ₂ O ₂ y negativa a HCl y a NaF; nitidez de horizonte gradual.

Nota: la tabla es una descripción realizada directamente en campo y aparece por quien fue descrita.

Características fisicoquímicas y mineralógicas de clasificación de los Oxic Humustepts. Otros Humustepts tienen un 50% o más del volumen del suelo entre una profundidad de 25 cm a partir de la superficie del suelo mineral y ya sea una profundidad de 100 cm o un contacto dénsico, lítico o paralítico menos profundo (USDA, 2010).

Tabla 3.11 Características fisicoquímicas de los Oxic Humustepts

Horizonte espesor (cm)	ñbg·c c ⁻¹	Arcilla %	MO %	pH	SAI %	Fe mg kg ⁻¹	CE dSm ⁻¹	PSI %	AIC*
Ap 0-47	1.17	27.12	8.55	4.5	66.9	121.6	0.02	4.44	0.45
Bw 72-98	1.21	48.12	4.27	4.9	8.25	0.06	0,01	3.89	0.29

* *Actividad de intercambio catiónico para definir criterios de familia. >0.6 superactiva; 0.4-0.6 activa; 0.24-0.4 semiactiva, <0.24 subactiva.*

Potencial de hidrogeniones – pH. Los valores encontrados para los suelos de este perfil se encuentran en la clasificación de extremadamente ácido para el primer horizonte y muy fuertemente ácido para el segundo horizonte, lo cual indica que la disposición de los elementos químicos esenciales para la nutrición vegetal se ve gravemente comprometida debido al grado de acidez.

Porcentaje de saturación de aluminio – % SAI. En el primer horizonte hasta una profundidad de 47 cm se encontró un porcentaje de saturación de aluminio superior a 60 %, lo que evidencia las condiciones inapropiadas para la explotación agrícola por su alto contenido de aluminio; disminuyendo este valor hasta 34.7% a un máximo de 110 cm de profundidad.

Porcentaje de materia orgánica – % MO. De acuerdo con los resultados evaluados en laboratorio, estos suelos se encuentran en la clasificación de conveniente para el primer horizonte al presentar valores entre 4.1% y 5.2%, lo que indica que las condiciones, especialmente biológicas en términos agronómicos, son buenas. Para el segundo horizonte se encuentra en la clasificación de inconveniente, lo que muestra presencia de problemas en sus condiciones generales.

Tabla 3.12 Caracterización fisicoquímica del Oxic Humustepts

H. Espesor (cm)	Ca (meq/100 gr ⁻¹)	Mg (meq/100 gr ⁻¹)	K (meq/100 gr ⁻¹)	Na (meq/100 gr ⁻¹)	P (meq/100 gr ⁻¹)	Arena %	Limo %	Textura
Ap 0-47	0.71	0.78	0.11	0.28	5.46	46.88	27.12	Franco-arcillo-arenoso
Btw 48-110	2.56	0.89	0.86	0.28	6.66	30.88	49.12	Arcilloso

Bases intercambiables (Na⁺, K⁺, Ca⁺⁺, Mg⁺⁺). Debido a las condiciones de pH bajo y alta saturación de aluminio, la presencia de bases intercambiables es baja en los suelos de la zona para este perfil.

Propiedades mineralógicas. Respecto al componente mineralógico, el Oxic Humustepts está dominado por la caolinita (ver Figura 3.19), la cual es producto de meteorización ácida, tiene baja capacidad de intercambio catiónico y área superficial reducida; en menor proporción por material no cristalino, que corresponde a ceniza volcánica (alófana).

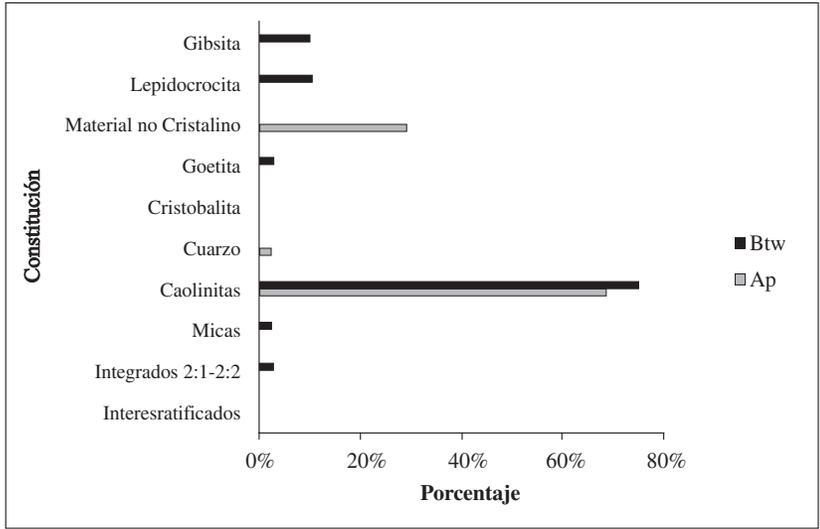


Figura 3.19 Representación semicuantitativa de la fracción mineral arcillosa (difracción de rayos X) del Oxic Humustepts.

3. Typic Ustifolists. Familia Dísica e Isofrígida

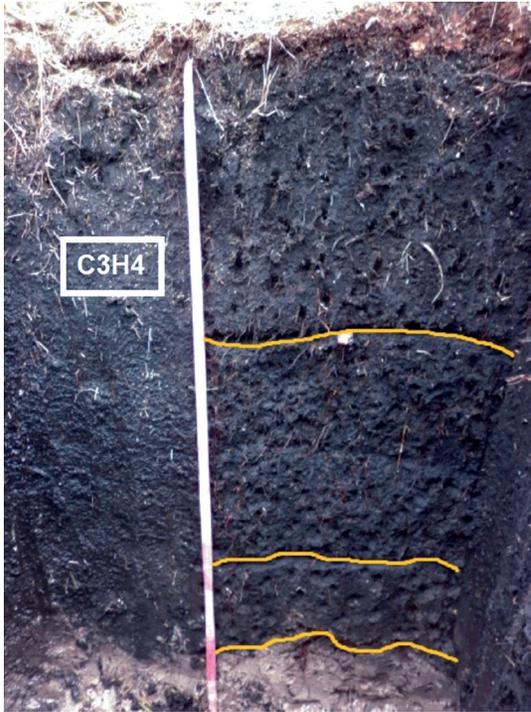


Figura 3.20 Perfil modal del Typic Ustifolists

Tabla 3.13 Descripción general del Typic Ustifolists

	TYPIC USTIFOLISTS
Taxonomía:	Typic Ustifolists
Número de perfil:	C3H4
Localización:	Departamento: Boyacá, municipio: Toca
Sitio:	Vereda Chorrera
Altitud:	3.190 msnm
Latitud:	N 05.57456W 073.11916
Paisaje:	Montaña erosional estructural
Posición geomorfológica:	Ladera
Relieve:	Laderas cóncavas y montañoso estructural
Litología o material parental:	Depósitos superficiales clásticos hidrogravigénicos
Longitud de la pendiente:	Larga
Gradiente de la pendiente:	4-16 %
Clima ambiental:	Frío seco
Clima edáfico:	Semiseco, ústico; temperatura, isofrígido
Encharcamiento	Ocasional
Nivel freático:	Profundo, superior a 120 cm
Erosión:	No
Drenaje:	Lento
Profundidad efectiva:	Profunda (> 90 cm)
Limitante de la profundidad:	Horizonte arenoso
Características diagnósticas:	Materiales orgánicos
Uso actual:	Páramo en estado de conservación
Limitantes del uso:	Reacción muy fuertemente ácida, altos nivel es de aluminio, fertilidad baja
Descrito por:	Germán Eduardo Cely Reyes, Laura Sofía Palacios Pacheco, Fabián Leonardo Barragán Reyes. 1 de octubre de 2012

Nota: la tabla es una descripción realizada directamente en campo y aparece por quien fue descrita.

Tabla 3.14 Morfología del Typic Ustifolists

TYPIC USTIFOLISTS	
Oa 0–42 cm	Color en húmedo negro (10 YR-2/1); textura francolimoso orgánico; estructura tipo- bloques subangulares, clase-fina, grado- moderado; consistencia seco- no seco, húmedo-muy friable, mojado- no pegajoso- no plástico; abundantes raíces vivas hasta 50 cm; pH 4.83, reacción violenta a H ₂ O ₂ , fuerte a NaF y negativa a HCl; límite claro, ondulado.
Oe 42–86 cm	Color en húmedo negro (10 YR 2/1); textura limoso orgánico; estructura tipo- bloques subangulares, clase-fina, grado- fuerte; consistencia seco- no seco, húmedo- friable, mojado- no pegajosa-ligeramente plástico; abundantes raíces muertas; pH 4.79; reacción fuerte a H ₂ O ₂ , nula a HCl y ligera a NaF; nitidez de horizonte clara.
Oi 86-105 X	Color en húmedo negro (5 Y 2.5/1); textura franco arcilloso limoso; estructura tipo- bloques subangulares, clase-fina, grado- fuerte; consistencia seco- no seco, húmedo- friable, mojado- no pegajosa-ligeramente plástico; sin presencia de raíces; pH 4.69; reacción ligera a H ₂ O ₂ y negativa a HCl y a NaF; raíces abundantes muertas.
C 105 – 140 X	Color en húmedo (10 YR 6/2); estructura tipo- bloques subangulares, clase-fina, grado- fuerte; consistencia seco- no seco, húmedo- friable, mojado- no pegajosa-ligeramente plástico; pH 4.56; no presentó reacción a H ₂ O ₂ ni a HCl ni a NaF.

Nota: la tabla es una descripción realizada directamente en campo y aparece por quien fue descrita.

Características de clasificación de los Typic Ustifolists. Otros Folists tienen un régimen de humedad del suelo ústico o xérico (USDA, 2010).

Tabla 3.15 Características fisicoquímicas de los Typic Ustifolists

Horizonte espesor (cm)	$\rho_{bg} \text{ c c}^{-1}$	Arcilla %	MO %	pH	SAI %	Fe mg kg^{-1}	CE dS m^{-1}	PSI %	AIC*
Oa 0-42	1.31	27.12	17.80	4.8	53.3	84.42	0.02	3.08	0.24
Oe 42-86	1.02	15.12	18.32	4.7	79.1	196.65	0.02	2.70	1.48
Oi 86-105	0.91	—	25.67	4.6	78.5	128.78	0.03	5.35	—
C* 105-140	0.99	9.12	15.39	4.5	86.6	253.2	0.04	3.75	3.81

* *Actividad de intercambio catiónico para definir criterios de familia (>0.6 superactiva; 0.4-0.6 activa; 0.24-0.4 semiactiva, <0.24 subactiva.*

* *C. Esta relacionado con el material geológico.*

Potencial de hidrogeniones – pH. Los valores encontrados para los suelos de este perfil se encuentran en la clasificación de muy fuertemente ácido para los primeros tres horizontes y extremadamente ácido para el cuarto horizonte, lo cual indica que la disposición de los elementos químicos esenciales para la nutrición vegetal se ve gravemente comprometida debido al grado de acidez.

Porcentaje de saturación de aluminio – % SAI. En el primer horizonte hasta una profundidad de 42 cm se encontró un porcentaje de saturación de aluminio correspondiente a nivel de tolerancia (entre 30% y 60%) con un valor de 53.3%; en los demás horizontes se encontró un valor superior a 60%, lo que evidencia las condiciones inapropiadas para la explotación agrícola por su alto contenido de aluminio.

Porcentaje de materia orgánica – % MO. De acuerdo con los resultados de contenido de carbono orgánico evaluados en laboratorio, estos suelos se encuentran en la clasificación de conveniente, debido principalmente a los altos contenidos de materia orgánica, lo que evidencia que las condiciones, especialmente biológicas en términos agronómicos, son buenas, pero no adecuadas para su explotación.

Tabla 3.16 Caracterización fisicoquímica del Typic Ustifolists

H. Espesor (cm)	Ca (meq 100 gr ⁻¹)	Mg (meq 100 gr ⁻¹)	K (meq 100 gr ⁻¹)	Na (meq 100 gr ⁻¹)	P (meq 100 gr ⁻¹)
Oa 0-42	1.08	0.2	0.27	0.11	5.40
Oe 42-86	0.68	0.01	0.18	0.13	6.55
Oi 86-105	0.57	0.1	0.23	0.3	3.54
C 105-140	0.41	0.07	0.11	0.23	5.48

Bases intercambiables (Na⁺, K⁺, Ca⁺⁺, Mg⁺⁺). Debido a las condiciones de pH bajo y alta saturación de aluminio, la presencia de bases intercambiables es baja en los suelos de la zona del perfil.

Propiedades mineralógicas. Respecto al componente mineralógico del Typic Ustifolists solo se realizaron análisis al horizonte 4, con clasificación Bc, debido a que los demás horizontes se caracterizaron como horizontes orgánicos. En este horizonte domina la caolinita (Figura 3.21), la cual es producto de meteorización ácida, tiene baja capacidad de intercambio catiónico y área superficial reducida; en menor proporción por micas, precursor de minerales arcillosos tipo 2:1.

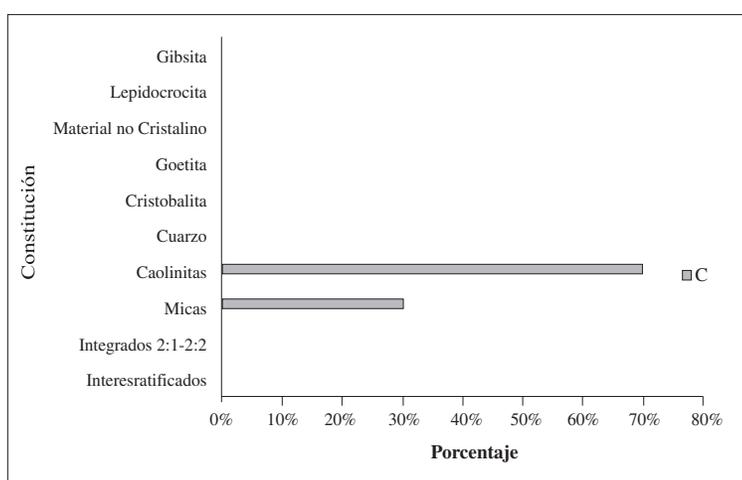


Figura 3.21 Representación semicuantitativa de la fracción mineral arcillosa (difracción de rayos X) de Typic Ustifolists. *C. Está relacionado con el material geológico.

4. Lithic Ustorthents. Familia Esquelética Franca, Kaolinítica, Semiactiva e Isofrígida

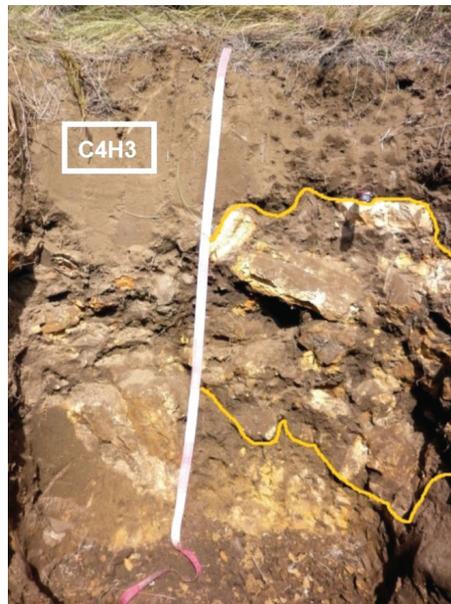


Figura 3.22 Perfil modal del Lithic Ustorthents.

Características fisicoquímicas y mineralógicas de clasificación de los Lithic Ustorthents. Otros Orthents tienen un régimen de humedad del suelo ústico. Otros Ustorthents tienen un contacto lítico dentro de los 50 cm de la superficie del suelo mineral. (USDA, 2010). Son suelos poco profundos, con poco desarrollo, se mantienen secos por más de 90 días al año, se encuentran generalmente en zonas montañosas.

Tabla 3.17 Características fisicoquímicas de los Lithic Ustorthents

H. espesor (cm)	ρ_b g'cc ⁻¹	Arcilla %	MO %	pH	SAI %	Fe mg'kg ⁻¹	CE dS'm ⁻¹	PSI %	AIC*
Ap 0-39	1.02	19.12	1.06	4.4	58.1	16.2	0.02	5.16	0.53
Cr 40-70	–	–	–	–	–	–	–	–	–
2At 70-100	1.29	–	39.12	1.70	5.0	57.0	–	0.008	0.19

* Actividad de intercambio catiónico para definir criterios de familia (>0.6 superactiva; 0.4-0.6 activa; 0.24-0.4 semiactiva, <0.24 subactiva)

* Ap. Hace referencia a un horizonte superficial impactado por actividades antrópicas.

* 2At. Está relacionado con una discontinuidad litológica y evidencias de pedogénesis.

Tabla 3.18 Descripción general Lithic Ustorthents.

LITHIC USTORTHERENTS	
Taxonomía:	Lithic Ustorthents
Número de perfil:	C4H3
Localización:	Departamento: Boyacá, municipio: Toca
Sitio:	Vereda Chorrera
Altitud:	3.011 msnm
Latitud:	N 05.58761 W 073.12084
Paisaje:	Montaña erosional estructural
Posición geomorfológica:	Ladera
Relieve:	Laderas cóncavas y montañoso estructural
Litología o material parental:	Depósitos superficiales clásticos hidrogravigénicos
Longitud de la pendiente:	Larga
Gradiente de la pendiente:	4-16%
Clima ambiental:	Frío seco
Clima edáfico:	Humedad: ústico; temperatura, isofrígido
Encharcamiento	No
Nivel freático:	Profundo
Erosión:	Hídrica, ligera
Profundidad efectiva:	Poco profundo (<40 cm)
Limitante de la profundidad:	Contacto lítico
Características diagnósticas:	Bajo desarrollo genético
Uso actual:	Pajonal de páramo. Área en recuperación
Limitantes del uso:	Presencia de rocas a 40 cm de profundidad
Descrito por:	Germán Eduardo Cely Reyes, Laura Sofía Palacios Pacheco, Fabián Leonardo Barragán Reyes. 1 de octubre de 2012

Tabla 3.19 Morfología del Lithic Ustorthents

LITHIC USTORTHENTS	
Ap 0–39 cm	Color en húmedo café claro oliva (2.5 Y - 5R); textura franco arenosa; estructura tipo- bloques subangulares, clase- muy fina, grado- moderado; consistencia seco- blanda, húmedo- friable, mojado- no pegajosa-ligeramente plástico; abundantes raíces muertas; pH 4.49, reacción fuerte frente a H ₂ O ₂ y a NaF, negativa a HCl; límite ondulado.
Cr 40–70 cm	Afloramientos rocosos; inclusiones coluviales; nitidez de horizonte gradual. Color en húmedo café claro; textura franco arenosa; estructura eipo- bloques subangulares, clase- muy fina, grado- moderado; consistencia seco- blanda, húmedo- friable, mojado- no pegajosa-ligeramente plástico; rocas blandas y poca presencia de raíces muertas; pH 5.04; acumulación de arcillas y arenas; fuerte reacción a H ₂ O ₂ , a NaF y negativa a HCl; nitidez de horizonte gradual.
2At 70-100 X	

Nota: la tabla es una descripción realizada directamente en campo y aparece por quien fue descrita.

Potencial de hidrogeniones – pH. Los valores para los suelos de este perfil se encuentran en la clasificación de extremadamente ácido para el primer horizonte y muy fuertemente ácido para el segundo, lo que revela que la disposición de los elementos químicos esenciales para la nutrición vegetal se ve gravemente comprometida.

Porcentaje de saturación de aluminio – % SAI. En los dos horizontes se encontró un porcentaje de saturación de aluminio correspondiente a nivel de tolerancia (entre 30% y 60%) con un valor aproximado a 60%, lo que evidencia las condiciones inapropiadas para la explotación agrícola por su alto contenido de aluminio, además de las barreras mecánicas con la presencia de roca a 40 cm de profundidad.

Porcentaje de materia orgánica – % MO. De acuerdo con los resultados de contenido de carbono orgánico evaluados en laboratorio, estos suelos se encuentran en la clasificación de muy inconveniente e inconveniente, debido principalmente a los bajos contenidos de materia orgánica, lo que indica que las condiciones, especialmente biológicas en términos agronómicos, son malas e inadecuadas para su explotación.

Tabla 3.20 Caracterización fisicoquímica del Lithic Ustorthents

H. Espesor (cm)	Ca (meq·10 ⁰ gr ⁻¹)	Mg (meq·10 ⁰ gr ⁻¹)	K (meq·10 ⁰ gr ⁻¹)	Na (meq·10 ⁰ gr ⁻¹)	P (meq·10 ⁰⁰ gr ⁻¹)	Arena %	Limo %	Textura
Ap 0-39	0.8	0.78	0.09	0.26	2.05	60.88	20	Franco-arenoso
2At 70-100X	0.78	0.84	0.09	0.3	4.54	50.88	10	Arcillo-arenoso

Bases intercambiables (Na⁺, K⁺, Ca⁺⁺, Mg⁺⁺). Debido a las condiciones de pH bajo y alta saturación de aluminio, la presencia de bases intercambiables es baja en los suelos de la zona del perfil.

Propiedades mineralógicas. Respecto al componente mineralógico del Lithic Ustorthents, domina la caolinita (Figura 3.23), la cual es producto de meteorización ácida, tiene baja capacidad de intercambio catiónico y área superficial reducida; seguido por goetita en el primer horizonte, la cual pertenece a minerales opacos; finalmente existe material no cristalino en el horizonte dos, que representa la ceniza volcánica (alófanos); y en menor proporción micas, precursor de minerales arcillosos tipo 2:1.

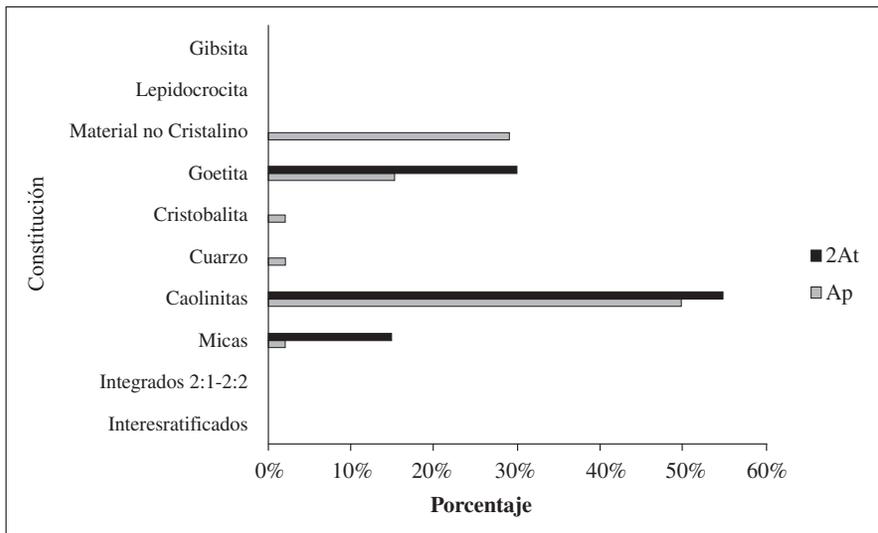


Figura 3.23 Representación semicuantitativa de la fracción mineral arcillosa (difracción de rayos X) de Lithic Ustorthents.

4.2.2 Caracterización vegetal. La zona se encuentra en un rango de elevación bastante amplio. En las partes más bajas alcanza los 2.630 msnm y en su pico más alto, los 3.600 msnm. La topografía quebrada y la heterogeneidad ambiental de sus montañas están asociadas a una gran variedad de ambientes que pueden albergar una gran diversidad de especies.

Se evidencia el fenómeno de vegetación de sucesión primaria y secundaria, donde irrumpen las zonas de matorrales secundarios y las herbáceas a manera de parches. Se encuentran elementos florísticos propios del páramo como: frailejones (*Espeletia argentea*), *Rumex acetosella*, *Lachemilla orbiculata*, *Hipchoeris sessiliflora*, *Bidens* sp., *Poligonum* sp., *Acaena cylindrostachia*, entre otros, que descienden de la parte alta para ocupar los espacios vacíos de lo que antiguamente era el bosque altoandino.

Unidades de vegetación. Se establecieron parcelas para verificación en campo y definición de unidades vegetales, evidenciando que algunos parches pequeños de vegetación nativa en la parte alta de la zona desaparecieron por causa de quemadas, de acuerdo con información de los habitantes; estos incendios forestales ocurrieron repetidas veces durante los últimos ocho a quince años.

Se diferenciaron seis unidades de vegetación en el área de estudio: bosque nativo; bosque plantado (pino); matorral alto; matorral-pastizal, matorral-rocoso erial; pastos naturales; pastos cultivados y cultivos intensivos (Figura 3.24).

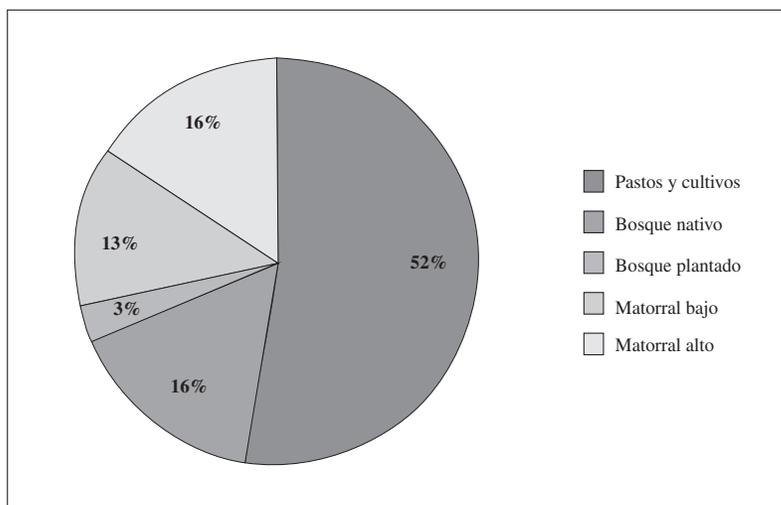


Figura 3.24 Unidades de vegetación predominantes.

Especies vegetales. Se registraron 277 especies, pertenecientes a 87 familias de plantas superiores, incluidos helechos, musgos y líquenes, para un total de 221 géneros. Se estima que este número corresponde aproximadamente a un 95% de todas las especies existentes.

Dentro del inventario de biotipos para plantas angiospermas, se cuenta con 135 herbáceas, 39 arbustos, 26 árboles y 5 lianas para un total de 205 especies.

En el páramo, por motivo de grandes alteraciones, domina la cobertura de herbazal-pastizal con gran diversidad de tipos de hierbas, sin dejar de reconocer que hay un buen número de especies de arbustos y árboles nativos que mantienen el equilibrio del bosque andino (Figura 3.25).

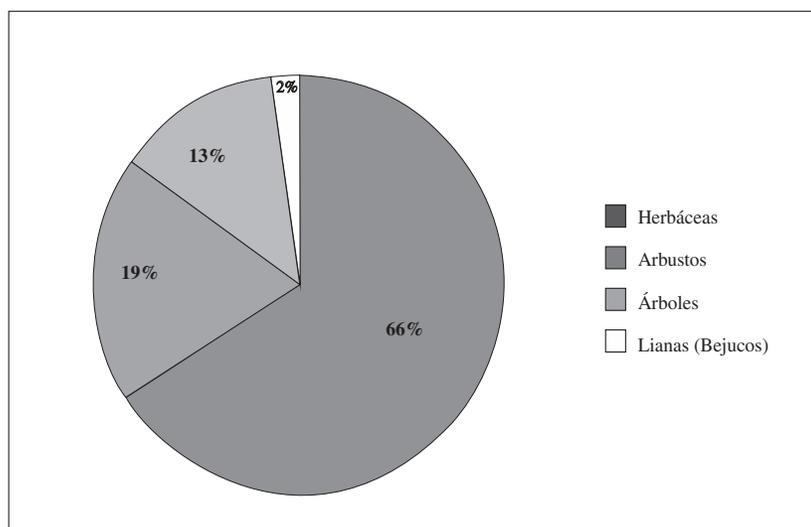


Figura 3.25 Biotipos predominantes.

La familia Asteraceae es la más representativa con 25 especies distribuidas en 23 géneros; esta es una condición dominante para zonas intervenidas. Igualmente, en alta montaña andina, autores como Rangel (2000), mencionan dominancia de este grupo de plantas. La familia Poaceae presenta 13 especies en 11 géneros, seguida por las familias: Fabaceae con 8 especies en 5 géneros, Solanaceae con 9 especies en 4 géneros, Ericaceae con 7 especies en 6 géneros, Melastomataceae con 6 especies en 3 géneros, Rosaceae con 7 especies en 4 géneros y Myrtaceae con 3 especies (Figura 3.26).

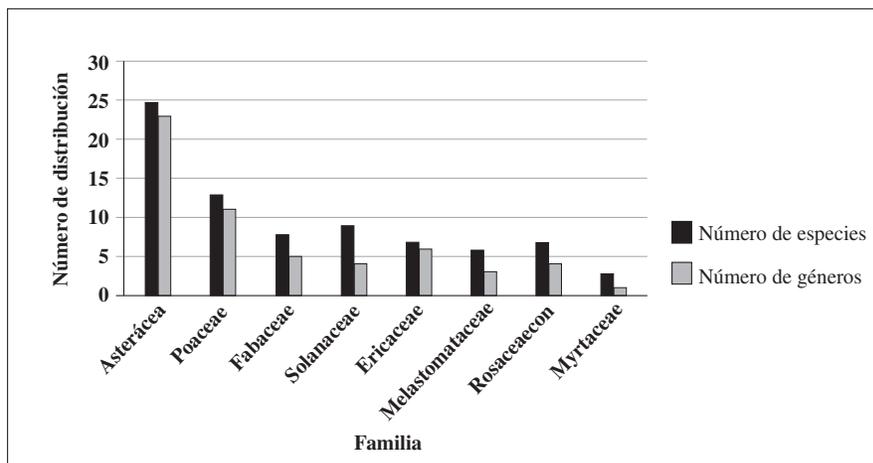


Figura 3.26 Familias botánicas con mayor número de especies.

Los géneros registrados son frecuentes en zonas andinas y conforman la estructura de bosque seco andino, siendo indispensables respecto al aporte de interrelaciones con aves e insectos, como es el caso de tunos (*Miconia*), arrayán (*Myrsianthes*), jucu (*Viburnum*) y cucharo (*Myrsine*), grupos importantes en la recuperación de fragmentos y corredores biológicos (Figura 3.27).

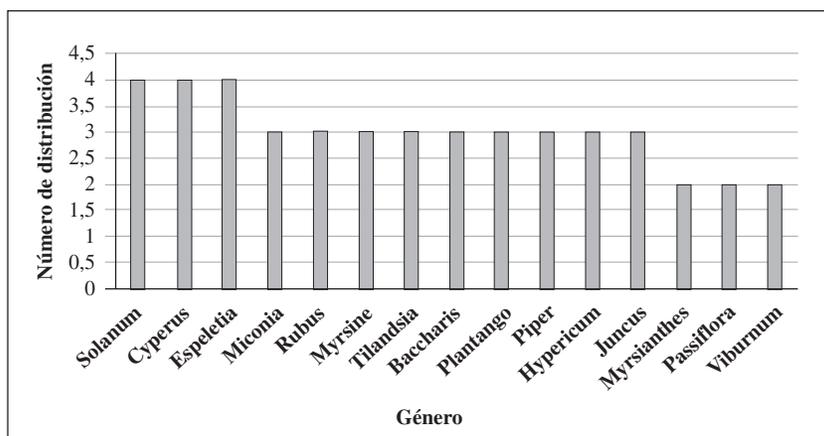


Figura 3.27 Géneros registrados.

En la Tabla 3.21 se exponen las especies representativas en el área de estudio, con su respectiva función ecológica, y en la Tabla 3.22 se muestra la diversidad de frailejones presentes en el páramo de La Cortadera, información importante a la hora de actualizar bases de datos respecto a la oferta florística de material endémico en este páramo.

Tabla 3.21 Especies representativas del área.

Familia	Nombre Científico	Función ecológica	Nombre común
Araliaceae	<i>Oreopanaxfloribundum</i>	Climáxica Bosque altoandino	Mano de oso
Araliaceae	<i>Oreopanaxmutisii</i>	Climáxica. Bosque altoandino y páramo	Gague
Asteraceae	<i>Diplostephiumrosma- nifolium</i>	Preclimáxica. Páramo seco	Romero blanco
Blechnaceae	<i>Blechnumschomburgkii</i>	Preclimáxica Bosquealtoandino	Helecho
Brunelliaceae	<i>Brunelliasp</i>	Climáxica Bosque altoandino	Cedrillo
Caprifoliaceae	<i>Viburnum triphyllum</i>	Preclimáxica. Bosque altoandino	Garrocho
Cumnonniaceae	<i>Weinmania tomentosa</i>	Climáxica Páramo húmedo	Encenillo
Clusiaceae	<i>Clusiamultiflora</i>	Consolidación Bosque altoandino	Gaque
Ericaceae	<i>Maclanearupestres</i>	Climáxica Páramo húmedo	Uvacamarera
Hypericaceae	<i>Hypericumsp</i>	Pionera etapa herbazal Páramo húmedo	Chite
Lauraceae	<i>Ocoteacalophylla</i>	Climáxica Bosque altoandino	Laurel
Melastomataceae	<i>Miconiasquamulosa</i>	Climáxica Páramo húmedo	Tuno
Melastomataceae	<i>Bucquetiaglutinosa</i>	Climáxica Bosque altoandino	Tuno Charne
Myricaceae	<i>Myricaparvifolia</i>	Consolidación Bosque altoandino	Laurel
Myrtaceae	<i>Myrsianthesleucosylla</i>	Consolidación Bosque altoandino	Arrayán
Poaceae	<i>Chusqueascadens</i>	Climáxica Bosque altoandino	Chusque
Rosaceae	<i>Hesperomelesheterophylla</i>	Preclimáxica Bosque altoandino	Mortiño
Scalloniaceae	<i>Scallonia paniculada</i>	Climáxica Páramo seco	Colorado
Simplocaceae	<i>Simplocostheiformes</i>	Preclimáxica húmedo altoandino	Té de Bogotá

Tabla 3.22 Diversidad de frailejones.

Familia	Nombre Científico	Nombre Común
Compositae	<i>Espeletiopsiscorymbosa</i>	Frailejón
Compositae	<i>Espeletia grandiflora</i>	Frailejón
Compositae	<i>Espeletiaargentea</i>	Frailejón
Compositae	<i>Espeletia muisca</i>	Frailejón
Compositae	<i>Espeletiopsisspp</i>	Frailejón

4.3 CUANTIFICACIÓN DE LAS RESERVAS DE CARBONO EN EL SUELO

Para la cuantificación de las reservas de CO presentes en el suelo del área de estudio se tomó en cuenta la metodología antes descrita; se ubicaron tres PPM, las cuales fueron georreferenciadas y representan las diferentes condiciones de uso del suelo estudiados, **no intervenido** (*vegetación de páramo (Vp)*), **en recuperación** (*vegetación herbácea muy rala sobre afloramientos rocosos (Pe)*), e **intervenido** (*cultivos transitorios (Cu)*) (ver figuras 3.28, 3.29, 3.30).

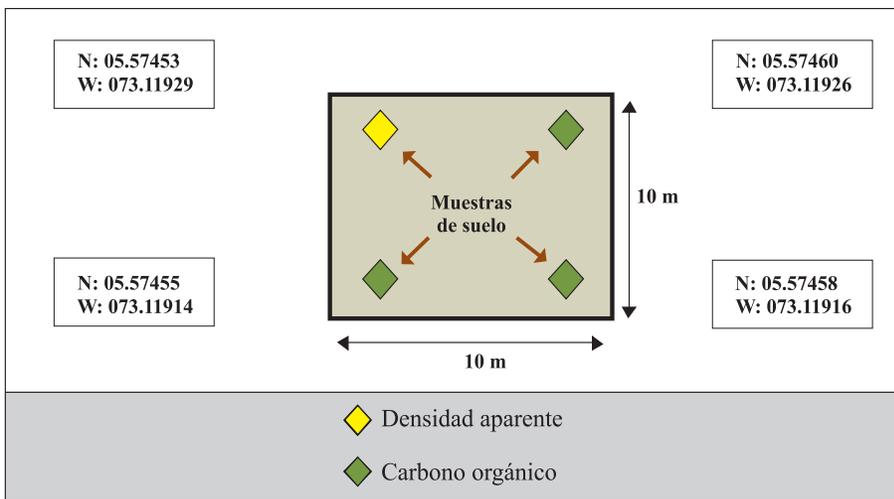


Figura 3.28 Esquema PPM 1 - Área no intervenida a 3.187 msnm.

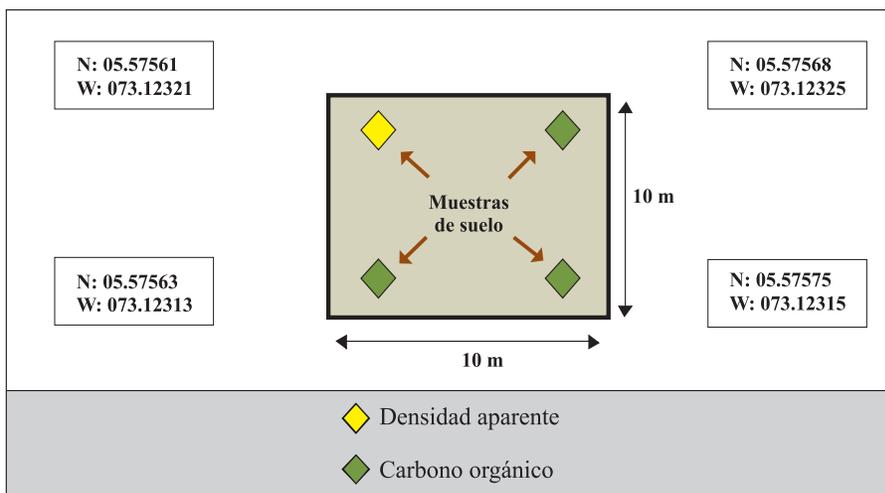


Figura 3.29 Esquema de PPM 2 - Área en recuperación a 3.251 msnm.

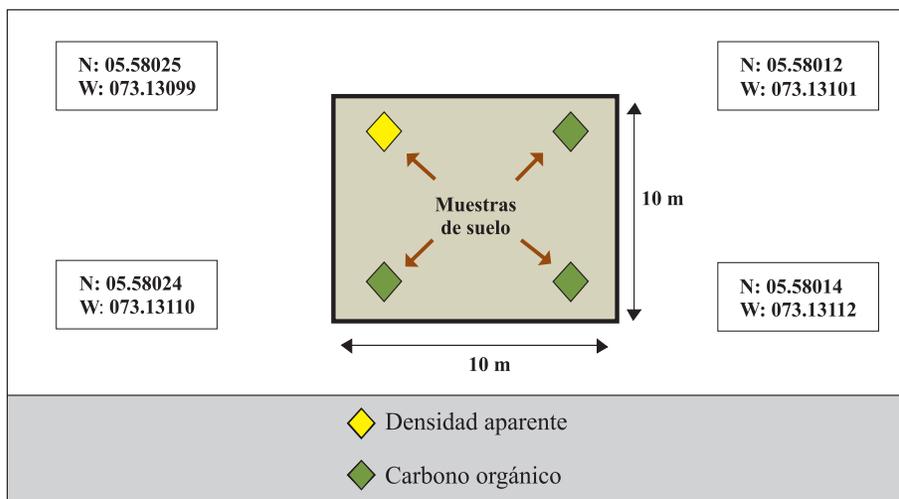


Figura 3.30 Esquema de PPM 3 - Área Intervenida a 3.164 msnm.

Al establecer las PPM, muestrear y procesar en laboratorio, en la Tabla 3.23 se presentan los resultados obtenidos para las dos profundidades estudiadas (0-15 cm) y (15-30 cm).

Tabla 3.23 Resultados de laboratorio para carbono orgánico (CO) y densidad aparente (ρ_b).

PARCELA	CO (g kg^{-1} de suelo)	Pb (t m^{-3})
PPM 1		
(0-15 cm)	139.6	1.3867
(15-30 cm)	116.3	0.5317
PPM 2		
(0-15 cm)	65.8	1.0775
(15-30 cm)	33.2	0.5532
PPM 3		
(0-15 cm)	9.3	1.1110
(15-30 cm)	4.6	1.3481

Para conocer las toneladas de carbono por hectárea ($t\ ha^{-1}C$), los datos presentados anteriormente son remplazados en la siguiente fórmula y presentados en la Tabla 3.24.

$$COS = [Cos] \times pb \times Profundidd \times (1 - frag) \times 10$$

Tabla 3.24 Valores de CO y ρb remplazados en fórmula.

PPM 1	
$COS_{(0-15\ cm)} = 139.6 * 1.3867 * 0.15 * (1 - 0) * 10 = 290.37\ t\ ha^{-1}C$	$COS_{(15-30\ cm)} = 116.3 * 0.5317 * 0.30 * (1 - 0) * 10 = 185.51\ t\ ha^{-1}C$
PPM 2	
$COS_{(0-15\ cm)} = 65.8 * 1.0775 * 0.15 * (1 - 0.02) * 10 = 104.75\ t\ ha^{-1}C$	$COS_{(15-30\ cm)} = 33.2 * 0.5532 * 0.30 * (1 - 0.02) * 10 = 54.27\ t\ ha^{-1}C$
PPM 3	
$COS_{(0-15\ cm)} = 9.3 * 1.1110 * 0.15 * (1 - 0.2) * 10 = 15.18\ t\ ha^{-1}C$	$COS_{(15-30\ cm)} = 4.3 * 1.3481 * 0.30 * (1 - 0.2) * 10 = 17.04\ t\ ha^{-1}C$

Tabla 3.25 Valores de CO expresados $t\ ha^{-1}C$ almacenadas en el suelo.

Profundidad (cm)	Condición de uso del suelo	
	Carbono orgánico del suelo COS ($t\ ha^{-1}C$)	CO ₂ emitido o almacenado ($t\ /ha/año\ CO_2e$) ¹
PPM 1	NO INTERVENIDO	
(0-15 cm)	290.37	1065.65
(15-30 cm)	185.51	680.82
Total	475.88	1746.47
PPM 2	EN RECUPERACIÓN	
(0-15 cm)	104.75	384.44
(15-30 cm)	54.27	199.17
Total	159.02	583.60
PPM 3	INTERVENIDO	
(0-15 cm)	15.18	55.74
(15-30 cm)	17.04	62.54
Total	32.22	118.24

¹ Los resultados de CO₂e fueron desarrollados con valores correspondientes a la línea base obtenida, es decir, no se consideran como resultados válidos en el contexto de secuestro de carbono. Para conocer el CO₂e por hectárea en un año (resultado válido), se debería continuar con posteriores muestreos por lo menos durante un año más; de esta manera se observará detalladamente la dinámica temporal del carbono en el suelo y se podrá acceder a mercados de comercialización de carbono, de ser contemplados dentro de los lineamientos del Protocolo de Kyoto.

Las reducciones de emisiones resultantes de la actividad de este tipo de proyectos son contabilizadas en forma de certificados de reducción de emisiones (CRE) y negociadas en mercados internacionales de carbono. Un CRE corresponde a una tonelada métrica de dióxido de carbono equivalente (CO_2e), calculada con base en el potencial de calentamiento global de este gas.

Una tonelada de carbono equivale a 3,67 toneladas de CO_2e (obtenido en razón de los pesos moleculares 44/12). Para saber la cantidad de CO_2e emitido o almacenado a partir de la cantidad de carbono de un determinado depósito, se debe multiplicar esta por 3,67, (Rügnitz et ál., 2009).

Como se puede apreciar en la Tabla 3.25 y en la Figura 3.31, los valores más altos de COS expresados en toneladas almacenadas en el suelo del área de estudio, teniendo en cuenta que es línea base, se presentan en la PPM 1 ($475.88 \text{ t ha}^{-1}\text{C}$) que corresponde al estado *no intervenido*, vegetación de páramo (Vp), así mismo, la profundidad que presenta mayores contenidos ($290.37 \text{ t ha}^{-1}\text{C}$) es la de 0 a 15 cm. Esto concuerda con diferentes estudios (Albaladejo, Martínez, Almagro, Ruiz & Ortiz, 2008; Lal, 2005 y Rondón, Amézquita, Díaz, Paz & Chávez, 2002) que indican que los contenidos más elevados de COS se encuentran en los primeros 20 cm del suelo.

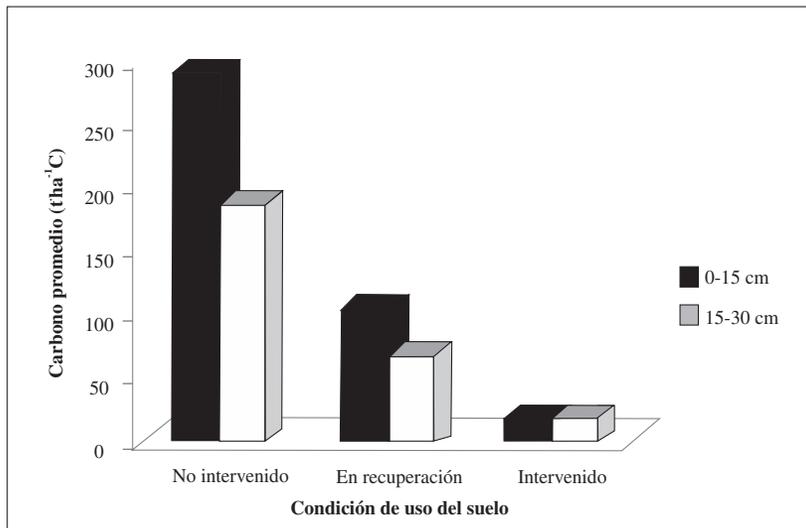


Figura 3.31 COS almacenado bajo diferentes condiciones de uso del suelo y a dos profundidades muestreadas.

Rondón et ál. (2002) mencionan que los contenidos de COS son muy altos en las capas superficiales del suelo (20% -30%) y van decreciendo progresivamente hasta 3-5% a 1 m de profundidad. Según estos autores, este es un comportamiento característico

de los suelos de tipo histosólico –que para el presente estudio se encuentran en la condición de uso que se denomina como *no intervenido*– y son indicadores de prevalencia de características anaeróbicas. Los suelos bajo páramo evidencian tenores menores de carbono superficial respecto al bosque, probablemente como consecuencia de los procesos repetitivos de quema tanto natural como inducida a que son sometidas estas áreas.

Respecto a los valores correspondientes a la PPM 2 en estado de *recuperación*, vegetación herbácea muy rala sobre afloramientos rocosos (Pe), se puede apreciar diferencia marcada de contenidos en las dos profundidades estudiadas, igualmente los valores más elevados ($104.75 \text{ t ha}^{-1} \text{ C}$), corresponden a la profundidad de 0 a 15 cm.

La PPM 3 ubicada en la zona *intervenida*, cultivos transitorios (Cu), presenta los valores más bajos de COS, un total de $32.22 \text{ t ha}^{-1} \text{ C}$. En esta zona, al contrario de lo que ocurre en las parcelas 1 y 2, los contenidos más altos de COS almacenados se encuentran en la profundidad de 15 a 30 cm. Esto se debe principalmente al establecimiento de prácticas agrícolas, como la mecanización, de esta manera las reservas de COS presentes en los primeros centímetros salen a la atmósfera y reaccionan con el oxígeno (O_2) formando CO_2 .

Este comportamiento del COS bajo cultivos concuerda con estudios realizados por Rondón et ál. (2002) y Lal (1995), que indican que las capas superficiales de estos suelos presentan significativamente menores tenores de COS, lo cual es consistente con los efectos esperados al aumentar la tasa de mineralización de la materia orgánica del suelo debido a las labores de labranza y preparación del suelo para el establecimiento y manejo del cultivo. De igual forma que en el presente estudio, el suelo bajo cultivos mostró una acumulación mayor de carbono a las capas más profundas, donde se registran incrementos respecto a los valores para suelos no intervenidos.

De esta manera, se corrobora la importancia de la conservación de un ecosistema tan importante como lo es el páramo, pues al darle un uso adecuado y equilibrado al ecosistema, especialmente al suelo, se contribuye con la disminución de uno de los principales GEI, el CO_2 .

La ρ_b de estos suelos es en general baja para las tres condiciones de uso, con valores especialmente bajos en la superficie de áreas bajo vegetación nativa (15 a 30 cm). Se observa que en las profundidades de 0 a 15 cm de las zonas *no intervenido* y *en recuperación*, la ρ_b presenta valores más elevados respecto a los de la profundidad de 15 a 30 cm (Figura 3.32). Este factor puede estar relacionado con el hecho de haberse realizado pisoteo, compactando el suelo e influyendo en los resultados de ρ_b .

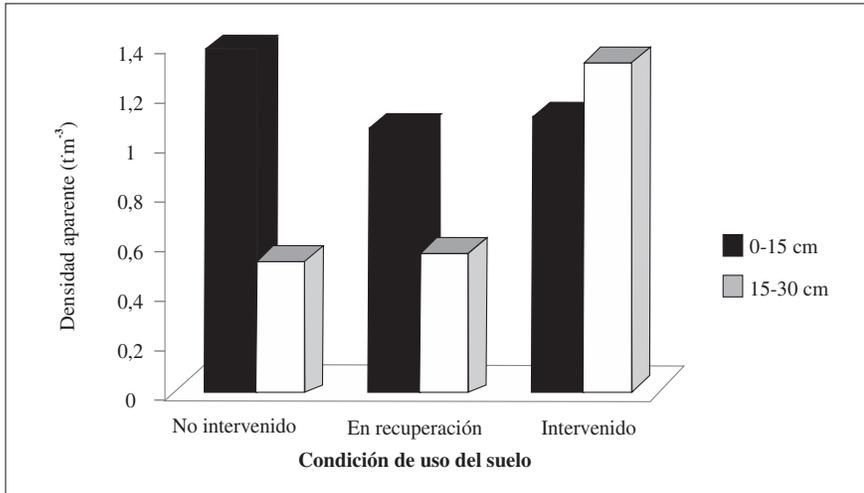
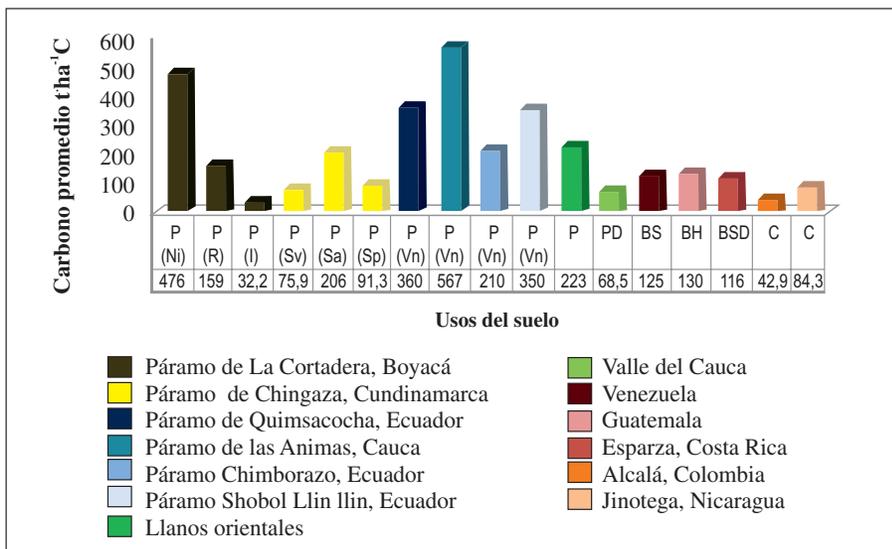


Figura 3.32 Densidad aparente (ρ_b) bajo diferentes condiciones de uso del suelo y a dos profundidades muestreadas.

Los suelos intervenidos (cultivos y ganadería) muestran claras señales de compactación en las capas superficiales atribuibles al uso de labranza, con frecuencia mecanizada y al pisoteo del ganado. Según Rondón et ál. (2002) la compactación produce aumentos en la ρ_b , lo cual puede distorsionar los cálculos de las reservas de COS. No existen aún alternativas satisfactorias para corregir este problema metodológico.

Teniendo en cuenta el tipo de suelo a escala 1:25.000 (ocho observaciones en 100 ha), en el que se establecieron las tres PPM, se pudo comprobar que los mayores contenidos de COS se ubican en suelos denominados como **Typic Ustifolists**, área no intervenida, que hace relación a la vegetación de páramo (Vp), con predominio de especies como *Espeletia corymbosa*, *Espeletia argentea*, *Espeletia muisca*, *Rumexacetosella* y *Lachemilla orbiculata*. Estos suelos presentan en los dos primeros horizontes contenidos de materia orgánica de 17.8% y 18.3% respectivamente, comprobado con datos de COS que muestran valores de 475.88 t ha⁻¹C para esta área.

En la Figura 3.33 se observan las reservas del COS presentes bajo diferentes usos del suelo. Como se puede apreciar, los valores más altos se ubican en ecosistemas de páramo con vegetación nativa, páramo de Las Ánimas con 567 t ha⁻¹C; para el páramo de La Cortadera, vegetación de páramo (Vp), los valores de COS se encuentran bien ubicados (476 t ha⁻¹C), respecto a los diferentes resultados encontrados en páramos y en general en todos los usos del suelo estudiados; los valores más bajos de COS los presentan suelos donde se han establecido cultivos (ej. papa y café) y pasturas degradadas.



Fuente. construido con base en Arreaga (2002); Borja, Iñíguez & Crespo (2006); Carvajal, Feijoo, Quintero & Rondón (2009); Cunalata, Inga, Álvarez, Recalde & Echeverría (2011); Delaney et ál. (1997); Fisher et ál. (1994); Medina (2006); Muhammad et ál. (2007); Rondón et ál. (2002).

Figura 3.33. Almacenamiento de COS bajo diferentes usos del suelo. **P (Ni)** Páramo no intervenido, **P (R)** Páramo en recuperación, **P (I)** Páramo intervenido, **P (Sv)** Páramo suelos volcánicos, **P (Sa)** Páramo suelos arenosos, **P (Sp)** Páramo suelos pantanosos, **P (Vn)** Páramo vegetación nativa, **P Pastura**, **PD Pastura degradada**, **BS Bosque seco**, **BH Bosque húmedo**, **BSD Bosque secundario**, **C Cafetales**.

Con base en los resultados obtenidos y su relación con datos preexistentes de COS en diferentes ecosistemas, se resalta la importancia del adecuado uso y manejo de los suelos del páramo de La Cortadera. Por tanto resulta imprescindible establecer un manejo que procure la conservación de dicho ecosistema, para que, de esta manera, pueda seguir siendo una importante reserva de COS y así contribuir con la disminución de GEI (CO₂) y, por ende, con la mitigación del tan nombrado cambio climático.

4.4 PAGO POR SERVICIOS AMBIENTALES –PSA– COMO INSTRUMENTO PARA LA CONSERVACIÓN DEL PÁRAMO

El páramo es un ecosistema donde elementos como la vegetación, el suelo y subsuelo, han desarrollado un gran potencial para prestar servicios ambientales relacionados con interceptar, almacenar y regular el agua (MAVDT, 2008). Como se mencionó, existen diferentes estudios que demuestran la capacidad del páramo como sumidero de carbono, especialmente el relacionado con el componente edáfico. Con

base en los resultados obtenidos sobre la capacidad de almacenamiento de COS, se determina que las reservas de COS están directamente relacionadas con el cambio en el uso del suelo, ya que estas presentan valores menores en áreas intervenidas, principalmente por el establecimiento de actividades agropecuarias, en comparación con zonas donde se conserva el paisaje propio del páramo y se ubican los valores más altos de carbono orgánico.

Bajo estos supuestos es de gran importancia adelantar prácticas que procuren la conservación del páramo. Como contrapartida a estos aspectos, surgen los esquemas de pago por servicios ambientales (PSA), que se constituyen como instrumentos económicos, a través de los cuales se reconocen las externalidades positivas por la conservación y manejo sostenible de los recursos naturales, y permiten que se encuentren oferentes y demandantes de los servicios ambientales, con un resultado favorable para los objetivos de conservación (MAVDT, 2008).

Según Wunder (2006), se destacan cuatro tipos de PSA:

1. *Secuestro y almacenamiento de carbono*: por ejemplo, una empresa eléctrica del hemisferio norte paga a campesinos del trópico por plantar y mantener árboles.
2. *Protección de la biodiversidad*: por ejemplo, donantes que pagan a los pobladores locales por proteger y restaurar áreas para crear un corredor biológico.
3. *Protección de cuencas hidrográficas*: por ejemplo, los usuarios aguas abajo pagan a los dueños de fincas aguas arriba por adoptar usos de la tierra que limiten la deforestación, la erosión del suelo, riesgos de inundación, entre otros.
4. *Belleza escénica*: por ejemplo, una empresa de turismo paga a una comunidad local por no cazar en un bosque usado para turismo de observación de la vida silvestre.

Como documentan Pagiola et ál. (2004), la mayoría de los esquemas de PSA son recientes o han estado en funcionamiento por pocos años. Por ello son pocos los estudios empíricos que documentan prácticas idóneas o lecciones aprendidas.

Sin embargo, en el país, el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, MAVDT (2008), fija la estrategia para el pago por servicios ambientales, que busca establecer las condiciones institucionales, financieras, técnicas, legales y administrativas que permitan la orientación, viabilidad y ejecución eficiente y generalizada de esquemas de pago por servicios ambientales a nivel nacional, regional y local.

La estrategia propone que el pago por servicios ambientales se realice a través de proyectos regionales o locales, desarrollados entre particulares en forma voluntaria o también fomentados por las autoridades ambientales y con la concurrencia de recursos públicos y privados.

Estos proyectos consisten en el conjunto de actividades orientadas a posibilitar el pago por servicios ambientales en una cuenca, región o ecosistema específico, los cuales deben ser ambiental y económicamente factibles, para lo cual se requiere que el esquema de PSA se aplique en ecosistemas privilegiados de acuerdo con los diferentes instrumentos de planificación de las autoridades ambientales nacionales, regionales o locales, y que existan las condiciones económicas favorables para que se dé la disponibilidad a recibir de los proveedores de los servicios ambientales, y la disponibilidad a pagar de los beneficiarios del mismo.

Con el fin de privilegiar la implementación de esquemas de PSA relacionados con los páramos es claro que en el ámbito nacional, todos estos ecosistemas son prioritarios, y que regionalmente podrá preferirse la intervención sobre los mismos, utilizando los instrumentos de planificación ambiental brindándoles la protección especial que merecen.

Los páramos parecen estar bien ubicados al momento de implementar esquemas de PSA. Los tipos de PSA que podrían llegarse a desarrollar de acuerdo con los servicios ambientales que dicho ecosistema brinda son: protección de cuencas, conservación de la biodiversidad, belleza escénica y secuestro de carbono.

Para el caso de la implementación de PSA por secuestro de carbono, actualmente no se cuenta con inventarios sistemáticos ni modelos que describan las reservas de COS, y su dinámica en respuesta a los cambios en el uso del suelo. Dada la gran cantidad de carbono orgánico en los suelos de páramo, este ecosistema parece estar bien ubicado para participar en los futuros escenarios de comercialización de carbono, lo cual podría convertirse en una de las pocas opciones de uso sustentable para el páramo (Sevink, 2009). Sin embargo, hasta el momento, el Protocolo de Kyōto ha reconocido a las plantaciones forestales como los únicos sumideros de carbono que entrarían en el mercado de reducción de emisiones (García, 2003).

En el país se contempla la posibilidad de desarrollar esquemas de PSA enfocados a la conservación del ecosistema, principalmente esquemas relacionados con protección de cuencas y conservación de biodiversidad. Desde un enfoque ecosistémico, en la medida que se conserve el espacio geográfico de la cuenca en el páramo, se logra establecer un equilibrio de los servicios ambientales mediante la recuperación de la vegetación en áreas intervenidas, que de manera directa incidirán en una mayor capacidad de almacenamiento de carbono bajo espacios de restauración.

5. CONCLUSIONES

Mediante los mapas de carbono orgánico obtenidos para profundidades de 0 a 15 cm y de 15 a 30 cm, se evidencia la disminución de este parámetro en suelos que han sido intervenidos ya sea por cultivos o pasturas, además de los cambios en la temperatura de la superficie (Capítulo I). Por lo cual se resalta que esta intervención influye en las condiciones edafoclimáticas de la región y se hace necesario la generación de planes de control del uso del suelo en zonas del páramo de La Cortadera.

Se establecieron tres PPM bajo diferentes condiciones de uso del suelo, en un área piloto de 500 ha del páramo de La Cortadera. Los valores más altos de $\text{t ha}^{-1}\text{C}$ se encuentran en las condiciones de uso no intervenido y en recuperación. Se evidencia la disminución de las reservas de COS en suelos que han sido intervenidos. Por lo cual se resalta que esta intervención influye directamente en la capacidad de captura de carbono por parte del suelo y por ende en la disminución de emisiones de GEI especialmente CO_2 , limitando de esta manera la posibilidad de que el páramo aparezca como un escenario de mitigación ante el efecto del cambio climático

Los suelos de páramo representan depósitos muy importantes de COS. Se puede decir que cada unidad de área en el páramo de La Cortadera en estado de conservación, contiene aproximadamente dos veces más toneladas de COS que un área equivalente a pasturas en los Llanos Orientales. Existen grandes dificultades metodológicas aún por resolver a la hora de obtener estimativos confiables de los almacenamientos reales de carbono en suelos de páramo, ya que las metodologías para estudiar las reservas de COS son muy versátiles, lo que dificulta comparar resultados de captura de COS e integrar bases de datos confiables.

Los resultados obtenidos en la comparación de datos de índices de vegetación NDVI y EVI con la información recopilada de carbono orgánico, muestran una similitud visual en los mapas, pero al realizar un análisis se obtiene que la correlación múltiple entre los datos de índices de vegetación y el contenido de carbono orgánico son inversas con valores de: -0.256 para el NDVI y de -0.197 para el EVI, valores demasiado bajos. En este aspecto se debe evaluar alguna transformación de la información espectral, que permita obtener un modelo acertado que relacione los datos espectrales con los del contenido de CO.

Según los análisis espaciotemporales realizados, se aprecia que el remplazo de coberturas nativas por pasturas o cultivos aumenta el porcentaje de radiación reflejada respecto a la radiación que incide sobre la misma, apreciable en la comparación de los datos de las series temporales de las bandas espectrales para las coberturas de estudio. En el caso del área no intervenida y el área en recuperación, se aprecia una disminución en la reflectancia de las bandas azul, rojo, infrarrojo cercano e infrarrojo

medio, lo cual se evidencia en una disminución de la temperatura y es importante a la hora de determinar patrones de comportamiento en regiones del páramo de La Cortadera que están siendo intervenidas.

La información que se aborda en los diferentes capítulos contribuirá, desde lo técnico, con la posible implementación de esquemas de PSA en el páramo de La Cortadera, teniendo presente la ubicación de dicho páramo en la zona central de Boyacá, especialmente por su importancia como regulador hídrico para una importante zona agrícola del departamento. De esta manera se concluye que al conservar la cuenca, entre otras, se conservan y restauran las coberturas vegetales, aumentando la posibilidad de capturar carbono orgánico principalmente por parte de los suelos.

REFERENCIAS

- Albaladejo J., Martínez, M., Almagro, M., Ruiz, A. & Ortiz, R. (2008). *Factores de control en la dinámica del carbono orgánico de los suelos de la región de Murcia. Topic 2: Soil Erosion and Desertification*. Retrieved from <http://congresos.um.es/icod/icod2009/paper/viewFile/4271/4111>;
- Asher, S. (2001). *Encyclopedia of Biodiversity*. Volume 1. USA: Academic Press.
- Arreaga, W. (2002). *Almacenamiento de carbono en bosques con manejo forestal sostenible en la reserva de biosfera maya, Petén, Guatemala*. Tesis Mag. Sc. Turrialba, CR, CATIE. 73 p. Recuperado de <http://orton.catie.ac.cr/repdoc/A0249E/A0249E.PDF>;
- Avellaneda, A. (2002). Alteración del páramo de Chontales en Boyacá por ganadería y aplicación de plaguicidas en papa. En *Memorias Congreso Mundial de Páramos*. Tomo I (pp. 812-818). Recuperado de: http://bibdigital.rjb.csic.es/PDF/Fernandez_Paramos_Colombia_2002.pdf
- Borja, R., Iñíguez, V. & Crespo, P. (2006). Cuantificación del contenido de materia orgánica: suelos del páramo del austro del Ecuador. En *Memorias Taller Regional de Cuantificación y Estimación de los Stocks de Carbono en Ecosistemas de Alta Montaña*. Lima, Perú.
- Cammeraat, E. & Bouten, W. (2009). Modelización del secuestro de carbono en ecosistemas de páramo: Enfoque e impactos del uso del suelo. En *Memorias Taller regional de Cuantificación y Estimación de los Stocks de Carbono en Ecosistemas de Alta Montaña*. Lima, Perú.
- Campbell, G.S. (1986). Extinction coefficients for radiation in plant canopies calculated using an ellipsoidal inclination angle distribution. *Agric. For. Meteorol.*, 36, 317-32. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0168192386900109>;

- Carter, G. & Knapp, A. (2001). Leaf optical properties in higher plants: linking spectral characteristics to stress and chlorophyll concentration. *American Journal of Botany*, 88(4), 677-684. Retrieved from <http://www.amjbot.org/content/88/4/677.full>;
- Carvajal, F., Feijoo, A., Quintero, H. & Rondón, M. (2009). Carbono orgánico del suelo en diferentes usos del terreno de paisajes andinos Colombianos. *Revista de la Ciencia del Suelo y Nutrición Vegetal*, 9(3), 222-235. Recuperado de <http://www.scielo.cl/pdf/rcsuelo/v9n3/art05.pdf>;
- Cortés, A. (1994). *Los suelos de páramo: reguladores del recurso hídrico en Boyacá*. Bogotá, Colombia: Universidad Jorge Tadeo Lozano, Dirección del Centro de Investigaciones Científicas.
- Cunalata, C., Inga, C., Álvarez, G., Recalde, C. & Echeverría, M. (2011). *Determinación de carbono orgánico total presente en el suelo y biomasa de los páramos de las comunidades de Chimborazo y Shobol Llin llin en Ecuador*. Riobamba, Ecuador: Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. 9 p.
- Delaney, M., Brown, S., Lugo, E., Torres-Lezama, A. & Bello, N. (1997). The distribution of organic carbon in major components of forest located in five zones of Venezuela. *Journal of Tropical Ecology*, 13, 697-708. Retrieved from <http://journals.cambridge.org/action/displayAbstract?fromPage=online&aid=5255496>;
- Delgadillo, R. & Montalvo, S. (2006). *Manual de monitoreo de carbono en sistemas agroforestales*. San Cristóbal de las Casas, Chiapas, México: AMBIO. 35 p.
- Fisher, M., Rao, M., Ayarza, A., Lascano, E., Sanz, J., Thomas, R. & Vera, R. (1994). Carbon storage by introduced deeprooted grasses in the South American savannas. *Nature*, 371, 236-238.
- García, J. (2003). *Análisis del potencial de emisión de dióxido de carbono del páramo de Chingaza y lineamientos para su conservación en el contexto del mecanismo de desarrollo limpio*. Tesis de grado para optar al título de ecólogo. Universidad Javeriana, Bogotá. 110 p.
- Hoffer, A. (1978). Biological and physical considerations in applying computer-aided analysis techniques to remote sensor data. In P.H. Swain & S. M. Davis (eds). *Remote Sensing: The Quantitative Approach. Chapter 5* (pp. 227-289). New York: Mc Graw Hill.
- Hofstede, R. (1999). El páramo como espacio para la fijación de carbono atmosférico. En G. Medina & P. Mena (Eds). *El páramo como espacio de mitigación de carbono atmosférico. Serie Páramo 1*. Quito, Ecuador: GTP/AbyaYala.

- Hofstede, R. (2002). Los páramos andinos; su diversidad, sus habitantes, sus problemas y sus perspectivas. Un breve diagnóstico regional del estado de conservación de los páramos. En *Memorias Congreso Mundial de Páramos*. Tomo II. (pp. 82-204). Quito.
- Hofstede, R. (2002). Los páramos Andinos; su diversidad, sus habitantes, sus problemas y sus perspectivas. Un breve diagnóstico regional del estado de conservación de los páramos. In *Congreso Mundial de Páramos* (Vol. 2).
- Huete, K., Didan, T., Miura, E., Rodriguez, P., Gao, X. & Ferreira, L.G. (2002) Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, 83(1), 195-213. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425702000962>;
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi IGAC. (2005). *Estudio general de suelos y zonificación de tierras del departamento de Boyacá*. Bogotá D.C.: Departamento Administrativo Nacional de Estadística, Instituto Geográfico Agustín Codazzi, Subdirección de Agrología. Tomo I. 256 p, Tomo II. 156 p.
- IPCC Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (1996). *Directrices del IPCC para los inventarios de los gases de efecto invernadero, versión revisada en 1996: Libro de trabajo. Módulo 5. Cambio de uso de la tierra y silvicultura*. Recuperado de <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gl/pdffiles/spnch5-1>.
- IPCC Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (2001). Tercer informe de evaluación cambio climático 2001: impactos, adaptación y vulnerabilidad. En J.J. McCarthy, O.F. Canziani, N.A. Leary, D.J. Dokken & K.S. White (Eds.) *Resumen para responsables de políticas y resumen técnico. Parte de la contribución del Grupo de trabajo II al Tercer Informe de Evaluación Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*. Ginebra, CH. Cambridge: Cambridge University Press. 1000 p.
- IPCC Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (2006). Capítulo 3: Representación coherente de las tierras. Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero. En *Agricultura, silvicultura y otros usos de la tierra*. Volumen 4. Recuperado de http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/spanish/pdf/4_Volume4/V4_03_Ch3_Representation.pdf;
- Lupo, F., Linderman, M., Vanacker, V., Bartholomé, E., Lambin, F. (2005). Categorization of land-cover change processes based on phenological indicators extracted from time series of vegetation. *International Journal of Remote Sensing*. 28(11), 2469-2483.

- Lal, R. (1995). The role of residues management in sustainable agricultural systems. *J. Sustainable Agriculture*. 5(4), 51-78. Retrieved from http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1300/J064v05n04_06#.U06xN_15Odc; consulta: mayo de 2012.
- Mac Dicken, K. (1997). *A guide to monitoring carbon storage in forestry and agroforestry projects*. Winrock International Institute for Agricultural Development. 87 p. Retrieved from <http://www.winrock.org/fnrm/files/carbon.pdf>;
- Maki, M., Ishiara, M. & Tamura, M. (2004). Estimation of leaf water status to monitor the risk of forest fires by using remotely sensed data. *Remote Sensing of environment*. 90(4), 441-450. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pdf>;
- Martínez, E., Fuentes, P. & Acevedo, E. (2008). Carbono orgánico y propiedades del suelo. *Revista de la Ciencia del Suelo y Nutrición Vegetal*, 8(1), 68-96. Recuperado de <http://www.scielo.cl/pdf/rcsuelo/v8n1/art06.pdf>;
- Medina, C. (2006). *Cuantificación del carbono almacenado en suelo de café (Coffea arabica L.) con sombra en la hacienda Santa Maura, Jinotega, Nicaragua*. 26 p. Recuperado de http://lcalera2.una.edu.ni/download_pdf/Calera_Inv-CAL58_Num-_Ano-8.pdf
- Ministerio del Ambiente de Perú. (2009). *Identificación de metodologías existentes para determinar stock de carbono en ecosistemas forestales. Segunda Comunicación Nacional del Perú a la CMNUCC*. Perú: Ministerio del Ambiente. 99 p.
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial MAVDT (2008). *Estrategia nacional de pago por servicios ambientales*. Bogotá: Viceministerio de Ambiente, Grupo de Análisis Económico. 97 p.
- Muhammad, I., Chacón, M., Cuartas, C., Naranjo, J., Ponce, G., Vega, P., Casasola, F. & Rojas, J. (2007). Almacenamiento de carbono en el suelo y la biomasa arbórea en sistemas de usos de la tierra en paisajes ganaderos de Colombia, Costa rica y Nicaragua. Avances de investigación. *Agroforestería en las Américas*, 45.
- NASA National Aeronautics and Space Administration. (2002). *Land Cover Land Use Change (LULCC) Program*, [NASA LCLUC webpage], University of Maryland, College Park. Retrieved from <http://lcluc.umd.edu/>;
- Ormeño, S. (2006). *Teledetección fundamental*. (3a ed.). Madrid: Escuela Técnica Superior de Ingenieros en Topografía, Geodesia y Cartografía, Departamento de Ingeniería Topográfica y Cartografía, Universidad Politécnica. 344p.

- Pagiola, S., Agostini, P., Gobbi, J., De Haan, C., Ibrahim, M., Murgueitio, E., Ramírez, E., Rosales, M. & Ruíz, P.R. (2004). *Paying for biodiversity conservation services in agricultural landscapes*. World Bank. Forthcoming as Environment Department. Paper No. 96. Washington, D.C. 27 p. En: <ftp://ftp.fao.org/docrep/nonfao/lead/x6154e/x6154e00.pdf>;
- Pinilla, C. (1995). *Elementos de teledetección*. Madrid: Rama. 313 p.
- Rangel, O. (2000). *La biodiversidad de Colombia*. Bogotá D.C.: Facultad de Ciencias Humanas, Universidad Nacional de Colombia. Recuperado de <file:///D:/UserReedso/Downloads/3-8083-PB.pdf>;
- Rock, B., Veogelman, D., Williams, D., Vogelman, A. & Hoshizaki, T. (1986). Remote Detection of forest damage. *Bioscience*. 36(7), 439-445. Retrieved from <http://www.jstor.org/discover/10.2307/1310339?uid=3737808&uid=2&uid=4&sid=21103845938067>;
- Rondón, M. (2000). Los páramos andinos frente al calentamiento global. Historia de una sed anunciada. *Revista Investigación y Ciencia, Asociación Colombiana para el Avance de la Ciencia, ACAC*, 9, 46-53.
- Rondón, M., Amézquita, E., Díaz, E., Paz, L. & Chávez, J. (2002). Efecto de cambios en el uso del suelo sobre los almacenamientos de carbono y flujos de gases de efecto invernadero en áreas del páramo de Las Ánimas, Cauca, Colombia. En CIAT, Universidad del Cauca, CRC. *Memorias Congreso Mundial de Páramos. Estrategias para la conservación y sostenibilidad de sus bienes y servicios ambientales*. Paipa, Colombia, mayo 13-18 de 2002. pp. 106-107.
- Rouse, J. W., Haas, H., Shell, J., Deering, D. & Harlan, J. (1974). *Monitoring the vernal advancement of retrogradation of natural vegetation*. Type III Final Report, Greenbelt, Md: NASA/GSFC. 371 pp.
- Rügnitz, M., Chacón, M. & Porro, R. (2009). *Guía para la determinación de carbono en pequeñas propiedades rurales*. (1ª ed). Lima, Perú: Centro Mundial Agroforestal ICRAF, Consorcio Iniciativa Amazónica IA. 79 p.
- Salgado, I. (2005). *Comportamiento espacio-temporal (1986-2003) de plantaciones frutales en laderas de la provincia de Quillota mediante imágenaría satelital y SIG*. Trabajo de grado para optar el título de ingeniero agrónomo. Pontificia Universidad Católica de Valparaíso. Quillota. 98 p. Recuperado de <http://www.avocadosource.com/papers/ChilePapersA-Z/S-TU/SalgadoIgnacio2005.pdf>.
- Sevink, J. (2009). Los páramos y sus reservas de carbono. En *Memorias Taller regional de cuantificación y estimación de los stocks de carbono en ecosistemas de alta montaña*. Lima, Perú. Recuperado de <http://www>.

condesan.org/ppa/sites/default/files/recursos/archivos/carbono_paramos-taller-SGCAN.pdf

- Silva, J. (1984). *Inventario florestal continuo em florestas tropicais: a metodologia utilizada pela EMBRAPA-CPATU na Amazonia brasileira*. Belém, PA: EMBRAPA.
- Slaton, M., Hunt, R. & Smith, W. (2001). Estimating near infrared leaf reflectance from leaf structural characteristics. *American Journal of Botany*, 88(2), 278-284. Retrieved from <http://www.jstor.org/discover/10.2307/2657019?uid=3737808&uid=2&uid=4&sid=21103845741907>;
- Tian, Q., Tong, Q., Pu, R., Guo, X. & Zhao, C. (2001). Spectroscopic determination of wheat water status using 1650-1850 nm spectral absorption features. *International Journal of Remote Sensing*. 22(12), 2329-2338. Retrieved from http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/01431160118199#U0hCo_15Odc;
- USDA Departamento de Agricultura de los Estados Unidos. (2010). *Servicio de conservación de recursos naturales. Claves para la taxonomía de suelos* (11 ed.) EUA: USDA. 365 p.
- Ustin, S., Roberts, D. Gamon, J. Asner, G. & Green, R. (2004). Using imaging spectroscopy to study ecosystem processes and properties. *BioScience*. 54(6), 523-534. Retrieved from <http://bioscience.oxfordjournals.org/content/54/6/523.full.pdf>;
- Wunder, S. (2006). *Pagos por servicios ambientales: principios básicos esenciales*. Centro Internacional de Investigación Forestal. CIFOR Occasional Paper No. 42(s). 32p. Recuperado de http://www.cifor.org/publications/pdf_files/OccPapers/OP-42S.pdf.
- Zarco-Tejada, P.J., J.R. Miller, Morales, A., Berjón, A. & Agüera, J. (2004). Hyperspectral indices and model simulation for chlorophyll estimation in open-canopy tree crops. *Remote Sensing of Environment*, 90, 463-476. Doi: 10.1016/j.rse.2004.01.017

A n e x o s

Anexo A

Principales especies vegetales. Páramo de La Cortadera



(Cora Pavonia)



(Cladoniafurcata)



(Sphagnum sp.)



(Sticta sp.)



(Dryopteris sp.)



(Lycopodium complanatum)



(Eryngium humboldtii)



(Clethra fimbriata)



(Jamesonia sp.)



(Hupersia sp.)



(Puya goudotiana)



(Espeletia grandiflora)



(Espeletia tunjana)



(Espeletia muisca)



(Befaria resinosa)



(Gnaphalium bogotensis)



(Oncidium piramidales)



(Carex bonplandii)



(Paepalanthuscolumbiensis)



(Lupinuspubescens)



(Gaultheriaanastromosans)

Este libro se terminó de imprimir en octubre de 2015,
en el Grupo Imprenta y Publicaciones de
la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia,
con una edición de 200 ejemplares.
Tunja - Boyacá - Colombia

