

Dinámica del páramo como espacio para la captura de carbono

Dinámica del páramo como espacio para la captura de carbono

**Fabio Emilio Forero Ulloa
Germán Eduardo Cely Reyes
Laura Sofía Palacios Pacheco**



Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia
Tunja
2015

Dinámica del páramo como espacio para la captura de carbono / Forero Ulloa, Fabio Emilio ; Cely Reyes, Germán Eduardo ; Palacios Pacheco, Laura Sofía. Colección Investigación UPTC N.º 58. Tunja: Editorial UPTC, 2015. 144 p.

ISBN 978-958-660-216-7

1. Páramo. 2. Captura carbono. 3. Suelo.

(Dewey 631.4/21).

Primera edición: 2015

200 ejemplares (papel)

Dinámica del páramo como espacio para la captura de carbono

ISBN 978-958-660-216-7

© Fabio Emilio Forero Ulloa, 2015

© Germán Eduardo Cely Reyes, 2015

© Laura Sofía Palacios Pacheco, 2015

© Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, 2015

Resultado del proyecto de investigación UPTC-CORPOBOYACÁ “Determinación del efecto del cambio climático en áreas vulnerables de ecosistemas de alta montaña y establecimiento de la línea base sobre el potencial de secuestro de carbono asociado al componente edáfico, páramo de La Cortadera, Boyacá”.

Gustavo Orlando Álvarez Álvarez, Rector UPTC

Comité Editorial

Celso Antonio Vargas Gómez, Mg.

Hugo Alfonso Rojas Sarmiento, Ph.D.

Fred Manrique Abril, Ph.D.

Liliana Fernández Samacá, Ph.D.

Luz Eliana Márquez, Mg.

Fanor Casierra Posada, Ph.D.

Jovanny Arles Gómez Castaño, Ph.D.

Rigaud Sanabria Marín, Ph.D.

Pablo Enrique Pedraza Torres, Ph.D.

Editora en jefe: Bertha Ramos Holguín

Coordinadora editorial: Ayda Blanco Estupiñán

Corrección de Estilo: Claudia Amarillo Forero

Libro financiado por la Dirección de Investigaciones de la UPTC.

Se permite la reproducción parcial o total con la autorización expresa de los titulares del derecho de autor.

Este libro es registrado en Depósito Legal, según lo establecido en la Ley 44 de 1993, el Decreto 460 del 16 de marzo de 1995, el Decreto 2150 de 1995 y el Decreto 358 de 2000.

Citación: Forero, F., Cely, G. y Palacios, S. (2015). *Dinámica del páramo como espacio para la captura de carbono*. Tunja: Editorial UPTC.

Editorial UPTC

Edificio Administrativo – Piso 4

Avenida Central del Norte 39-115

comite.editorial@uptc.edu.co

www.uptc.edu.co

Impresión

Grupo Imprenta y Publicaciones

UPTC - Avenida Central del Norte

Tels.: (0*8) 740 5626 - Exts. 2366 - 2367 - Fax 2408

imprenta.publicaciones@uptc.edu.co

Reconocimiento

El Grupo Interinstitucional de Investigación en Suelos Sulfatados Ácidos Tropicales, GISSAT, y el Grupo de Investigación en Desarrollo y Producción Agraria Sostenible, GIPSO-UPTC, expresan sus agradecimientos por el invaluable apoyo:

A la Corporación Autónoma Regional de Boyacá, Corpoboyacá y a la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, UPTC, (Dirección de Investigaciones), por aportar los recursos financieros a través del convenio número 2012041 “Determinación del efecto del cambio climático en áreas vulnerables de ecosistemas de alta montaña y establecimiento de la línea base sobre el potencial de secuestro de carbono asociado al componente edáfico, páramo de La Cortadera, Boyacá”, cuyos resultados permitieron la elaboración de la presente publicación.

A las siguientes personas, que formaron parte del grupo de trabajo durante la ejecución del proyecto: Como investigadores principales: I.A.M. Sc. Fabio Emilio Forero Ulloa, I.A. M.Sc. Germán Eduardo Cely Reyes; como profesionales: I.A. Laura Sofía Palacios Pacheco, I.A. Fabián Leonardo Barragán Reyes. Al M.Sc. I.E Andrés Fernando Jiménez López, del Grupo de Investigación en Procesamiento de Señales DSP-UPTC, cuya participación fue definitiva en el desarrollo del proyecto. Al Esp. Manuel Galvis, de la Escuela de Ingeniería Ambiental de la UPTC, por contribuir con la caracterización de especies vegetales.

Al Laboratorio de Suelos y Aguas de la UPTC, por permitir realizar análisis físicos y químicos con calidad, especialmente a Ricardo Pacheco por su apreciada colaboración.

A los profesionales funcionarios de Corpoboyacá: I.A. Esp. Óscar Bernal, biólogo; M.Sc. (C) Omar Alexis Cely Reyes, Ing. Evangelista Márquez, por su cooperación y vinculación en el desarrollo del proyecto.

A la comunidad que forma parte del páramo de La Cortadera, por facilitar el tiempo y el espacio para llevar a cabo las actividades contempladas en el proyecto.

En fin, gracias a todos los que hicieron posible este valioso trabajo. Gracias Mapalina, por permitirnos caminar por uno de tus tantos hogares.

Tierra negra,
tierra generosa
que amamanta el agua.
Tierra sufrida, lastimada
que espera manos cálidas.
Tierra que florece, que ilumina,
tierra que convoca, tierra que reclama.
Tierra de mis páramos andinos. Tierra sagrada.

A las montañas andinas, territorios sagrados por los que corre vida,
energía y equilibrio
Sofía

A mis padres, por existir
A Ángela Rocío, por los momentos compartidos
Germán

A mis padres, por la vida
A Nicolás y Fabio Andrés, mis hijos y motores de mi vida
Fabio Emilio

Contenido

PRESENTACIÓN	13
INTRODUCCIÓN GENERAL	15
CAPÍTULO I	19
COMPORTAMIENTO DE PARÁMETROS CLIMÁTICOS A PARTIR DE DATOS REGIONALES	19
1. INTRODUCCIÓN	21
2. MARCO DE REFERENCIA	22
2.1 CAMBIO CLIMÁTICO Y PÁRAMOS	22
2.2 CAMBIO CLIMÁTICO Y USO DEL SUELO	23
2.3 CAMBIO CLIMÁTICO Y BIODIVERSIDAD	24
2.4 ANÁLISIS ESPACIOTEMPORAL DE DATOS DE SENSORES REMOTOS	24
2.5 ANÁLISIS ESPACIAL DE DATOS GEOGRÁFICOS	25
2.6 ANÁLISIS DE DATOS GEOGRÁFICOS	25
3. METODOLOGÍA	26
3.1 ANÁLISIS ESPACIAL DE LA INFORMACIÓN	27
3.1.1 Procesamiento de la información de precipitación	27
3.2 ANÁLISIS TEMPORAL DE LA INFORMACIÓN	28
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	29
4.1 ANÁLISIS ESPACIAL	29
4.2 ANÁLISIS TEMPORAL	34
4.2.1 Series temporales. Temperatura nocturna	34
4.2.2 Series temporales. Temperatura diurna	38
5. CONCLUSIONES	41
REFERENCIAS	41

CAPÍTULO II	45
EL PÁRAMO: REGULADOR HÍDRICO. APLICACIÓN DE MODELOS PARA ESTIMACIÓN DE CAUDALES	45
1. INTRODUCCIÓN	47
2. MARCO DE REFERENCIA	48
2.1 CICLO HIDROLÓGICO	49
2.2 HIDROLOGÍA EN EL PÁRAMO	50
2.2.1 Precipitación horizontal	51
2.3 HERRAMIENTA DE EVALUACIÓN DE SUELO Y AGUA – SWAT	52
3. METODOLOGÍA	53
3.1 IDENTIFICACIÓN Y RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN SECUNDARIA	53
3.2 ANÁLISIS Y PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN	54
3.3 CARACTERIZACIÓN DE LAS CUENCAS EN ESTUDIO	54
3.4 DETERMINACIÓN DE PERIODOS DE RETORNO Y CONSTRUCCIÓN DE CURVAS IDF	54
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	55
4.1 ÁREA DE LA CUENCA PRINCIPAL Y SUBCUENCAS PÁRAMO DE LA CORTADERA	55
4.2 ANÁLISIS MORFOMÉTRICO	56
4.2.1 Cuenca San Francisco	56
4.2.2 Cuenca río Toca	57
4.2.3 Cuenca quebrada Raiba	57
4.2.4 Cuenca quebrada La Colorada	58
4.2.5 Cuenca río Chorrera	58
4.3 DETERMINACIÓN DE CAUDALES MÍNIMOS Y MEDIOS	60
4.3.1 Valores de caudal	60
4.4 ANÁLISIS DE CAUDALES	61
4.4.1 Caudales río Cormechoque. Estación San Francisco	62
4.4.2 Caudales río Chorrera. Estación Chorrera	62
4.5 CÁLCULO DE LA PRECIPITACIÓN MEDIA POR EL MÉTODO DE POLÍGONOS DE THIESSEN	63
5. CONCLUSIONES	65
REFERENCIAS	66
CAPÍTULO III	69
CAPTURA DE CARBONO EN SUELOS DE PÁRAMO LÍNEA BASE A PARTIR DE ESCENARIOS DE INTERVENCIÓN	69

1.	INTRODUCCIÓN	71
2.	MARCO DE REFERENCIA	72
2.1	SUELOS DE PÁRAMO	72
2.1.1	Importancia de la materia orgánica	72
2.2	IMPACTOS DE CAMBIOS EN EL USO DEL SUELO SOBRE EL PÁRAMO	73
2.3	EL SUELO DE PÁRAMO COMO SUMIDERO DE CARBONO	73
2.4	SENSORES REMOTOS	74
2.4.1	Caracterización biofísica de coberturas vegetales mediante sensores remotos ...	74
2.4.2	Firma espectral	75
2.4.3	Respuesta vegetal a la radiación del espectro del visible	76
2.4.4	Respuesta vegetal a la radiación del espectro infrarrojo cercano	76
2.4.5	Respuesta vegetal a la radiación del espectro infrarrojo de onda corta	76
2.4.6	Índices espectrales	77
2.4.7	Respuesta espectral del suelo	78
3.	METODOLOGÍA	78
3.1	MUESTREO DE SUELOS	78
3.2	ANÁLISIS ESPACIAL	79
3.2.1	Procesamiento de información	79
3.3	ESTUDIO DE FACTORES BIÓTICOS	81
3.3.1	Caracterización de suelos	81
3.3.2	Caracterización vegetal	82
3.4	CUANTIFICACIÓN DE LAS RESERVAS DE CARBONO EN EL SUELO	82
3.4.1	Métodos de campo	83
3.4.2	Métodos de laboratorio	87
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	88
4.1	ANÁLISIS ESPACIAL	88
4.1.1	Procesamiento información de carbono orgánico	88
4.1.2	Procesamiento de información de sensores remotos	90
4.2	ESTUDIO DE FACTORES BIÓTICOS	94
4.2.1	Caracterización de suelos	94
4.2.2	Caracterización vegetal	113
4.3	CUANTIFICACIÓN DE LAS RESERVAS DE CARBONO EN EL SUELO ..	117
4.4	PAGO POR SERVICIOS AMBIENTALES –PSA– COMO INSTRUMENTO PARA LA CONSERVACIÓN DEL PÁRAMO	123
5.	CONCLUSIONES	126
	REFERENCIAS	129
	ANEXOS	135

Presentación

La Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia –UPTC–, a través de la Dirección de Investigaciones –DIN–, el Grupo Interinstitucional de Investigación en Suelos Sulfatados Ácidos Tropicales –GISSAT– y el Grupo de Investigación en Desarrollo y Producción Agraria Sostenible –GIPSO–, junto con la Corporación Autónoma Regional de Boyacá –Corpoboyacá–, a través del convenio de cooperación número 2012041 de 2012, decidieron desarrollar el proyecto denominado “Determinación del efecto del cambio climático en áreas vulnerables de ecosistemas de alta montaña y establecimiento de la línea base sobre el potencial de secuestro de carbono asociado al componente edáfico, páramo de La Cortadera, Boyacá”, código SGI 1064.

Metodológicamente, el proyecto contempló la realización del estudio de factores climáticos, la aplicación de modelos hidrológicos para estimación de caudales, la caracterización de suelos, la caracterización vegetal, la variabilidad de carbono orgánico bajo diferentes condiciones de uso del suelo y el establecimiento de la línea base sobre el potencial de captura de carbono en suelos de páramo, a través del montaje de parcelas permanentes de monitoreo.

Los procesos metodológicos validados en este estudio por los grupos de investigación GISSAT y GIPSO, pueden ser extrapolados en diferentes escenarios o condiciones ambientales de ecosistemas de páramo, teniendo en cuenta las coberturas existentes y los tipos de suelos descritos, para contribuir de esta manera, entre otros aspectos, a mejorar la toma de decisiones, especialmente de las autoridades ambientales, en asuntos relacionados con la formulación y actualización de los esquemas de ordenamiento territorial –EOT– y los planes de manejo y ordenación de cuencas –POMCA–.

El principal propósito de la presente publicación es generar conocimiento aplicable a ecosistemas de páramo, que permita la inclusión de diferentes entes, como el

académico, ambiental, político y la comunidad interesada en la conservación de este valioso ecosistema. Resulta imprescindible enfatizar en el entendimiento de los páramos como espacios vitales para la supervivencia de millones de personas que habitamos en ecosistemas andinos y somos dependientes de todos los servicios ambientales que ofrece el páramo, en especial el agua.

Introducción general

Los recursos naturales brindan a la sociedad gran cantidad de servicios que contribuyen a su desarrollo y bienestar; muchos de ellos, por lo general, son bienes comunes -presentan libre acceso para la explotación y competencia por el consumo-, es decir, que cualquier persona puede intervenirlos y alterar sus ciclos biogeoquímicos, bien sea por la sobreexplotación de los recursos o por el cambio en el uso del suelo. Dichas modificaciones generan degradación en los ecosistemas y, por ende, un desequilibrio que se ve reflejado en la disminución de la oferta de servicios ambientales.

El cambio climático inducido por las actividades humanas es un problema mundial que afecta de forma negativa los procesos ecológicos, económicos y sociales que rigen el planeta. El cambio climático es provocado principalmente por gases de efecto invernadero, como el metano, el óxido nitroso y el dióxido de carbono (CO₂), los cuales ocasionan el incremento de su concentración en la atmósfera.

Los contenidos de carbono atmosférico se han incrementado principalmente por dos actividades humanas: el cambio de uso del suelo y el uso de combustibles fósiles. De 1750 a 2011, las emisiones de CO₂ procedentes de la combustión de combustibles fósiles y la producción de cemento liberaron 375 gigatoneladas de carbono GtC (1 Gt = 1 x 10⁹ t), y se estima que la deforestación y otros cambios de uso del suelo han liberado 180 GtC. Esto genera unas emisiones antropógenas acumuladas de 555 GtC. De esas emisiones de CO₂ antropógenas acumuladas, se han concentrado 240 GtC en la atmósfera, 155 GtC han sido incorporadas al océano y 160 GtC se han depositado en ecosistemas terrestres naturales (esto es, el sumidero terrestre residual acumulado) (IPCC, 2013).

Dada la importancia de los ecosistemas en el desarrollo humano, y entendiendo el impacto que generan las actividades antrópicas sobre estos, se hace indispensable la conservación de aquellos ecosistemas que se consideran vulnerables. En Colombia, las zonas que se encuentran por encima de los 3000 msnm y que son definidas por Morales *et ál.*, (2007), como páramos, son consideradas uno de los ecosistemas que

más se han visto afectados por la insostenibilidad, pese al gran impacto que tiene en la vida de los seres humanos, principalmente por su función como regulador hídrico y fuente de agua para los millones de personas que viven en los flancos de la cordillera de los Andes (Sevink, 2009). Esta característica y su gran capacidad de almacenamiento y captura de carbono atmosférico a través de la retención de materia orgánica en los suelos y la absorción del mismo por parte de las masas boscosas en crecimiento, constituyen factores estratégicos que le dan gran importancia a dicho ecosistema (Hofstede, Segarra & Mena, 2003).

De esta manera, el páramo aparece como escenario de mitigación ante el efecto del cambio climático, especialmente mediante la reducción de gases efecto invernadero (GEI), CO₂; pues al existir mayores contenidos de carbono orgánico en el suelo por aporte de materiales orgánicos provenientes de la vegetación, existirá mayor acumulación de carbono en las capas inferiores del suelo, lo que permitirá el almacenamiento que se da gracias a las condiciones ambientales del páramo, especialmente a las bajas temperaturas.

A pesar de las importantes funciones ecosistémicas del páramo, con el tiempo ha sufrido drásticas transformaciones, ya sea por efecto de las actividades antrópicas o por el cambio climático global. En Colombia está vigente la Ley 99 de 1993, que reconoce el valor de los páramos, pero no menciona cómo se regula su uso y conservación. Los ejemplos más dicientes de transformación de los páramos ocurren en Boyacá, Santander y Norte de Santander (Molano, 1995).

El páramo de La Cortadera hace parte del distrito de páramos de Boyacá, complejo Tota-Bijagual-Mamapacha, tiene una extensión de 27.031,86 ha y para el sector del municipio de Toca, de acuerdo con Morales *et al.*, (2007), tiene un área de 5.423 ha. Se encuentra en jurisdicción de los municipios de Pesca, Toca, Tuta y Siachoque, y posee un rango altitudinal de 3.000-3.815 msnm. Gran parte de sus aguas son retenidas en la represa de La Copa, con el objeto de regular caudales y suministrar agua de riego en temporadas secas, especialmente para el Distrito de Riego del Alto Chicamocha y Firavitoba-Usochicamocha.

De acuerdo con Corpoboyacá y la Fundación Ecosistema Colombia (2008), uno de los páramos más afectados en Boyacá es el de La Cortadera, principalmente hacia el sector ubicado entre los municipios de Toca y Pesca. Allí, la cobertura vegetal se encuentra muy fragmentada y vastas áreas de páramo han sufrido drásticas alteraciones antrópicas, al ser remplazadas por pastizales, como consecuencia del cambio en el uso del suelo, especialmente por actividades agropecuarias mediante el establecimiento de cultivos de papa y avena y el continuo pastoreo, ya que, a diferencia de otros ecosistemas, en el páramo no es necesario remover la vegetación para el desarrollo de la ganadería.

Actualmente no existe información base sobre la variabilidad de carbono orgánico en el páramo de La Cortadera y su comportamiento con relación a la intervención antrópica asociada a cambios en el uso del suelo. Como los suelos contienen alrededor de tres veces más reservas de carbono orgánico que la biomasa vegetal y animal sobre el suelo, y el doble del carbono contenido en la atmósfera, la materia orgánica del suelo es potencialmente la más peligrosa fuente de CO₂ (Sentis, 1994).

El monitoreo del carbono orgánico del suelo (COS) es una estrategia para evaluar cambios temporales y espaciales asociados al cambio de uso del suelo y sus repercusiones en el almacenamiento de carbono. Desde esta perspectiva se establecieron tres parcelas permanentes de muestreo (PPM), con el fin de estimar el almacenamiento de carbono orgánico en el suelo bajo diferentes condiciones de uso: **no intervenido** (*vegetación de páramo (Vp)*), **en recuperación** (*vegetación herbácea muy rala sobre afloramientos rocosos (Pe)*) e **intervenido** (*cultivos transitorios (Cu)*). Estas tres condiciones de uso se integran con el estudio de la variabilidad climática y permiten identificar cambios en su tendencia a nivel local, además de establecer patrones de comportamiento de la red hídrica aportante del ecosistema.

Teniendo en cuenta la importancia del páramo como escenario de mitigación de GEI mediante la captura de carbono y sus indispensables servicios ecosistémicos, a continuación se presentan tres capítulos que servirán como base para el conocimiento del páramo desde esta perspectiva. Dichos capítulos buscan evaluar factores ambientales transversales que contribuyan al entendimiento de la dinámica integral del ecosistema de páramo como espacio de captura de carbono. Se dedicó especial interés a un área piloto de 500 ha ubicada en el municipio de Toca.

Capítulo I. Comportamiento de parámetros climáticos a partir de datos regionales. Se presenta un análisis espaciotemporal de las características climáticas que permiten determinar patrones de comportamiento. Posteriormente se estudian datos espaciotemporales de medidas de precipitación, adquiridos de estaciones climatológicas cercanas a la región. De acuerdo con estos análisis, se definen ciclos estacionales y se determinan fechas en las que existen cambios representativos del uso y la cobertura del suelo.

Capítulo II. El páramo: regulador hídrico. Aplicación de modelos para estimación de caudales. Con base en el modelo digital de elevación, se delimita la cuenca principal y las subcuencas que hacen parte del páramo. Luego, a partir de datos climáticos, se valida la aplicación del modelo SWAT. Finalmente se estiman caudales mínimos, medios y máximos y periodos de retorno para diferentes años.

Capítulo III. Captura de carbono en suelos de páramo. Línea base a partir de escenarios de intervención. 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. Dentro del análisis espacial de carbono orgánico se establece la línea base sobre el potencial de captura de carbono, mediante la ubicación de parcelas de muestreo en diferentes condiciones de uso del suelo. Finalmente, se relaciona la inclusión de esquemas de pago por servicios ambientales (PSA), como una posible estrategia para la conservación del páramo de La Cortadera.

Capítulo I

Comportamiento de parámetros climáticos a partir de datos regionales



1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años ha aumentado el interés por estimar variaciones en los procesos biogeoquímicos a gran escala, con relación a su variabilidad espacial y temporal, debido a la preocupación del efecto ocasionado por el hombre sobre el ciclo global de los recursos naturales”.

Hay que tener en cuenta que al existir diferentes coberturas en los suelos y distribuciones espaciales, se pueden alterar las condiciones climáticas locales y regionales. Es tal el efecto de las coberturas del suelo, que es un condicionante de la manera como la energía solar incide sobre ellas. Por ejemplo, el remplazo de árboles por pasturas o cultivos, aumenta el albedo, que consiste en el porcentaje de radiación que cualquier superficie refleja respecto a la radiación que incide sobre la misma, lo cual representa a escala local un aumento de la temperatura y disminución de la humedad, que, a su vez, ocasiona una modificación en la composición de especies que pueden regenerarse en el sitio, y afecta ciclos de disturbios, como el del fuego.

A escala regional se puede evidenciar que el remplazo de bosque o vegetación nativa por pastura tiene efectos similares, pues provoca un aumento regional de la temperatura y una disminución de la precipitación, y puede, igualmente, alterar los patrones de circulación atmosférica, al acentuar o atenuar las diferencias de temperatura, y por ende, presión entre regiones (Nosseto, Jobbágy & Paruelo, 2005). La influencia del tipo de vegetación tiene consecuencias evidentes también en las cuencas hidrográficas, por lo tanto, una planificación de los tipos de vegetación y el uso del suelo en la parte alta de las cuencas, especialmente desde los ecosistemas de páramo, es un factor determinante para los planes de manejo ambiental actuales.

Los ecosistemas y su distribución están determinados por el factor climático, y los sistemas presentes y futuros son reflejo de una interacción entre variables como suelo, clima y uso del suelo. El efecto del cambio climático, aunado a los efectos de la pérdida de hábitat y fragmentación de paisajes, posibilitará que se modifique la composición de la mayoría de los ecosistemas, cambiando los hábitats de muchas

especies. De esta forma se aumentará el régimen de pérdida de algunas especies y se crearán oportunidades para el establecimiento de otras (IPCC, 2002).

El aumento de la temperatura, que se espera para este siglo, reduciría fuertemente la superficie de la zona bioclimática del páramo y sus franjas de subpáramo y superpáramo, con consecuencias que pueden ser más graves en páramos ya fuertemente intervenidos, como es el caso del páramo de La Cortadera; ambos procesos afectarán tanto la biodiversidad como la oferta de agua (Van der Hammen, 2002).

En el presente capítulo se muestra un análisis espaciotemporal de las características climáticas que permiten determinar patrones de comportamiento en el páramo de La Cortadera. Se inicia con una descripción de series temporales de temperatura diurna y nocturna para los años 2005 a 2012; además, se estudian datos espaciotemporales de medidas de precipitación adquiridas por estaciones climatológicas cercanas a la región de estudio. De acuerdo con estos análisis, se definen ciclos estacionales y se determinan fechas en las que existen cambios representativos del uso y cobertura del suelo, que permitan establecer de forma cualitativa y cuantitativa los cambios que se han presentado en las regiones de estudio en esta serie de tiempo.

2. MARCO DE REFERENCIA

2.1 CAMBIO CLIMÁTICO Y PÁRAMOS

Tal vez el efecto más crítico del cambio climático sea el aumento de la temperatura global, pero no es el único. Existen en Colombia estudios que evidencian los efectos directos que se presentarían sobre el ambiente. Como resultado de estos estudios se ha observado un marcado retroceso de los glaciares de montaña, aumento de la temperatura y cambios en la humedad y las lluvias, entre otros, que afectarán a medio y largo plazo la estructura y el funcionamiento de los ecosistemas, en términos de sus ciclos fenológicos, nutrientes y agua, procesos que finalmente incidirán en la prestación de bienes y servicios que brindan los ecosistemas a los seres vivos (Rodríguez, Pabón, Bernal & Martínez, 2010).

Las últimas estimaciones concluyen que globalmente la temperatura media del aire se ha incrementado en $0,6 \pm 0,2$ °C durante los últimos 100 años (IPCC, 2001). Así mismo, a nivel nacional, se estima que con un aumento proyectado para el 2050, de la temperatura media anual del aire entre 1 °C y 2 °C, y una variación en la precipitación $\pm 15\%$, el 78 % de los nevados y el 56% de los páramos, desaparecerán (IDEAM, 2001).

El aumento de la temperatura que se espera para este siglo reduciría fuertemente la superficie de la zona bioclimática del páramo y sus franjas de subpáramo, páramo y superpáramo, con consecuencias que pueden ser más graves en páramos ya fuertemente intervenidos; ambos procesos afectarán tanto la biodiversidad

como la oferta de agua (Van der Hammen, 2002). La reducción del tamaño y de la biodiversidad, disminuirá su capacidad para absorber agua, lo que aumentará la escorrentía, la erosión y la sedimentación aguas abajo (Catarious & Espach, 2009).

Por otra parte, dentro de los factores de la importancia de conservar este ecosistema estratégico, aparte de los múltiples servicios y bienes ambientales que provee, hay otro factor de relevancia, como es la cantidad de carbono que retienen estos ecosistemas, sobre todo en el compartimiento del suelo, que de no ser conservado, sería emitido en forma de CO₂ atmosférico y contribuiría al cambio climático (Serrano, Páez & Ramírez, 2008).

2.2 CAMBIO CLIMÁTICO Y USO DEL SUELO

Se ha estudiado el efecto del cambio de uso del suelo en el cambio climático, tanto a nivel global como nacional. A nivel global se estima que el cambio del uso del suelo contribuye con un 12% al calentamiento global y, a nivel nacional, el cambio de uso del suelo aporta un 66.6% en las emisiones domésticas totales de gases efecto invernadero, GEI (ACCEFYN, 1998).

En las últimas décadas se han incrementado las investigaciones en el tema cobertura vegetal-clima, debido a que el clima es un factor primordial en la distribución de los patrones mundiales de los ecosistemas y, al mismo tiempo, los ecosistemas, a través de su cobertura vegetal y suelos, pueden afectar el sistema climático (Zhao, Pitman & Chase, 2001; Chapin et ál., 2000; Foley, Heil Costa, Delire, Ramankutty & Snyder, 2003).

La relevancia de esta relación es tal, que la conversión histórica del uso del suelo por parte del hombre puede haber causado una disminución de la temperatura entre 1 y 2 °C en latitudes medias y un calentamiento de 1 a 2 °C en áreas tropicales deforestadas.

El uso del suelo determina características de la superficie terrestre, como la humedad de la capa superficial del suelo, la regulación del balance de radiación del sistema superficie-atmósfera, los flujos de masa (vapor de agua o CO₂) y energía (calor) entre este sistema y la rugosidad que controla la energía cinética de la atmósfera, principalmente. La afectación del sistema climático, a través de la cobertura y uso del suelo, se resume en dos grandes categorías: procesos biogeoquímicos, que incluyen las emisiones de gases de efecto invernadero, como el dióxido de carbono y metano (CH₄), y procesos biofísicos tales como la modificación del albedo de la superficie del suelo (Rodríguez et ál., 2010). Como los suelos contienen alrededor de tres veces más reservas de carbono orgánico que la biomasa vegetal y animal sobre la tierra y el doble del carbono contenido en la atmósfera, la materia orgánica del suelo es potencialmente la fuente más peligrosa de CO₂ para el calentamiento global, aparte del proveniente de los combustibles fósiles (Sentis, 1994).

2.3 CAMBIO CLIMÁTICO Y BIODIVERSIDAD

Los cambios ambientales globales relacionados con la alteración del clima, los ciclos biogeoquímicos, el uso del suelo, la introducción de especies, entre otros, han cambiado la diversidad local y mundial del planeta, con importantes consecuencias sobre los sistemas ecológicos y sociales (Chapin et ál., 2000). El cambio de uso del suelo es uno de los principales impulsores del cambio de la diversidad biológica y se proyecta para el año 2100 como el de mayor impacto global, seguido del cambio climático (Sala et ál., 2000; Hansen et ál., 2001; Duraiappah et ál., 2005; Fischlin & Midgley, 2007).

En cuanto a las alteraciones por el efecto del cambio climático en los páramos, se espera que varias especies tengan problemas para encontrar en el antiguo superpáramo su ambiente propio, zonal o azonal. Se puede suponer que especialmente las especies endémicas y frecuentemente de requerimientos ecológicos especiales, de los géneros *Espeletia* y *Espeletiopsis*, correrán peligro de extinción (IDEAM, 2003).

Dentro del contexto de los Andes, el alto valor para la biodiversidad no está en la riqueza de especies sino en su singularidad. Gracias a las adaptaciones a condiciones extremas, en el páramo existen muchas especies que no se encuentran en ninguna otra parte (Hofsted et ál., 2003), factor que convierte al páramo en un ecosistema de suma importancia a la hora de adelantar planes de adaptación y mitigación ante el efecto del cambio climático.

2.4 ANÁLISIS ESPACIOTEMPORAL DE DATOS DE SENSORES REMOTOS

La determinación del comportamiento de las variables extraídas mediante el procesamiento de información satelital debe ser comprendida con técnicas de análisis espacial y temporal. El control y posterior seguimiento de la planificación territorial encuentran en los SIG y la teledetección herramientas de análisis espacial particularmente potente. Ambas tecnologías están desempeñando un papel importante en la adquisición, procesamiento y análisis de información espacial o geoinformación del territorio, sobre todo con fines de inventario, planificación y gestión. De esta manera, en primera instancia, el sistema informático debe proporcionar información suficiente para el análisis del entorno y de los recursos (Conesa, Álvarez & Granell, 2004).

Dado que el valor de una observación en una localización concreta puede informar sobre el valor de otra localización de interés cercana a ella, resultará crucial el análisis de la estructura de la dependencia espacial entre las observaciones disponibles y el desarrollo de procedimientos que permitan estimar el valor de la característica objeto de estudio en una localización no observada, aprovechando la estructura de la dependencia espacial que presenta dicha característica (Montero & Larraz, 2008).

El análisis espacial consiste en la determinación de parámetros de áreas extensas mediante el uso de la geoestadística y el procesamiento de imágenes; mientras que los análisis temporales se fundamentan en la obtención de información en periodos de tiempo constantes y la determinación de comportamientos, tendencias y modelos, que permitan conocer históricos o la predicción del comportamiento de variables específicas.

2.5 ANÁLISIS ESPACIAL DE DATOS GEOGRÁFICOS

El análisis espacial consiste en el estudio de entidades usando propiedades topológicas o geométricas. La geoestadística es el análisis e interpretación de datos geográficamente referenciados y se especializa en el análisis e interpretación de cualquier grupo de datos referenciados, pero con un enfoque de características continuas, y es considerada como uno de los tres campos especializados en el análisis de datos espaciales junto con el análisis de patrones de puntos y la estadística de objetos espaciales discretos (Goovaerts, 1997). La geoestadística tiene tres objetivos principales: estimación de modelos, predicción y prueba de hipótesis, en donde la predicción espacial (interpolación espacial) estima locaciones intermedias usando la información de las muestras (Hengl, 2009).

La geoestadística no es un mapeo convencional de variables ambientales, sino la aplicación de técnicas estadísticas cuantitativas para obtener mapas basados en observaciones en campo, que involucra:

1. Diseño de planes de muestreo y flujos de trabajo.
2. Recolección de datos en campo y análisis en laboratorio.
3. Estimación del modelo usando los puntos muestreados (calibración).
4. Implementación del modelo (predicción).
5. Evaluación del modelo.
6. Distribución y producción de los mapas de salida.

2.6 ANÁLISIS DE DATOS GEOGRÁFICOS

Una serie de tiempo es un conjunto de datos numéricos que se obtienen en periodos regulares de tiempo. La unidad de tiempo puede ser: hora, día, semana, mes, trimestre, año o cualquier periodo que se pueda considerar de interés:

$(Z_t : t = 1, 2 \dots n) = Z_1, Z_2, \dots, Z_t$. Una serie temporal es estacionaria en sentido débil, si existen y son estables la media, la varianza y las covarianzas, es decir, si para todo t :

- $\mu_t = \mu$ constante
- $\sigma_t^2 = \sigma$ constante
- $Cov(Z_t, Z_{t+k}) = Cov(Z_t, Z_{t-k}) = \gamma_k$; $k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$

Para un proceso estacionario, la función de autocorrelación (ACF o ρ^k) se calcula de la siguiente forma:

$$\rho^k = \frac{Cov(Z_t, Z_{t+k})}{\sqrt{Var(Z_t)}\sqrt{Var(Z_{t+k})}} = \frac{\gamma_k}{\gamma_0}, \text{ donde: } Var(Z_t) = Var(Z_{t+k}) = \gamma_0$$

3. METODOLOGÍA

La base de datos se construyó a partir de información relacionada con: temperatura diurna (8 días - 1 km), temperatura nocturna (8 días - 1 km) para la serie 2005-2012, derivada de la interpretación de imágenes satelitales MODIS y datos de precipitación mensual de las estaciones climatológicas operadas por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia IDEAM (Tabla 1.1, Figura 1.1).

Tabla 1.1 Ubicación de estaciones climatológicas

ESTACIÓN	MUNICIPIO	LATITUD	LONGITUD
Pesca	Pesca	5.31°N	73.04°W
Siachoque	Siachoque	5.30°N	73.15°W
El Encanto	Oicatá	5.36°N	73.19°W
Colegio Agropecuario	Chivatá	5.33°N	73.16°W
San Antonio	Tuta	5.41°N	73.14°W
El Garrocho	Toca	5.37°N	73.07°W
Casa Amarilla	Toca	5.32°N	73.09°W
Azulejos	Tuta	5.39°N	73.12°W
La Copa	Toca	5.34°N	73.12°W
San Cristóbal	Toca	5.35°N	73.11°W
Pila la Finca	Soracá	5.31°N	73.18°W
Rondón	Rondón	5.21°N	73.12°W

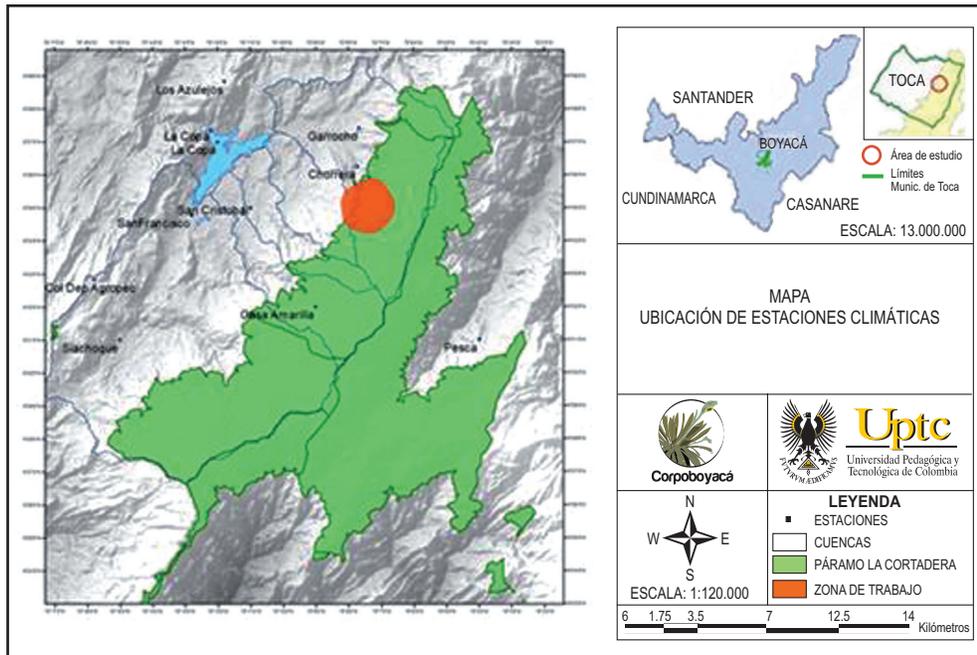


Figura 1.1 Ubicación geográfica de estaciones climatológicas.

3.1 ANÁLISIS ESPACIAL DE LA INFORMACIÓN

3.1.1 Procesamiento de la información de precipitación. Los datos recopilados de precipitación de las estaciones climatológicas del IDEAM ubicadas en los municipios de Pesca, Siachoque, Oicatá, Chivatá, Tuta, Toca, Soracá y Rondón se organizaron en un archivo de texto; después se cargó la información de precipitación según los años de funcionamiento de cada estación en el *software* QGIS, para, de esta manera, realizar los procedimientos de interpolación y generación de isoyetas con el fin de establecer el comportamiento espacial y temporal de la precipitación en la región estudiada. En las figuras 1.2, 1.3 y 1.4 se muestran los valores de precipitación anual para la serie 1991-2011. La escala de colores está representada por niveles rojos para medidas de precipitación bajas, pasando por naranja, amarillo, verde, hasta llegar al azul para valores de precipitación alta. Las estaciones están marcadas por un número (Tabla. 1.2).

Tabla 1.2 Asignación numérica para las estaciones climatológicas

ESTACIÓN	NOMBRE
1	Pescapg
2	Siachoquepm
3	Elencantopm
4	Colagrppm
5	Sanantoniopm
6	Elgarrochopm
7	Casaamaripm
8	Azulejospm
9	Lacopacd
10	San cristobalme
11	Pilalafcaco
12	Rondón

3.2 ANÁLISIS TEMPORAL DE LA INFORMACIÓN

La información espectral se procesó mediante el *software* HEG de la NASA y con un *plugin* desarrollado en Python se realizó la extracción de información para la región de estudio. Se obtuvo la serie temporal 2005-2012 proveniente de datos de productos satelitales (temperatura nocturna (°C) y temperatura diurna (°C), dividida en tres regiones: **no intervenida** (*vegetación de páramo (Vp)*), **en recuperación** (*vegetación herbácea muy rala sobre afloramientos rocosos (Pe)*) e **intervenida** (*cultivos transitorios (Cu)*). Se realizaron los siguientes procedimientos para identificar el mejor modelo que represente a la serie temporal:

1. Se graficó la serie de tiempo; se examinó y obtuvo una apreciación de la tendencia, estacionalidad, datos aberrantes, varianza no constante y si era o no estacionaria.

2. Para cada serie de tiempo se calculó el coeficiente de variación ($CV = \frac{SD}{Media} \%$); si el CV es mayor que el 30%, la serie requiere una transformación que estabilice la varianza. Se utilizaron las siguientes transformaciones: Z_i , $\sqrt{Z_i}$, $\ln(t)$, $\frac{1}{\sqrt{Z_i}}$, $\frac{1}{Z_i}$, y a cada una de ellas se le calculó el CV; a la serie de tiempo que presentó el menor CV se le aplicó la respectiva transformación.

3. Se calcularon y examinaron las funciones ACF y PACF muestral de la serie transformada y se estimaron los valores de p y q (usualmente estos valores son menores o iguales a 3). Así se halló el mejor modelo ARMA (p, q) para la serie de tiempo.
4. Se calcularon los cuatro datos siguientes al último valor de la serie de tiempo, llamados *pronósticos*.
5. Con el modelo identificado en el paso 3 se obtuvo la ecuación que representa la serie y se modeló la misma; luego se graficó la serie original con la serie modelada en un mismo plano cartesiano para hacer inferencias sobre lo acertado del modelo.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 ANÁLISIS ESPACIAL

En la Figura 1.2 se puede apreciar el comportamiento de precipitaciones para el año 2011; las isoyetas están ubicadas a intervalos de 100 mm. A pesar de presentarse una variación de colores que van desde el azul (mayor precipitación), hasta el rojo (menor precipitación), estas escalas no son representativas; se establecen con el fin de resaltar cambios en la precipitación.

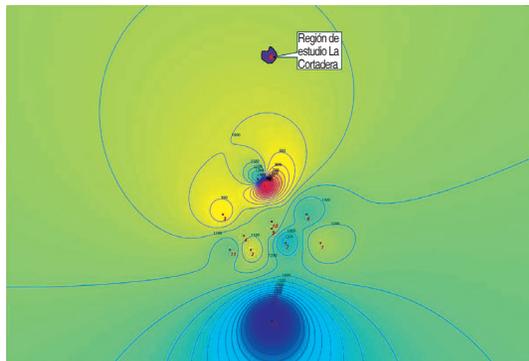


Figura 1.2 Precipitación e isoyetas para el año 2011.

En la figura anterior se pueden observar precipitaciones con un máximo de 2.000 mm para zonas cercanas a la estación Rondón y mínimas de 200 mm para zonas próximas a la estación El Encanto.

En la Figura 1.3 se muestra el comportamiento de precipitaciones para los años 1991-1998; las isoyetas están ubicadas a intervalos de 100 mm. Igualmente, los valores máximos se encuentran en zonas vecinas a la estación Rondón y mínimos cerca de la estación El Encanto.

Para las Figuras 1.4 y 1.5, correspondientes a la serie 1999-2011, se siguen presentando elevadas precipitaciones en zonas cercanas a la estación Rondón, y mínimos en zonas próximas a las estaciones Colegio Agropecuario y Azulejos. Cabe resaltar que durante los periodos 2010 y 2011 se presentan valores de precipitación más elevados, debido a eventos relacionados con la ocurrencia del fenómeno de La Niña.

Es importante destacar que el área correspondiente al páramo de La Cortadera, se caracteriza por presentar regímenes de precipitación bajos, con vegetación típica de estas condiciones, que llevan a definirlo como un páramo seco. En Colombia, las precipitaciones anuales en páramos oscilan entre valores bajos de 600 mm-año⁻¹ hasta más de 3000 mm-año⁻¹. Según Rangel (2000), la clasificación de los páramos colombianos de acuerdo con la precipitación anual va desde páramos secos (< 1200 mm) hasta pluviales (4,050 mm) (Díaz, Navarrete & Suárez, 2005).

En los páramos colombianos, la humedad se manifiesta por el rocío, la constante neblina y las lloviznas frecuentes: características de las altas montañas tropicales de clima húmedo. Esta gran humedad no está directamente relacionada con una precipitación alta, ya que a pesar de que existen regiones donde la precipitación anual es superior a 3000 mm, muchos páramos tienen una precipitación media anual aproximada de 1000 mm o menos. Sin embargo, por las bajas temperaturas y la alta nubosidad, la evapotranspiración es reducida y es esta una de las principales razones del alto rendimiento hídrico de estos ecosistemas (Díaz et ál., 2005).

En escenarios de cambio climático y de acuerdo con las estimaciones nacionales, en aquellas zonas donde la precipitación va a disminuir bajo un escenario menos pesimista, la reducción respecto a los valores de referencia será de hasta 15%, mientras que en la región andina para los departamentos de Cundinamarca, Boyacá, Tolima, Huila y el oriente del Valle exhibirá una transición climática de clima semihúmedo a clima semiárido (IDEAM, 2010b). Esto está acorde con la tendencia histórica de la precipitación total para el período 1971-2000, en el cual se señala su disminución, principalmente para los departamentos de Cundinamarca y Boyacá, en donde se encuentra cerca del 32% del área de los páramos del país (Gil, 2012).

Para las estaciones localizadas en el país entre los 3.000 y 4.200 msnm, correspondientes a las áreas donde se encuentran los páramos, se ha establecido una tendencia, aunque variable, hacia la disminución de las precipitaciones anuales del orden de 5,5 mm-año⁻¹; así como una tendencia a la disminución de los eventos extremos, contrario con lo reportado en otros pisos térmicos inferiores a la altitud en mención, donde se espera una intensificación de los eventos extremos (IDEAM, 2010a).

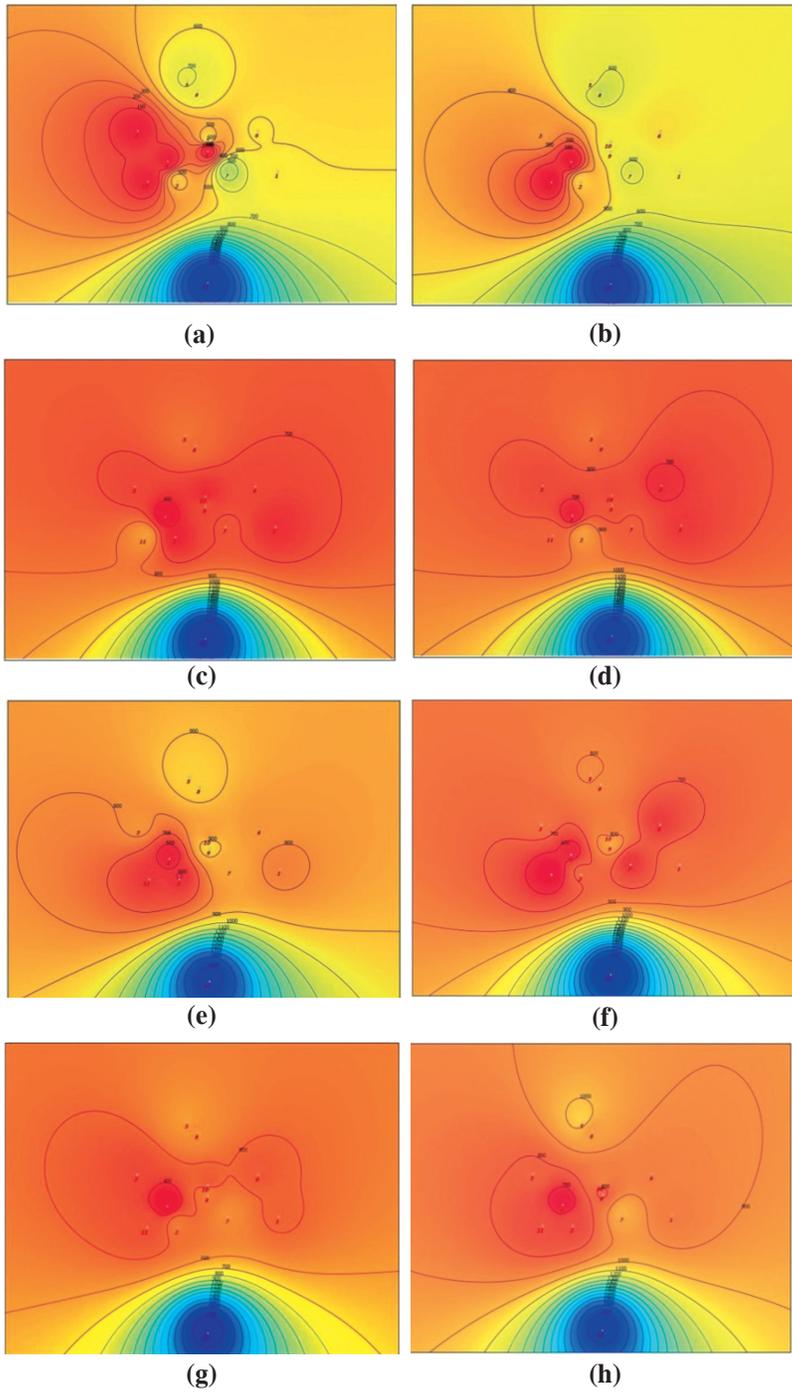


Figura 1.3. Precipitación e isoyetas para los años a) 1991, b) 1992, c) 1993, d) 1994, e) 1995, f) 1996, g) 1997, h) 1998.

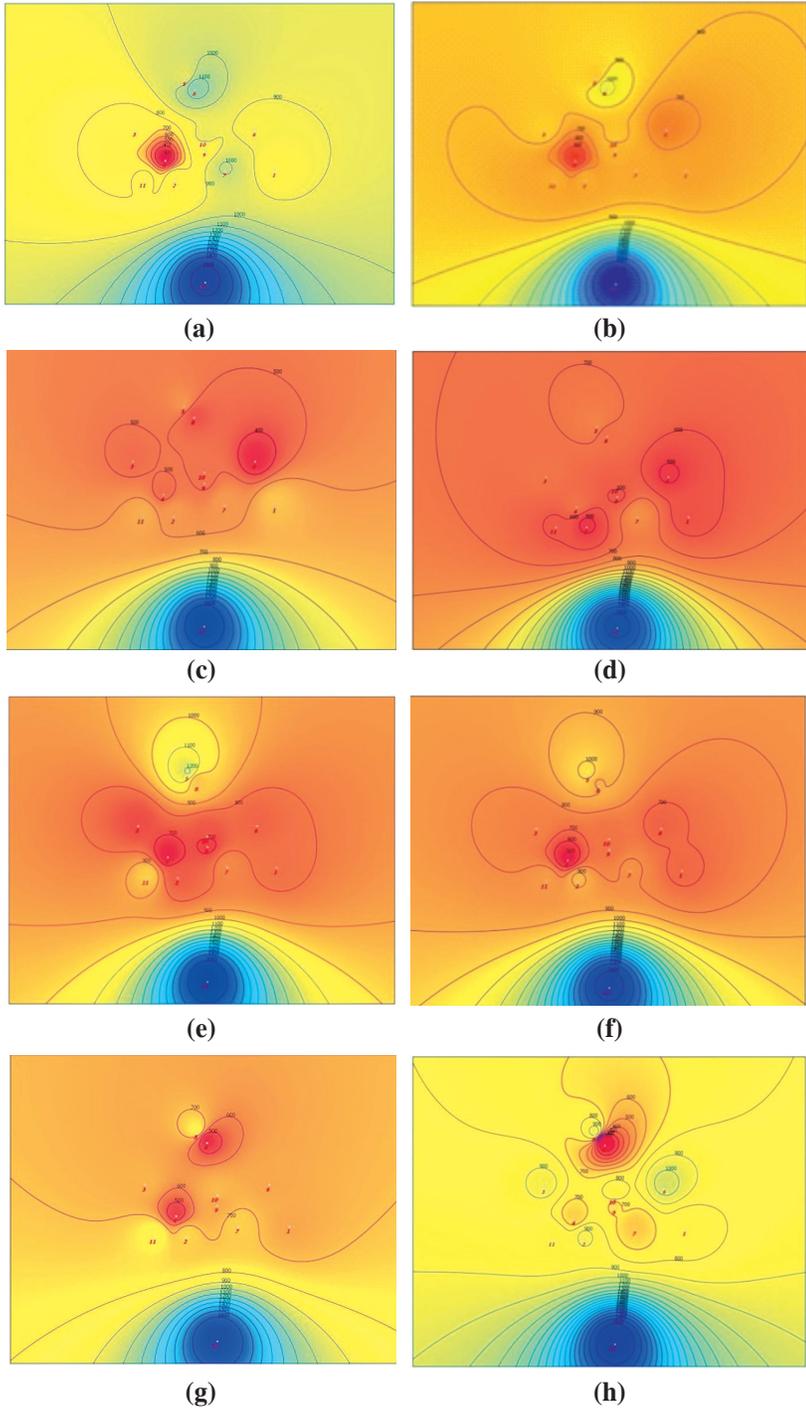


Figura 1.4 Precipitación e isoyetas para los años a) 1999, b) 2000, c) 2001, d) 2002, e) 2003, f) 2004, g) 2005, h) 2006.

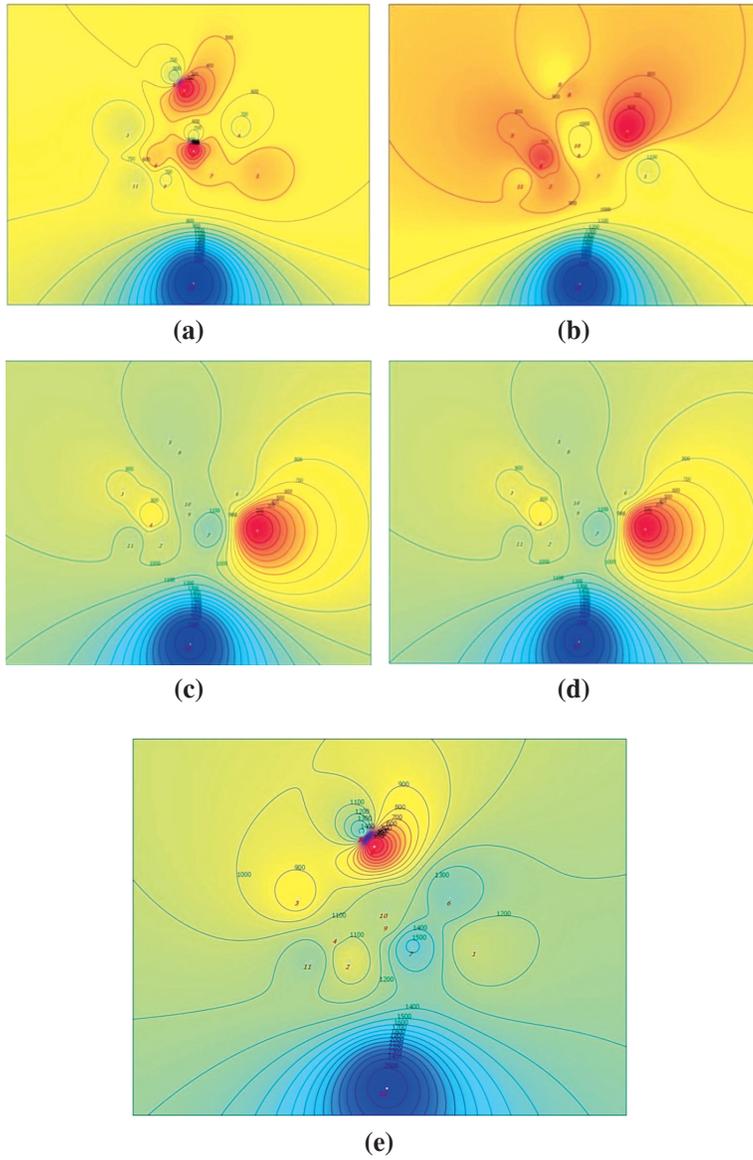
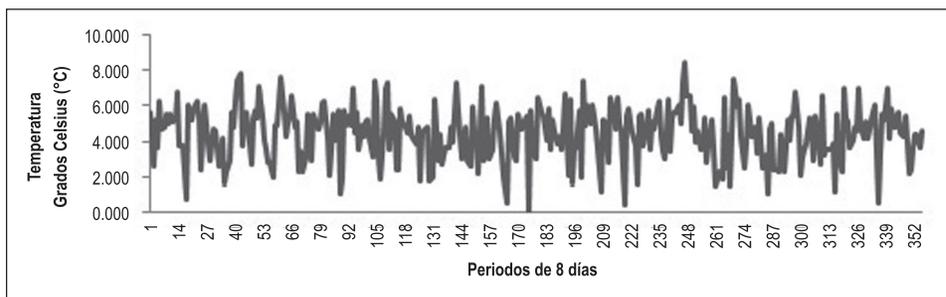


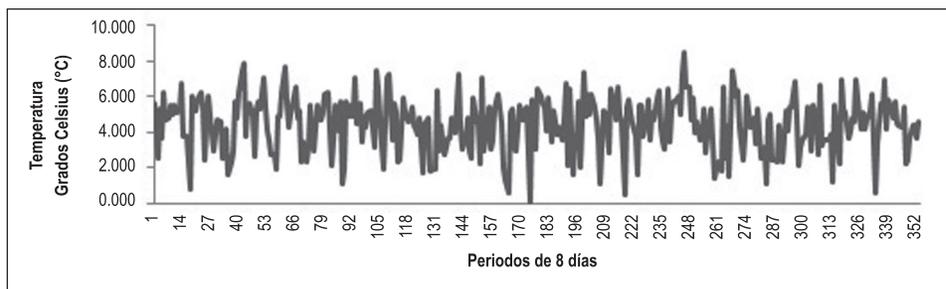
Figura1.5 Precipitación e isoyetas para los años a) 2007, b) 2008, c) 2009, d) 2010, e) 2011.

4.2 ANÁLISIS TEMPORAL

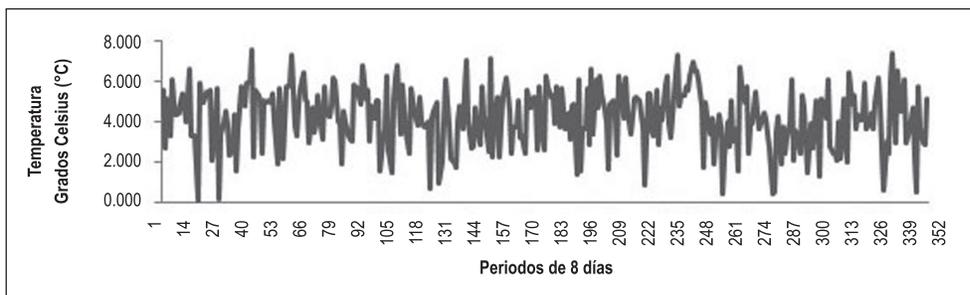
4.2.1 Series temporales. Temperatura nocturna



Intervenido



No intervenido



En recuperación

Figura 1.6 Series temporales de temperatura nocturna.

En la Figura 1.6 se muestra el comportamiento de temperatura nocturna para las distintas condiciones de uso de suelo en estudio (intervenido, no intervenido y en recuperación). Los periodos corresponden a ocho días, dentro de cada intervalo.

De acuerdo con la información de estaciones climatológicas y con base en el tipo de cobertura, para la Figura 1.6 se pueden obtener los siguientes promedios de temperatura nocturna: área intervenida 4.4 °C, área no intervenida 4.2 °C, y área en recuperación 4.2 °C. Al considerar estos datos es evidente un aumento en la temperatura resultado de un desequilibrio en el ecosistema por efecto principalmente del cambio de cobertura.

Las series temporales para temperatura diurna y nocturna se trabajan suponiendo que durante estos años siempre existió la misma cobertura, por esta razón no se pueden tener en cuenta como datos exactos. Los picos presentes representan un cambio significativo en determinado período, sin embargo no se cuenta con datos temporales suficientes para conocer el evento biótico que pudo llegar a alterar dichas temperaturas.

En la Tabla 1.3 se aprecian los parámetros de los modelos correspondientes a cada serie temporal. Dichos modelos consisten en una ecuación matemática que explica el comportamiento de datos climáticos en el tiempo. Se puede considerar una herramienta útil a la hora de realizar pronósticos de hasta cuatro datos después de la última serie, en este caso ocho días; es decir, que con base en estas predicciones se pueden obtener datos posteriores de hasta un mes.

Posterior a esta modelación se calcularon los valores de las series temporales para cada caso, y se obtuvieron las gráficas de comparación entre datos iniciales y modelados (Figura 1.7).

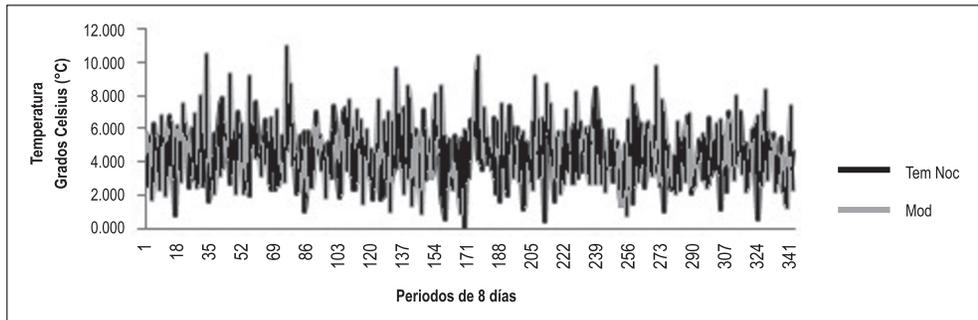
Tabla 1.3 Modelos y parámetros de series temporales de temperatura nocturna.

COBERTURA	OBSERVACIONES	MODELO	PRONÓSTICOS	
Intervenido	Se escoge el modelo ARMA(1,1) como el mejor, con parámetros AR(1)=0.292, MA(1)=0.147 y desviación estándar del ruido blanco SD(at)=0.398	$z_t = 0.292 \cdot z_{t-1} - 0.147 \cdot a_{t-1} + a_t$	357 358 359 360	4.3047 4.2827 4.2761 4.2744
No intervenido	Modelo AR(1) como el mejor, con parámetros AR(1)=0.120, y desviación estándar del ruido blanco SD(at)=1.467	$z_t = 0.120 \cdot z_{t-1} + a$	357 358 359 360	4.3291 4.2549 4.2460 4.2449
En recuperación	Modelo ARMA(1,1) como el mejor, con parámetros AR(1)=0.701, MA(1)=0.597 y desviación estándar del ruido blanco SD(at)=0.409	$z_t = 0.701 \cdot z_{t-1} - 0.597 \cdot a_{t-1} + a_t$	357 358 359 360	3.9730 3.9914 4.0038 4.0126

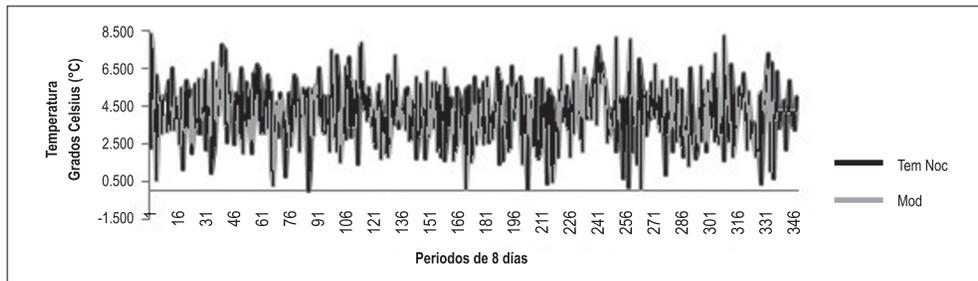
Comparando los modelos obtenidos de las series temporales de temperatura nocturna, se puede observar que los modelos para áreas intervenidas y en recuperación son ARMA (1,1); esto significa que para cada uno de ellos la temperatura en el tiempo t está relacionada linealmente con ella misma en el tiempo $t-1$ y linealmente con la componente aleatoria a_{t-1} . El modelo para áreas no intervenido (zona de páramo) es AR (1), semejante a los modelos anteriores, con la diferencia de que en este modelo no hay relación lineal con la componente aleatoria, lo cual evidencia una uniformidad en la respuesta en cuanto a la no existencia de dependencia de cambios aleatorios anteriores.

Cabe resaltar que existen valores anómalos en las series temporales de los datos originales, los cuales son causados por la presencia de nubosidad en los píxeles de la imagen procesada, correspondientes a las regiones de estudio, por errores en la adquisición de información del sensor o por cambios bruscos en la superficie o cobertura de estudio. Estos datos anómalos son corregidos por el modelo encontrado,

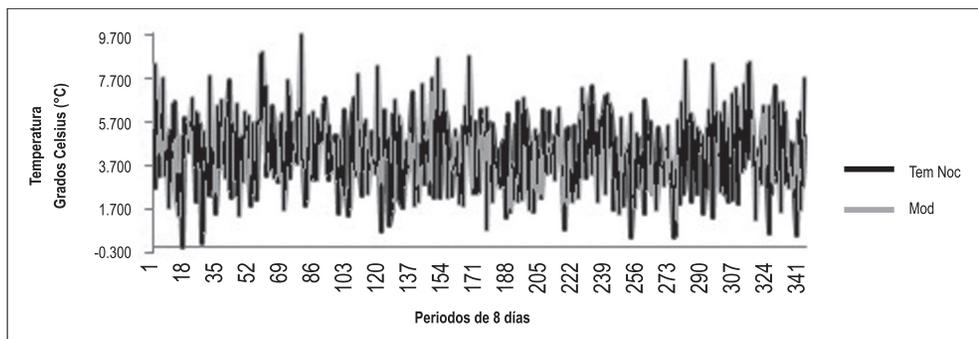
de forma tal que se suavizan las curvas de la serie de tiempo y con las ecuaciones encontradas se obtienen los pronósticos.



Intervenido



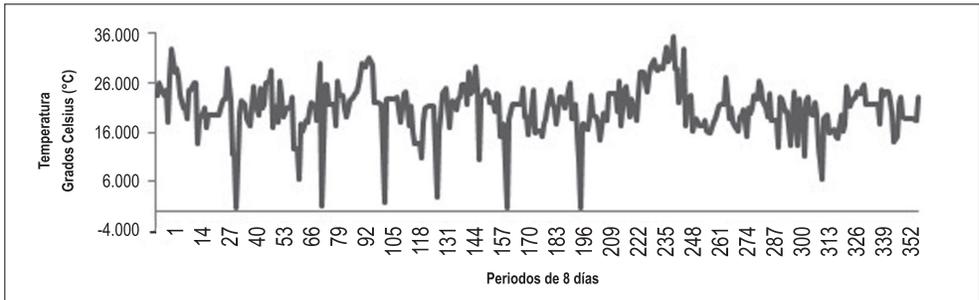
No intervenido



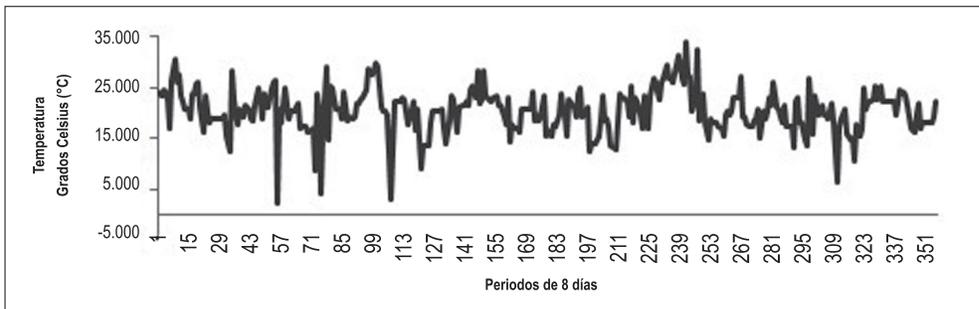
En recuperación

Figura 1.7 Modelos de series temporales de temperatura nocturna.

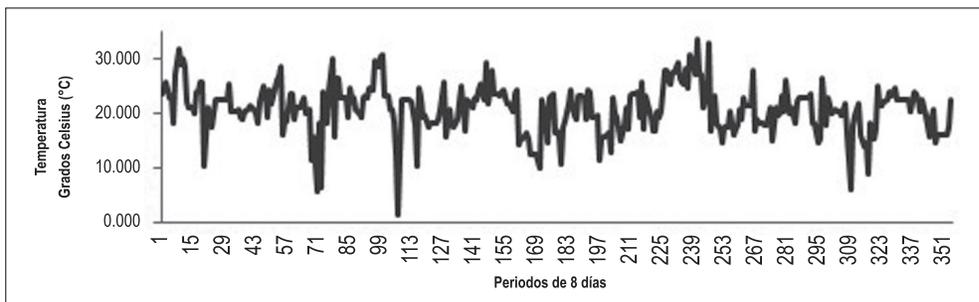
4.2.2 Series temporales. Temperatura diurna



Intervenido



No intervenido



En recuperación

Figura 1.8 Series temporales de temperatura diurna.

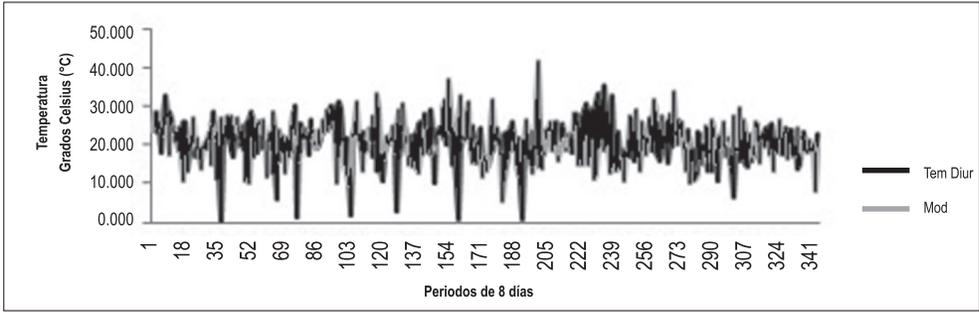
En la Figura 1.8 se presentan los siguientes promedios de temperatura diurna para cada condición de uso de suelo: intervenido 20.9 °C (CV 63,2), no intervenido 20.4 °C (Cv 57,8), y en recuperación 20.8 °C (59,3). Al considerar estos datos se puede observar un aumento en la temperatura para el área intervenida, lo que indica que el cambio de cobertura contribuye significativamente al aumento de la temperatura local.

En la Tabla 1.4 se aprecian los parámetros de los modelos correspondientes a cada serie temporal. Se calculan los valores de las series temporales para cada caso, obteniéndose las gráficas de comparación entre datos iniciales y modelados (Figura 1.9).

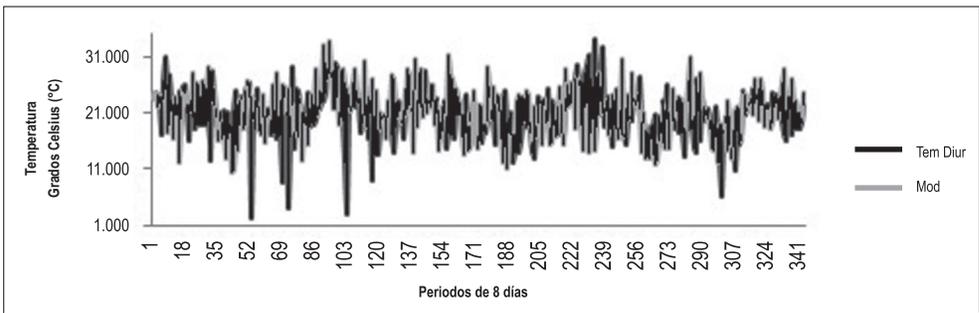
Tabla 1.4 Modelos y parámetros de las series temporales de temperatura diurna.

COBERTURA	OBSERVACIONES	MODELO	PRONÓSTICOS
Intervenido	Se escoge el modelo AR(1) como el mejor modelo, con parámetro AR(1) = 0.497 y desviación estándar del ruido blanco SD(at) = 4.449	$z_t = 0.497 \cdot z_{t-1} + a_t$	356 21.9129 357 21.4179 358 21.1721 359 21.0501
No intervenido	Modelo AR(3) como el mejor modelo, con parámetro AR(1) = 0.383, AR(2) = 0.053, AR(3) = 0.195 y desviación estándar del ruido blanco SD(at) = 3.694	$z_t = 0.383 \cdot z_{t-1} + 0.053 \cdot z_{t-2} + 0.195 \cdot z_{t-3} + a_t$	357 20.681 358 20.404 359 20.832 360 20.641
En recuperación	Modelo AR(2) como el mejor modelo, con parámetro AR(1) = 0.409 , AR(2) = 0.218 y desviación estándar del ruido blanco SD(at) = 3.713	$z_t = 0.409 \cdot z_{t-1} + 0.218 \cdot z_{t-2} + a_t$	356 20.8350 357 21.2184 358 20.9792 359 20.9651

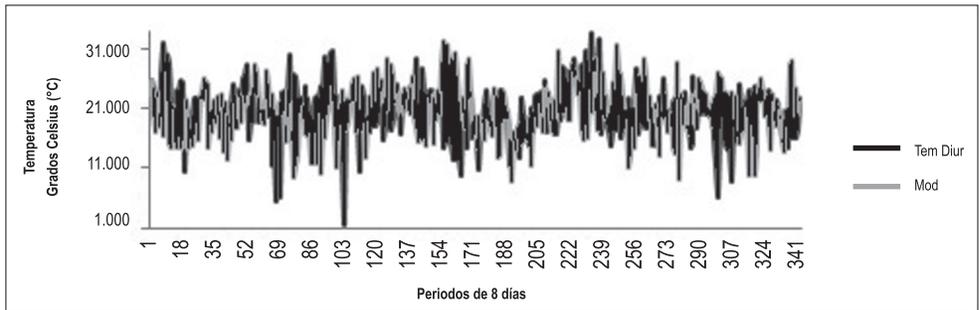
Comparando los modelos obtenidos de las series temporales de temperatura diurna se puede observar que el modelo para el área intervenida es AR (1). Esto significa que la temperatura en el tiempo t , está relacionada linealmente con ella misma en el tiempo $t-1$. El modelo para el área no intervenida es AR (3); esto significa que la temperatura en el tiempo t está relacionada linealmente con ella misma en el tiempo $t-1$, en el tiempo $t-2$ y en el tiempo $t-3$. El modelo para el área en recuperación es AR (2), lo que significa que la temperatura en el tiempo t está relacionada linealmente con ella misma en el tiempo $t-1$ y en el tiempo $t-2$, lo cual permite predecir de mejor manera temperaturas diurnas posteriores con los datos recopilados anteriormente.



Intervenido



No intervenido



En recuperación

Figura 1.9 Modelos de series temporales de temperatura diurna.

5. CONCLUSIONES

Los datos obtenidos de las estaciones climatológicas correspondientes a precipitación, indican que en la mayoría de años estudiados de 1991 a 2011, las precipitaciones más altas se encuentran en zonas cercanas a la estación Rondón, mientras que las que presentan valores más bajos se encuentran en zonas vecinas a estaciones correspondientes a El Encanto, El Garrocho, El Azulejo y La Copa.

En los análisis realizados para establecer el comportamiento de la temperatura diurna y nocturna es importante resaltar que a pesar de que existen modelos útiles, en el momento de predecir tendencias, no es fácil llegar a dar un pronóstico específico y acertado, debido a que no hay estacionalidad marcada en las series de tiempo estudiadas.

De acuerdo con resultados obtenidos en diferentes series de tiempo para áreas no intervenidas, intervenidas y en recuperación, es evidente el aumento de la temperatura diurna y nocturna durante los años estudiados y su relación con la alteración del ecosistema de páramo, debido al cambio en el uso del suelo y el tipo de cobertura.

Los modelos obtenidos en el análisis de series temporales establecen ciertas variaciones en los tipos de cobertura y el tipo de dato espectral estudiado; sin embargo, pueden ser instrumentos útiles para predecir comportamientos futuros de variables climáticas para el estudio de diferentes ecosistemas. Se evidencia la necesidad de continuar con investigaciones relacionadas con los temas de análisis espaciotemporal de variables de campo y espectrales para mejorar las metodologías y optimizar los resultados obtenidos.

REFERENCIAS

- Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales ACCEFYN (1998). *Inventario preliminar de gases de efecto invernadero. Fuentes y sumideros: Colombia 1990. Resumen ejecutivo*. Sociedad Alemana de Cooperación Técnica, GTZ. 10 p. Recuperado de: [http://www.accefyn.org.co/Web_GEI\(actualizada\)/Archivos_gei/I_Resumen.pdf](http://www.accefyn.org.co/Web_GEI(actualizada)/Archivos_gei/I_Resumen.pdf)
- Catarious, M. & Espach, R. (2009, oct.). *Impactos de cambio climático en la seguridad nacional y regional de Colombia*. 50 p. Recuperado de [http://www.cna.org/sites/default/files/CNA%20Impacts%20of%20Climate%20Change%20in%20Colombia%20Spanish%20FINAL%20\(2\).pdf](http://www.cna.org/sites/default/files/CNA%20Impacts%20of%20Climate%20Change%20in%20Colombia%20Spanish%20FINAL%20(2).pdf).

- Chapin, F.S., Zaveleta, E.S., Eviner, V-T., Naylor, R.L., Vitousek, S P., Lavorel, M., Reynolds, H.L., Hooper, D.U., Sala, O.E., Hobbie, S.E., Mack, M.C. & Diaz, S. (2000). Consequences of changing biotic diversity. *Nature*, 405, 234-242.
- Conesa, C., Álvarez, Y. & Granell, C. (2004). *El empleo de los SIG y la teledetección en planificación territorial*. Murcia, España: Universidad de Murcia.
- Corpoboyacá & Fundación Ecosistema Colombia. (2008). *Evaluación del estado de conservación de cuatro especies de frailejones amenazadas (Espeletia paipana, Espeletia chocontana, Espeletia oswaldiana, Espeletia brachyaxianthasubsp. pescana)*. Boyacá, Colombia: Corpoboyacá.
- Díaz, M., Navarrete, J. & Suárez, T. (2005). Páramos hidrosistemas sensibles. *Revista de Ingeniería*, 22, 64-75. Recuperado de <https://revistaing.uniandes.edu.co/pdf/A8%2022.pdf>.
- Duraiappah, A., Naeem, S., Agardi, T., Ash, N., Cooper, D., Díaz, S. et ál. (eds.). (2005). *Ecosystems and human well-being: biodiversity synthesis*. Washington, DC: Island Press. 100 p.
- Fischlin, A. & Midgley, G.F. (2007). Ecosystems, their properties, goods, and services. In M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden & C.E. Hanson, (Eds.), *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 211-272). Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Foley, J.A., Heil Costa, M., Delire, C., Ramankutty, N. & Snyder, P. (2003). Green surprise? How terrestrial ecosystems could affect earth's climate. *Front Ecol Environ*, 1(1), 38–44.
- Gil, G. (2012). Páramos: potencia vulnerable en las alturas. *Cambium, Boletín Informativo del Centro de Investigación en Ecosistemas y Cambio Climático. Carbono y Bosques C&B*, 9(1), 6–12.
- Goovaerts, P. (1997). *Geostatistics for natural resources evaluation (Applied Geostatistics)*. New York: Oxford University Press. 496 p.
- Hansen, A.J., Neilson, R.P., Dale, V.H., Flather, C.H., Iverson, L.R., Currie, D.J., Shafer, S., Cook, R. & Bartlein, P.J. (2001). Global change in forests: responses of species, communities, and biomes. *Bioscience* 51 (9), 765–779.
- Hengl, T. (2009). *A practical guide to geostatistical mapping*. 291 p. Retrieved from: <http://spatial-analyst.net/book/>
- Hofstede, R., Segarra, P. & Mena, P. (eds). 2003. *Los páramos del mundo. Atlas mundial de los páramos*. Quito: Global Peatland Initiative/NC-IUCN/ EcoCiencia,. 85 p. Recuperado de http://www.condesan.org/apcafiles/c6924e7390318016d869182e0da9470c/Introduccion_Paramos_mundo.pdf.

- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM (2001). *Primera Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*. Bogotá, Colombia: Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT), Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD). 307 p. Recuperado de <http://unfccc.int/resource/docs/natc/colnc1.pdf>.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM (2003). *Páramos y ecosistemas alto andinos de Colombia en condición hot spot & global climatic tensor*. Recuperado de <https://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/Bvirtual/000689/Introduccion.pdf>
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM (2010a). Capítulo 4. Vulnerabilidad. En *Segunda Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático*. Bogotá: IDEAM.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM (2010b). Cambio climático en temperatura, precipitación y humedad relativa para Colombia usando modelos meteorológicos de alta resolución (panorama 2011-2100). Bogotá: IDEAM.
- Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático IPCC (2001). *ClimateChange2001: The Scientific Basis*. Cambridge: Cambridge University. 94 p. Retrieved from <http://www.acrim.com/Reference%20Files/CLIMATECHANGE%202001%20-%20The%20Scientific%20Basis.pdf>
- IPCC Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático IPCC (2002). Documento técnico V del IPCC. 93 p. Retrieved from <https://www.ipcc.ch/pdf/technical-papers/climate-changes-biodiversity-sp.pdf>
- Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático IPCC (2013). Resumen para responsables de políticas. En T. F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex & P.M. Midgley (eds.). *Cambio climático 2013: bases físicas*. Contribución del Grupo de trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Cambridge, Reino Unido y Nueva York, NY, Estados Unidos de América: Cambridge University Press. Recuperado de file:///D:/Downloads/WG1AR5_SPM_brochure_es%20BASES%20FISICAS.pdf.
- Molano, J. (1995). Paisajes de la alta montaña ecuatorial. En ECOAN. *El Páramo. Ecosistema de alta montaña*. Serie Montañas Tropoandinas I (pp. 15-62). Bogotá, D.C.: Códice.

- Montero, J. & Larraz, B. (2008). *Introducción a la geoestadística lineal*. La Coruña, España: Netbiblo.
- Morales, M., Otero, J., Van der Hammen, T., Torres, A., Cadena, C., Pedraza, N., Rodríguez, C., Franco, J.C., Betancourth, E., Olaya, E. Posada, E. & Cárdenas, L. (2007). *Atlas de páramos de Colombia*. Bogotá, D. C.: Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. 208 p.
- Nosetto, M., Jobbágy, B. & Paruelo, J. (2005). Land use change and water losses: the case of grassland afforestation across a soil textural gradient in central Argentina. *Global Change Biology*, 11(7), 1-17. Retrieved from <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1365-2486.2005.00975.x/abstract>;
- Rodríguez, N., Pabón, J.D., Bernal, N.R. & Martínez, J. (2010). *Cambio climático y su relación con el uso del suelo en los Andes colombianos*. Bogotá, D. C.: Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, Universidad Nacional de Colombia y Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación. 80 p.
- Sala, O.E., Chapin, I.F., Armesto, J.J., Berlow, E., Bloomfield, J., Dirzo, R., Huber Sanwald, E., Huenneke, L.F., Jackson, R.B., Kinzig, A., Leemans, R., Lodge, D.H., Mooney, H.A., Oesterheld, M., Leroy Poff, N., Sykes, M.T., Walker, B.H., Walker, M. & Wall, D.H. (2000). Global biodiversity scenarios for the year 2100. *Science*, 287 (5459), 1770–1774.
- Sentis, I. (1994). La materia orgánica y la degradación y erosión de suelos en el trópico. En *Memorias del VII Congreso Colombiano de la Ciencia del Suelo*. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo. Bucaramanga. Colombia.
- Serrano, C., Páez, E. & Ramírez, L. (2008, junio). *Situación de los páramos en Colombia frente a la actividad antrópica y el cambio climático. Informe preventivo*. Instituto de Estudios del Ministerio Público Procuraduría Delegada para Asuntos Ambientales y Agrarios. 170 p. Recuperado de <http://fundacionecoan.org/Documentos/Eventos/libro4.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
- Van der Hammen. 2002. Diagnóstico, cambio global y conservación. En *Memorias Congreso Mundial de Páramos*. Paipa, Colombia. Tomo I. (pp. 60-7). Recuperado de: http://bibdigital.rjb.csic.es/PDF/Fernandez_Paramos_Colombia_2002.pdf.
- Zhao, M., Pitman, A. & Chase, T. (2001). Climatic effects of land cover change at different carbon dioxide levels. *Clim Res*.17, 1–18.

Capítulo II

El páramo: regulador hídrico Aplicación de modelos para estimación de caudales



1. INTRODUCCIÓN

Dentro de la generación de conocimiento bajo el enfoque de conservación de ecosistemas naturales, es indispensable analizar cada uno de sus componentes, entre los cuales se encuentra tal vez uno de los más importantes, la disponibilidad y distribución del recurso hídrico. El páramo es considerado como regulador de un número importante de cuencas hidrográficas a lo largo del territorio nacional; por esta razón, el componente hidrológico, al igual que su comportamiento, es clave al momento de tomar decisiones encaminadas a la preservación y sostenibilidad de este valioso ecosistema.

La validación adecuada de modelos hidrológicos a partir de información climática (precipitación) es indispensable para realizar análisis que cuantifiquen los impactos del cambio climático sobre el comportamiento hidrológico de una cuenca y su directa influencia sobre la disponibilidad de los recursos hídricos, especialmente para consumo humano y actividades agrícolas.

El páramo de La Cortadera es un importante regulador hídrico, ya que es el encargado de mantener el caudal de la represa La Copa, cuyas aguas son destinadas para las actividades agropecuarias de municipios como Paipa, Duitama, Tibasosa y Sogamoso, entre otros, por medio del Distrito de Riego y Drenaje del Alto Chicamocha y Firavitoba (Usochicamocha).

La información que se tiene en la actualidad acerca de los ecosistemas de alta montaña es amplia, generalizada y aislada (Morales et ál., 2007). Pese a que existen trabajos hidrológicos completos en Colombia sobre este tipo de ecosistemas, no se han hecho muchos estudios que establezcan las características hídricas y permitan conocer de manera detallada el estado actual; problemática que no es ajena en el páramo de La Cortadera.

Cuantificaciones del balance hídrico con modelos tradicionales de hidrología de cuencas muestran una subestimación de su producción hídrica real, lo cual podría

deberse a la falta de contabilización del importante aporte hídrico del agua contenida en la atmósfera e interceptada por las plantas (denominada precipitación horizontal) y que no es registrada en las estaciones de medición de precipitación (Díaz, Navarrete & Suárez, 2005).

En hidrología, los modelos numéricos son una herramienta básica con la que se puede estudiar el ciclo hidrológico y las relaciones hidrológicas con los problemas científicos y prácticos. Desde mediados de 1960 numerosos modelos hidrológicos se han establecido y desarrollado a partir de los principios simples y conceptos de modelos distribuidos y basados en la física. Entre estos modelos, la herramienta de evaluación de suelo y agua (SWAT), desarrollada en la década del noventa del siglo pasado, es un modelo para el estudio de cuencas hidrográficas.

El estudio hidrológico está enfocado en el análisis de la red hídrica que se genera del páramo de La Cortadera, con el fin de conocer el comportamiento hidrológico de la cuenca total y de las cinco subcuencas que lo componen, como herramienta para la planeación y el ordenamiento territorial, la toma de decisiones de carácter institucional, el uso y el manejo de los recursos naturales, además para establecer la función hidrológica que cumple como proveedor de bienes y servicios ambientales, especialmente de agua, para suplir las necesidades de los habitantes de varios municipios.

2. MARCO DE REFERENCIA

El ecosistema de páramo ha proporcionado una importante función socioeconómica a la comunidad andina como su principal fuente de agua. Debido a las circunstancias climáticas especiales, los suelos poco profundos y porosos con alto contenido de materia orgánica, y su topografía formada por la acción de los glaciares, la hidrología superficial del páramo tiene características extraordinarias. Comparados con cuencas montañosas de otras regiones, los ríos que descienden desde los páramos tienen un flujo base sostenido como resultado de la elevada capacidad de regulación del agua del páramo. Sin embargo, esta función está amenazada por un incremento de la actividad humana durante los últimos años (Buytaert et ál., 2006).

Según el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial MAVDT (2003), el páramo es un ecosistema donde elementos como la vegetación, el suelo y el subsuelo, han desarrollado un gran potencial para interceptar, almacenar y regular el agua. La importancia de este ecosistema radica fundamentalmente en dichas funciones, que regulan de esta manera los flujos hídricos superficiales y subterráneos.

En los páramos colombianos, la humedad se manifiesta por el rocío, la constante neblina y las lloviznas frecuentes, características de las altas montañas tropicales.

Esta gran humedad no está directamente relacionada con una precipitación alta, ya que a pesar de que existen regiones donde la precipitación anual es superior a 3000 mm, muchos páramos tienen una precipitación media anual aproximada de 1000 mm o menos. Rivera y Rodríguez (2011) reportan precipitaciones anuales en páramos colombianos que pueden oscilar entre valores bajos de 600 mm·año⁻¹ hasta más de 3.000 mm·año⁻¹; sin embargo, por las bajas temperaturas y la alta nubosidad, la evapotranspiración es reducida, situación que es una de las principales razones del alto rendimiento hídrico de estos ecosistemas.

De esta forma, debido a las características hidrogeológicas, con diversidad de sustratos geológicos fracturados que alimentan acuíferos superficiales y subterráneos, los páramos se convierten en zonas que favorecen la acumulación y regulación de las aguas subterráneas, principalmente por la disposición de sistemas de fallamiento y de diaclasas locales, claves en la percolación e infiltración del agua superficial.

Todas estas características expresan la importancia del páramo como regulador hídrico, por sostener el flujo base de las corrientes que nacen y descienden de estos ecosistemas hacia las áreas medias y bajas, y por ofrecer excelente calidad de agua. Estas propiedades son derivadas de su alta capacidad de almacenamiento asociada al potencial de infiltración, a los complejos de humedales, a la morfología de las cuencas, al tipo de suelos, a la formación de niebla y a la capacidad de retención de las plantas, entre otros (Rivera & Rodríguez, 2011).

2.1 CICLO HIDROLÓGICO

El ciclo hidrológico y su balance global constituyen el modelo básico para entender el funcionamiento del sistema hídrico y las interacciones entre el océano y el continente. Este ciclo representa el proceso continuo de la circulación y transformación del agua en sus diversos estados en la esfera terrestre. Su dinámica es determinada por las condiciones de la radiación solar, la acción de la gravedad y las interacciones de las capas superiores de la Tierra: atmósfera, litósfera y biósfera (IDEAM, 2010).

La descripción conceptual del ciclo hidrológico se presenta consecutivamente, de acuerdo con el orden de los procesos en la dirección del flujo del agua en estos ecosistemas; es decir, entradas por precipitación en todas sus formas (vertical y horizontal: lluvia que es transportada por el viento y la niebla), precipitación neta dentro del bosque, agua en el horizonte orgánico, escorrentía superficial, infiltración de la precipitación, evapotranspiración, agua en el suelo, percolación profunda y drenaje en la cuenca (Tobón, 2009).

El ciclo hidrológico está gobernado por procesos naturales que ocurren de manera continua. El agua cae sobre la superficie terrestre en forma líquida o sólida, parte

de la cual puede evaporarse antes de tocar la superficie terrestre. Aquella fracción que alcanza la vegetación es parcialmente retenida por las hojas de las plantas (intercepción). De allí, una parte es evaporada de nuevo hacia la atmósfera, en tanto que la fracción restante cae hacia el suelo, en donde puede infiltrarse o escurrir por las laderas, siguiendo la dirección de las mayores pendientes del terreno. La parte del agua que escurre a lo largo de las laderas puede ser interceptada por las depresiones naturales del terreno, en donde se evapora o infiltra; o, por último, se mueve a través de los drenajes naturales de la cuenca y forma el flujo superficial. Estos tres flujos –superficial, subsuperficial y subterráneo– conforman la escorrentía, que integra los cauces de las corrientes, alimenta los diferentes almacenamientos y drena finalmente al mar.

Esta compleja interacción entre la atmósfera y los procesos superficiales y subsuperficiales afecta el régimen, la cantidad, la distribución y la calidad del agua en las diferentes unidades hidrográficas. Por ello, los componentes del ciclo hidrológico difieren en sus características químicas, bioquímicas, variabilidad espacial y temporal, resiliencia, vulnerabilidad a la presión (incluidos usos de la tierra y cambio climático), susceptibilidad a la contaminación y capacidad de proveer servicios ambientales apropiados para ser utilizados en forma sostenible (IDEAM, 2010).

2.2 HIDROLOGÍA EN EL PÁRAMO

Según el MAVDT (2003), el páramo es un ecosistema donde elementos como la vegetación, el suelo y subsuelo, han desarrollado un gran potencial para interceptar, almacenar y regular el agua; la importancia de este ecosistema radica en estos procesos.

A pesar de su limitada extensión alrededor del mundo (35.000 km²) (Hofstede, Segarra & Mena, 2003), los páramos se reconocen por los servicios ambientales que proporcionan a escala local y global (Kappelle & Horn, 2005). Entre estos servicios se encuentran la conservación de la biodiversidad, el almacenamiento de carbono en el suelo, la hidroenergía y, principalmente, el abastecimiento de agua potable para las grandes ciudades, como es el caso de Bogotá (Colombia) que depende casi en un 95 % del agua proveniente de los páramos (Buytaert et ál., 2011).

El rendimiento hídrico de los páramos está relacionado, entre otros, con factores con variables como la orografía y la presencia de vegetación arbustiva de tipo suculento y cespitoso, que logra incorporar al suelo un régimen de precipitación errática. Dicha precipitación es finalmente almacenada por el suelo que actúa como un excelente regulador hídrico y es convertida por este en un flujo constante de agua (Buytaert et ál., 2011).

La necesidad de la modelación hidrológica de los ecosistemas de páramo ha sido ampliamente discutida, como lo presentan Sáenz, Domínguez y Díaz-Granados (2001) y enfatizan Bruinjeel y Hamilton (2000). La mayoría de la investigación en páramos se ha enfocado en su flora y fauna, actualmente existen pocos estudios sobre los procesos hidrológicos propios de estos ecosistemas.

2.2.1 Precipitación horizontal. Los aportes de agua a la zona no saturada del suelo en ecosistemas naturales provienen principalmente de la precipitación convencional o lluvia. Sin embargo existen otros mecanismos distintos en los que el agua atmosférica puede incorporarse al suelo. En este sentido, el cambio en las variables precipitación y temperatura también producen cambios en la humedad relativa; con una menor precipitación, existe una mayor posibilidad de radiación solar y menor nubosidad, y dado que, normalmente, las nubes afectan significativamente la energía, la luz y los regímenes de temperatura e importan potencialmente grandes cantidades de agua como precipitación y precipitación horizontal (corresponde a la niebla) (Mulligan, 2010), todo lo anterior representaría efectos más drásticos sobre el funcionamiento hidrológico del páramo.

La niebla es una nube a ras de suelo. Se compone de muy pequeñas gotas de agua que por ser tan pequeñas ($< 40 \mu\text{m}$), no tienen peso suficiente para caer y, por tanto, quedan suspendidas en el aire y son desplazadas por este (Cereceda, 2000). Estas pequeñas gotas pueden unirse dando lugar a gotas de mayor tamaño que discurren por el obstáculo y caen al suelo. Este proceso hidrológico es conocido como precipitación de niebla (Ritter, Regalado, Aschan & Gómez, 2005); también se puede definir como la humedad contenida en las nubes bajas o en la neblina, que es atrapada por las plantas y condensada en gotas más grandes que se precipitan por la superficie de la vegetación y los suelos.

Attaroff y Rada (2000) definen la precipitación horizontal como entradas adicionales por interceptación del agua de la niebla y de la lluvia transportada por el viento en una dirección diferente a la vertical. Ese tipo de precipitación tiene un papel importante en la hidrología de los páramos, especialmente en aquellos que tienen bajos niveles de precipitación vertical (Rivera & Rodríguez, 2011).

Aunque la dinámica de la interceptación del agua de la niebla por la vegetación aún no es muy clara y el monitoreo de esta debería ser el primer paso para mejorar el entendimiento del proceso, esta es entendida como un proceso físico donde la vegetación actúa como una barrera física que captura las pequeñas gotas de niebla y las incorpora de manera efectiva al suelo por goteo desde el dosel. La idea intuitiva de diferentes autores sugiere una relación de eficiencia diferente para la captura del agua de niebla, según el tipo de vegetación o factores biológicos y los factores climáticos (Navarrete, 2004).

2.3 HERRAMIENTA DE EVALUACIÓN DE SUELO Y AGUA –SWAT–

En hidrología, los modelos numéricos son una herramienta básica con la que se puede estudiar el ciclo hidrológico y las relaciones hidrológicas con los problemas científicos y prácticos. Desde mediados de 1960, numerosos modelos hidrológicos se han establecido y los han desarrollado a partir de los principios simples y los conceptos de modelos distribuidos y basados en la física. Entre estos modelos, la herramienta de evaluación de suelo y agua (SWAT), desarrollada en la década del noventa, es un modelo para el estudio de cuencas hidrográficas de gran tamaño.

SWAT fue diseñado para aceptar entradas disponibles con el fin de permitir el uso general en grandes regiones, y también ser continuo en el tiempo y, de esta forma, permitir la simulación de los factores de gestión del suelo, validado en un amplio intervalo de regímenes hidrológicos. SWAT incorpora las características de varios institutos como el Departamento de Agricultura de USA (USDA) y el Servicio de Investigación Agrícola (ARS). Igualmente, los modelos han sido objeto de continua revisión y ampliación de sus capacidades (Chen & Wu, 2012).

SWAT es un modelo integrado que incluye componentes tales como clima, hidrología, suelo, nutrientes, plaguicidas, manejo del suelo, bacterias y agentes patógenos. El modelo es un simulador computacionalmente eficiente de hidrología y calidad del agua a varias escalas, que se ha utilizado en muchas aplicaciones internacionales (Schuol, Abbaspour, Srinivasanand & Yang, 2008). Incluye procedimientos para describir cómo la concentración de CO₂, la precipitación, la temperatura y la humedad afectan el crecimiento vegetal. También simula la evapotranspiración, la nieve y la generación de escorrentía, y se utiliza para investigar los impactos del cambio climático (Rouholahnejad et ál., 2012).

SWAT es un modelo de simulación continua que opera en intervalos de tiempo diarios. La heterogeneidad espacial de la cuenca se integra a partir de información del modelo de elevación digital, suelos y los datos de uso de la tierra por medio de sistemas de información geográfica. La parametrización espacial del modelo SWAT se realiza dividiendo la cuenca en subcuencas a partir de la topografía. Estas se subdividen en unidades de respuesta hidrológica (HRU) basadas en las características del suelo y el uso de la tierra.

En los últimos años, la herramienta SWAT ha sido utilizada en muchos países y se ha probado para la simulación hidrológica a diferentes escalas espaciales, para investigar las estrategias de gestión de cuencas hidrográficas. En Grecia se modeló la calidad del agua en una cuenca de tamaño medio y se utilizó tecnología SIG como una herramienta de gestión ambiental (Pisinaras, Petalas, Gikas, Gemetzi & Tsihrintzis, 2010), mostrando buenos resultados entre los datos observados y

simulados; igualmente se demostró que la combinación entre SWAT y el apoyo tecnológico SIG es una herramienta muy útil en la evaluación de alternativas de gestión.

En 18 países de África Occidental (Schuol et ál., 2008), la modelación SWAT permitió la cuantificación de la disponibilidad de agua dulce en un área de 4×10^6 km², como respuesta a la preocupación mundial por el desabastecimiento de agua dulce; también se simuló la cuenca del río Simiyu, aportante del lago Victoria, con muy buenos resultados (Mulungu & Munishi, 2007).

En Francia, sobre cuencas altamente intervenidas por cultivos agrícolas, SWAT ha tenido un buen desarrollo con variables, como caudales diarios simulados, sedimentos y partículas de carbono, que coinciden con los valores observados en campo (Oeurng, Sauvage & Sánchez, 2011), y ha demostrado la versatilidad del programa en este tipo de modelación.

En Brasil se ha utilizado SWAT para la simulación de caudales de corrientes de agua utilizando datos de pluviómetros y pluviógrafos dentro y fuera de la cuencas (Strauch et ál., 2012). En Perú se modeló la cuenca del río Cañete, en estudio realizado por Uribe y Quintero (2011), con resultados muy acertados de acuerdo con los caudales medidos y observados.

El modelo hidrológico SWAT ha sido implementado para la modelación de los caudales de un río en China, para simular la respuesta hidrológica al cambio climático en diferentes escenarios (Song & Zhang, 2012). En Colombia solo se han realizado los trabajos reportados por Navarrete (2004), Díaz et ál. (2005) y Lombana (2006), en los cuales se tiene en cuenta un modelo de precipitación horizontal para ecosistemas de páramo simulados por medio de la herramienta SWAT. Estos trabajos indican la importancia hidrológica de los páramos y, con el modelamiento hidrológico, obtienen aportes de la precipitación horizontal de un 18 % de la precipitación vertical, tal como lo reportan estudios similares. También enfatizan en la necesidad de continuar investigando la dinámica hidrológica de estos ecosistemas en el país.

3. METODOLOGÍA

3.1 IDENTIFICACIÓN Y RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN SECUNDARIA

Con el fin de adelantar el análisis hidrológico de la cuenca, se identificó la información espacial y alfanumérica necesaria para su caracterización. En la delimitación, zonificación de cobertura y uso del suelo para las cuencas, se utilizaron imágenes de sensores remotos, y se adquirieron modelos digitales de elevación de la zona de estudio.

Adicionalmente, se solicitó al Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) las series históricas de los diferentes parámetros climáticos, tanto de la zona de estudio como de estaciones cercanas, así como las relaciones intensidad-duración-frecuencia.

3.2 ANÁLISIS Y PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN

Se desarrolló con el propósito de evaluar las imágenes satelitales, así como el estado y calidad de las series hidroclimatológicas. Como resultado se obtuvo una clasificación preliminar del uso y cobertura del suelo, la cual se ajustó a partir de visitas de campo, identificación y tratamiento de valores dudosos, llenado de datos faltantes y corrección de heterogeneidades.

También se hizo identificación, recolección y procesamiento de la información primaria, que consistió principalmente en la realización de visitas de campo que permitieron obtener la información necesaria para garantizar la veracidad de la información secundaria.

3.3 CARACTERIZACIÓN DE LAS CUENCAS EN ESTUDIO

Se establecieron las características morfométricas de las diferentes cuencas pertenecientes al páramo de La Cortadera, a partir de la determinación de áreas mediante el modelo digital del terreno; así mismo, se llevó a cabo un análisis topográfico que permitió la delimitación de cada una de las cuencas hidrográficas.

Para el análisis geomorfológico de las cuencas se establecieron las principales características que inciden en la respuesta de la cuenca a eventos de precipitación, tales como área, perímetro, densidad de drenaje, entre otras. Luego se determinó el tipo de cobertura de las cuencas, indispensable para analizar el comportamiento del suelo en eventos de escorrentía efectiva.

3.4 DETERMINACIÓN DE PERIODOS DE RETORNO Y CONSTRUCCIÓN DE CURVAS IDF

Las curvas de intensidad–duración–frecuencia (IDF) se construyen por medio de puntos representativos de la intensidad media de precipitación para diferentes duraciones, todos correspondientes a una misma frecuencia o período de retorno. Mediante las curvas IDF es posible estimar la intensidad de tormentas de distintas duraciones y para diferentes periodos de retorno. La metodología usada para el cálculo de las curvas IDF consiste básicamente en realizar un análisis de frecuencia a cada una de las series de valores máximos de precipitación obtenidas para cada duración. La serie a la cual se le realiza el análisis de frecuencias puede ser seleccionada de tres formas:

a) *Serie máximas anuales*. Está conformada por cada uno de los valores máximos de precipitación observados en cada uno de los años de registro.

b) *Serie de duraciones parciales*. Está conformada por aquellos datos que sobrepasan un valor base predefinido.

c) *Serie de excedencias anuales*. En la cual el valor base, de la serie anterior, es seleccionado de tal forma que el número de datos que conforman la serie sea igual al número de años de registros.

Una vez seleccionada la serie de máximos, se estableció el rango de duraciones para el cual se estimaron las curvas IDF. Luego, a cada una de las series obtenidas para cada duración, se le ajustó una función de distribución, normalmente la distribución Gumbel. Con la función de distribución ajustada a los datos observados, se construyeron familias de curvas en las cuales pudieron estimarse las intensidades máximas para diferentes duraciones con distintas probabilidades de ocurrencia.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las cuencas delimitadas hacen parte del páramo de La Cortadera y tienen en común que el nacimiento de sus principales tributarios es el páramo y el sitio de entrega natural de sus aguas es un valle donde se ubica la represa de La Copa. Se estudió la cuenca total y las cinco subcuencas por separado, ya que cada una tiene varias corrientes de agua importantes y de esta forma se facilita la interpretación (Figura 2.1).

4.1 ÁREA DE LA CUENCA PRINCIPAL Y SUBCUENCAS. PÁRAMO DE LA CORTADERA

Las cuencas se delimitaron a partir del modelo de elevación digital (DEM) con resolución de 30 m y con el programa SWAT (por sus siglas en inglés, Soil and Water Assessment Tool), que determina las cuencas de acuerdo con las corrientes de agua identificadas en el modelo. A cada corriente de agua identificada, se le asigna el punto de salida y el programa genera automáticamente el límite de cada cuenca y su red hídrica.

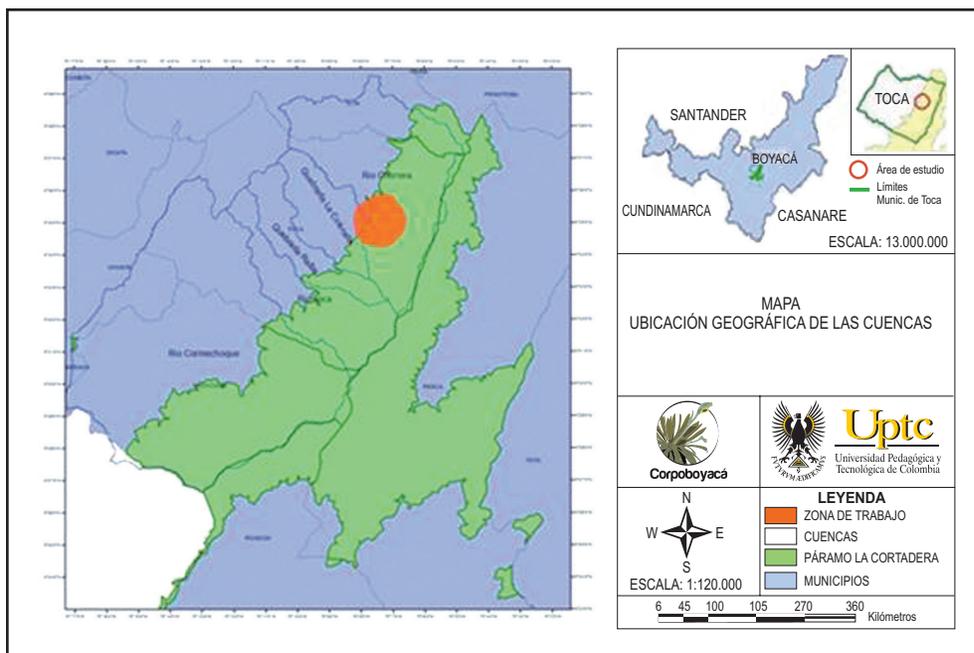


Figura 2.1 Cuencas delimitadas dentro del área del páramo La Cortadera. Zona correspondiente al color verde

4.2 ANÁLISIS MORFOMÉTRICO

4.2.1 Cuenca San Francisco. La corriente principal es el río Cormechoque con una longitud de 23838.29 m formada por los ríos La Cana, Siachoque y las quebradas Ánimas, Gacha, Tinsita, Ojo de Agua, El Encenillo, Matecana, Tuneca, El Vallado, Pozo Negro. El área de la cuenca del río Cormechoque es de 164.01 km²; puede ser catalogada como una cuenca intermedia pequeña, con poca capacidad de almacenamiento de agua. El perímetro obtenido es de 62.37 km.

La densidad de la red de drenaje para la cuenca es de 0.0019, que indica una cuenca mal drenada. Una red de drenaje con un valor bajo indica bajos volúmenes de escurrimiento y bajas velocidades del agua. Este valor muestra que la cuenca, en una tormenta, tiene poco aporte de agua a la corriente principal.

La forma de la cuenca de acuerdo con el valor obtenido aplicando la fórmula que relaciona el ancho medio de la cuenca y la longitud axial de la misma es de 0.53. Una cuenca con factor de forma inferior a 1 indica que tiene forma alargada y está sujeta a presentar crecientes, las cuales son lentas y sostenidas. El resultado para el coeficiente de compacidad es de 1.37, que revela que en el momento de picos grandes o tormentas, la cuenca no tenderá a generar grandes crecientes o inundaciones.

De acuerdo con el índice de alargamiento, la cuenca es cuadrada, 1.12. Este índice determina qué tan rápida es la reacción de la corriente principal ante precipitaciones en la cuenca. Valores cercanos a 1 indican una forma cuadrada y valores mayores a 2, una forma alargada.

La mayor parte del comportamiento hidrológico de la cuenca y las características físicas están determinadas por la topografía, ya que a mayores pendientes, mayores velocidades de agua y menor tiempo de concentración de la cuenca. La diferencia de altura definirá la temperatura y precipitación del lugar. Para la cuenca San Francisco, el rango de altitudes va desde 3.500 hasta 2.650 msnm.

La pendiente fue determinada mediante el programa Arc Gis, con base en el modelo de elevación digital y la topografía del terreno. Para esta cuenca, la pendiente media del terreno es de 8.55 % y la pendiente media del cauce principal es de 6.56 %.

4.2.2 Cuenca río Toca. La corriente principal de esta cuenca es el río Toca con una longitud de 14690.59 m, formada por el río Toca que se une con la quebrada Honda y la quebrada Chorro Blanco.

El área de la cuenca del río Toca es de 30.4 km²; catalogada como una cuenca pequeña, con poca capacidad de almacenamiento de agua. El perímetro obtenido es de 36.42 km. La densidad de la red drenaje para la cuenca es de 0.0023, lo cual significa una cuenca mal drenada, con bajos aportes de caudal a la corriente principal al momento de presentarse una tormenta.

La forma de la cuenca es alargada y está sujeta a presentar crecientes, las cuales son lentas y sostenidas. El factor de forma se obtiene aplicando la fórmula que relaciona el ancho medio de la cuenca con la longitud axial de la misma. Para el caso de esta cuenca, el valor es 0.21, que evidencia una forma alargada. El coeficiente de compacidad, que es de 1.87, denota que en momentos de picos grandes o tormentas, la cuenca no tenderá a generar grandes crecientes o inundaciones dado su carácter de alargamiento de acuerdo con el valor encontrado de 3.38. Este índice determina qué tan rápida es la reacción de la corriente principal ante precipitaciones en la cuenca.

Para la cuenca del río Toca, las altitudes van desde 3.750 a 2.650 msnm, la pendiente media del terreno es 10.87 % y la pendiente media del cauce principal es de 9.11 %.

4.2.3 Cuenca quebrada Raiba. La corriente principal de esta cuenca es la quebrada Raiba con una longitud de 12584.29 m, formada por varias corrientes sin nombre.

El área calculada para la cuenca de la quebrada Raiba es de 17.9 km², que puede ser catalogada como una cuenca pequeña con baja capacidad de almacenamiento de

agua. El perímetro de la cuenca es de 29.1 km, y la densidad de la red drenaje es de 0.0023, lo cual evidencia una cuenca mal drenada.

La forma de la cuenca, con base en la fórmula que relaciona el ancho medio de la cuenca y la longitud axial de la misma, es de 0.29. Cuando una cuenca muestra un factor de forma inferior a 1, indica que tiene una forma alargada y está sujeta a presentar crecientes lentas y sostenidas. El resultado obtenido para el coeficiente de compacidad es de 1.94, lo cual indica que en el momento de picos grandes o tormentas, la cuenca no tenderá a generar grandes crecientes o inundaciones, dado su carácter de alargamiento de acuerdo con el valor encontrado de 5.14.

Las altitudes para esta cuenca están desde 3.435 a 2.670 msnm, la pendiente media del terreno es 8.18% y la pendiente media del cauce principal es de 9.63%.

4.2.4 Cuenca quebrada La Colorada. La quebrada La Colorada es la corriente principal de esta cuenca, tiene una longitud de 10637.22 m y está formada por varias corrientes sin nombre.

El área obtenida para la cuenca de la quebrada La Colorada es de 20.9 km², que es catalogada como una cuenca pequeña con poca capacidad de almacenamiento de agua. El perímetro de la cuenca es de 23.85 km.

La densidad de la red drenaje para esta cuenca es de 0.0025, hecho que significa una cuenca mal drenada. Este valor indica que la cuenca en el momento de una tormenta tiene poco aporte de agua a la corriente principal.

La forma de la cuenca es alargada y la longitud axial de la misma es de 0.28. El resultado obtenido para el coeficiente de compacidad es 1.46, lo que señala que en momentos de picos grandes o tormentas, la cuenca no tenderá a generar grandes crecientes o inundaciones, dado su carácter de alargamiento de acuerdo con el valor encontrado de 2.23.

En la cuenca quebrada La Colorada, las altitudes están en rangos desde 3.280 a 2.685 msnm, la pendiente media del terreno es 7.2% y la pendiente media del cauce principal es de 7.4%.

4.2.5 Cuenca río Chorrera. La corriente principal de esta cuenca es el río Chorrera, con una longitud de 19219.77 m, formada por la quebrada Colorada, Los Morros, El Cucharó, El Chorro, Paso encantado, El Chuscal, La Gallinera, El Alisal, Paso de mula.

Tabla 2.1 Parámetros morfométricos de las cuencas del páramo de La Cortadera.

Cuenca	Área (km ²)	Perímetro (km)	Ancho (km)	Densidad drenaje	Coefficiente compacidad	Factor de forma	Pendiente promedio (%)	Índice de alargamiento
Río Cormecheque	164.01	62.37	12.13	0.0019	1.37	0.53	8.55	1.12
Río Toca	30.46	36.42	3.44	0.0023	1.87	0.21	10.87	3.38
Quebrada La Raiba	17.90	29.17	2.05	0.0023	1.94	0.29	8.18	5.14
Quebrada La Colorada	20.97	23.85	3.90	0.0025	1.46	0.28	7.20	2.23
Río Chorrera	67.04	45.57	8.06	0.0020	1.57	0.65	9.48	1.70

Continuación tabla 2.1

Cuenca	Cauce principal	Longitud corriente principal (km)	Longitud total corrientes (km)	Longitud axial de la cuenca (km)	Pendiente media cauce (%)	Tiempo de concentración (min)
Río Cormecheque	Río Cormecheque	23.83	309.35	17.58	6.56	172
Río Toca	Río Toca	14.69	70.45	11.82	9.11	76
Quebrada La Raiba	Quebrada La Raiba	12.58	41.20	7.84	9.63	62
Quebrada La Colorada	Quebrada La Colorada	10.63	52.01	8.57	7.40	68
Río Chorrera	Río Chorrera	19.21	133.08	10.11	7.59	120

El área obtenida para la cuenca de la quebrada La Colorada e de 67.048 km², puede ser catalogada como una cuenca pequeña con poca capacidad de almacenamiento de agua. El perímetro obtenido es de 45.57 km. La densidad de la red drenaje para esta cuenca, que es de 0.0020, revela una cuenca mal drenada.

La forma de la cuenca es alargada, de acuerdo con el resultado de aplicar la fórmula que relaciona el ancho medio de la cuenca y la longitud axial de la misma, es de 0.65. El valor obtenido para el coeficiente de compacidad es de 1.57, que indica que en el momento de picos grandes o tormentas, la cuenca no tenderá a generar grandes crecientes o inundaciones, dado su carácter de alargamiento de acuerdo con el valor encontrado de 1.7.

Para la cuenca río Chorrera, las altitudes corresponden a rangos desde 3.450 a 2.650 msnm, la pendiente media del terreno es 9.48 % y la pendiente media del cauce principal es de 7.59 %. En la Tabla 2.1 se presentan las características morfométricas de las cuencas estudiadas.

4.3 DETERMINACIÓN DE CAUDALES MÍNIMOS Y MEDIOS

El método utilizado para hallar caudales fue un modelo lluvia–escorrentía, denominado método racional, el cual se basa en:

Mediciones indirectas de precipitación, basadas en curvas IDF (intensidad–duración–frecuencia), ya establecidas.

Tiempo de concentración de la cuenca: se halla utilizando los valores de pendiente media de la cuenca, la longitud axial y el coeficiente de escorrentía establecido para dicho terreno.

Valores de área de la cuenca aportante: se obtienen con el fin de establecer un valor de caudal máximo pico a la salida o desembocadura de la cuenca.

$$Q = (C * I * A) * 2.78$$

C = Coeficiente escorrentía

I = Intensidad (mm·h⁻¹)

A = Área (ha)

El valor de 2.78, es utilizado con el fin de establecer unidades en litros por segundo (lt·s⁻¹), usando una intensidad (I) en (mm·h⁻¹) y el área en (ha).

4.3.1 Valores de caudal. Para determinar los *caudales pico a la salida de la cuenca*, se utilizó la metodología que consiste en hallar el caudal para periodos de retorno de 5, 10, 20, 50 y 100 años. En el momento de establecer la intensidad por medio de

las curvas IDF, cada curva se graficó con el fin de encontrar la ecuación y generar la línea de tendencia más adecuada para su comportamiento, para disminuir la probabilidad de error.

Para los valores de *caudales medios y mínimos* se utilizó el método racional, basado en la información de precipitación de la estación más cercana a la cuenca por estudiar. Dicha precipitación se convirtió en intensidad de precipitación, para poder aplicar el método racional normalmente.

4.4 ANÁLISIS DE CAUDALES

Con el propósito de conocer la disponibilidad del recurso hídrico en la cuenca del páramo de La Cortadera correspondiente al municipio de Toca, se ubicaron las estaciones limnimétricas en la zona de estudio con datos disponibles. En la Tabla 2.2 se presenta la información de las estaciones utilizadas.

Tabla 2.2 Estaciones limnimétricas en el área de influencia de la cuenca del páramo de La Cortadera

Cuenca	M/pio	Nombre	Coord. X	Coord. Y	Información		msnm
Río Cormechoque	Toca	San Cristóbal	1095739.00	1108821.16	1991	2010	2700
Río Chorrera	Toca	Chorrera	1105102.81	1111551.80	1992	2010	2700

4.4.1 Caudales río Cormechoque. Estación San Francisco. En la salida del río Cormechoque y en el borde de la represa de La Copa se encuentra ubicada la Estación Limnimétrica San Francisco. Se utilizaron los registros de caudales desde el año 1991 al 2010. En la Figura 2.2 se presentan los regímenes de caudales medios mensuales registrados.

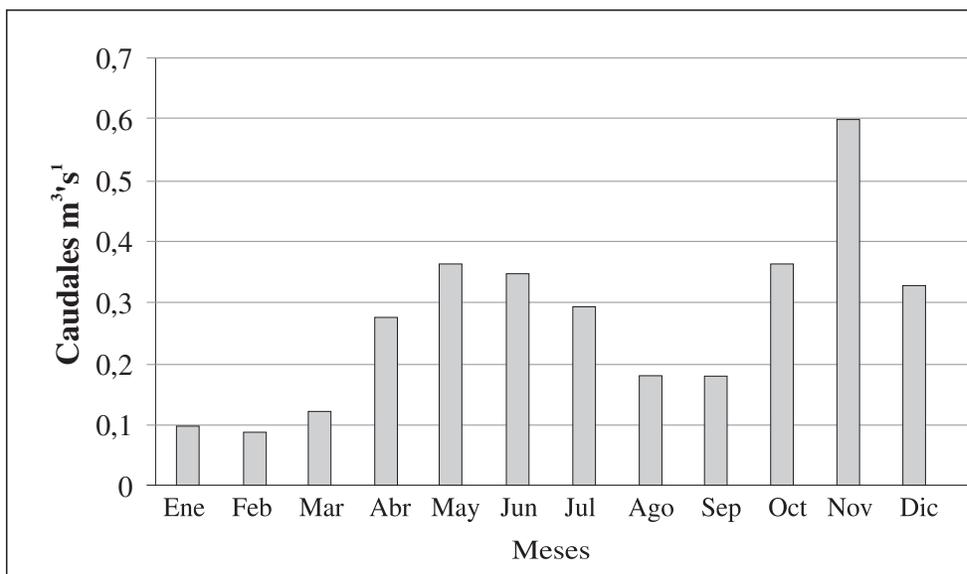


Figura 2.2 Caudales medios mensuales de la Estación San Francisco.

Como se puede apreciar, existe un régimen bimodal con dos periodos lluviosos en los meses de abril a mayo y octubre a noviembre, siendo el mes de julio el de valores de precipitación más altos. Los caudales no descienden inmediatamente pasada la temporada de lluvias, sino que se mantienen; es probable que los acuíferos que existen en la región aumenten durante la época de lluvias suministrando excedentes de agua a los ríos después de terminada la temporada.

4.4.2 Caudales río Chorrera. Estación Chorrera. En la parte intermedia del río Chorrera se encuentra la Estación Limnimétrica Chorrera. Para el análisis se utilizaron datos de caudales desde el año 1992 al 2010. En la Figura 2.3 se encuentran los regímenes de caudales medios mensuales registrados.

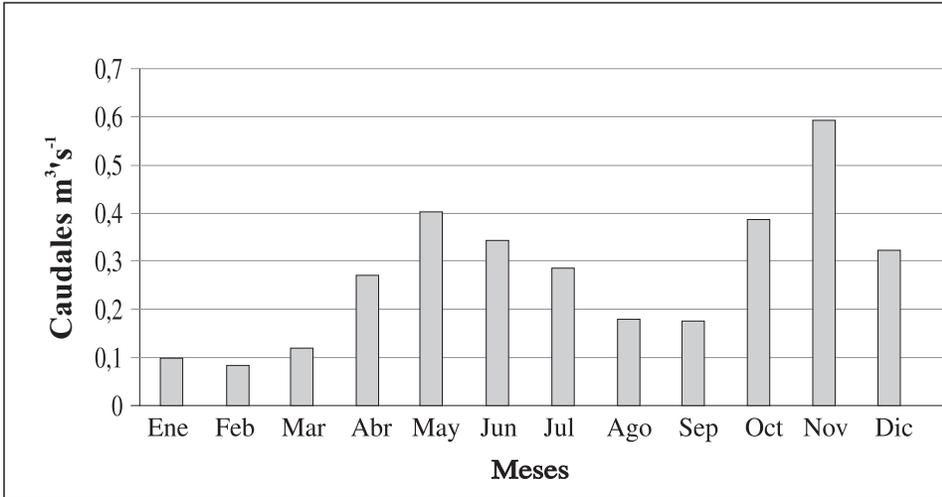


Figura 2.3 Caudales medios mensuales de la Estación Chorrera.

Los reportes de estación evidencian un régimen bimodal con dos periodos de lluvias en los meses de abril a junio y octubre a noviembre, siendo este último mes el de mayores precipitaciones. Los caudales no se mantienen de un período a otro, probablemente existe un cambio en las coberturas vegetales que disminuyen la producción de agua en los acuíferos. Además es una corriente de orden bajo, comparada con el río Cormechoque.

4.5 CÁLCULO DE LA PRECIPITACIÓN MEDIA POR EL MÉTODO DE POLÍGONOS DE THIESSEN

Los polígonos de Thiessen son una manera sencilla para la interpolación, que consiste en asignar a cada punto no muestreado el valor de su punto de control más cercano, usando polígonos de proximidad. Esta técnica fue introducida por Thiessen (1911), quien estaba interesado en averiguar cómo usar los registros pluviométricos para estimar la precipitación total una región. La ventaja de los polígonos Thiessen es el enfoque en la gran simplicidad, pero en realidad no producen un campo de estimación continuo; en consecuencia, al procesamiento de datos nominales de esta manera no se le suele llamar interpolación (Ruelland, Bardin, Billen & Servat, 2008).

Para calcular el promedio de la precipitación en un área, una práctica común es sumar los valores registrados en cada estación dentro del área y dividirlo en la suma del número de estaciones consideradas. Según Thiessen (1911), el hecho de que la precipitación varía considerablemente a lo largo no solo de grandes áreas, sino también en áreas muy limitadas, es una cuestión de observación común.

Para el cálculo de los caudales medios de las cuencas identificadas, se utilizaron los datos de valores totales mensuales de precipitación (mm) de las estaciones que tienen influencia en la cuenca del páramo de La Cortadera. En la Tabla 2.3 se presentan los datos de las estaciones utilizadas.

Los datos de las estaciones climatológicas utilizadas en el estudio hidrológico son los mismos empleados en el capítulo anterior en el proceso de caracterización del comportamiento de parámetros climáticos en la región (véase Figura 1.1).

Tabla 2.3 Estaciones climatológicas utilizadas.

Municipio	Estación	Tipo	Coord. X	Coord. Y	Período de tiempo (años)		Elevación (msnm)
					1957	2011	
Siachoque	Siachoque	PM ¹	1091697.08	1101851.51	1957	2011	2720
Pesca	Pesca	PG ²	1112014.34	1101882.85	1957	2011	2678
Oicatá	El Encanto	PM	1084683.14	1110746.15	1992	2011	2645
Chivatá	Col Agrop	PM	1090231.02	1105223.81	1992	2011	2900
Tuta	San Antonio	PM	1093903.54	1119975.21	1971	2011	2580
	Los Azulejos	PG	1097602.18	1116294.13	1976	2011	2780
Toca	El Garrocho	PM	1105216.23	1113701.17	1974	2011	2836
	Casa Amarilla	PM	1102776.22	1103711.14	1974	2011	3200
	La Copa	CO ³	1097221.62	1112919.19	1992	2011	2700
	San Cristóbal	ME ⁴	1099073.93	1109235.38	1971	2011	2700
Soracá	Pila La Fca	PM	1086156.17	1101844.05	1992	2011	2873
Rondón	Rondón	CO	1097264.61	1083426.77	1991	2011	2120

La ponderación de la precipitación media polígonos de Thiessen, se muestra en la Figura 2.4.

¹ **PM:** Estación pluviométrica

² **PG:** Estación pluviográfica

³ **CO:** Estación climatológica ordinaria

⁴ **ME:** Estación meteorológica

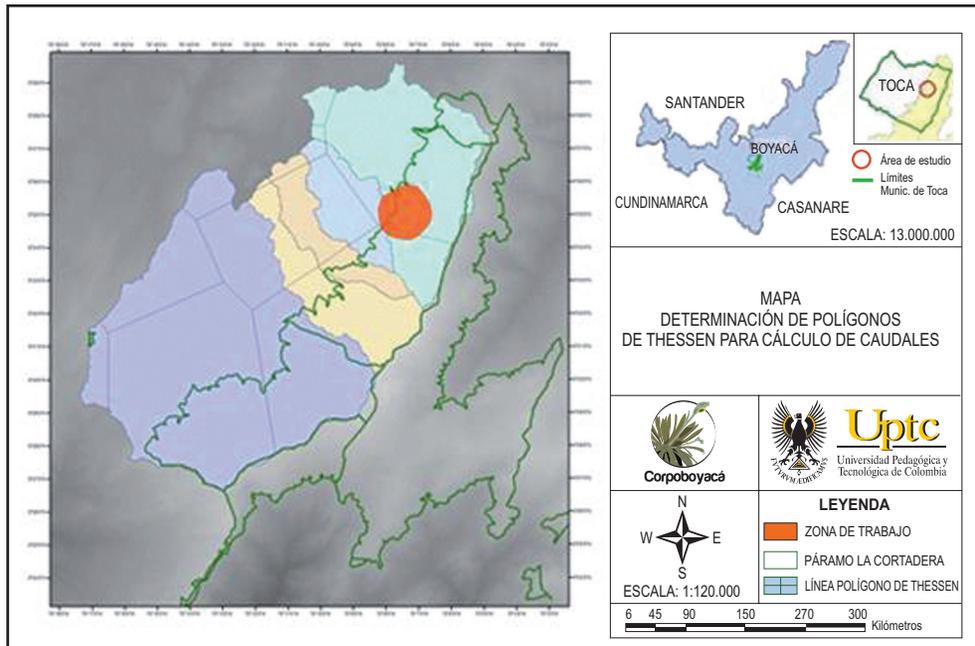


Figura 2.4 Polígonos de Thiessen.

5. CONCLUSIONES

Las cuencas identificadas para la zona de estudio se caracterizan por poseer un área pequeña con caudales base, sostenidos durante todas las épocas del año.

Existe un régimen bimodal con dos periodos lluviosos en los meses de abril a mayo y octubre a noviembre, siendo el mes de julio el de mayor valor. Los caudales no descienden inmediatamente pasada la temporada de lluvias, sino que se mantienen; probablemente la presencia de acuíferos en la región aumenta durante la época de lluvias, suministrando excedentes de agua a los ríos después de terminada la temporada.

Se observa una reducción de los caudales en las épocas secas, producto de la baja precipitación y del aumento en el cambio de coberturas vegetales de la zona, aspectos que contribuyen con el descenso en el almacenamiento de agua en los suelos.

La precipitación media se encuentra entre 550 y 900 mm·año⁻¹, lo que confirma que es un área con baja precipitación. El rendimiento hidrológico corresponde al almacenamiento de agua en el suelo, gracias a sus características de retención de agua.

A pesar de la destrucción acelerada de las coberturas vegetales de bosque altoandino y de páramo, aún se registran caudales altos medidos en las estaciones limnimétricas.

REFERENCIAS

- Ataroff, M. y F. Rada. 2000. «Deforestation Impact on Water Dynamics in a Venezuelan Andean Cloud Forest». *Ambio* 29: 440-444.
- Buytaert, W., Célleri, R., Bièvre, B., Cisneros, F., Wyseure, G., Deckers, J. & Hofstede, R. (2006). Human impact on the hydrology of the Andean páramos. *Earth-Science Reviews*, 79, 53–72. Retrieved from http://paramo.cc.ic.ac.uk/pubs/2006_ESR.pdf; consulta: julio de 2012.
- Buytaert, W. & Beven, K. (2011). Models as multiple working hypotheses: hydrological simulation of tropical alpine wetlands. *Hydrological Processes*, 25(11), 1784-1799.
- Bruijnzeel, L.A. & Hamilton, L.S. (2000). Decision time for cloud forest. Water related issues and problems of humid tropics and other warm humid regions. *WWP, IHP, Humid Tropics Programme Series*, (13).
- Cereceda, P. (2000). Los atrapa nieblas, tecnología alternativa para el desarrollo rural. *Revista Medio Ambiente y Desarrollo Cipma*, 16(4), 51-56.
- Chen, J. & Wu, Y. (2012). Advancing representation of hydrologic processes in the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) through integration of the TOPographic MODEL (TOPMODEL) features. *Journal of Hydrology*, 420–421, 319–328.
- Díaz, M., Navarrete, J. & Suárez, T. (2005). Páramos hidrosistemas sensibles. *Revista de Ingeniería*, 22, 64-75. Recuperado de <https://revistaing.uniandes.edu.co/pdf/A8%2022.pdf>;
- Hofstede, R., Segarra, P. & Mena, P. (2003). *Los páramos del mundo. Proyecto Atlas Mundial de los Páramos*. Quito: Global Peatland Initiative/NC-.IUCNE/EcoCiencia.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM (2010). *Estudio nacional del agua 2010*. Bogotá D.C. Recuperado de <https://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/Bvirtual/021888/021888.htm>; consulta abril de 2013.
- Kapelle, M. & Horn, S. P. (2005). Hacia una breve descripción del concepto páramo. En Instituto Nacional de Biodiversidad -INBio (ed.). *Páramos de Costa Rica*. (pp. 29-36). Santo Domingo de Heredia: INBio.
- Lombana, C. (2006). *Modelación y generación de estrategias de intervención de cuencas paramunas. Caso de estudio cuencas abastecedoras de agua potable, páramo de Chingaza*. Tesis de pregrado. Universidad de los Andes, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental. Bogotá, Colombia. 114 p.

- Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial MAVDT. (2003). *Resolución 0839 del 1 de agosto de 2003 “Por la cual se establecen los términos de referencia para la elaboración del Estudio sobre el Estado Actual de Páramos y del Plan de Manejo Ambiental de los Páramos”*. Bogotá D.C.: Secretaría General de la Alcaldía Mayor de Bogotá D.C. Recuperado de <http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=9149>;
- Morales, M., Otero, J., Van der Hammen, T., Torres, A., Cadena, C., Pedraza, C., Rodríguez, N., Franco, C., Betancourt, J.C., Olaya, E., Posada, E. & Cárdenas, L. (2007). *Atlas de Páramos de Colombia*. Bogotá, D.C.: Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander Von Humboldt. 208 p.
- Mulligan, M. (2010). Modeling the tropics-wide extent and distribution of cloud forest and cloud forest loss, with implications for conservation priority. In L.A. Bruijnzeel, F.N. Scatena & L.S. Hamilton (eds.) *Tropical montane cloud forests: science for conservation and management* (pp. 14-38). Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Mulungu, D. & Minishi, S. (2007). Simiyu River catchment parameterization using SWAT model. *Physics and Chemistry of the Earth*, 32, 1032–1039.
- Navarrete, J. (2004). *Hidrología de páramos, modelación de la cuenca alta del río Blanco con AVSWAT 2000*. Tesis de maestría. Universidad de los Andes, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental. Bogotá, Colombia.
- Oeurng, C., Sauvage, S. & Sánchez, J.M. (2011). Assessment of hydrology, sediment and particulate organic carbon yield in a large agricultural catchment using the SWAT model. *Journal of Hydrology*, 401(3-4), 145–153.
- Pisinaras, V., Petalas, C., Gikas, G., Gemetzi, A. & Tsihrintzis, V. (2010). Hydrological and water quality modeling in a medium-sized basin using the Soil and Water Assessment Tool (SWAT). *Desalination*, 250(1.1), 274–286.
- Ritter, A., Regalado, C.M., Aschan, G. & Gómez, L.A. (2005). Contribución hídrica de la captación de niebla al balance de un bosque de Laurisilva en el Parque Nacional de Garajonay. En J. Samper & A. Paz (eds). *Memorias VII Jornadas de investigación en la zona no saturada del suelo*. (pp. 351-358). Universidad da Coruña.
- Rivera, D. & Rodríguez, C. (2011). *Guía divulgativa de criterios para la delimitación de páramos de Colombia*. Bogotá: Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial e Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. 68 p.

- Ruelland, D., Bardin, S., Billen, G. & Servat, E. (2008). Sensitivity of a lumped and semi-distributed hydrological model to several methods of rainfall interpolation on a large basin in West Africa. *Journal of Hydrology*, 361(1-2), 96– 117.
- Rouholahnejad, E., Abbaspour, K.C., Vejdani, M., Srinivasan, R., Schulin, R. & Lehmann, A. (2012). A parallelization framework for calibration of hydrological models. *Environmental Modelling & Software*, 31, 28-36.
- Sáenz, J.A., Domínguez, F. & Díaz-Granados, M. (2001). Needs in the quantification of paramo ecosystems hydrology. Applicable model proposal. In *Proceedings of The Annual Agu Hydrology Days* (pp.198-210). Hydrology Days Annual Meeting; 21st, Hydrology days.
- Schuol, J., Abbaspour, K., Srinivasanand, R. & Yang, J. (2008). Estimation of freshwater availability in the West African sub-continent using the SWAT hydrologic Model. *Journal of Hydrology*, 352(1-2), 30-49.
- Song, L. & Zhang, J. (2012). Hydrological Response to Climate Change in Beijiang River Basin Based on the SWAT Model. International Conference on Modern Hydraulic Engineering. *Procedia Engineering*, 28, 241–245.
- Strauch, M., Bernhofer, C., Koide, S., Volk, M., Lorz, C. & Makeschin, F. (2012). Using precipitation data ensemble for uncertainty analysis in SWAT streamflow simulation. *Journal of Hydrology*, 414–415(11), 413–424.
- Thiessen, A.H. (1911). Precipitation averages for large areas. *Mon. Weather Rev.* 39, 1082–1084. Retrieved from <http://docs.lib.noaa.gov/rescue/mwr/039/mwr-039-07-1082b.pdf>;
- Tobón, C. (2009, mayo). *Los bosques andinos y el agua*. Serie investigación y sistematización No. 4. Quito: Programa Regional para la Gestión Social de Ecosistemas Forestales Andinos ECOBONA- INTERCOOPERATION, CONDESAN. 122 p. Recuperado de <http://www.bosquesandinos.info/ECOBONA/Bosques,%20final-web.pdf>;
- Uribe, R. N. & Quintero, M. (2011). *Aplicación del modelo hidrológico SWAT a la cuenca del río Cañete*. Lima, Perú: Centro Internacional de Agricultura Tropical CIAT.

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

o de vegetación para detectar cambios en los cultivos debidos a la acumulación de biomasa, cambios inducidos por la apariencia, desarrollo de estructuras reproductivas y comienzo de periodos de crecimiento. Para este estudio se utilizó el índice de vegetación EVI (Enhanced Vegetation Index, por sus siglas en inglés), que será explicado en secciones posteriores.

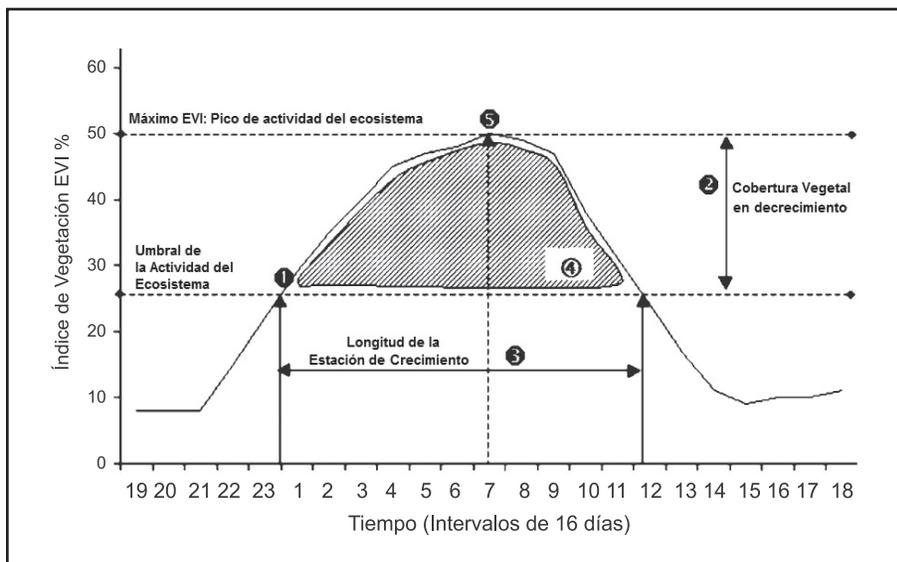


Figura 3.1. Indicadores fenológicos teóricos que describen el cambio en índice de vegetación.

(1) Inicio de la estación de crecimiento; (2) Máximo rango de índice de vegetación EVI (o amplitud de EVI); (3) longitud de la estación de crecimiento; (4) área debajo de la curva de crecimiento de vegetación; (5) fecha del máximo valor de EVI.

Fuente: adaptado de Lupo et ál. (2005).

2.4.2 Firma espectral. Con el fin de poder analizar e interpretar el comportamiento espectral de una superficie, es necesario realizar medidas radiométricas en el laboratorio o en campo (imágenes satelitales, imágenes aéreas o espectralradiómetros). A partir de dichas medidas es posible determinar la relación entre la respuesta de la superficie en estudio y las características del objeto observado (Pinilla, 1995). La firma espectral es el comportamiento de la radiación electromagnética reflejada por una superficie, y en teledetección es un indicador efectivo del tipo de cobertura existente (bosques, suelos cultivados, láminas de agua, entre otros), mediante la energía que estas reflejan y emiten.

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:

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

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 sensitivo 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.

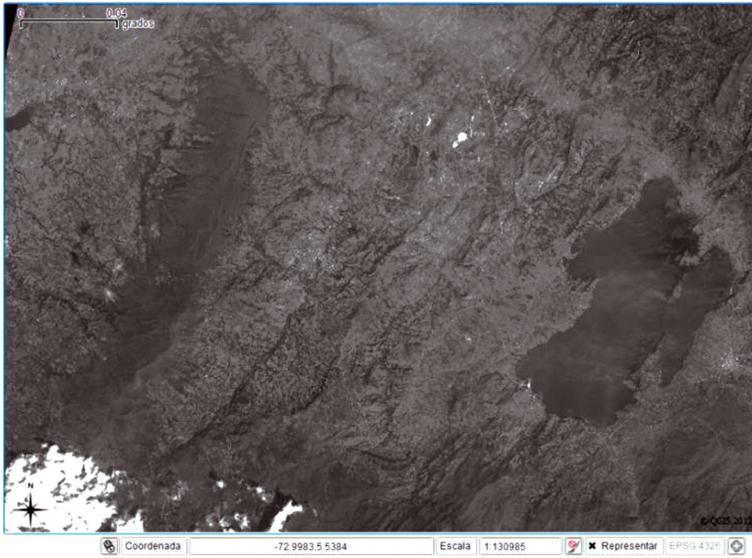


Figura 3.3 Imagen SPOT del área de estudio.



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.

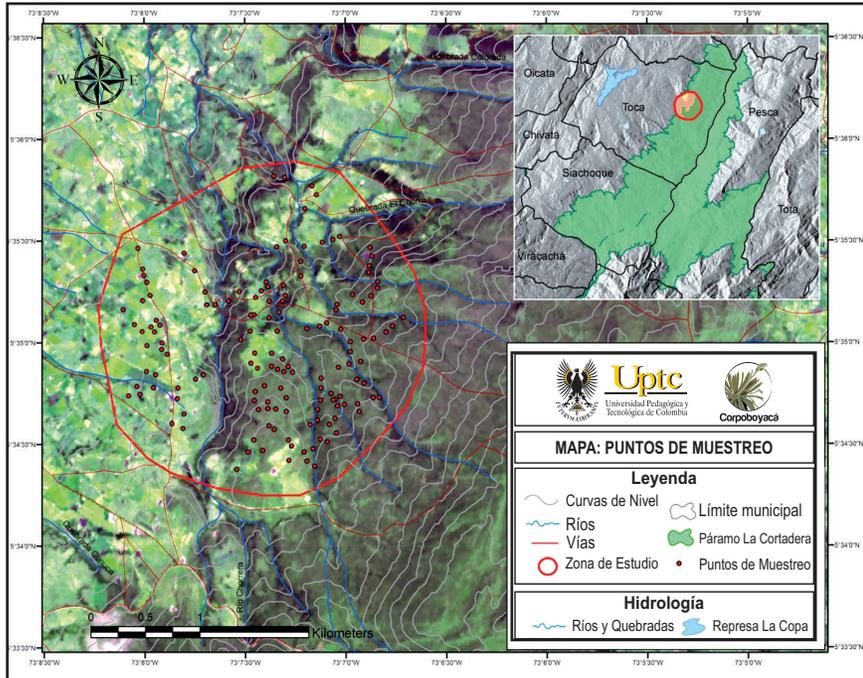


Figura 3.5 Puntos de muestreo para toma de muestras de CO y pH .

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

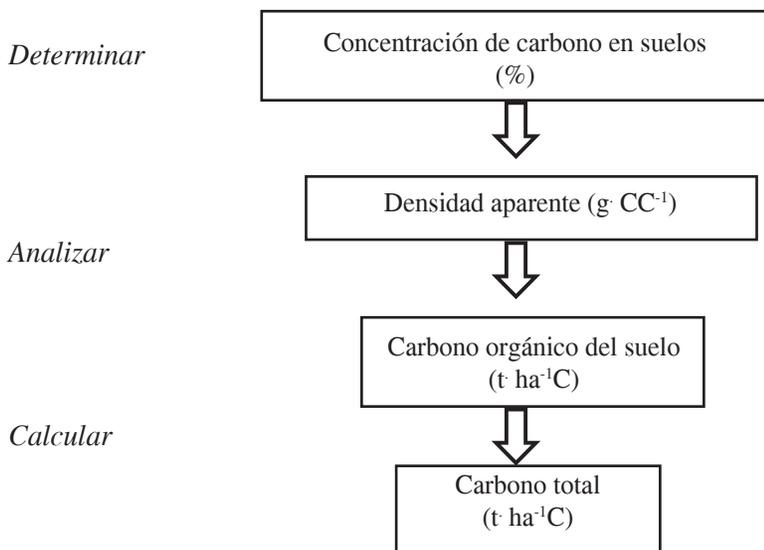


Figura 3.6 Método para determinar el contenido de Carbono Orgánico en el Suelo (COS).

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.

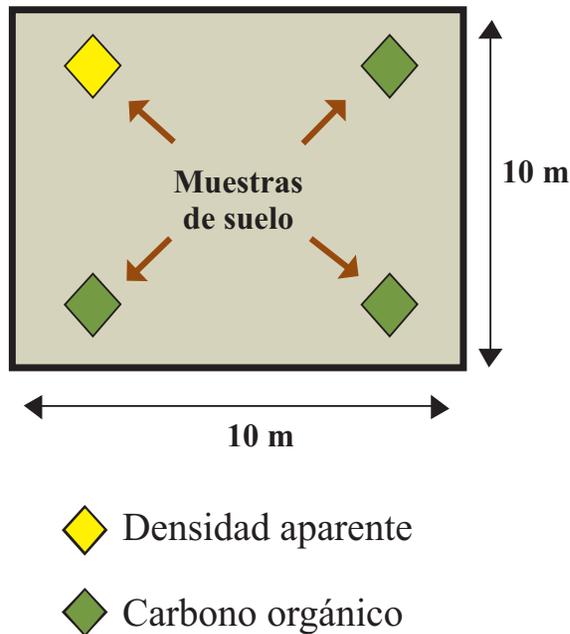


Figura 3.7 Diseño de toma de muestras en PPM 10 m X 10 m.

Fuente: adaptado de Rüginitz 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.

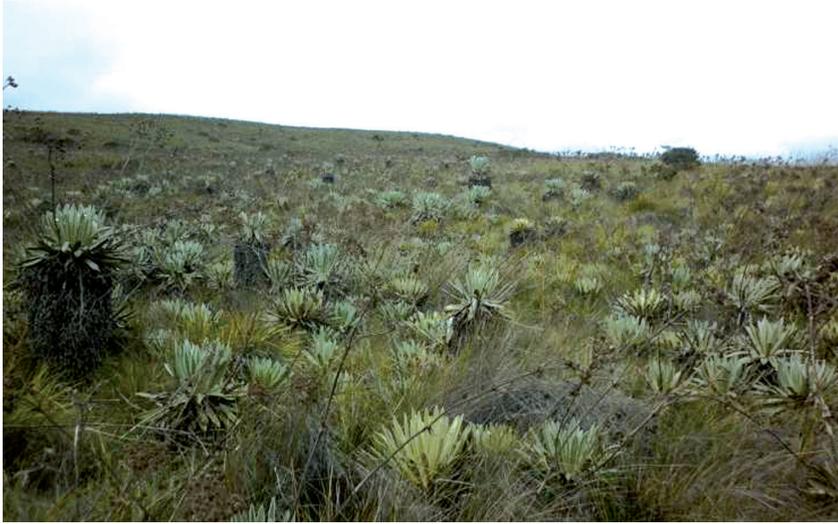


Figura 3.9 Sitio de muestro para PPM 2 - Área en recuperación.



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

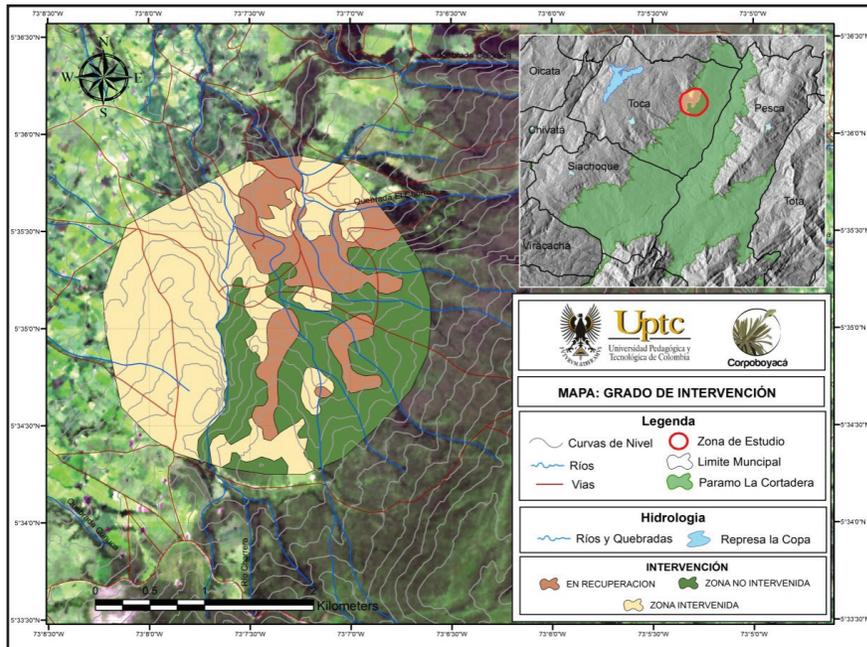


Figura 3.11 Zonificación de áreas de muestreo.

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:

- Pesar los cilindros e identificarlos como peso 1 (P1).
- Preparar la superficie del suelo (que esté lisa) a una profundidad de 15 cm.
- 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.

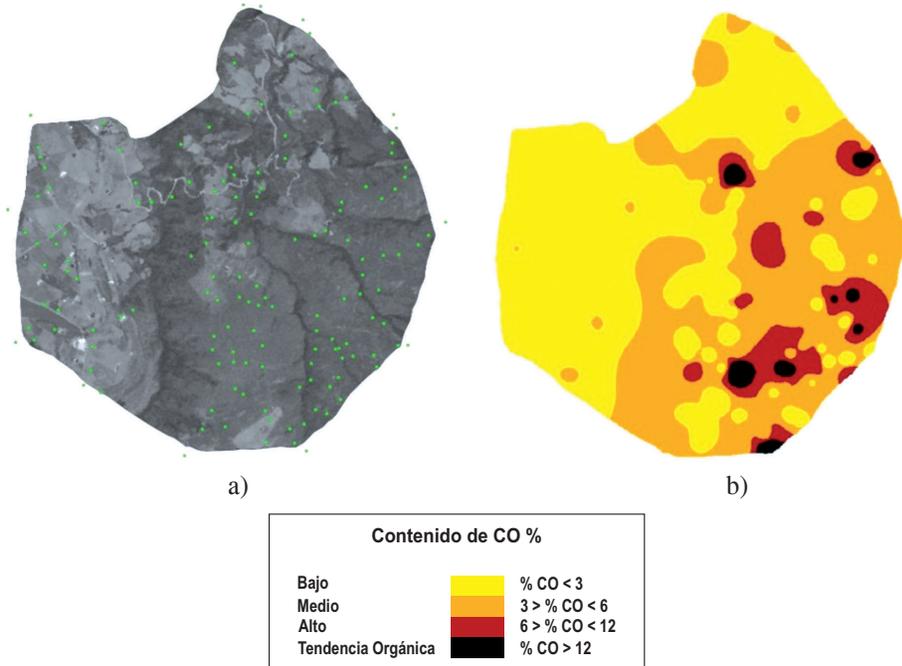


Figura 3.12 Interpolación de datos de carbono orgánico a profundidades de 0 a 15 cm. a) Imagen pancromática y muestras de campo, b) Ponderación Inversa a la Distancia (IDW).

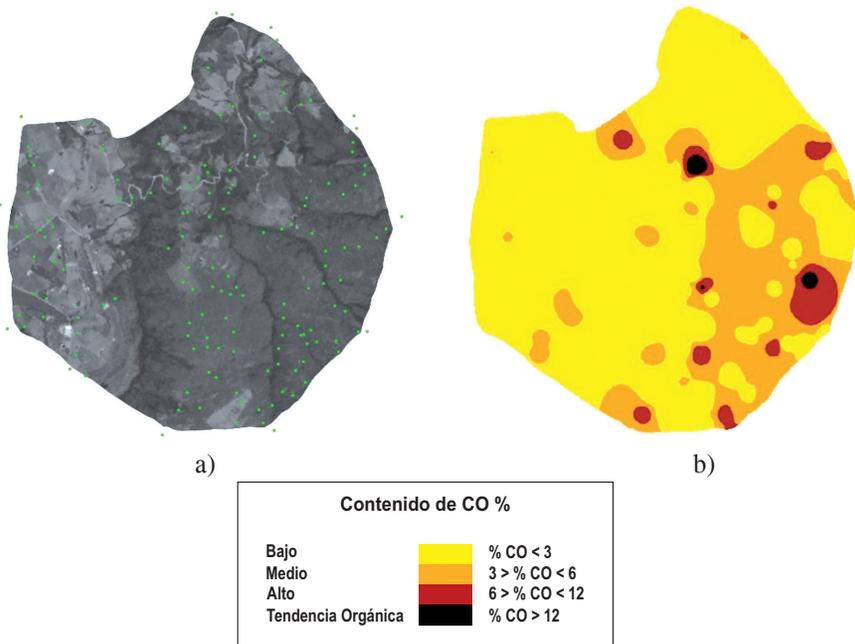


Figura 3.13 Interpolación de datos de carbono orgánico a profundidades de 15 a 30 cm. a) Imagen pancromática y muestras de campo, b) Ponderación Inversa a la Distancia (IDW).

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.

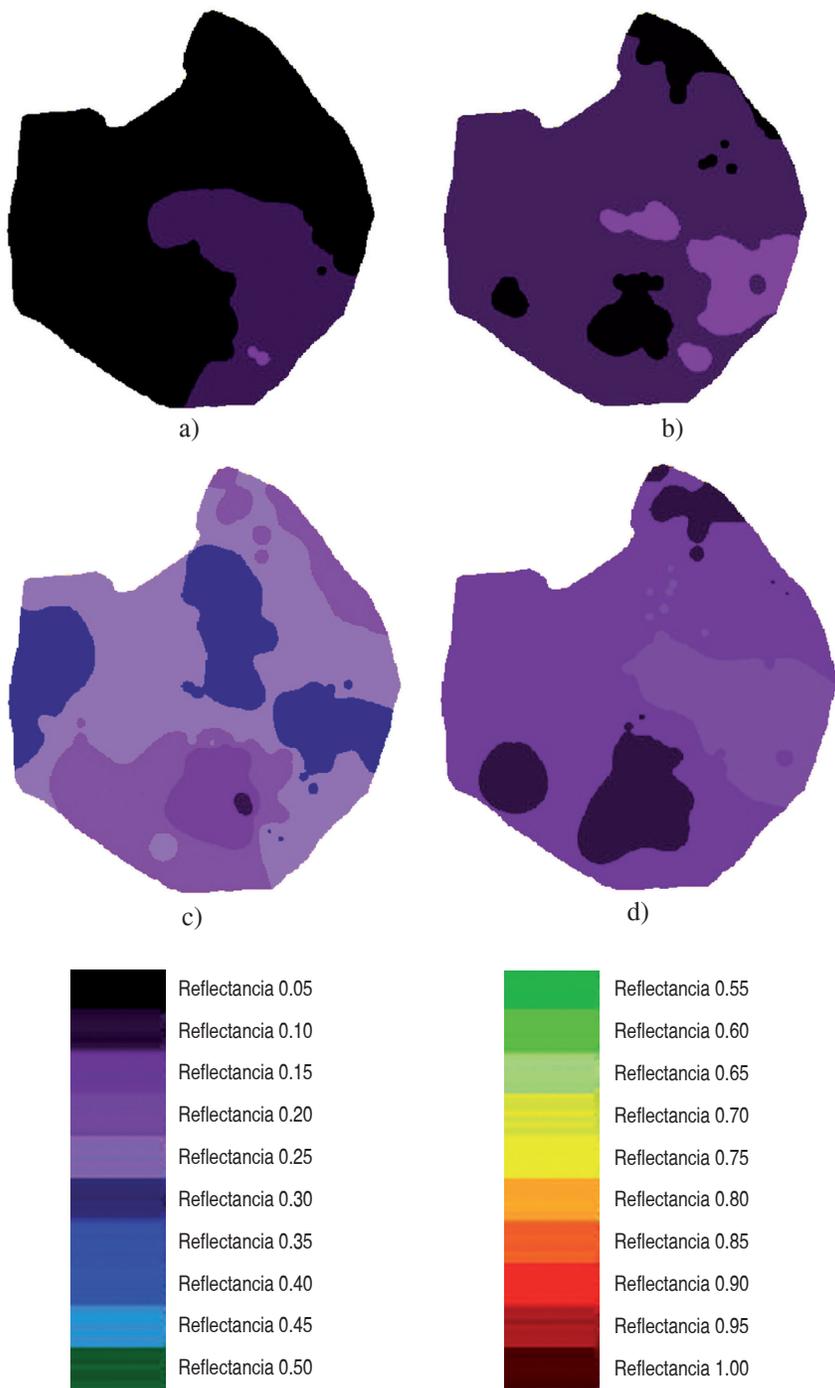


Figura 3.14 Bandas espectrales del producto MODIS. a) Banda espectral azul, b) banda espectral roja, c) banda espectral del infrarrojo cercano y d) banda espectral del infrarrojo medio.

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

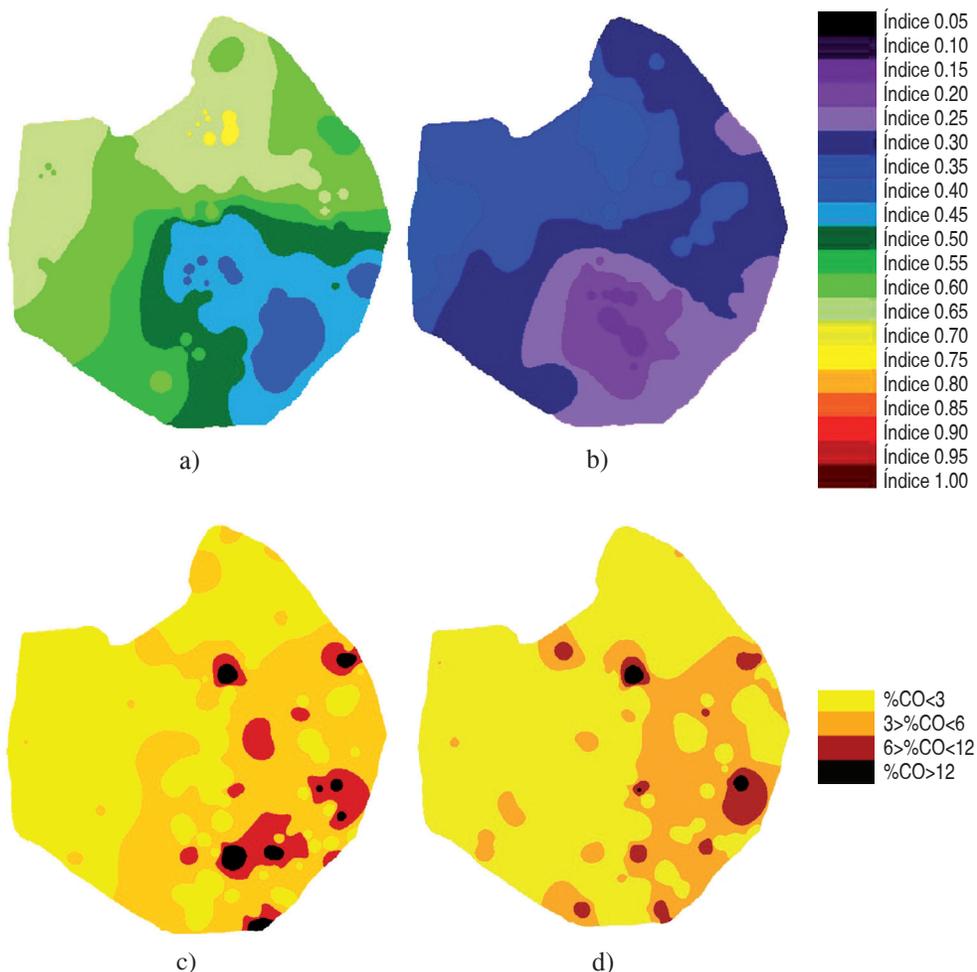


Figura 3.15 Índices de vegetación del producto MODIS. a) Índice de vegetación NDVI, b) índice de vegetación para coberturas boscosas EVI, c) mapa de carbono orgánico 0-15cm, d) mapa de carbono orgánico 15-30cm.

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

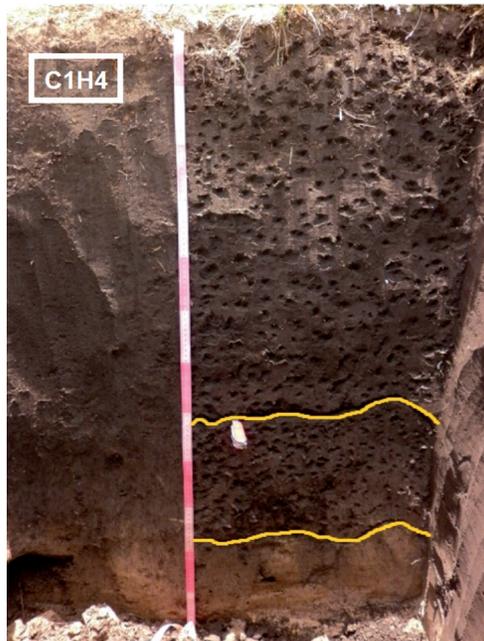


Figura 3.16 Perfil modal del Humic Dystrustepts.

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.

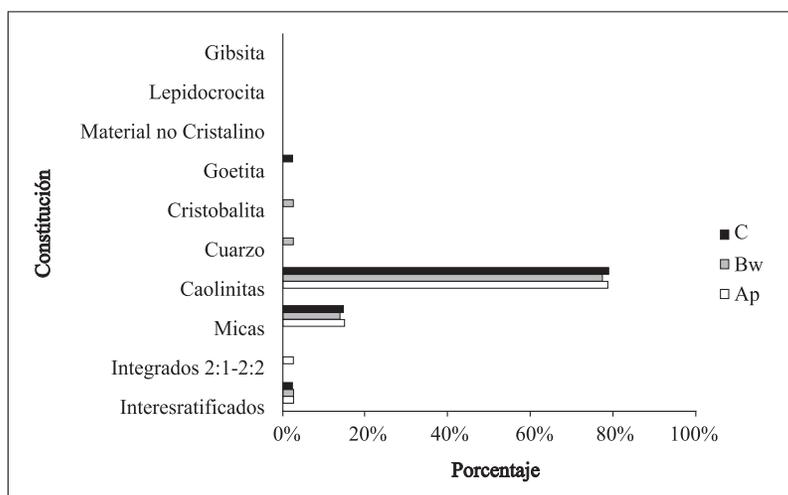


Figura 3.17 Representación semicuantitativa de la fracción mineral arcillosa (Difracción de rayos X) del Humic Dystrustepts.

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

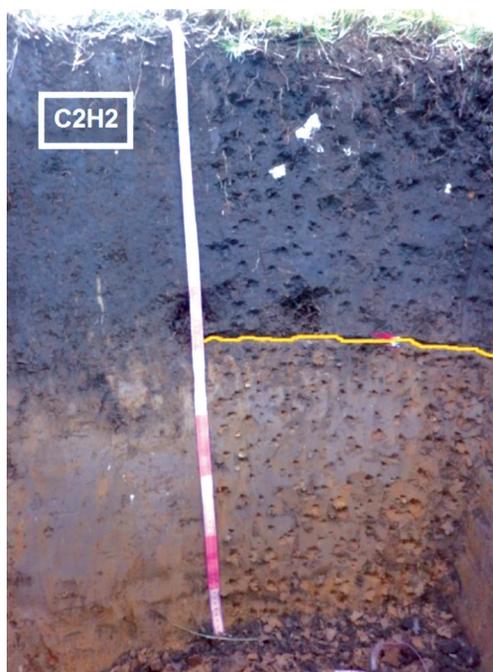


Figura 3.18 Perfil modal del Oxic Humustepts.

Tabla 3.9 Descripción general del Oxíc Humustepts

OXIC HUMUSTEPS	
Taxonomía:	Oxíc 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).

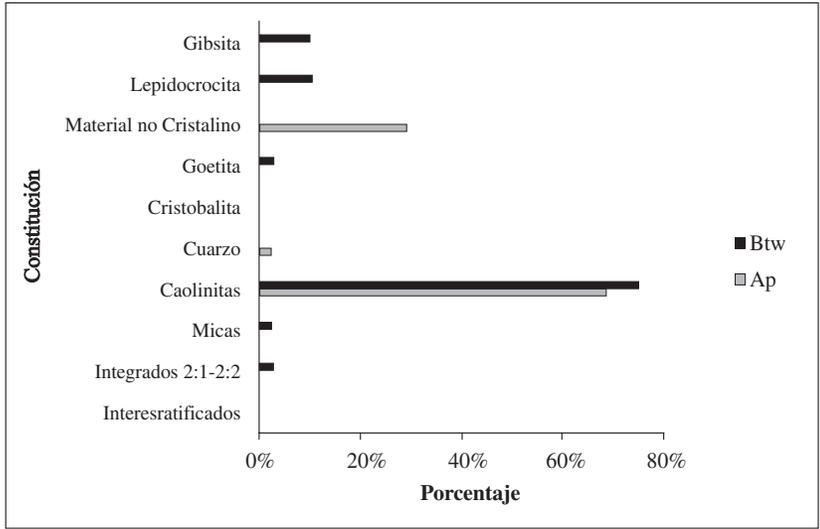


Figura 3.19 Representación semicuantitativa de la fracción mineral arcillosa (difracción de rayos X) del Oxic Humustepts.

3. Typic Ustifolists. Familia Dísica e Isofrígida

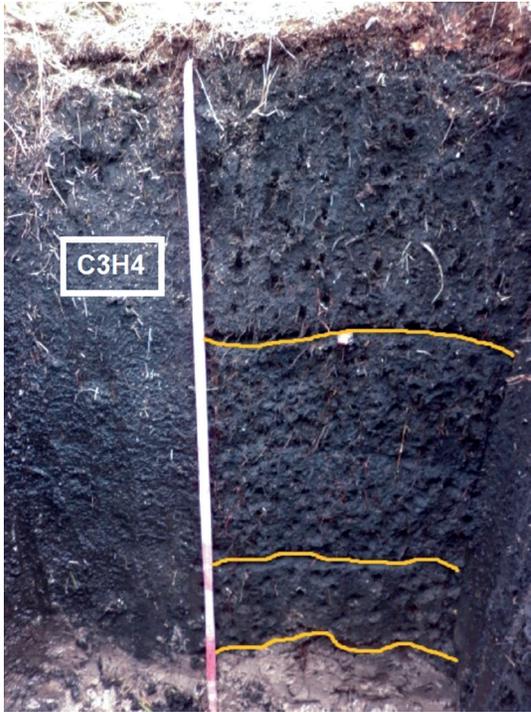


Figura 3.20 Perfil modal del Typic Ustifolists

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.

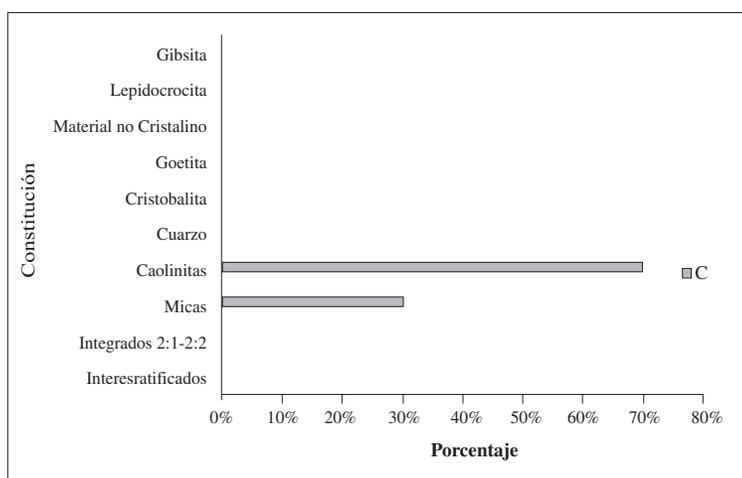


Figura 3.21 Representación semicuantitativa de la fracción mineral arcillosa (difracción de rayos X) de Typic Ustifolists. *C. Está relacionado con el material geológico.

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

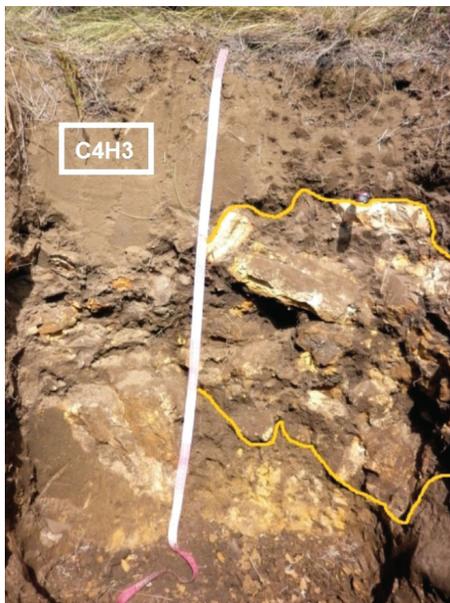


Figura 3.22 Perfil modal del Lithic Ustorthents.

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 USTORTHENTS	
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.

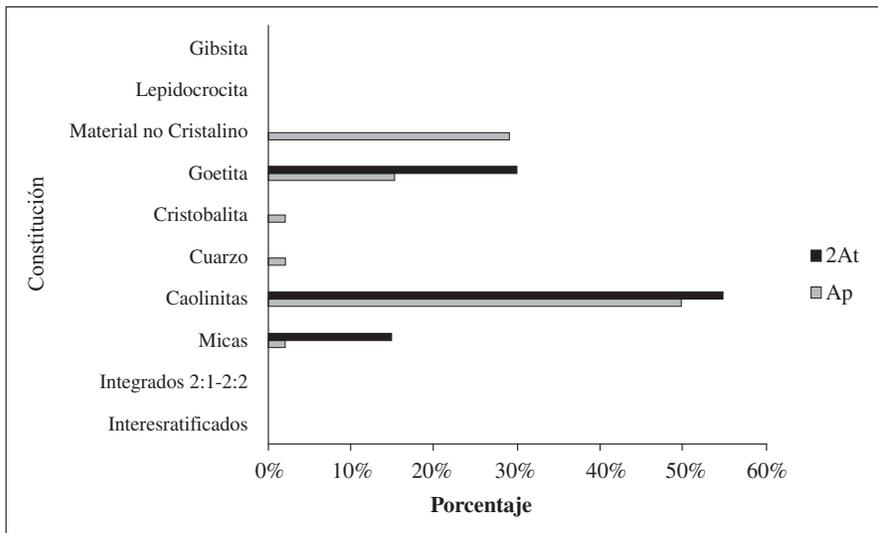


Figura 3.23 Representación semicuantitativa de la fracción mineral arcillosa (difracción de rayos X) de Lithic Ustorthents.

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 quemas, 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).

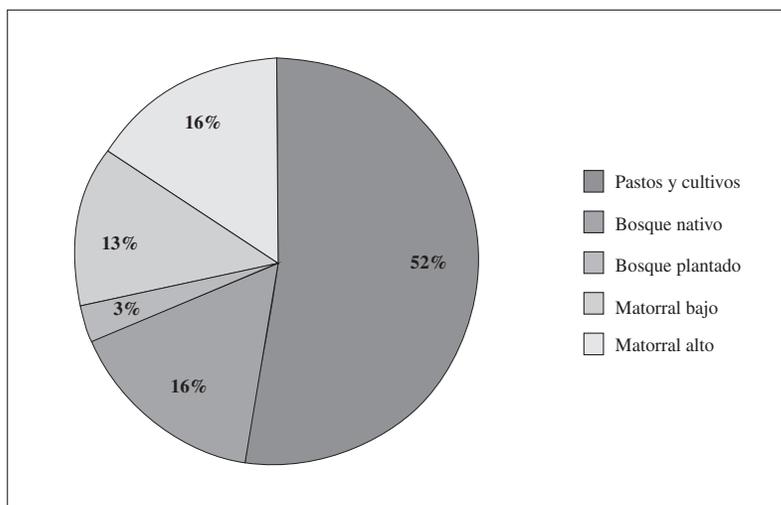


Figura 3.24 Unidades de vegetación predominantes.

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).

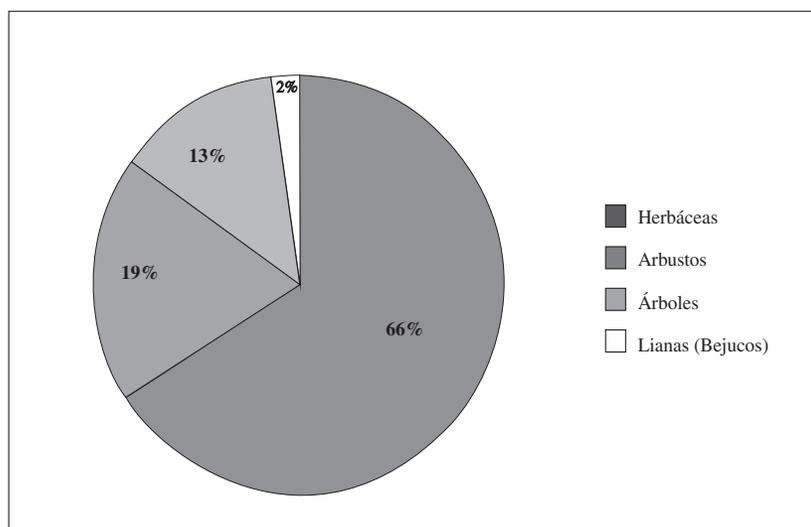


Figura 3.25 Biotipos predominantes.

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).

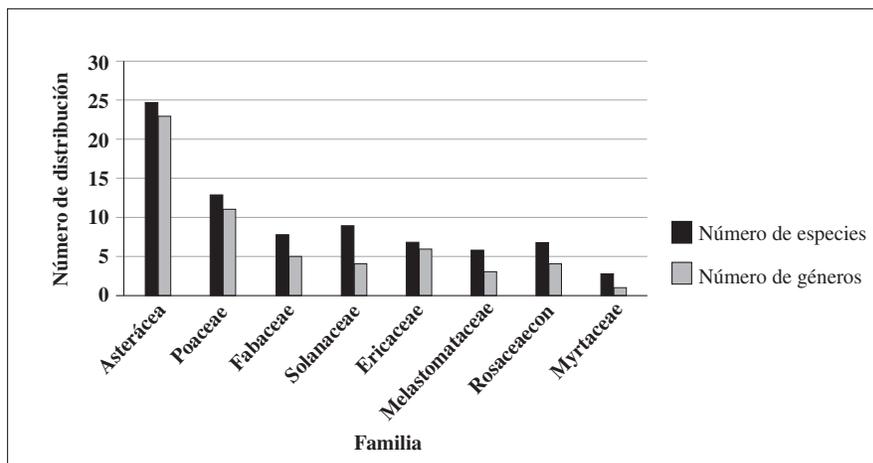


Figura 3.26 Familias botánicas con mayor número de especies.

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).

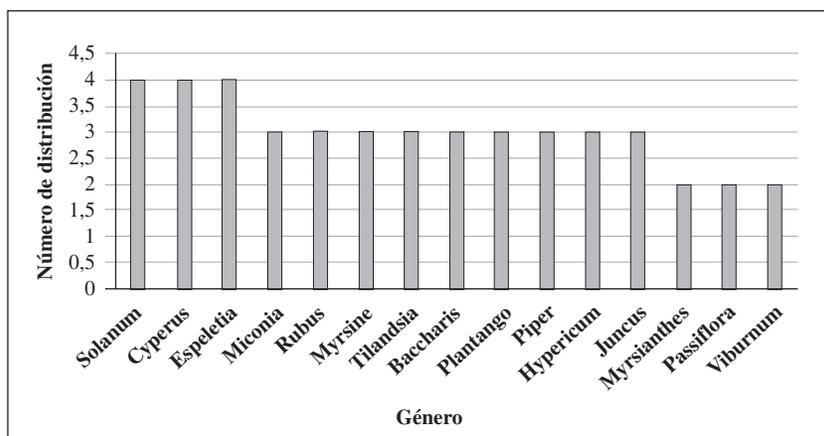


Figura 3.27 Géneros registrados.

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).

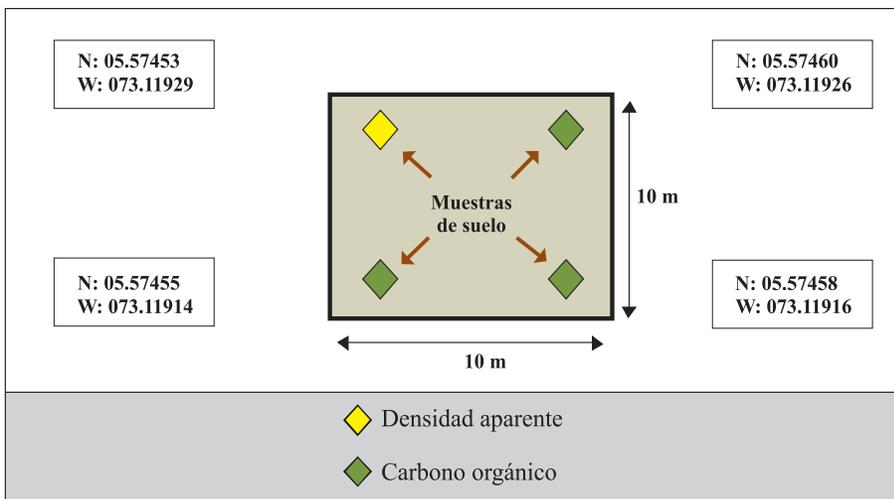


Figura 3.28 Esquema PPM 1 - Área no intervenida a 3.187 msnm.

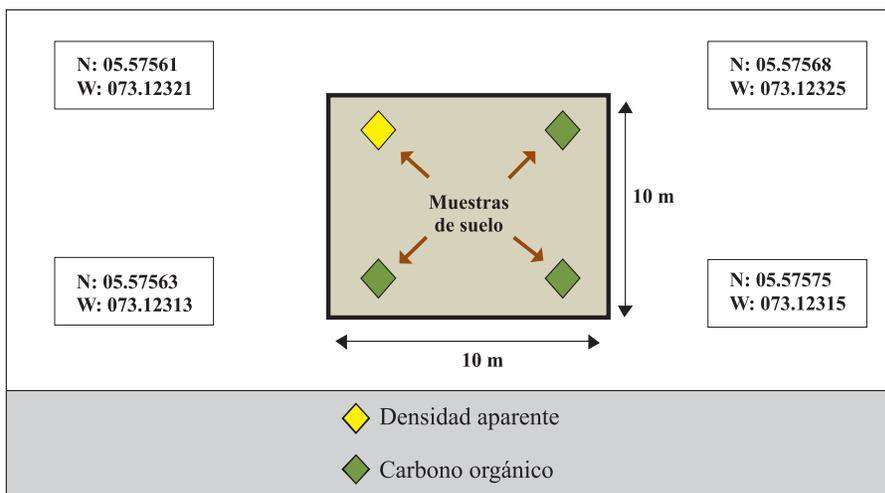


Figura 3.29 Esquema de PPM 2 - Área en recuperación a 3.251 msnm.

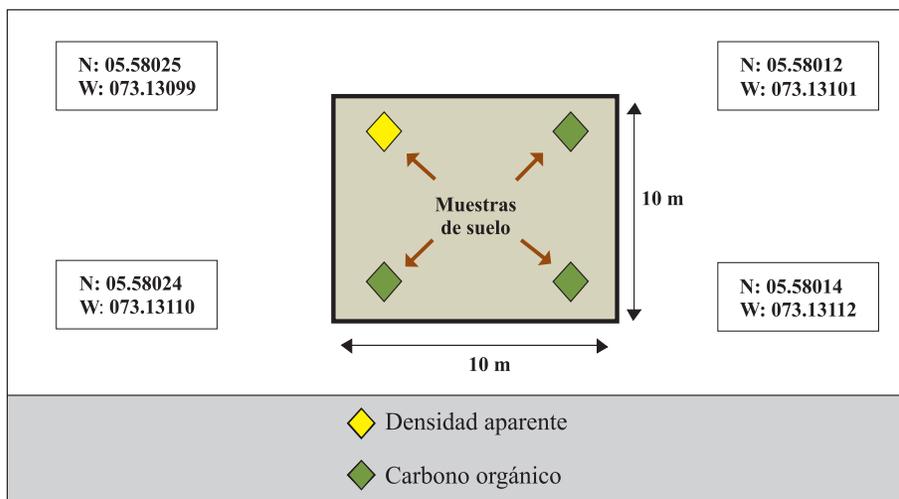


Figura 3.30 Esquema de PPM 3 - Área Intervenida a 3.164 msnm.

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.

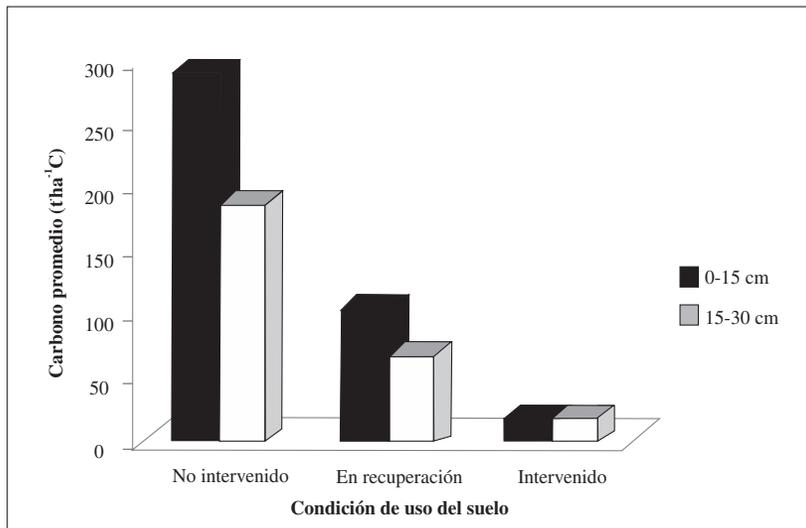


Figura 3.31 COS almacenado bajo diferentes condiciones de uso del suelo y a dos profundidades muestreadas.

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 .

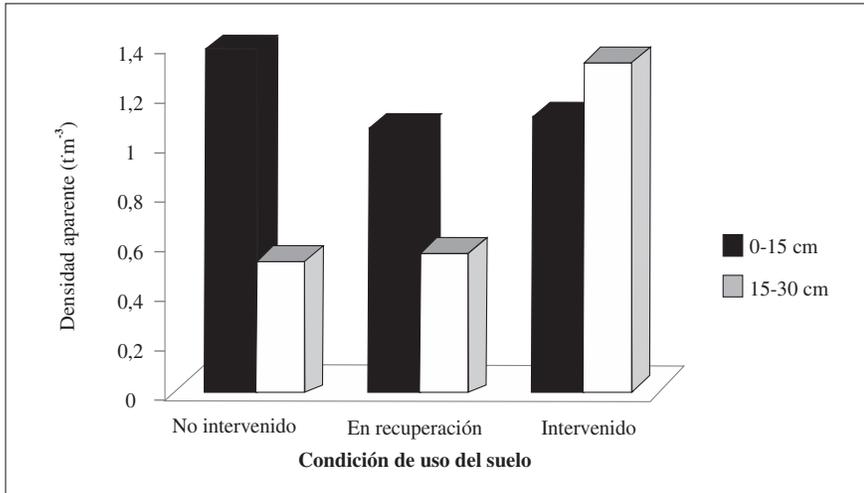
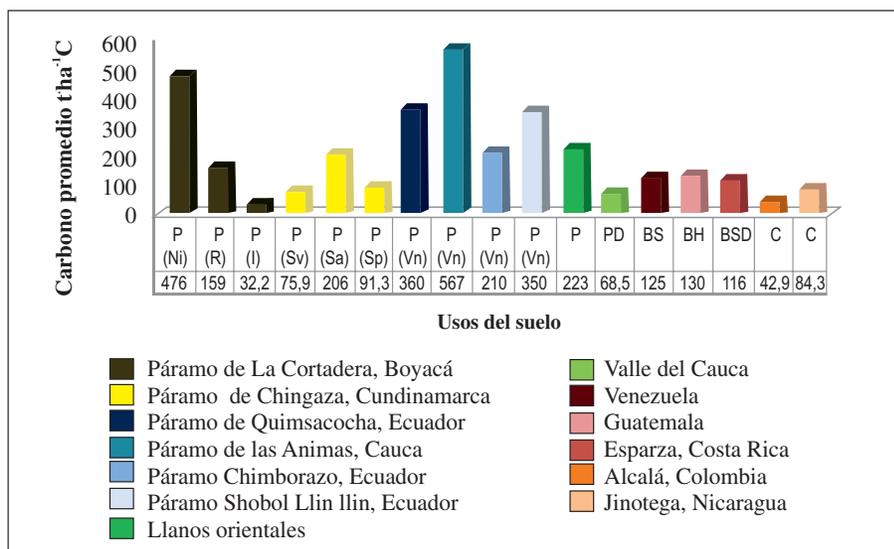


Figura 3.32 Densidad aparente (ρ_b) bajo diferentes condiciones de uso del suelo y a dos profundidades muestreadas.

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 *Espeletopsis 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 Agroflorestal 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

