



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

**Distribución espacial del stock de
carbono orgánico del suelo en paisajes
ocupados por caña de azúcar
(*Saccharum officinarum*) para panela**

Yeny Paola Carrillo Cortés

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ciencias Agrarias
Bogotá, Colombia
2022

Distribución espacial del stock de carbono orgánico del suelo en paisajes ocupados por caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) para panela

Yeny Paola Carrillo Cortés

Tesis o trabajo de investigación presentada(o) como requisito parcial para optar al título
de:

Magister en Ciencias Agrarias

Directora:

Doctora Yolanda Rubiano Sanabria

Codirectora:

Investigadora Magister Bellanid Huertas Carranza

Línea de Investigación:

Suelos y Aguas

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ciencias Agrarias

Bogotá, Colombia

2022

Agradecimientos

A mis padres Luis Emiro y Adriana por apoyarme siempre y acompañarme en este camino, gracias por sus palabras de aliento y abrazos cuándo los necesitaba. A mis hermanos Laura y Jonathan por ser testigos día a día del proceso y por sus consejos. A mi novio Jonathan por su paciencia y por escucharme a diario contarle mis penas y alegrías. A mis queridas abuelitas Cecilia y Zoraida por ser mi pilar espiritual y aterrizarme siempre.

A mi directora, la doctora Yolanda Rubiano Sanabria por guiarme en este proceso y por sus enseñanzas en la ciencia del suelo y a mi codirectora, la investigadora Bellanid Huertas Carranza por sus enseñanzas sobre el cultivo de caña y por su apoyo y fuerza en momentos difíciles.

A mis compañeros de estudio Karla, Leonardo y Felipe, con quienes pasábamos tardes hablando sobre nuestros avances y preocupaciones. A los profesores Héctor Jaime, Pedro Karim y Jeiner Buitrago que me introdujeron a la ciencia de la Geomorfología, a entender y a mejorar en la interpretación de las geoformas. A quienes conocí en el camino, Sebastián Gutiérrez, Edinson Chacón y Melissa Lis, por escuchar y responder a mis dudas, y por darme sus consejos para mejorar.

A la universidad Nacional de Colombia por acogerme como estudiante y brindarme las herramientas para mi formación, y por su apoyo para participar en congresos internacionales. A la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria – AGROSAVIA por formular y ejecutar el proyecto de servicios ecosistémicos en paisajes de agricultura familiar panelera, del cual hace parte esta investigación. A todos los agricultores de Quebradanegra y Nocaima que nos abrieron las puertas de sus fincas para la toma de información.

Un agradecimiento especial a Iván Rodrigo Orjuela Osorio (Q.E.P.D) por ser quién me guio en la decisión de continuar mi formación académica, jamás olvidaré aquellas largas conversaciones, jornadas de ensayo y correcciones, regaños y felicitaciones que me motivaron a seguir y a ser mejor profesional y persona.

Resumen

El suelo, segundo reservorio global de carbono (C), es importante en la regulación del ciclo biogeoquímico de este elemento. Sin embargo, el equilibrio de este ciclo se ve perturbado por actividades antropogénicas que disminuyen el contenido de C en el suelo, aumentando sus concentraciones en la atmósfera. Las estrategias de conservación de suelo adoptadas desde el sector agrícola surgen como una propuesta a la mitigación de estos cambios, ya que le permiten recuperar sus facultades como regulador y depósito de C. El cultivo de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) para producción de panela presenta un alto potencial en la captura de carbono y su estabilidad en el suelo. Por lo cual, el objetivo de investigación fue evaluar la distribución espacial del stock de Carbono Orgánico del Suelo (COS) en paisajes ocupados por cultivos de caña de azúcar para panela. Para esto, se caracterizaron los paisajes agrícolas de caña panelera en los municipios de Quebradanegra y Nocaima mediante procesamiento de información geoespacial. Se utilizó el método de Hiper cubo Latino para definir una muestra de 13 fincas con geoformas y manejos representativos donde se determinó el stock del COS y su distribución en una profundidad de 50 cm. Con esta información, las correlaciones entre variables y el entrenamiento de un modelo no paramétrico se pudo establecer un modelo conceptual sobre la influencia de las covariables ambientales en las existencias de COS. Se evidenció que el COS es controlado por las características propias de cada sitio, tanto de propiedades del suelo como factores clima, organismos y relieve. Específicamente, los factores importantes en la determinación del COS fueron la humedad del suelo ($R^2=0,38$), contenido de arcillas ($R^2=0,36$), diámetro ponderado medio ($R^2=0,20$) y temperatura ($R^2=0,33$).

Palabras clave: carbono orgánico del suelo, paisaje agrícola, caña de azúcar para panela, covariables ambientales.

Spatial distribution of soil organic carbon stock in landscapes occupied by sugarcane (*Saccharum officinarum*) for panela

Abstract

Soil is the second global carbon (C) reservoir and it is important regulating the biogeochemical cycle of this element. However, balance in this cycle is disturbed by anthropogenic activities that decrease C content in the soil, while increasing its concentration in the atmosphere. Soil conservation strategies adopted in the agricultural sector emerge as a proposal to mitigate these changes, since they allow soil to recover its potential as a regulator and deposit of C. Sugar cane (*Saccharum officinarum*) cultivation to produce panela has a high potential in C sequestration and its stability in the soil. Therefore, the objective of this study was to evaluate Soil Organic Carbon (SOC) spatial distribution in landscapes occupied by sugar cane crops for panela production. Agricultural landscapes of sugarcane for panelera were characterized in the municipalities of Quebradanegra and Nocaima (Colombia) using geospatial information processing; sugar cane producers and management strategies were also characterized. Samples were defined using a Latin Hypercube in 13 farms of representative geofoms and agricultural management where SOC stock and its distribution in the first 50cm were determined. With this information, a conceptual nonparametric model of the influence of environmental covariates on SOC stocks was built. Model showed that SOC is controlled by local characteristics, such as soil properties and climate factors, organisms and topography. Specifically, the most important factors determining SOC were soil humidity ($R^2=0,38$), clay content ($R^2=0,36$), weighted average diameter ($R^2=0,20$) and temperature ($R^2=0,33$).

Keywords: Soil organic carbon, agriculture landscape, sugarcane for panela, environmental covariates.

Contenido

Introducción	1
Capítulo 1. Caracterización biofísica del paisaje agrícola de caña de azúcar para producción de panela y sus manejos en los municipios de Quebradanegra y Nocaima (Cundinamarca)	3
1.1. Introducción	3
1.2. Marco conceptual.....	4
1.3. Metodología	8
1.3.1. Descripción del área de estudio.....	8
1.3.2. Metodología para la caracterización del paisaje agrícola del cultivo de caña de azúcar para panela	10
1.4. Resultados y discusión	14
1.4.1. Caracterización climática	14
1.4.2. Caracterización geomorfológica.....	16
1.4.3. Caracterización cobertura de caña de azúcar panelera	20
1.4.4. Caracterización de suelos.....	23
1.4.5. Análisis estadístico para la tipificación de los cultivos.....	24
1.5. Conclusiones	28
Capítulo 2. Stock del carbono orgánico del suelo asociado a cultivos de caña de azúcar panelera	29
2.1. Introducción	29
2.2. Marco conceptual.....	31
2.3. Metodología.....	37
2.3.1. Muestreo, análisis en campo y laboratorio.....	37
2.3.2. Análisis de los datos	41
2.4. Resultados y discusión	42
2.4.2. Caracterización edáfica de las unidades productivas	44
2.4.3. Carbono orgánico del suelo.....	47
2.4.4. Distribución vertical del cos	54
2.5. Conclusiones.....	52

Capítulo 3. Propuesta de modelo conceptual del efecto de covariables ambientales en el stock del carbono orgánico del suelo.....	53
3.1. Introducción	53
3.2. Marco conceptual.....	54
3.3. Metodología	55
3.3.1. Preparación y procesamiento de insumos	55
3.3.2. Selección de covariables y entrenamiento de un modelo	57
3.3.3. Distribución lateral.....	57
3.3.4. Aproximación a un modelo conceptual de las covariables ambientales sobre el COS	58
3.4. Resultados y discusión	58
3.4.1. Selección de covariables y entrenamiento de un modelo	58
3.4.2. Distribución lateral del stock de carbono orgánico del suelo en 10 cm de profundidad.....	60
3.4.3. Modelo conceptual de las covariables ambientales que influyen en el COS	61
3.5. Conclusiones	66
Referencias.....	67

Introducción

Los paisajes agrícolas¹, son sistemas complejos y multifuncionales que ofrecen servicios ecosistémicos al hombre, y son percibidos por el mismo, según su concepción y construcción social. Así, los paisajes agrícolas se consideran áreas de producción agrícola y también pueden ser dedicados a la contemplación, el disfrute, la conservación de biodiversidad, regulación climática, regulación hídrica y la captura de carbono, servicios ecosistémicos que cambian con la heterogeneidad del paisaje. Estos sistemas al ser multifuncionales son objeto de planificación y manejo adecuado. (Anderson *et al.*, 2017; Baral *et al.*, 2013).

Iniciativas como el pago a agricultores por proporcionar servicios ecosistémicos, tales como la captura de carbono se hacen más visibles globalmente (Lovell *et al.*, 2010) y se puede incentivar el desarrollo rural sostenible, considerando los beneficios sociales y económicos que proporcionan los paisajes agrícolas (Oostindie *et al.*, 2006). Aunque, la agricultura contribuye aproximadamente al 26% de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en Colombia, se ha evidenciado que este sector también ofrece oportunidades en mitigación del cambio climático disminuyendo las concentraciones de CO₂ con una absorción del 59% (IDEAM, 2016).

En Colombia el cultivo de caña panelera ocupa aproximadamente 218.749 hectáreas (ha) y representa el 3,7% del PIB agrícola del país (Agronet, 2019²; García *et al.*, 2007). Este cultivo se concentra en zonas de ladera, principalmente en la región andina, en Cundinamarca ocupa un 15,15% del total del área cultivada (Agronet, 2019) y es característico de pequeños agricultores, familias campesinas, que dedican a la agricultura entre las 5 y 20 ha. En Colombia, solo un 5% de la producción panelera se efectúa en extensiones superiores a 50 ha (Abaunza *et al.*, 2012). Se ha encontrado también, que suelos sembrados con caña de azúcar, con un manejo de labranza reducida presentan mayores tenores de COS comparados con otros cultivos manejados convencionalmente (Machado *et al.*, 2010; Montenegro y Chaves, 2011).

El monitoreo de C es importante para la comprensión científica del ciclo del C y para orientar objetivos políticos que lleven a la disminución de emisiones de Gases de Efecto Invernadero - GEI, la seguridad alimentaria y la mitigación de cambio climático (Smith *et al.*, 2012). En este

¹ También considerados paisajes de producción (Baral, *et al* 2013), Paisajes Rurales (Oostindie *et al.* 2006)

² <https://www.agronet.gov.co/estadistica/Paginas/home.aspx?cod=1>

contexto, Colombia ha formulado Acciones Nacionalmente Apropriadas de Mitigación – NAMAs³ - para el subsector agrícola panelero que buscan reducir las emisiones de GEI y aumentar las reservas de carbono mediante estrategias de reconversión en la siembra, manejo del cultivo y del proceso productivo. De lo expuesto deriva la importancia de conocer las existencias del COS en paisajes de agricultura de caña panelera, que aporten a inventarios desde este subsector y permitan plantear estrategias de reconversión productiva sostenible.

En consonancia con lo expuesto, esta investigación tiene como objetivo principal: evaluar el stock de carbono orgánico del suelo en paisajes ocupados por caña de azúcar para panela (*Saccharum officinarum*), específicamente: *i*) Realizar la caracterización biofísica (geomorfología, clima, cobertura y suelos) en paisajes ocupados por caña de azúcar panelera, *ii*) Determinar el stock de COS y su variabilidad en los cultivos de caña de azúcar panelera bajo los modelos de corte y, *iii*) Proponer un modelo conceptual que establezca las relaciones entre las covariables ambientales y el stock de COS.

El documento se presenta en 3 capítulos que responden a los objetivos específicos. El capítulo 1, corresponde a la caracterización biofísica del paisaje agrícola panelero en los municipios de Quebradanegra y Nocaima con información generada de geoformas, variables climáticas y uso de cultivo de caña (y sus manejos), incluye la tipificación de cultivos realizada a partir de un Análisis Factorial de Datos Mixtos (AFDM). El capítulo 2, evidencia como a partir del análisis con el Hipercono Latino Condicionado se define la muestra representativa de la zona de estudio, describen las actividades realizadas en campo, laboratorio y el análisis de los datos para determinar el stock de COS, densidad aparente, densidad real, textura, humedad, estabilidad estructural y aquellos parámetros derivados del DEM, mediante correlaciones de Pearson y distribución vertical de las propiedades. En el capítulo 3 se estableció un modelo conceptual sobre la influencia que tienen las covariables ambientales en el stock de carbono, teniendo en cuenta la información obtenida en el capítulo 2.

³ Las NAMAs se formularon a partir de la Estrategia de Desarrollo Bajo en Carbono para el cumplimiento parcial del compromiso ratificado de la COP21 sobre reducir el 20% de las emisiones proyectadas para 2030.

Capítulo 1. Caracterización biofísica del paisaje agrícola de caña de azúcar para producción de panela y sus manejos en los municipios de Quebradanegra y Nocaima (Cundinamarca).

1.1. Introducción

La panela, es un producto definido por la FAO como, edulcorante tradicional procesado de la caña de azúcar, es un sólido sin refinar obtenido tras la evaporación del jugo de la caña y que toma un nombre vernáculo diferente en cada país o región, derivado del cultivo de caña de azúcar, la cual en Latinoamérica ocupa más de 13 millones de ha (FAOSTAT, 2019⁴). En Colombia, el área destinada a este cultivo es de 218.749 hectáreas dedicadas a la elaboración artesanal e industrial de panela y la sitúan como el segundo productor mundial después de la India, con 1,6 millones de toneladas*año⁻¹ en 2018 (Kumar y Singh, 2021), y en el primer consumidor con 32 kg per cápita/año (Rodriguez *et al.*, 2004). En éste país, su consumo como alimento se destaca como un rasgo cultural nacional (Aguiar, 2001) y se constituye en parte del sustento de más de 350.000 familias, asentadas en las laderas montañosas cálidas y templadas (500 a 1.500 msnm) de la región andina.

Administrativamente, Cundinamarca representa la mayor extensión cultivada con caña de azúcar para panela, contribuye con 18,23%, seguido de Antioquia que aporta el 17,24% (Agronet, 2019). Localmente, la provincia de Gualivá, puntualmente los municipios de Quebradanegra y Nocaima, se caracterizan por ser productores de panela, ocupan el tercero y quinto lugar en la producción local de panela y son el área objeto de este estudio (Agronet, 2016).

Hoy, el interés de los científicos por estudiar los paisajes agrícolas se ha suscitado gracias al reconocimiento de su importancia productiva y económica, y a su relevancia como espacios multifuncionales que han evolucionado con el hombre y que proporcionan servicios

⁴ <http://www.fao.org/faostat/es/#home>

ecosistémicos de producción, soporte, regulación y culturales, en los cuales se entiende que el uso de la tierra (y su manejo) tienen un impacto en el paisaje en los tipos y en la calidad de los servicios que prestan a la sociedad (Pilgaard, 2016).

Este capítulo desarrolla el marco conceptual sobre las nociones de paisaje y paisaje agrícola en Colombia, incluye la caracterización biofísica realizada para el paisaje agrícola de caña panelera en los municipios de Quebradanegra y Nocaima a partir del análisis interpretativo de información de clima, geomorfología, suelo, cobertura y manejo del cultivo de caña panelera y la tipificación de los cultivos resaltando la importancia de las geoformas, el relieve y el manejo del cultivo usando la herramienta de análisis factorial de datos mixtos (AFDM) y el análisis de agrupamiento jerárquico.

1.2. Marco conceptual

El paisaje se define como un sistema integrado por elementos físicos (suelo, geomorfología, clima), elementos vivos (fauna y flora - cobertura vegetal) incluye además elementos humanos (actividades antrópicas, el entorno construido y el diseño del paisaje) (Lovell *et al.*, 2010). Al denominarlo como sistema, se entiende que se trata no solo de la sumatoria de sus elementos (Etter, 1991; Fernández, 2010; Salas, 2017), sino que resulta de la combinación dinámica de los mismos, y que hacen del paisaje un conjunto indisociable en constante evolución (Aguirre, 2018) con funciones propias para proporcionar servicios ecosistémicos (Anderson *et al.*, 2017; Baral *et al.*, 2013).

La evolución de este concepto la han estudiado a profundidad Aguirre, 2018, Castillo Poveda, 2016 y Fernández-christlieb, 2010. Aquí, se presenta un resumen cronológico general con énfasis en el contexto biofísico del paisaje y los aportes de investigadores para la construcción del concepto.

En el siglo XIX, Alexander Von Humboldt en el marco de la geografía como “*ciencia de síntesis*” se refirió a los paisajes – *Landschaft* como unidades naturales existentes en un espacio (Castillo, 2016), y lo definió en el contexto científico como el carácter íntegro de una porción de tierra (Etter, 1991). En esta medida, Carl Ritter, y William Davis consideraron la geografía como una ciencia diferenciante de regiones e incluyeron los principios evolutivos de aspectos físicos

del paisaje como las geoformas. A comienzos del siglo XX Alfred Hettner, de la escuela alemana propuso el término *Länderkunde Schema* que integra geología, relieve, clima, recursos naturales y asentamientos en el paisaje, sentando las bases de factores formadores. Posteriormente, Otto Schlüter propuso el *Kulturlandschaft* que diferencia el paisaje cultural del paisaje natural y los patrones de asentamientos (Aguirre, 2018).

En Colombia, el IGAC adoptó para el mapeo de los suelos la definición de paisaje geomórfico propuesta por Joseph Alfred Zinck en 2016, “una gran superficie terrestre caracterizada por su expresión fisiográfica, formado por la repetición de tipos de relieve similares o la asociación de diferentes tipos de relieve”. La unidad de análisis denominada en inglés “*landform*” y en español “*forma del terreno*”, se identifica en función de sus características sin hacer referencia a los factores de formación, ya que no son intrínsecamente parte de su clasificación. Este sistema, propone una estructura de niveles categóricos anidados. Para la descripción, identificación y clasificación de geoformas se debe tener en cuenta los atributos, a) morfográficos (geometría) b) morfométricos (dimensiones) que se aplican sobre el componente externo de las geoformas y son descriptivos, estos se extraen de imágenes satelitales o modelos digitales de elevación, c) morfogénicos (origen y evolución) y d) morfocronológicos (tiempo), que se aplican en el componente interno y se determinan principalmente en laboratorio (Zinck *et al.*, 2016).

Paisaje Agrícola

El paisaje agrícola, a su vez, se entiende como un paisaje cultural, fue reconocido en 1992 por La Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura - UNESCO – que estableció la protección de los paisajes culturales, definidos como “[...] las obras combinadas de la naturaleza y del hombre [...]. Ilustran la evolución de la sociedad humana y sus asentamientos a lo largo del tiempo, condicionados por las limitaciones y/o las oportunidades físicas que presenta el entorno natural y por las sucesivas fuerzas sociales, económicas y culturales, tanto internas como externas” (Luengo, 2013).

La propuesta de *paisaje agropecuario* adoptada por la UPRA en 2016, lo define como “un paisaje cultural patrimonial en cualquier parte del territorio apto para el desarrollo agropecuario, tal como lo percibe la población, cuyo carácter sea resultado de acción en interacción entre naturaleza y ser humano a lo largo del tiempo, en donde la apropiación simbólica, conlleva su

ordenamiento mediante prácticas y actividades agrícola, forestal, pecuaria, acuícola y pesquera”.

Según Wezel *et al.* (2016) con su enfoque de paisaje eco-agrícola, propone la gestión de paisajes para la producción y la conservación, aunque no incluye explícitamente los sistemas alimentarios. Pero adopta el término de territorios agroecológicos, para referirse a los territorios en transición a sistemas agrícolas y alimentarios sostenibles, en función de la adaptación de prácticas agrícolas, conservación de la biodiversidad y de los recursos, e integración de sistemas alimentarios en el territorio.

Al hablar de paisaje agrícola se entiende que existe una heterogeneidad y variación en el espacio, la cual exige análisis con nuevos enfoques, ya que los existentes aplicados en áreas homogéneas, no se ajustan a zonas de naturaleza cambiante y pueden conducir a representaciones erróneas de procesos a gran escala. Para resolverlo, se pueden tomar dos caminos, el primero, es capturar estos cambios en un área pequeña con un gran número de muestras, y el segundo es escoger diferentes parcelas de áreas pequeñas que representen la complejidad del paisaje (Sierra *et al.*, 2007).

Los paisajes agrícolas y los servicios ecosistémicos

Los Servicios Ecosistémicos (SE) son procesos y funciones de los sistemas naturales que la sociedad percibe como beneficios ecológicos, culturales o económicos. Incluyen los servicios de provisión (producción de alimentos, agua, maderas y fibras); regulación (climática, hídrica, dinámica de poblaciones y ciclos de C y N, entre otros); sustento o soporte (ciclaje de nutrientes, estructural y generación de hábitat) y culturales (recreativos, espirituales y estéticos) (Blum, 2005; Bone *et al.*, 2010).

Investigadores, actores locales y tomadores de decisión reconocen la importancia de la multifuncionalidad de los paisajes agrícolas para realizar el manejo integrado del paisaje (Estrada *et al.*, 2014), que se logra a partir de la planificación del paisaje y los procesos de diseño (transformación o modificación intencional) u ocupación de este. El manejo integrado armoniza la producción agrícola con la conservación del ecosistema, combinando diferentes funciones del paisaje (Jordan y Warner, 2010; Lovell y Johnston, 2009).

El cultivo de caña de azúcar para panela (*Saccharum officinarum*)

En Colombia el cultivo de caña de azúcar ocupa el quinto lugar de área cultivada en más de 400.000 ha y aproximadamente el 62% se destina a la producción de panela, con 70.000 unidades agrícolas de pequeñas familias dedicadas a este cultivo y un estimado de 20.000 trapiches (UPRA, 2020) ocupa el segundo renglón en importancia económica y genera un equivalente de 120.000 empleos permanentes. Se cree que la panela es originaria de Nueva Guinea, India o Indochina y que fue introducida a Colombia en el año 1510. Desde entonces se extendió por varias localidades del país y a la fecha es el segundo productor de panela representando el 16% de la producción mundial que equivale a 1,6 millones de toneladas anuales (Aguiar, 2001; García-Meléndez, 2007; Osorio, 2007; Rodríguez *et al.*, 2004).

La Caña de azúcar es una planta monocotiledónea de la familia de las gramíneas, su mecanismo de fotosíntesis es vía C4, lo que le hace más eficiente en la fijación de CO₂, las plantas C4 se adaptan mejor a tierras secas y usan el agua de forma eficiente ya que con solo 250 moléculas de agua pueden fijar una molécula de CO₂, mientras que plantas C3 tendrían que usar 500 moléculas de agua. Sus raíces con frecuencia alcanzan 40 cm para anclaje, absorción de nutrientes y agua. El tallo es el órgano más importante de la planta, porque allí se almacenan los azúcares (entrenudos) que se aprovechan en los procesos productivos (azúcar, panela y otros). Es un cultivo semipermanente, que tradicionalmente se maneja con una concepción biológica (bajo en insumos, fertilizantes, fungicidas, plaguicidas) por lo que es considerado como un cultivo que conserva el suelo y le protege de la erosión, especialmente en zonas de ladera (Aguiar, 2001; García *et al.*, 2007; Montenegro y Chaves, 2011; Osorio, 2007; Taiz y Zeiger, 2006).

La oferta edafoclimática requerida para establecer este cultivo bajo las categorías de aptitud alta, moderada y baja propuestos por la UPRA sugiere que las temperaturas óptimas fluctúan entre los 25 y 27°C, sin embargo, también es apto entre los 20 y 30°C, este es un factor importante en la elaboración y acumulación de sacarosa (García *et al.*, 2007; Osorio, 2007), En cuanto a la humedad, o las condiciones de precipitación es importante mantener al menos en días calurosos 8-9 mm de agua/ha/día y en días fríos 3-4 mm/ha/día (Aguiar, 2001; García *et al.*, 2007), ya que permite la translocación de los nutrientes y es clave en la formación de azúcares, además de ser esencial en periodo de desarrollo, se debe asegurar al año suministros entre los 1.500 y 1.750 mm (Aguiar, 2001; Osorio, 2007).

Según la capacidad de laboreo, los suelos más aptos para este cultivo son aquellos con texturas Franco-arcillo-arenosa (FArA), Arcillo-limosa (ArL) franco-arcillosa (FAr) y franca (F) y en menor grado suelos Franco-arenosos (FA) Arenosos (A) y Arcillosos (Ar) (Aguiar, 2001; García *et al.*, 2007). Las pendientes inferiores a 25% son las más aptas y permiten alto rendimiento del cultivo, entre 25- 50% la aptitud es media y 50-75% es baja.

Manejos del cultivo de caña

Un aspecto sobresaliente en el cultivo de la caña de azúcar para producción de panela tiene que ver con las prácticas realizadas por los agricultores y que han permitido diferenciar dos tipos de manejo denominados: entresaque y por parejo. El primero, entresaque, es realizado por pequeños agricultores, en áreas de aproximadamente 4 ha, con mano de obra familiar, con sistema de siembra por mateado o siembra de cajuela y el corte consiste en la recolección de las cañas maduras, dejando las inmaduras para una futura cosecha, poco fertilizados y renovados, se evita la remoción del suelo y hace control de arvenses y cosecha manual su uso es más frecuente en los Departamentos de Cundinamarca, Caldas y Risaralda con rendimientos de 5,4 t panela*ha⁻¹*año⁻¹ (Aguiar, 2001; Rodríguez *et al.*, 2004; Abaunza *et al.*, 2012).

El segundo, manejo por parejo, corresponde a explotaciones más tecnificadas, en áreas de 10 o más hectáreas, la mano de obra es contratada, el sistema de siembra por chorrillo, lo que permite un crecimiento uniforme de los tallos y que facilita la cosecha, corte de todos los tallos dejando el suelo descubierto y las cepas para su rebrote. El rendimiento está por encima de los 10,2 t panela*ha⁻¹*año⁻¹, son comunes prácticas de mecanización, fertilización y control químico de arvenses. Este tipo de manejo se emplea en los departamentos de Santander, Boyacá y Nariño (Aguiar, 2001; García *et al.*, 2007 y Abaunza *et al.*, 2012).

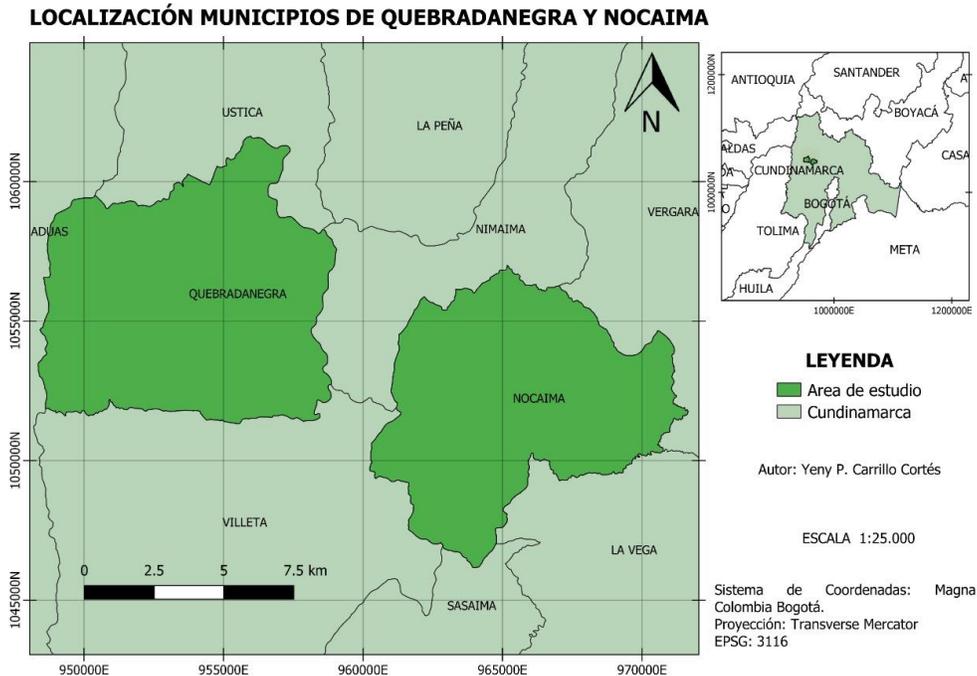
1.3. Metodología

1.3.1.Descripción del área de estudio

El área de estudio pertenece a la cuenca hidrográfica del Río Magdalena, subcuenca del Río Negro y abarca las áreas ocupadas por cultivo de caña panelera de los municipios de

Quebradanegra (5°07'04.11" N, 72°28'45.74" W) y Nocaima (5°04'10.29" N, 74°22'49.01" W) ubicados en el departamento de Cundinamarca, tal como se ilustra en la Figura 1-1.

Figura 1-1: Localización geográfica del área de estudio. Fuente: Elaboración propia



El clima dominante según el sistema Caldas – Lang es templado húmedo con temperatura media anual de 21°C y precipitación entre 1100 y 1800 mm anuales. El material parental a partir del cual han evolucionado los suelos consiste en rocas sedimentarias del Cretácico y depósitos del Cuaternario a orillas del Río Negro y Quebradanegra. La formación Trincheras – Kitir, predomina con un 82,5% en el municipio de Nocaima y ocupa el 19,1% en Quebradanegra y se compone de lodolitas negras, silíceas y calcáreas con concreciones de tamaños variables e intercalaciones esporádicas de calizas y arenitas del grupo Villeta. La formación Útica – Kiut (del cretácico) representa 46% en el municipio de Quebradanegra y consta de arenitas (subarcosicas de grano fino a muy grueso) arcósicas a sublitoarenitas finas a conglomeráticas, en secuencias gradadas (y capas muy gruesas) con presencia de materiales limo arcillosos (lodolitas, limolitas negras) y calizas en la parte superior. En Quebradanegra los suelos se han desarrollado a partir de rocas clásticas limo arcillosas y químicas carbonatadas. Algunos suelos se han desarrollado sobre depósitos de cenizas volcánicas provenientes del complejo Ruiz –

Tolima de la cordillera central reposados sobre la parte occidental del municipio de Quebradanegra (SGC, 2014).

Los municipios de Quebradanegra y Nocaima se ubican en el paisaje de montaña con pendientes planas a fuertemente empinadas y grados de disección profundos como el cajón del Río Negro. En estos municipios se han identificado 60 unidades cartográficas de suelo clasificados hasta nivel de familia. A continuación se resaltan las unidades más representativas que corresponden a consociaciones, identificadas con los símbolos, y componentes taxonómicos: MQFF-M004 (consociación de suelos Entic Hapludolls, esquelética - arcillosa, activa, isotérmica; Typic Hapludolls, esquelética - franca sobre arcillosa, isotérmica; Typic Hapludolls, esquelética - franca, isotérmica) y MQFF-I055 (Consociación: Pachic Humudepts, franca - fina sobre fragmental, mezclada, isotérmica; Typic Dystrudepts, esquelética - franca, isotérmica; Typic Hapludands, medial sobre fragmental, isotérmica) que predominan en 13,6% y 16,3% en Quebradanegra y Nocaima respectivamente (IGAC, 2019).

1.3.2. Metodología para la caracterización del paisaje agrícola del cultivo de caña de azúcar para panela

La figura 1-2 resume las actividades realizadas en este capítulo sobre la caracterización del paisaje agrícola de caña panelera que comprende: a) la caracterización climática de los municipios, b) la geomorfología a nivel de forma del terreno, c) la distribución de los cultivos de caña panelera y sus manejos d) la tipificación de los cultivos.

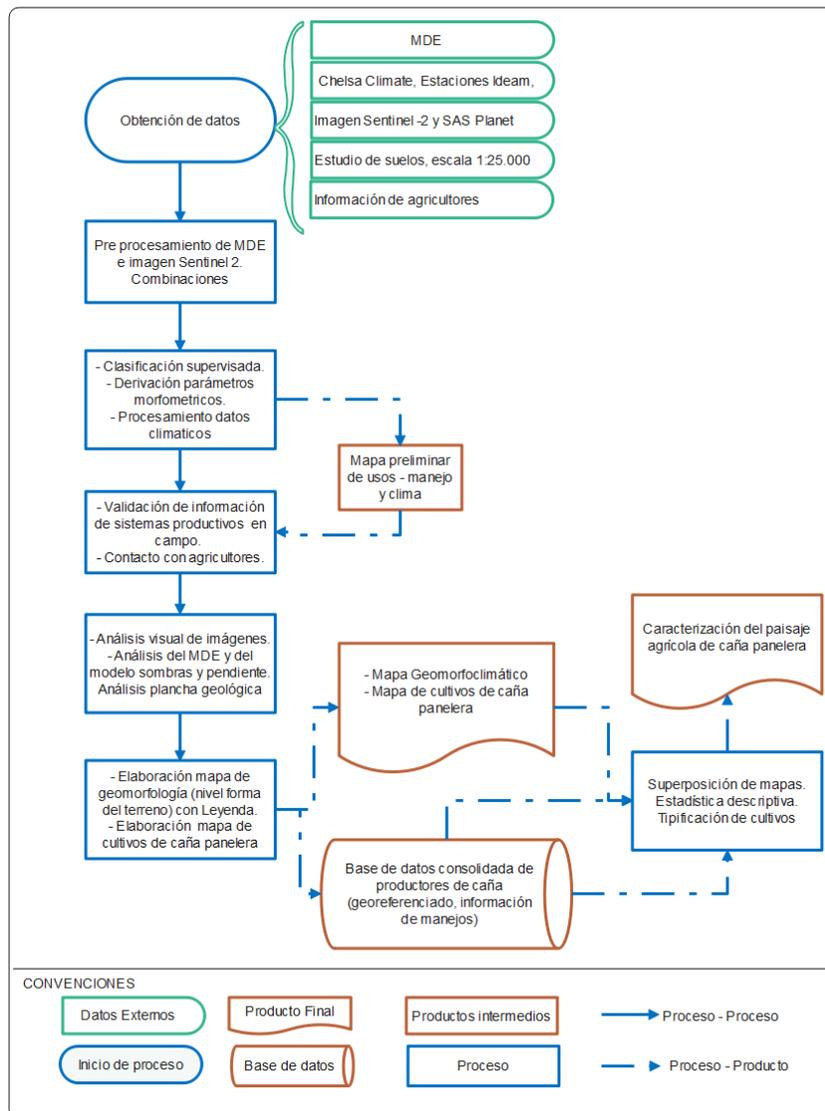
1.3.2.1. Caracterización climática

Se utilizó la información de temperatura y precipitación histórica de las estaciones climatológicas y pluviométricas ubicadas en municipios vecinos de Quebradanegra. Igualmente, se recurrió a los datos procesados por el modelo Chelsa Climate - *Climatologies at high resolution for the earth's land surface areas* - con datos climáticos de 1 km de resolución espacial para complementar la información adquirida de las estaciones. Se utilizó el Modelo Digital de Elevación - MDE de 12,5 metros de resolución del satélite ALOS PALSAR

ALPSRP275560090 para generar la información de temperatura y clima consolidada en el mapa y la leyenda geomorfoclimática.

El análisis de temperatura se realizó de acuerdo con la metodología descrita por Fries *et al.*, (2012), utilizando la información del MDE y la temperatura media en las estaciones climatológicas y el CHELSA. Se generó la superficie de interpolación usando el algoritmo de distancia inversa ponderada (IDW) y del vecino más cercano. El análisis de precipitación se realizó teniendo como base la información obtenida de las estaciones pluviométricas del IDEAM y los datos obtenidos del CHELSA. La superficie de interpolación se creó en ArcGIS utilizando los métodos de IDW, vecino más cercano y Kriging,

Figura 1-2: Diagrama metodológico - caracterización biofísica del paisaje agrícola panelero



1.3.2.2. Caracterización geomorfológica

La metodología aplicada para la caracterización de las geoformas se basó en la propuesta de Alfred Zinck, (2016), adaptada por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi – IGAC (IGAC, 2018; Martínez *et al.*, 2017) consiste en realizar un procedimiento de segmentación en forma secuencial de una superficie en seis niveles jerárquicos, que parte de lo general, escala pequeña 1:100.000 a lo detallado escala 1:25.000. Se definieron 4 niveles categóricos (clima, ambiente de formación, tipo de relieve, forma del terreno), se adicionó el Clima propuesto por Villota (1997) y retomado por Serrato (2009) en su sistema categórico. La leyenda no explicita el nivel de paisaje, que en la zona de estudio corresponde al paisaje de montaña. El análisis interpretativo se realizó en dos fases: En la primera, se utilizaron las fotografías aéreas (060-064) del vuelo C-2164 de 1984. La interpretación estereoscópica de geomorfología se efectuó hasta el nivel de forma del terreno en la vereda Concepción y se digitalizó con Qgis. Posteriormente se realizó la interpretación visual desde la pantalla de la computadora de la imagen Sentinel y el modelo digital de elevación en toda el área de estudio. Esta interpretación geomorfológica sirvió como marco de referencia para caracterizar los paisajes del cultivo de caña panelera.

Del MDE ALOS PALSAR resolución 12,5 m se derivaron los parámetros: pendiente, orientación y curvaturas vertical y horizontal predominantes en áreas de cultivo de caña de azúcar para panela, mediante los algoritmos de Zevenbergen & Thorne (1987) en el software SAGA, definidos como atributos accesorios que luego se utilizaron para la tipificación de los cultivos.

1.3.2.3. Caracterización del cultivo caña de azúcar

Con la imagen Sentinel-2⁵ para la interpretación de usos y coberturas, se realizó una clasificación supervisada preliminar delineando áreas mediante polígonos sobre las coberturas identificadas como cultivo de caña con el algoritmo de clasificación de mínima distancia. A continuación, se realizó la verificación mediante identificación y georreferenciación en campo, reclasificación con el algoritmo de clasificación de cobertura del suelo (LCS) y combinado con algoritmos de mínima distancia, máxima probabilidad y ángulo espectral (Congedo, 2019).

⁵ <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>. Identificador S2B_MSIL1C_20180921T152629_N0206_R025_T18NWL_20180921T204438

La información proporcionada por los agricultores a la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA), la Federación de paneleros de Colombia (FEDEPANELA) y la Unidad Municipal de Asistencia Agropecuaria de Quebradanegra y Nocaima (UMATA), fue revisada, analizada y consolidada en una base de datos general, se contactó telefónicamente a los agricultores para corroborar y consultar los datos: nombre de finca, vereda, extensión del cultivo de caña en hectáreas, manejo de corte, tiempo del cultivo acorde al manejo de corte y disponibilidad de tiempo del agricultor para apoyar las actividades en campo.

Con base en registros 1 y 2 del IGAC, se corroboró la información recopilada, usando imágenes satelitales SAS Planet y herramientas de análisis de los programas Qgis y Google earth. Se realizó la interpretación visual de la cobertura de cultivos de caña de acuerdo con la metodología descrita por Van Zuidam (1985) usando parámetro de patrón, color, textura, y tono del cultivo, que permitió su localización espacial.

1.3.2.4. Caracterización de suelos

Se utilizó el Estudio Semidetallado de Suelos de la Cuenca del Río Negro escala 1:25.000, con el fin de reconocer la distribución de los suelos en los municipios analizados y que soportan el cultivo de caña de azúcar para producción de panela. Después de revisar la calidad de los datos y de reconocer las geoformas, las unidades cartográficas y taxonómicas y los atributos asociados, y teniendo en cuenta la información de cultivo generada se obtuvo el área de suelos ocupados con caña de azúcar para panela. La información sobre material parental de la zona fue complementada con la plancha 208 del Servicio Geológico Colombiano (SGC).

1.3.2.5. Tipificación de cultivos

Como insumos fueron utilizados la información geomorfológica y de cultivos de caña de azúcar para panela generada. Se extrajo el área de cultivo en cada geoforma y se consolidó esta información en la base de datos previamente trabajada con otros atributos como la pendiente, aspecto, curvatura longitudinal, curvatura transversal, índice de posición topográfica, e índice topográfico de humedad.

En R se analizaron los datos, mediante el análisis factorial de datos mixtos- AFDM, un método de componentes principales que permite analizar y explorar asociaciones entre variables cuantitativas y cualitativas. Las variables cuantitativas consideradas fueron: el área de cultivo, el IPT, el ITH, el aspecto y el NDVI. Las variables cualitativas fueron: la geoforma, el rango de pendiente y el manejo. Finalmente, se realizó un análisis de agrupación, clúster jerárquico utilizando el criterio de Ward, que se basa en la varianza multidimensional resultante del AFDM. Para esto se utilizó la librería FactoMineR y factoextra para visualizar los resultados (Kassambara, 2017).

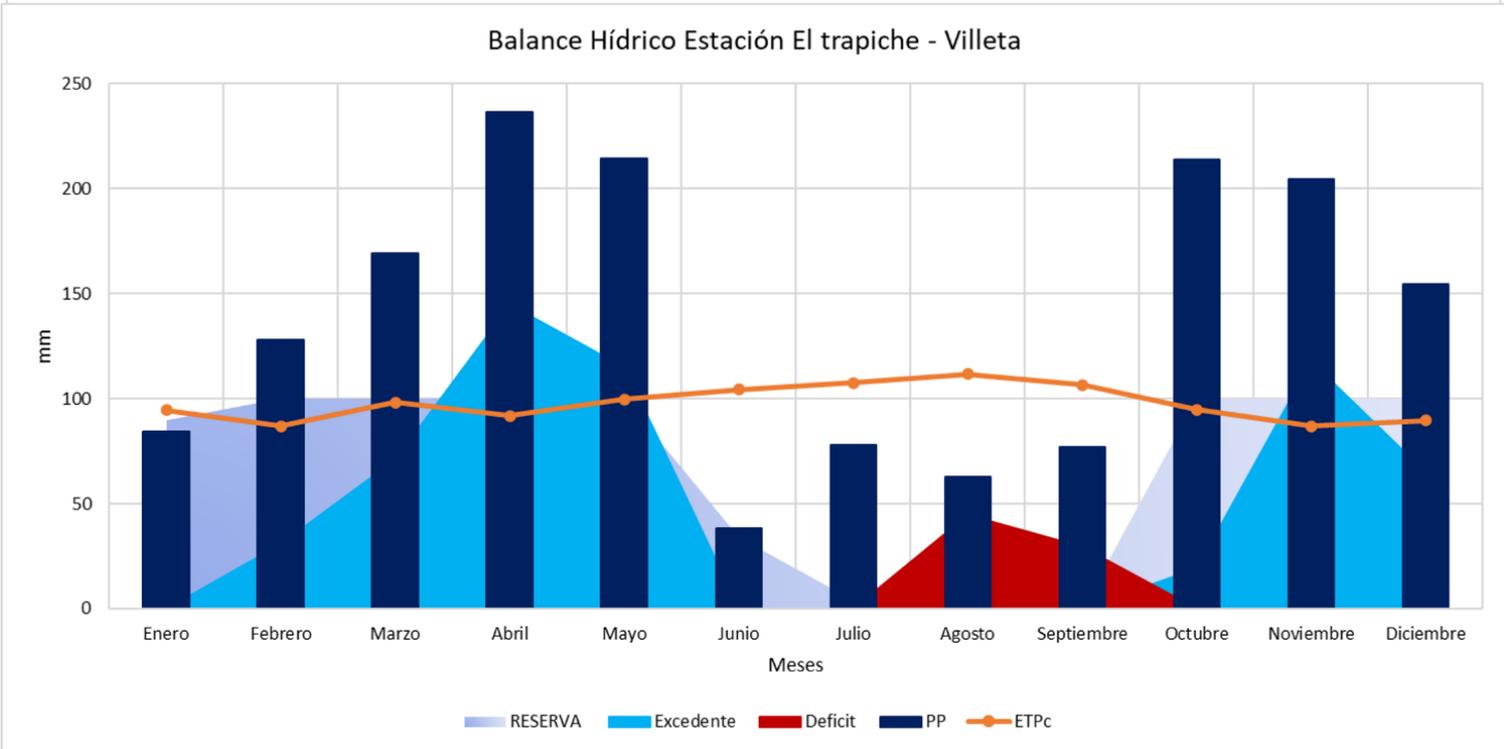
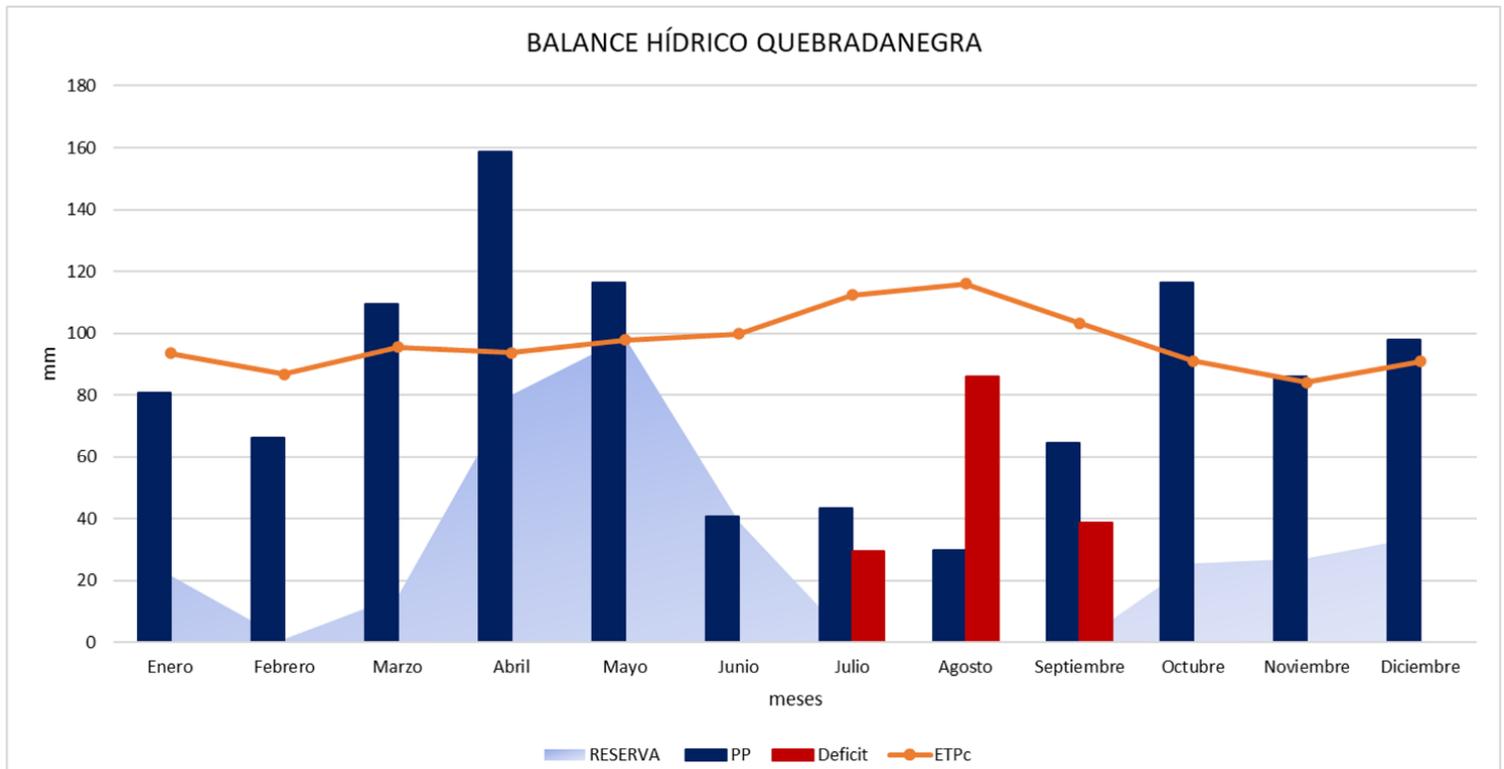
1.4. Resultados y discusión

1.4.1. Caracterización climática

Los resultados del análisis del modelo Chelsa climate junto con el MDE y los datos de las estaciones climáticas permiten verificar que el clima ambiental dominante en el área de estudio es templado húmedo y en menor extensión se encuentran los climas cálido húmedo y cálido seco. En el municipio Quebradanegra (5228,69 ha) y Nocaima (6258,88 ha) para un total de 11487,57 ha equivalentes al 77,18% se distribuye el clima templado húmedo. En zonas más bajas que circundan a los ríos, el clima es cálido húmedo (2989,95 ha) y cálido seco (405,44 ha), de igual forma lo ha descrito el IGAC, (2000) al señalar que en elevaciones inferiores a 1000 msnm cerca a los ríos Quebradanegra y Río Negro el clima es cálido húmedo y cálido seco. Tal como se puede apreciar en la segunda columna de la leyenda geomorfológica de la tabla 1-1, y que se especifica en términos de piso térmico (altura msnm) y humedad (derivada de Caldas Lang).

En la figura 1-3 se muestran los climadiagramas (balances hídricos) que explicitan el clima y que se constituyen en parte de la oferta eco fisiológica para el cultivo de caña con destino a la producción de panela. Allí se evidencia una distribución bimodal de las lluvias, con dos épocas marcadas de baja precipitación en los meses de diciembre -febrero y junio-septiembre, con precipitaciones anuales que se encuentran entre 1661,5 para Villeta y 1801,8 para Quebradanegra. (IDEAM, 2010), valores que se encuentran entre el rango óptimo de precipitación de 1500 a 1800 mm al año para el cultivo de caña de azúcar panelera (Rodríguez *et al.*, 2020).

Figura 1-3: Balance Hídrico municipios de Quebradanegra y Villeta



1.4.2. Caracterización geomorfológica

La interpretación geomorfológica resultó en la Leyenda Geomorfoclimática de los municipios de Nocaima y Quebradanegra. La cual presenta en la primera columna el paisaje, en la segunda el clima ambiental descrito en el acápite anterior, en la tercera columna se presenta el ambiente morfogenético de formación, a continuación, están las columnas correspondientes a los tipos de relieve y formas del terreno, tal como lo ilustra la tabla 1-1.

Como se observa en la figura 1-4, el paisaje de montaña es característico de ambos municipios y ha evolucionado por acción de movimientos orogénicos y tectónica de placas que por sus esfuerzos compresivos ha generado un complejo sistema de fallas de cabalgamiento en el oriente de Quebradanegra con relieves que varían de planos a fuertemente escarpados. La morfología montañosa está estrechamente ligada a los ambientes que definieron la génesis de esta, el ambiente estructural es evidente en las áreas de fallas y plegamientos controlados por la dinámica interna sobre formaciones del Cretáceo como Útica dando paso a tipos de relieve asociados al fracturamiento o fallamiento como los espinazos con frecuentes buzamientos de 40° y crestones con buzamientos cercanos a los 30°, ambos constituidos por estratos de rocas sedimentarias inclinadas.

Quebradanegra cuenta con 7.983,80 ha, de las cuales el 46,51% es representado por los Espinazos y el 29,40% por los Crestones evidenciando fuerte control estructural en la zona. Así mismo se evidencia en Nocaima con extensión de 6.899,16 hectáreas, de las cuales el 67,80% fueron clasificados como espinazos y 16,19% como crestones. Las formas del terreno representativas en los tipos de relieve de control estructural (Espinazos y crestones) denominadas como Frente o ladera erosional y Revés o ladera estructural se caracterizan porque el frente es de longitud menor y un relieve abrupto con respecto al Revés, el cual se dispone en el sentido del ángulo de buzamiento. En Quebradanegra el frente y revés de espinazo ocupan el 23,02% y 19,18% respectivamente, así como el frente y revés de crestón el 18,24% y el 17,85. Entre tanto en Nocaima el revés de espinazo comprende el 32,74% y su frente el 31,84% y el revés y frente de crestón representan 10,61% y 5,58%.

En tanto que, el ambiente denudacional caracterizado por la acción de agentes como el agua, el viento o la gravedad que meteorizan, erosionan y remueven materiales detríticos y modelan tipos de relieve suavizados como lomas en climas que favorecen estos procesos denudativos y

de disección. En Quebradanegra la loma ocupa 13,89% y en Nocaima el 8,91%, representada principalmente por cimas alargadas redondeadas y laderas cortas con relieves moderadamente inclinados.

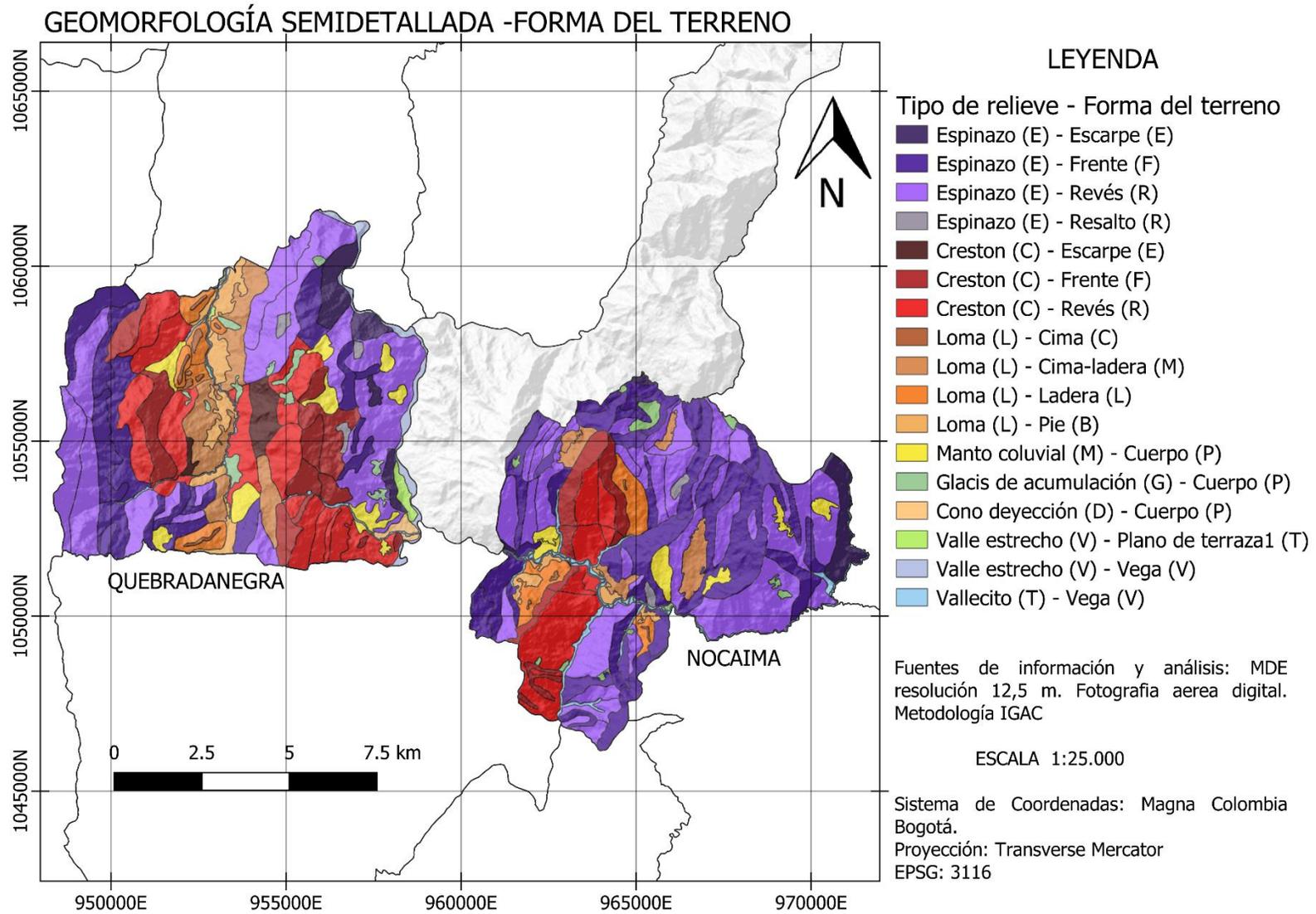
La interpretación sobre la vereda concepción en el municipio de Quebradanegra en las coordenadas 5° 6'50.69"N, 74°30'0.97"O, entre los 750 y 1200 msnm es un ejemplo que muestra la heterogeneidad de unidades geomorfológicas en la zona de estudio, allí, una falla de cabalgamiento caracteriza por el costado occidental un ambiente estructural con relieves dominantes fuertemente empinados y con presencia de materiales duros como las areniscas de la formación Útica que promueven el desarrollo de suelos jóvenes y del otro lado hacia el valle del Río Quebradanegra un ambiente denudacional con lomas sobre Lutitas y calizas de la formación Trincheras.

Otras geoformas de ambiente depositacional como el valle estrecho, vallecito, glacis de acumulación, manto coluvial, y cono de deyección en conjunto representan el 9,65% en Quebradanegra, mientras que en Nocaima tipos de relieve como el vallecito, glacis de acumulación y manto coluvial representan en conjunto el 6,76%.

En cuanto a la pendiente, en los dos municipios dominan las áreas con relieve ligeramente escarpado (25 al 50%) que ocupan 6545 ha, 44% del área en las posiciones de ladera; fuertemente inclinado (12 al 25%) en 4040 ha (27%), ubicados con preferencia en la vega del río Quebradanegra, en menor proporción áreas moderadamente escarpados con pendientes de 50 a 75% en 3663 ha (25%) ubicados principalmente en zonas altas de la montaña hacia el occidente del municipio y que en ocasiones limitan con la rivera del Río Negro, en tanto las zonas con pendientes moderadamente inclinada (7 al 12%), fuertemente escarpada (>75%), casi plana (3-7%) y plana representan 635 ha (4%).

El mapa de la figura 1-4 muestra las geoformas identificadas en los municipios de Quebradanegra y Nocaima y se vincula a través del símbolo con la leyenda de la tabla 1-1.

Figura 1-4: Interpretación geomorfológica hasta el nivel de forma del terreno.



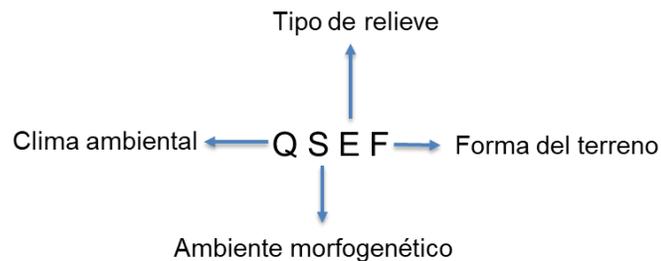
Fuente: Elaboración propia

Tabla 1-1: Leyenda de Geomorfología de los municipios de Quebradanegra y Cundinamarca

Paisaje	Clima	Ambiente de formación	Tipo de relieve	Forma del terreno	Símbolo	Área (ha)	Distribución (%)			
Montaña	Cálido seco (W)	Deposicional (B)	Valle estrecho (V)	Vega (V)	WBVV	167,45	1,13			
				Plano_de_terraza1 (T)	WBVT	6,46	0,04			
	Cálido húmedo (V)	Deposicional (B)	Valle estrecho (V)	Glacis acumulación (G)	Cuerpo (P)	WBGV	13,69	0,09		
				Vallecito (T)	Vega (V)	VDTV	187,7	1,26		
				Loma (L)	Pie (B)	WELB	131,80	0,89		
	Cálido húmedo (V)	Deposicional (B)	Valle estrecho (V)	Vega (V)	VBVV	14,27	0,10			
				Plano_de_terraza1 (T)	VBVT	44,11	0,30			
				Glacis acumulación (G)	Cuerpo (P)	VBGP	46,18	0,31		
				Manto coluvial (M)	Cuerpo (P)	VBMP	151,86	1,02		
				Cono deyección (D)	Cuerpo (P)	VBDP	40,07	0,27		
				Espinazo (E)	Resalto (S)	VBES	12,53	0,08		
				Denudacional (E)	Loma (L)	Pie (B)	VELB	131,02	0,88	
						Ladera (L)	VELL	161,16	1,08	
						Cima (C)	VELC	36,38	0,24	
						Cima-ladera (M)	VELM	439,78	2,96	
				Estructural (S)	Crestón (C)	Revés (R)	VSCR	537,66	3,62	
						Frente (F)	VSCF	76,16	0,51	
						Espinazo (E)	Revés (R)	VSER	811,98	5,47
							Frente (F)	VSEF	58,95	0,40
	Escarpe (E)	VSEE	297,98			2,01				
	Templado húmedo (Q)	Deposicional (B)	Glacis acumulación (G)			Cuerpo (P)	QBGP	172,3	1,16	
				Manto coluvial (M)	Cuerpo (P)	QBMP	357,91	2,41		
		Denudacional-depositacional (D)	Vallecito (T)	Vega (V)	QDTV	35,85	0,24			
				Denudacional (E)	Loma (L)	Pie (B)	QELB	113,32	0,76	
		Ladera (L)	QELL			346,63	2,33			
		Cima (C)	QELC			20,98	0,14			
		Cima-ladera (M)	QELM			369,97	2,49			
Estructural (S)		Crestón (C)	Revés (R)	QSCR	1651,31	11,12				
			Frente (F)	QSCF	1071,12	7,21				
			Espinazo (E)	Escarpe (E)	QSCE	160,16	1,08			
	Resalto (S)			QSES	73,71	0,50				
	Revés (R)		QSER	3576,48	24,08					
	Frente (F)		QSEF	3356,49	22,60					
Escarpe (E)	QSEE	181,34	1,22							

El símbolo corresponde a la figura 1-5:

Figura 1-5: Símbolo de la leyenda geomorfológica a nivel de forma del terreno



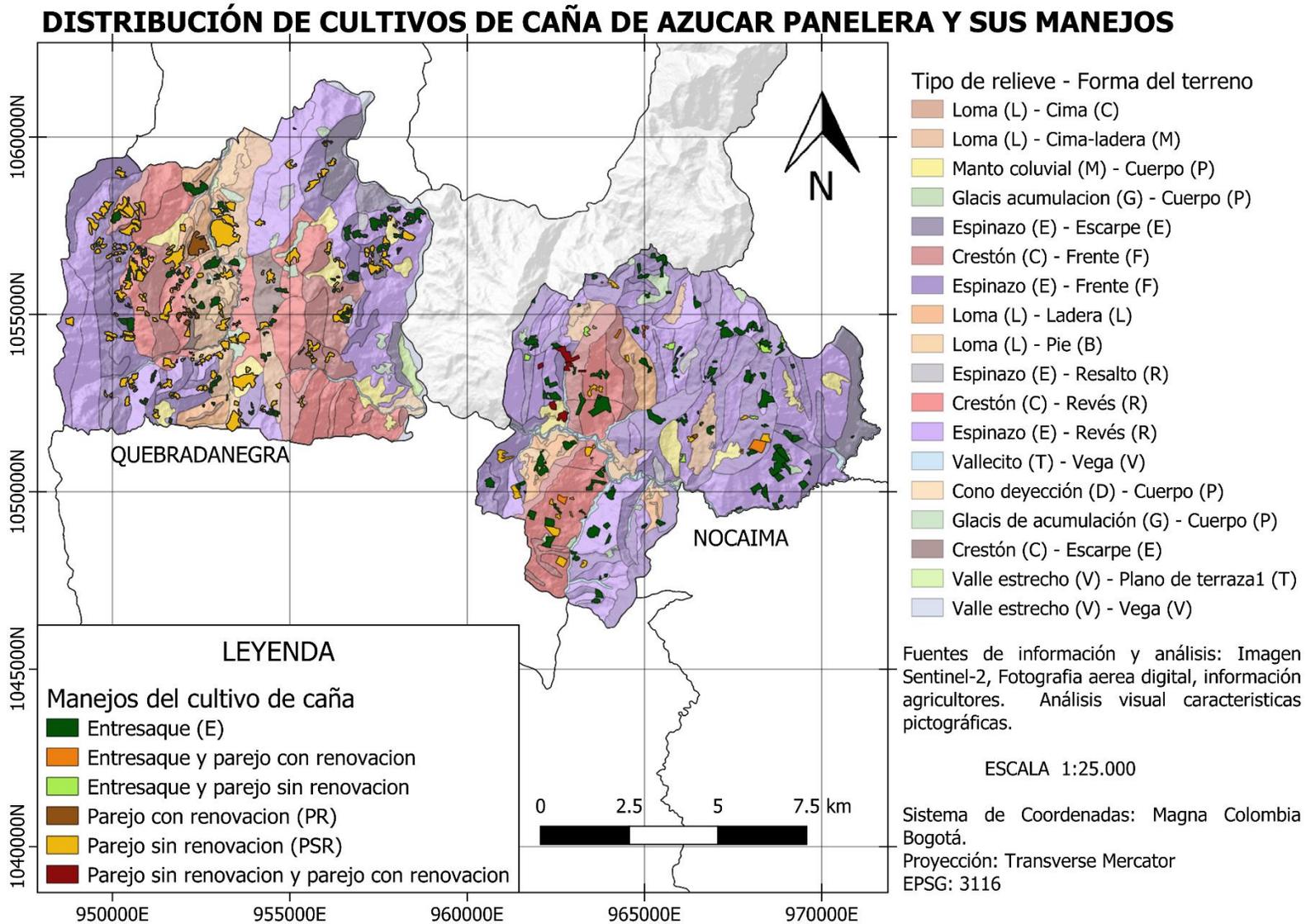
Se resalta que la categoría de paisaje está representada en su totalidad por Montaña, por esto no se contempla en la simbología. El ejemplar de Símbolo expuesto indica que la letra Q corresponde al clima medio húmedo, la letra S indica un ambiente morfogenético estructural, la letra E expresa el tipo de relieve Espinazo, y por último la F, es la forma del terreno Frente.

1.4.3. Caracterización cobertura de caña de azúcar panelera

En total se determinaron 278 cultivos de caña panelera con un área aproximada de 1009,47 ha, distribuidas en diferentes manejos, geoformas y relieves. El 61,36% se localizaron en pendientes del 25-50%, el 17,5% en pendientes de 12-25, 10% en pendientes de 12-50%, 6% de los cultivos se localizan en pendientes del 0-12% y mayor a 75%.

En la Figura 1-6 se muestra la distribución de los cultivos de caña y su manejo transpuesto a la geomorfología caracterizada que de acuerdo con la tabla 1-2, la cual contiene un resumen de la información levantada en esta investigación sobre los sistemas de manejo de los cultivos permiten ver que en Quebradanegra el 54% de los cultivos son manejados bajo el sistema de parejo sin renovación (PSR), que se ha caracterizado por la cosecha de todos los tallos y permitiendo los residuos de cosecha en el suelo, en estos cultivos no se realiza renovación de cepas encontrándose cultivos con edades entre 20 y 60 años, tal como lo han determinado Rodríguez *et al*, (2020) en el modelo productivo para Cundinamarca.

Figura 1-6: Mapa de caracterización de cultivos de caña en Quebradanegra mediante clasificación visual.



Fuente: Elaboración propia.

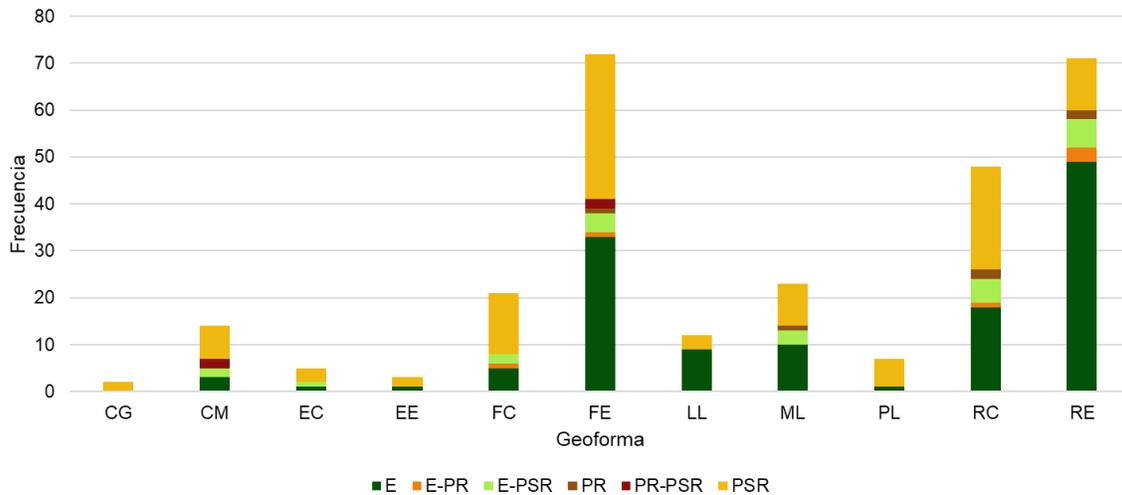
En Nocaima, el 68% de los cultivos son manejados principalmente en entresaque. De manera general los sistemas productivos reconocidos por actividades que contribuyen a la conservación del suelo son predominantes en la zona de estudio. Abaunza *et al.*, (2012), encontraron que en la provincia de Gualivá el corte por entresaque (incluido el aquí denominado parejo sin renovación) se presenta en el 97% del territorio, mientras que el parejo solo en 2%. Se encontró que en promedio las áreas de los cultivos son de 3,3 ha, aunque en relieves ligera-moderadamente inclinados (3 – 12%) los cultivos superan las 10 ha, con una posible mejora en tecnificación y rendimiento de estos, así mismo lo ha evidenciado Aguilar *et al.* (2012) en una región mexicana con cultivos de caña de azúcar con destino a la panela cuyas condiciones geográficas, económicas y sociales son similares a las presentadas en este estudio.

Tabla 1-2: Área de los manejos de cultivos de caña panelera por municipio

Municipio	E	E-PSR	PSR	PSR-PR	E-PR	PR	Total
Área de los cultivos (ha)							
Quebradanegra	142,89	121,42	364,19			36,19	664,703
Nocaima	234,69	7,2	53,21	17,91	30,44	1,32	344,77
Total	377,58	128,62	439,40	17,91	30,44	15,51	1009,47

Aunque las investigaciones enfocadas a los paisajes de agricultura de caña panelera y más específicamente en sus manejos son escasas, se ha reconocido a través de otros autores que los manejos aquí empleados también son practicados en otros países productores de panela, o realizan prácticas que se pueden asemejar. Por ejemplo, en India cuyas actividades productivas de la caña son similares a las de Colombia, realizan cosecha manual de los tallos acorde a las necesidades económicas y, alimentarias propias del productor (Kumar y Singh, 2021). En sistemas tecnificados con otros fines para la caña se conoce el sistema de corte “green cane harvesting” que se asemeja al parejo sin renovación, ya que, aunque es una cosecha mecánica, deja los residuos sobre el suelo, lo que contribuye al control de malezas, minimiza la pérdida de humedad y la erosión, manteniendo la productividad y calidad del suelo (Ma *et al.*, 2013).

Figura 1-7: Cultivos de caña panelera en sus respectivos manejos y geoformas (Análisis de frecuencias).



Elaboración propia. CG: Cuerpo de glacis de acumulación. ML: Cima y ladera de loma. CM: Cuerpo de manto coluvial. EC: Escarpe de crestón. EE: Escarpe de espinazo. FC: Frente de Crestón. FE: Frente de espinazo. LL: Ladera de loma. PL: Pie de loma. RC: Revés de Crestón. RE: Revés de Espinazo. E: Entresaque. E-PNR: Entresaque y parejo sin renovación. E-PR: Entresaque y parejo. PNR: Parejo sin renovación. PR: Parejo. PR-PSR. Parejo y parejo sin renovación

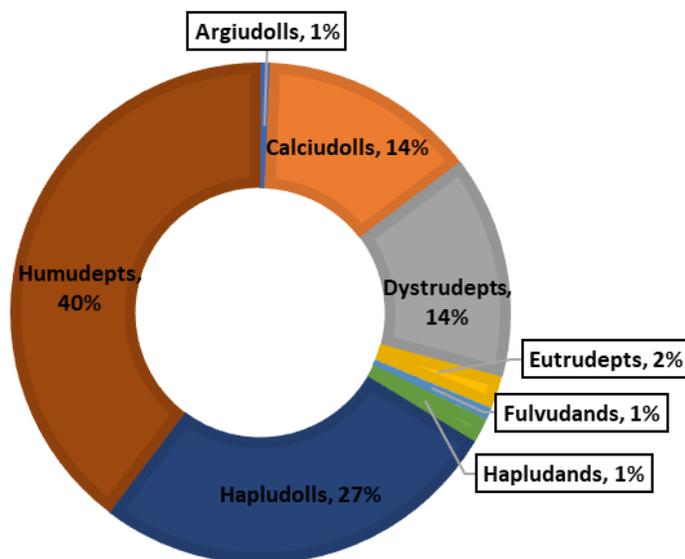
La figura 1-7 muestra el análisis de frecuencias que se realizó para identificar las geoformas más representativas en los cultivos de caña y la distribución de los manejos en cada una de estas geoformas. Se evidencia que en el paisaje de montaña las geoformas a nivel de tipo de relieve estructurales denominadas Espinazo y Crestón son las representativas de los cultivos de caña en estos municipios. Alrededor del 12% de los cultivos se ubican en pendientes ligeramente escarpadas a fuertemente escarpadas (25- >75%), condiciones que influyen en la disminución de los rendimientos del cultivo, pero que pueden contribuir en la acumulación de sacarosa en las plantas, según lo determina García *et al.*, 2007

1.4.4. Caracterización de suelos

En la figura 1-8 se observa que los cultivos de caña panelera identificados en esta investigación se localizan predominantemente en un 56,2% en unidades cartográficas donde el orden de suelo principal corresponde al Inceptisol, las unidades cartográficas dominadas por orden Molisol representa aproximadamente el 41,4%. A nivel de gran grupo los Inceptisoles con un epipedón úmbrico o mólico conocidos como Humudepts representan el 40% seguido del 27%

de Hapludolls. A nivel de subgrupo se encuentra que el 8,13% del área total de los cultivos se han desarrollado en la Consociación MQFF- I055 que corresponde principalmente a Pachic Humudepts, luego se encuentra en un 7,9% en la Consociación MQFR-I059 representado por Andic Humudepts, un 6,9% sobre la Consociación I062 que lo compone principalmente Typic Humudepts y 6,5% de la Consociación I069 con representación de Typic Dystrudepts .

Figura 1-8: Clasificación de suelos hasta nivel de gran grupo representativos de los cultivos de caña panelera.



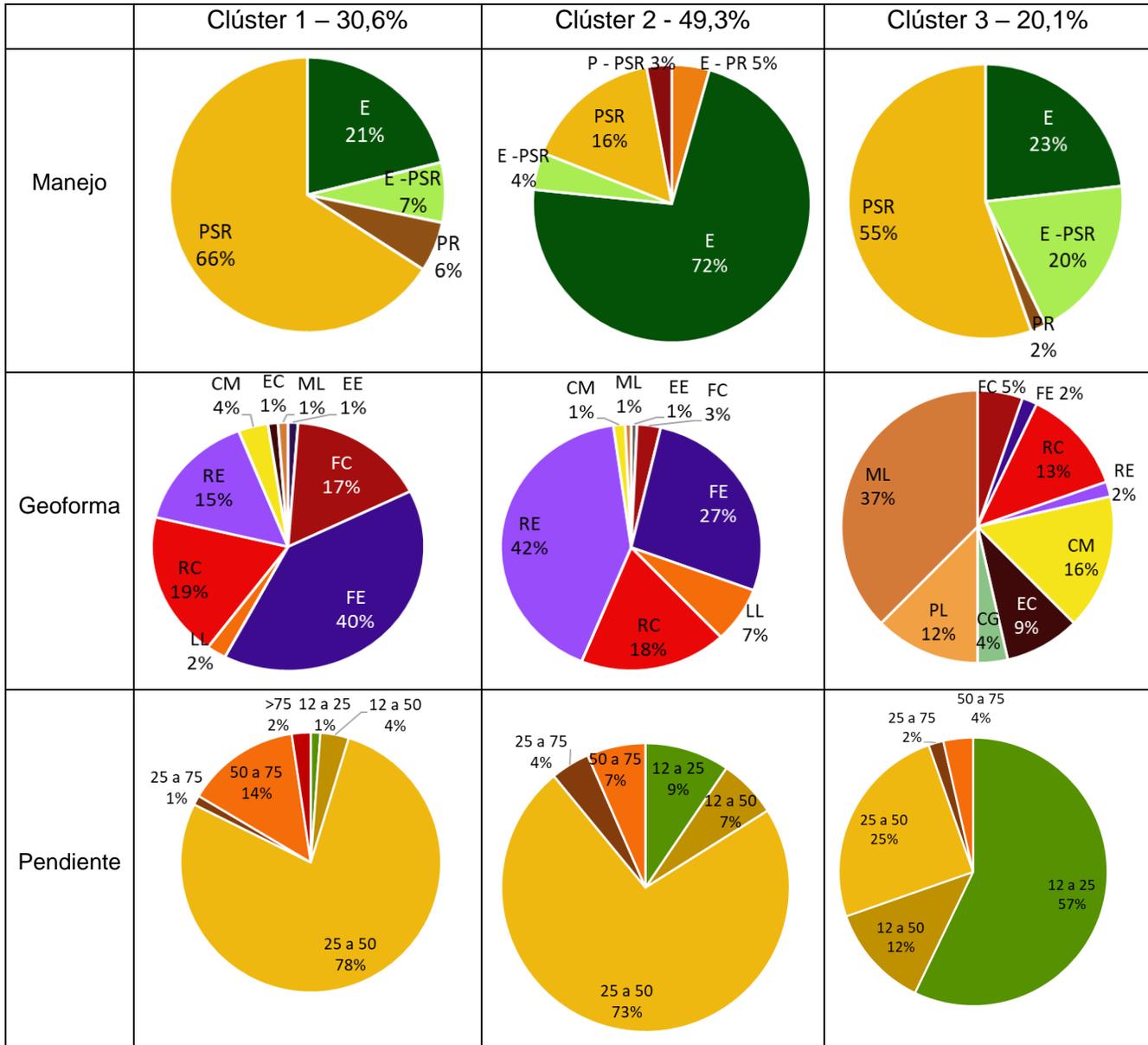
Fuente: Elaboración propia a partir de estudio de suelos

1.4.5. Análisis estadístico para la tipificación de los cultivos

En esta investigación se identificaron 3 grupos o clústers a partir del AFDM y el agrupamiento Jerárquico. En la Figura 1-9 se observa que el clúster 1 con 85 individuos se caracteriza por cultivos bajo el manejo de parejo sin renovación en las geoformas frente de espinazo principalmente, en este clúster domina el relieve ligeramente empinado (pendientes del 25 al 50%). El clúster 2 con 137 individuos se caracteriza por el manejo en Entresaque en formas del terreno revés de espinazo (pendientes del 25 al 50%) y representa el 50% de todos los cultivos identificados. En el clúster 3 que tiene 56 individuos se encuentran los cultivos principalmente manejados bajo el parejo sin renovación en geoformas de ambientes denudativos como la cima y ladera de loma con relieves fuertemente ondulados (pendiente del 12 – 25). Se observó que las variables cualitativas más influyentes en la determinación de los grupos fueron el tipo de

manejo y la geoforma, las variables cuantitativas que más influyeron fueron el índice topográfico de humedad y la elevación.

Figura 1-9: Características de los clústers generados en los cultivos de caña.



Como se puede evidenciar, aunque la mayoría de los cultivos se localizan en formas del terreno de carácter estructural como el frente y el revés de espinazo, estos se caracterizan por estar en pendientes que varían de plano a fuertemente inclinado, es decir muchos de estos cultivos se localizan principalmente en las partes inferiores de las geoformas o en zonas intermedias

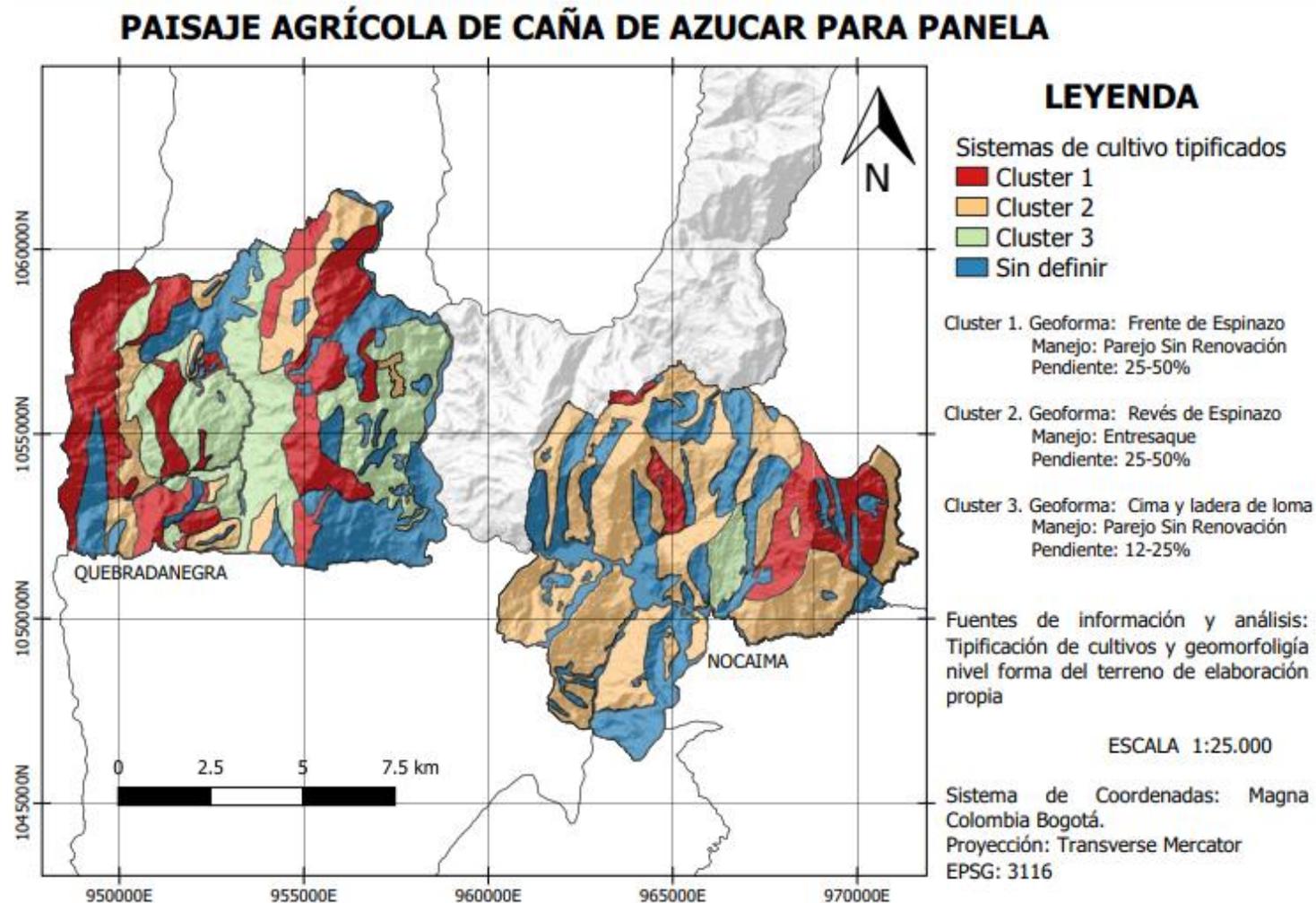
planas, características evidenciadas en campo. De acuerdo con Rodríguez *et al.*, (2020) y García *et al.*, (2007) los suelos que se han formado en un ambiente coluvial o coluvio-erosional debido a la ganancia de materiales son aptos para el mantenimiento de este cultivo.

Con estos resultados se observa que los cultivos con manejo por parejo sin renovación encontrado en los municipios en pendientes casi planas a fuertemente onduladas presentan mayor capacidad o aptitud de tecnificación del cultivo con uso de maquinaria para la cosecha y fertilización.

La figura 1-10 representa la distribución espacial de los clústers previamente identificados. El clúster 1 se localiza principalmente en la parte occidental de Quebradanegra en un ambiente estructural sobre el Frente y Revés del espinazo, cuyo manejo predominante es el parejo sin renovación. el clúster 2 se distribuye principalmente en el municipio de Nocaima en geoformas estructurales como el Revés de espinazo y el frente de espinazo. Estos dos clústers caracterizados también por presentarse en pendientes predominantes del 25 al 50%. El clúster 3 que se observa principalmente en la parte central de Quebradanegra localiza aquellos cultivos que se caracterizan por tener grandes extensiones y manejo de parejo sin renovación, estos lugares rodean principalmente el río Quebradanegra y se caracterizan por ser de relieves ligeramente planos a moderadamente inclinados.

Así como se ha demostrado la tipificación de sistemas productivos de caña de azúcar panelera en esta investigación, la caracterización y tipificación de otros sistemas productivos se ha explorado en ámbito científico con diversos fines, por ejemplo, Ríos *et al.* (2004) realizaron una caracterización de cultivos de Lulo utilizando un análisis de correspondencias múltiples con variables categóricas, cualitativas u ordinales y el agrupamiento jerárquico, entre sus conclusiones determinaron que la clasificación estaba ligada a la ubicación geográfica y a la homogeneidad biofísica. Rodríguez *et al.* (2021) realizaron una tipificación en Nariño de cultivos de Uchuva usando el AFDM y el clúster jerárquico cuyo propósito a futuro en la investigación es desarrollar estudios que realicen ajustes a los modelos productivos agronómicos adaptados a las condiciones ambientales y socioeconómicas de los cultivadores y la implementación de políticas que fortalezca la cadena productiva. En ambos casos, así como en los resultados de este proyecto, la tipificación simplifica la diversidad de los sistemas productivos mediante grupos sobre los cuales se pueden hacer recomendaciones específicas, necesario para el diseño de políticas que se adecuen a las verdaderas necesidades de los agricultores.

Figura 1-10: Distribución espacial de los cultivos de caña panelera tipificados



Fuente: Elaboración propia

1.5. Conclusiones

Fue posible mediante el uso de datos provenientes de fuentes primarias y secundarias (geomorfología, clima, cobertura y suelos) y con el apoyo de técnicas de análisis espacial (MDE, imágenes de satélite) caracterizar de manera consistente los paisajes ocupados con caña panelera en los municipios Quebradanegra y Nocaima.

La integración de unidades de paisaje y sus atributos permitió representar en un mapa la distribución espacial de los cultivos, su extensión, los tipos de manejo, las áreas más representativas por posición geomorfológica, por clase de suelo y en general aquella información que puede ser útil para los procesos de toma de decisiones y planificación en una región.

En este caso particular se corroboró que el sistema de manejo parejo sin renovación domina en las formas del terreno frente y revés de espinazo y en cimas, laderas y pie de lomas en el municipio de Quebradanegra, en tanto que, en Nocaima, es el manejo entresaque el que ocupa una mayor extensión y se ubica en formas del terreno similares, pero en crestones y espinazos. Así la caracterización geomorfológica se constituye en una variable importante y determinante que posiblemente condiciona los manejos adoptados en una u otra localidad.

La morfología de dichas posiciones es también determinante del tamaño de las explotaciones (3 a 4 ha en promedio) y que sin duda contribuyen a configurar la agricultura familiar de áreas de montaña en Colombia y Latinoamérica.

Capítulo 2. Stock del carbono orgánico del suelo asociado a cultivos de caña de azúcar panelera

2.1. Introducción

El suelo es un cuerpo natural dinámico ubicado en la parte más externa de la corteza terrestre y resultante de la acción combinada de factores y procesos ocurridos en el tiempo. Está integrado por tres fases: sólida (minerales, materia orgánica y microorganismos), líquida (solución del suelo) y gaseosa (atmósfera del suelo), las cuales exhiben unas propiedades físicas, químicas y mineralógicas, que modulan las funciones del suelo, asociadas a los servicios ecosistémicos (SE) (Lal, 2016).

Los investigadores de la ciencia del suelo han resaltado su papel fundamental al vincular algunos de los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), con los SE que oferta y con las funciones del suelo: 1) producción de biomasa, incluida agricultura y silvicultura (objetivos 1, 2, 3, 7, 8,12 y 15) 2) almacenamiento, filtrado y transformación de nutrientes, sustancias y agua (Objetivos 6, 12 y 15; 3) Conservación de la biodiversidad (hábitat de especies y genes) 4) Entorno físico y cultural (soporte actividades humanas) (Objetivos 3, 4, 6, 15 y 16) 5) Reservorio de carbono (stock de Carbono Orgánico del Suelo - SCOS) (objetivos 12, 13 y 15) 6) Archivo de patrimonio geológico y arqueológico (Objetivos 3, 4, 15, y 16) y sugieren de manera prioritaria el desarrollo de investigaciones interdisciplinarias de ODS que se apoyen en la información existente en el ámbito de la ciencia del suelo (Keesstra et al., 2016).

En su función como reservorio de carbono, el suelo almacena un estimado de 1500 Pg CO en el primer metro superficial a nivel global y aproximadamente 6,2 Pg CO a nivel nacional (Bolívar *et al.*, 2021) por lo que es considerado el primer depósito terrestre de COS. Su comportamiento, como reservorio o fuente, depende de los factores de formación del suelo, pero además, puede ser modificado por su uso y manejo (FAO, 2002; Rattan Lal *et al.*, 1999). Por lo anterior, la gestión del COS es fundamental para mantener y mejorar la salud del suelo, la cual se puede lograr al incentivar y reconocer prácticas de cultivo tendientes a proteger y conservar esta

función natural del suelo y así contribuir a mejorar la oferta de SE, ligada a su vez a la seguridad alimentaria y a la mitigación del cambio climático (Rattan Lal, 2016).

El proceso mediante el cual el C se fija desde la atmósfera a través de las plantas o de los residuos orgánicos y se almacena en el suelo, se denomina captura de C, (FAO, 2017b). Las prácticas de agricultura de conservación evitan la remoción del suelo y la pérdida del COS por mineralización, lo que contribuye a la acumulación de CO en diversos estratos del suelo, es decir que se distribuye verticalmente y esto permite obtener un inventario más preciso sobre las existencias de carbono en este depósito (Ahammad *et al.*, 2014; Rattan Lal, 2009).

En Colombia son múltiples las actividades que han desarrollado los agricultores para incorporar prácticas de manejo conservacionista tendientes a mantener el COS en este reservorio. Fruto del acompañamiento de instituciones como AGROSAVIA y del resultado de experiencias e investigaciones, el cultivo de caña de azúcar destinado a la producción de panela se proyecta, como promisorio para alcanzar este objetivo. Con más de 200.000 hectáreas sembradas en todo el territorio (Agronet, 2019; UPRA, 2020) se caracteriza por ser un cultivo de agricultura familiar (unidades productivas menores de 5 ha, prácticas de agricultura de conservación que mantienen el suelo cubierto con material vegetal y evitan su perturbación) y explotaciones comerciales (superior a 10 ha, prácticas de mecanización, renovación, fertilización, aplicación de agroquímicos y remoción del suelo) (Gómez y Miranda, 2009; Rodríguez *et al.*, 2004). En Cundinamarca los cultivos son principalmente de agricultura familiar tal como se han descrito y cuyo sistema de corte es por entresaque, sistema que también fue dominante en este estudio, también se encontró que el manejo por parejo sin renovación ha ganado importancia en la región. Así, se enfocó este capítulo en el objetivo específico “Determinar el stock de COS y su variabilidad en cultivos de caña de azúcar para panela, bajo los modelos de corte identificados en los municipios”.

Este capítulo aborda inicialmente el marco conceptual sobre el COS y las variables textura y estabilidad estructural. Luego, partiendo de la caracterización obtenida en el capítulo precedente, expone cómo fueron determinadas las unidades de muestreo en campo utilizando el Hiper cubo Latino Condicionado (HCLC), y presenta el análisis derivado del procesamiento de datos de laboratorio a nivel estadístico y por último muestra la distribución vertical del COS, y su relación con los tipos de manejo evaluados dentro de la dinámica de almacenamiento de COS.

2.2. Marco conceptual

El suelo

Tal como se ha mencionado, y como se observa en la ecuación (2.1) el suelo es un cuerpo natural resultante de la interacción de factores formadores descritos por Jenny, 1941 y McBradney, 2003 y evidentes en la ecuación:

$$S = (s, c, o, r, p, a, n) \quad (2.1)$$

Donde, *s* se refiere al suelo o a una característica del suelo (COS), *c* al clima, *o* a los organismos, *r* relieve, *p* material parental, ocurridos a través del *a* tiempo y *n* su georeferenciación, los que lo hacen único y complejo, se caracteriza por tener horizontes resultado de adiciones, pérdidas, translocaciones y transformaciones de materia y energía, (USDA, 2010). Al ser dinámico, juega un rol primordial en el ciclaje de materia orgánica muerta y en la descomposición y almacenamiento de nutrientes para las plantas, captura de carbono y moderación del clima, además de ser un hábitat para la diversidad (Lal, 2016). Como entidad viva, tiene la capacidad de proveer servicios ecosistémicos (Lal, 2004; Stockmann *et al.*, 2015) también de promover la salud en plantas, animales y humanos (Lal, 2016).

El Carbono Orgánico del Suelo (COS)

El carbono orgánico del suelo (COS) es considerado un indicador de calidad del suelo (Stockmann, Adams, *et al.*, 2015) que contribuye en la agregación de las partículas, estabiliza la estructura, mejora la porosidad del suelo (Tisdall y Oades, 1982) que responde positiva o negativamente a los cambios causados por perturbaciones naturales o antrópicas del paisaje (Vagen y Winowiecki, 2013) y controla directamente la infiltración, la disponibilidad de agua y nutrientes para las plantas (Lis, 2017). Ambientalmente, se le considera un parámetro determinante en la resiliencia del suelo en la estimación de la vulnerabilidad del suelo al riesgo por cambio climático, a la degradación física por erosión hídrica y eólica (Martínez *et al.*, 2008) y a la degradación química dada por el desequilibrio de nutrientes (Osman, 2014). El COS es el componente más importante de la materia orgánica total del suelo, cuya fuente principal es el CO₂ fijado por las plantas y transformado sucesivamente por organismos del suelo en compuestos más complejos y estables (Trumbore, 1997). Su estabilidad depende de

propiedades como la textura, la estructura, el pH y la mineralogía, que crean mecanismos de protección a nivel físico, químico y bioquímico en los cuales el C: es encapsulado en agregados (ped) que impiden el acceso de microorganismos (Six *et al.*, 2002), o forma complejos con constituyentes minerales del suelo como arcillas, óxidos e hidróxidos (Trumbore, 1997) y en los cuales la resíntesis bioquímica del C se evidencia en moléculas de estructuras complejas como compuestos aromáticos humificados y largas cadenas alifáticas (FAO, 2002; Six *et al.*, 2002).

De esta manera, en el suelo se encuentran diferentes fracciones de C, de acuerdo con los tiempos de rotación y mecanismos de protección así: la fracción lábil o activa, es aquella que permanece en el suelo por un periodo corto que va de semanas hasta 10 años (Jha *et al.*, 2012) se compone de biomasa microbiana, celulosa y sustancias no húmicas fáciles de oxidar por mineralización (Nieder, & Benbi, 2008). Esta fracción representa entre el 20 y el 40% del carbono en el primer metro del suelo (Trumbore, 1997) constituye un indicador importante en la calidad del suelo incluido su potencial productivo (Zapata, 2010; Galantini, 2008) y es alterada por las actividades antrópicas (Wu *et al.*, 2011).

La fracción intermedia se relaciona con el CO inmovilizado por los microorganismos, puede estar parcialmente estabilizado en la superficie de los minerales arcillosos mediante procesos de condensación, adsorción, desorción, floculación y acomplejamiento, también con la formación de polímeros de humus que favorecen la estabilidad de los macroagregados y tiene un tiempo de rotación de 10 a 100 años (Jha *et al.*, 2012; Whitbread, 1995; Ziegler *et al.*, 2013).

La fracción recalcitrante o reserva pasiva, se compone de sustancias húmicas que forman complejos con las arcillas, asociaciones organominerales con óxidos, hidróxidos, oxihidróxidos de Fe, Mn, Al, Si, sulfatos, carbonatos y alófanos (Gougoulas *et al.*, 2014). Este es el depósito más resistente a la descomposición, su tiempo de rotación oscila entre 100 a más de 1000 años, lo cual favorece el secuestro de CO₂ (Hartemink, 2014; FAO, 2017; Totsche, *et al.*, 2018; Cabrera, 2000).

El COS se deriva de los procesos pedogenéticos dados bajo la interacción de los factores formadores del suelo. Martínez, *et al.*, (2008) y Sánchez, *et al.*, (2012) describen al clima, la geología y las prácticas de manejo como responsables principales de las reservas de C en el suelo. El almacenamiento de COS es un procesos lento, dependiente de la cantidad y calidad

de residuos orgánicos, de la posición geomorfológica local donde estos son acumulados para su posterior transformación y de la intensidad y duración del ambiente intempérico que es en últimas el que define el tipo de proceso de acumulación (littering), translocación (haploidización, pedoturbación), transformación (humificación, mineralización, paludización, melanización, carbonatación) o más complejo (podzolización, andolización) (Targulian y Krasilnikov, 2007; Zapata, 2002). Así los tenores de COS son favorecidos por factores bióticos y abióticos que ofrecen protección físico-química del CO en los agregados, en la estructura de los organismos o asociado fuertemente a las partículas minerales (arcillas, complejos, quelatos) del suelo (Trumbore *et al.*, 2011). Además, las evidencias de los mismos expresadas en el suelo como propiedades físicas, químicas, biológicas, mineralógicas, son atributos o diagnósticas para su clasificación taxonómica (USDA, 2014 y WRB, 2014).

Importancia de la profundidad en las reservas de Carbono

Indicadores conocidos de degradación del suelo son la erosión y la disminución de las reservas de COS, esta última con potenciales efectos negativos en otras funciones del suelo como almacenaje de nutrientes, retención hídrica, agregación del suelo, absorción de contaminantes, entre otras. Por lo anterior, el stock de COS ha sido propuesto como indicador para la degradación del suelo, aunque las relaciones entre alteraciones del COS y la degradación aún no han sido bien establecidas. En este aspecto, investigadores determinan que también es importante abordar la importancia del COS a profundidad para la degradación del suelo ya que el contenido de COS a una profundidad de 30 cm responde fácilmente a las perturbaciones, mientras que por debajo de esta profundidad las reservas se pueden ver alteradas hasta después de una década (Lorenz *et al.*, 2019; Meersmans *et al.*, 2009).

Según Kautz *et al.* (2013), en regiones templadas el subsuelo contribuye a más del 60% de nitrógeno, potasio y fósforo para las plantas y cualquier cambio de COS en la profundidad puede influir en la degradación del suelo que afecte esta función. Si bien, las investigaciones sobre los procesos en el subsuelo y las existencias de COS a mayor profundidad en diferentes escalas son escasas, los autores han comenzado a recomendar la inclusión de las existencias del COS a profundidad en un marco de seguimiento de la degradación del suelo (Lorenz *et al.*, 2019). Además, es necesario contar con información cuantitativa y precisa del suelo para la planificación y el manejo de los recursos naturales (Malone *et al.*, 2009).

Los muestreos realizados en la capa superficial del suelo (0-30 cm) generan datos que algunas veces subestiman el contenido de COS, porque aunque la acumulación de CO se da preferentemente en el primer horizonte del suelo, a mayor profundidad se pueden encontrar existencias entre 19 y 42% C (Lacoste *et al.*, 2014), favorecidas por procesos de estabilización de C tales como la protección física, interacciones órgano-minerales, o limitación energética de microorganismos descomponedores (Braakhekke *et al.*, 2011; Rumpel *et al.*, 2012).

Adicionalmente, autores como Trumbore, 1997 han mostrado que la MOS derivada de plantas C4 persiste largos periodos en suelos alterados e indicando una creciente importancia de la materia orgánica pasiva con la profundidad en el suelo. Las propiedades en el suelo cambian de forma continua tanto lateral como verticalmente, y para entender este fenómeno se han generado, analizado y evidenciado la capacidad de herramientas como los splines cuadráticos de áreas iguales en la predicción de funciones de profundidad que representan esta variación evitando la discontinuidad, los splines son un conjunto de funciones cuadráticas locales que describen una curva suave a través de un conjunto de puntos, basados en datos generales del horizonte (Bishop *et al.*, 1999; Malone *et al.*, 2009).

Sierra *et al.*, (2007), midieron las reservas de C en biomasa viva aérea y subterránea, necromasa y suelos a 4 metros de profundidad en un paisaje heterogéneo de bosques tropicales, en bosques primarios estimaron aproximadamente 383,7 tC * ha⁻¹ en total y demostraron que el C en suelo representó el 59%, y en bosques secundarios representó el 84%. Con este estudio concluyeron que las estimaciones de biomasa aérea subestiman las reservas totales de C en ecosistemas forestales y sugieren que los paisajes heterogéneos implican un esfuerzo mayor para determinar un muestreo que represente la variabilidad espacial.

La estructura del suelo

La estructura del suelo se refiere al tamaño, forma y disposición espacial de sus componentes mineral y orgánico, incluyendo la distribución del espacio poroso, que le da la capacidad de retener o transmitir fluidos y sustancias orgánicas e inorgánicas y de permitir el desarrollo radicular. La estabilidad estructural favorable permite mejorar la fertilidad del suelo y disminuir su erodabilidad. Por consiguiente, la agregación se entiende como el proceso de formación de partículas complejas a partir de partículas simples, que implica el tamaño y forma de los

agregados, su configuración, organización y estabilidad conocida como la resistencia del suelo a la degradación por factores como el viento, el agua, el laboreo, entre otros (Bronick y Lal, 2004; Lobo y Pulido, 2006; Perez, 1992).

El modelo de jerarquía agregada consiste en que las partículas primarias son unidas mediante agentes cementantes como desechos bacterianos, fúngicos y vegetales y cationes polivalentes en microagregados (<250 μm). Posteriormente, estos microagregados se unen a través de cementantes orgánicos transitorios como polisacáridos y agentes temporales como raíces en macroagregados (>250 μm) con enlaces que son más fuertes dentro de los microagregados que entre ellos. Bajo esta jerarquía se cumple: 1). Los macroagregados se descomponen gradualmente primero en los microagregados antes de las partículas minerales primarias, 2) los macroagregados tienen mayor contenido de MO ya que es aglutinante en su formación, 3) los macroagregados tienen más material orgánico lábil que microagregados (Bronick y Lal, 2004; Six *et al.*, 2000; Tisdall y Oades, 1982).

El COS tiene propiedades químicas tales como su carácter anfótero o su capacidad de cambio que determinan su potencial de carga y complejación, también actúan en la tasa de descomposición que tiene un efecto directo en la agregación (Schulten y Leinweber, 2000) por ejemplo el COS lábil puede aglutinar de forma rápida, pero así mismo es transitorio, mientras que el COS recalcitrante aunque en el proceso de agregación es lento, su efecto es duradero (Bronick y Lal, 2004).

La estructura del suelo, por medio de la porosidad, el intercambio gaseoso y la humedad afecta la descomposición del COS, así como su oclusión y la profundidad. Los tiempos de rotación varían dentro de los agregados según su tamaño, los complejos formados con la arcilla y compuestos inorgánicos (Bronick y Lal, 2004). La MOS promueve la estabilidad estructural porque disminuye el hinchamiento de los agregados y su permeabilidad, además aumenta la fuerza intrínseca de los agregados (Pulido *et al.*, 2009). La tasa de descomposición del CO hace efectiva la formación de agregados estables además de ser un mecanismo para su protección. Si bien se presenta una relación entre el COS y la estabilidad estructural, se ha demostrado que esta relación está más dada por la calidad del COS que por su cantidad.

La protección física que ejercen los agregados al COS está dada por el poco o nulo acceso de la microbiota abundante en la parte externa del agregado al COS, además se reduce la difusión

de oxígeno, principalmente en microagregados como efecto a la porosidad y la humedad que ocupa los poros, además la materia que ha sido ocluida en un agregado experimenta una descomposición selectiva de compuestos sencillos como carbohidratos conservándose estructuras más largas y complejas de difícil descomposición como lípidos y proteínas Six *et al.*, 2002).

Los cultivos, además de disminuir las reservas de carbono, cambian la distribución y estabilidad de los agregados del suelo (Six *et al.*, 2000), es por esto que se conoce como un indicador de degradación de suelos. Los suelos con mayor riesgo a la degradación física son aquellos con baja estabilidad estructural, en función del contenido de materia orgánica condicionada por la vegetación y por las prácticas de cultivos (Fernández *et al.*, 2016).

La evaluación de estabilidad estructural (EE) del suelo es importante para determinar los efectos de los manejos sobre el recurso, existen diferentes metodologías para determinar la estabilidad de los agregados, entre estas la turbidimetría, el tamizado en seco y el tamizado en húmedo, donde algunas resultan ser más precisas para determinar el efecto del uso que otras, sin embargo, es un tema en constante investigación (Castillo *et al.*, 2008), ya que no existe un método estandarizado que sea utilizado de manera universal (Fernández *et al.*, 2016).

La textura del suelo

La textura hace referencia a la proporción de las partículas arena, limo y arcilla en la fracción mineral del suelo. Las arcillas, son minerales secundarios formados a partir de minerales de rápida intemperización y son la oferta actual de nutrientes para el suelo. Estos minerales están constituidos por capas laminares en las cuales es posible el intercambio de cationes, esta capacidad de intercambio aumenta o disminuye dependiendo de las condiciones de hidratación en el suelo y de la composición interna del tipo de arcilla (Besoain, 1985).

Las arcillas denominadas 2:1 tienen una alta superficie específica y alta capacidad de intercambio catiónico (CIC) y mayor potencial de unión con MO, por ejemplo, la montmorillonita ($80-150 \text{ cmol}_c \cdot \text{kg}^{-1}$) y la vermiculita ($120-220 \text{ cmol}_c \cdot \text{kg}^{-1}$). Sin embargo, otras arcillas 2:1 como la illita presentan una superficie específica menor que el resto de las arcillas 2:1 y CIC media ($20-50 \text{ cmol}_c \cdot \text{kg}^{-1}$). Por otra parte arcillas tipo 1:1 como la Caolinita y la Halloisita son pobres

en bases y por lo tanto presentan muy baja CIC ($5-10 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$) estas se forman principalmente en un medio que estimula el lavado de cationes (Besoain, 1985).

Los tipos de arcilla como los mencionados, ofrecen diferentes mecanismos en la protección de MO por medio de la micro agregación que depende tanto del contenido como del tipo de arcilla. Se ha comprobado que el C en complejos organominerales se encuentra químicamente protegido, lo que se fortalece con el aumento de las proporciones de limo y arcilla (Six *et al.*, 2002).

2.3. Metodología

La figura 2-1 resume las actividades realizadas en este capítulo sobre el cálculo del stock de carbono orgánico del suelo en los cultivos de caña panelera, que comprenden: a) la etapa de definición de tamaño de muestra (tipo de análisis, hipercubo latino) b) caracterización morfológica del suelo y muestreo (campo) c) determinación de propiedades físicas y químicas (laboratorio) d) análisis estadístico (descriptivo y distribución vertical del stock de COS).

2.3.1. Muestreo, análisis en campo y laboratorio

Para la determinación del tamaño de la muestra se usaron las unidades de paisaje provenientes de la caracterización descrita en el capítulo 1, de las 278 unidades productivas identificadas mediante la tipificación de cultivos de caña por parejo y entresaque, se usaron 130 unidades productivas, gracias a la anuencia de sus propietarios para obtener información. Se seleccionó el método de análisis, Hipercubo latino Condicionado – HCLC, el cual permite generar muestreos estratificados en presencia de datos auxiliares y es frecuentemente utilizado como estrategia apropiada para aplicar a proyectos con recursos limitados, representa de manera adecuada la distribución geográfica de la muestra y de las frecuencias de las covariables analizadas (W. de Carvalho *et al.*, 2014; Minasny y McBratney, 2006). Se empleó la librería “*clhs*” del programa RStudio 3.6.3 (Roudier *et al.*, 2020) para determinar el tamaño de muestra asociado a las unidades productivas representativas de los manejos y las geoformas características usando como condicionales la georreferenciación de cada sistema de cultivo y el clúster al cual pertenece.

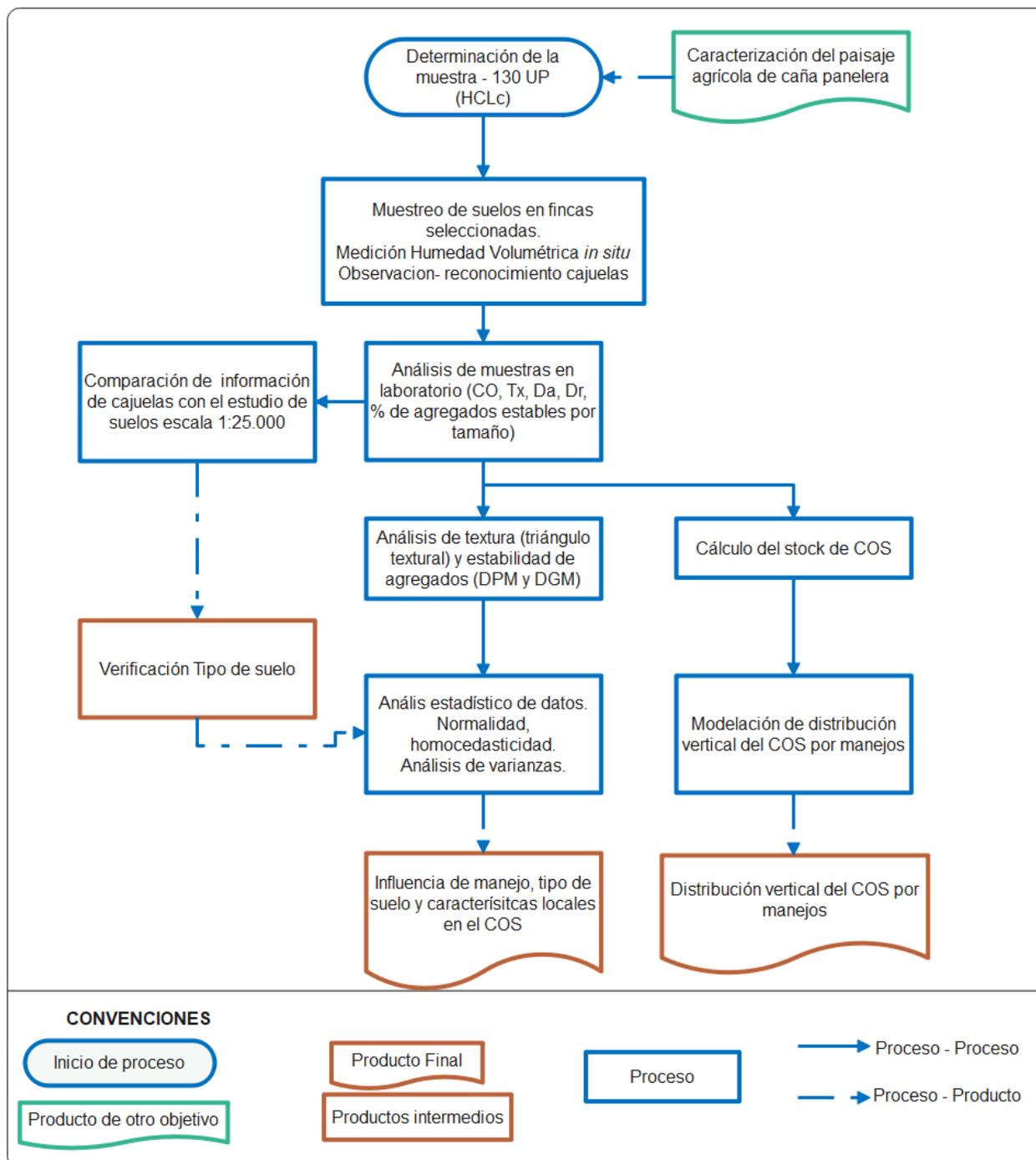


Figura 2-1: Diagrama metodológico – Determinación del stock de COS en cultivos de caña panelera.

Se escogieron dos parcelas de observación de 25 m² por finca, considerando tres características homogéneas (pendiente, posición geomorfológica y densidad de siembra) y como sistema control se consideraron las pasturas de dos de las fincas, para un total de 28 sitios de muestreo y análisis. En cada parcela se hicieron cajuelas de 50 x 50 x 50 cm para

describir las características morfológicas del suelo (espesor de los horizontes superficiales, color en húmedo, textura, estructura, consistencia, raíces, actividad de macroorganismos, límite y topografía de horizontes), y se efectuaron las determinaciones de campo de rutina (pH, reacción a H₂O₂, HCl y prueba de Fieldes), acorde con las especificaciones del manual de descripción de perfiles en campo (USDA, 2014b).

En cada cajuela se extrajeron muestras en las profundidades 0-10, 10-20, 20-30, 30-40 y 40-50 cm. Se tomaron 140 muestras disturbadas y 135 muestras sin disturbar en anillos de 5 cm de diámetro y 5 cm de altura. Para las cajuelas NcF5 y QnF4 solo se tomaron las dos y tres profundidades respectivamente, debido a la presencia de gravilla y piedras en más del 90%. Adicionalmente, se determinó la humedad volumétrica del suelo *in situ* utilizando el equipo ML3 Thetakit de Delta-T Devices.

La caracterización analítica de las muestras se llevó a cabo en el Laboratorio de Suelos de AGROSAVIA, sede Tibaitatá, Mosquera siguiendo el Manual de Métodos Analíticos del laboratorio de Suelos (IGAC, 2006) y se detallan en la tabla 2-1.

Tabla 2-1: Métodos de laboratorio empleados

Propiedad	Método	Unidad
Carbono Orgánico (CO)	Walkley y Black (1934) (NTC5403 – colorimetría)	%
Densidad aparente (Da)	Cilindro	g* cm ⁻³
Densidad real	Picnómetro	g*cm ⁻³
Textura	Hidrómetro de Bouyoucos	%
Estabilidad estructural	Yoder (Equipo Maser, Ref EEAM02)	índice

Para estimar el tenor de Carbono orgánico del suelo (COS) por espesor se empleó la fórmula de Lacoste *et al.* (2014) que incluye el porcentaje en volumen de Gravilla (Gr), descrita en la ecuación 2.2. El stock de carbono orgánico del suelo (SCOS) se estimó a partir de la sumatoria del COS hasta 50 cm de profundidad (de Oliveira *et al.*, 2017).

$$COS \left(\frac{Mg}{ha} \right) = CO \left(\frac{Kg}{Mg} \right) * Da \left(\frac{Mg}{m^3} \right) * E(m) * 10 * \left(\frac{1 - Gr (\%vol)}{100} \right) \quad (2.2)$$

A partir de los porcentajes de las fracciones arena (A), limo (L) y arcilla (Ar), se establecieron las clases texturales (Triángulo textural, USDA,2014) y se graficaron en el programa sigma plot 14.0.

La estabilidad de agregados (%), se determinó en laboratorio por el método de Yoder (IGAC, 2006) en el equipo Maser, Referencia EEAM02, que consta de un juego de cinco tamices (4, 2, 1, 0,5, y 0,25 mm). Las fracciones retenidas en los tamices representan los agregados estables al agua y se clasificaron acorde con Zhou *et al.* (2020) y se presentan en la Tabla 2-2.

Tabla 2-2: Clasificación de Agregados Zhou *et al.* (2020).

Clasificación Agregados	Tamaño Agregado (mm)	Tamiz (mm)
Macroagregados Grandes	> 2	4
		2
		1
Macroagregados Pequeños	< 2 y > 0,25	0,5 0,25
Microagregados	< 0,25	-

Con la información del porcentaje de agregados retenidos en cada tamiz fueron calculados los índices de agregación del suelo.

El diámetro geométrico medio (DGM) calculado según la ecuación (2.3) de Mazurak, 1950 (Pérez, 1992).

$$GMD = \exp\left(\frac{\sum_{i=1}^n (W_i * \text{Log} \bar{X}_i)}{\sum_{i=1}^n W_i}\right) \quad (2.3)$$

El diámetro ponderado medio (DPM) se calculó según lo dice Kemper y Rosenau (Lobo y Pulido, 2011), ver ecuación (2.4).

$$DMP = \sum_{i=1}^n \bar{X}_i * W_i \quad (2.4)$$

Donde W_i , es el peso de los agregados (g) retenidos en cada tamiz, o la fracción de peso de la clase de tamaño correspondiente. \bar{X}_i , es el diámetro medio de cada fracción (mm). De acuerdo

con el DPM la estabilidad estructural se clasifica en: Inestable (DPM <0,5), Ligeramente estable (0,5 - 1,5), Moderadamente estable (1,5 - 3), estable (3 - 5), muy estable (>5)

Según el porcentaje de agregados estables mediante el método de yoder se clasifican la estabilidad del suelo para evaluar su capacidad de infiltración de agua (agregados estables al agua con diámetro mayor a 1 mm) y la estabilidad para evaluar la susceptibilidad a la erosión (agregados estables al agua con diámetro mayor a 0,5 mm) de la siguiente manera:

Tabla 2-3: Clasificación de estabilidad según diámetro de agregados

Estabilidad	Agregados estables mayores a 1 mm de diámetro (%)	Agregados estables mayores a 0,5 mm de diámetro (%)
Muy alta	>60	>75
Alta	40-60	60-75
Media	20-40	45-60
Baja	10-20	30-45
Muy baja	<10	<30

.Fuente: Adaptado de Lobo y Pulido, 2006

2.3.2. Análisis de los datos

Se realizó la estadística descriptiva de las propiedades del suelo para los manejos: entresaque, parejo sin renovación y pasturas. A partir de las correlaciones de Pearson y Spearman se identificaron las posibles covariables ambientales que influyen los contenidos de COS. Se emplearon la prueba de Shapiro Wilk y Kosmogorv (Cherubin *et al.*, 2015; Selim *et al.*, 2016), el test de Levene y el test de Durbin-Watson con el fin de analizar de forma general el comportamiento normal de los datos y definir el análisis con métodos paramétricos o no paramétricos.

Para evaluar las diferencias en el COS generadas por los manejos (entresaque y parejo sin renovación) se realizó el análisis de varianza con un factor de clasificación, usando la librería *car* en R Studio (Fox *et al.*, 2021). También se empleó este análisis para encontrar las diferencias entre geoformas (Frente de espinazo, revés de espinazo, frente de crestón, revés de crestón, pie de loma, cima y ladera de loma), tipos de suelo (Calciudolls, Hapludolls, Humudepts), la interacción manejo-suelo y clúster.

2.3.2.1. Distribución vertical del cos

Para cada perfil de suelo se modeló la distribución vertical del COS mediante la función de suavizado *mpspline* de la librería GSIF (Hengl, 2016) y la librería *lattice* (Sarkar *et al.*, 2021) en RStudio 3.6.3. Los datos fueron agrupados por tipo de manejo y con las variaciones cm a cm de COS generadas con el spline, se construyeron los perfiles delimitados por los percentiles 25 y 75, con el fin analizar su variación vertical.

2.4. Resultados y discusión

2.4.1. Muestreo

El análisis derivado de la aplicación del HCLc arrojó 13 unidades productivas descritas en la tabla 2-4 y representadas en la Figura 2-2, ubicadas en el mismo número de fincas, con una réplica para cada una para un total de 28 puntos de muestreo incluyendo los dos puntos tomados como control en sistemas de pastura. Los manejos de corte por entresaque se encuentran ubicados en frente y revés de espinazos y uno en revés de crestón, mientras que los 12 puntos de corte por parejo sin renovación se ubican a la mitad en geoformas denudativas como el pie y cima-ladera de loma y el restante en frente y revés de crestón y frente de espinazo. De las 13 fincas 5 se encuentran en Molisoles y 8 en Inceptisoles.

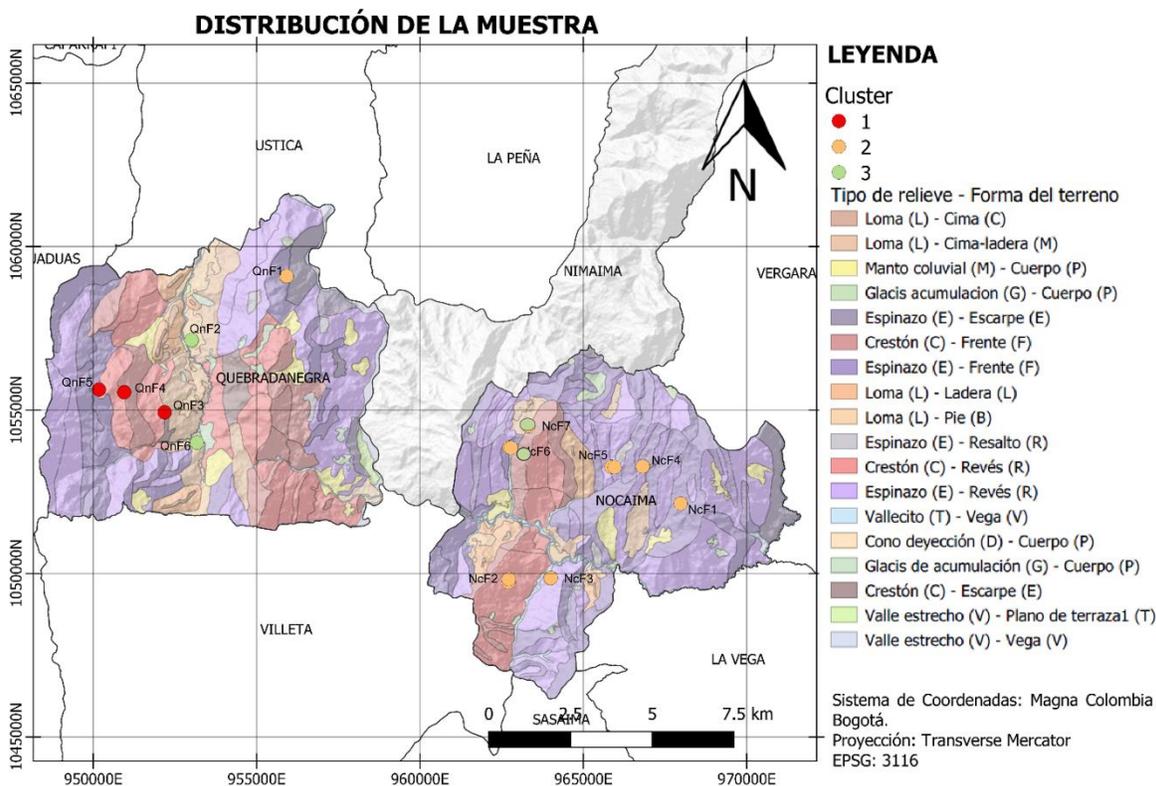
Tabla 2-4: Suelos descritos en los sitios de estudio

Geoforma**	Manejo	Familia taxonómica de suelo *(IGAC, 2019)	Pendiente (%)	Finca
F-E	E	Typic Hapludolls, esquelética - franca, mezclada, sub-activa, isotérmica (M006 – Perfil 25S0305)	25-50	QnF1
P-L	PSR	Typic Calciudolls, fina, semiactiva isotérmica (M018 - Perfil 25S0440)	12-25	QnF2
R-C	PSR	Typic Hapludolls, fina, activa, isotérmica (M011 perfil 25S0455)	25-50	QnF3
F-C	PSR	Typic Hapludolls, esquelética, franca fina, isotérmica (M004 obs)	50-75	QnF4
F-E	PSR	Typic Humudepts, franca-gruesa sobre fragmental, semiactiva, isotérmica (I070 – Perfil 25S0430)	25-50	QnF5
M-L	PSR	Typic Calciudolls, fina, semiactiva, isotérmica (M018 - perfil 25S0440)	12-25	QnF6

Geoforma**	Manejo	Familia taxonómica de suelo *(IGAC, 2019)	Pendiente (%)	Finca
F-E	E	Typic Humudepts, fina, activa, isotérmica (I062 – perfil 25S0459)	12-25	NcF1
R-C	E-P	Typic Humudepts, fina, activa isotérmica (I062 – perfil 25S0459)	12-25	NcF2
R-E	E	Typic Humudepts, fina, semiactiva, isotérmica (I062 – perfil 25S0408)	12-25	NcF3
F-E	E	Typic Humudepts, fina, isotérmica (I046 – Observación LE-066)	25-50	NcF4
R-E	E	Typic Humudepts, esquelética - franca, mezclada, superactiva, isotérmica (I056 - perfil: 25S0503)	12-25	NcF5
F-E	E	Typic Humudepts, franca-fina, activa, isotérmica (I054, perfil 25S0369)	25-50	NcF6
M-L	PSR	Eutric Humudepts, esquelética, arcillosa, mezclada, isotérmica. (I051)-	12-25	NcF7

F-E: Frente de espinazo. P-L: Pie de loma. R-C: Revés de crestón. F-C: Frente de Crestón. M-L: Cima y ladera de loma. R-E: Revés de espinazo. E: Entresaque. PSR: Parejo sin renovación. P: Parejo. *Información extraída del Estudio semidetallado de suelos de la cuenca del Rio Negro, (IGAC, 2019). ** Tomado de la figura 1-6, capítulo 1.

Figura 2-2: Distribución de la muestra en los manejos y geoformas caracterizados mediante CHLS



2.4.2. Caracterización edáfica de las unidades productivas

La descripción específica de los suelos descritos a través de cajuelas y corroborados con el estudio de suelos del IGAC en 2019 se encuentra en el Anexo I. En resumen, en las 13 unidades productivas se identificaron Calcudolls, Hapludolls y Humudepts. Los suelos muestreados en las unidades productivas presentan un régimen de humedad údico, siendo benéficos para el desarrollo de los cultivos trabajados en un clima predominante templado húmedo.

En los Calcudolls la familia textural es fina con altos contenidos de Arcilla siendo dominantes aquellas de tipo 2:1 con tendencia a ser expansivas. En la finca QnF1 los Hapludolls tienen una textura FA perteneciendo a una familia esquelética-franca, sin embargo, la estabilidad de agregados fue Alta y muy alta en el 90% de los horizontes analizados. En QnF2, cuyos suelos son en su totalidad arcillosos, el 80% tuvo estabilidad alta y muy alta. En QnF3 el 50% fue alto y el 40% muy alto con una textura predominantemente Arcillosa.

En general las fincas que presentan menor estabilidad estructural son NcF6, NCF7 y la pastura en NcF3. Aunque en su totalidad los suelos son arcillosos, es probable que las arcillas en estos sitios no sean expansivas o de alta superficie específica.

2.4.2.1. Clasificación textural y estabilidad de agregados del suelo

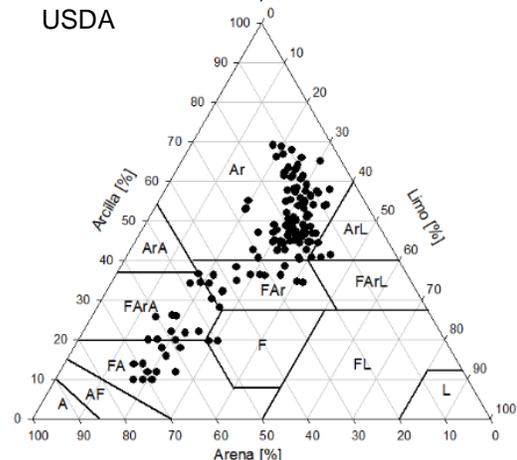
Con respecto a la clasificación textural (Figura 2-3, tabla 2-5), el 66% de los horizontes muestreados presentan texturas arcillosas (Ar), 10% texturas franco-arcillosas (FAr) y el 7% texturas franco-arcillo-arenosas (FArA).

Tabla 2-5: Textura de los suelos

Textura	# horizontes	Porcentaje
Ar	93	66,43
ArA	1	0,71
ArL	4	2,86
F	2	1,43
F Ar	14	10,00
F Ar A	11	7,86
FA	15	10,71
Total	140	100.00

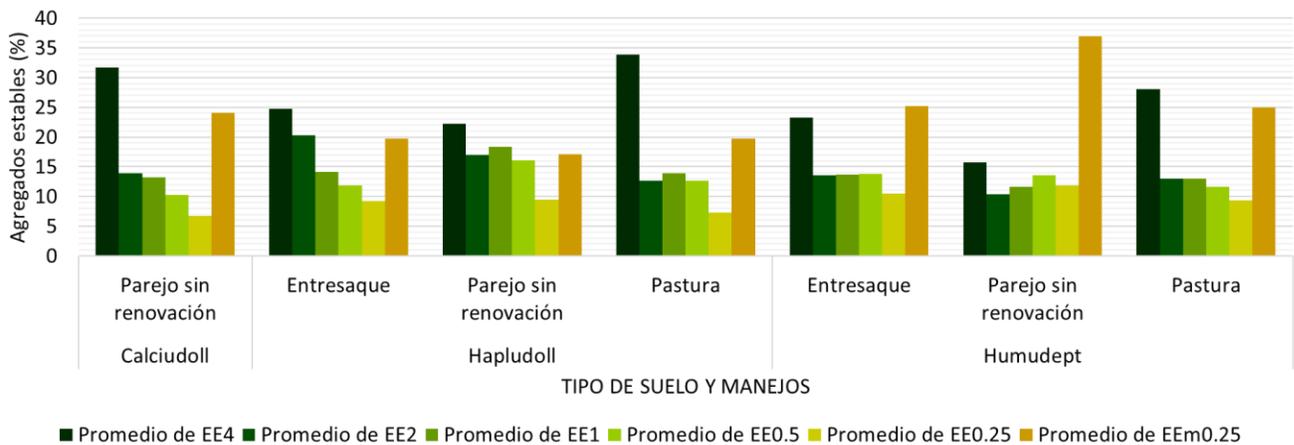
Fuente: Elaboración Propia

Figura 2-3: Triángulo textural de 140 muestras de suelo, de acuerdo con la USDA



La figura 2-4 permite analizar la estabilidad estructural de cada suelo muestreado, con respecto a su clasificación taxonómica y el tipo de manejo al que corresponde. En la mayoría de Humudepts dominan los microagregados, mientras que en los Molisoles (Hapludolls y Calcudolls) predominan principalmente los macroagregados grandes. La presencia y dominio de macroagregados superiores a 1 mm de diámetro son favorables para la estructura del suelo, disminuyendo la susceptibilidad a la erosión (Lobo y Pulido, 2006).

Figura 2-4: Distribución de los agregados estables por suelo y manejo



En la tabla 2-6 se muestran en porcentajes la proporción de suelos (horizontes) muestreados que cuentan con estabilidad estructural apta para la infiltración del agua, baja vulnerabilidad a la erosión y estabilidad según el DPM. En esta tabla la totalidad de las muestras analizadas corresponde a 140. En 47 de 140 muestras, es decir, en el 33,57% se vio una alta estabilidad de agregados mayores a 1 mm de diámetro, con mayor proporción en la profundidad de 10 a 20 cm, y en 51% de los Molisoles. La estabilidad alta se presentó en 40% de las muestras, en donde predominan Inceptisoles en 54%, con mayor proporción en la profundidad de 20 a 30 cm, aunque en Molisoles esta proporción domina en 40 a 50 cm (31%). Se resalta que valores de estabilidad bajo o muy bajo no se encontraron en suelos Molisoles (allí solo se encontraron estabilidad alta, muy alta y media). Con base en lo anterior, y a lo establecido por Lobo y Pulido, 2006, se ha encontrado que los suelos Molisoles de la región presentan mayor estabilidad de agregados que permite una alta capacidad de infiltración de agua en el suelo.

Tabla 2-6: Estabilidad de agregados en los horizontes muestreados

Estabilidad	Agregados estables al agua con 1 mm de diámetro	Agregados estables al agua con 0,5 mm de diámetro	Estabilidad estructural según DPM
Muy Alta	33,6%	30,7%	-
Alta - Estable	40%	32,9%	16,43%
Media – Ligeramente estable	20,7%	21,4%	16,43%
Baja – Moderadamente estable	4,3%	10,7%	66,43%
Muy Baja - Inestable	1,4%	4,3%	0,71%

En cuanto a la estabilidad de agregados superiores a 0,5 mm de diámetro, se encuentra que 31% es muy alta siendo 47% de los suelos Molisoles con mayor proporción en la profundidad de 10 a 20 cm, 32% se clasificó como alta estabilidad por igual en los órdenes de suelos. El 10% presenta baja estabilidad (en 20% por Molisoles) y estabilidad muy baja solo se presenta en Inceptisoles, lo que demuestra que este orden de suelos presenta una mayor susceptibilidad a la erosión del suelo (Lobo y Pulido, 2006). Así mismo en suelos de orden Molisol se observó mayor correlación de la fracción de arcillas con la estabilidad de macroagregados, como lo determinó Pulido *et al.* (2009).

Los microagregados se encontraron principalmente en las profundidades de 30-50 cm, y se encuentra altamente correlacionado con el contenido de carbono. Si bien algunos autores como Lobo y Pulido señalan que la existencia de estos microagregados en el suelo son una señal de inestabilidad, y le hacen susceptible al sellado y encostrado de suelo, y por consiguiente a la pérdida por escorrentía, es posible que estos microagregados también estén ejerciendo protección sobre el COS, así como lo determinaron Pulido *et al.* (2009), que evaluaron la relación entre calidad de MO y estabilidad de agregados, encontraron alta correlación entre agregados estables de 4, 2 y <0,25 mm y las fracciones de la MOS. Lo anterior debido a que la constante entrada de MO fresca regula la formación de sustancias húmicas y su descomposición en sustancias más estables y complejas.

Durante el análisis en campo se observó que los suelos de Quebreadanegra QnF2, QnF3 y QnF6 reaccionaron al ácido clorhídrico, lo que evidencia la existencia de carbonatos de calcio, situación que fue corroborada con el estudio de suelos. La existencia de estos carbonatos influye en la agregación del suelo, ya que puede precipitar compuestos que actúan como

aglutinantes o también forman puentes entre arcillas y materia orgánica, incrementando la estabilidad de agregados (Bronick y Lal, 2004).

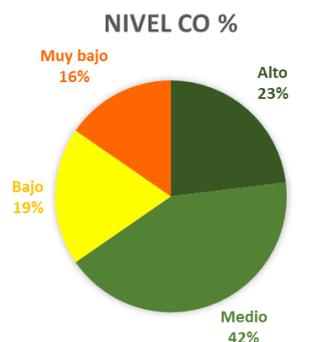
Se deduce que, aunque el 66% de los horizontes analizados son arcillosos, el 71% de estos horizontes presentan alta y muy alta estabilidad, el 22% presentan estabilidad media y solo el 6,4% presentan estabilidad baja o muy baja. Se resalta que el papel de agregar los suelos no solo depende de la clase textural sino de la calidad o tipo de mineral que se encuentran en el suelo.

2.4.3. Carbono orgánico del suelo

De acuerdo con los niveles interpretativos de porcentaje de carbono orgánico en los primeros 30 cm del suelo propuestos por IGAC, 2017, donde valores de 0,6% – 1% corresponden a una calificación de “Muy bajo”, de 1,1% - 1,5% equivalen a “Bajo”, de 1,6% - 2,5% es “Medio”, y de 2,6% - 6% es “Alto”, la figura 2-5, muestra el valor promedio del contenido de CO (%) en esta profundidad. En comparación con el estudio de suelos reportado por el IGAC, 2019 en un 15% de los casos comparados se encontraron valores superiores de CO con un promedio de 0,69%, los valores de CO inferiores fueron de 1,21% en promedio. Tauta, 2017 reportó en su estudio un promedio de 3,76% de CO para suelos bajo cultivos de caña panelera, mientras que en este estudio en promedio se reporta 1,97%, lo cual se puede ver reflejado en que el estudio de Tauta, 2017 se realizó sobre suelos clasificados como vertisoles con alto porcentaje de arcillas expandibles y que pueden contribuir positivamente en el aumento de reservas de C.

Para el área de estudio se encontró que el sitio QnF6 presentó en promedio los valores más altos de carbono orgánico con 2,08% y corresponde a Calciudolls en el pie de loma bajo el manejo de cosecha de parejo sin renovación, en tanto que el menor valor se presentó en un frente de espinazo en un cultivo bajo el manejo de cosecha de entresaque.

Figura 2-5: Nivel de carbono orgánico (%) para 30 cm de profundidad de acuerdo con el IGAC, 2017.



2.4.3.1. Stock de carbono orgánico del suelo

En la tabla 2-7 se presentan los resultados promedio de stock de carbono orgánico SCOS ($t \cdot ha^{-1}$), tenor de carbono orgánico CO (%) y densidad aparente ($g \cdot cm^{-3}$) para los manejos de corte por entresaque, parejo sin renovación y el sistema control de pastura. Se evidencia mayor contenido de carbono en los primeros diez centímetros de cada tipo de manejo, valor que decrece de manera proporcional al incremento de la densidad aparente.

Tabla 2-7: Valores promedio de COS, CO y Da por manejo y profundidad

Profundidad	Entresaque			PSR			Pastura		
	COS ($t \cdot ha^{-1}$)	CO (%)	Da ($g \cdot cm^{-3}$)	COS ($t \cdot ha^{-1}$)	CO (%)	Da ($g \cdot cm^{-3}$)	COS ($t \cdot ha^{-1}$)	CO (%)	Da ($g \cdot cm^{-3}$)
0-10 cm	25,75	2,51	1,17	26,65	2,45	1,14	37,51	3,50	1,11
10-20 cm	20,38	1,68	1,34	24,98	2,07	1,25	27,42	2,52	1,13
20-30 cm	14,71	1,16	1,32	20,35	1,67	1,33	24,31	2,00	1,25
30-40 cm	12,54	0,93	1,36	17,19	1,37	1,35	18,54	1,36	1,37
40-50 cm	8,75	0,64	1,45	12,26	0,91	1,48	15,07	1,08	1,40
TOTAL	82,13	1,38	1,32	101,48	1,70	1,31	122,85	2,09	1,25

Aunque Cerri *et al.* (2011) compararon la captura de C en sistemas de caña conversión de sistemas de cosecha bajo quema y cosecha verde o sin quema evidenciaron que las diferencias de acumulación de carbono no solo se debían al manejo sino también a las diferencias en la textura del suelo ($\leq 35\%$ de arcilla), es decir, los suelos arcillosos tenían una tasa anual media de acumulación de C que era aproximadamente tres veces mayor que los suelos arenosos. Así mismo Mishra y Francaviglia (2021) encontraron que la fracción arcilla influía en la captura de carbono.

Los cultivos de caña panelera en manejo de corte por entresaque y parejo sin renovación en promedio para los 50 cm de profundidad presentan valores densidad aparente de 1,327 y 1,308 $g \cdot cm^{-3}$ respectivamente y las pasturas presentan un promedio 1,250 $g \cdot cm^{-3}$. Baquero *et al* (2012) reportaron resultados similares al comparar suelos bajo cultivos de caña (Da promedio en 40 cm de 1,48 $g \cdot cm^{-3}$) con suelos bajo área forestal (Da promedio en 40 cm de 1,19 $g \cdot cm^{-3}$). Lo anterior indica una posible compresión gradual de los agregados del suelo aumentando la Da. Sin embargo, aunque se presentan valores mayores de Da en los cultivos de caña, de

acuerdo con Arshad *et al* (1996), no supera el umbral de $1,40 \text{ (g*cm}^{-3}\text{)}$, a partir del cual el crecimiento del sistema radicular se ve afectado. De acuerdo con la verificación que se realizó de suelos, se evidenció que en promedio los valores de densidad aparente de esta investigación fueron superiores en $0,20 \text{ g*cm}^{-3}$ con respecto a los reportados por el IGAC, 2019, con una diferencia mínima de $0,01 \text{ g*cm}^{-3}$ y máxima de $0,58 \text{ g*cm}^{-3}$, siendo las fincas de QnF5 y NcF2 las de mayor diferencia.

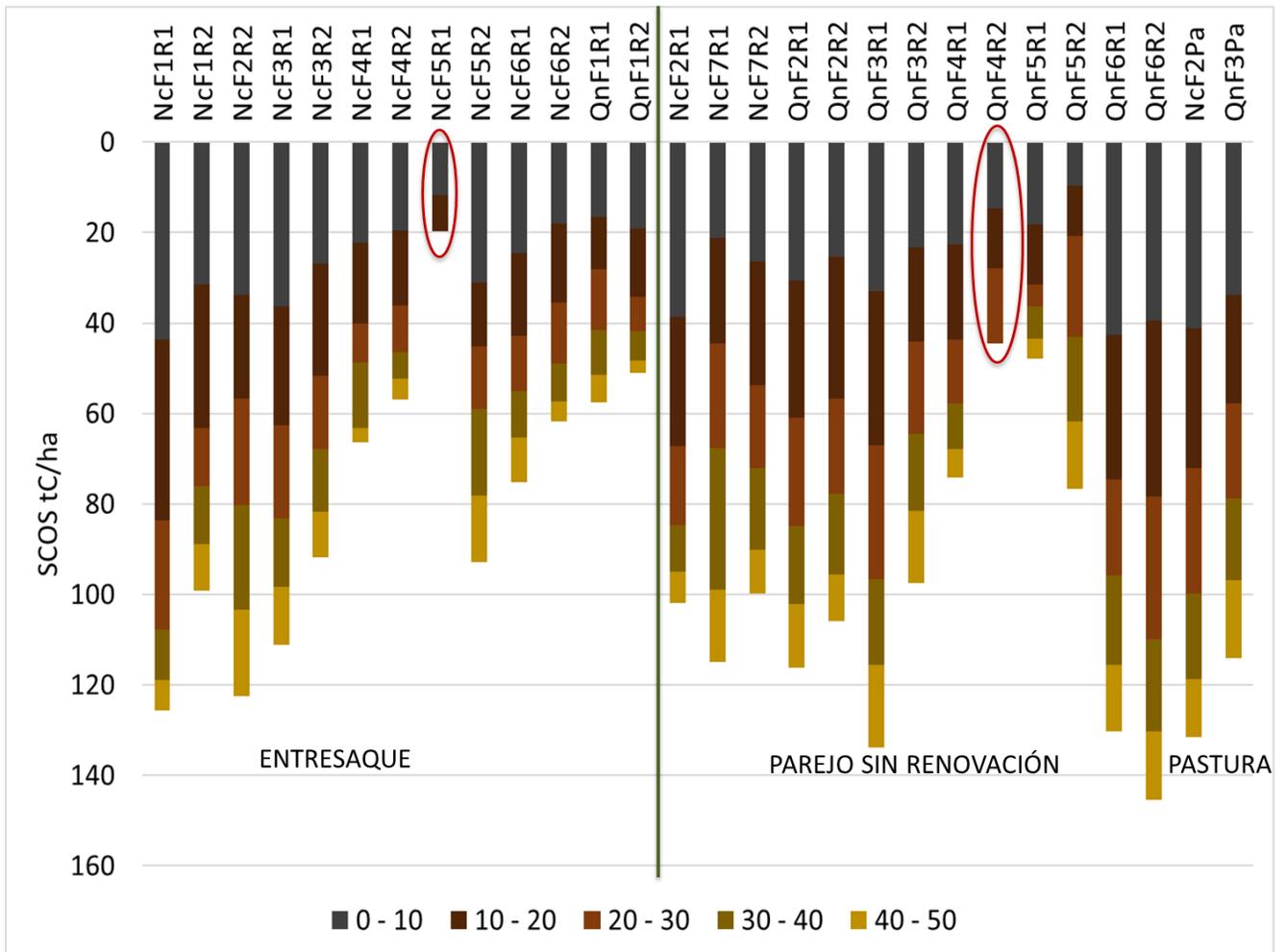
En la figura 2-6 se presenta el valor calculado de SCOS (ton *ha^{-1}) para cada sitio y se identifican por colores las profundidades muestreadas. Nótese que para las fincas NcF5R1 y QnF4R2 solo se muestrearon las capas superficiales (0 -10 y 10 -20, en la primera y una capa adicional 20-30 en la segunda), donde la profundidad efectiva está limitada por la presencia de piedras en el perfil, en el caso de Nocaima se trata de un Typic Humudepts, fina, activa, isotérmica y en Quebradanegra de Typic Hapludolls, esquelética, franca fina, isotérmica, ubicados en las formas del terreno revés de espinazo en pendiente 12-25% y frente de crestón en pendiente de 50 -75%, respectivamente, para estos dos suelos el SCOS ($11,75$ y $7,96$) en NcF5R1 y ($14,62$, $13,31$ y $16,67$) en QnF4R2.

El stock de carbono promedio en los 50 cm superficiales para el manejo de entresaque fue de $82,13 \text{ t*ha}^{-1}$, mientras que para el manejo de parejo sin renovación fue de $101,48 \text{ t*ha}^{-1}$. La pastura tuvo un promedio en el stock de $122,85 \text{ t*ha}^{-1}$. Se resalta que en algunas fincas como NcF4, NcF5 con manejo de entresaque tienen una densidad de siembra menor que el parejo sin renovación, lo que implica un menor aporte de residuos vegetales. Bolívar y colaboradores reportaron en 2021 para el área andina de Colombia un promedio de 84 t*ha^{-1} en 30 cm de profundidad, para este estudio se observa que el 28,6% de los sitios analizados presentan existencias iguales o superiores reportándose QnF6R2 como el más alto de todos con un total de $109,91 \text{ t*ha}^{-1}$ en un Calciudoll con un manejo de cosecha de parejo sin renovación y el valor más bajo para NcF5R1 con $19,71 \text{ t*ha}^{-1}$ en un Humudept bajo el manejo de entresaque, aunque este valor se debe principalmente a la pedregosidad existente en el perfil que solo permitió un muestreo hasta los 20 cm de profundidad.

Referente a la relación entre el SCOS con las variables edáficas analizadas como la textura y la estructura, se observa que el 66% de los horizontes muestreados presentan texturas arcillosas (Ar) y en promedio el COS corresponde a $20,95 \text{ t*ha}^{-1}$, la textura francoarcillosa (FAr) que representan el 10% de las muestras presenta en promedio $15,81 \text{ t*ha}^{-1}$ y la textura franco-

arcillo-arenosa (FArA) presente en 7% tiene 18,28 t*ha⁻¹. Lo anterior se presenta porque los minerales de arcilla se caracterizan por alta superficie específica y tienen mayor capacidad de formar complejos con M.O, incluso si es un tipo de arcilla 2:1 semi activa como la illita. En contraste la textura FA puede presentar COS alrededor de 11,52% lo que evidencia que un mayor contenido de partículas gruesas como la arena disminuye la capacidad de adsorción de materia orgánica por ser de muy baja actividad y superficie específica inferior a las arcillas.

Figura 2-6: Stock de COS en los manejos y suelos analizados



Se observa que Inceptisoles en horizontes arcillosos presentaron 19,04 t*ha⁻¹ y los Molisoles 24 t*ha⁻¹, esto puede presentarse como respuesta al de arcilla o mineralogía predominante en cada sitio.

Si bien, en el municipio de Nocaima se encuentran suelos con familias texturales finas o muy finas, refiriéndose a suelos arcillosos, en casos como NcF4 y NcF3 se encuentran correlaciones bajas (0,06) con carbono orgánico de suelo dando a entender que las arcillas presentes allí no son de alta superficie específica o expansivas.

En la tabla 2-8 se observa el análisis de normalidad de los datos y de sus residuales tanto a nivel general como por cada profundidad. Se encontró que las variables COS y CO tienen un comportamiento normal ($p > 0,05$) en la mayoría de los datos. De igual forma al hacer el análisis de homocedasticidad de los datos se evidencia que hay homogeneidad de varianzas ($p > 0,05$) y también se observa independencia en los datos (Tabla 2-9).

Tabla 2-8: Análisis de normalidad, homocedasticidad e independencia de datos.

Prueba	0-10 cm		10-20 cm		20-30 cm		30-40 cm		40-50 cm	
	COS	CO	COS	CO	COS	CO	COS	CO	COS	CO
Shapiro-Wilk	0,08	0,31	0,08	0,40	0,12	0,32	0,21*	0,24	0,33	0,61
Levene	0,58	0,30	0,46	0,29	0,39	0,88	0,31	0,41	0,66	0,52
Durbin-Watson	0,74	0,10	0,40	0,06	0,27	0,08	0,55	0,57	0,98	0,97

* Test de Kosmogorov-Smirnof corregido por Lillieforst.

Tabla 2-9: Análisis de varianzas (ANOVA) con un factor de clasificación (DCA).

Factor	Cambio	0-10 cm	10-20 cm	20-30 cm	30-40 cm	40-50 cm	p valor COS	
Manejos	0,44	0,84	0,19	0,02*	0,03-	0,05-		
Suelos	0,29	0,13	0,03*	0,08-	0,29	0,41		
Geoforma	0,99	0,24	0,18	0,02*	0,005***	0,01*		
Clúster	0,04*	0,02*	0,02*	0,23	0,33	0,76		
Suelo-manejo	0,42	0,15	0,04*	0,07-	0,24	0,20		

Los asteriscos (***) indica nivel de significancia de 0. El asterisco (*) indica nivel de significancia de 0,01. La línea (-) indica nivel de significancia de 0,01 de 0,05.

El análisis de varianza permitió identificar que al comparar los valores de carbono orgánico del suelo tanto por el manejo como por la geoforma hubo diferencias en las profundidades superiores a los 20 cm. Al hacer la comparación por atributo suelo o por la interacción suelo-manejo se observaron diferencias en el horizonte de 10 a 20 cm de profundidad. Sin embargo, al comparar estos valores entre clúster, que contempla no solo las geoformas y los manejos

sino también el efecto de la pendiente se evidencian diferencias no solo en los horizontes 0-10 cm y 10- 20 cm sino que se marca también, de forma importante en la pendiente de cambio de COS a lo largo del perfil, es decir, el cambio o la disminución de COS con la profundidad se ve condicionado por la interacción de estas características específicas de sitio.

Como se estableció previamente, se evidencia que la actividad de cultivo presenta menor stock de carbono comparado con la pastura. De Oliveira *et al.* (2017) encontraron que en un cultivo de caña que reemplazó una pastura en 2005 el contenido de carbono fue inferior en capas de 0 a 10 y 10 a 20 cm con una disminución de 30,3 a 17,0 Mg C ha⁻¹ (43,9%), en el caso de este estudio se observa que para los suelos Humudepts a esta misma profundidad la pastura presentaba unas existencias de 72,076 Mg C ha⁻¹, mientras que el parejo tenía 67,15 y el Entresaque 56,73 es decir 6,81 y 21% menos que la pastura, en este caso se observó la importancia que tienen los componentes minerales del suelo, ya que para estas profundidades en la pastura el porcentaje de arcilla era de 58%, mientras que para el Parejo y el entresaque fue de 33,57 y 28,33 respectivamente. En cuanto a la pastura analizada en el suelo Hapludolls se observó que para los 20 cm habían 57,77 Mg C ha⁻¹ mientras que para el cultivo bajo parejo sin renovación los valores fueron de 66,94 y 44,02 es decir uno de los sitios con 15% más y otra con 23% menos. Es importante resaltar el papel que ejerce en este escenario los microorganismos del suelo y la vegetación cercana que aporta diferentes residuos orgánicos alrededor de esta pastura. De Oliveira *et al.*, 2017 proponen que esto indica que en capas profundas el C existente antes del cambio de uso no ha sido alterado por el cultivo o por las prácticas de manejo, por lo que es probable que se encuentre protegido por microagregados o arcilla en el suelo. Geissen *et al.* (2009) determinaron que el porcentaje de C en capas de 0-20 y 20-40 cm para pastura fue de 1,95 y 1,32% respectivamente, mientras que para caña fueron de 1,85 y 1,16%. En este estudio se reportaron valores superiores tanto para las pasturas con 3,01% (0-20 cm) y 1,68% (20-40 cm), como para el cultivo de caña 2,19% (0-20 cm) y 1,26% (20-40 cm).

Aunque se presente disminución de COS en capas superficiales por el manejo debido a la mineralización que aumenta con la exposición a la temperatura y humedad superficial, se resaltan casos como el mencionado de QnF3 en que el cultivo de caña presenta mayor COS que la pastura en el perfil. De Oliveira *et al.* (2017), llega a la conclusión de que evaluar el COS en capas superficiales (0 a 20 cm) puede llevar a un sesgo en estudios de cambio de uso del suelo, ya que posiblemente el carbono que se encuentra en superficie no solamente se ha

agotado, sino que se está acumulando en capas inferiores, lo anterior puede conllevar una sobreestimación en las pérdidas en un balance de GEI si no se tiene en cuenta la importancia de capas inferiores. Selim *et al.* (2016) en su investigación comparan manejos con quema y sin quema de residuos, determinaron que el COS en los 20 cm superficiales representan solo el 28-29% del COS en 100 cm, encontraron que a profundidades mayores de 60 cm el COS disminuye en zonas de quema. Con stock de 73,1 t*ha⁻¹ en zona quemada comparado con 79 t*ha⁻¹ en manejo de conservación.

En esta investigación no se presentan unidades con remoción de residuos vegetales posteriores a la cosecha, sin embargo, sí se observa que algunos cultivos tienen más densidad de siembra que otros, especialmente los manejos por parejo sin renovación con un promedio de 190 tallos por 25m², mientras que en Nocaima es en promedio 137 tallos por 25m² lo anterior contribuye a un mayor aporte de estos residuos en el suelo, lo que va a beneficiar un proceso de descomposición en el suelo y mayor acumulación de CO en las capas superficiales. Por ejemplo, de Oliveira *et al.* (2018) hallaron que en un cultivo sin remoción de residuos tenía un stock de 87,7 tC*ha⁻¹ en la profundidad de 0 a 40 cm y con remoción de 100% disminuía a 84,5 tC*ha⁻¹. En la zona de estudio de forma general para esta profundidad se encuentra para el PSR de 88,7 Mg C/ha y para entresaque de 73,38 tC*ha⁻¹. Sin embargo, se resalta que en el caso de NcF2 donde el corte por entresaque presentó un stock mayor (122 tC*ha⁻¹). Thorburn *et al.* (2012) en su investigación determinaron que los cambios de carbono se hacen evidentes después de 5 años de retención de residuos o buen manejo, pero la existencia de estos cambios es altamente específica del sitio por las otras covariables como suelo, clima, prácticas, entre otros, por lo que se considera importante un enfoque de modelado para integrar los diferentes factores que afectan cada sitio para determinar el grado de captura de C. Así mismo lo resaltan Lisboa *et al.* (2019) cuando evaluaron los efectos de eliminar los residuos de caña sobre la calidad de un Oxisol y un Ultisol, enfatizaron por un lado las características propias del suelo, resaltando que el oxisol responde fácilmente a estos cambios como disminución en el índice de calidad, y que es necesario hacer recomendaciones enfocadas al sitio y sus características.

Schmiedt *et al.* (2017) evaluaron los efectos del cambio de uso del suelo de vegetación nativa a cultivo de caña de azúcar, las modificaciones en atributos del suelo debido al cambio de uso fueron significativas. En uno de los sitios no hubo diferencias entre vegetación nativa y cultivo

de caña, esto lo explicó por el largo periodo que lleva el cultivo (más de 40 años), por lo que los residuos dejados en suelo durante ese periodo de tiempo pudieron conservar el COS.

Los residuos de caña de azúcar son la fuente principal de carbono en suelos con este cultivo, incluso mucho mayor que los aportes por las raíces (Nunes *et al.*, 2013). Estos residuos se caracterizan por una tasa de descomposición lenta debido a la alta relación C:N (100:1) y a sus concentraciones de lignina y polifenoles, de esta forma la tasa de metabolización por parte de microorganismos es superada por las adiciones de MO fresca que se transforma en sustancias húmicas aromáticas, y en el plazo aproximado de un año la fauna del suelo puede incorporar los residuos a capas más profundas. Aunque la vegetación desempeña un rol importante, es necesario resaltar la importancia de las condiciones edafoclimáticas específicas y su efecto en las existencias de COS (de Oliveira *et al.*, 2018; Thorburn *et al.*, 2012).

2.4.4. Distribución vertical del cos

En la figura 2-7, se muestra que los splines tanto para el manejo de corte por entresaque como el parejo sin renovación siguen la tendencia general de distribución vertical tal como lo han demostrado Fernández, 2020 en una investigación sobre oxisoles, Lis-Gutiérrez *et al.* (2020) con la investigación que realizaron en el páramo y Oliveira *et al.*, 2017 en suelos con cultivo de caña de azúcar, sin embargo, este cambio es más abrupto en el manejo de corte por entresaque que en promedio disminuye 3,2 tC*ha⁻¹ en cada profundidad (0-10 cm) hasta alcanzar 12 t*ha⁻¹ en los 50 cm. Mientras que en el manejo de parejo sin renovación el COS se mantiene hasta los 20 cm, y allí comienza a disminuir hasta alcanzar 14,5 t*ha⁻¹ a los 50 cm. También se observa como lo expone Oliveira *et al.* (2017) la interacción entre la fracción de arcilla y el COS que forman agregados y protegen el COS, esta relación es más visible en suelos Molisoles y se mantiene en la profundidad, mientras que con suelos Humudepts es cambiante y disminuye con la profundidad.

Se observa que el COS en ambos manejos disminuye con la profundidad, tal como lo describe Oliveira *et al.*, 2017, sin embargo, este cambio es más abrupto en el manejo de corte por entresaque que en promedio disminuye 3,2 tC*ha⁻¹ en cada profundidad hasta alcanzar 12 tC*ha⁻¹ en los 50 cm. Mientras que en el manejo de parejo sin renovación el COS se mantiene hasta los 20 cm, y allí comienza a disminuir hasta alcanzar 14,5 t*ha⁻¹ a los 50 cm. También se

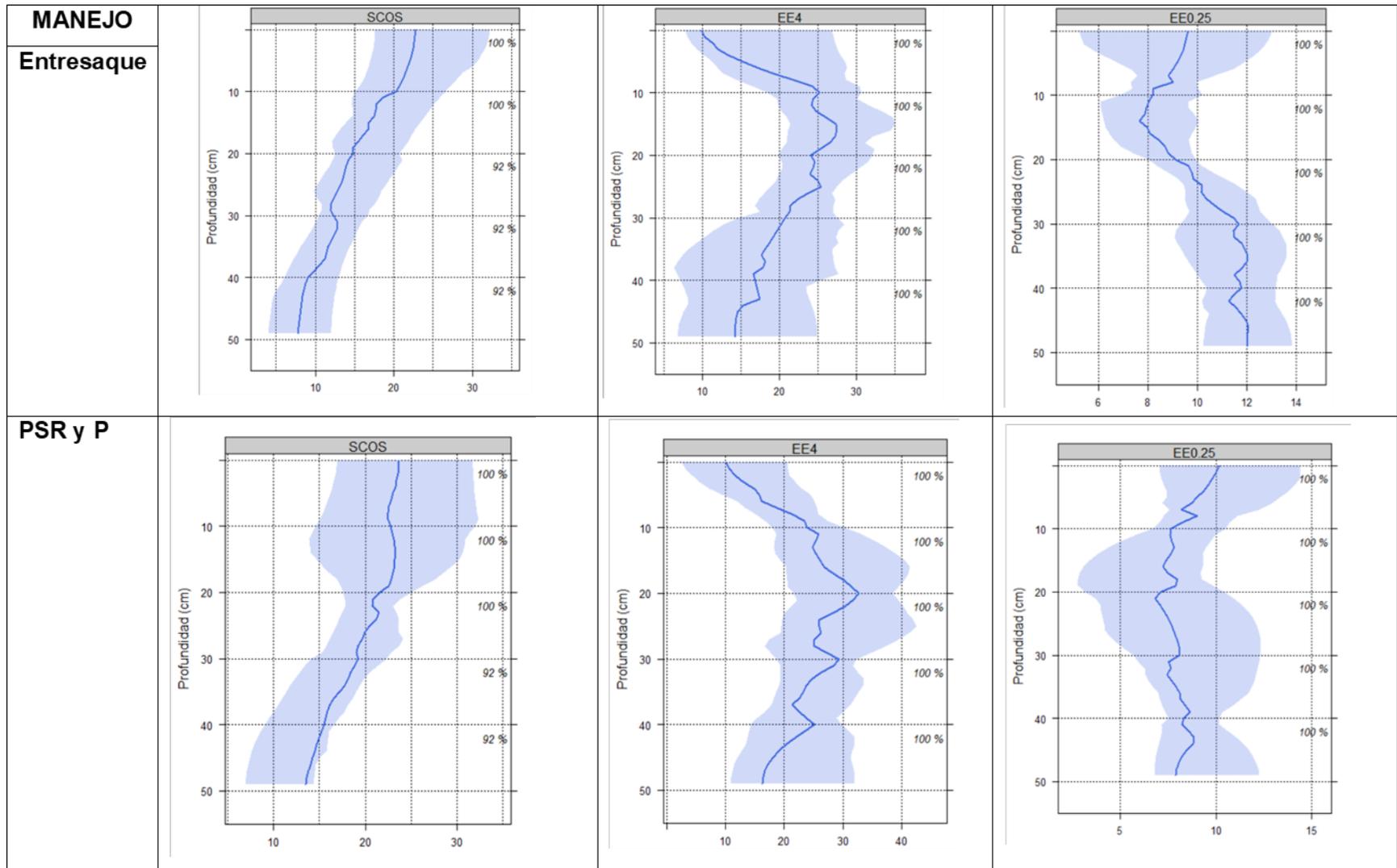
observa como lo expone Oliveira *et al.* (2017) la interacción entre la fracción de arcilla y el COS que forman agregados y protegen el COS, esta relación es más visible en suelos Molisoles y se mantiene en la profundidad, mientras que con suelos Humudepts es cambiante y disminuye con la profundidad.

De forma general dominan microagregados (<0,25mm de diámetro) en 26,5%, y macroagregados mayores a 4mm en 24,2%. Macroagregados pequeños de 0,25mm tienen un comportamiento similar a microagregados, estos microagregados se presentan mayoritariamente en la profundidad de 0 – 10 cm, disminuye en las profundidades 10 – 30 y aumenta nuevamente en las profundidades 30 – 50 (excepto en NcF5, NcF6 y QnF1). Caso contrario se observa con los macroagregados grandes y macroagregados pequeños de 1mm que predominan en las profundidades de 10 – 30 cm.

El comportamiento de los microagregados con la profundidad en el manejo por entresaque demuestra un alto porcentaje en capas superficiales, disminución en capas intermedias y vuelve a aumentar con la profundidad, mientras que en el manejo del parejo sin renovación se observa que en la capa superficial también es alto el porcentaje de microagregados pero estos disminuyen y no vuelven a aumentar con la profundidad. Es probable que al no verse correlacionado los microagregados con el carbono orgánico o con minerales de arcilla, se deba a la posible interacción de estos microagregados con materia recalcitrante ejerciendo protección física con la profundidad.

Se resalta la importancia de la profundidad en las existencias de COS, demostrando que aproximadamente el 27% del COS se encuentra entre los 30 y los 50 cm de profundidad, tal como lo determinó Premrov *et al.* (2017) que determinó que a partir de los 30 cm se acumulaba más del 22% del COS.

Figura 2-7: Distribución vertical del COS, los agregados estables de diámetro de 4mm y los micro agregados en los manejos encontrados



2.5. Conclusiones

En general se encontró que el mayor contenido de CO se concentra en las capas más superficiales del suelo, disminuyendo paulatinamente con la profundidad e inversamente con el comportamiento de la densidad aparente.

En el municipio de Quebradanegra las existencias de carbono son mayores en suelos Calciudolls o que presentan carbonato de calcio, lo que demuestra la importancia que puede generar esta especie química en la protección del COS.

Los contenidos de arcilla son importantes en la captura de COS, sin embargo, se resalta la importancia que puede tener la mineralogía, ya que en algunos casos donde se presentan suelos arcillosos como NcF4 o NcF6 las existencias de C fueron inferiores a $75\text{tC}\cdot\text{ha}^{-1}$

Capítulo 3. Propuesta de modelo conceptual del efecto de covariables ambientales en el stock del carbono orgánico del suelo

3.1. Introducción

Las reservas de carbono están controladas por factores tales como el clima, el suelo y la geomorfología (Gray *et al.*, 2015; Senapati *et al.*, 2014; Wiesmeier *et al.*, 2019), y también se ven afectadas por el uso y manejo de la tierra (Lal, 2004). En las últimas décadas, investigadores han desarrollado modelos de dinámica de carbono que posibilitan simular su respuesta en diferentes escenarios que incluyen como covariables el relieve, las condiciones climáticas, los usos del suelo y las prácticas de manejo (Senapati *et al.*, 2014).

La caracterización y la relación entre las covariables ambientales y el contenido de carbono orgánico del suelo, pueden proveer herramientas a diferentes actores tomadores de decisiones a escala local y regional. La aplicación de un modelo conceptual que permita establecer la relación carbono-covariables ambientales permitirá desarrollar una metodología replicable en otras zonas con manejo de cultivo de caña.

En este capítulo se propone un modelo conceptual que relaciona las variables ambientales locales caracterizadas en los municipios de Quebradanegra y Nocaima con el carbono orgánico del suelo en cultivos de caña de azúcar para la producción de panela, este modelo se generó a partir de la información obtenida en el capítulo 2 y el entrenamiento de un modelo no paramétrico que permite verificar la importancia de covariables ambientales en las existencias del COS.

3.2. Marco conceptual

Covariables ambientales

VARIABLES CLIMÁTICAS COMO LA PRECIPITACIÓN Y LA TEMPERATURA INFLUYEN SOBRE LA DINÁMICA DEL COS, YA QUE CONTROLAN LA ACTIVIDAD MICROBIANA SOBRE LA DESCOMPOSICIÓN, HUMIFICACIÓN Y MINERALIZACIÓN DE LA MATERIA ORGÁNICA DEL SUELO, POR EJEMPLO, CONDICIONES CLIMÁTICAS FRÍAS Y HÚMEDAS CONTRIBUYEN A UN MAYOR ALMACENAMIENTO DE CARBONO COMPARADO CON LOS CLIMAS CÁLIDOS Y SECOS (Álvarez y Lavado, 1997). AUNQUE LOS INCREMENTOS DE TEMPERATURA TIENDEN A ACELERAR LA DESCOMPOSICIÓN DE LA MATERIA ORGÁNICA, SE HA EVIDENCIADO QUE TAMBIÉN INTERVIENEN EN EL AUMENTO DE LA PRODUCCIÓN PRIMARIA NETA DE PLANTAS GENERANDO MAYORES ENTRADAS DE BIOMASA EN EL SUELO (Deb *et al.*, 2015).

LOS PARÁMETROS MORFOMÉTRICOS PROPIOS DE LA GEOMORFOLOGÍA COMO LA PENDIENTE, LA ORIENTACIÓN Y LA CURVATURA, CONTROLAN LOS FLUJOS DEL AGUA, SU ACUMULACIÓN Y DESCARGA EN EL SUELO. EL TRANSPORTE DEL COS EN PENDIENTES FUERTES POSIBILITA SU REDISTRIBUCIÓN A NUEVOS SITIOS DONDE PERSISTE MÁS TIEMPO (Chenu *et al.*, 2019). LOS ATRIBUTOS LOCALES DEL TERRENO COMO LA LONGITUD, ORIENTACIÓN Y CURVATURA DE LA PENDIENTE INFLUYEN SIGNIFICATIVAMENTE SOBRE EL CONTENIDO DE COS A ESCALA DETALLADA, PERO NO SON IGUAL DE RELEVANTES A ESCALA GENERAL, ES DECIR DE MENOR DETALLE (Gray *et al.*, 2015; Grimm *et al.*, 2008; Wiesmeier *et al.*, 2019).

LAS CARACTERÍSTICAS DEL SUELO COMO LA TEXTURA Y LA MINERALOGÍA INFLUYEN EN LA CAPACIDAD DE ESTE RECURSO PARA ALMACENAR Y MANTENER EL C. PARTÍCULAS FINAS (DIÁMETRO <2µm) PROVEEN MECANISMOS DE PROTECCIÓN QUÍMICA, QUE VARÍAN SEGÚN EL TIPO (ARCILLAS 1:1, 2:1; 2:1:1) (Saggar *et al.*, 1996; Six *et al.*, 2002). ASÍ, MINERALES COMO LA ALÓFANA O LA MONTMORILLONITA PROPORCIONAN MAYOR PROTECCIÓN QUÍMICA QUE LA CAOLINITA (Chenu *et al.*, 2019). LA PROFUNDIDAD DEL SUELO DESEMPEÑA UN ROL IMPORTANTE EN EL ALMACENAMIENTO DE C, YA QUE AL HABER UNA MAYOR PROFUNDIDAD, LOS MECANISMOS COMO LA PROTECCIÓN DE LA MATERIA ORGÁNICA DENTRO DE LOS AGREGADOS DEL SUELO LIMITA LA ACTIVIDAD MICROBIANA (Braakhekke *et al.*, 2011; Fontaine *et al.*, 2007; Lacoste *et al.*, 2014; Rumpel *et al.*, 2012; Yu *et al.*, 2017).

SE HA DEMOSTRADO QUE EL USO, CAMBIO DE USO Y MANEJO DEL SUELO TAMBIÉN PRODUCEN CAMBIOS EN LAS RESERVAS DEL COS. STOCKMANN, *et al.* (2015) IDENTIFICARON LA COBERTURA DEL SUELO COMO UNO DE LOS PRINCIPALES IMPULSORES DEL CAMBIO TEMPORAL DE COS. ACTIVIDADES COMO LA LABRANZA REDUCIDA,

rotación de cultivos y cobertura permanente del suelo, han confirmado ser importantes en suelos tropicales, debido a la disminución de la temperatura del suelo y por lo tanto, menor mineralización del C (Lal, 2004).

El cultivo de caña de azúcar con un manejo de labranza reducida presenta mayores contenidos de COS, comparados con los de un manejo convencional (Montenegro y Chaves, 2011). De Oliveira *et al.*, 2018 destacan la importancia de investigar el efecto de la remoción de material residual de la caña en las existencias de COS y en el grado de humificación de la materia orgánica con el fin de promover el mantenimiento y mejoramiento de las funciones del suelo. Nunes *et al.* (2013) estimaron que la permanencia de residuos en la superficie puede generar aumentos en las reservas de C de 0,66 a 0,81 Mg C ha⁻¹ año⁻¹ durante cuatro años.

3.3. Metodología

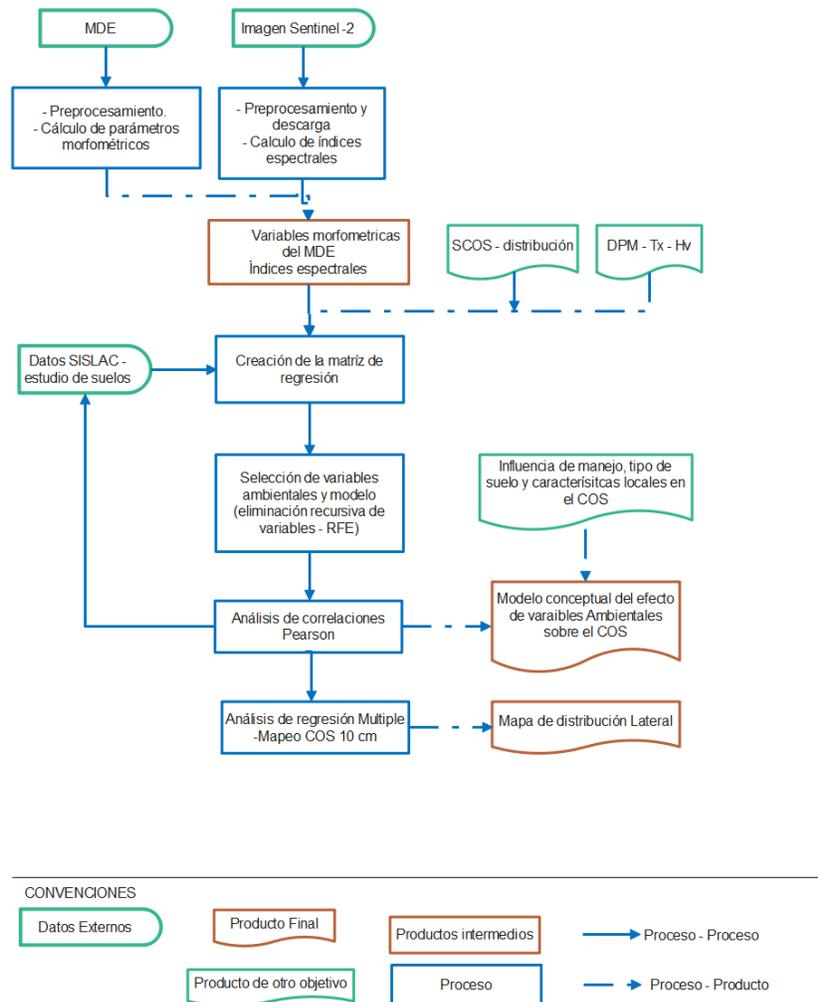
La figura 3-1 muestra los procedimientos establecidos para proponer el modelo conceptual de las covariables ambientales que controlan el COS, usando como insumos imágenes satelitales, modelo digital de elevación y datos heredados del SISLAC que permiten un análisis de los diferentes parámetros a través de métodos de regresión y de correlación para identificar y entender su control sobre el carbono orgánico en el suelo.

3.3.1. Preparación y procesamiento de insumos

Se descargó de la plataforma Google earth engine⁶ una imagen Sentinel 2A de reflectancia en la superficie con resoluciones de 10 y 20 metros en un periodo de tiempo de junio a diciembre de 2020 con corrección de nubosidad. En R se calcularon los índices espectrales (Gholizadeh *et al.*, 2018; Marini y Santamaría, 2019) tal como se describen en el Anexo II. Del MDE se derivaron 20 parámetros morfométricos en SAGA (Ver Anexo III). Los valores de los índices y de los parámetros morfométricos se extrajeron para las coordenadas de los sitios muestreados en campo.

⁶ https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/COPERNICUS_S2_SR

Figura 3-1: Diagrama metodológico - Elaboración del modelo conceptual de covariables del COS



La regresión de theil-sen es un método de regresión no paramétrico que resiste valores atípicos manteniendo la eficiencia estadística. Con esta herramienta se calculó la pendiente general del cambio en el valor de las variables de 0 a 50 cm de profundidad (calculados en el capítulo 2) (Thiel, 1950; Sen 1968), con esta información se organizó una matriz de regresión que contiene las pendientes de las variables descritas, los datos por profundidad de cada variable, los parámetros morfométricos y los índices espectrales para un total de 128 variables y 28 registros.

3.3.2. Selección de covariables y entrenamiento de un modelo

Se utilizó la metodología de eliminación recursiva de variables (Recursive Features Elimination - RFE) del paquete *caret* en R (Khun, 2017), que permite una selección eficiente de covariables y que se analiza a través de la raíz del error cuadrático medio (RMSE por sus siglas en inglés), estas covariables contribuyen a la predicción en el cambio del COS en la profundidad. Con esta información generada de covariables se analizó el rendimiento de diferentes algoritmos de aprendizaje automático, enlistados en los resultados como Random Forest – RF, Máquina de soporte vectorial – SVM, cubista, entre otros. Este procedimiento se repitió manualmente 10 veces y se probó para conjuntos de 10, 20 y 30 covariables con 10, 20 y 30 repeticiones.

Se realizó la partición de los datos en 70% para entrenamiento y 30% para validación del modelo. Se entrenó el modelo y se analizaron los resultados de coeficiente de determinación (R^2) y RMSE utilizando la librería *Hydrogof*, este procedimiento se repitió manualmente 10 veces con el fin de evidenciar un buen rendimiento del modelo escogido para analizar las covariables que influyen en la tasa de cambio del COS en el perfil del suelo.

3.3.3. Distribución lateral

Mediante el uso de los 28 sitios muestreados en el proyecto y el uso de perfiles del SISLAC y el estudio de suelos del IGAC, 2019 se logró obtener un total de 65 sitios para el stock de carbono orgánico en los 10 cm superficiales del suelo, se usó como insumos los datos de SCOS de cada perfil en los 10 cm superficiales y se tomaron las covariables de mayor importancia reportados por la eliminación recursiva de variables y el análisis de Pearson. Los datos raster de morfometría e índices de vegetación se llevaron a una misma resolución y en SAGA se utilizó el análisis de regresión lineal múltiple para estimar el stock de carbono en el área de estudio.

3.3.4. Aproximación a un modelo conceptual de las covariables ambientales sobre el COS

Con la literatura encontrada en las bases de datos, los hallazgos en el capítulo 2, los resultados obtenidos por el RFE y el entrenamiento del modelo como refuerzo, se elaboró el modelo conceptual que explica la interacción de covariables ambientales en el paisaje de caña panelera que influyen en las existencias del COS.

3.4. Resultados y discusión

3.4.1. Selección de covariables y entrenamiento de un modelo

Al realizar el RFE se evidenció que entre las covariables morfométricas, las resaltadas en el grupo de 25 covariables más importantes correspondió a la elevación y a la red de canales, tal como lo describieron Malone y colaboradores. (2009). La eliminación recursiva de variables (RFE) determinó entre las 30 variables importantes algunos índices espectrales como SAVI, GNDVI y GCI. Según Gholizadeh *et al.* (2019), GNDVI guarda una fuerte correlación con el COS y SAVI presenta alta correlación con la arcilla. Sin embargo, al probar los modelos con estos atributos su rendimiento disminuía abruptamente, por lo que se excluyeron del análisis en el modelo determinado.

Como se observa en la figura 3-2 con un total de 30 variables escogidas por el método de RFE se logra alcanzar un valor de RMSE inferior a 0,16. En general las variables más comunes en este conjunto son porcentaje de arcilla en todas las profundidades, la tasa de cambio del contenido de humedad, el DPM y DGM de las profundidades 2 y 3, los microagregados en la profundidad 1 y 3 y otras variables que se visualizan en la tabla 3-1. Estas variables posteriormente fueron seleccionadas a criterio del autor, según los hallazgos en pruebas pasadas y las correlaciones establecidas con el COS. Se encontró que en la mayoría de veces que se ejecutaba la herramienta RFE el Modelo Random Forest presentaba el R^2 más alto (0,73) y el RMSE (0,145) más bajo a comparación de los otros modelos analizados, en segundo lugar se encontraba la máquina de soporte vectorial, $R^2=0,67$, RMSE= 0,148.

Figura 3-2: Resultado de la eliminación recursiva de variables

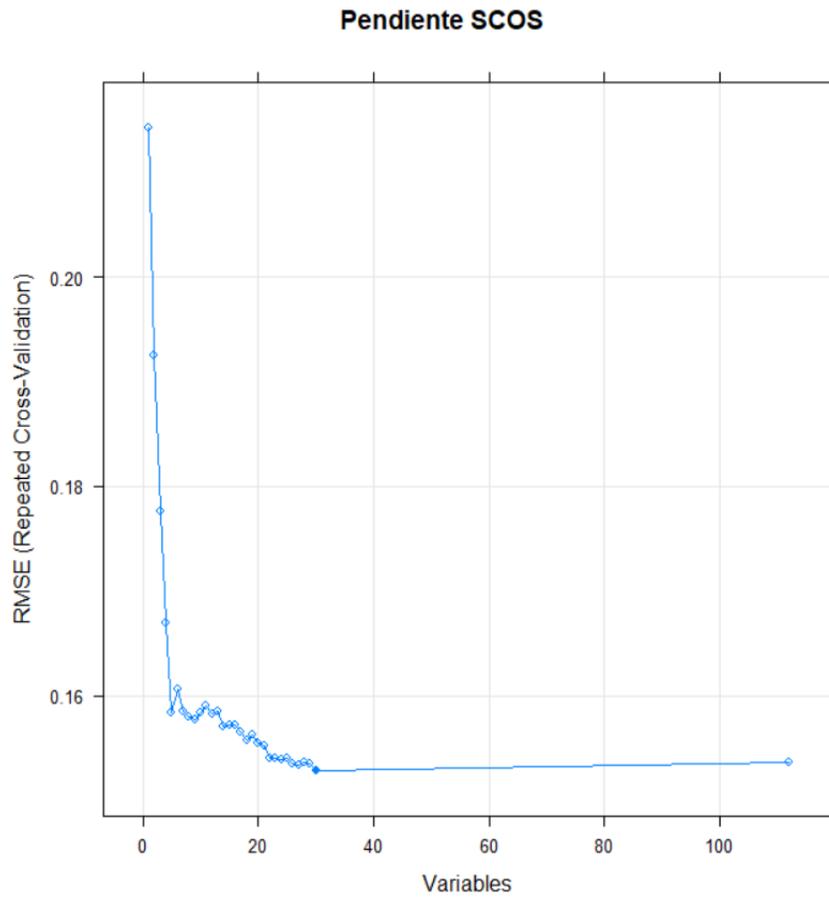


Tabla 3-1: Nivel de importancia de las covariables analizadas usando el Modelo Random Forest.

Variable	Imp	Variable	Imp	Variable	Imp
1. Arcilla 20-30 cm	0,168	7. AE 0,25 mm 10-20 cm	0.058	13. AE 0,25 mm 20-30 cm	0.025
2. Delta Humedad	0,115	8. DPM 10-20 cm	0.053	14. DGM 20-30 cm	0.011
3. Arcilla 10-20 cm	0,105	9. Arcilla 30-40 cm	0.051	15. microagregados 0-10 cm	0.018
4. Red de canales	0,083	10. AE 4 mm 20-30 cm	0.051		
5. Arcilla 0-10 cm	0.066	11. AE 0,5 mm 30-40 cm	0.048		
6. Elevación	0.060	12. Arcilla 40-50 cm	0.030		

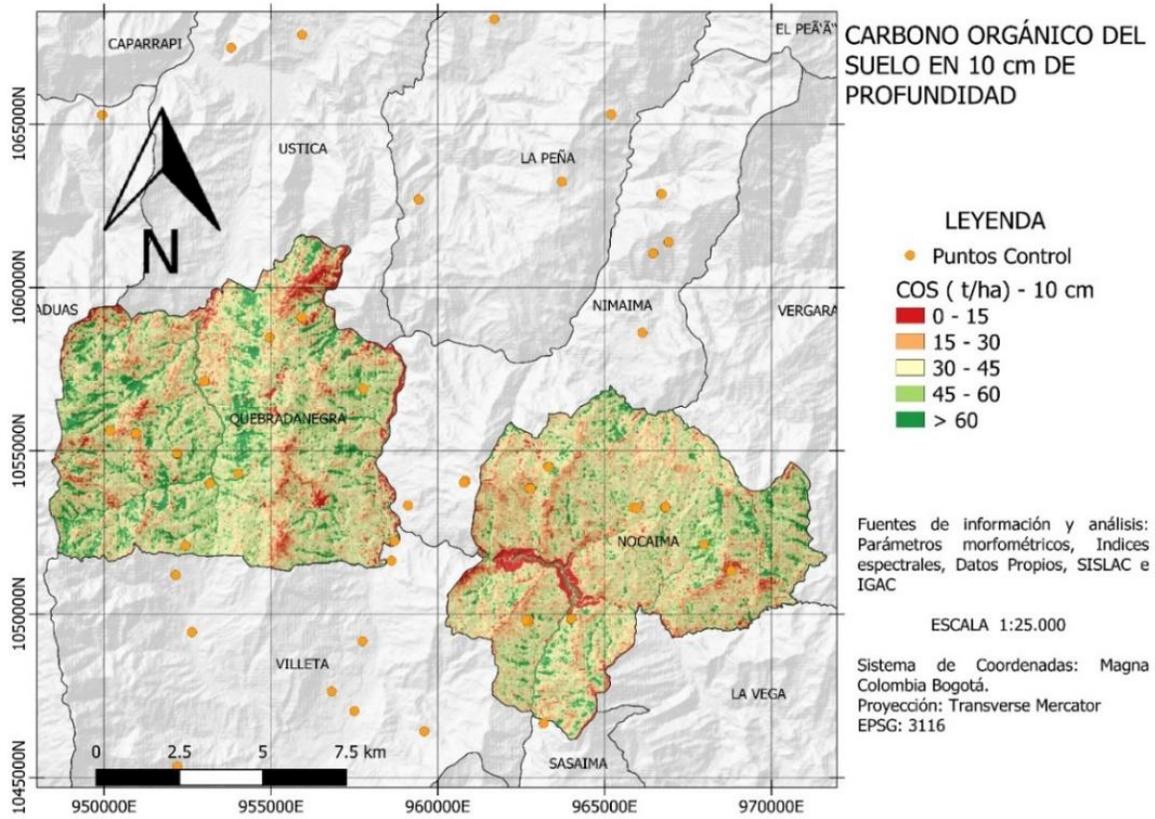
AE. Agregados estables. DPM: Diámetro ponderado Medio. DGM. Diámetro geométrico medio

Posteriormente al entrenar y validar el modelo Random Forest con 20 registros y 15 covariables demostró un rendimiento en la validación de $R^2=0,69$ y un $RMSE=0,17$ explicando el 44% de la variabilidad de los datos. Tal como lo describen Ellili *et al.* (2019) que aplicaron un modelo de Random Forest usando también como covariables 15 atributos (considerando las propiedades inherentes del suelo y los derivados del MDE) para demostrar el cambio de SCOS en el Noroccidente de Francia a escala de paisaje. En dicha investigación encontraron que las propiedades inherentes del suelo fueron importantes para hacer las predicciones. Carvalho *et al.* (2019) determinaron que el algoritmo Random Forest también tuvo buen rendimiento en la predicción de COS en territorio brasileño con $R^2=0,33$ para los datos de validación, entre esto encontraron que las covariables más importantes fueron el tipo de suelo, la precipitación, la temperatura y el índice de vegetación NDVI. Castro *et al.*, (2017) encontraron a partir del análisis de RF que la elevación fue una de las covariables más importantes derivadas del MDE para determinar MO, también encontraron la profundidad del valle el índice de convergencia, el LS Factor, el índice topográfico de humedad y el flujo acumulado.

3.4.2. Distribución lateral del stock de carbono orgánico del suelo en 10 cm de profundidad

En la figura 3-3 se observa el mapa de distribución lateral del stock de carbono orgánico del suelo en la capa superficial de 0-10 cm de profundidad que se logró a partir de la regresión lineal múltiple con un error cuadrático medio – $RMSE$ de $6,16 \text{ Mg ha}^{-1}$. Como se puede ver, el municipio de Quebradanegra presenta mayores contenidos de COS con respecto a Nocaima, resaltando la importancia de los suelos y de familias texturales presentes en estos sitios.

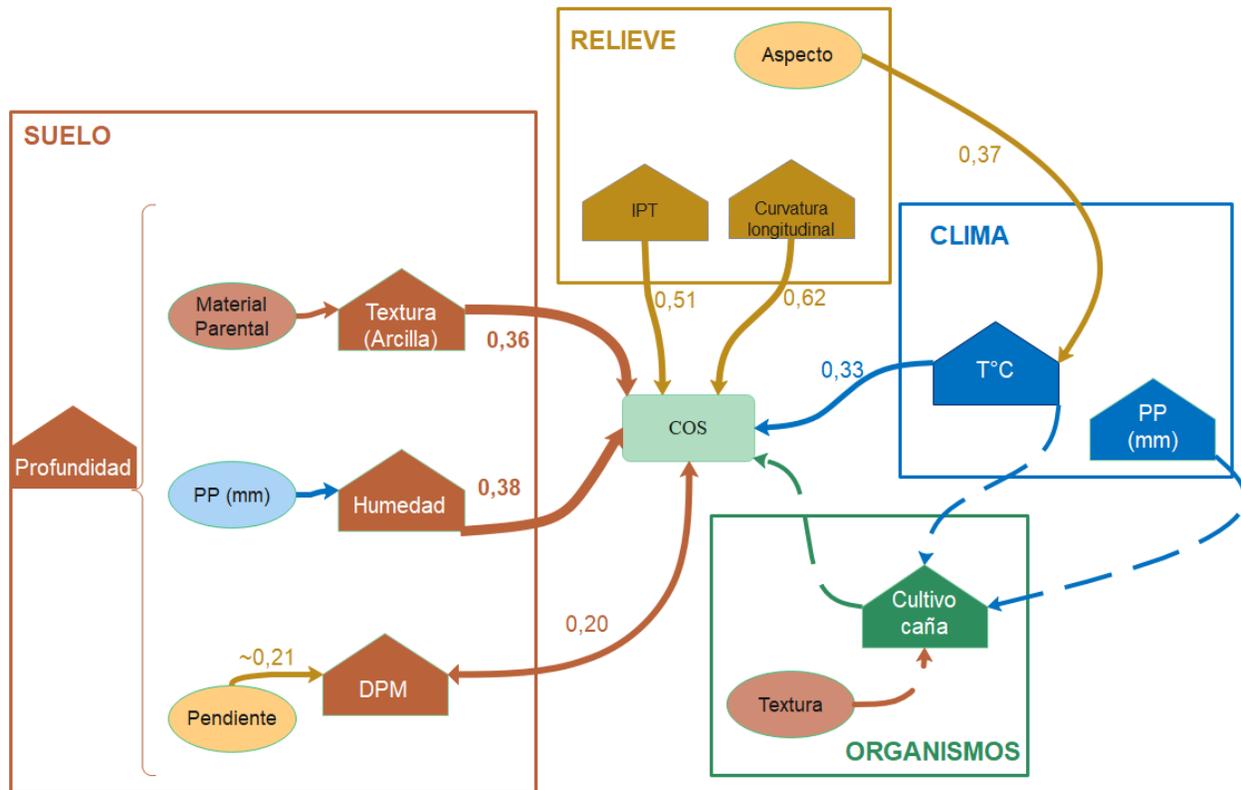
Figura 3-3: Distribución lateral del stock de carbono orgánico del suelo



3.4.3. Modelo conceptual de las covariables ambientales que influyen en el COS

Se estructuró un modelo conceptual que facilita visualizar la influencia de las variables caracterizadas localmente sobre el carbono orgánico del suelo, así como se muestra en la figura 3-4.

Figura 3-4: Modelo conceptual de covariables ambientales sobre el stock de COS



En Cuadro rojo se discriminan las variables intrínsecas del suelo, en el cuadro amarillo se encuentran las covariables morfométricas o referentes al relieve. En el cuadro azul, se evidencian las variables referentes al clima. En color verde se observan las variables o factores que corresponden al manejo. Las líneas discontinuas indican una relación no cuantificada. Las líneas continuas indican la importancia de la relación y el valor r de la correlación de spearman.

El cultivo de caña de azúcar para panela en los sistemas de corte por entresaque y parejo sin renovación predominan en la zona de estudio, bajo estos sistemas se mantiene la cobertura de residuos sobre el suelo, así como se evita la remoción de suelo, lo que beneficia la permanencia de material orgánico en los horizontes. El material vegetal proveniente de la caña se caracteriza por tener un bajo contenido de nitrógeno y se encuentra constituido por compuestos ricos en carbono como la celulosa, la lignina y los polifenoles (García *et al.*, 2007; Santos *et al.*, 2017). Lo anterior presenta una relación elevada de C:N que beneficia la existencia y actividad de hongos en el suelo (Zhang *et al.*, 2016). Según Verbruggen *et al.* (2016), en las condiciones donde domina la existencia de hongos aumenta las asociaciones con las raíces de las plantas, si bien, aumenta la mineralización de la biomasa a corto plazo, se favorece la agregación del suelo y la estabilización de la materia orgánica. Es posible que el

carbono analizado en este estudio corresponde a las existencias lábiles, y se esté generando una subestimación del stock de carbono orgánico del suelo, debido a que en estas condiciones con este cultivo es posible presentar carbono recalcitrante que no ha sido analizado, así como lo declara Geissen *et al.* (2009) sería necesario más estudios que prueben si hay diferencias en la calidad de materia orgánica en este cultivo.

El cultivo se distribuye principalmente en clima templado húmedo con precipitaciones anuales de 1700 mm, lo que contribuye a mayor humedad en el suelo, beneficiando el adecuado desarrollo y rendimiento de la planta y disminuyendo la tasa de mineralización de materia orgánica (Meier y Leuschner, 2010). Los cultivos muestreados se encuentran en temperaturas que oscilan entre 19,8 y 23,5 °C presentando una correlación positiva con el contenido de COS, tal como lo expresaron (Xiong *et al.*, 2014) en su investigación y contrario a lo que demostraba (Mishra y Francaviglia, 2021), de todas formas aunque lo normal es encontrar un relación inversa, los rangos de temperatura encontrados no afectan negativamente la acumulación de COS (Kämpf *et al.*, 2016).

Según Pretty y Ball, (2001) el potencial del suelo en la captura de C es mayor en zonas templadas húmedas comparadas con zonas tropicales húmedas y semiáridas. Stockmann *et al.*, (2015) identificó que en cultivos que manejan cobertura del suelo en zonas de clima templado húmedo existe un potencial de captura de carbono entre 0,2 y 0,5 tC ha*año⁻¹ mientras que en un clima tropical húmedo la tasa de captura está entre 0,1 y 0,2 tC ha*año⁻¹.

Los municipios se localizan sobre un relieve complejo con diferentes altitudes y pendientes dominantes de 25 a 50%, este tipo de relieve de alta complejidad entre espinazos y lomas influye la heterogeneidad del stock de COS. En esta investigación no se evidenció una fuerte correlación entre COS y pendiente ($r = -0,09$), lo que responde a que la mayoría de los cultivos se encontraban en relieves ondulados.

Algunos estudios citados por Zhu *et al.*, (2019) en el Mediterráneo o en Irán han demostrado que los contenidos de COS son mayores en orientación de la pendiente hacia el Norte, sin embargo, otros estudios realizados en zonas cercanas al Ecuador como Yimer, Ledin, & Abdelkadir, (2006) en Etiopia o Sigua & Coleman, (2010) en La Florida demostraron que el COS fue mayor en pendientes que se orientan al sur con un microclima frío y húmedo. Leiva, (2012), desarrolló un estudio en el cual encontró que la orientación de la pendiente hacia el suroeste

era menos vulnerable que la orientación noreste a las épocas de sequía, lo que generaba menor disminución de humedad en el suelo y por consiguiente menor efecto en el COS. En este estudio se encontró que el aspecto dominante en los cultivos de caña es Noreste con un 21,4%, de acuerdo con lo encontrado en la literatura la orientación NE puede influir en la disminución del COS, sin embargo, este efecto debe ser demostrado en posteriores análisis. Se indica que esta es una covariable indirecta del COS, ya que se relaciona positivamente con la temperatura $r=0,37$.

De acuerdo con la literatura encontrada, en zonas de pendientes pronunciadas (mayor a 35%), no se espera un efecto significativo de las curvaturas en el stock de COS. Sin embargo, en áreas con gradiente de pendientes inferior al 35% con curvatura vertical o de perfil convexa se espera un flujo acelerado de agua y materiales, entre estos COS, a zonas de inferior altura, mientras que la curvatura horizontal cóncava influye positivamente en la divergencia de flujos y la acumulación de materiales en partes perpendiculares de la pendiente, esto genera una redistribución del material orgánico que se ha perdido en zonas superiores y que posiblemente sean enterrados por la llegada de nuevos materiales (Fissore *et al.*, 2017; R. Lal, 2004; Leiva Gutiérrez, 2012). En esta investigación, se observó que la curvatura longitudinal presenta una correlación positiva con el COS, principalmente en los horizontes profundos, de, 40-50 cm (0,73), 30-40 cm (0,68), 20-30 cm (0,56).

En los municipios el material parental se constituye principalmente de rocas sedimentarias clásticas limoarcillosas como las lutitas, lodolitas y sales calcareos, de estas rocas se derivan minerales secundarios como Illita, Montmorillonita y Caolinita. De acuerdo con el IGAC, 2019, la mayoría de las unidades productivas se encuentran sobre minerales semi activos o activos (Illita o la montmorillonita). La fracción arcillosa de suelos Molisoles presentaron mayores correlaciones con COS que en Inceptisoles, lo que representa también mayores correlaciones con los índices de agregación o macroagregados, al ser la arcilla uno de los componentes importantes en la agregación del suelo.

La clase de suelo demostró ser importante en la distribución del COS, presentándose mayores existencias en Molisoles comparados con Inceptisoles, tal como lo explica Carvalho *et al.* (2019), esto en respuesta a la asociación del COS con la textura y estructura en cada suelo. Gholizadeh *et al.* (2018) encontraron una extensa gama de arcilla relacionada con la alta

variabilidad del material parental en su región de estudio y observaron grandes diferencias al observar el contenido de arcilla en función del tipo de suelo.

Es importante denotar que existen interacciones entre las covariables que afectan en la acumulación o pérdida de COS, estudios como el de Xiong *et al* (2014) rebelaron que uso en sí no representa cambios significativos en las existencias del COS, pero al ser considerado con factores climáticos si se observa que pueden explicar el 46% de su variabilidad.

No existe correlación en el primer horizonte entre el COS y los macroagregados grandes ni pequeños, pero si existe una correlación positiva ($r=0,34$) con microagregados. A medida que aumenta la profundidad la correlación con microagregados disminuye, y alcanza valor negativo de ($r=-0,46$) a los 50 cm, mientras que la correlación con macroagregados pequeños de 1mm aumenta significativamente (0,65) y con macroagregados grandes de 4 mm aumenta también en menor medida ($r=0,39$). Así mismo la correlación con el DGM y el DPM aumentan en la profundidad con el COS, alcanzando valores de 0,46 y 0,47 respectivamente.

Este cambio en la relación entre el COS y los agregados estables es visible en suelos Humudepts, que presentan altas correlaciones en horizonte superficial con microagregados y disminuye hasta alcanzar correlaciones negativas de ($r=-0,60$), lo que evidencia posiblemente un empobrecimiento de carbono lábil en microagregados. A la profundidad de 50 cm se observa una alta correlación entre el carbono y macroagregados pequeños de 1 mm ($r=0,75$) y otros macroagregados. Este mismo cambio se observa en suelos Hapludolls que inicia con una correlación positiva con microagregados ($r=0,53$), los cuales también tienen alta correlación con el contenido de arcilla ($r=0,60$), y finaliza con una correlación negativa ($r=-0,22$), así como con los macroagregados pequeños de 0,25 mm ($r=-0,69$).

El comportamiento del COS en Calcudoll no indica correlación con microagregados en el primer horizonte, pero existe una alta correlación en la profundidad de 30 a 40 cm así como con macroagregados pequeños de 0,25 mm y 0,50 mm ($r=0,90$, $r=0,87$, $r=0,88$ respectivamente), finalmente a los 50 cm, no se observa correlación con microagregados pero sigue siendo alta con macroagregados pequeños.

3.5. Conclusiones

El modelo Random Forest demostró un alto desempeño para la cantidad de datos analizados y las variables de entrada sin presentar sobreajuste, y sirvió como apoyo para la conceptualización del modelo de covariables ambientales.

Se evidencio la importancia de la profundidad como covariable ambiental que influye en las existencias de COS, a medida que aumenta la profundidad se observa el efecto de variables intrínsecas del suelo y su importancia específica en cada horizonte.

El contenido de arcilla y la humedad del suelo resultaron ser las covariables más significativas que explican el COS en la zona de estudio.

Las características específicas de cada sitio influyen en las existencias del carbono orgánico del suelo. Se puede observar que en el municipio de Quebradanegra las existencias de carbono son mayores en suelos calciudoll o que presentan carbonato de calcio, lo que demuestra la importancia que puede generar esta especie química en la protección del COS. De igual forma se observa la importancia de la mineralogía en la captura de carbono, ya que en algunos casos donde se presentan suelos arcillosos, e incluso relieves planos como NcF4 o NcF6 las existencias de C son inferiores a $75\text{tC}\cdot\text{ha}^{-1}$.

Referencias

- Abaunza, C. A., Forero, C. A., García, G. O., y Carvajal, G. H. (2012). *Zonificación y organización de clúster empresariales para las cadenas de caña panelera, frutales y papa criolla en Cundinamarca*. 116.
- Aguiar, S. B. (2001). *Bases técnicas para el establecimiento y manejo del cultivo de caña en el departamento de Casanare*.
- Aguilar-Rivera, N., Rodríguez L, D. A., R.V., E., Castillo M, S. A., y Herrera, A. (2012). *The Mexican Sugarcane Industry : Overview , Constraints , Current Status and Long-Term Trends*. 14(September), 207–222. <https://doi.org/10.1007/s12355-012-0151-3>
- Aguirre, N. (2018). *Paisaje Agropecuario: incorporación en la planificación territorial*.
- Ahammad, H., Clark, H., Dong, H., Elsididng, E., Haberl, H., Harper, R., House, J., Jafari, M., Maser, O., Mbow, C., Ravindranath, N., Rice, C., Robledo, C., Romanovskaya, A., Sperling, F., y Tubiello, F. (2014). Agriculture, Forestry and Other Land Use (AFOLU). In *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 811–922).
- Álvarez, R., y Lavado, R. S. (1997). *Climate, organic matter and clay content relationships in the Pampa and Chaco soils, Argentina* (p. Geoderma).
- Anderson, N. M., Ford, R. M., y Williams, K. J. H. (2017). Contested beliefs about land-use are associated with divergent representations of a rural landscape as place. *Landscape and Urban Planning*, 157, 75–89. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2016.05.020>
- Baquero, J., Ralish, R., de Conti, C., y Guimaraes, M. de F. (2012). Soil Physical Properties and Sugarcane root growth in a red oxisol. *Revista Brasileira de La Ciencia Del Suelo*, 1, 63–70.
- Baral, H., Keenan, R. J., Fox, J. C., Stork, N. E., y Kasel, S. (2013). Spatial assessment of ecosystem goods and services in complex production landscapes: A case study from south-eastern Australia. *Ecological Complexity*, 13, 35–45. <https://doi.org/10.1016/j.ecocom.2012.11.001>
- Besoain, E. (1985). *Mineralogía de arcillas de suelos*.
- Bishop, T. F. A., McBratney, A. B., y Laslett, G. M. (1999). Modelling soil attribute depth functions with equal-area quadratic smoothing splines. *Geoderma*, 27–45.
- Blum, W. E. H. (2005). *Functions of soil for society and the environment*. 4, 75–79.

<https://doi.org/10.1007/s11157-005-2236-x>

- Bolivar, A., Camacho, C., Ordoñez, N., Gutierrez, J., Alvarez, G., Guevara, M., Olivera, C., Olmedo, G., Bunning, S., y Vargas, R. (2021). aet. *Ecosistemas*, 30(1), 1–11.
- Bone, J., Head, M., Barraclough, D., Archer, M., Voulvoulis, N., and Scheib, C. (2010). Soil Quality Assessment under Emerging Regulatory Requirements. *Environment International*, 36, 609–622.
- Braakhekke, M. C., Beer, C., Hoosbeek, M. R., Reichstein, M., Kruijt, B., Schrumph, M., and Kabat, P. (2011). Somprof: A vertically explicit soil organic matter model. *Ecological Modelling*, 222(10), 1712–1730. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2011.02.015>
- Bronick, C. J., y Lal, R. (2004). *Soil structure and management: a review*. 124(2005), 3–22. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.03.005>
- Carvalho, L., Moniz, R., De Souza, E., Vieira, G., G R Schaefer, C. E., and Fernandes Filho, E. I. (2019). Modelling and mapping soil organic carbon stocks in Brazil. *Geoderma*, 340(December 2017), 337–350. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.01.007>
- Castillo, J., Navia, J., y Menjivar, J. (2008). Estimación de la estabilidad estructural de dos suelos al sur de Colombia con diferentes tipos de manejo. *Acta Agronómica*, 31–34.
- Castillo Poveda, M. (2016). Contextualización histórica del concepto de paisaje, sus implicaciones filosóficas y científicas. *Revista de Filosofía de La Universidad de Costa Rica*, 55(143), 11–24.
- Cerri, C. C., Galdos, M. V. ., Maia, S. M. ., Bernoux, M., Feigl, B. . J. ., Powlsonc, D., y Cerri, C. E. P. (2011). *Effect of sugarcane harvesting systems on soil carbon stocks in Brazil : an examination of existing data*. February, 23–28. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2010.01315.x>
- Chenu, C., Angers, D. A., Barré, P., Derrien, D., Arrouays, D., y Balesdent, J. (2019). Increasing organic stocks in agricultural soils: Knowledge gaps and potential innovations. *Soil and Tillage Research*, 188(April 2018), 41–52. <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.04.011>
- Cherubin, M. R., Franco, A. L. C., Cerri, C. E. P., Oliveira, D. M. da S., Davies, C. A., y Cerri, C. C. (2015). Sugarcane expansion in Brazilian tropical soils-Effects of land use change on soil chemical attributes. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 211(2015), 173–184. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2015.06.006>
- de Carvalho, W., da Silva, C., Muselli, A., Koenow, H., Rendeiro, N., y Barge, S. (2014). MÉTODO DO HIPERCUBO LATINO CONDICIONADO PARA A AMOSTRAGEM DE SOLOS NA PRESENÇA DE COVARIÁVEIS AMBIENTAIS VISANDO O. *Revista Brasileira de Ciencia Do Solo*, 38(June), 386–396. <https://doi.org/10.1590/S0100->

06832014000200003

- de Oliveira, R., Lal, R., Ronquim, C. C., Barretto, E., Nunes, J. L., Maldonado, W., Bastos, D., y La Scala, N. (2017). Changes in quantity and quality of soil carbon due to the land-use conversion to sugarcane (*Saccharum officinarum*) plantation in southern Brazil. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 240, 54–65. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.02.016>
- de Oliveira, R., Santos, L. M., Carneiro, L., Lal, R., Pereira, D. M., Kolln, O. T., Junqueira, H. C., y Nunes Carvalho, J. L. (2018). Sugarcane yield and soil carbon response to straw removal in south-central Brazil. *Geoderma*, 328(March), 79–90. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.05.003>
- Deb, S., Mandal, B., Bhadoria, P. B. S., Singh, H. B., y Rakshit, A. (2015). Soil organic carbon: Towards better soil health, productivity and climate change mitigation. *Climate Change and Environmental Sustainability*, 3(1), 26. <https://doi.org/10.5958/2320-642x.2015.00003.4>
- Ellili, Y., Walter, C., Michot, D., Pichelin, P., y Lemercier, B. (2019). Mapping soil organic carbon stock change by soil monitoring and digital soil mapping at the landscape scale *Geoderma* Mapping soil organic carbon stock change by soil monitoring and digital soil mapping at the landscape scale. *Geoderma*, 351(May), 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.03.005>
- Estrada, N., Hart, A. K., DeClerck, F. A. J., Harvey, C. A., y Milder, J. C. (2014). Integrated landscape management for agriculture, rural livelihoods, and ecosystem conservation: An assessment of experience from Latin America and the Caribbean. *Landscape and Urban Planning*, 129, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2014.05.001>
- Etter, A. (1991). *INTRODUCCIÓN A LA ECOLOGÍA DEL PAISAJE: Un Marco de Integración para los Levantamientos Ecológicos* (Issue October 1991). <https://doi.org/10.13140/2.1.4464.5121>
- FAO. (2002). *Captura de carbono en los suelos para un mejor manejo de la tierra*.
- FAO. (2014). *World reference base for soil resources 2014 international soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps*.
- FAO. (2017a). *Carbono Organico del suelo potencial oculto*.
- FAO. (2017b). *Liberación del potencial del carbono orgánico del suelo - Documento de resultados*. <http://www.fao.org/3/b-i7268s.pdf%0Awww.fao.org/publications>
- Fernández-christlieb, F. (2010). *El nacimiento del concepto de paisaje y su contraste en dos ámbitos culturales: el viejo y el nuevo mundo* (pp. 55–79).
- Fernández, L., González, M., y Sáez Sáez, V. (2016). Relación entre un índice de estabilidad estructural de suelo, la zona bioclimática y la posición fisiográfica en Venezuela. *Terra*

Nueva Etapa.

- Fissore, C., Dalzell, B. J., Berhe, A. A., Voegtli, M., Evans, M., y Wu, A. (2017). Influence of topography on soil organic carbon dynamics in a Southern California grassland. *Catena*, 149, 140–149. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.09.016>
- Fontaine, S., Barot, S., Barre, P., Bdioui, N., Mary, B., y Rumpel, C. (2007). Stability of organic carbon in deep soil layers controlled by fresh carbon supply. *Nature*, 450(December). <https://doi.org/10.1038/nature06275>
- Fries, A., Rollenbeck, R., Nauß, T., Peters, T., y Bendix, J. (2012). Agricultural and Forest Meteorology Near surface air humidity in a megadiverse Andean mountain ecosystem of southern Ecuador and its regionalization. *Agricultural and Forest Meteorology*, 152, 17–30. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2011.08.004>
- García-Meléndez, E. (2007). *Módulo VII : Sistemas de Información Geográfica y Teledetección, análisis visual de imágenes.*
- García, H., L, A., Toscano LaTorre, A., Santana, N., y Insuasty, O. (2007). Guía tecnológica para el manejo integral del sistema productivo de la caña panelera. In *Republica de Colombia* (Vol. 53, Issue 9). <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Geissen, V., Sánchez-hernández, R., Kampichler, C., Ramos-reyes, R., y Sepulveda-lozada, A. (2009). Geoderma Effects of land-use change on some properties of tropical soils — An example from Southeast Mexico. *Geoderma*, 151(3–4), 87–97. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.03.011>
- Gholizadeh, A., Zizala, D., Saberioon, M., y Boruvka, L. (2018). Soil Organic Carbon and Texture Retrieving and Mapping using Proximal , Airborne and Sentinel-2 Spectral Imaging. *Remote Sensing of Environment*, December. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.09.015>
- Gómez, E., y Miranda, J. (2009). Manejo agronómico de la caña panelera con énfasis en el control biológico. *Fondo Nacional de La Panela*, 32. http://www.fedepanela.org.co/publicaciones/cartillas/manejo_agronomico_de_la_cana_panelera.pdf
- Gougoulias, C., Clark, J. M., y Shaw, L. J. (2014). The role of soil microbes in the global carbon cycle: Tracking the below-ground microbial processing of plant-derived carbon for manipulating carbon dynamics in agricultural systems. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 94(12), 2362–2371. <https://doi.org/10.1002/jsfa.6577>
- Gray, J. M., Bishop, T. F. A., y Wilson, B. R. (2015). Factors Controlling Soil Organic Carbon Stocks with Depth in Eastern Australia. *Soil Science Society of America Journal*, 79(6), 1741. <https://doi.org/10.2136/sssaj2015.06.0224>

- Grimm, R., Behrens, T., Märker, M., y Elsenbeer, H. (2008). Soil organic carbon concentrations and stocks on Barro Colorado Island - Digital soil mapping using Random Forests analysis. *Geoderma*, 146(1–2), 102–113. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2008.05.008>
- IDEAM. (2016). *Inventario nacional y departamental de gases de efecto invernadero - Colombia*.
- IGAC. (2000). *Estudio general de suelos y zonificación de tierras del departamento de Cundinamarca*.
- IGAC. (2018). *Sistema de clasificación geomorfológica aplicado a los levantamientos de suelos*.
- IGAC. (2019). Estudio de Suelos a escala 1:25.000 para el plan de ordenación y manejo de la cuenca. In *Estudio de Suelos a escala 1:25.000 para el plan de ordenación y manejo de la cuenca. Tomo 2* (Vol. 53, Issue 9, pp. 1689–1699). <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Jha, P., Garg, N., Lakaria, B. L., Biswas, A. K., y Rao, A. S. (2012). Soil and residue carbon mineralization as affected by soil aggregate size. *Soil and Tillage Research*, 121, 57–62. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.still.2012.01.018>
- Jordan, N., y Warner, K. D. (2010). Enhancing the Multifunctionality of US Agriculture. *BioScience*, 60(January), 60–66. <https://doi.org/10.1525/bio.2009.60.1.10>
- Kämpf, I., Hölzel, N., Störrle, M., Broll, G., y Kiehl, K. (2016). Potential of temperate agricultural soils for carbon sequestration: A meta-analysis of land-use effects. *Science of the Total Environment*, 566–567, 428–435. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.05.067>
- Kassambara, A. (2017). *Practical Guide to Principal Component Methods in R*.
- Keesstra, S. D., Bouma, J., Wallinga, J., Tittonell, P., Smith, P., Cerdà, A., Montanarella, L., Quinton, J. N., Pachepsky, Y., Van Der Putten, W. H., Bardgett, R. D., Moolenaar, S., Mol, G., Jansen, B., y Fresco, L. O. (2016). The significance of soils and soil science towards realization of the United Nations sustainable development goals. *Soil*, 2(2), 111–128. <https://doi.org/10.5194/soil-2-111-2016>
- Kumar, A., y Singh, P. (2021). *Sugar and Sugar Derivatives : Changing Consumer Preferences. April*. <https://doi.org/10.1007/978-981-15-6663-9>
- Lacoste, M., Minasny, B., McBratney, A., Michot, D., Viaud, V., y Walter, C. (2014). High resolution 3D mapping of soil organic carbon in a heterogeneous agricultural landscape. *Geoderma*, 213(January 2014), 296–311. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.07.002>
- Lal, R. (2004). *World cropland soils as a source or sink for atmospheric carbon*. 71, 145–191. [https://doi.org/10.1016/s0065-2113\(01\)71014-0](https://doi.org/10.1016/s0065-2113(01)71014-0)
- Lal, R. (2004). *Soil Carbon Sequestration Impacts on Global Climate Change and Food Security*. 304(June), 1623–1627.

- Lal, Rattan. (2009). Soil Science. *European Journal of Soil Science*, April, 158–169.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2008.01114.x>
- Lal, Rattan. (2016). *Soil health and carbon management*. 1. <https://doi.org/10.1002/fes3.96>
- Lal, Rattan, Follett, R. F., Kimble, J., y V, C. C. (1999). Managing U.S. cropland to sequester carbon in soil. *Soil and Water Conservation*.
- Leiva Gutiérrez, N. (2012). *Metodología para el cálculo de la humedad del suelo usando parámetros topográficos(MDE), climáticos y edáficos en un sector del piedemonte depositacional del municipio de Villavicencio*. 145.
<http://www.bdigital.unal.edu.co/8910/1/795068.2012.pdf>
- Lisboa, I. P., Cherubin, M. R., Satiro, L. S., Siqueira-Neto, M., Lima, R. P., Gmach, M. R., Wienhold, B. J., Schmer, M. R., Jin, V. L., Cerri, C. C., y Cerri, C. E. P. (2019). Applying Soil Management Assessment Framework (SMAF) on short-term sugarcane straw removal in Brazil. *Industrial Crops and Products*, 129(June 2018), 175–184.
<https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.12.004>
- Lobo, D., y Pulido, M. (2006). Métodos e índices para evaluar la estabilidad estructural de los suelos Methods and index for evaluating soil structure stability. *Venezuelos*, 14, 22–37.
- Lorenz, K., Lal, R., y Ehlers, K. (2019). Soil organic carbon stock as an indicator for monitoring land and soil degradation in relation to United Nations ' Sustainable Development Goals. *Land Degrad Dev*, December 2017, 824–838. <https://doi.org/10.1002/ldr.3270>
- Lovell, S. T., DeSantis, S., Nathan, C. A., Olson, M. B., Ernesto Méndez, V., Kominami, H. C., Erickson, D. L., Morris, K. S., y Morris, W. B. (2010). Integrating agroecology and landscape multifunctionality in Vermont: An evolving framework to evaluate the design of agroecosystems. *Agricultural Systems*, 103(5), 327–341.
<https://doi.org/10.1016/j.agsy.2010.03.003>
- Lovell, S. T., y Johnston, D. M. (2009). *Creating multifunctional landscapes : how can the field of ecology inform the design of the landscape ? May 2009*. <https://doi.org/10.1890/070178>
- Luengo, A. (2013). Los paisajes agrícolas del Patrimonio Mundial. *Patrimonio Mundial*, 69, 9–15.
- Ma, S., Karkee, M., y Zhang, Q. (2013). *Sugarcane Harvesting System : a Critical Overview Sugarcane Harvesting System : a Critical Overview*. July.
<https://doi.org/10.13031/aim.20131574361>
- Machado, F., Lima, E., Bacis, M., Urquiaga, S., Alves, B., y Moddey, R. (2010). Impact of pre-harvest burning versus trash conservation on soil carbon and nitrogen stocks on a sugarcane plantation in the Brazilian Atlantic forest region. *Plant Soil*, 333(February), 71–

80. <https://doi.org/10.1007/s11104-010-0320-7>
- Malone, B. P., Mcbratney, A. B., Minasny, B., y Laslett, G. M. (2009). Mapping continuous depth functions of soil carbon storage and available water capacity. *Geoderma*, 154(1–2), 138–152. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.10.007>
- Marini, F., y Santamaría, M. (2019). Evaluación de índices verdes convencionales e índices del “borde rojo” en la discriminación de cultivos a nivel regional. *Nadir: Rev. Elect. Geogr. Austral.*
- Martínez Ardila, N. J., López Salgado, H. J., Samacá Torres, W., Vargas Tejedor, S. S., y Vargas Hernández, W. F. (2017). Tecnologías de la información para la consolidación ambiental y productiva del territorio. *Análisis Geográficos*, 53, 17–24.
- Martínez, E., Fuentes, J. P., y Acevedo, E. (2008). *CARBONO ORGÁNICO Y PROPIEDADES DEL SUELO*. 68–96.
- Meersmans, J., Wesemael, B. Van, Ridder, F. De, Geel, T. M., y Baets, S. De. (2009). *Spatial analysis of soil organic carbon evolution in Belgian croplands and grasslands , 1960 – 2006. July 2019.* <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2009.01855.x>
- Meier, I. C., y Leuschner, C. (2010). Variation of soil and biomass carbon pools in beech forests across a precipitation gradient. *Global Change Biology*, 16, 1035–1045. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2009.02074.x>
- Minasny, B., y McBratney, A. B. (2006). A conditioned Latin hypercube method for sampling in the presence of ancillary information \$. *Computers and Geosciences*, 32, 1378–1388. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2005.12.009>
- Mishra, G., y Francaviglia, R. (2021). *Land Uses , Altitude and Texture Effects on Soil Parameters . A Comparative Study in Two Districts of Nagaland , Northeast India.*
- Montenegro, J., y Chaves, M. (2011). Contribución del Sector Cañero a la Mitigación del Cambio Climático. *XVIII Congreso Azucarero Nacional ATACORI*, 506, 1–14.
- Nieder, R., y Benbi, D. K. (2008). Carbon and Nitrogen Transformations in Soils. *Carbon and Nitrogen in the Terrestrial Environment*, 137–159. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8433-1_5
- Nunes, J. L., Otto, R., Junqueira, H., y Ocheuze, P. C. (2013). Input of sugarcane post-harvest residues into the soil. *Scientia Agricola*, October, 336–344.
- Oostindie, H., Roep, D., y Renting, H. (2006). *Definitions , references and interpretations of the concept of multifunctionality in The Netherlands. January.*
- Osman, K. T. (2014). Chemical Soil Degradation. In *Soil Degradation, Conservation and Remediation*. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-7590-9>

- Osorio, G. (2007). Buenas Prácticas agrícolas y buenas prácticas de manufactura en la producción de caña panelera. In *Journal of Chemical Information and Modeling* (Vol. 53, Issue 9). <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Perez, J. (1992). *Estudio de la estabilidad estructural del suelo en relación con el complejo de cambio.*
- Pilgaard, S. B. (2016). Agriculture and landscape interaction—landowners' decision-making and drivers of land use change in rural Europe. *Land Use Policy*, 57, 759–763. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2016.05.025>
- Premrov, A., Cummins, T., y Byrne, K. A. (2017). Assessing fixed depth carbon stocks in soils with varying horizon depths and thicknesses , sampled by horizon. *Catena*, 150, 291–301. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.11.030>
- Pretty, J., y Ball, A. (2001). Agricultural influences on carbon emissions and sequestration: a review of evidence and the emerging trading options. *Occasional Paper, May 2014*, 03.
- Pulido, M., Lobo-Lujan, A. D., y Lozano-Pérez, Z. (2009). Asociación entre indicadores de estabilidad estructural y la materia orgánica en suelos agrícolas de venezuela. *Agrociencia*.
- Ríos, G., Romero Carrascal, M., Botero Ospina, M. J., Franco, G., Pérez Cárdenas, J. C., Morales Muñoz, J. E., Gallego Duque, J. L., y Echeverry Agudelo, D. I. (2004). *Zonificación, caracterización y tipificación de los sistemas de producción de lulo (Solanum quitoense Lam) en el Eje Cafetero *.* 5, 22–30.
- Rodriguez, G., Garcia, H., Roa, Z., y Santacoloma, P. (2004). Producción de panela como estrategia de diversificación en la generación de ingresos en áreas rurales de América Latina. *Fao*, 98. http://www.fao.org/fileadmin/user_upload/ags/publications/AGSF_WD6s.pdf
- Rodriguez, G., Huertas, B., Polo, S., Gonzáles, C., Tauta, J., Rodriguez, J., Ramírez, J., Velasquez, F., Espitia, J., y López, R. (2020). *Modelo productivo de la caña de azúcar para la producción de panela en Cundinamarca.*
- Roudier, P., Brugnard, C., Beaudette, D., y Louis, B. (2020). *Package ' clhs .'* <https://doi.org/10.1201/b12728>
- Rumpel, C., Chabbi, A., y Marschner, B. (2012). Carbon storage and sequestration in subsoil horizons: Knowledge, Gaps and potentials. In *Recarbonization of the Biosphere: Ecosystems and the Global Carbon Cycle* (Issue December 2014, pp. 1–559). <https://doi.org/10.1007/978-94-007-4159-1>
- Saggar, S., Parshotam, A., Sparling, G. P., Feltham, C. W., y Hart, P. (1996). 14C-labelled ryegrass turnover and residence times in soils varying in clay content and mineralogy 14C-

LABELLED RYEGRASS TURNOVER AND RESIDENCE TIMES IN SOILS VARYING IN CLAY CONTENT AND MINERALOGY. *Soil Biol Biochem*, vo, 1677–1686.

[https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(96\)00250-7](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(96)00250-7)

Salas, R. (2017). *ARQUEOLOGÍA DEL PAISAJE Colores en el valle de El Dorado Valle del Cauca-Colombia (100-1550 d.C.)*.

Sánchez, M., Prager M, M., Naranjo, R. E., y Sanclemente, O. E. (2012). *El suelo, su metabolismo, ciclaje de nutrientes y prácticas agroecológicas*. 19–34.

Santos, M. L., Cantarella, H., Junqueira, H., Kölln, O. T., Borges, T. M., Martineli, G., Cândida, S., y Nunes Carvalho, J. L. (2017). Comprehensive assessment of sugarcane straw : implications for biomass and bioenergy production. *Biofuels, Bioprod. Bioref.*, 1–17.

<https://doi.org/10.1002/bbb.1760>

Schmiedt, T. M., Mariano, E., Boschiero, B. N., y Otto, R. (2017). Soil carbon and nitrogen dynamics as affected by land use change and successive nitrogen fertilization of sugarcane. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 247(October 2016), 63–74.

<https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.06.005>

Schulten, H., y Leinweber, P. (2000). New insights into organic-mineral particles : composition , properties and models of molecular structure. *Biol Fertil Soils*, 30, 399–432.

Selim, H. M., Newman, A., Zhang, L., Arceneaux, A., Tubaña, B., y Gaston, L. A. (2016).

Distributions of organic carbon and related parameters in a Louisiana sugarcane soil. *Soil and Tillage Research*, 155, 401–411. <https://doi.org/10.1016/j.still.2015.09.010>

Senapati, N., Ghosh, S., Daniel, H., y Rakshit, A. (2014). *Modelling and Simulation of Diffusive Processes*. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-05657-9>

Serrato, P. K. (2009). LA CLASIFICACIÓN FISIOGRAFICA DEL TERRENO APARTIR DE LA INCLUSION NUEVOS ELEMENTOS CONCEPTUALES. *Revista Perspectiva Geográfica*, 14.

SGC, S. G. C. (2014). *Geología de la Plancha 208 Villeta*.

Sierra, C. A., Jorge, I., Orrego, S. A., Moreno, F. H., Harmon, M. E., Zapata, M., Colorado, G. J., Lara, W., Restrepo, D. E., Berrouet, L. M., Loaiza, L. M., y Benjumea, J. F. (2007). *Total carbon stocks in a tropical forest landscape of the Porce region , Colombia*. 243, 299–309.

<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.03.026>

Six, J., Conant, R., Paul, E. A., y Paustian, K. (2002). Stabilization mechanisms of protected versus unprotected soil organic matter: Implications for C-saturation of soils. *Plant and Soil*, 241(2), 155–176.

Six, J., Paustian, K., Elliot, E., y Combrink, C. (2000). Soil Structure and Organic Matter I.

- Distribution of Aggregate-Size Classes and Aggregate-Associated Carbon. *Soil Science Society of America Journal*, 64. <https://doi.org/10.2136/sssaj2000.642681x>
- Smith, P., Davies, C. A., Ogle, S., Zanchi, G., Bellarby, J., Bird, N., Boddey, R. M., Namara, N. P. M. C., Powlson, D., Cowie, A., Noordwijk, M. V. A. N., Sarah, C., Stuart, J., Kirton, A., y Eggar, D. (2012). *Towards an integrated global framework to assess the impacts of land use and management change on soil carbon : current capability and future vision*. *March*, 2089–2101. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2012.02689.x>
- Stockmann, U., Padarian, J., Mcbratney, A., Minasny, B., Brogniez, D. De, Montanarella, L., Young, S., Rawlins, B. G., y Field, D. J. (2015). Global soil organic carbon assessment. *Global Food Security*, 6, 9–16. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2015.07.001>
- Taiz, L., y Zeiger, E. (2006). Photosynthesis: Carbon Reactions. In *Plant Physiology*.
- Targulian, V. O., y Krasilnikov, P. V. (2007). *Soil system and pedogenic processes : Self-organization , time scales , and environmental significance*. 71, 373–381. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2007.03.007>
- Thorburn, P. J., Meier, E. A., Collins, K., y Robertson, F. A. (2012). Soil & Tillage Research Changes in soil carbon sequestration , fractionation and soil fertility in response to sugarcane residue retention are site-specific. *Soil & Tillage Research*, 120, 99–111. <https://doi.org/10.1016/j.still.2011.11.009>
- Tisdall, M. J., y Oades, M. J. (1982). *Organic matter and water-stable aggregates in soils*.
- Totsche, K. U., Amelung, W., Gerzabek, M. H., Guggenberger, G., Klumpp, E., Knief, C., Lehdorff, E., Mikutta, R., Peth, S., Prechtel, A., Ray, N., y Kögel-Knabner, I. (2018). Microaggregates in soils. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 181(1), 104–136. <https://doi.org/10.1002/jpln.201600451>
- Trumbore, S. (1997). *Potential responses of soil organic carbon to global environmental change*. 94(August), 8284–8291.
- Trumbore, S. E., Torn, M. S., Rasse, D. P., Janssens, I. A., Abiven, S., Dittmar, T., Kleber, M., Guggenberger, G., Kögel-Knabner, I., Lehmann, J., Schmidt, M. W. I., Weiner, S., Manning, D. A. C., y Nannipieri, P. (2011). Persistence of soil organic matter as an ecosystem property. *Nature*, 478(7367), 49–56. <https://doi.org/10.1038/nature10386>
- USDA. (2010). *Keys to soil taxonomy*.
- USDA. (2014a). Keys to soil taxonomy. In *United States Department of Agriculture Natural Resources Conservation Service*.
- USDA. (2014b). *Soil Survey Field and Laboratory Methods Manual*. 51.
- Vagen, T.-G., y Winowiecki, L. (2013). *Mapping of soil organic carbon stocks for spatially explicit*

assessments of climate change mitigation potential. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/8/1/015011>

Van Zuidam, R. A. (1985). AERIAL PHOTO-INTERPRETATION IN TERRAIN ANALYSIS AND GEOMORPHOLOGIC MAPPING. *International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences*.

Verbruggen, E., Jansa, J., Hammer, E. C., y Rillig, M. C. (2016). Do arbuscular mycorrhizal fungi stabilize litter-derived carbon in soil? *Journal of Ecology*, 104(1), 261–269. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.12496>

Villota, H. (1997). Una nueva aproximación a la clasificación fisiográfica del terreno. *CIAF*.

Wezel, A., Brives, H., Casagrande, M., Clément, C., y Dufour, A. (2016). *Agroecology and Sustainable Food Systems Agroecology territories : places for sustainable agricultural and food systems and biodiversity conservation Agroecology territories : places for sustainable agricultural*. 3565(January). <https://doi.org/10.1080/21683565.2015.1115799>

Whitbread, A. . (1995). Soil Organic Matter: Its Fractionation and Role in Soil Structure. In *Organic matter management for Sustainable Agriculture* (Issue 56, pp. 124–131).

Wiesmeier, M., Urbanski, L., Hobbey, E., Lang, B., von Lützow, M., Marin-Spiotta, E., van Wesemael, B., Rabot, E., Ließ, M., Garcia-Franco, N., Wollschläger, U., Vogel, H. J., y Kögel-Knabner, I. (2019). Soil organic carbon storage as a key function of soils - A review of drivers and indicators at various scales. *Geoderma*, 333(July 2018), 149–162. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.07.026>

Wu, H., Wiesmeier, M., Yu, Q., Steffens, M., Han, X., y Kögel-Knabner, I. (2011). Labile organic C and N mineralization of soil aggregate size classes in semiarid grasslands as affected by grazing management. *Biology and Fertility of Soils*, 48, 305–313. <https://doi.org/10.1007/s00374-011-0627-4>

Xiong, X., Grunwald, S., Myers, D. B., Ross, C. W., Harris, W. G., y Comerford, N. B. (2014). Interaction effects of climate and land use / land cover change on soil organic carbon sequestration. *Science of the Total Environment*, 493, 974–982. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.06.088>

Yu, P., Han, K., Li, Q., y Zhou, D. (2017). Soil organic carbon fractions are affected by different land uses in an agro-pastoral transitional zone in Northeastern China. *Ecological Indicators*, 73, 331–337. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.10.002>

Zapata, R. (2002). *Química de los procesos pedogenéticos del suelo*.

Zhang, Q., Wu, J., Yang, F., Lei, Y., Zhang, Q., y Cheng, X. (2016). Alterations in soil microbial community composition and biomass following agricultural land use change. *Nature*

Publishing Group, June, 1–10. <https://doi.org/10.1038/srep36587>

Zhou, M., Liu, C., Wang, J., Meng, Q., Ye, Y., y Ma, X. (2020). Soil aggregates stability and storage of soil organic carbon respond to cropping systems on Black Soils of Northeast China. *Scientific Reports*, 1–13. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-57193-1>

Ziegler, S. E., Billings, S. A., Lane, C. S., Li, J., y Fogel, M. L. (2013). Warming alters routing of labile and slower-turnover carbon through distinct microbial groups in boreal forest organic soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 60, 23–32.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2013.01.001>

Zinck, J A. (2012). *Geopedología*.

Zinck, Joseph Alfred, Metternicht, G., Bocco, G., y Del valle, H. (2016). *Geopedology*.

Anexo I

Descripción de las cajuelas de suelo

Cajuela: QnF1R1

Clasificación taxonómica: Typic Hapludolls, esquelética - franca, mezclada, sub-activa, isotérmica

Símbolo unidad cartográfica: M006 – Perfil 25S0305 –

Observación HS035

Localización:

Municipio: Quebradanegra

Vereda: Santa Bárbara

Finca: Los Mangos

Coordenadas

Latitud: 1059085; Longitud: 955899

Clima ambiental: Templado húmedo

Paisaje: Montaña

Tipo de relieve: Espinazo

Forma del terreno: Frente

Pendiente: 25 – 50%

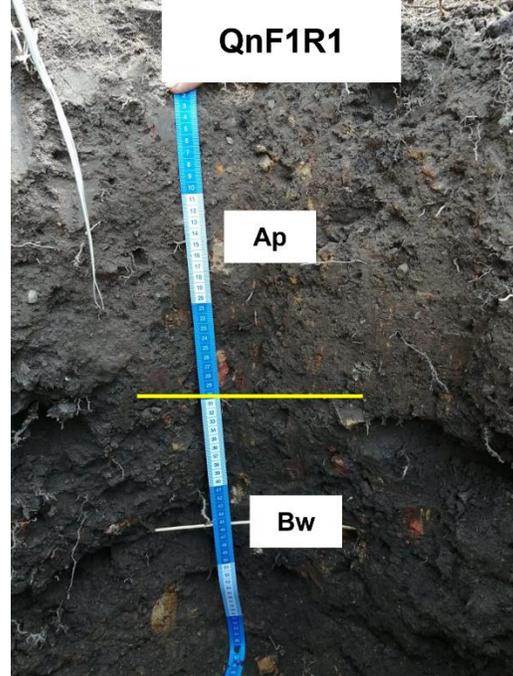
Material Parental: Lodolitas y limolitas

Horizontes diagnósticos:

Epipedón Mólico, endopedón cámbico

Régimen de temperatura: Isotérmico

Régimen de humedad: Údico



0-30	Color en húmedo 10 YR 2/1; textura Franco-arenosa (FA); estructura blocosa subangular fina y media, moderada, granular fina; consistencia en húmedo firme, en mojado ligeramente pegajosa y plástica; presencia de piedras en 10%; presencia de raíces hasta los 40 cm; pH entre 6 y 7; moderada reacción (xx) a H ₂ O ₂ .
30 – x cm	Color en húmedo 7.5YR 3/1; textura Franco-arenosa (FA); estructura blocosa subangular fina y media, moderada, granular fina; consistencia en mojado pegajosa y no plástica; presencia de cascajo, laja y gravilla en 30%.

Análisis físicos de la cajuela QnF1R1

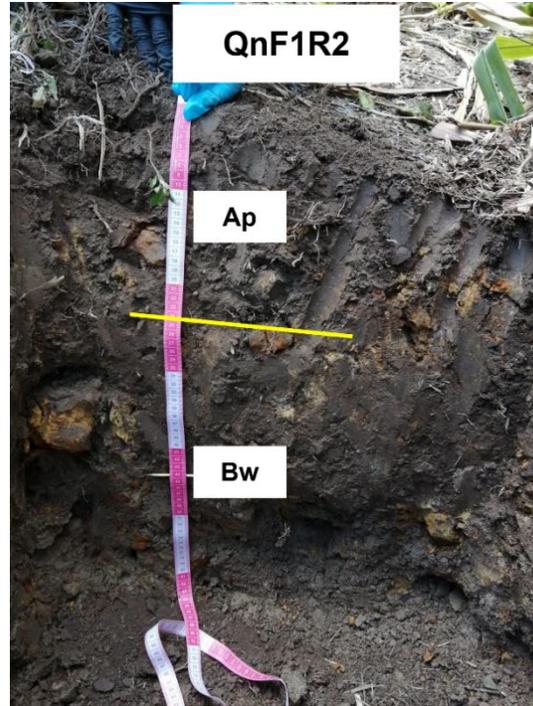
Profundidad	Humedad (%) Hv	Densidad (g*cm ⁻³)		Agregados estables (%)						DPM	Granulometría Bouyoucos (%)			Textura
		Da	Dr	EE4	EE2	EE1	EE0,5	EE0,25	EEm0,25		A	L	Ar	
0-10	15,50	1,58	2,48	5,49	60,40	21,82	3,35	1,55	7,39	2,509	68,91	21,29	9,80	FA
10-20	21,00	1,69	2,56	27,09	18,04	20,20	12,02	7,70	14,95	2,607	70,99	19,23	9,78	FA
20-30	16,60	1,78	2,53	21,16	20,79	15,34	15,95	10,21	16,54	2,302	62,83	25,35	11,82	FA
30-40	15,00	1,44	2,53	28,18	17,04	18,34	17,29	8,70	10,45	2,652	58,79	23,32	17,89	FA
40-50	11,70	1,72	2,56	39,55	14,31	10,37	15,24	8,31	12,22	3,119	62,91	21,25	15,84	FA

Análisis físicos de la cajuela QnF1R1

Profundidad	CO	MO	CT	SCOS
0-10	1,16	2,00	1,31	16,50
10-20	0,76	1,31	1,61	11,56
20-30	0,85	1,47	1,55	13,62
30-40	0,75	1,29	1,13	9,72
40-50	0,52	0,90	0,86	6,26

Cajuela: QnF1R2

Clasificación taxonómica: Typic Hapludolls, esquelética - franca, mezclada, subactiva, isotérmica
 Símbolo unidad cartográfica: M006 – Perfil 25S0305
 Localización:
 Municipio: Quebradanegra
 Vereda: Santa Bárbara
 Finca: Los Mangos
 Coordenadas
 Latitud: 1059093; Longitud: 955921,1
 Clima ambiental: Templado húmedo
 Paisaje: Montaña
 Tipo de relieve: Espinazo
 Forma del terreno: Frente
 Pendiente: 25 – 50%
 Material Parental: Lodolitas y limolitas
 Horizontes diagnósticos:
 Epipedón Mólico, endopedón cámbico
 Régimen de temperatura: Isotérmico
 Régimen de humedad: Údico
 Uso y Manejo: Caña de azúcar para panela - Entresaque



0- 24	Color en húmedo 10 YR 3/2; textura Franco-arenosa (FA); estructura granular fina, muy fina, moderada; consistencia en húmedo firme, en mojado ligeramente pegajosa, ligeramente plástica; presencia de guijarro, piedra en 10%; presencia de raíces hasta los 40 cm; pH entre 6 y 7; moderada reacción (xx) a H ₂ O ₂ .
24 – 60 cm	Color en húmedo 10 YR 4/2; textura al tacto Arcillosa (Ar); estructura blocosa subangular media, granular, fina y media moderada; consistencia en húmedo firme, en mojado pegajosa y ligeramente plástica; presencia de guijarro y piedra en 30%.

Análisis físicos de la cajuela QnF1R2

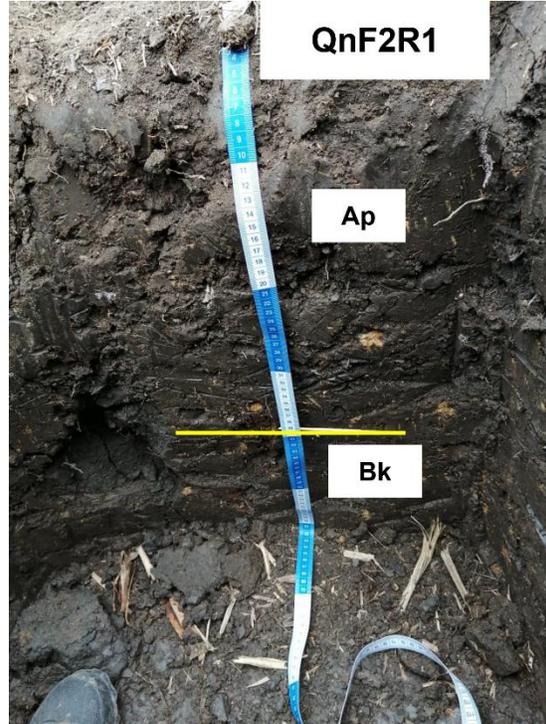
Profundidad	Humedad (%) Hv	Densidad (g*cm ⁻³)		Agregados estables (%)						DPM	Granulometría Bouyoucos (%)			Textura
		Da	Dr	EE4	EE2	EE1	EE0,5	EE0,25	EE0,25		A	L	Ar	
0 -10	19,70	1,37	2,53	30,64	19,74	9,97	11,71	11,87	16,07	2,732	68,91	17,24	13,85	FA
10 -20	10,40	1,49	2,55	22,65	15,41	15,05	13,23	10,80	22,87	2,215	66,95	21,25	11,80	FA
20-30	9,10	1,59	2,55	26,00	13,55	11,60	11,68	9,90	27,26	2,300	68,97	19,23	11,80	FA
30-40	13,10	1,72	2,59	27,32	11,91	11,83	11,59	12,81	24,54	2,339	73,04	17,19	9,77	FA
40-50	13,90	1,86	2,61	19,09	12,11	6,86	6,50	10,82	44,62	1,757	69,06	21,19	9,75	FA

Análisis químicos de la cajuela QnF1R2

Profundidad	CO	MO	CT	SCOS
0 -10	1,54	2,65	2,04	18,99
10 -20	1,13	1,95	1,50	15,15
20-30	0,54	0,93	0,80	7,73
30-40	0,41	0,71	0,41	6,35
40-50	0,21	0,36	0,32	2,73

Cajuela: QnF2R1

Clasificación taxonómica: Typic Calciudolls, fina, semiactiva isotérmica.
 Símbolo unidad cartográfica en estudio de suelos: M018 - Perfil 25S0440
 Localización:
 Municipio: Quebradanegra
 Vereda: Concepción
 Finca: El triunfo
 Coordenadas: Latitud: 1057131; Longitud: 953020,1
 Clima ambiental: Cálido húmedo
 Paisaje: Montaña
 Tipo de relieve: Loma
 Forma del terreno: Pie
 Pendiente: 12-25%
 Material Parental: Lodolitas y shales calcáreos
 Horizontes diagnósticos: Epipedón mólico, endopedón cálcico
 Régimen de temperatura: Isotérmico
 Régimen de humedad: Údico
 Uso y Manejo: Caña de azúcar para panela - Parejo sin renovación



0- 40	Color en húmedo 10 YR 2/1, moteados 10% 2.5 YR 5/8 (naranja); textura Arcillosa (Ar); estructura blocosa subangular muy fina, fina, media y gruesa fuerte; consistencia en húmedo muy firme, en mojado muy pegajoso y muy plástico; pH de 6,1; moderada reacción (xx) a H ₂ O ₂ ; reacción suave (x) a HCl.
40 - xcm	Color en húmedo 10 YR 2/1; textura Arcillosa (Ar); estructura blocosa subangular muy gruesa, muy fuerte, más que en H1; consistencia en húmedo muy firme, en mojado muy pegajoso, plástico; pH 6,7; reacción moderada (xx) a H ₂ O ₂ ; reacción muy fuerte (xxx) a HCl.

Análisis físicos de la cajuela QnF2R1

Profundidad	Humedad (%) Hv	Densidad (g*cm ⁻³)		Agregados estables (%)						DPM	Granulometría Bouyoucos (%)			Textura
		Da	Dr	EE4	EE2	EE1	EE0,5	EE0,25	EE0,25		A	L	Ar	
0 -10	32,20	1,16	2,41	12,01	9,49	5,76	5,84	9,37	57,53	1,243	18,86	34,06	47,08	Ar
10 -20	38,70	1,28	2,47	39,35	23,41	12,97	7,72	4,55	11,99	3,348	16,80	36,12	47,08	Ar
20-30	36,00	1,33	2,46	54,85	21,62	10,37	4,85	2,49	5,81	4,148	16,89	36,08	47,03	Ar
30-40	36,80	1,32	2,41	33,24	18,57	16,72	9,14	5,49	16,84	2,912	23,32	31,85	44,83	Ar
40-50	34,50	1,47	2,53	33,68	10,05	11,36	8,78	7,51	28,62	2,623	17,51	37,85	44,64	Ar

Análisis químicos de la cajuela QnF2R1

Profundidad	CO	MO	CT	SCOS
0 -10	2,65	4,57	5,81	30,74
10 -20	2,36	4,07	5,10	30,21
20-30	1,80	3,10	4,66	23,94
30-40	1,30	2,24	3,71	17,16
40-50	0,96	1,66	3,46	14,11

Cajuela: QnF2R2

Clasificación taxonómica: Typic Calciudolls, fina, semiactiva isotérmica.

Símbolo unidad cartográfica en estudio de suelos: M018 - Perfil 25S0440

Localización:

Municipio: Quebradanegra

Vereda: Concepción

Finca: El triunfo

Coordenadas

Latitud: 1057141; Longitud: 953008,7

Paisaje: Montaña

Tipo de relieve: Loma

Forma del terreno: Pie

Pendiente: 12-25%

Material Parental: Lodolitas y shales calcáreos

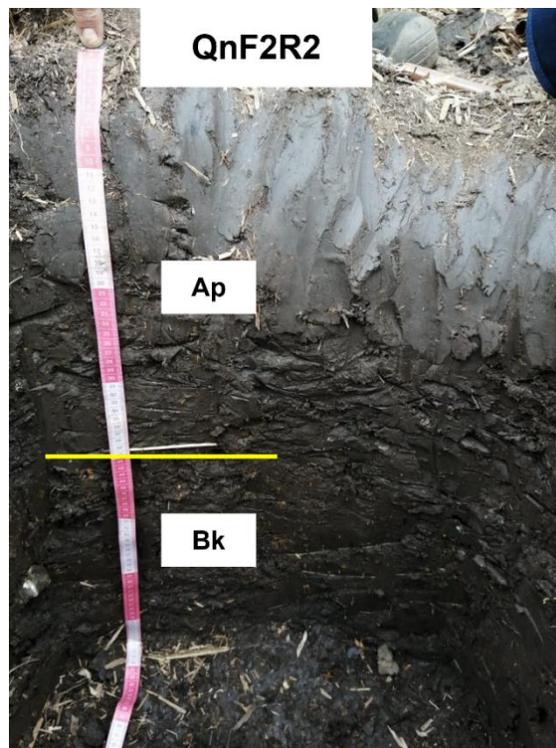
Clima ambiental: Cálido húmedo

Horizontes diagnósticos: Epipedón mólico, endopedón cálcico

Régimen de temperatura: Isotérmico

Régimen de humedad: Údico

Uso y Manejo: Caña de azúcar para panela - Parejo sin renovación



0-40 cm	Color en húmedo 5 YR 2.5/1; textura Arcillosa (Ar) y franco-arcillosa (Far); estructura blocosa subangular media y gruesa, moderada; consistencia en húmedo firme, en mojado pegajosa y plástica; pH de 6,3; fuerte reacción (xxx) a H ₂ O ₂ ; fuerte reacción (xxx) a HCl.
40 – x cm	Color en húmedo 5 YR 2.5/1; textura Arcillosa (Ar); estructura blocosa subangular media y gruesa, moderada; consistencia en húmedo firme, en mojado pegajosa y plástica; pH 6,6; reacción moderada (xx) a H ₂ O ₂ ; reacción muy fuerte (xxx) a HCl.

Análisis físicos de la cajuela QnF2R2

Profundidad	Humedad (%) Hv	Densidad (g*cm ⁻³)		Agregados estables (%)						DPM	Granulometría Bouyoucos (%)			Textura
		Da	Dr	EE4	EE2	EE1	EE0,5	EE0,25	EE0,25		A	L	Ar	
0 -10	35,30	1,28	2,33	28,33	14,35	13,54	12,36	8,17	23,25	2,486	21,44	37,93	40,63	Ar
10 -20	36,80	1,33	2,46	20,00	8,47	11,45	14,91	10,55	34,62	1,821	18,79	35,25	45,96	Ar
20-30	38,20	1,35	2,40	44,76	15,44	15,40	9,16	4,93	10,31	3,480	21,35	33,87	44,78	Ar
30-40	37,90	1,61	2,52	47,05	13,61	12,46	6,64	5,45	14,80	3,507	25,61	35,85	38,54	F Ar
40-50	35,90	1,28	2,42	30,69	13,96	11,92	9,06	6,41	27,96	2,566	19,56	33,76	46,68	Ar

Análisis químicos de la cajuela QnF2R2

Profundidad	CO	MO	CT	SCOS
0 -10	1,99	3,43	5,43	25,47
10 -20	2,35	4,05	5,11	31,26
20-30	1,56	2,69	4,12	21,06
30-40	1,10	1,90	3,16	17,71
40-50	0,82	1,41	3,26	10,50

Cajuela: QnF3R1

Clasificación taxonómica: Typic Hapludolls, fina, activa, isotérmica

Símbolo unidad cartográfica: M011 – perfil 25S0455

Localización

Municipio: Quebradanegra

Vereda: La Esperanza

Finca: La Argelia

Coordenadas: Latitud: 1054926; Longitud: 952186,5

Paisaje: Montaña

Tipo de relieve: Crestón

Forma del terreno: Revés

Pendiente: 25-50%

Material Parental: Arcillolitas y lutitas

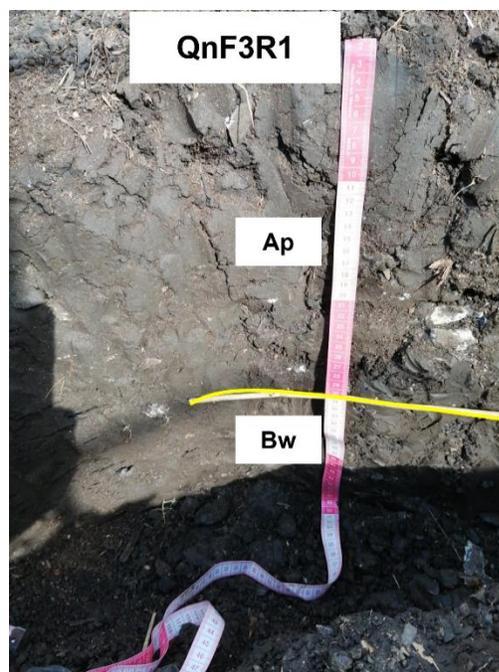
Clima ambiental: Templado húmedo

Horizontes diagnósticos: Epipedón mólico, endopedón cámbico

Régimen de temperatura: Isotérmico

Régimen de humedad: Údico

Uso y Manejo: Caña de azúcar para panela - Parejo sin renovación



0- 30 cm	Color en húmedo 7.5 YR 2.5/1; textura Arcillosa (Ar); estructura blocosa subangular, fuerte; consistencia en húmedo firme, en mojado pegajosa y ligeramente plástica; moderada reacción (xx) a H ₂ O ₂ .
30-x cm	Color en húmedo 10 YR 3/1; textura Arcillosa (Ar); estructura blocosa subangular fuerte; consistencia en húmedo muy firme; presencia de raíces finas a 40 cm pH 6,7; reacción baja (x) a H ₂ O ₂ ; reacción moderada(xx) a HCl.

Análisis físicos de la cajuela QnF3R1

Profundidad	Humedad (%) Hv	Densidad (g*cm ⁻³)		Agregados estables (%)						DPM	Granulometría Bouyoucos (%)			Textura
		Da	Dr	EE4	EE2	EE1	EE0,5	EE0,25	EE0,25		A	L	Ar	
0 -10	34,90	1,16	2,29	9,19	6,61	7,82	9,02	9,98	57,38	1,044	11,69	34,44	53,87	Ar
10 -20	39,80	1,25	2,37	46,92	21,90	14,66	5,96	2,73	7,83	3,757	14,17	34,28	51,55	Ar
20-30	26,20	1,33	2,40	47,84	14,74	15,03	6,93	2,81	12,65	3,616	18,59	32,10	49,31	Ar
30-40	35,00	1,35	2,55	23,27	14,13	15,05	12,33	8,43	26,79	2,203	25,29	19,56	55,15	Ar
40-50	33,10	1,51	2,57	35,44	12,73	15,79	13,22	6,96	15,85	2,890	12,96	31,89	55,15	Ar

Análisis químicos de la cajuela QnF3R1

Profundidad	CO	MO	CT	SCOS
0 -10	2,84	4,90	6,68	32,94
10 -20	2,72	4,69	5,77	34,00
20-30	2,23	3,84	5,03	29,66
30-40	1,41	2,43	5,61	19,04
40-50	1,21	2,09	4,28	18,27

Cajuela: QnF3R2

Clasificación taxonómica: Typic Hapludolls, fina, activa, isotérmica

Símbolo unidad cartográfica: M011 – perfil 25S0455

Localización

Municipio: Quebradanegra

Vereda: La Esperanza

Finca: La Argelia

Coordenadas: Latitud: 1054934; Longitud: 952181

Paisaje: Montaña

Tipo de relieve: Crestón

Forma del terreno: Revés

Pendiente: 25-50%

Material Parental: Arcillolitas y lutitas

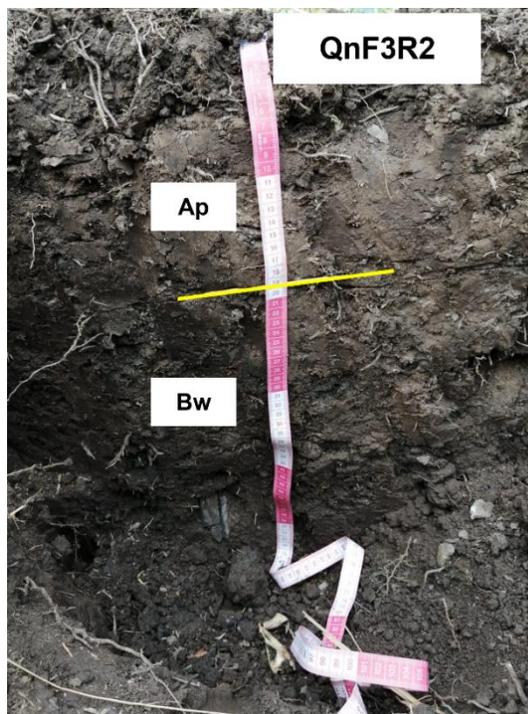
Clima ambiental: Templado húmedo

Horizontes diagnósticos: Epipedón mólico, endopedón cámbico

Régimen de temperatura: Isotérmico

Régimen de humedad: Údico

Uso y Manejo: Caña de azúcar para panela - Parejo sin renovación



0- 19 cm	Color en húmedo 7.5 YR 2.5/1; textura Franco-arcillosa (FAR); estructura blocosa subangular, firme; consistencia en húmedo firme, en mojado pegajosa y ligeramente plástica; raíces finas; presencia de fauna como hormigas, reacción debil (x) a H ₂ O ₂ ; reacción fuerte (xxx) a HCl.
19-x cm	Color en húmedo 10YR 3/1, 10YR 4/1 (entre café y gris); textura arcillosa (Ar) y Franco-arcillosa (FAR); estructura blocosa subangular, moderada; consistencia en húmedo firme, en mojado pegajosa y ligeramente plástica; pH 7; reacción fuerte (xxx) a HCl.

Análisis físicos de la cajuela QnF3R2

Profundidad	Humedad (%) Hv	Densidad (g*cm ⁻³)		Agregados estables (%)						DPM	Granulometría Bouyoucos (%)			Textura
		Da	Dr	EE4	EE2	EE1	EE0,5	EE0,25	EE0,25		A	L	Ar	
0 -10	28,50	1,37	2,46	28,15	9,90	12,93	11,60	8,27	29,15	2,334	23,72	39,89	36,42	F Ar
10 -20	27,00	1,45	2,37	24,22	15,66	12,84	10,76	7,79	28,73	2,261	23,65	41,93	34,42	F Ar
20-30	29,00	1,50	2,42	19,36	11,02	11,23	13,99	10,73	33,66	1,848	23,57	33,79	42,64	Ar
30-40	29,10	1,38	2,56	33,61	14,96	13,07	11,07	6,56	20,74	2,795	15,47	37,85	46,68	Ar
40-50	29,70	1,54	2,47	18,95	10,87	12,31	11,90	9,11	36,86	1,817	32,11	31,59	36,30	F Ar

Análisis químicos de la cajuela QnF3R2

Profundidad	CO	MO	CT	SCOS
0 -10	1,70	2,93	7,84	23,29
10 -20	1,43	2,47	6,99	20,74
20-30	1,37	2,36	6,26	20,55
30-40	1,22	2,10	5,63	16,84
40-50	1,04	1,79	6,70	16,02

Cajuela: QnF4R1

Clasificación taxonómica: Typic Hapludolls, esquelética - franca, mezclada, subactiva, isotérmica (no se ve en estudio)

Símbolo unidad cartográfica: M006 – perfil 25S0305

Localización

Municipio: Quebradanegra

Vereda: San Isidro

Finca: Buenavista

Coordenadas: Latitud: 1055550; Longitud: 950950,5

Paisaje: Montaña

Tipo de relieve: Crestón

Forma del terreno: Frente

Pendiente: 50-75%

Material Parental: Lodolitas y limolitas

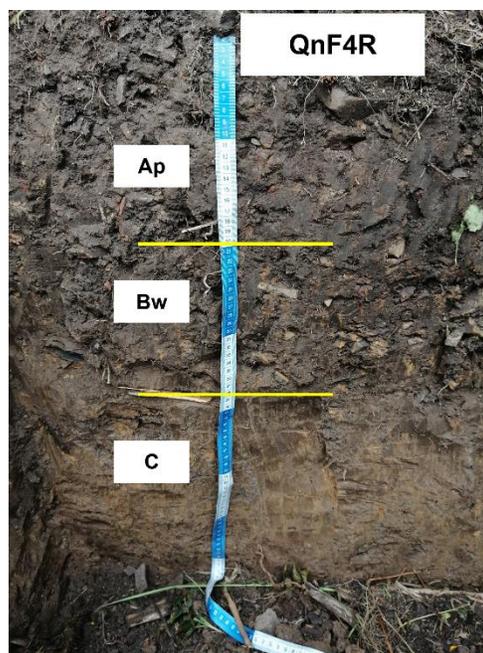
Clima ambiental: Templado húmedo

Horizontes diagnósticos: Epipedón mólico, endopedón cámbico.

Régimen de temperatura: Isotérmico

Régimen de humedad: Údico

Uso y Manejo: Caña de azúcar para panela - Parejo sin renovación



0- 20 cm	Color en húmedo 10 YR2/1; textura Franco-arcillo-arenosa (FAr) y Franco-arcillosa (FAr); estructura migajosa, débil, estructura granular fina (suelta) y blocosa media gruesa; consistencia en mojado no pegajosa, no plástica; laja en 10%; reacción débil (x) a H ₂ O ₂ .
20-35 cm	Color en húmedo 7.5 YR 3/2; textura Franco-arcillosa (FAr); estructura migajosa, débil; consistencia en mojado ligeramente pegajosa y no plástica; laja en 30%.
35-75 cm	Color en húmedo 7.5YR 4/4; textura Franco-arcillosa (FAr) y Arcillosa (Ar); estructura masiva; pH 6.

Análisis físicos de la cajuela QnF4R1

Profundidad	Humedad (%) Hv	Densidad (g*cm ⁻³)		Agregados estables (%)						DPM	Granulometría Bouyoucos (%)			Textura
		Da	Dr	EE4	EE2	EE1	EE0,5	EE0,25	EE0,25		A	L	Ar	
0 -10	18,40	1,29	2,31	27,74	17,98	13,13	10,33	6,63	24,20	2,533	52,61	25,40	21,99	F Ar A
10 -20	21,90	1,39	2,30	24,18	14,10	11,43	9,71	7,70	32,87	2,188	44,38	21,39	34,23	F Ar
20-30	24,20	1,51	2,37	39,88	25,05	17,91	7,76	3,53	5,87	3,492	34,21	29,52	36,27	F Ar
30-40	23,80	1,29	2,34	25,99	24,01	19,47	13,00	6,28	11,26	2,707	36,38	25,40	38,22	F Ar
40-50	27,20	1,47	2,41	12,02	12,63	23,63	25,82	11,28	14,62	1,708	18,03	35,58	46,39	Ar

Análisis químicos de la cajuela QnF4R1

Profundidad	CO	MO	CT	SCOS
0 -10	1,96	3,38	3,42	22,76
10 -20	1,68	2,90	2,66	21,02
20-30	1,32	2,28	2,37	13,95
30-40	1,11	1,91	1,79	10,02
40-50	0,63	1,09	1,10	6,48

Cajuela: QnF4R2

Clasificación taxonómica: Typic Hapludolls, esquelética - franca, mezclada, subactiva, isotérmica

Símbolo unidad cartográfica: M006 – perfil 25S0305

Localización

Municipio: Quebradanegra

Vereda: San Isidro

Finca: Buenavista

Coordenadas: Latitud: 1055540; Longitud: 950945

Paisaje: Montaña

Tipo de relieve: Crestón

Forma del terreno: Frente

Pendiente: 50-75%

Material Parental: Lodolitas y limolitas

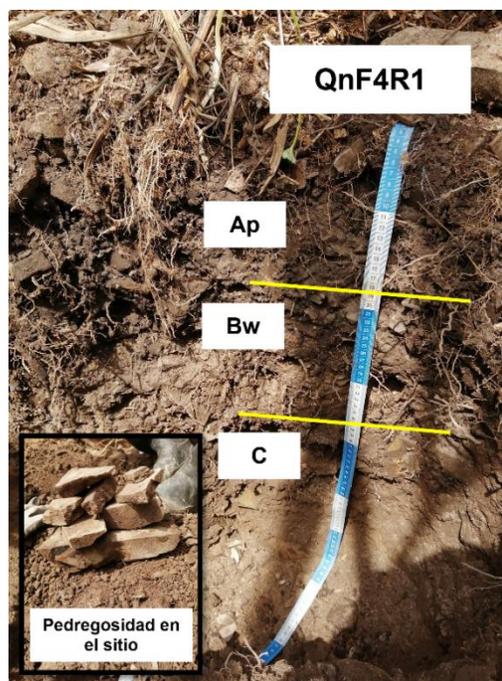
Clima ambiental: Templado húmedo

Horizontes diagnósticos: Epipedón mólico, endopedón cámbico.

Régimen de temperatura: Isotérmico

Régimen de humedad: Údico

Uso y Manejo: Caña de azúcar para panela - Parejo sin renovación



0- 17cm	Color en húmedo 10YR 3/1 y moteados naranjas 2.5YR 5/8; textura Franco-arenosa (FA); estructura blocosa subangular, moderada; consistencia en mojado no pegajosa y no plástica; laja en 10%; presencia de raíces; reacción débil (x) a H ₂ O ₂ .
17-38 cm	Color en húmedo 7.5 YR 3/2; textura Franco-arenosa (FA) y Franco-arcillo-arenosa (FArA); estructura blocosa subangular fuerte; consistencia en mojado ligeramente pegajosa y no plástica; laja en 30%.
38-50 cm	Color en húmedo 7.5YR 4/4; textura Franco-arenosa (FA); estructura masiva; Laja en 30%; presencia de raíces a 40 cm; pH de 6.

Análisis físicos de la cajuela QnF4R2

Profundidad	Humedad (%) Hv	Densidad (g*cm ⁻³)		Agregados estables (%)						DPM	Granulometría Bouyoucos (%)			Textura
		Da	Dr	EE4	EE2	EE1	EE0,5	EE0,25	EE0,25		A	L	Ar	
0 -10	5.20	1,09	2,29	1,53	3,67	19,90	29,91	17,88	27,10	0,826	64,78	15,26	19,96	FA
10 -20	8.40	1,08	2,39	33,65	20,18	16,25	11,14	7,21	11,57	2,994	70,99	15,19	13,82	FA
20-30	14.10	1,33	2,42	17,07	18,16	19,94	16,06	11,57	17,21	2,053	58,74	19,29	21,97	F Ar A
30-40	11.60			19,53	18,96	23,13	16,51	10,21	11,66	2,264	62,87	19,25	17,88	FA
40-50	13.60			20,39	14,55	18,48	19,90	12,24	14,45	2,150	58,91	21,23	19,86	FA

Análisis químicos de la cajuela QnF4R2

Profundidad	CO	MO	CT	SCOS
0 -10	1,49	2,57	2,48	14,62
10 -20	1,37	2,36	2,30	13,32
20-30	1,79	3,09	2,85	16,66
30-40	1,11	1,91	2,13	
40-50	0,91	1,57	1,31	

Cajuela: QnF5R1

Clasificación taxonómica: Typic Humudepts, franca-gruesa sobre fragmental, semiactiva, isotérmica

Símbolo unidad cartográfica: I070 – Perfil 25S0430

Localización

Municipio: Quebradanegra

Vereda: San Isidro

Finca: San Isidro

Coordenadas: Latitud: 1055627; Longitud: 950175

Paisaje: Montaña

Tipo de relieve: Espinazo

Forma del terreno: Frente

Pendiente: 25-50%

Material Parental: Areniscas

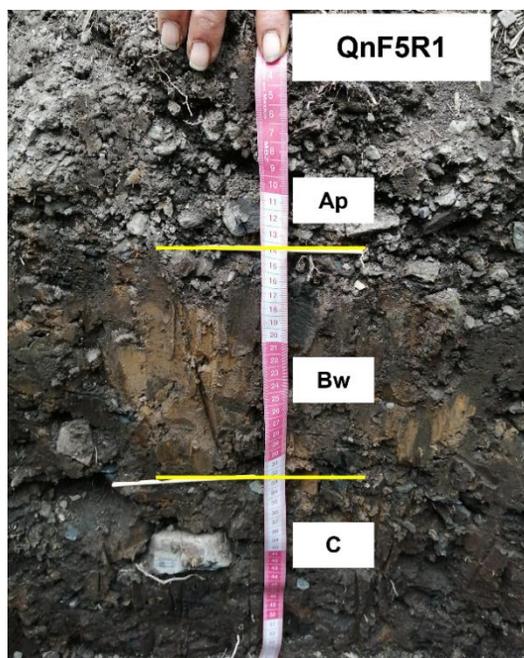
Clima ambiental: Templado húmedo

Horizontes diagnósticos: Epipedón úmbrico, endopedón cámbico

Régimen de temperatura: Isotérmico

Régimen de humedad: Údico

Uso y Manejo: Caña de azúcar para panela - Parejo sin renovación



0- 14cm	Color en húmedo 7.5 YR 3/1; textura Franco-arcillo-arenosa (FArA); estructura blocosa subangular, moderada a fuerte; consistencia en húmedo ligeramente plástica y ligeramente pegajosa; piedra en 30%.
14–31 cm	Color en húmedo 7.5 YR 4/4 y 30% 7.5 YR 3/2; textura Franco-arenosa (FA) y franco-arcillosa (FAr); estructura blocosa subangular medio-gruesa, moderada; consistencia en mojado pegajosa y no plástica.
31–x cm	Color en húmedo 7.5YR 3/1 Café con algunos moteados naranja (7.5YR 4/6) en 5%; textura Franco-arcillosa (FAr) y arcillosa (Ar); estructura blocosa subangular gruesa; consistencia en húmedo firme, en mojado ligeramente plástica y pegajosa; piedra en 10%. pH 6; baja reacción (<x) a HCl.

Análisis físicos de la cajuela QnF5R1

Profundidad	Humedad (%) Hv	Densidad (g*cm ⁻³)		Agregados estables (%)						DPM	Granulometría Bouyoucos (%)			Textura
		Da	Dr	EE4	EE2	EE1	EE0,5	EE0,25	EEm0,25		A	L	Ar	
0 -10	18,40	1,34	2,40	20,43	14,55	16,86	21,72	16,01	10,44	2,151	58,65	19,34	22,01	F Ar A
10 -20	21,90	1,38	2,39	39,23	15,41	12,07	9,92	7,93	15,45	3,120	62,71	17,31	19,98	FA
20-30	24,20	1,62	2,55	26,07	16,37	14,01	13,60	12,18	17,77	2,435	42,52	25,38	32,10	F Ar
30-40	23,80	1,47	2,40	3,33	6,82	7,51	7,63	7,11	67,59	0,686	42,40	21,37	36,23	F Ar
40-50	27,20	1,67	2,44	6,22	7,15	7,72	10,65	11,63	56,63	0,898	27,18	25,79	47,03	Ar

Análisis químicos de la cajuela QnF5R1

Profundidad	CO	MO	CT	SCOS
0 -10	1,52	2,62	2,65	18,33
10 -20	0,96	1,66	2,49	13,25
20-30	0,29	0,50	0,69	4,70
30-40	0,54	0,93	1,52	7,14
40-50	0,30	0,52	1,11	4,51

Cajuela: QnF5R2

Clasificación taxonómica: Typic Humudepts, franca-gruesa sobre fragmental, semiactiva, isotérmica

Símbolo unidad cartográfica: I070 – Perfil 25S0430

Localización

Municipio: Quebradanegra

Vereda: San Isidro

Finca: San Isidro

Coordenadas: Latitud: 1055624; Longitud: 950173,6

Paisaje: Montaña

Tipo de relieve: Espinazo

Forma del terreno: Frente

Pendiente: 25-50%

Material Parental: Areniscas

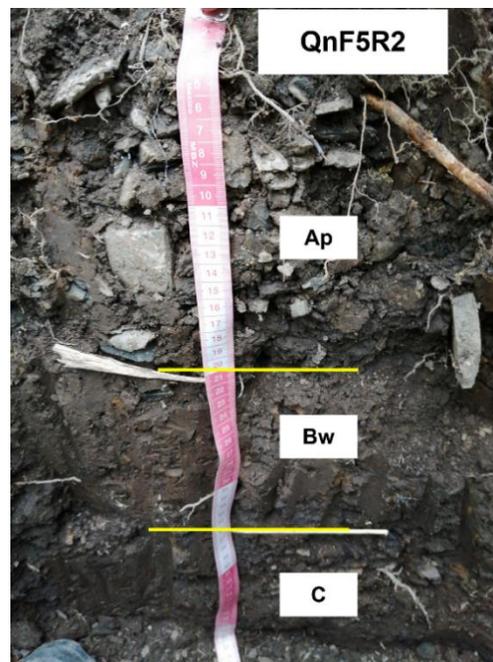
Clima ambiental: Templado húmedo

Horizontes diagnósticos: Epipedón úmbrico, endopedón cámbico

Régimen de temperatura: Isotérmico

Régimen de humedad: Údico

Uso y Manejo: Caña de azúcar para panela - Parejo sin renovación



0- 20 cm	Color en húmedo 10YR 3/1, moteados 10YR 5 /6 (medio naranjas); textura Franco-arcillo-arenosa (FArA); estructura blocosa subangular muy fina, fina y media; consistencia en mojado pegajosa y ligeramente plástica; piedra en 30%; Poca presencia de raíces.
20-47cm	Color en húmedo 10YR 3/2; textura Franco-arcillo-arenosa (FArA); estructura blocosa subangular media y gruesa; consistencia en húmedo firme, en mojado muy pegajosa y ligeramente plástica.
47 – X cm	Color en húmedo 10YR 3/1; textura Franco-arcillo-arenosa (FArA); estructura blocosa subangular media y gruesa; consistencia en mojado pegajosa y no plástica; piedra en 10%. pH 6; baja reacción (<x) a HCl.

Análisis físicos de la cajuela QnF5R2

Profundidad	Humedad (%) Hv	Densidad (g*cm ⁻³)		Agregados estables (%)						DPM	Granulometría Bouyoucos (%)			Textura
		Da	Dr	EE4	EE2	EE1	EE0,5	EE 0,25	EEem0,25		A	L	Ar	
0 -10	11,00	1,48	2,38	4,73	5,10	7,18	5,91	6,36	70,72	0,701	48,44	17,33	34,23	F Ar A
10 -20	13,50	1,54	2,40	25,67	15,92	11,84	9,55	8,16	28,86	2,334	42,40	25,43	32,17	F Ar
20-30	31,10	1,50	2,38	19,82	11,64	10,46	13,71	11,80	32,57	1,883	46,07	19,48	34,45	F Ar A
30-40	24,70	1,48	2,41	9,70	10,59	10,43	16,43	14,48	38,38	1,281	60,24	14,12	25,64	F Ar A
40-50	15,00	1,71	2,41	14,76	14,44	13,67	12,05	4,25	40,83	1,681	56,49	17,35	26,16	F Ar A

Análisis químicos de la cajuela QnF5R2

Profundidad	CO	MO	CT	SCOS
0 -10	0,73	1,26	1,53	9,72
10 -20	0,72	1,24	1,64	11,09
20-30	1,48	2,55	2,88	22,20
30-40	1,41	2,43	2,72	18,78
40-50	0,97	1,67	1,84	14,93

Cajuela: QnF6R1

Clasificación taxonómica: Typic Calciudolls, fina, semiactiva isotérmica.

Símbolo unidad cartográfica en estudio de suelos: M018 - Perfil 25S0440

Localización

Municipio: Quebradanegra

Vereda: Nacaderos

Finca: La Noria

Coordenadas: Latitud: 1054008; Longitud: 953165,7

Paisaje: Montaña

Tipo de relieve: Loma

Forma del terreno: Cima y ladera

Pendiente: 12-25%

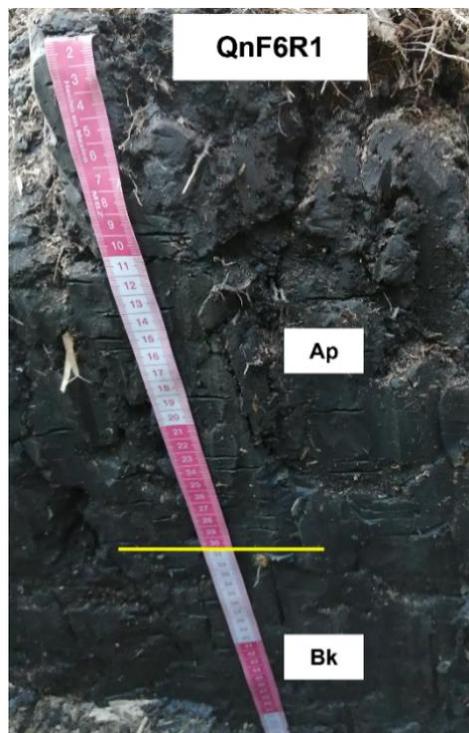
Lodolitas y shales calcáreos Clima ambiental: Templado húmedo

Horizontes diagnósticos: Epipedón mólico, endopedón cálcico

Régimen de temperatura: Isotérmico

Régimen de humedad: Údico

Uso y Manejo: Caña de azúcar para panela - Parejo sin renovación



0- 30 cm	Color en húmedo 10YR 3/1; textura Arcillosa (Ar); estructura blocosa subangular fina, media y gruesa, fuerte; consistencia en húmedo firme, en mojado muy pegajosa y plástica; pH 6,4; Reacción moderada (xx) a H ₂ O ₂ ; baja reacción (<x) a HCl.
30 – X cm	Color en húmedo 10YR 3/2; textura Arcillosa (Ar); estructura blocosa subangular media y fina, muy fuerte; consistencia en húmedo firme, en mojado muy pegajosa y ligeramente plástica; pH 6,5; baja reacción (<x) a H ₂ O ₂ , fuerte reacción (xxx) a HCl.

Análisis físicos de la cajuela QnF6R1

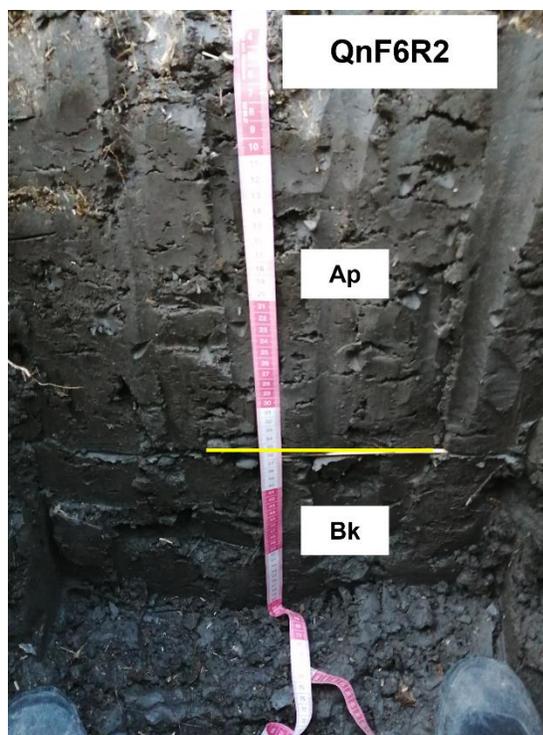
Profundidad	Humedad (%) Hv	Densidad (g*cm ⁻³)		Agregados estables (%)						DPM	Granulometría Bouyoucos (%)			Textura
		Da	Dr	EE4	EE2	EE1	EE0,5	EE0,25	EEm0,25		A	L	Ar	
0 -10	36,30	1,16	2,30	12,04	11,76	16,56	16,03	11,07	32,53	1,526	13,78	28,18	58,04	Ar
10 -20	35,50	1,13	2,30	33,87	16,96	17,20	10,38	5,92	15,67	2,919	9,93	26,01	64,06	Ar
20-30	33,70	1,14	2,40	28,58	13,76	18,19	12,28	7,47	19,71	2,545	8,25	25,90	65,85	Ar
30-40	31,40	1,37	2,42	19,67	9,47	13,63	13,22	8,24	35,76	1,844	11,76	21,41	66,83	Ar
40-50	30,40	1,45	2,46	29,25	11,28	6,94	11,56	7,71	33,27	2,355	9,04	33,88	57,08	Ar

Análisis químicos de la cajuela QnF6R1

Profundidad	CO	MO	CT	SCOS
0 -10	3,68	6,34	6,98	42,69
10 -20	2,83	4,88	5,15	31,98
20-30	1,86	3,21	3,90	21,20
30-40	1,43	2,47	3,63	19,59
40-50	1,02	1,76	3,25	14,79

Cajuela: QnF6R2

Clasificación taxonómica: Typic Calcudolls, fina, semiactiva isotérmica.
 Símbolo unidad cartográfica en estudio de suelos: M018 - Perfil 25S0440
 Localización
 Municipio: Quebradanegra
 Vereda: Nacederos
 Finca: La Noria
 Coordenadas: Latitud: 1054004; Longitud: 953170,6
 Paisaje: Montaña
 Tipo de relieve: Loma
 Forma del terreno: Cima y ladera
 Pendiente: 12-25%
 Material Parental: Lodolitas y shales calcáreos
 Clima ambiental: Templado húmedo
 Horizontes diagnósticos: Epipedón mólico, endopedón cálcico
 Régimen de temperatura: Isotérmico
 Régimen de humedad: Údico
 Uso y Manejo: Caña de azúcar para panela - Parejo sin renovación



0- 36 cm	Color en húmedo 10YR 3/1; textura Arcillosa (Ar); estructura blocosa subangular, fina media – gruesa, moderada; consistencia en húmedo blanda, en mojado muy pegajosa y ligeramente plástica; presencia de raíces; pH 7; reacción moderada (xx) a H ₂ O ₂ ; baja reacción (<x) a HCl.
36 – X cm	Textura Arcillosa (Ar); estructura blocosa subangular fina, media y gruesa, blanda; consistencia en húmedo firme, en mojado ligeramente plástica y pegajosa; gravilla en 10%; pH 6,7; baja reacción (<x) a H ₂ O ₂ , fuerte reacción (xxx) a HCl.

Análisis físicos de la cajuela QnF6R2

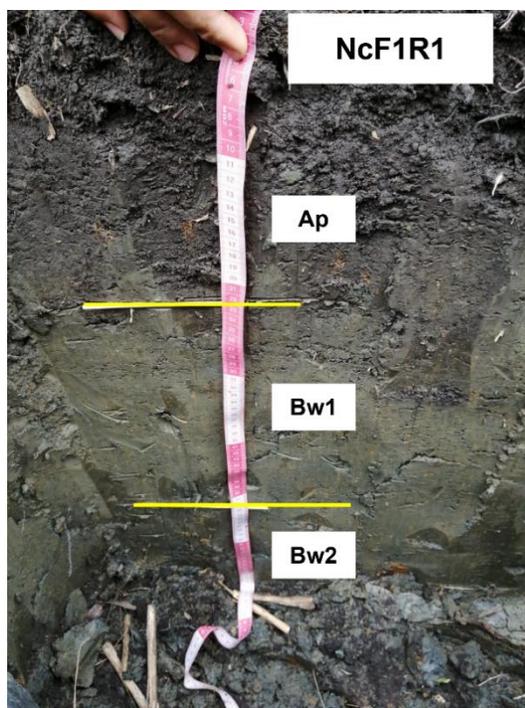
Profundidad	Humedad (%) Hv	Densidad (g*cm ⁻³)		Agregados estables (%)						DPM	Granulometría Bouyoucos (%)			Textura
		Da	Dr	EE4	EE2	EE1	EE0,5	EE0,25	EEm0,25		A	L	Ar	
0 -10	42,00	0,91	2,27	25,22	8,81	10,64	11,45	8,85	35,03	2,100	11,10	28,38	60,52	Ar
10 -20	41,70	1,06	2,34	43,08	16,86	16,98	9,70	0,70	12,68	3,437	13,89	23,98	62,13	Ar
20-30	40,00	1,34	2,39	38,32	16,97	17,34	9,55	5,78	12,05	3,177	9,33	22,75	67,92	Ar
30-40	35,60	1,42	2,30	28,27	10,26	11,61	10,59	7,37	31,89	2,325	13,72	20,14	66,14	Ar
40-50	31,90	1,41	2,35	32,36	13,67	13,83	11,41	7,04	21,70	2,698	11,11	20,08	68,81	Ar

Análisis químicos de la cajuela QnF6R2

Profundidad	CO	MO	CT	SCOS
0 -10	4,34	7,48	7,88	39,49
10 -20	3,66	6,31	6,27	38,80
20-30	2,36	4,07	4,62	31,62
30-40	1,44	2,48	3,53	20,45
40-50	1,18	2,03	3,79	14,97

Cajuela: NcF1R1

Clasificación taxonómica: Typic Humudepts, fina, activa, isotérmica
 Símbolo unidad cartográfica: I062 – perfil 25S0459
 Localización
 Municipio: Nocaima
 Vereda: San Cayetano
 Finca: La Aguadita
 Coordenadas: Latitud: 1052142; Longitud: 967979
 Paisaje: Montaña
 Tipo de relieve: Espinazo
 Forma del terreno: Frente
 Pendiente: 12-25%
 Material Parental: Arcillolitas y lutitas
 Clima ambiental: Templado húmedo
 Horizontes diagnósticos: Epipedón úmbrico, endopedón cámbico
 Régimen de temperatura: Isotérmico
 Régimen de humedad: Údico
 Uso y Manejo: Caña de azúcar para panela - Entresaque



0- 22 cm	Color en húmedo 10YR 3/1; textura Arcillosa (Ar); estructura migajosa muy fina y fina, y estructura blocosa subangular media, suave; consistencia en húmedo friable, en mojado ligeramente pegajosa y ligeramente plástica; presencia de raíces hasta 10 cm; pH 6-7; reacción moderada (xx) a H ₂ O ₂ .
22-52 cm	Color en húmedo Gley 10Y y moteado 15% 10YR 5/6; textura Arcillosa (Ar); estructura blocosa subangular media, moderada; consistencia en húmedo friable, en mojado ligeramente pegajosa y plástica.
52 – X cm	Color en húmedo Gley2 4/5B y 50% Gley1 3/10Y; textura Arcillosa (Ar); estructura blocosa subangular, gruesa, débil; consistencia en húmedo firme.

Análisis físicos de la cajuela NcF1R1

Profundidad	Humedad (%) Hv	Densidad (g*cm ⁻³)		Agregados estables (%)						DPM	Granulometría Bouyoucos (%)			Textura
		Da	Dr	EE4	EE2	EE1	EE0,5	EE0,25	EE0,125		A	L	Ar	
0 -10	45,10	0,67	2,08	14,45	5,49	8,02	17,95	14,36	39,74	1,390	11,12	32,64	56,24	Ar
10 -20	51,30	0,95	2,39	39,63	20,12	19,29	10,37	3,24	7,34	3,370	15,06	31,20	53,74	Ar
20-30	49,30	1,15	2,42	4,32	45,02	14,80	13,16	9,33	13,38	1,982	12,34	24,23	63,43	Ar
30-40	46,20	1,25	2,47	40,69	9,95	15,49	12,31	5,22	16,33	3,105	4,62	30,24	65,14	Ar
40-50	42,30	1,35	2,48	14,98	9,58	9,50	10,68	10,96	44,28	1,506	12,98	26,10	60,92	Ar

Análisis químicos de la cajuela NcF1R1

Profundidad	CO	MO	CT	SCOS
0 -10	6,51	11,22	11,29	43,62
10 -20	4,22	7,28	6,32	40,09
20-30	2,09	3,60	3,12	24,04
30-40	0,90	1,55	1,58	11,25
40-50	0,49	0,84	0,85	6,62

Cajuela: NcF1R2

Clasificación taxonómica: Typic Humudepts, fina, activa, isotérmica

Símbolo unidad cartográfica: I062 – perfil 25S0459

Localización

Municipio: Nocaima

Vereda: San Cayetano

Finca: La Aguadita

Coordenadas: Latitud: 1052142; Longitud: 967977,9

Paisaje: Montaña

Tipo de relieve: Espinazo

Forma del terreno: Frente

Pendiente: 12-25%

Material Parental: Arcillolitas y lutitas

Clima ambiental: Templado húmedo

Horizontes diagnósticos: Epipedón úmbrico, endopedón cámbico

Régimen de temperatura: Isotérmico

Régimen de humedad: Údico

Uso y Manejo: Caña de azúcar para panela - Entresaque

0- 23 cm	Color en húmedo 7.5YR 2/1; textura Arcillosa (Ar); estructura blocosa subangular fina y media; consistencia en húmedo ligeramente plástica; presencia de raíces hasta 10 cm; pH 6-7; reacción moderada (xx) a H ₂ O ₂ .
23 – X cm	Color en húmedo Gley 10Y; textura Arcillosa (Ar); estructura blocosa subangular media; consistencia en húmedo muy firme; presencia de raíces hasta 35 cm; pH 6-7.

Análisis físicos de la cajuela NcF1R2

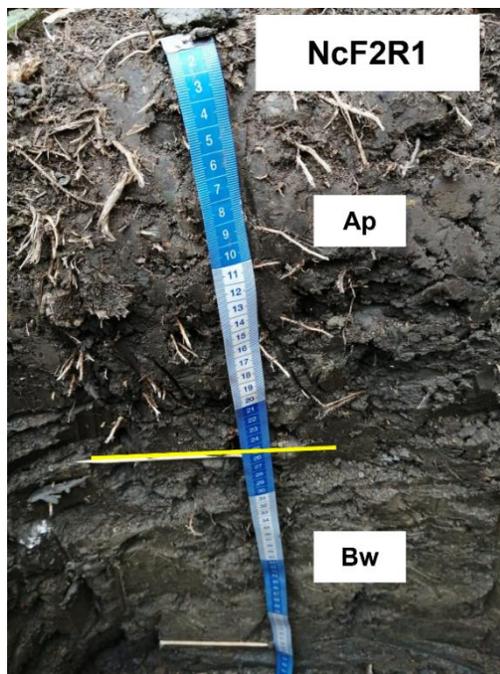
Profundidad	Humedad (%) Hv	Densidad (g*cm ⁻³)		Agregados estables (%)						DPM	Granulometría Bouyoucos (%)			Textura
		Da	Dr	EE4	EE2	EE1	EE0,5	EE0,25	EEm0,25		A	L	Ar	
0 -10	45,90	1,04	2,40	11,32	10,99	10,47	10,43	9,33	47,46	1,338	20,21	32,60	47,19	Ar
10 -20	43,20	1,33	2,52	20,94	18,28	21,68	17,00	7,84	14,25	2,305	24,91	32,36	42,73	Ar
20-30	37,90	1,53	2,53	23,30	19,07	17,04	14,47	9,99	16,15	2,391	23,11	32,25	44,64	Ar
30-40	30,80	1,47	2,60	18,66	17,06	16,46	13,85	10,33	23,64	2,050	23,19	32,22	44,59	Ar
40-50	27,50	1,70	2,57	14,78	15,67	12,53	16,00	13,18	27,84	1,749	25,31	32,19	42,50	Ar

Análisis químicos de la cajuela NcF1R2

Profundidad	CO	MO	CT	SCOS
0 -10	3,03	5,22	5,22	31,51
10 -20	2,39	4,12	4,01	31,79
20-30	0,83	1,43	1,64	12,70
30-40	0,87	1,50	1,45	12,79
40-50	0,61	1,05	1,14	10,37

Cajuela: NcF2R1 (Parejo)

Clasificación taxonómica: Typic Humudepts, fina, activa, isotérmica
 Símbolo unidad cartográfica: I062 – perfil 25S0459
 Localización
 Municipio: Nocaíma
 Vereda: El Cajón
 Finca: Ventorrillo
 Coordenadas: Latitud: 1049742; Longitud: 962710,6
 Paisaje: Montaña
 Tipo de relieve: Crestón
 Forma del terreno: Revés
 Pendiente: 25-50%
 Material Parental: Arcillolitas y lutitas
 Clima ambiental: Templado húmedo
 Horizontes diagnósticos: Epipedón úmbrico, endopedón cámbico
 Régimen de temperatura: Isotérmico
 Régimen de humedad: Údico
 Uso y Manejo: Caña de azúcar para panela - Parejo



0- 25 cm	Color en húmedo 7.5YR 2.5/1; textura Arcillosa (Ar); estructura blocosa subangular; consistencia en húmedo muy firme, en mojado ligeramente plástica y pegajosa; presencia de raíces en 35%; pH 6-7; reacción moderada (xx) a H ₂ O ₂ .
25-58 cm	Color en húmedo Gley1 4/10Y, moteados blancos; textura Arcillosa (Ar); estructura blocosa subangular, moderada; consistencia en húmedo blanda, en mojado ligeramente pegajosa y ligeramente plástica; pH 6,5; moderada reacción (xx) a HCl.
58 – X cm	Color en húmedo Gley1 4/10y, moteados naranja; textura al tacto Arcillosa (Ar); estructura blocosa subangular, gruesa, firme; consistencia en húmedo firme.

Análisis físicos de la cajuela NcF2R1

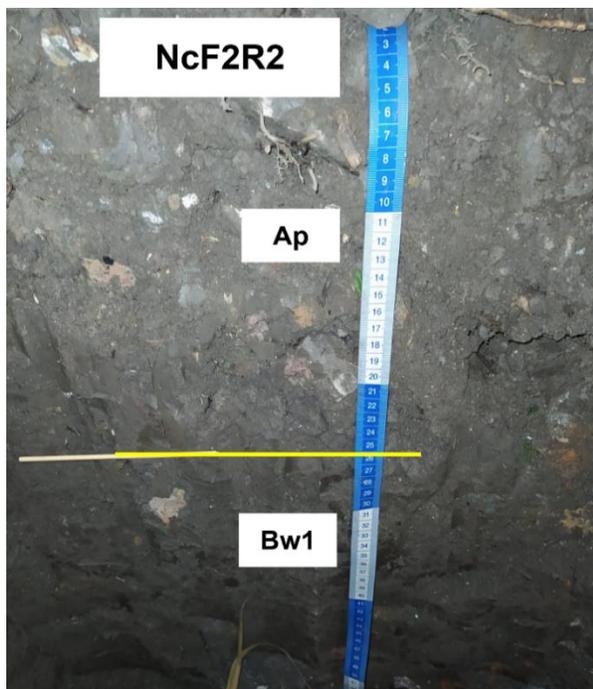
Profundidad	Humedad (%) Hv	Densidad (g*cm ⁻³)		Agregados estables (%)						DPM	Granulometría Bouyoucos (%)			Textura
		Da	Dr	EE4	EE2	EE1	EE0,5	EE0,25	EE0,25		A	L	Ar	
0 -10	37,60	1,15	2,29	14,61	10,41	12,24	13,76	14,08	34,90	1,572	20,31	34,62	45,07	Ar
10 -20	36,50	1,29	2,46	45,31	18,57	13,76	7,17	2,90	12,29	3,562	14,40	24,23	61,37	Ar
20-30	27,80	1,42	2,47	46,04	17,70	13,44	8,07	4,51	10,24	3,585	12,98	17,93	69,09	Ar
30-40	29,10	1,56	2,47	38,61	8,50	10,75	12,01	7,68	22,45	2,880	13,18	32,14	54,68	Ar
40-50	21,50	1,70	2,51	18,76	7,32	8,06	10,74	9,24	45,88	1,639	15,39	40,21	44,40	ArL

Análisis químicos de la cajuela NcF2R1

Profundidad	CO	MO	CT	SCOS
0 -10	3,36	5,79	5,61	38,64
10 -20	2,21	3,81	3,91	28,51
20-30	1,24	2,14	2,45	17,61
30-40	0,65	1,12	2,11	10,14
40-50	0,41	0,71	2,36	6,97

Cajuela: NcF2R2

Clasificación taxonómica: Typic Humudepts, fina, activa, isotérmica
 Símbolo unidad cartográfica: I062 – perfil 25S0459
 Localización
 Municipio: Nocaima
 Vereda: El Cajón
 Finca: Ventorrillo
 Coordenadas: Latitud: 1049826; Longitud: 962717,7
 Paisaje: Montaña
 Tipo de relieve: Crestón
 Forma del terreno: Revés
 Pendiente: 25-50%
 Material Parental: Arcillolitas y lutitas
 Clima ambiental: Templado húmedo
 Horizontes diagnósticos: Epipedón úmbrico, endopedón cámbico
 Régimen de temperatura: Isotérmico
 Régimen de humedad: Údico
 Uso y Manejo: Caña de azúcar para panela - Entresaque



0- 26 cm	Color en húmedo marrón claro y oscuro; textura Arcillo-arenosa (ArA) y Franco-arcillo-arenosa (FArA) ; estructura blocosa subangular media y gruesa, migajosa fina y media; consistencia en húmedo friable, en mojado pegajosa y ligeramente plástica; gravilla y cascajo en 10%; pH 6,5; reacción suave (x) a H ₂ O ₂ y reacción moderada a (xx) HCl.
26-55 cm	Color en húmedo marrón gris oscuro; textura Arcillosa (Ar); estructura blocosa subangular media; consistencia en húmedo blanda, en mojado ligeramente pegajosa y ligeramente plástica; cascajo en 5%; moderada reacción (xx) a HCl.
55 – X cm	Color en húmedo Glay1 4/10 y moteados 7.5YR 5/1 (naranja); textura al tacto Franco-arcillo-arenosa (FArA); estructura blocosa subangular gruesa, suave; consistencia en húmedo firme, en mojado ligeramente pegajosa y no plástica; cascajo en 5%; pH 6,5; reacción suave (x) a H ₂ O ₂ ; reacción moderada (xx) a HCl.

Análisis físicos de la cajuela NcF2R2

Profundidad	Humedad (%) Hv	Densidad (g*cm ⁻³)		Agregados estables (%)						DPM	Granulometría Bouyoucos (%)			Textura
		Da	Dr	EE4	EE2	EE1	EE0,5	EE0,25	EE0,25		A	L	Ar	
0 -10	21,80	1,43	2,59	25,32	5,67	7,75	11,70	8,89	40,67	1,977	45,54	17,96	36,50	ArA
10 -20	20,90	1,54	2,61	35,68	18,36	17,91	13,18	5,09	9,78	3,091	45,83	23,97	30,20	F Ar A
20-30	28,20	1,06	2,39	21,53	14,32	15,22	17,62	11,80	19,51	2,150	26,81	20,10	53,09	Ar
30-40	24,30	1,26	2,48	16,12	12,23	14,11	16,94	14,56	26,03	1,760	22,70	28,32	48,98	Ar
40-50	27,50	1,30	2,46	17,66	10,99	17,50	17,70	12,45	23,70	1,861	27,13	20,01	52,86	Ar

Análisis químicos de la cajuela NcF2R2

Profundidad	CO	MO	CT	SCOS
0 -10	2,62	4,52	6,70	33,72
10 -20	1,66	2,86	4,09	23,01
20-30	2,46	4,24	4,83	23,47
30-40	1,94	3,34	3,46	23,22
40-50	1,54	2,65	4,65	19,02

Cajuela: NcF3R1

Clasificación taxonómica: Typic Humudepts, fina, semiactiva, isotérmica

Símbolo unidad cartográfica: I062 – perfil 25S0408

Localización

Municipio: Nocaima

Vereda: Concepción – parte baja

Finca: Santa Marta

Coordenadas: Latitud: 1049852; Longitud: 963989.1

Paisaje: Montaña

Tipo de relieve: Espinazo

Forma del terreno: Revés

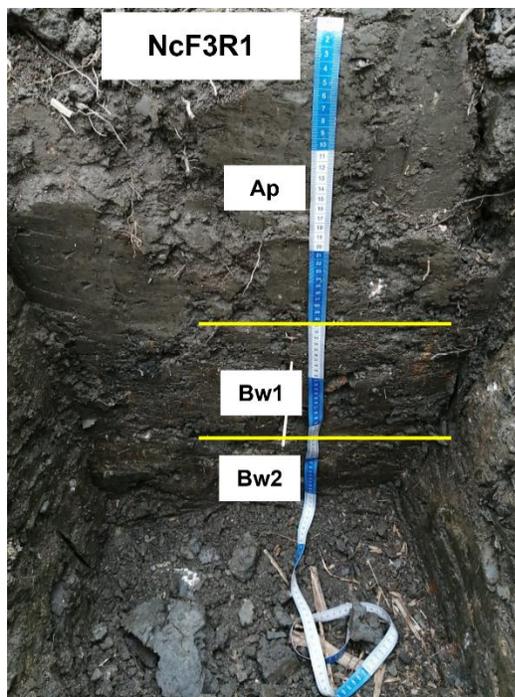
Pendiente: 12-25%

Material Parental: Arcillolitas y lutitas

Clima ambiental: Templado húmedo

Horizontes diagnósticos: Epipedón úmbrico, endopedón cámbico

Uso y Manejo: Caña de azúcar para panela - Entresaque



0- 36 cm	Color en húmedo 5Y 3/1; textura Arcillosa (Ar); estructura blocosa subangular media y gruesa, moderada; consistencia en húmedo firme, en mojado pegajosa y plástica.
36-54 cm	Color en húmedo 5Y 2.5/1, moteados naranja, acumulación de carbonatos; textura Arcillosa (Ar); estructura blocosa subangular, fuerte; consistencia en húmedo muy firme, en mojado pegajosa y ligeramente plástica; suave reacción (x) a HCl.
54 – X cm	Color en húmedo 5Y 3/1 en 70% y 5Y 5/4 30% (amarillento); textura Arcillosa (Ar); estructura blocosa subangular muy fuerte; consistencia en mojado ligeramente plástica; pH 6-7; reacción moderada (xx) a HCl.

Análisis físicos de la cajuela NcF3R1

Profundidad	Humedad (%) Hv	Densidad (g*cm ⁻³)		Agregados estables (%)						DPM	Granulometría Bouyoucos (%)			Textura
		Da	Dr	EE4	EE2	EE1	EE0,5	EE0,25	EEm0,25		A	L	Ar	
0 -10	28,80	1,00	2,34	13,22	12,25	14,04	18,47	12,70	29,32	1,594	14,01	34,67	51,32	Ar
10 -20	27,40	1,16	2,47	34,78	23,24	18,10	8,44	4,77	10,66	3,150	14,49	34,47	51,04	Ar
20-30	24,90	1,18	2,46	26,75	9,37	14,27	14,52	10,47	24,62	2,279	14,57	34,44	50,99	Ar
30-40	22,00	1,25	2,55	16,58	11,57	9,65	11,69	12,34	38,17	1,668	16,90	36,37	46,73	Ar
40-50	25,60	1,26	2,51	25,95	12,95	13,69	15,56	9,78	22,08	2,332	10,67	30,27	59,06	Ar

Análisis químicos de la cajuela NcF3R1

Profundidad	CO	MO	CT	SCOS
0 -10	3,64	6,28	5,66	36,40
10 -20	2,26	3,90	3,60	26,22
20-30	1,75	3,02	3,05	20,65
30-40	1,20	2,07	2,65	15,00
40-50	1,03	1,78	1,97	12,98

Cajuela: NcF3R2

Clasificación taxonómica: Typic Humudepts, fina, semiactiva, isotérmica

Símbolo unidad cartográfica: M011

Localización

Municipio: Nocaíma

Vereda: Concepción – parte baja

Finca: Santa Marta

Coordenadas: Latitud: 1049867; Longitud:

964007,6

Paisaje: Montaña

Tipo de relieve: Espinazo

Forma del terreno: Revés

Pendiente: 12-25%

Material Parental: Arcillolitas y lutitas

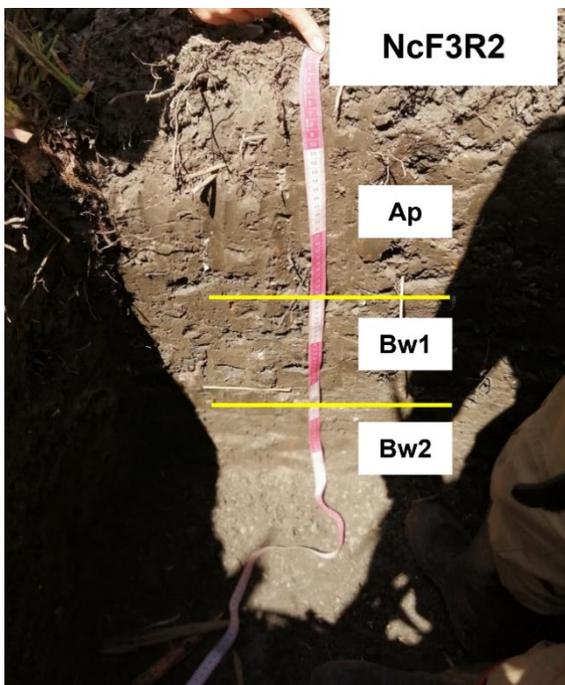
Clima ambiental: Templado húmedo

Horizontes diagnósticos: Epipedón úmbrico,

endopedón cámbico

Uso y Manejo: Caña de azúcar para panela -

Entresaque



0- 30cm	Color en húmedo 5Y 3/1; textura Arcillosa (Ar); estructura blocosa subangular blocosa subangular fina y media; consistencia en húmedo firme, en mojado pegajosa y plástica.
30-50 cm	Color en húmedo 5Y 2.5/1 con moteados naranja (menos que R1); textura Franco-arcillosa (FAR) y arcillosa (Ar); estructura blocosa subangular fuerte; consistencia en húmedo firme, en mojado pegajosa y ligeramente plástica; presencia de raíces hasta 50 cm suave reacción (x) a HCl.
50 – X cm	Algunos moteados naranja 5Y 2.5/1; textura al tacto Arcillo-arenosa (ArA); estructura blocosa subangular muy fuerte; consistencia en húmedo blanda, en mojado plástica y pegajosa; pH 6; reacción moderada (xx) a HCl.

Análisis físicos de la cajuela NcF3R2

Profundidad	Humedad (%) Hv	Densidad (g*cm ⁻³)		Agregados estables (%)						DPM	Granulometría Bouyoucos (%)			Textura
		Da	Dr	EE4	EE2	EE1	EE0,5	EE0,25	EEm0,25		A	L	Ar	
0 -10	26,70	1,17	2,46	32,52	8,26	11,70	14,07	10,51	22,94	2,548	24,59	30,43	44,98	Ar
10 -20	28,50	1,26	2,52	20,72	20,35	19,65	14,01	9,36	15,91	2,308	16,45	34,52	49,03	Ar
20-30	25,50	1,14	2,45	44,86	7,23	11,52	12,09	8,42	15,87	3,224	18,76	38,51	42,73	Ar
30-40	24,20	1,36	2,46	28,06	9,10	13,81	14,70	12,10	22,23	2,347	24,91	40,56	34,53	F Ar
40-50	22,10	1,33	2,27	22,64	11,87	12,40	14,27	12,11	26,71	2,086	25,23	30,18	44,59	Ar

Análisis químicos de la cajuela NcF3R2

Profundidad	CO	MO	CT	SCOS
0 -10	2,30	3,97	4,77	26,91
10 -20	1,97	3,40	3,40	24,82
20-30	1,41	2,43	2,72	16,07
30-40	1,02	1,76	2,61	13,87
40-50	0,76	1,31	2,43	10,11

Cajuela: NcF4R1

Clasificación taxonómica: Typic Humudepts, fina, isotérmica

Símbolo unidad cartográfica: I046 – Observación LE-066

Localización

Municipio: Nocaima

Vereda: San Juanito

Finca: Alto de la cruz

Coordenadas: Latitud: 1053272; Longitud: 966813,8

Paisaje: Montaña

Tipo de relieve: Espinazo

Forma del terreno: Frente

Pendiente: 25-50%

Material Parental: Arcillolitas y lutitas

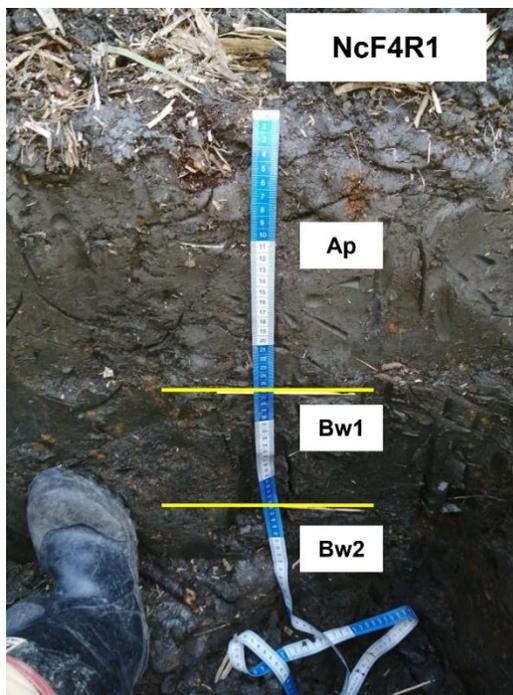
Clima ambiental: Templado húmedo

Horizontes diagnósticos: Epipedón úmbrico,

endopedón cámbico

Uso y Manejo: Caña de azúcar para panela -

Entresaque



0- 26 cm	Color en húmedo 10YR 3/1; textura Arcillo-limosa (ArL) y Arcillosa (Ar); estructura blocosa subangular, fina y media, débil; consistencia en húmedo friable, blanda, en mojado ligeramente pegajosa y ligeramente plástica; presencia de raíces, pH 6-7.
26-45 cm	Color en húmedo Gley1 2.5/10Y Gris con moteados naranjas; textura Arcillosa (Ar); estructura blocosa subangular media y gruesa, fuerte; consistencia en mojado muy pegajosa y ligeramente plástica; suave reacción (x) a HCl.
45 – X cm	Color en húmedo Gley1 4/10Y; textura Franco-arcillosa (FAR); estructura blocosa subangular gruesa, moderada; consistencia en mojado pegajosa y no plástica.

Análisis físicos de la cajuela NcF4R1

Profundidad	Humedad (%) Hv	Densidad (g*cm ⁻³)		Agregados estables (%)						DPM	Granulometría Bouyoucos (%)			Textura
		Da	Dr	EE4	EE2	EE1	EE0,5	EE0,25	EEm0,25		A	L	Ar	
0 -10	46,70	1,00	2,23	10,55	3,29	9,53	15,46	16,67	44,50	1,109	18,59	40,65	40,76	ArL
10 -20	46,80	1,24	2,22	35,46	9,25	14,90	13,25	7,43	19,71	2,780	17,25	36,22	46,53	Ar
20-30	45,80	1,36	2,48	38,00	4,49	10,42	12,83	9,81	24,45	2,735	17,42	36,15	46,43	Ar
30-40	43,20	1,37	2,55	24,42	9,32	7,69	8,91	8,95	40,71	2,011	21,57	38,14	40,29	Ar
40-50	33,70	1,54	2,57	9,95	7,15	6,82	11,59	11,80	52,68	1,111	27,66	36,11	36,23	F Ar

Análisis químicos de la cajuela NcF4R1

Profundidad	CO	MO	CT	SCOS
0 -10	2,23	3,84	3,74	22,30
10 -20	1,43	2,47	2,44	17,73
20-30	0,64	1,10	1,28	8,70
30-40	1,05	1,81	0,65	14,39
40-50	0,21	0,36	0,57	3,23

Cajuela: NcF4R2

Clasificación taxonómica: Typic Humudepts, fina, isotérmica

Símbolo unidad cartográfica: I046 – Observación LE-066

Localización

Municipio: Nocaíma

Vereda: San Juanito

Finca: Alto de la cruz

Coordenadas: Latitud: 1053278; Longitud: 966830,8

Paisaje: Montaña

Tipo de relieve: Espinazo

Forma del terreno: Frente

Pendiente: 25-50%

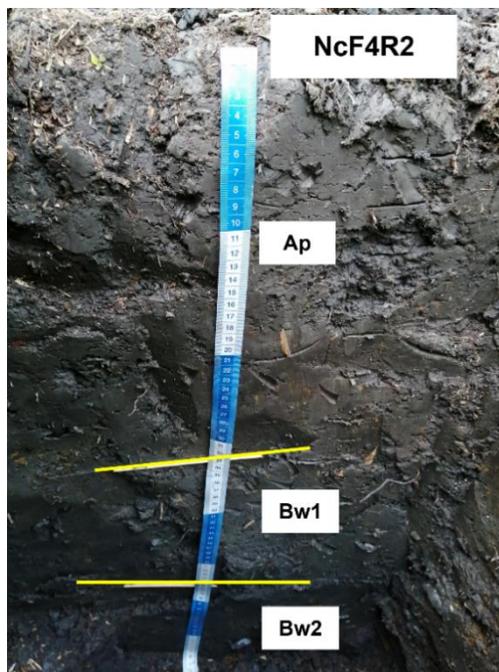
Material Parental: Arcillolitas y lutitas

Clima ambiental: Templado húmedo

Horizontes diagnósticos: Epipedón úmbrico, endopedón cámbico

Uso y Manejo: Caña de azúcar para panela -

Entresaque



0- 33 cm	Color en húmedo 2.5Y 2.5/1, Algunos moteados naranja en perfil; textura al tacto Arcillosa (Ar); estructura Blocosa subangular media y gruesa, moderada; consistencia en húmedo friable, en mojado pegajosa y no plástica; pH 6-7; reacción moderada (xx) a H ₂ O ₂ .
33 – X cm	Color en húmedo Gris con moteados naranjas. Peds entre gris y azules Gley1 3/N; textura al tacto Arcillosa (Ar); estructura blocosa subangular media-gruesa, moderada; consistencia en húmedo firme, en mojado muy pegajosa y ligeramente plástica.

Análisis físicos de la cajuela NcF4R2

Profundidad	Humedad (%) Hv	Densidad (g*cm ⁻³)		Agregados estables (%)						DPM	Granulometría Bouyoucos (%)			Textura
		Da	Dr	EE4	EE2	EE1	EE0,5	EE0,25	EEm0,25		A	L	Ar	
0 -10	40,90	1,02	2,40	12,52	12,97	8,30	11,98	11,00	43,23	1,450	16,63	42,65	40,72	ArL
10 -20	37,70	1,30	2,48	26,16	16,13	18,46	14,33	8,11	16,81	2,489	14,66	38,51	46,83	Ar
20-30	36,50	1,34	2,48	30,59	9,16	10,31	14,11	11,04	24,79	2,443	16,98	38,38	44,64	Ar
30-40	38,50	1,38	2,53	4,96	8,25	8,05	16,54	15,53	46,67	0,907	23,60	32,05	44,35	Ar
40-50	38,50	1,40	2,51	10,92	4,56	6,44	14,42	18,13	45,54	1,121	19,46	36,14	44,40	Ar

Análisis químicos de la cajuela NcF4R2

Profundidad	CO	MO	CT	SCOS
0 -10	1,91	3,29	3,10	19,48
10 -20	1,28	2,21	2,47	16,64
20-30	0,76	1,31	1,50	10,18
30-40	0,44	0,76	0,97	6,07
40-50	0,32	0,55	0,79	4,48

Cajuela: NcF5R1

Clasificación taxonómica: Typic Humudepts,
esquelética - franca, mezclada, superactiva, isotérmica

Símbolo unidad cartográfica: I056 – perfil: 25S0503

Localización

Municipio: Nocaima

Vereda: San Agustín

Finca: La Gloria – Villa Alcira

Coordenadas: Latitud: 1053262; Longitud: 965855,4

Paisaje: Montaña

Tipo de relieve: Espinazo

Forma del terreno: Revés

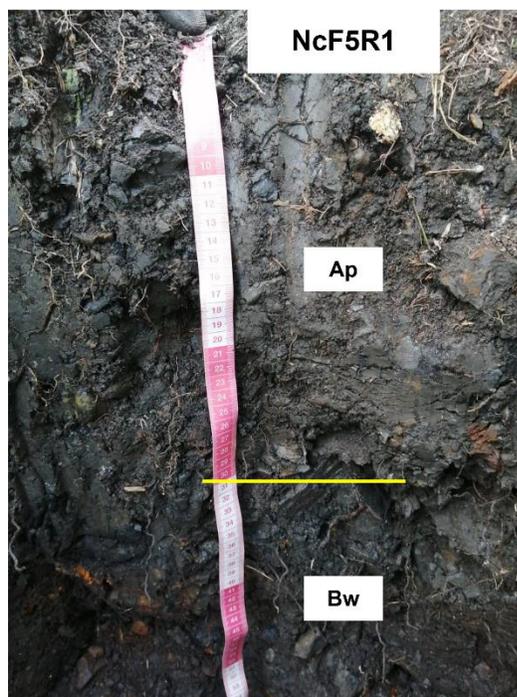
Pendiente: 12-25%

Material Parental: Lodolitas y limolitas

Clima ambiental: Templado húmedo

Horizontes diagnósticos: Epipedón úmbrico,
endopedón cámbico

Uso y Manejo: Caña de azúcar para panela -
Entresaque



0- 30cm	Color en húmedo 10YR 3/1; textura al tacto Franco-arenosa (FA); estructura blocosa subangular media, moderada; consistencia en húmedo suave, enmojado pegajosa y no plástica; Laja en 30%; pH 6,3.
30 – X cm	Color en húmedo 5Y 2.5/1; textura al tacto Franco-arcillo-arenosa (FArA); estructura blocosa subangular media, moderada; consistencia en mojado ligeramente pegajosa, ligeramente plástica; laja en más de 80%; presencia de raíces hasta 50 cm.

Análisis físicos de la cajuela NcF5R1

Profundidad	Humedad (%) Hv	Densidad (g*cm ⁻³)		Agregados estables (%)						DPM	Granulometría Bouyoucos (%)			Textura
		Da	Dr	EE4	EE2	EE1	EE0,5	EE0,25	EE0,25		A	L	Ar	
0 -10	19,50	1,46	2,57	26,34	23,59	20,10	13,70	7,62	8,65	2,732	45,18	26,77	28,05	F Ar A
10 -20	17,90	1,75	2,52	37,26	18,67	14,64	10,48	7,26	11,69	3,136	55,62	18,48	25,90	F Ar A
20-30	18,90			29,52	22,02	22,50	11,45	6,49	8,02	2,889	51,68	28,64	19,68	F
30-40	17,00			26,24	17,80	17,68	15,54	9,73	13,02	2,543	49,68	30,66	19,66	F
40-50	12,00			37,45	11,78	9,88	8,99	10,08	21,82	2,881	55,86	22,46	21,68	F Ar A

Análisis químicos de la cajuela NcF5R1

Profundidad	CO	MO	CT	SCOS
0 -10	1,15	1,98	2,56	11,75
10 -20	0,65	1,12	1,66	7,96
20-30	0,47	0,81	1,29	
30-40	0,40	0,69	0,98	
40-50	0,34	0,59	0,92	

Cajuela: NcF5R2

Clasificación taxonómica: Typic Humudepts,
franca - fina, activa, isotérmica

Símbolo unidad cartográfica: I054 – perfil
25S0369

Localización

Municipio: Nocaíma

Vereda: San Agustín

Finca: La Gloria – Villa Alcira

Coordenadas: Latitud: 1053249; Longitud:
965953,7

Paisaje: Montaña

Tipo de relieve: Espinazo

Forma del terreno: Revés

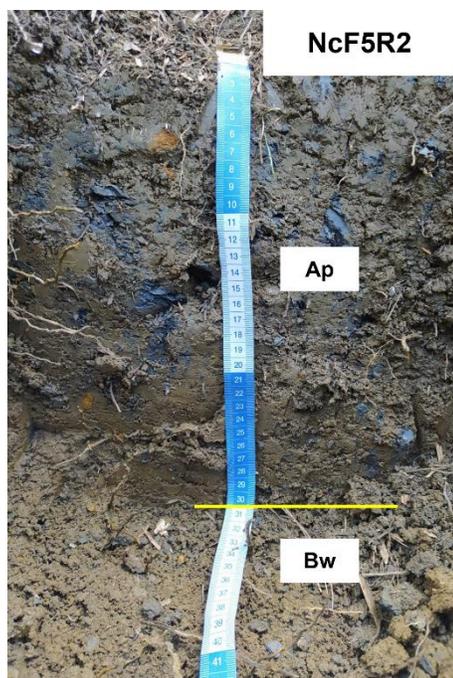
Pendiente: 12-25%

Material Parental: Lodolitas y limolitas

Clima ambiental: Templado húmedo

Horizontes diagnósticos: Epipedón úmbrico,
endopedón cámbico

Uso y Manejo: Caña de azúcar para panela -



0- 30cm	Color en húmedo 10YR 3/3; textura al tacto Franco-arcillo-arenosa (FArA); estructura blocosa subangular media, moderada; consistencia en mojado pegajosa y ligeramente plástica; pH 5,5.
30 – X cm	Color en húmedo 10YR 4/4; textura al tacto Arcillosa (Ar); estructura blocosa subangular media – gruesa, moderada; consistencia en mojado pegajosa y plástica; pH 5,3

Análisis físicos de la cajuela NcF5R2

Profundidad	Humedad (%) Hv	Densidad (g*cm ⁻³)		Agregados estables (%)						DPM	Granulometría Bouyoucos (%)			Textura
		Da	Dr	EE4	EE2	EE1	EE0,5	EE0,25	EE0,25		A	L	Ar	
0 -10	46,20	1,16	2,63	45,38	17,80	18,33	10,06	3,83	4,60	3,627	31,19	32,64	36,17	F Ar
10 -20	26,40	1,28	2,39	22,40	19,43	18,53	16,37	10,84	12,42	2,384	38,05	27,19	34,76	F Ar
20-30	48,00	1,13	2,45	17,89	16,10	18,66	17,60	12,56	17,20	2,037	18,47	29,56	51,97	Ar
30-40	48,30	1,15	2,60	10,37	9,63	11,14	17,97	17,44	33,46	1,320	17,30	27,84	54,86	Ar
40-50	43,90	1,25	2,44	6,07	7,68	7,89	14,56	16,54	47,26	0,943	18,09	36,06	45,85	Ar

Análisis químicos de la cajuela NcF5R2

Profundidad	CO	MO	CT	SCOS
0 -10	2,68	4,62	4,37	31,01
10 -20	1,11	1,91	2,31	14,21
20-30	1,22	2,10	2,84	13,76
30-40	1,67	2,88	2,81	19,13
40-50	1,18	2,03	2,17	14,75

Cajuela: NcF6R1

Clasificación taxonómica: Typic Humudepts, franca-fina, activa, isotérmica

Símbolo unidad cartográfica: I054, perfil 25S0369

Localización

Municipio: Nocaima

Vereda: Cocunche

Finca: La Esperanza

Coordenadas: Latitud: 1053859; Longitud: 962741,5

Paisaje: Montaña

Tipo de relieve: Espinazo

Forma del terreno: Frente

Pendiente: 25-50%

Material Parental: Lodolitas y sales calcáreos

Clima ambiental: Cálido húmedo

Horizontes diagnósticos: Epipedón úmbrico, endopedón cámbico

Uso y Manejo: Caña de azúcar para panela - Entresaque



0- 26 cm	Color en húmedo 10YR 3/1; textura al tacto Franco-arcillo-arenosa (FArA); estructura blocosa subangular, moderada; consistencia en húmedo firme, en mojado ligeramente pegajosa y no plástica; pH 5,3.
26 – X cm	Color en húmedo 10YR 3/1; textura al tacto Franco-arcillosa (FAr); estructura blocosa subangular, media y gruesa, moderada; consistencia en mojado pegajosa y ligeramente plástica.

Análisis físicos de la cajuela NcF6R1

Profundidad	Humedad (%) Hv	Densidad (g*cm ⁻³)		Agregados estables (%)						DPM	Granulometría (%)			Textura
		Da	Dr	EE4	EE2	EE1	EE0,5	EE0,25	EEm0,25		A	L	Ar	
0 -10	31,00	1,18	2,40	29,45	17,08	21,34	13,71	7,99	10,43	2,745	16,94	35,64	47,42	Ar
10 -20	28,40	1,26	2,56	30,61	18,30	18,06	14,01	7,45	11,58	2,804	20,31	30,95	48,74	Ar
20-30	27,00	1,20	2,41	27,02	12,01	15,33	16,18	11,53	17,94	2,398	18,86	30,72	50,42	Ar
30-40	37,60	1,27	2,41	7,89	11,97	7,93	10,48	11,89	49,85	1,137	19,11	32,67	48,22	Ar
40-50	39,10	1,32	2,48	3,59	3,71	4,88	12,23	13,72	61,86	0,621	23,04	32,73	44,23	Ar

Análisis químicos de la cajuela NcF6R1

Profundidad	MO	CO	CT	SCOS
0 -10	3,60	2,09	3,58	24,63
10 -20	2,48	1,44	2,36	18,21
20-30	1,74	1,01	1,74	12,12
30-40	1,41	0,82	1,49	10,44
40-50	1,29	0,75	1,37	9,90

Cajuela: NcF6R2

Clasificación taxonómica: Typic Humudepts,
franca-fina, activa, isotérmica

Símbolo unidad cartográfica: I054, perfil 25S0369

Localización

Municipio: Nocaima

Vereda: Cocunche

Finca: La Esperanza

Coordenadas: Latitud: 1053844; Longitud:

962785,9

Paisaje: Montaña

Tipo de relieve: Espinazo

Forma del terreno: Frente

Pendiente: 25-50%

Material Parental: Lodolitas y shales calcáreos

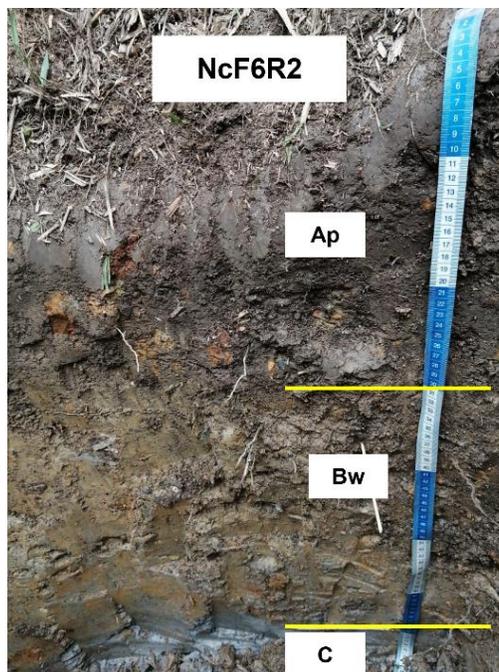
Clima ambiental: Cálido húmedo

Horizontes diagnósticos: Epipedón úmbrico,

endopedón cámbico

Uso y Manejo: Caña de azúcar para panela -

Entresaque



0- 30 cm	Limite difuso; Color en húmedo 10YR 3/1; textura Arcillosa (Ar); estructura blocosa subangular, media y gruesa y migajosa, moderada; consistencia en mojado pegajosa y ligeramente plástica; pedregosidad en 10%.
30- 70cm	Color en húmedo Gris 5Y 5/1 con moteado naranja (no se nota en perfil) 10YR 6/6; textura al tacto Arcillosa (Ar); estructura blocosa subangular, media y gruesa, débil; consistencia en húmedo blanda, en mojado ligeramente pegajosa y ligeramente plástica; presencia de algunas raíces hasta 60 cm; pH 5,2.
70 – X cm	Color en húmedo Gris plateado; textura al tacto Arcillosa (Ar); estructura laminar, delgada, débil; consistencia en mojado pegajosa y ligeramente plástica.

Análisis físicos de la cajuela NcF6R2

Profundidad	Humedad (%) Hv	Densidad (g*cm ⁻³)		Agregados estables (%)						DPM	Granulometría Bouyoucos (%)			Textura
		Da	Dr	EE4	EE2	EE1	EE0,5	EE0,25	EE0,125		A	L	Ar	
0 -10	41,80	1,14	2,37	9,72	10,52	14,64	19,60	16,94	28,59	1,365	23,84	29,11	47,05	Ar
10 -20	35,70	1,22	2,33	15,68	12,28	11,47	15,64	15,28	29,65	1,693	30,54	26,86	42,60	Ar
20-30	34,70	1,36	2,42	5,75	6,69	7,21	11,47	13,25	55,62	0,859	21,07	32,70	46,23	Ar
30-40	37,80	1,43	2,56	2,67	2,72	4,30	8,39	10,94	70,98	0,499	17,25	32,60	50,15	Ar
40-50	39,20	1,33	2,45	0,41	0,57	1,83	6,46	11,14	79,59	0,259	13,07	28,56	58,37	Ar

Análisis químicos de la cajuela NcF6R2

Profundidad	CO	MO	CT	SCOS
0 -10	1,75	3,02	3,20	17,96
10 -20	1,60	2,76	2,52	17,54
20-30	1,10	1,90	1,63	13,49
30-40	0,58	1,00	0,98	8,28
40-50	0,34	0,59	0,74	4,51

Cajuela: NcF7R1

Clasificación taxonómica: Eutric Humudepts, esquelética, arcillosa, mezclada, isotérmica. Símbolo unidad cartográfica: I051 -

Localización

Municipio: Nocaíma

Vereda: Baquero

Finca: El Porvenir

Coordenadas: Latitud: 1054524; Longitud: 963316,9

Paisaje: Montaña

Tipo de relieve: Loma

Forma del terreno: Cima y ladera

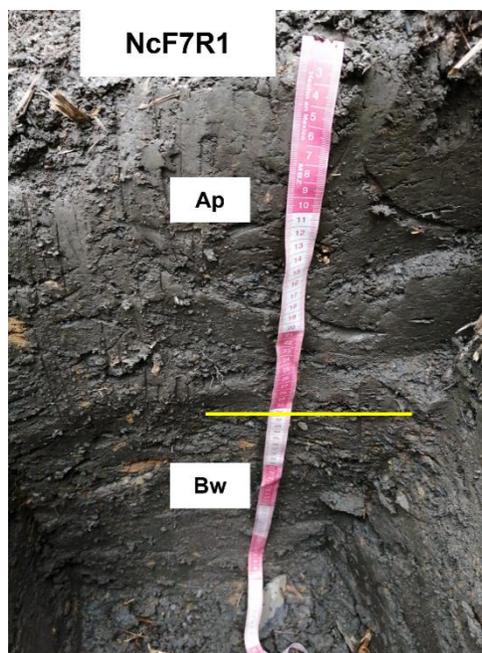
Pendiente: 12-25%

Material Parental: Arcillolitas y lutitas

Clima ambiental: Templado húmedo

Horizontes diagnósticos: Epipedón úmbrico, endopedón cámbico

Uso y Manejo: Caña de azúcar para panela - Parejo sin renovación



0- 30 cm	Textura Arcillosa (Ar); estructura blocosa subangular gruesa, media y fina, migajosa fina, débil; consistencia en húmedo friable, en mojado pegajosa y ligeramente plástica; pH 5,5.
30 – X cm	Color en húmedo Café con moteado naranja en 25%; textura Arcillosa (Ar); estructura blocosa subangular media y gruesa, moderada; consistencia en húmedo blanda, en mojado pegajosa y ligeramente plástica; pH 5,5.

Análisis físicos de la cajuela NcF7R1

Profundidad	Humedad (%) Hv	Densidad (g*cm ⁻³)		Agregados estables (%)						DPM	Granulometría Bouyoucos (%)			Textura
		Da	Dr	EE4	EE2	EE1	EE0,5	EE0,25	EEm0,25		A	L	Ar	
0 -10	33,30	0,74	2,18	18,32	10,86	15,64	19,78	14,95	20,45	1,890	17,50	31,54	50,96	Ar
10 -20	42,90	1,01	2,41	16,61	13,89	12,39	13,97	13,36	29,79	1,791	15,05	36,45	48,50	Ar
20-30	39,30	1,06	2,24	13,86	10,25	12,40	15,40	13,70	34,39	1,535	9,30	37,05	53,65	Ar
30-40	42,80	1,23	2,38	22,55	6,95	11,24	17,12	14,26	27,89	1,947	13,65	31,89	54,46	Ar
40-50	37,60	1,33	2,28	13,22	9,25	15,23	18,38	15,44	28,47	1,531	30,47	28,95	40,58	Ar

Análisis químicos de la cajuela NcF7R1

Profundidad	CO	MO	CT	SCOS
0 -10	2,87	4,95	5,70	21,27
10 -20	2,32	4,00	3,94	23,32
20-30	2,19	3,78	3,69	23,15
30-40	2,54	4,38	3,16	31,33
40-50	1,20	2,07	1,80	15,93

Cajuela: NcF7R2

Clasificación taxonómica: Eutric Humudepts, esquelética, arcillosa, mezclada, isotérmica.

Símbolo unidad cartográfica: I051 -

Localización

Municipio: Nocaima

Vereda: Baquero

Finca: El Porvenir

Coordenadas: Latitud: 1054506; Longitud: 963323,3

Paisaje: Montaña

Tipo de relieve: Loma

Forma del terreno: Cima y ladera

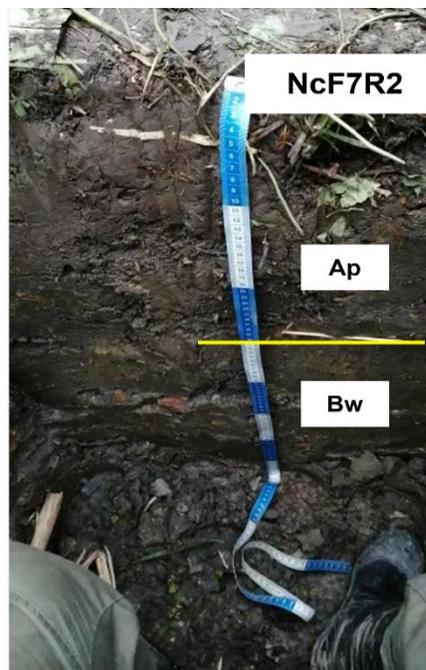
Pendiente: 12-25%

Material Parental: Arcillolitas y lutitas

Clima ambiental: Templado húmedo

Horizontes diagnósticos: Epipedón úmbrico, endopedón cámbico

Uso y Manejo: Caña de azúcar para panela - Parejo sin renovación



0- 30 cm	Color en húmedo café grisáceo, 5% moteados; textura Arcillo-limosa (ArL) y Arcillosa (Ar); estructura blocosa subangular gruesa, media y fina, débil; consistencia en húmedo friable, en húmedo pegajosa y ligeramente plástica; pH 5,9.
30 – X cm	Color en húmedo gris oscuro, 30% moteados naranja; textura al tacto Arcillosa (Ar); estructura blocosa subangular gruesa, moderada; consistencia en húmedo firme, en mojado pegajosa y ligeramente plástica; pH 5,9.

Análisis físicos de la cajuela NcF7R2

Profundidad	Humedad (%) Hv	Densidad (g*cm ⁻³)		Agregados estables (%)						DPM	Granulometría Bouyoucos (%)			Textura
		Da	Dr	EE4	EE2	EE1	EE0,5	EE0,25	EE0,25		A	L	Ar	
0 -10	49,40	0,73	2,21	15,84	13,18	14,17	17,20	13,63	25,98	1,771	14,18	44,44	41,38	ArL
10 -20	44,70	1,12	2,30	16,40	11,25	17,26	17,42	13,54	24,13	1,792	8,83	37,24	53,93	Ar
20-30	47,20	1,00	2,37	24,88	8,34	15,65	16,42	12,46	22,25	2,175	22,79	29,52	47,69	Ar
30-40	42,60	0,97	2,33	18,65	8,10	10,55	13,91	13,78	35,01	1,720	6,09	36,10	57,81	Ar
40-50	43,50	1,40	2,44	8,36	5,99	4,61	7,38	8,73	64,93	0,920	9,18	33,31	57,51	Ar

Análisis químicos de la cajuela NcF7R2

Profundidad	CO	MO	CT	SCOS
0 -10	3,61	6,22	6,40	26,48
10 -20	2,43	4,19	3,92	27,28
20-30	1,83	3,15	2,66	18,28
30-40	1,87	3,22	3,41	18,06
40-50	0,69	1,19	1,06	9,64

Cajuela: QnF3Pastura

Clasificación taxonómica: Typic Hapludolls, fina, activa, isotérmica

Símbolo unidad cartográfica: M011 – perfil 25S0455

Localización

Municipio: Quebradanegra

Vereda: La Esperanza

Finca: La Argelia

Coordenadas: Latitud: 1057131; Longitud: 953020.1

Paisaje: Montaña

Tipo de relieve: Crestón

Forma del terreno: Revés

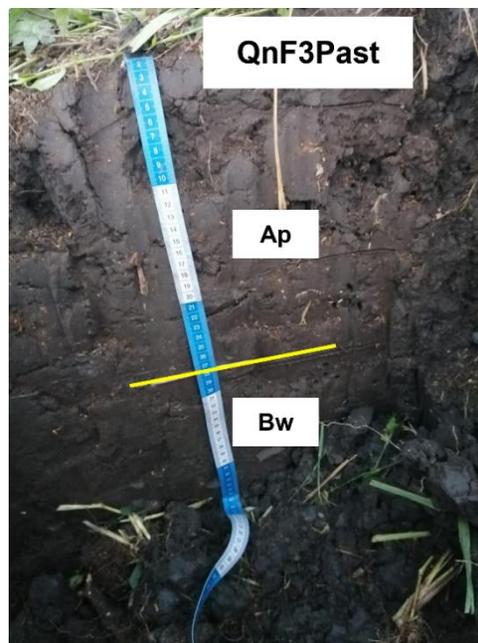
Pendiente: 25-50%

Material Parental: Arcillolitas y lutitas

Clima ambiental: Templado húmedo

Horizontes diagnósticos:

Uso y Manejo: Pastura



0- 27cm	Color en húmedo 10YR 3/1, café muy oscuro; textura al tacto Arcillosa (Ar); estructura blocosa subangular media y gruesa, firme; consistencia en húmedo firme, en mojado ligeramente pegajosa, ligeramente plástica; pH 6,1; reacción suave (x) a H ₂ O ₂ ; reacción suave (x) a HCl.
27 – X cm	Color en húmedo 10YR 3/1; textura al tacto Arcillosa (Ar); estructura blocosa subangular fina, media y gruesa, muy firme; consistencia en húmedo firme (menos que H1), pegajosa, plástica; pH 6,5, reacción moderada (xx) a HCl.

Análisis físicos de la cajuela QnF3Pastura

Profundidad	Humedad (%) Hv	Densidad (g*cm ⁻³)		Agregados estables (%)						DPM	Granulometría Bouyoucos (%)			Textura
		Da	Dr	EE4	EE2	EE1	EE0,5	EE0,25	EE0,25		A	L	Ar	
0 -10	30,70	1,27	2,37	48,06	12,37	9,11	6,84	5,33	18,29	3,485	15,45	26,91	57,64	Ar
10 -20	30,80	1,29	2,34	33,11	17,97	14,85	10,87	6,85	16,35	2,876	14,12	32,84	53,04	Ar
20-30	29,30	1,39	2,38	26,72	14,79	18,13	14,50	7,21	18,66	2,478	13,94	28,80	57,26	Ar
30-40	34,50	1,40	2,46	32,45	11,21	15,19	15,92	8,32	16,91	2,683	16,00	28,80	55,20	Ar
40-50	33,00	1,40	2,47	29,15	6,81	12,03	14,84	8,77	28,40	2,314	11,69	30,92	57,39	Ar

Análisis químicos de la cajuela QnF3Pastura

Profundidad	CO	MO	CT	SCOS
0 -10	2,66	4,59	4,81	33,78
10 -20	1,86	3,21	3,92	23,99
20-30	1,51	2,60	3,26	20,99
30-40	1,29	2,22	3,13	18,06
40-50	1,24	2,14	3,33	17,36

ANEXO II

Tabla II-1. Índices de vegetación derivados de imagen sentinel -2

Covariable	Formula
NDVI	$NDVI = \frac{B8 - B4}{B8 + B4}$
GNDVI	$GNDVI = \frac{B8 - B3}{B8 + B3}$
WDVI	$WDVI = B8 - \left(\frac{B8}{B4}\right) * B4$
SATVI	$SATVI = \left(\frac{B11-B4}{B11+B4}\right) * 1 + L - \left(\frac{B12}{2}\right)$
TVI	$TVI = \sqrt{\left(\frac{B8-B4}{B8+B4} + 0,5\right)} * 100$
EVI	$EVI = 2,5 * \left(\frac{B8 - B4}{(B8 + 6 * B4 - 7,5 * B2) + 1}\right)$
Clay	$Clay = \frac{B11}{B12}$
BI	$BI = \left(\frac{\sqrt{B3 * B3 + B4 * B4 + B8 * B8}}{3}\right)$
SR	$SR = \frac{B4 - B8}{B4 + B8}$
RVI	$RVI = \frac{B8}{B4}$
SAVI	$SAVI = \frac{(B8 - B4) * 1,5}{B8 - B4 + 0,5}$
MSAVI2	$MSAVI2 = \frac{B8 - B2 * B8 + 1 - \sqrt{(2 * B8 + 1)^2 - 8 * B8 - B4}}{2}$
SRIRE-5-6-7	$SRIRE - 5 - 6 - 7 = \frac{B8}{Red\ Edge\ (5 - 6 - 7)}$
RB	$RB = \frac{B4}{B2}$
NDRE-5-6-7	$NDRE - 5 - 6 - 7 = \frac{B8 - Red\ Edge\ (5 - 6 - 7)}{B8 + Red\ Edge\ (5 - 6 - 7)}$
NDVI -5-6-7	$NDVI - 5 - 6 - 7 = \frac{Red\ Edge\ (5 - 6 - 7) - B4}{Red\ Edge\ (5 - 6 - 7) + B4}$

NGRDI	$NGRDI = \frac{B3 - B4}{B3 + B4}$
AVI	$AVI = (B8 * (1 - B4) * (B8 - B4)) * 1/3$
NDMI	$NDMI = \frac{B8 - B11}{B8 + B11}$
BSI	$BSI = \frac{(B11 + B4) - (B8 + B2)}{(B11 + B4) + (B8 + B2)}$
NDWI	$NDWI = \frac{B3 - B8}{B3 + B8}$
MSI	$MSI = \frac{B11}{B8}$
GCI	$GCI = \frac{B8}{BB3} - 1$

Fuente: Adaptado de Gholizadeh *et al.*, (2018), Marini y Santamaría. (2019) y http://www.saga-gis.org/saga_tool_doc/2.2.0/a2z.html

Anexo III

Parámetros morfométricos derivados del modelo digital de elevación a través de SAGA

Parámetro	Procedimiento
Pendiente	Calculada en porcentaje con el módulo slope, Aspect, curvature
Aspecto	Calculado en grados con el módulo slope, Aspect, curvature
Curvatura transversal	Unidades por defecto con el módulo slope, Aspect, curvature
Curvatura longitudinal	Unidades por defecto con el módulo slope, Aspect, curvature
Índice de Convergencia	Unidades por defecto usando el módulo Basic Terrain Analysis
Closed depressions	Unidades por defecto usando el módulo Basic Terrain Analysis
Flow accumulation	Unidades por defecto usando el módulo Flow accumulation (recursive)
TWI	Unidades por defecto usando el módulo Terrain Wetness Index
LS Factor	Unidades por defecto usando el módulo Basic Terrain Analysis
Channel Network base level	Unidades por defecto usando el módulo Basic Terrain Analysis
Vertical distance to channel network	Unidades por defecto (metros) usando el módulo Vertical distance to channel network
Valley depth	Unidades por defecto usando el módulo Basic Terrain Analysis

Relative slope position	Unidades por defecto usando el módulo Basic Terrain Analysis
MRVBF	Unidades por defecto usando el módulo Multiresolution Index of Valley Bottom Flatness
MRRTF	Unidades por defecto usando el módulo Multiresolution Index of Valley Bottom Flatness
TRI	Unidades por defecto usando el módulo Terrain Ruggedness Index
TPI	Unidades por defecto usando el módulo Topographic Position Index
Positive Openness	Unidades por defecto usando el módulo Topographic Openness
Negative Openness	Unidades por defecto usando el módulo Topographic Openness

Anexo IV

Estadística descriptiva de las variables determinadas en laboratorio y derivadas por profundidades.

Est.	Hum	Da	DR	EE4	EE2	EE1	EE0,5	EE0,25	EE0,125	A	Ar	L	MO	CO	P	SCOS
Unidad	%	g*cm ⁻³	g*cm ⁻³	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	t*ha ⁻¹
PROFUNDIDAD 0 – 10 cm																
Media	31,62	1,15	2,36	19,29	12,90	12,77	13,48	10,79	30,77	28,99	40,91	30,10	4,45	2,58	3,9	27,01
SD	11,87	0,23	0,14	11,73	10,59	4,70	5,49	4,32	16,67	19,03	13,75	7,94	2,10	1,22	6,9	9,52
Mínimo	5,20	0,67	2,02	1,53	3,29	5,76	3,35	1,55	4,60	11,10	9,80	15,26	1,26	0,73	0	9,72
Máximo	49,40	1,58	2,63	48,06	60,40	21,82	29,91	18,23	70,72	68,91	60,52	44,44	11,22	6,51	30	43,62
Mediana	31,91	1,16	2,36	15,23	10,93	12,51	12,87	10,25	28,87	20,26	41,15	30,55	4,21	2,44	0	25,98
Curtosis	-0,65	- 0,14	0,41	0,23	15,51	-0,82	1,80	-0,55	-0,17	-0,29	-0,23	-0,57	2,68	2,68	6,7	-0,92
CA	-0,44	- 0,33	- 0,27	0,78	3,52	0,41	0,80	-0,01	0,48	1,08	-0,70	-0,26	1,27	1,27	2,3	0,10
CV	0,38	0,20	0,06	0,61	0,82	0,37	0,41	0,40	0,54	0,66	0,34	0,26	0,47	0,47		0,35
PROFUNDIDAD 10 - 20 cm																
Media	31,35	1,29	2,42	30,43	17,09	15,69	11,79	7,49	17,50	29,06	42,04	28,90	3,32	1,93	3,2	23,02
SD	11,39	0,20	0,10	9,26	3,74	2,98	3,04	3,38	8,08	20,18	15,31	7,22	1,52	0,88	6,7	8,65
Mínimo	8,40	0,95	2,20	15,68	8,47	11,43	5,96	0,70	7,34	8,83	9,78	15,19	1,12	0,65	0	7,96
Máximo	51,30	1,75	2,61	46,92	23,41	21,68	17,42	15,28	34,62	70,99	64,06	41,93	7,28	4,22	30	40,09
Mediana	31,08	1,28	2,40	30,52	17,53	15,17	11,00	7,47	15,20	19,49	46,25	28,04	3,06	1,77	0	23,01
Curtosis	-0,71	0,19	- 0,53	-1,16	0,22	-1,04	-0,76	0,25	-0,58	-0,29	-0,29	-1,01	0,46	0,45	8,8	-0,83
CA	-0,33	0,45	- 0,12	0,04	-0,58	0,13	0,12	0,34	0,84	1,06	-0,69	-0,18	0,74	0,74	2,7	0,18
CV	0,36	0,15	0,04	0,30	0,22	0,19	0,26	0,45	0,46	0,69	0,36	0,25	0,46	0,46		0,38
PROFUNDIDAD 20 - 30 cm																
Media	31,47	1,32	2,42	28,47	15,37	14,73	12,82	9,00	19,62	25,74	45,33	28,93	2,49	1,44	3,6	18,14
SD	10,23	0,19	0,08	12,36	7,65	3,54	3,26	3,31	10,42	17,16	15,30	6,20	1,08	0,63	8,3	6,72
Mínimo	9,10	1,00	2,22	4,32	4,49	7,21	4,85	2,49	5,81	8,25	11,80	17,93	0,50	0,29	0	4,70
Máximo	49,30	1,78	2,55	54,85	45,02	22,50	17,62	13,70	55,62	68,97	69,09	38,51	4,29	2,49	30	31,62
Mediana	30,20	1,33	2,42	26,73	14,76	14,91	13,28	9,85	17,49	18,81	46,33	29,23	2,46	1,43	0	18,28
Curtosis	-0,31	- 0,38	1,57	-0,20	7,68	-0,33	0,05	-0,84	4,15	0,74	0,24	-0,95	-0,90	-0,90	6,4	-0,45
CA	-0,15	0,31	- 0,74	0,20	2,15	0,00	-0,72	-0,58	1,62	1,34	-0,69	-0,27	-0,04	-0,04	2,6	0,01
CV	0,32	0,15	0,03	0,43	0,50	0,24	0,25	0,37	0,53	0,67	0,34	0,21	0,43	0,43		0,37
PROFUNDIDAD 30 - 40 cm																
Media	30,89	1,37	2,47	22,45	11,80	12,76	13,03	10,23	29,72	26,77	44,52	28,72	1,96	1,14	2,7	15,15
SD	10,02	0,15	0,10	11,22	4,69	4,16	3,19	3,37	15,61	18,30	15,38	6,98	0,86	0,50	6,5	5,87
Mínimo	11,60	0,97	2,26	2,67	2,72	4,30	6,64	5,22	10,45	4,62	9,77	14,12	0,69	0,40	0	6,07
Máximo	48,30	1,72	2,60	47,05	24,01	23,13	17,97	17,44	70,98	73,04	66,83	40,56	4,38	2,54	30	31,33

Est.	Hum	Da	DR	EE4	EE2	EE1	EE0,5	EE0,25	EEm0,25	A	Ar	L	MO	CO	P	SCOS
Unidad	%	g*cm ⁻³	g*cm ⁻³	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	t*ha ⁻¹
Mediana	30,85	1,37	2,47	22,50	10,90	12,15	13,02	9,97	26,41	22,14	45,76	29,52	1,91	1,11	0	15,07
Curtosis	-0,71	1,80	- 0,66	-0,26	0,46	0,25	-0,88	-0,85	1,17	0,61	-0,18	-0,74	0,91	0,91	12	0,76
CA	-0,24	- 0,17	- 0,45	0,06	0,63	0,37	-0,24	0,30	1,10	1,26	-0,65	-0,36	0,69	0,69	3,2	0,52
CV	0,32	0,11	0,04	0,50	0,40	0,33	0,25	0,33	0,53	0,68	0,35	0,24	0,44	0,44		0,39
PROFUNDIDAD 40 - 50 cm																
Media	29,15	1,46	2,46	20,19	10,49	11,11	12,83	10,38	35,00	26,12	44,54	29,35	1,34	0,78	4,46	10,85
SD	9,65	0,17	0,09	11,40	4,15	4,76	4,29	3,27	17,44	17,79	14,84	6,25	0,63	0,36	9,56	4,98
Mínimo	11,70	1,25	2,27	0,41	0,57	1,83	6,46	4,25	11,30	9,04	9,75	17,35	0,36	0,21	0	2,73
Máximo	43,90	1,86	2,61	39,55	20,00	23,63	25,82	18,13	79,59	69,06	68,81	40,21	2,65	1,54	30	19,02
Mediana	29,42	1,41	2,46	18,86	10,93	11,24	11,98	10,23	28,55	19,51	44,62	30,23	1,33	0,77	0	10,43
Curtosis	-0,73	- 0,37	0,17	-1,04	0,38	0,50	1,80	0,13	0,06	0,57	0,09	-0,95	-0,95	-0,95	3,77	-1,27
CA	-0,39	0,78	- 0,54	0,19	-0,26	0,43	1,01	0,40	0,73	1,31	-0,75	-0,32	0,04	0,04	2,22	-0,09
CV	0,33	0,11	0,04	0,56	0,40	0,43	0,33	0,32	0,50	0,68	0,33	0,21	0,47	0,47		0,46

SD: Desviación estándar, CA: Coeficiente de asimetría, Hum: Humedad, Da: Densidad aparente, DR: Densidad real. EE4: Agregados estables mayores a 4 mm de diámetro, EE2: Agregados estables mayores a 2 mm de diámetro, EE0,5 Agregados estables mayores a 0,5 mm de diámetro, EE0,25: Agregados estables mayores a 0,25 mm de diámetro, EEm0,25: Agregados inferiores a 0,25 mm de diámetro, A: Arena, L: limo, Ar: Arcilla, MO: Materia orgánica, CO: carbono orgánico, P: Pedregosidad, SCOS: stock del carbono orgánico del suelo.