

Caracterización y clasificación de la cobertura de suelo de paramo mediante metodología de cuencas pareadas. caso de estudio: Páramo de Berlín (Santander).

Duvan Alejandro Godoy Chivata

Héctor Gabriel Medina Pinzón

Trabajo de Grado para Optar el título de Ingeniero Civil

Director

Isabel Cristina Domínguez Rivera

PhD en Agricultura, Alimentación y Desarrollo Rural

Codirector

Sebastián Elías Patiño Gutiérrez

Ingeniero Civil

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas

Escuela de Ingeniería Civil

Bucaramanga

2019

Dedicatoria

Este trabajo es un homenaje a Gabriel Antonio Medina Martínez, Lilia Pinzon Rodríguez, Miguel Ángel Medina Pinzon, Diego Medina Pinzon, María Isabella Medina Garnica, Dora Beatriz Chivata López, Jairo Enrique Godoy Guevara, Jhair Enrique Godoy Chivata y Camila Andrea Godoy Chivata, por su constante dedicación, apoyo económico y moral, por su tiempo, sus consejos, creer en nosotros y reiterarnos que podíamos cumplir este sueño en esos momentos donde no quedaban alientos para seguir, pues su sueño siempre fue darnos mucho más de lo que ellos pudieron tener y vernos crecer siendo profesionales.

Agradecimientos

A Dios por la vida y cada una de las bendiciones que nos has regalado. A Gabriel Antonio Medina Martínez, Lilia Pinzon Rodríguez, Yenifer Tatiana Duarte calderón, Dora Beatriz Chivata López, Jairo Enrique Godoy Guevara y Lorena Quiroga Ruiz, por su constante apoyo durante la carrera y esfuerzos para lograr este sueño, por creer en nuestras capacidades. A Isabel Cristina Domínguez Rivera, Sebastián Elías Patiño Gutiérrez, Edgar Ricardo Oviedo Ocaña, y en general al grupo de investigación en recursos hídricos y saneamiento ambiental (GPH) y sus participantes por las diferentes asesorías y acompañamiento durante el desarrollo del proyecto. A la universidad Industrial de Santander por el préstamo de las instalaciones y equipos para la realización de los diferentes ensayos. A Santander científico en el marco del proyecto “Análisis participativo de la influencia del uso del suelo en los servicios hidrológicos de suministro y regulación ofertados por el ecosistema de páramo seco. Caso: Berlín (Complejo Santurban, Santander-Colombia)” por permitirnos ser una colaboración en el desarrollo del proyecto y así mismo darnos la oportunidad de realizar el proyecto de investigación para optar por el título como ingenieros.

Contenido

	Pág.
Introducción	15
1. Objetivos	17
1.1 Objetivo General	17
1.2 Objetivos Específicos.....	17
2. Marco Referencial.....	18
2.1 El ecosistema de páramo.....	18
2.1.1 Hidrología de páramo.	20
2.1.2 Clima de páramo.	20
2.1.3 Geología de páramo.	21
2.1.4 Vegetación de páramo.....	21
2.2 Cobertura de Suelo.....	21
2.3 Propiedades hidrofísicas del suelo	22
2.4 Cuenca Hidrográfica	24
2.5 Cuencas Pareadas.....	25
2.6 Paramo de Berlín – Santander.....	26
2.6.1 Aspectos Climáticos.....	27
2.6.1.1 Precipitación.	27
2.6.1.2 Temperatura.	27

2.6.1.3 Vegetación.	28
2.6.2 Metodología.	29
2.6.2.1 Fase 1: Selección de las UH.....	29
2.6.2.2 Fase 2: Identificación de coberturas.	31
2.6.2.3 Fase 3: Cuantificación de propiedades hidrofísicas del suelo.	31
2.6.2.4 Fase 4: Análisis de las propiedades hidrofísicas respecto al uso del suelo.....	33
3. Resultados.	33
3.1 Selección de cuencas.....	33
3.2 Clasificación de coberturas	36
3.3 Análisis de las propiedades hidrofísicas del suelo	41
3.3.1 Contenido de materia orgánica.	43
3.3.2 Contenido de humedad.	44
3.3.3 Potencial de hidrogeno.....	45
3.3.4 Conductividad eléctrica.	47
3.3.5 Densidad real.	48
3.3.6 Densidad aparente.	48
3.3.7 Porosidad total.	49
3.3.8 Textura.	51
3.3.9 Similitud entre las zonas de muestreo.....	52
4. Conclusiones	53
5. Recomendaciones	55
Referencias Bibliográficas	56
Apéndices.....	61

Lista de Figuras

	Pág.
<i>Figura 1.</i> Cuenca hidrográfica y sus elementos.....	25
<i>Figura 2.</i> Isoyetas de precipitación en el Páramo de Berlín (Santander).	28
<i>Figura 3.</i> Puntos de acceso a las UH.	30
<i>Figura 4.</i> Esquema microcuencas potenciales.....	34
<i>Figura 5.</i> Esquema general usos de suelo encontrados.	40
<i>Figura 6.</i> Distribución espacial de toma de muestras.....	42
<i>Figura 7.</i> Contraste de Contenido de materia orgánica en las profundidades A: 0-5, B: 10-15 y C: 20-25 cm.....	44
<i>Figura 8.</i> Contraste de medias de Contenido de Humedad en las profundidades A: 0-5, B: 10-15 y C: 20-25 cm.	45
<i>Figura 9.</i> Contraste del Potencial de Hidrogeno en las profundidades A: 0-5, B: 10-15 y C: 20-25 cm.....	46
<i>Figura 10.</i> Contraste del Conductividad eléctrica en las profundidades A: 0-5, B: 10-15 y C: 20-25 cm.....	47
<i>Figura 11.</i> Contraste de la Densidad real en las profundidades A: 0-5, B: 10-15 y C: 20-25 cm.....	48
<i>Figura 12.</i> Contraste de la Densidad aparente en las profundidades A: 0-5, B: 10-15 y C: 20-25 cm.	49

Figura 13. Contraste de la Porosidad total en las profundidades A: 0-5, B: 10-15 y C: 20-25

cm..... 50

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. <i>Clasificación de paramos según la altura.</i>	19
Tabla 2. <i>Clasificación según la precipitación.</i>	20
Tabla 3. <i>Cobertura de suelo.</i>	22
Tabla 4. <i>Propiedades físico-químicas del suelo.</i>	23
Tabla 5. <i>Normas guía.</i>	32
Tabla 6. <i>Características relevantes de las microcuencas.</i>	35
Tabla 7. <i>Resumen de coberturas encontradas</i>	36

Lista de Apéndices

	Pág.
Apéndice A. Mapa uso de suelo Esc 1:25000.....	61
Apéndice B: Mapa de suelo, cartografía río tona Esc 1:10000.....	62

Resumen

Titulo: Caracterización y clasificación de la cobertura de suelo de paramo mediante metodología de cuencas pareadas. caso de estudio: Páramo de Berlín (Santander)*.

Autores: Duvan Alejandro Godoy Chivata
Héctor Gabriel Medina Pinzón**

Palabras Claves: Páramo, uso del suelo, propiedades hidrofísicas, cambio de cobertura, agricultura

Descripción:

El ecosistema de páramo se caracteriza por los múltiples servicios ecosistémicos que brinda, entre estos, la captación, almacenamiento y regulación del recurso hídrico. Los suelos desempeñan un papel importante en relación con el recurso hídrico y el estudio de sus propiedades hidrofísicas proporciona información sobre la interacción entre la masa del suelo y el agua, la cual se ve afectada por los diferentes procesos de los cultivos. En esta investigación se realizó un estudio exploratorio en el páramo de Berlín (Santander) sobre el impacto del cambio en la cobertura natural por cultivo intensivo en ocho propiedades hidrofísicas que tienen los suelos de páramo (humedad del suelo, materia orgánica, densidad aparente, densidad real, porosidad, conductividad eléctrica, pH y textura). Como fase inicial del proyecto se hizo una revisión de cartografía buscando dos unidades hidrográficas (UH) que cumplieran con características geomorfológicas similares y con único diferenciador el uso de suelo para aplicar la metodología de cuencas pareadas. Con esta metodología se buscó eliminar la variabilidad climática y obtener diferencias en las propiedades según el uso de suelo. Posteriormente se realizó la identificación de coberturas presentes en las UH seleccionadas, seguido de la recolección de muestras para realizar el análisis estadístico descriptivo de las propiedades. Como resultado al análisis se observó que el cambio de cobertura natural por cultivo intensivo genera un impacto sobre las propiedades hidrofísicas especialmente materia orgánica, humedad, pH y porosidad, alterando la capacidad del suelo intervenido para retener y regular el agua. La caracterización obtenida es fundamental para definir el diseño posterior de muestreo del suelo en el marco del proyecto “Análisis participativo de la influencia del uso del suelo en los servicios hidrológicos de suministro y regulación ofertados por el ecosistema de páramo seco. Caso: Berlín (Complejo Santurban, Santander-Colombia)”.

* Proyecto de grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas Escuela de Ingeniería Civil Director Isabel Cristina Domínguez Rivera
Ing. Msc. PHD Codirector Sebastián Elías Patiño Gutiérrez Ingeniero civil

Abstract

Title: Characterization and classification of paramo land cover through paired watershed methodology. case study: Berlin Moor (Santander)*.

Authors: Duvan Alejandro Godoy Chivata
Héctor Gabriel Medina Pinzón**

Keywords: Paramo, land use, hydrophysical properties, land use change, agriculture

Descripción:

The paramo ecosystem is characterized by the multiple ecosystem services it provides, among them, the capture, storage, and regulation of water resources. Soils play an important role in relation to water resources and the study of their hydrological properties provides information on the interaction between soil mass and water, which is affected by different crop processes. In this research, an exploratory study was carried out in the Berlin paramo (Santander) on the impact of the change in natural coverage by intensive cultivation in eight hydrophysical properties of the paramo soils (soil moisture, organic matter, apparent density, real density, porosity, electrical conductivity, pH and texture). As an initial phase of the project, a review on the available cartography for the area was carried out looking for two hydrographic units (UH) with similar geomorphological characteristics and with land use as the main differentiator to apply the paired catchments methodology. With this methodology, climate variability can be eliminated as a confounding factor to identify differences on the hydrological properties according to land use. Subsequently, the identification of the coverage present in the selected UHs was carried out, followed by the collection of samples for the statistical analysis of the properties. As a result of the analysis, it was observed that the change of natural cover by intensive cultivation generates an impact on the hydrophysical properties of soil especially organic matter, soil moisture, pH and posity, altering the capacity of the soil under anthropogenic influence for retain ang regulate water. The characterization obtained is the base to define the subsequent soil sampling design within the framework of the project “Participatory analysis of the influence of land use on hydrological supply and regulation services offered by the dry wasteland ecosystem. Case: Berlin (Santurban Complex, Santander-Colombia)”.

* Proyecto de grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas Escuela de Ingeniería Civil Director Isabel Cristina Domínguez Rivera
Ing. Msc. PHD Codirector Sebastián Elías Patiño Gutiérrez Ingeniero civil

Introducción

Los páramos son ecosistemas importantes por su riqueza natural y alta biodiversidad (PGN, 2008). En Colombia, son el principal origen de las fuentes hídricas y se encargan de regular los flujos de las cuencas andinas (PGN, 2008). La importancia de estos ecosistemas está en los servicios que brindan, convirtiéndolos en un eje articulador para el desarrollo; entre estos servicios destacan el abastecimiento hídrico, producción de alimentos y generación de energía (Hofstede, 2010).

Uno de los factores que mantienen el alto potencial en servicios hídricos en ecosistemas de páramo es el suelo (Daza, Florez, & Triana, 2014), no obstante, el avance de la frontera agrícola y el cambio climático se han convertido en los principales tensores en las cuencas de páramo, provocando un deterioro en los servicios ecosistémicos que brindan (Daza et al., 2014). Una manera de evaluar el efecto de las actividades agrícolas sobre el suelo es mediante el estudio de las propiedades hidrofísicas del suelo. Las propiedades hidrofísicas describen la interacción entre la masa del suelo y el agua (Llambí et al., 2012). Entre estas propiedades destacan contenido de materia orgánica, contenido de humedad, densidad aparente, densidad real, porosidad, potencial de hidrogeno, conductividad eléctrica y textura. En Colombia, se han realizado diversas investigaciones en ecosistema de páramo (Daza et al., 2014), (Estupiñán, Gómez, Barrantes, & Limas, 2009), (Ministerio del Medio Ambiente, 2002), (Diaz, Paz, Amezquita, & Rivera., 2004), (PGN, 2008), las cuales describen el efecto de las actividades agropecuarias sobre el suelo y el

impacto que ocasionan en las propiedades hidrofísicas, lo cual altera la capacidad de retención y regulación hídrica.

La presente investigación fue desarrollada en el páramo de Berlín (Santander), perteneciente al complejo de páramos de Santurban con jurisdicción de las corporaciones autónomas regionales CDMB y CORPONOR. El propósito de esta investigación fue caracterizar y clasificar las coberturas de páramo y analizar el impacto de cambio de cobertura sobre las propiedades hidrofísicas del suelo. El proyecto se dividió en varias etapas para dar alcance a cada uno de los objetivos planteados, los cuales comprendían seleccionar dos unidades hidrográficas (UH), identificar sus coberturas, analizar las propiedades hidrofísicas del suelo en las coberturas encontradas y finalmente determinar diferencias en dichas propiedades para establecer unidades de monitoreo. El proyecto se desarrolló bajo el enfoque metodológico de cuencas pareadas.

La caracterización y clasificación de coberturas es fundamental para definir zonas homogéneas en, topografía, clima y propiedades hidrofísicas, para determinar unidades de monitoreo que permitan un seguimiento eficaz y con costo razonable a los efectos del cambio de cobertura sobre las propiedades hidrofísicas del suelo

El conjunto de resultados obtenidos aportó insumos para definir el diseño de muestreo del suelo a largo plazo en el marco del proyecto “Análisis participativo de la influencia del uso del suelo en los servicios hidrológicos de suministro y regulación ofertados por el ecosistema de páramo seco. Caso: Berlín (Complejo Santurban, Santander-Colombia)”

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Realizar un análisis exploratorio sobre el impacto del cambio en la cobertura natural de páramo por cultivo intensivo sobre las principales propiedades hidrofísicas del suelo en el páramo de Berlín (Santander).

1.2 Objetivos Específicos

- Seleccionar dos unidades hidrográficas en la cuenca del río Jordán, en el páramo de Berlín (Santander), que mejor cumplan los criterios para aplicar la metodología de cuencas pareadas.
- Analizar las principales propiedades hidrofísicas del suelo en las coberturas de suelo encontradas.
- Identificar los tipos de cobertura que componen las unidades hidrográficas potenciales.
- Determinar estadísticamente las diferencias en las propiedades hidrofísicas del suelo de páramo en las cuencas en estudio.

2. Marco Referencial

2.1 El ecosistema de páramo

El páramo se define como un ecosistema natural en la alta montaña tropical húmeda que se encuentra entre el límite superior de bosque y las nieves perpetuas. Usualmente se localiza a una altura entre 2500-5000 m.s.n.m. (PGN, 2008). Se caracteriza por presentar un clima frío-húmedo con una alta radiación solar y fuertes vientos; el clima se considera frío con una temperatura frecuentemente baja, acompañado de alta radiación solar. A partir de esto, la vegetación de páramo se caracteriza por su baja altura y adaptación al clima extremo (PGN, 2008).

Sudamérica posee una serie de condiciones bioclimáticas particulares. Esta serie de condiciones están determinadas por su localización respecto al eje ecuatorial y a la franja tropical del planeta (Hernández & Monasterio, 2002). Los páramos se encuentran concentrados en Venezuela, Colombia, Ecuador y norte de Perú, con pequeñas extensiones en Costa Rica y Panamá. Estos ecosistemas son fuente o nacimiento de los principales ríos y regulan los flujos de humedad de las cuencas andinas (Hernández & Monasterio, 2002).

En Colombia, el ecosistema de páramo se encuentra en la Cordillera Oriental y Central, con unas islas muy pequeñas en la Cordillera Occidental. A nivel nacional, el páramo ocupa un área aproximada de 1.925.410 hectáreas, las cuales comprenden un 40% del total de área paramuna en Sudamérica (M. Ramírez, 2016),(Ospina, n.d.).

Los páramos están divididos de acuerdo a la propuesta de Cuatrecasas (1958) (Hernández & Monasterio, 2002) como se muestra en la Tabla 1 donde se expone la clasificación de los ecosistemas de páramo de acuerdo a la altura.

Tabla 1.

Clasificación de paramos según la altura.

Altura (msnm)	Tipo	Características
3000-3200	Altoandino	-
3200-3500	Subpáramo	Es abundante en árboles de poca altura y arbustos y se encuentra encima del bosque montano. Su temperatura promedio es de 10° Celsius.
3500-4100	Paramo medio	Temperatura media de 5° Celsius. vegetación principalmente frailejones-pajonal (predominan plantas herbáceas y diversas especies de Espeletia), con turberas (humedales ácidos con una gran acumulación de materia orgánica).
4100-4700	Superpáramo	se caracteriza por sus frailejones, pastizales, musgos, líquenes y arbustos de pequeñas dimensiones, así como por sus numerosas lagunas con juncos, puede ser considerado una tundra-alpina.
>4700	Nieves perpetuas	-

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, se encuentra la clasificación de paramos según la precipitación de acuerdo a la propuesta de Cuatrecasas (1958) (Hernández & Monasterio, 2002).

Tabla 2.

Clasificación según la precipitación.

Precipitación (mm)	Tipo
623.5-1196.5	Seco
1197-1770	Semihúmedo
1771-2344	Húmedo
2345-2918	Muy húmedo
2919-3492	Superhúmedo
3493-4066	Superhúmedo pluvial
>4066	Pluvial

2.1.1 Hidrología de páramo. Los ecosistemas de páramo interceptan, almacenan y regulan los flujos de humedad superficiales y subterráneos mediante elementos como la vegetación, el suelo y subsuelo (Hernández & Monasterio, 2002). Estos ecosistemas son considerados estratégicos debido a diversos servicios ecosistémicos que brindan, entre los cuales se destaca el abastecimiento de agua para consumo humano (Hofstede, 2010).

A pesar de la compleja geología y topografía, los suelos de páramo son relativamente homogéneos. La regulación hídrica depende del contenido de materia orgánica presente en el suelo, captando el agua producto de la precipitación para luego descargar lentamente a manantiales, ríos, riachuelos y lagunas. Esta regulación se debe principalmente a la característica abierta y porosa del suelo de páramo que funciona como una esponja que absorbe agua y la libera hacia el subsuelo o la superficie (De Bièvre, Iñiguez, & Buytaert, 2008),(Buytaert, Céleri, De Bièvre, & Cisneros, 2003).

2.1.2 Clima de páramo. El clima presenta gran oscilación térmica, con pocas fuentes de agua y vientos variables, además de ello en los tiempos de invierno o de lluvia es muy frecuente que

se observe en el paisaje la niebla. En estos ecosistemas domina el clima de alta montaña tropical, con una gran amplitud térmica diaria. La temperatura media anual esta entre 2-10°C y la precipitación total anual oscila entre los 600 mm (en los páramos secos) y más de 4000 mm (en los páramos húmedos) (Hernández & Monasterio, 2002), (M. Ramírez, 2016).

2.1.3 Geología de páramo. Geológicamente la estructura del páramo presenta varios estratos con formas de tablas, su suelo por lo general es abundante en rocas de tipo sedimentarios compuestas en su mayoría por carbonato de calcio (Hernández & Monasterio, 2002).

2.1.4 Vegetación de páramo. El páramo alberga muchas especies de plantas endémicas, adaptadas a las Condiciones físico-químicas y climáticas específicas del lugar, tales como la baja presión atmosférica, radiación ultravioleta intensa, y los efectos de secado por el viento (Hofstede, 2010).

2.2 Cobertura de Suelo

La cobertura de la tierra comprende todos los elementos que se encuentran sobre la superficie del suelo ya sean naturales o creados por el ser humano, es decir, tanto la vegetación natural hasta todo tipo de construcción o edificación destinada para el desarrollo de las actividades del hombre y sus necesidades, a lo cual en forma genérica se denomina uso de la tierra (Geometry & Analysis, n.d.).

La cobertura de la tierra está completamente ligada a lo que superficialmente se puede describir como componente de la zona a partir de una descripción visual de lo que cubre esa

extensión terrestre. Las coberturas del suelo se pueden dividir en vegetal, degradada, hídrica y construida, cada una compuesta por subgrupos como se muestra a continuación:

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se podrá observar las principales coberturas de la tierra y tipos de acuerdo a C. A. S. S, M. Y. A. V, S. Planeación, and M. H. Reyes (2007) (CDMB(corporación autónoma regional para la defensa de la meseta de Bucaramanga), 2007).

Tabla 3.

Cobertura de suelo.

Unidad	Cobertura Vegetal				Degradada	Hídrica	Construida	
Clase	Bosques	Rastrojo	Pastizales	Cultivos	Tierras erosionadas	Material rocoso en superficie	Cuerpos de agua	Urbanizada
Tipo	Bosque natural intervenido	Rastrojo alto y bajo	Sabana estacional y semiestacional	Cultivo Pasto en rotación	Suelo desnudo	Capas de arena, tierra y cascajo	Ríos, quebradas, humedales	Cabecera municipal, áreas comunales rurales, instalaciones petroleras

2.3 Propiedades hidrofísicas del suelo

Las propiedades hidrofísicas del suelo son un conjunto de variables que describen la interacción entre una masa de suelo y el agua, específicamente, la propiedad del suelo de absorber y posteriormente liberar el agua, controlando los flujos superficiales (Llambí et al., 2012). Dichas propiedades están relacionadas con los fenómenos fisiológicos de la planta, las prácticas de

manejo de los suelos, la retención de humedad, la aireación, los procesos de erosión y remoción en masa (Geometry & Analysis, n.d.). Las propiedades que describen de forma directa o indirecta el estado del agua en una masa de suelo son: la capacidad de infiltración, capacidad de retención de humedad, estabilidad estructural, densidad aparente y real, textura, pH, porosidad, humedad del suelo, materia orgánica, conductividad eléctrica, color, permeabilidad del suelo, etc. (Geometry & Analysis, n.d.).

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, se muestra una breve descripción de estas propiedades del suelo en relación con sus principales características. Las definiciones enunciadas a continuación fueron sustraídas de los autores (Geometry & Analysis, n.d.), (R. Ramírez, 2007), (Burneo, 2013) y (Ruiz T & Grillo F, 1975).

Tabla 4.

Propiedades físico-químicas del suelo.

Propiedad	Definición
Capacidad de infiltración	Es la tasa máxima con la cual puede ingresar agua a un suelo, lo que es lo mismo, la intensidad máxima de agua de lluvia que puede absorber el suelo. La capacidad de infiltración se expresa como una velocidad (mm/h o mm/min).
Retención de humedad	Indica la cantidad de agua que retienen los suelos a diferentes tensiones. Dominado por fuerza de gravedad (macroporosidad) y por fuerzas capilares (microporosidad).
Estabilidad estructural	Es la capacidad que tiene el suelo para resistir la erosión hídrica. Depende estrechamente de la textura y de la formación del suelo.
Densidad aparente	Es la relación existente entre la masa y el volumen de suelo, se considera todo el espacio poroso existente.
Densidad real	Es la relación entre el volumen de las partículas de suelo y el volumen de éstas sin considerar el espacio poroso.

Propiedad	Definición
Textura	Es la distribución de las partículas del suelo expresada en porcentaje. Estas partículas son: la arena (2 - 0.02 mm), el limo (0.02 - 0.002 mm) y la arcilla (0.002).
pH	Es una de las propiedades físico-químicas más Importante en los suelos. Determina el grado de acidez o basicidad de acuerdo a la concentración de iones de hidrogeno.
Porosidad total	Es el espacio total entre poros aislados y el espacio ocupado por el agua en un suelo.
Humedad	Mide la cantidad de agua en relación con la masa o el volumen de suelo.
Materia orgánica	Hace referencia a la fracción de restos vegetales y animales que son descompuestos y reservados en el suelo.
Conductividad eléctrica	Mide la capacidad que tiene un suelo de conducir la electricidad debido a la presencia de sales o iones libres.

2.4 Cuenca Hidrográfica

Es un área de captación natural de agua de precipitación que conduce sus aguas hacia un único punto de salida mediante una corriente superficial. Se define, así mismo, como un sistema que integra la cobertura del terreno, el suelo y, en general, el entorno (VisionWorld, 2004). Los principales elementos de una cuenca hidrográfica son parteaguas (divisoria de aguas), laderas, afluentes, efluentes y el cauce principal como se ilustra en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

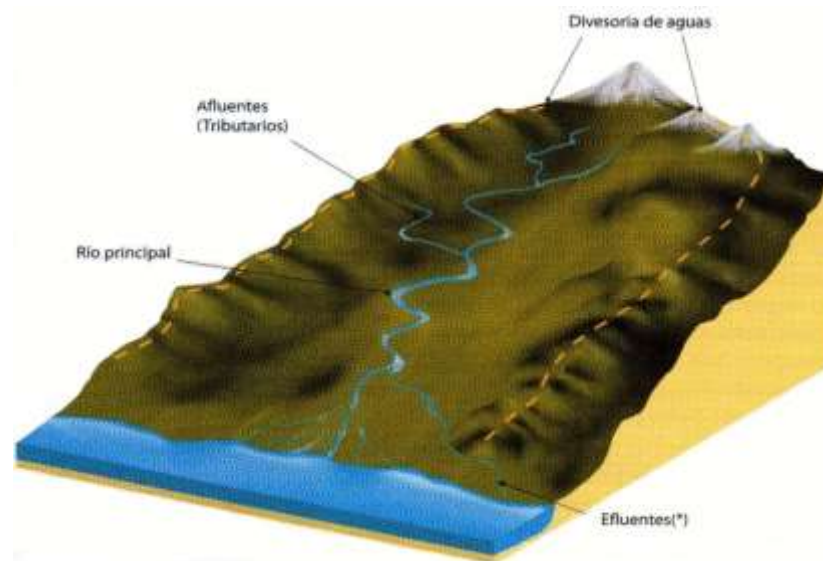


Figura 1. Cuenca hidrográfica y sus elementos.

2.5 Cuencas Pareadas

Es una metodología experimental que busca comparar dos o más cuencas ubicadas adyacentes o muy cercanas con características geomorfológicas, topográficas, hidrológicas y climáticas similares, donde el único factor diferenciador sea el uso del suelo. La metodología de cuencas pareadas busca eliminar la variabilidad climática de los resultados y atribuirlos únicamente al cambio de cobertura. Este tipo de estudios se ha empleado principalmente en determinar el impacto que tiene el cambio del uso del suelo sobre el rendimiento hídrico.(Best, Zhang, McMahon, Western, & Vertessy, 2003),(J. F. Patiño, León, Montes, & Hernández, 2007).

La metodología de cuencas pareadas se ha utilizado en diferentes ámbitos y con diferentes fines, por ejemplo:

- Determinar el posible impacto del cambio de uso de suelo en la producción de agua (Castillo Vega, 2005)

- Estimar el efecto que tiene la vegetación sobre el rendimiento hídrico (J. F. Patiño et al., 2007)
- Experimentos de forestación en Sudáfrica Scott (2000) (Scott, Prinsloo, Moses, Mehlomakulu, & Simmers, 2000).
- Experimentos de recrecimiento que estos analizan los efectos de la explotación forestal donde se permite el recrecimiento Stednick (1996) (Stednick, 1996).
- Experimentos de deforestación en cuencas colectoras en Australia Occidental Ruprecht y Schofield (1989) (Ruprecht & Schofield, 1989).

2.6 Paramo de Berlín – Santander

El páramo de Berlín (Santander) hace parte del complejo Santurbán. El páramo de Berlín se caracteriza por ser una zona atmosféricamente seca y se localiza en el altiplano de la Cordillera Oriental, específicamente, al nororiente de Colombia entre los departamentos de Santander y Norte de Santander bajo la jurisdicción de dos corporaciones ambientales (CAS y CORPONOR) (CDMB(corporación autónoma regional para la defensa de la meseta de Bucaramanga), 2007),(CORPONOR(Corporacion Autonoma Regional de la frontera Nororiental), 2009).

La zona del páramo seco (Berlín) en el complejo Santurban se localiza entre los 3.200-3.800 msnm y ocupa un área de 44272.44 hectáreas y un perímetro de 108.025 Km.

2.6.1 Aspectos Climáticos

2.6.1.1 Precipitación. En el área de manejo especial propuesta (paramo de Berlín), el régimen de precipitación es bimodal, con periodos de mayor precipitación entre los meses de abril-mayo y septiembre - noviembre aproximadamente, con valores entre los 680 mm, haciendo de éste un sitio de baja precipitación anual, por lo cual se califica como ambiente atmosféricamente seco. Los meses de menor precipitación se presentan en el periodo diciembre - febrero con valores entre los 30 y 100 mm (CDMB(corporación autónoma regional para la defensa de la meseta de Bucaramanga), 2007).

El páramo de Berlín Santander es ligeramente húmedo y presenta poca o ningún superávit (calidad de ingresos mayores a los gastos) de agua. Aún en época de mayor precipitación el factor de humedad varía entre 20 y 40% (CORPONOR(Corporacion Autonoma Regional de la frontera Nororiental), 2009).

2.6.1.2 Temperatura. La zona de Berlín presenta temperaturas diarias media de 0 a 6°C de acuerdo con la información de temperatura dentro de la Unidad Biogeográfica de Santurban (CDMB(corporación autónoma regional para la defensa de la meseta de Bucaramanga), 2007). En el territorio propuesto como AME (área de manejo especial) se determinaron diferentes sectores con base en los datos combinados de precipitación, balances hídricos y altitud (CDMB(corporación autónoma regional para la defensa de la meseta de Bucaramanga), 2007).

La **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** muestra la distribución de precipitaciones en el páramo de Berlín.

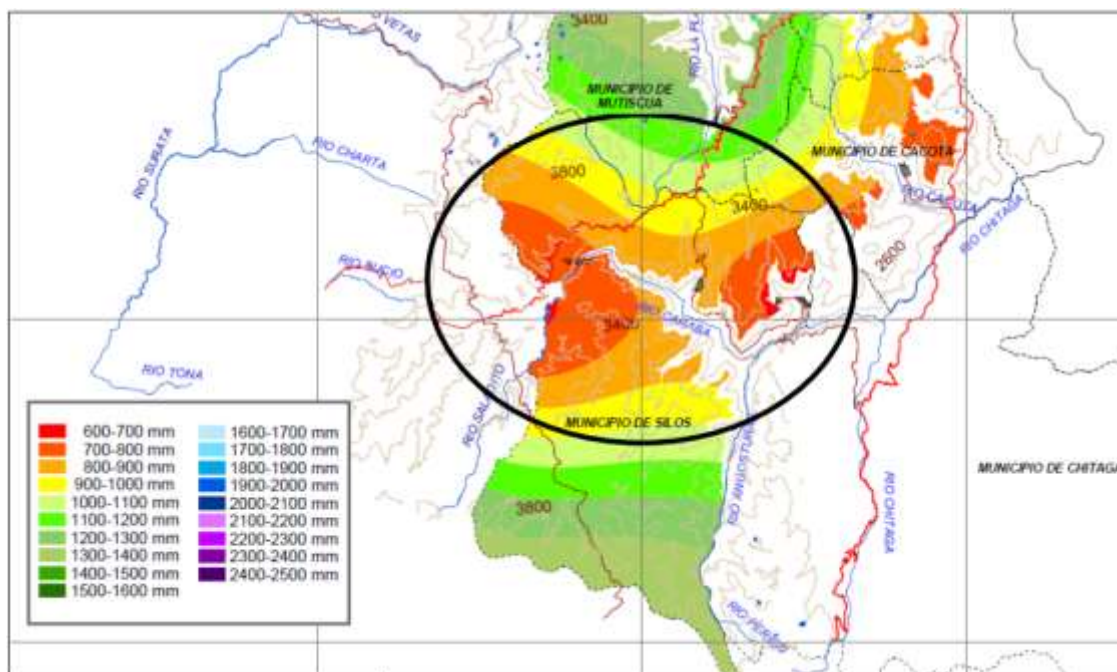


Figura 2. Isoyetas de precipitación en el Páramo de Berlín (Santander). Adoptado de : (CORPONOR (Corporación Autónoma Regional de la frontera Nororiental), 2009)

2.6.1.3 Vegetación. El páramo seco comprende áreas de vegetación abierta, caracterizadas por la presencia de extensos pajonales de gramíneas macallosas (*Calamagrostis* sp), las cuales, junto con plantas cespitosas, almohadilladas y arrosadas, imprimen al paisaje su aspecto característico. Las gramíneas que caracterizan los pastizales del páramo seco forman densos haces de hojas rígidas e involutas (enrolladas) apretados entre sí; ellas constituyen sin duda el porcentaje más alto de la cobertura vegetal de este ecosistema. Esta vegetación de porte herbáceo, está conformada principalmente por las familias Asteraceae, Rosaceae, Ericaceae, Bromeliaceae, Poaceae, entre otras (CORPONOR (Corporación Autónoma Regional de la frontera Nororiental), 2009).

2.6.2 Metodología.

Fases del proyecto

El proyecto se dividió en cuatro fases las cuales corresponden a: i) selección de las UH; ii) identificación de coberturas; iii) cuantificación de propiedades; y iv) establecimiento de unidades de muestreo.

2.6.2.1 Fase 1: Selección de las UH. En esta primera fase se realizó un análisis por medio de mapas de la zona de estudio en el páramo de Berlín con el fin de seleccionar las posibles unidades hidrográficas. Para esto, se usó cartografía de la cuenca del Río Tona (1:10000), Mapa de suelos (1:10000) y Mapa de uso del suelo 2005 (1:25000) (ver Anexos A y B). Se buscó atender los criterios del enfoque de cuencas pareadas, buscando que las UH tuvieran características geomorfológicas, topográficas y climáticas similares con único diferenciador el uso de suelo (Best et al., 2003). Con la selección preliminar se escogieron los pares 1 y 2 que se muestran en la Figura 3. Se tuvo en cuenta información secundaria que contenía características como altura, área, pendiente y cobertura de cada par, lo cual sirvió para comparar el porcentaje de área intervenida en las UH.

Realizada esta labor, se llevaron a cabo dos salidas de campo para reconocer las UH potenciales previamente seleccionadas y corroborar sus similitudes. Se ingresó al par potencial 1 y 2 por la vía Bucaramanga-Pamplona a la altura del kilómetro 51 y 53, respectivamente (Figura 3). Se recorrieron minuciosamente las UH a pie para observar la zona de estudio, los cultivos, los puntos de acceso y se estimaron los usos dominantes desde la parte más alta. El recorrido se realizó en compañía de uno de los propietarios de los predios quien explicó los usos del suelo

sobre las zonas que se iban transitando. Por último, después de la retroalimentación de la salida, en compañía del Grupo de investigación en recursos hídricos y saneamiento ambiental (GPH) se eligieron las UH de estudio en base a sus características geomorfológicas y la información recopilada en campo.

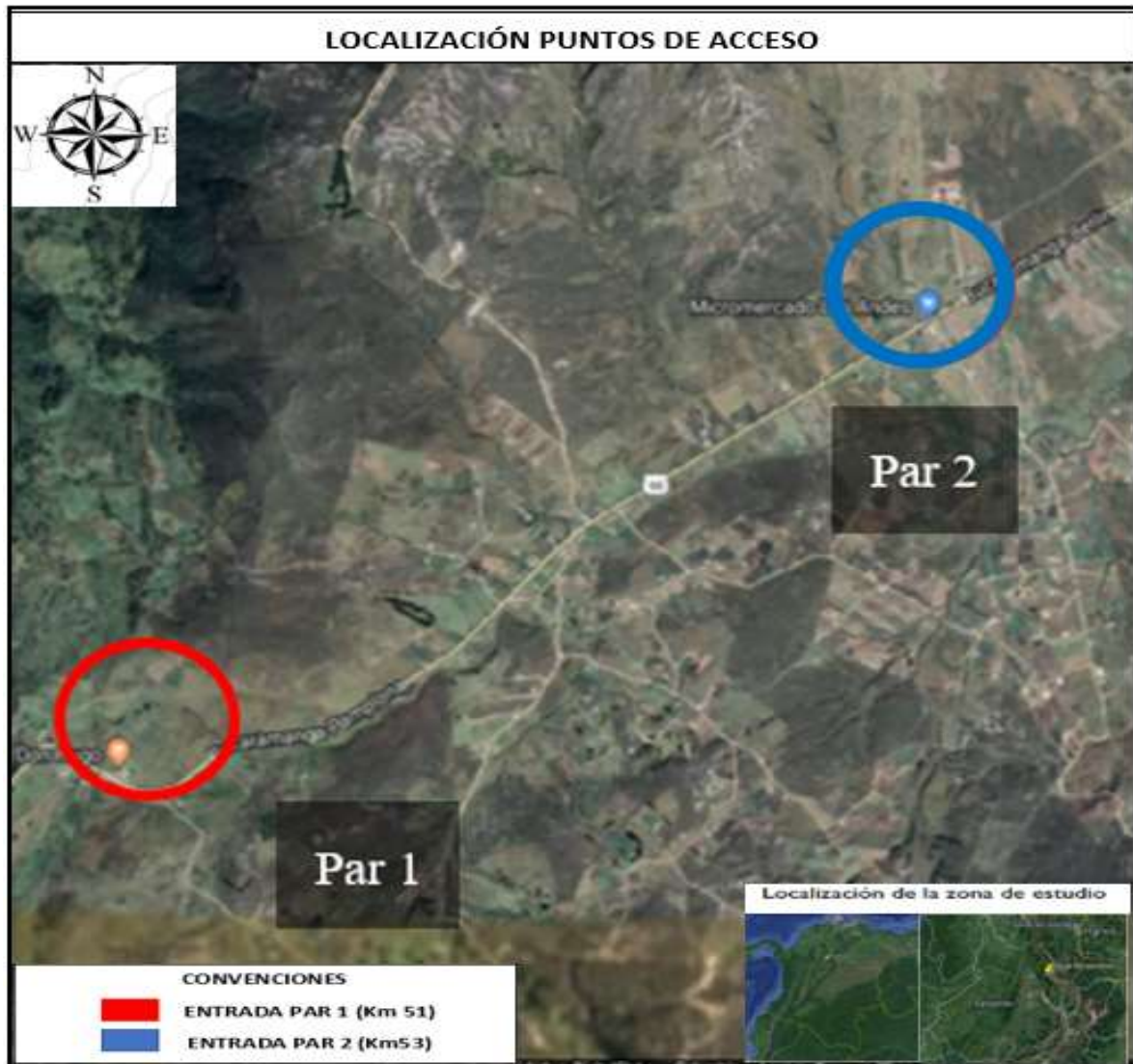


Figura 3. Puntos de acceso a las UH. Adaptado de Google Maps ("Google Maps," n.d.).

2.6.2.2 Fase 2: Identificación de coberturas. Después de realizada la Fase 1 y haber escogido dos UH para el estudio. Se hizo un reconocimiento visual en campo para describir los tipos de cobertura de suelo existentes en las UH. El recorrido fue realizado en zigzag, iniciando desde la parte alta hasta el cierre de las UH. Se recolectó información que describiera de forma general la cobertura de suelo en cada zona y sus características físicas (vegetación, pendiente, color del suelo y humedad). Como resultado se obtuvo una clasificación de los usos que se etiquetaron como unidades de muestreo, las cuales se diferencian principalmente por el tipo de cobertura presente.

2.6.2.3 Fase 3: Cuantificación de propiedades hidrofísicas del suelo. Se implementó el protocolo de recolección de muestras de suelo de acuerdo con la Norma Técnica Colombiana (NTC) 4113-1:1997 (NTC 4113-1, 1997), la cual establece los principios generales que se deben aplicar en el diseño de programas de muestreo de suelo. Los lugares para la recolección de muestras fueron tomados en las unidades de muestreo seleccionadas en la Fase 2 sobre las UH elegidas en la Fase 1. El número de réplicas se tomó de acuerdo a lo estipulado por la Norma Sismo Resistente (NSR 10) (N.S.R, 2010), dado que es un estudio preliminar del suelo.

Para cuantificar las propiedades hidrofísicas del suelo, en cada punto de recolección de muestras, en la zona de extracción se removieron de forma manual los dos primeros centímetros de suelo para evitar sustraer material vegetal directamente (raíces, hojas, tallos, entre otros). Se tomaron tres muestras de suelo por cada punto de forma aleatoria en cada unidad de muestreo de las cuales dos fueron alteradas y una inalterada para que de esta forma fueran representativas de la unidad de muestreo. En cada punto se extrajeron muestras a tres profundidades de 0 - 5, 10 - 15 y 20 – 25 cm. La extracción de estas muestras se realizó mediante barreno manual.

Para conservar las propiedades de las muestras inalteradas, se usó un anillo interno de 100 cm³ de volumen con el que cuenta el barreno, para almacenar la muestra con su estructura natural y ayudar a su conservación. Además, se guardaron las muestras dentro de bolsas herméticas y éstas dentro de un contenedor para preservarlas y evitar el daño por el transporte. Las muestras alteradas, por otro lado, no requerían ser tomadas directamente en el anillo, sin embargo, los demás procedimientos de conservación se mantuvieron tomando una masa de 150gr.

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se muestran las normas usadas para cuantificar las propiedades seleccionadas.

Tabla 5.

Normas guía.

Variable	Norma
Humedad del suelo	ASTM D2216-10 (American Society of Testing Materials, 2010)
Materia orgánica	ASTM F1647-11 (ASTM, 2011)
Densidad aparente	ASTM D7263-09 (ASTM:D7263-09, 2009)
Conductividad eléctrica	SSETM ECC1A3 (<i>Department of Sustainable Natural Resources SOIL SURVEY STANDARD TEST METHOD ELECTRICAL CONDUCTIVITY</i> , n.d.)
Textura	ASTM D422-06 (ASTM: D 422- 06, 2006)
Porosidad	ASTM D7263-09 (ASTM:D7263-09, 2009)
pH	ASTM D4972-01 (Statements & Testing, 2007)
Densidad real	ASTM D854-14 (ASTM-Standard-D854, 2014)

Los diferentes ensayos de laboratorio se realizaron en las instalaciones de la Universidad Industrial de Santander (Laboratorio de hidráulica) y al finalizar cada ensayo se hizo la respectiva recolección de los resultados arrojados de forma ordenada en una matriz para su posterior procesamiento y análisis.

2.6.2.4 Fase 4: Análisis de las propiedades hidrofísicas respecto al uso del suelo. El análisis de las propiedades hidrofísicas se realizó con técnicas de estadística descriptiva y gráficas. Se hizo una comparación directa entre las propiedades en función de la profundidad y las unidades de muestreo. Así mismo, entre las UH en relación con su valor promedio y desviación estándar para valorar la diferencia entre éstas. Se comparó la variabilidad de las propiedades hidrofísicas en función de los tipos de cobertura en las unidades de muestreo pertenecientes a la misma UH y se analizó el comportamiento de cada una de las variables de acuerdo al valor de desviación estándar. Dependiendo de esta comparación, se definió si había similitud entre las unidades de muestreo y de esta forma se determinó si se podían considerar como una sola unidad o en su defecto analizarlas por separado para un monitoreo de más largo plazo.

3. Resultados.

3.1 Selección de cuencas

En la Figura 4 se puede observar la localización de los dos pares potenciales de UH, resultado de la preselección con base en información secundaria. La Tabla 6 presenta las características relevantes para la selección de cuencas de estudio bajo el enfoque de cuencas pareadas, para cada UH de cada par de cuencas potenciales. Las coberturas fueron además verificadas mediante observación en salidas de campo.

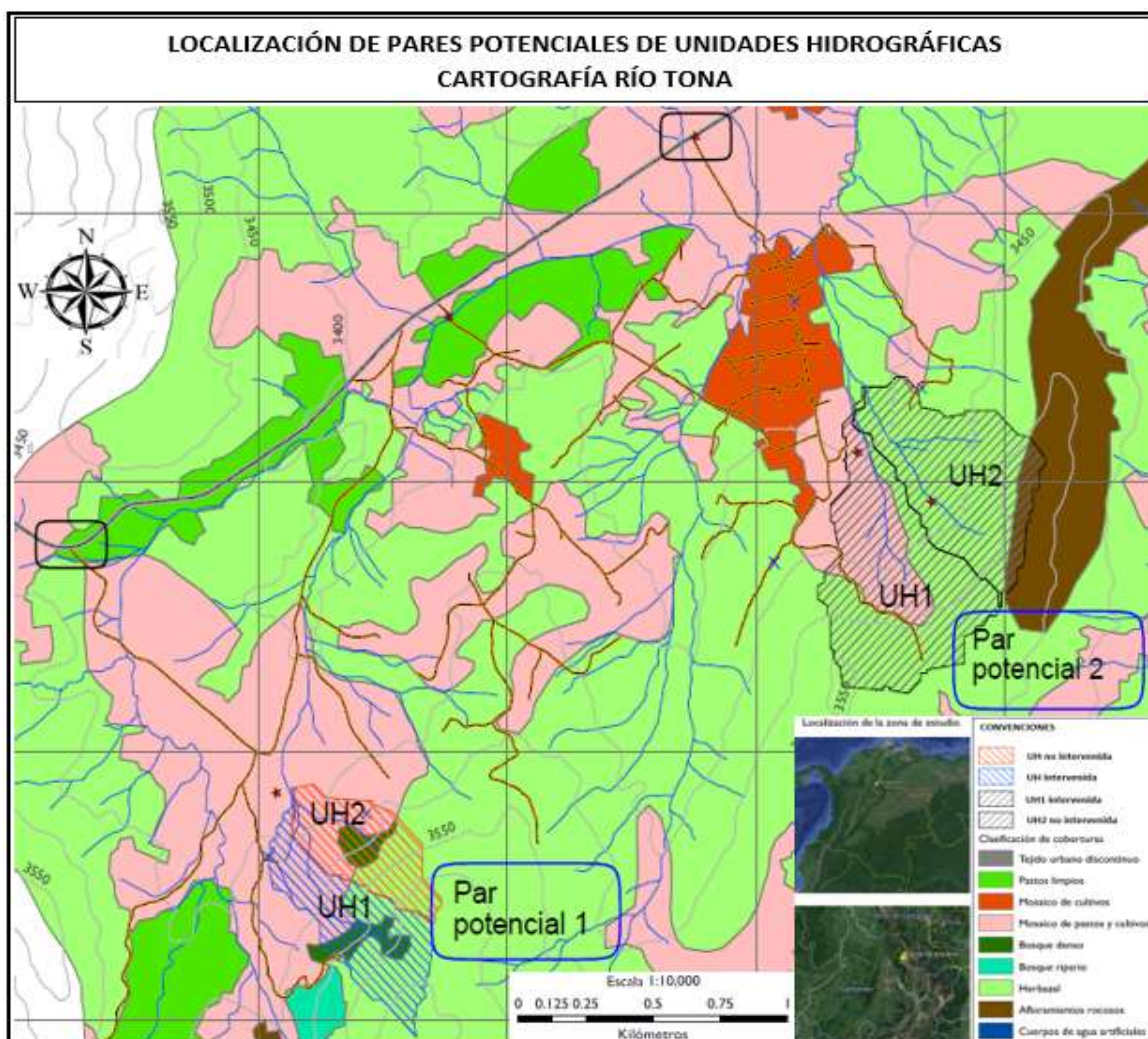


Figura 4. Esquema microcuencas potenciales. Adoptado de Celis (2019) (Celis, 2019).

Nota: UH1- UH intervenida, UH2- UH no intervenida.

Para la selección de las UH se tuvo en cuenta el porcentaje de área intervenida de cada par, encontrando una variación aproximada de 10% entre unidades pertenecientes al par 1 y de 38% para el par 2. Por otra parte, la variación de elevación máxima entre UH pertenecientes al mismo par es de aproximadamente 55 metros de altura. Se evidenció la presencia de un mayor número de coberturas en el par 1 como Bosque denso, con un porcentaje de área aproximado de 12.8% para cada UH.

Tabla 6.

Características relevantes de las microcuencas.

Características físicas	Microcuencas			
	Par 1		Par 2	
	UH inter.	UH no inter.	UH inter.	UH no inter.
Área (ha)	15.91	20.88	32.57	40.06
Perímetro (m)	2225	3275	3300	4050
Elev. Máx. Corriente (m)	3501	3565	3461	3511
Elev. Mín. Corriente (m)	3431	3431	3385	3385
Rango (m)	70	134	76	126
Long. Corriente principal (m)	447.7	772.3	744.3	1176.2
Pendiente Prom.	15.6	17.4	10.2	10.7
Corriente principal (%)				
Mosaico de pastos y cultivos (%)	46.9	36.5	0.5	38.6
Bosque denso (%)	12.8	12.7	0	0
Herbazal (%)	40.3	50.8	88.7	61.4
Afloramientos	0	0	10.8	0
Rocosos (%)				

Nota. Tomado de: *Celis (2019)* (Celis, 2019).

Con la verificación en campo se observó que la cobertura de “afloramientos rocosos” en el par uno tenía presencia en pequeñas zonas de la parte alta de las UH, además, el área catalogada como “Mosaico de pastos y cultivos” en la información secundaria de la UH natural del par uno correspondía en su totalidad a pastos naturales, los cuales sirven para la protección del suelo y no se observó algún tipo de alteración en la cobertura, por lo cual se consideró no intervenida, mientras que la zona intervenida del par dos tenía mayor presencia de pastos naturales que de

cultivo, convirtiendo la zona intervenida en menos del 10% -aproximadamente- del área total. A partir de lo anterior se pudo observar que el par 1 cumplía con la mayor cantidad de requisitos para llevar acabo el estudio bajo la metodología de cuencas pareadas.

3.2 Clasificación de coberturas

Mediante observación en salidas de campo, se ajustó la clasificación de coberturas, obtenida a partir de información secundaria, la cual por ser a una escala 1:10000, no era suficientemente exacta para el tamaño de la zona de estudio. La Tabla 7 contiene los tipos de cobertura, la descripción y un registro fotográfico.

Tabla 7.

Resumen de coberturas encontradas

Cobertura	Descripción	Unidad	Fotografía
Vegetación nativa de páramo con baja pendiente (N. baja pendiente)	Se observó un terreno con pendiente en promedio de 17% con presencia de frailejones, pajonal y	UH1	

Cobertura	Descripción	Unidad	Fotografía
Vegetación nativa de páramo con alta pendiente (N. alta pendiente)	afloramientos rocosos, también se observó un suelo húmedo y de color negro.	UH2	
	El terreno tenía una pendiente de aproximadamente 60% y se observaron arbustos, herbazales y frailejones dispersos. El suelo era húmedo y de color pardo oscuro.	UH1	
		UH2	
	Esta zona presentó elementos arbóreos, con una pendiente en promedio de 35% y un suelo de	UH1	
Arbusto denso (Arb. Denso)			

Cobertura	Descripción	Unidad	Fotografía
Barbecho	color negro con presencia de musgos y con alta humedad.	UH2	
	Se evidenció un terreno en descanso con pendiente de 12% aproximadamente, con cobertura de pastos y un color pardo oscuro.	UH1	
		UH2	
	Cultivo transitorio con pendiente aproximada del 12% y un color de suelo negro moderadamente seco. Se	UH1	
Cultivo de cebolla (Cult. Cebolla)			

Cobertura	Descripción	Unidad	Fotografía
	observaron empaques de fertilizantes, plaguicidas y fungicidas.		
Cultivo de papa (Cult. Papa)	Se observó una parte en fase de arado y otra en proceso de crecimiento con un suelo de color pardo moderadamente seco. Esta zona presentó la misma pendiente en promedio que el cultivo de cebolla.	UH1	

Nota: UH1-Unidad hidrográfica intervenida; UH2-Unidad hidrográfica no intervenida.

Se observó también una plantación forestal de pinos en la parte alta de la UH no intervenida, utilizada como lindero, la cual no es nativa de páramo y un par de cabezas de ganado en la zona de barbecho. En la UH intervenida existe una vivienda habitada, y en la UH no intervenida hay una vivienda deshabitada.

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se observa el esquema general de los usos del suelo y se ubica de forma aproximada la distribución en las UH.

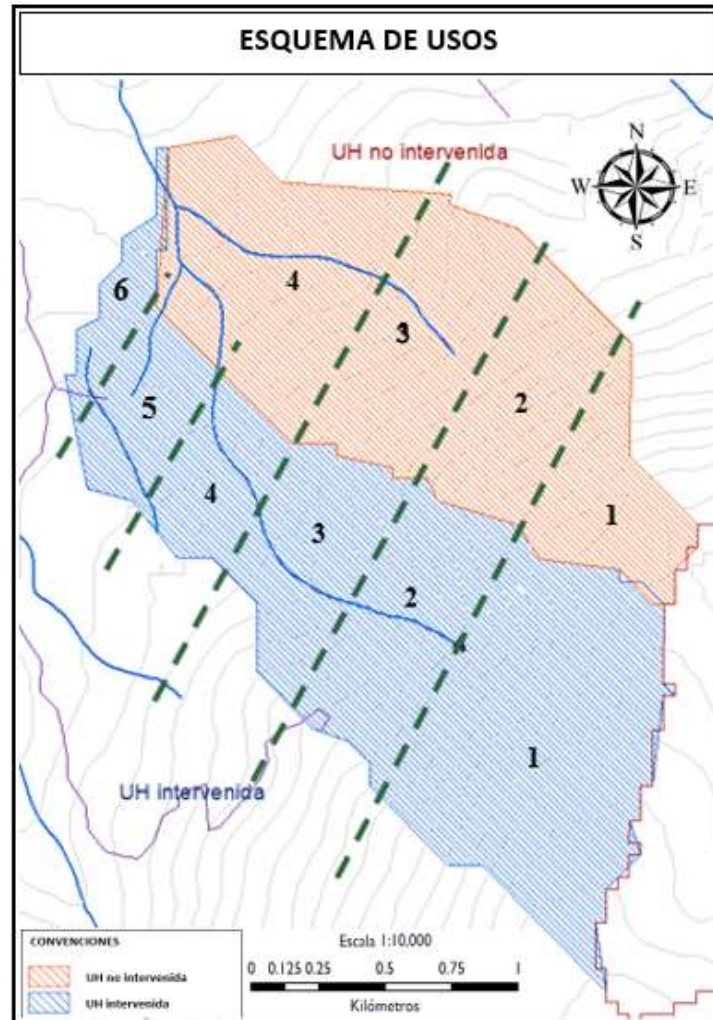


Figura 5. Esquema general usos de suelo encontrados. Adaptado de Patiño (2019) (S. Patiño, 2019).

Nota: 1-Vegetación nativa de páramo con baja pendiente, 2- vegetación nativa de páramo con alta pendiente, 3- arbusto denso, 4- barbecho, 5-cultivo de cebolla, 6- cultivo de papa.

Cada zona etiquetada con un número en la Figura 5 corresponde a 10 unidades de muestreo clasificadas según los usos en cada UH de origen: intervenida (6 unidades) y no intervenida (4 unidades), compartiendo número aquellas con un mismo uso.

Se observó que en la parte alta de ambas UH había vegetación nativa de páramo y dos pendientes, una baja en la cima y una más alta a medida que se desciende hasta llegar a la zona media que está dividida por una zona de bosques y una de pastos.

La zona que presenta pastos tiene características como surcos (hendiduras en la tierra producto del arado) que indican que anteriormente hubo intervención por cultivos. Por tal motivo, esta zona también fue caracterizada para definir las unidades de muestreo. Finalmente, en el cierre de la UH intervenida se observaron los cultivos de cebolla y de papa, los cuales son las principales actividades antrópicas en la zona.

3.3 Análisis de las propiedades hidrofísicas del suelo

La toma de muestras de cada unidad se realizó de forma aleatoria y distribuida, buscando que fueran representativas de cada cobertura. En la Figura 6 se puede observar la distribución espacial de los puntos de recolección de muestras en las UH. Estos puntos fueron georeferenciados con la ayuda del aplicativo móvil Avenza Maps (play store).

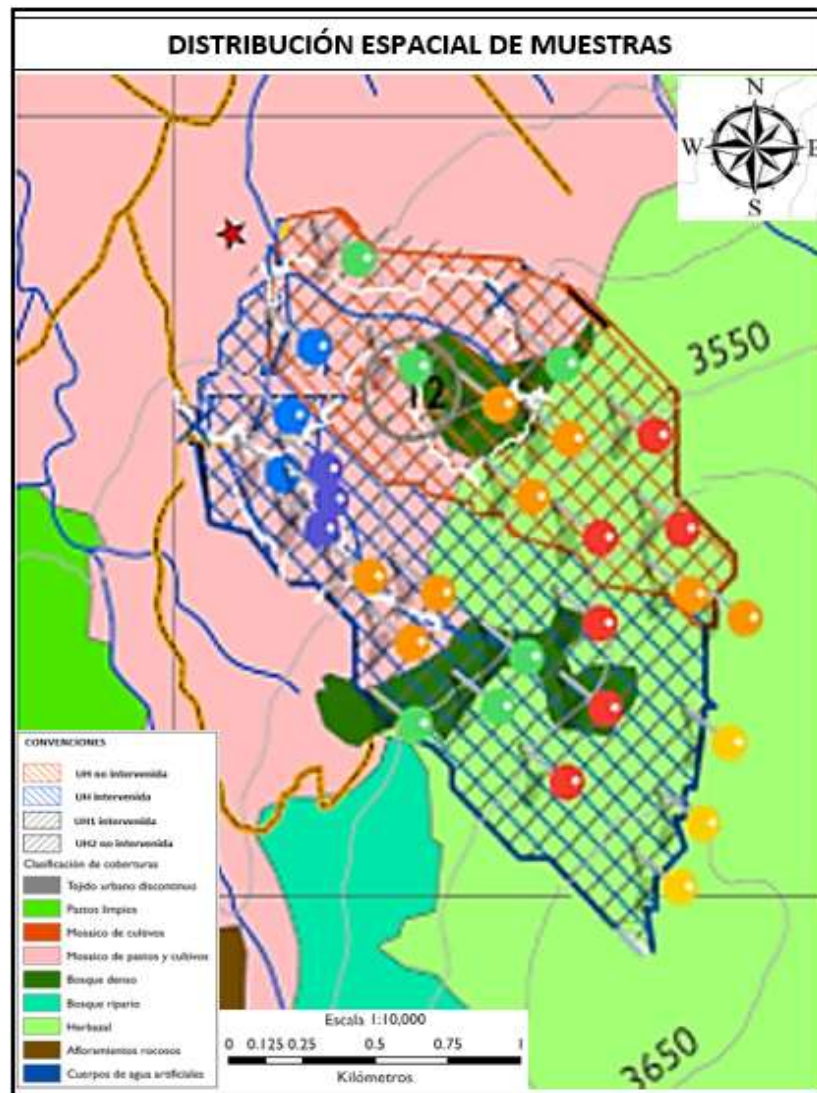


Figura 6. Distribución espacial de toma de muestras. Adaptado de Celis (2019) (Celis, 2019).

El análisis de las propiedades se desarrolló llevando a cabo los ensayos de laboratorio especificados en la sección de metodología para cada muestra y se recopiló la información de cada ensayo en el siguiente resumen. En las figuras mostradas a continuación se observa el comportamiento de cada variable y se clasifica por el tipo de cobertura de las unidades hidrográficas comparadas entre sí a las diferentes profundidades de muestreo.

3.3.1 Contenido de materia orgánica. En la Figura 7 se observa como disminuye el contenido de materia orgánica según el tipo de cobertura. La zona de cultivo de cebolla respecto a la vegetación natural de páramo en los primeros 5cm (UH intervenida) alcanzó a reducir en un 8.76%. Además, Se observa una disminución aproximada del contenido de materia orgánica para arbusto denso en las dos UH en relación a la segunda profundidad (10-15 cm) de 4.3% y la tercera (20-25 cm) en 2.3%, esto debido a que la materia orgánica es generada por la vegetación que compone la zona, quedando mayormente concentrada superficialmente (Angarita & Pastrana, 2016). Comparando las coberturas de vegetación natural de baja y alta pendiente se reduce en un 5% aproximadamente en ambas UH en las diferentes profundidades lo cual se puede atribuir a las características del terreno en pendiente y tipo de vegetación que las compone. Esta variación es producto de procesos como la agricultura que altera las condiciones iniciales del suelo y lo expone a la radiación solar y las altas temperaturas, ocasionando la degradación del suelo (Angarita & Pastrana, 2016).

La variación del contenido de MOS en la zona de Barbecho en la UH2 podría ser causado por las heces de un par de cabezas de ganado que se encontraron pastoreando el lugar. Resultados con la misma tendencia a los obtenidos en el estudio fueron evidenciados en estudios realizados en el páramo de Sumapaz (Daza et al., 2014) y el páramo El Granizo (Estupiñán et al., 2009), que muestran como el suelo con vegetación nativa presentó más altos contenidos de materia orgánica en comparación con otros usos de suelo, reduciéndolo en un 7% en promedio.

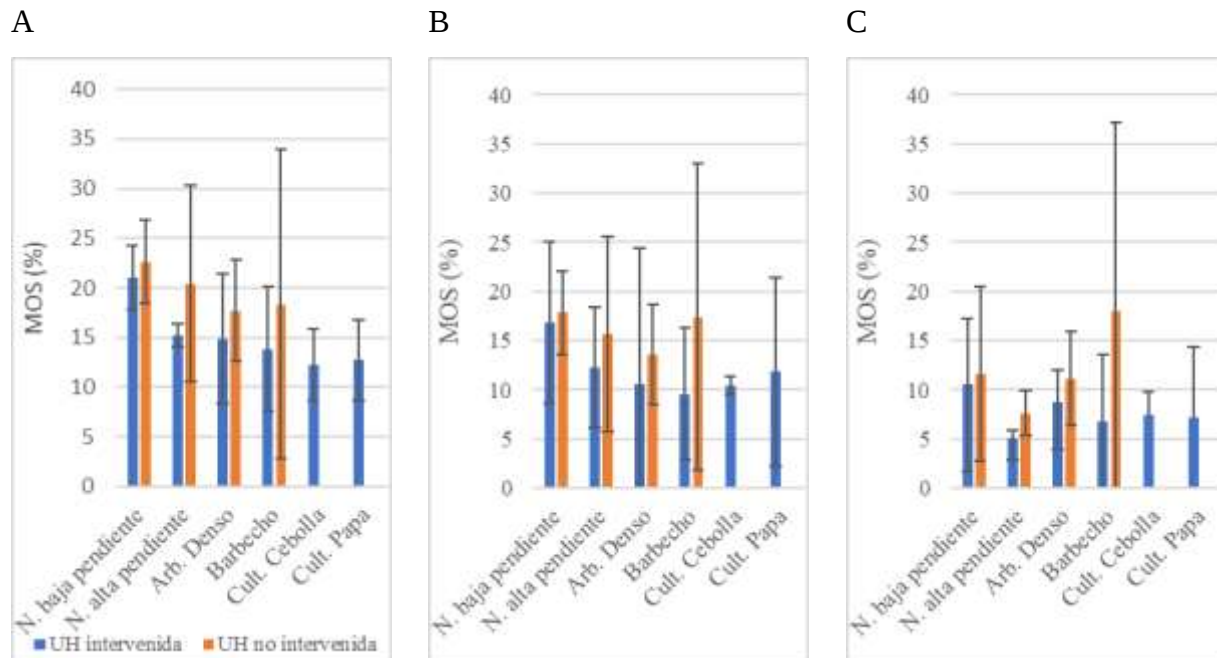


Figura 7. Contraste de Contenido de materia orgánica en las profundidades A: 0-5, B: 10-15 y C: 20-25 cm.

Nota: Tres muestras por cobertura para cada unidad hidrográfica.

3.3.2 Contenido de humedad. En la Figura 8 se puede observar cómo disminuye la Humedad respecto al tipo de cobertura. La zona de cultivos respecto a la vegetación natural de páramo (UH intervenida) alcanzo a reducir en un 20.49%. Por otra parte, se evidencia que la diferencia entre unidades para un mismo uso no supera el 5.6% de reducción del contenido de humedad. Este cambio se atribuye a factores como la vegetación y topografía.

Para una misma cobertura, disminuye a medida que aumenta la profundidad, si se observa el comportamiento en la cobertura N. alta pendiente en las dos UH la humedad promedio es de 47.9, 39.7 y 23.3% a las profundidades A, B y C respectivamente, lo cual puede atribuirse a los agregados del suelo que a medida que aumenta, aparece más material grueso, el cual tiene una menor capacidad de retención de humedad que el material fino (Angarita & Pastrana, 2016).

El tipo de vegetación presente es un factor importante para la humedad por la transpiración de las plantas. Algunas condiciones externas alteran la estructura del suelo, sometiéndolo a ambientes naturales extremos como las altas temperaturas y fuertes vientos, que ocasionan erosión y pérdida de humedad (Llambí et al., 2012).

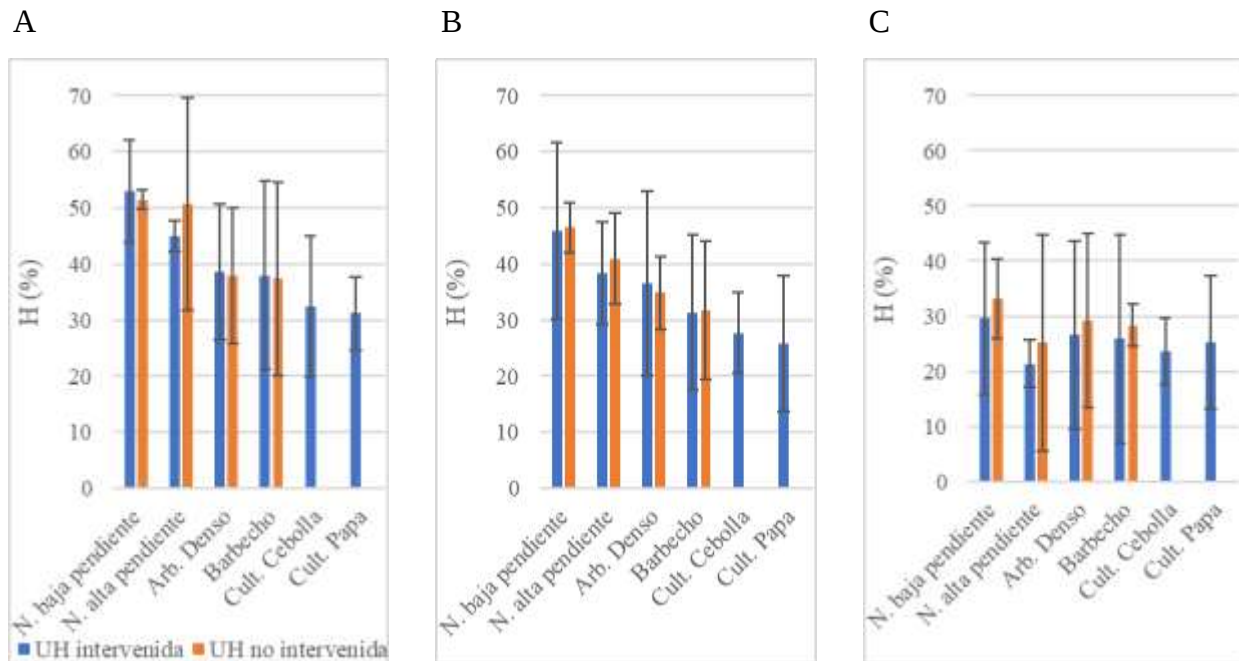


Figura 8. Contraste de medias de Contenido de Humedad en las profundidades A: 0-5, B: 10-15 y C: 20-25 cm.

Nota: Tres muestras por cobertura para cada unidad hidrografica.

3.3.3 Potencial de hidrogeno. En la Figura 9 se observa el comportamiento del pH según el tipo de cobertura, llegando a ser los cultivos los que presentan valores más altos respecto a los demás usos en las unidades de muestreo. De manera directa se puede observar el aumento de pH en la zona de cultivo de cebolla respecto a la zona natural, variando aproximadamente en una unidad, pasando de 4.3 a 5.3. Por otra parte, entre zonas con un mismo uso, la máxima variación de pH es en promedio de 0.3 a las diferentes profundidades.

Los mayores valores de pH en las zonas de cultivo pueden estar asociadas a que todo sustrato de cultivo necesita un rango de acidez para desarrollarse (Pérez, 2014). El valor óptimo de pH debe oscilar entre 5 y 6 para garantizar condiciones favorables en el desarrollo de los cultivos, lograr estas condiciones implica inducirlos por medio de la fertilización para obtener mayor rendimiento en las cosechas, aumentando el pH de la zona y la conductividad eléctrica del suelo (FAO (Food and Agriculture Organization), n.d.).

Con este resultado se puede evidenciar que el uso de abonos y fertilizantes alteran las propiedades químicas del suelo. Un comportamiento similar fue encontrado en otros estudios como el realizado en el páramo de El granizo – Cundinamarca (Estupiñán et al., 2009), donde el comportamiento de esta variable tiene la misma tendencia, siendo más neutro en la zona cultivada.

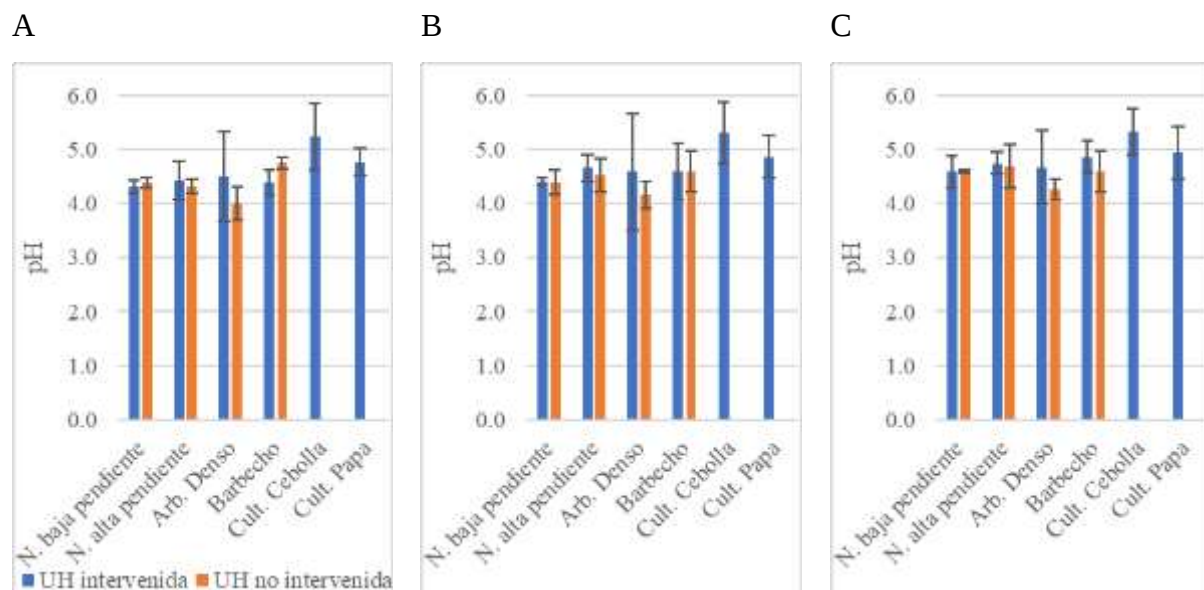


Figura 9. Contraste del Potencial de Hidrogeno en las profundidades A: 0-5, B: 10-15 y C: 20-25 cm.

Nota: Tres muestras por cobertura para cada unidad hidrografica.

3.3.4 Conductividad eléctrica. En cuanto a conductividad eléctrica, en la Figura 10 se observa para el uso de suelo N. baja pendiente una variación en 88 ms/cm respecto al cultivo de cebolla en la profundidad de 10- 15 cm. Esto puede estar asociado a que la presencia de fertilizantes aumenta la conductividad eléctrica (Barbaro, Karlanian, & Mata, n.d.). La tendencia esperada en las gráficas va ligada al comportamiento del pH, a medida que incrementa el pH del suelo, tiende a aumentar la capacidad para conducir la corriente eléctrica, es decir, se vuelve más alcalino (Barbaro et al., n.d.).

Se observa alta variación en los resultados, especialmente para la cobertura de arbusto denso, lo cual puede ser atribuido a errores en la calibración de los equipos, error humano en la medición o la composición de suelo en los puntos muestreados.

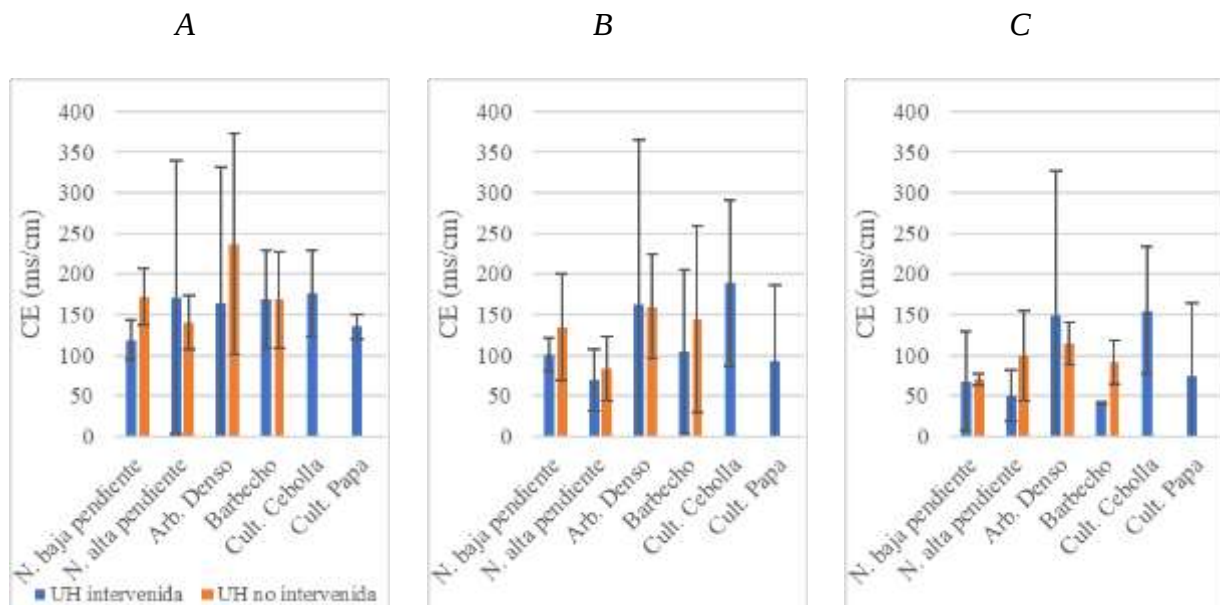


Figura 10. Contraste del Conductividad eléctrica en las profundidades A: 0-5, B: 10-15 y C: 20-25 cm.

Nota: Tres muestras por cobertura para cada unidad hidrografica.

3.3.5 Densidad real. La gravedad específica del suelo es un factor determinante para calcular la razón de vacíos y el grado de saturación de un suelo. La densidad real se hace necesaria para conocer la porosidad del suelo, que nos indica que tan eficiente puede ser para almacenar el recurso hídrico (ASTM-Standard-D854, 2014), (Daza et al., 2014).

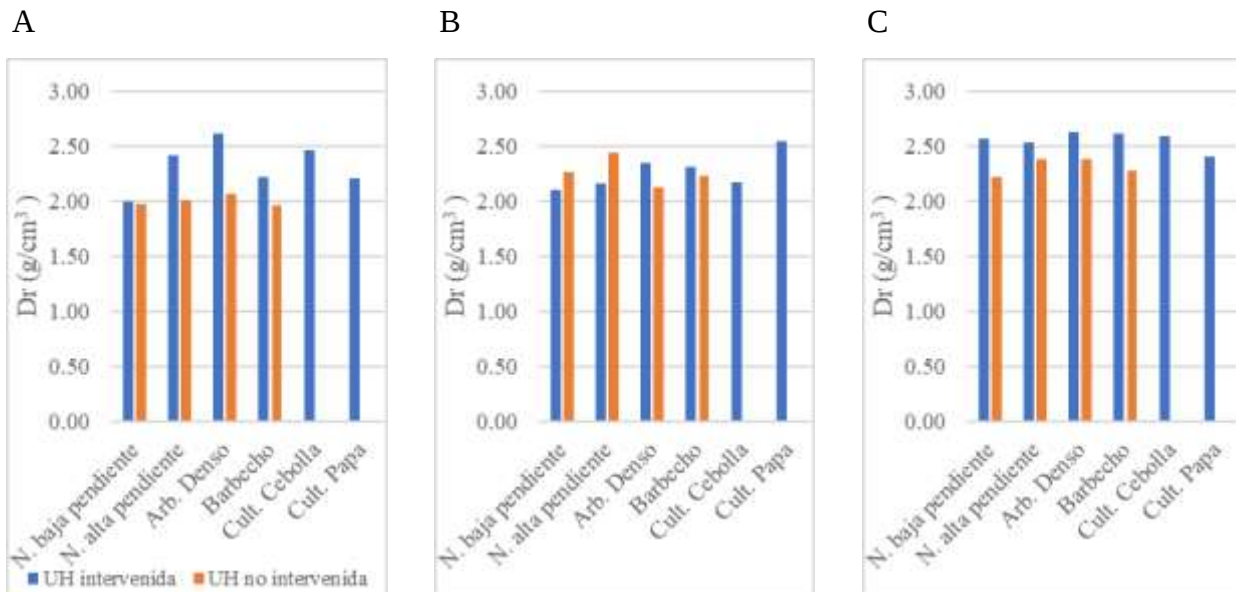


Figura 11. Contraste de la Densidad real en las profundidades A: 0-5, B: 10-15 y C: 20-25 cm.

Nota: Una muestra integrada de la misma profundidad para cada cobertura y unidad hidrografica.

3.3.6 Densidad aparente. La Figura 12 muestra una variación entre la zona de arbusto denso y barbecho de 0.36, 0.2 y 0.07 g/cm^3 para la UH intervenida y de 0.2 en promedio para la UH no intervenida a las profundidades A, B y C respectivamente. Se puede observar en la UH no intervenida que la densidad tiene una máxima variación entre coberturas de 0.3 g/cm^3 . La densidad aparente o densidad seca del suelo se ve influenciada por las actividades antrópicas y es usada para describir la porosidad total del suelo cuando es conocida la densidad real (Estupiñán et al., 2009).

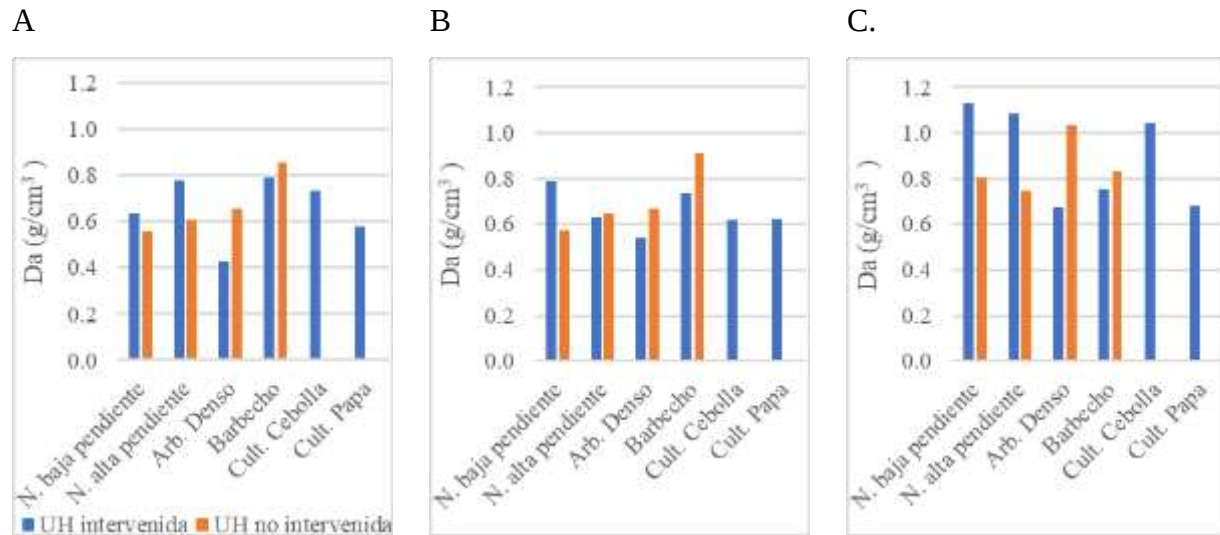


Figura 12. Contraste de la Densidad aparente en las profundidades A: 0-5, B: 10-15 y C: 20-25 cm.

Nota: Una muestra integrada de la misma profundidad para cada cobertura y unidad hidrográfica.

3.3.7 Porosidad total. En la Figura 13 se muestra el comportamiento de la porosidad del suelo a las diferentes profundidades. Se puede observar que disminuye a medida que aumenta la profundidad. La zona de arbusto denso muestra valores de porosidad de 83.6, 77.01 y 74.22% a las profundidades A, B y C respectivamente. Es destacable el comportamiento de la porosidad en la zona de barbecho de la UH intervenida puesto que aumenta con la profundidad, esto puede atribuirse a que es una zona en descanso y antes de serlo tenía cultivos.

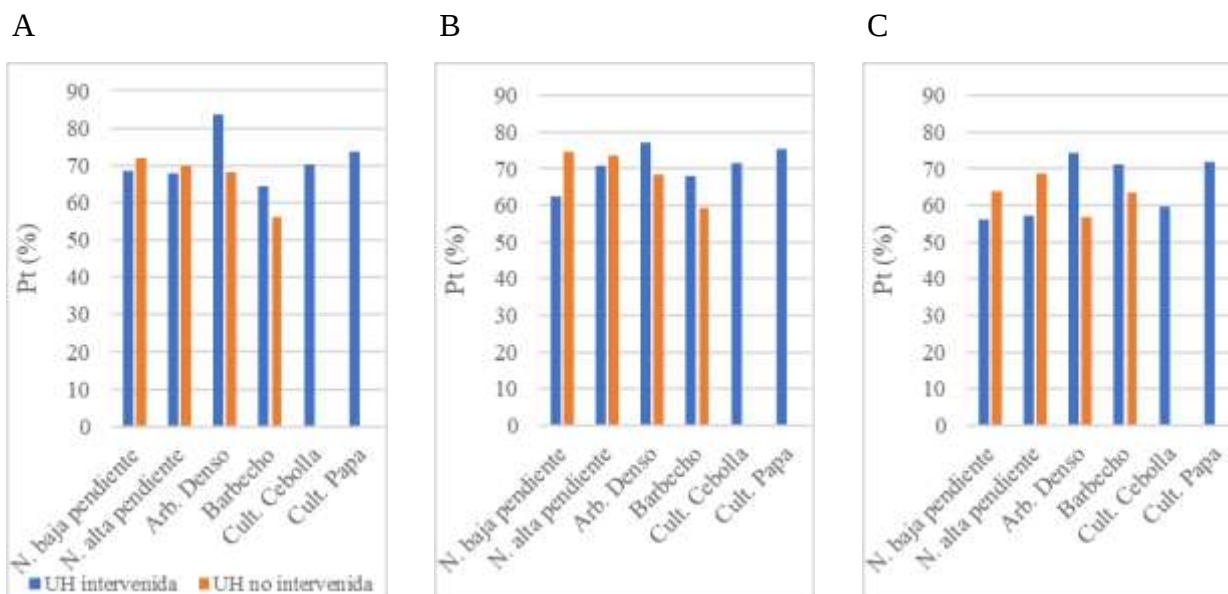


Figura 13. Contraste de la Porosidad total en las profundidades A: 0-5, B: 10-15 y C: 20-25 cm.

Nota: Una muestra integrada de la misma profundidad para cada cobertura y unidad hidrografica.

En la Figura 12 y Figura 13 se puede evidenciar la variación de la densidad aparente y como se ve afectada la porosidad. Si se observa el comportamiento de la densidad aparente en la N. baja pendiente, se evidencia como aumenta con la profundidad pasando de 1.05 a 1.56 g/cm³ (Figura 12) y se contrasta con el comportamiento de la porosidad de la N. baja pendiente que disminuye de 50 a 36% (Figura 13).

Se puede contrastar que la zona de cultivo muestra un aumento de la porosidad pero tiene un bajo contenido de materia organica y humedad, este resultado puede atribuirse al cambio de la estructura del suelo por las actividades de labranza (Daza et al., 2014).

Los suelos de páramo poseen baja densidad aparente debido al alto contenido de materia orgánica aumentando a la vez la porosidad del suelo (Daza et al., 2014). El alto contenido de materia orgánica, baja densidad aparente y alta porosidad en los suelos de páramo, indica una

capacidad de retención de agua muy alta, entre el 80 y 90% de saturación, equivalente a casi el doble del peso seco (Angarita & Pastrana, 2016).

El análisis de las propiedades hidrofísicas entre suelos con diferente cobertura permitió identificar el efecto que tiene el cambio de coberturas sobre las propiedades hidrofísicas del suelo, que se evidencia en una disminución aproximada para el cultivo con respecto a la zona N. baja pendiente del contenido de materia orgánica en un 10% y contenido de humedad en un 22%. La porosidad total (Pt) disminuye en un 28% en la zona de barbecho (zona en descanso) respecto a la zona de arbusto denso que es la zona con menor densidad aparente (Da). Por otra parte, se evidencia el aumento del potencial de hidrogeno (pH) con variación de una unidad y la conductividad eléctrica (CE) en 60 ms/cm aproximadamente en la zona de cultivo con respecto a la zona N. baja pendiente.

Estudios similares como el realizado en el páramo de Sumapaz (Daza et al., 2014), el páramo El Granizo (Estupiñán et al., 2009), el páramo Las Animas y el páramo Piedra de León (Díaz et al., 2004) pueden constatar el comportamiento de algunas de las variables acogidas para este estudio debido a resultados con la misma tendencia.

3.3.8 Textura. El análisis textural realizado por tamizado indicó que el suelo es grueso debido a que más del 50% en peso fue retenido hasta el tamiz No. 200. A la vez, no más del 50% de la fracción gruesa fue retenida en el tamiz No. 4, lo que indica mayor presencia de arenas. En general, se encontró un promedio de gravas en las dos UH de 2.42%, arenas 95.30% y finos 1.32%.

Los coeficientes de uniformidad y curvatura de las partículas dieron una clasificación de un suelo con presencia de arenas uniformes bien graduadas con grava y pocos finos, lo que significa

una distribución de tamaños de partículas diversos. Un suelo con mayor presencia de finos tiene mayor capacidad de almacenamiento y regulación del recurso hídrico, en cambio, un suelo con mayor presencia de agregados gruesos tiene más baja capacidad (Angarita & Pastrana, 2016).

Un estudio realizado por la CDMB caracteriza la estructura de la zona como “*una roca intrusiva ígnea tipo cuarzo monzonita, biotítica, inequigranular de grano grueso*” (CDMB(corporación autónoma regional para la defensa de la meseta de Bucaramanga), 2007).

Estudios en el páramo El granizo (Estupiñán et al., 2009) destacan suelos arenosos francos, los cuales permiten una buena retención de humedad. En el páramo de Sumapaz (Daza et al., 2014) se encontraron texturas francas y franco arcillosas que indican alta capacidad de retención y regulación de agua.

Los resultados obtenidos no permiten definir con exactitud la granulometría del suelo debido a que se necesita un pretratamiento para separar los pseudo-agregados por medio de la adición de sustancias químicas. Por lo tanto, para mejorar los resultados en cuanto a textura se recomienda realizar el laboratorio con los químicos necesarios y tomar al menos dos muestras más por uso.

3.3.9 Similitud entre las zonas de muestreo. En la discusión de clasificación de coberturas se hizo una descripción de las características de cada zona, encontrando similitud en vegetación y pendiente, lo cual permite considerar las zonas con igual cobertura como una sola. Sin embargo, el análisis de las propiedades hidrofísicas en dichas zonas aporta mayores elementos para validar este supuesto.

A partir de los resultados obtenidos se puede observar que hay unidades de muestreo que se pueden caracterizar como zonas homogéneas debido a que sus propiedades hidrofísicas tienden a mantener el mismo comportamiento. En particular, las zonas N. baja pendiente, N. alta

pendiente, Arb. Denso y barbecho entre ambas UH, además de presentan características similares en cobertura y en propiedades hidrofísicas. Los resultados mostrados de la Figura 7 a Figura 13, muestran una variación en promedio entre la UH intervenida y la UH no intervenida para la N. de baja pendiente de: humedad de 1.9%, densidad aparente de 0.2 g/cm^3 , densidad real de 0.2 g/cm^3 , porosidad de 7.8%, materia orgánica de 1.2%, potencial de hidrogeno de 0.0 y conductividad eléctrica de 29.5 ms/cm; para la zona de barbecho de: humedad de 1.7%, densidad aparente de 0.2 g/cm^3 , densidad real de 0.3 g/cm^3 , porosidad de 13.7%, materia orgánica de 2.8%, potencial de hidrogeno de 0.4 y conductividad eléctrica de 36.5 ms/cm

Dado que la media de los datos está contenida en la desviación estándar se consideran zonas idénticas. Este análisis se realizó para cada una de las profundidades y cada uso de suelo.

4. Conclusiones

Al estudiar los dos pares potenciales se clasificaron dos unidades hidrográficas, una intervenida y otra no intervenida en cada par según las coberturas presentes en cada una. Se considera cobertura no intervenida aquella que no muestra alteraciones en la vegetación por actividades antrópicas en la zona. El par uno fue el más adecuado para llevar a cabo el estudio bajo un enfoque metodológico de cuencas pareadas dado que tenía una unidad no intervenida por tener zonas con arbustos, frailejones, pajonales, zonas boscosas y pastos naturales y la otra unidad presentó zonas naturales con las mismas características y además cultivos de cebolla y

papa, los cuales se consideran actividades antrópicas y por tanto se consideró unidad hidrográfica intervenida.

Se concluyó que predominan seis usos del suelo en las UH los cuales son: vegetación nativa de páramo con alta pendiente, vegetación nativa de páramo con baja pendiente, arbusto denso, barbecho, cultivo de cebolla y de papa.

Como se pudo observar en las diferentes gráficas, la variabilidad de las propiedades hidrofísicas es evidente para cada variable a diferentes profundidades y para diferentes usos, lo cual da un indicio del efecto de las prácticas agrícola sobre las propiedades hidrofísicas del suelo en ecosistema de páramo, particularmente en las propiedades contenido de materia orgánica, humedad, porosidad y pH, que a su vez directamente inciden sobre la capacidad del suelo para retener y regular el recurso hídrico. De esta manera, es necesario incorporar alternativas para reducir los efectos de las prácticas agrícolas sobre el suelo, tales como evitar remover el suelo durante el cultivo, disminuir el arado con discos, evitar deforestación y evitar la compactación.

Encontrar zonas con características similares en cobertura y propiedades hidrofísicas, permitió identificar cuatro zonas de interés para un monitoreo de largo plazo: i) vegetación nativa de páramo con alta pendiente, ii) vegetación nativa de páramo con baja pendiente, iii) arbusto denso, y iv) barbecho. Al unificar estas zonas, es posible cumplir con el objetivo de analizar el efecto del cambio de cobertura sobre las propiedades hidrofísicas del suelo y a la vez disminuir los costos generales, la compra de equipos adicionales y reducir el tiempo y cantidad de ensayos de laboratorio, además se hace más eficiente el trabajo logístico al aliviar la carga en el monitoreo dado que cada perforación tarda un tiempo considerable, lo cual implica un mayor número de personas para cubrir las unidades.

5. Recomendaciones

El análisis de resultados reveló la variación excesiva de algunas propiedades (CE principalmente), lo cual puede deberse a la cantidad de muestras tomadas, la estratificación y composición mineral del suelo, la densidad de la vegetación presente, precisión de equipos o error humano a la hora de hacer los ensayos. Como recomendación, se debería tomar más replicas en cada zona para el posterior monitoreo, lo cual ayudaría a tener una menor desviación y, por tanto, resultados más homogéneos.

Referencias Bibliográficas

- American Society of Testing Materials. (2010). Standard Test Methods for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass: ASTM D 2216. *ASTM International*, (November 1988), 1–7. <https://doi.org/10.1520/D2216-10.N>
- Angarita, E., & Pastrana, J. (2016). *Estado del arte sobre las consecuencias de la agricultura en recursos hídricos y suelos en ecosistemas de páramo andino*. 61.
- ASTM-Standard-D854. (2014). Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer. *Annual Book of ASTM Standards*, 1–8. <https://doi.org/10.1520/D0854-14>
- ASTM: D 422- 06. (2006). Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils 1. *The Annual Book of ASTM Standards*, 63(Reapproved 2002), 1–8. <https://doi.org/10.1520/D0422-63R07E02.2>
- ASTM:D7263-09. (2009). Standard Test Methods for Laboratory Determination of Density (Unit Weight) of Soil Specimens. *ASTM International*, i, 1–7. <https://doi.org/10.1520/D7263-09.2>
- ASTM. (2011). Standard Test Methods for Organic Matter Content of Athletic Field Rootzone Mixes. *Annual Book of ASTM Standards*, (9), 1–7. <https://doi.org/10.1520/D2216-10.1.5>
- Barbaro, L., Karlanian, M., & Mata, D. (n.d.). *Importancia del pH y la Conductividad Eléctrica (CE) en los sustratos para plantas*. 11.
- Best, A., Zhang, L., McMahon, T., Western, A., & Vertessy, R. (2003). *A critical review of paired catchment studies with reference to seasonal flows and climatic variability*. *CSIRO Land and Water Technical Report*. 56.

Burneo, P. (2013). *Propiedades de los Suelos*. 45.

Buytaert, W., Céleri, R., De Bièvre, B., & Cisneros, F. (2003). Hidrología del Páramo Andino: Propiedades, Importancia y Vulnerabilidad. *Soil and Water*, 1–26. <https://doi.org/paramo.cc.ic.ac.uk/pubs/ES/Hidroparamo2.pdf>

Castillo Vega, C. I. (2005). *Análisis de caudales máximos en cuencas experimentales para distintas condiciones de cobertura arbórea , Décima*.

CDMB(corporación autónoma regional para la defensa de la meseta de Bucaramanga). (2007). “*PÁRAMO DE BERLÍN* .”

Celis, A. (2019). *Evaluación de los efectos del cambio de uso de suelo y cobertura sobre los servicios de abastecimiento y regulación hídrica ofertados por dos unidades hidrográficas de páramo/Artículo en preparación*.

CORPONOR(Corporacion Autonoma Regional de la frontera Nororiental). (2009). *EVALUACION-ZONIFICACIÓN ECOLÓGICA*. 151–176.

Daza, M., Florez, H., & Triana, F. (2014). *Efecto del Uso del Suelo en la Capacidad de Almacenamiento Hídrico en el Páramo de Sumapaz - Colombia*. 67(100), 7189–7200.

De Bièvre, B., Iñiguez, V., & Buytaert, W. (2008). Hidrología del páramo Importancia, propiedades y vulnerabilidad CONOCER PARA CONSERVAR. *Investigaciones Biofísicas En El Páramo*, 1–15. Retrieved from <https://es.scribd.com/document/58912130/Hidroparamo>

Department of Sustainable Natural Resources SOIL SURVEY STANDARD TEST METHOD ELECTRICAL CONDUCTIVITY. (n.d.). 1–3.

Diaz, E., Paz, L., Amezquita, E., & Rivera., M. (2004). Influencia de los sistemas de uso del suelo en el comportamiento de las propiedades físicas en los páramos “Las Ánimas” (municipio de Silvia) y “Piedra de León” (municipio de Sotará) departamento del Cauca. *Seminario Internacional Experiencias y Métodos de Manejo de Cuencas y Su Contribución Al Desarrollo Rural En Los Andes: Desafíos y Oportunidades Para Lograr Mayores Impactos*.

Estupiñán, L. H., Gómez, J. E., Barrantes, V. J., & Limas, L. F. (2009). *LAS CARACTERÍSTICAS DEL SUELO EN EL PÁRAMO EFFECT CAUSED BY AGRICULTURAL ACTIVITIES ON SOIL CHARACTERISTICS IN THE PARAMO EL GRANIZO (CUNDINAMARCA -COLOMBIA)*.

FAO (Food and Agriculture Organization). (n.d.). *Los fertilizantes y su uso*. 83.

Geometry, R., & Analysis, G. (n.d.). “*Tauramena-Casanare-Cobertura de suelos*.” 1–7.

Google Maps. (n.d.). Retrieved July 26, 2019, from <https://www.google.com/maps/@7.1221755,-72.9455111,3286m/data=!3m1!1e3>

Hernández, Z., & Monasterio, M. (2002). La vulnerabilidad de las formas de vida en la antropización del páramo andino. *Congreso Mundial de Páramos, Memorias Tomo I*, 321–331.

Hofstede, R. (2010). El impacto de las actividades humanas sobre el páramo. *Los Páramos Del Ecuador. Particularidades, Problemas y Perspectivas*, 161–181.

Llambí, L. D., Soto, A., Célleri, R., De Bièvre, B., Ochoa-Tocachi, B. F., & Borja, P. (2012). Ecología, Hidrología y Suelos de Páramos. *Proyecto Páramo Andino*, (1), 284. Retrieved from file:///C:/Users/GI1/Documents/Downloads/Ecologia_Hidrologia_y_Suelos_del_Paramo.pdf

Ministerio del Medio Ambiente. (2002). Programa nacional para el manejo sostenible y restauración de ecosistemas de alta montaña colombiana: páramos. *Congreso Mundial de Páramos- Memorias Tomo I*, 73. Retrieved from http://www.paramocolombia.info/doc_memorias.html

N.S.R. (2010). *Norma sismo resistente del 2010 Diario oficial*. 530–827.

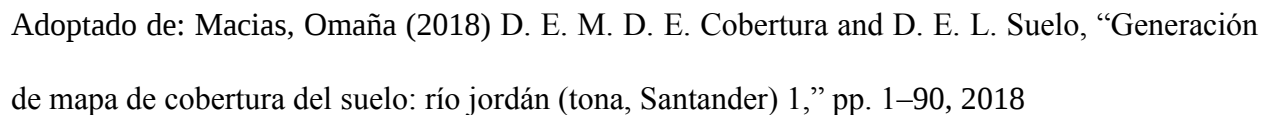
NTC 4113-1. (1997). Guía para el diseño de programas de muestreo. *Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC)*, 10.

Ospina, D. R. (n.d.). *Guía divulgativa de criterios para la delimitación de páramos de colombia*.

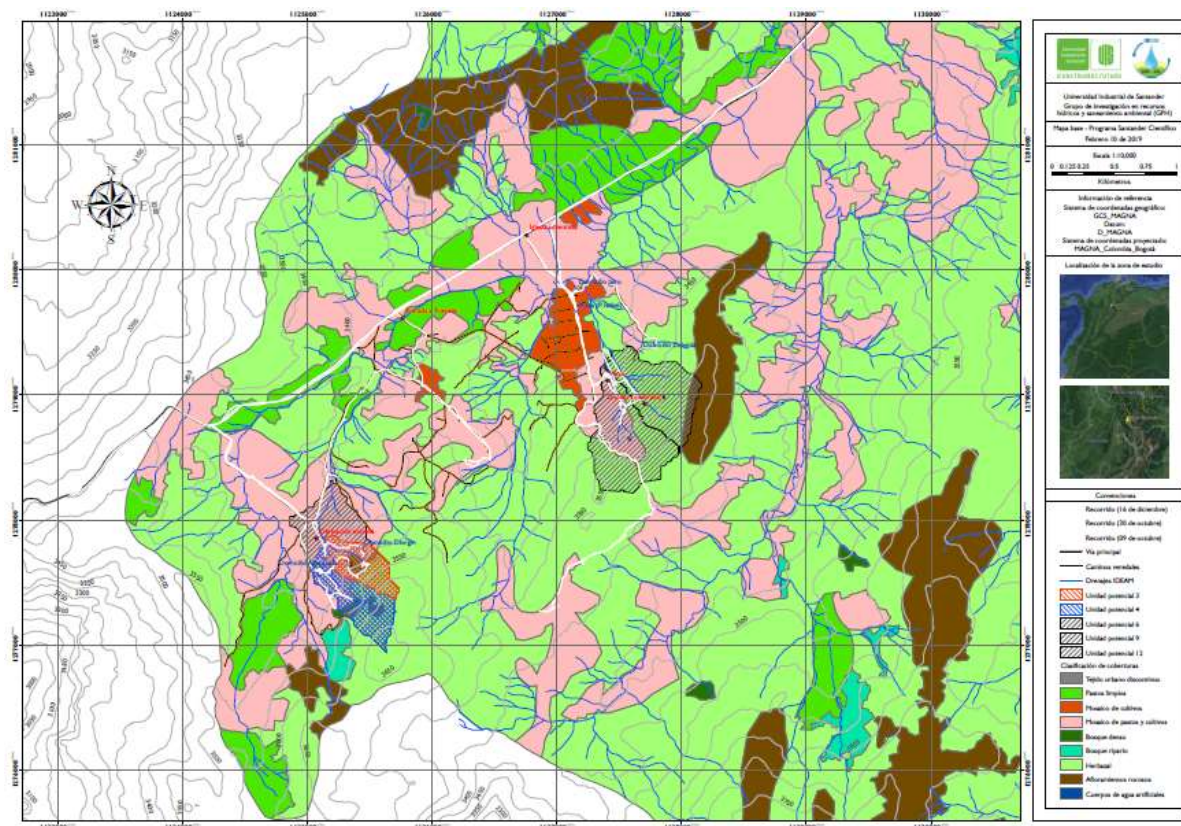
- Patiño, J. F., León, J. D., Montes, L. A., & Hernández, L. C. (2007). *Microcuenca De La Quebrada La Murciélago , Antioquia*.
- Patiño, S. (2019). *Evaluación del efecto del uso del suelo de páramo sobre sus propiedades hidrofísicas en relación con el servicio de suministro y regulación hídrica/ Artículo en preparación*.
- Pérez, J. (2014). *Uso de los fertilizantes y su impacto en la producción agrícola*.
- PGN. (2008). *Situación de los páramos en Colombia frente a la actividad antrópica y el cambio climático*. 112.
- Ramírez, M. (2016). *Caracterización de las propiedades hidrofísicas de los suelos del Centro Agropecuario Marengo CAM y su incidencia en su capacidad productiva*.
- Ramírez, R. (2007). *PROPIEDADES FÍSICAS QUÍMICAS y BIOLÓGICAS DE LOS SUELOS*. 5–23. Retrieved from <http://bibliotecadigital.agronet.gov.co/bitstream/11348/6636/1/083.pdf>
- Ruiz T, W., & Grillo F, M. (1975). Determinación de la retención de humedad del suelo a capacidad de campo por el método del tanque de arena. *Acta Agronómica*, 25(1–4), 31–53. Retrieved from http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/acta_agronomica/article/view/48463
- Ruprecht, J. K., & Schofield, N. J. (1989). Analysis of streamflow generation following deforestation in southwest Western Australia. *Journal of Hydrology*, 105(1–2), 1–17. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(89\)90093-0](https://doi.org/10.1016/0022-1694(89)90093-0)
- Scott, D. F., Prinsloo, F. W., Moses, G., Mehlomakulu, M., & Simmers, A. D. A. (2000). *A re-analysis of the South African catchment afforestation experimental data. Water Reaserch Commission Report No. 810/1/00*. (810), 1–138.
- Statements, B., & Testing, C. (2007). pH of Soils 1. *Annual Book of ASTM Standards*, 01(10), 10–12. <https://doi.org/10.1520/D4972-13.2>

- Stednick, J. D. (1996). Monitoring the effects of timber harvest on annual water yield. *Journal of Hydrology*, 176(1–4), 79–95. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(95\)02780-7](https://doi.org/10.1016/0022-1694(95)02780-7)
- VisionWorld. (2004). Manual de manejo de cuencas. *San Salvador, SV*, 1–107. Retrieved from <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Manual+de+manejo+d+e+cuencas#9>

Apéndice A. Mapa uso de suelo Esc 1:25000.



Apéndice B: Mapa de suelo, cartografía río tona Esc 1:10000.



Fuente: Celis (2019“Evaluación de los efectos del cambio de uso de suelo y cobertura sobre los servicios de abastecimiento y regulación hídrica ofertados por dos unidades hidrográficas de páramo/Artículo en preparación,”