

UNIVERSIDAD DE PAMPLONA

Facultad de Ciencias Agrarias
Programa de Ingeniería Agronómica



Evaluación de la calidad de suelos en ocho fincas productoras de papa (*Solanum tuberosum* L.),
en el municipio de Silos, corregimiento de La Laguna, Norte de Santander.

Presentado Por:
René Antonio Hernández
Código: 88030236

Pamplona, Colombia
2024

UNIVERSIDAD DE PAMPLONA

Facultad de Ciencias Agrarias
Programa de Ingeniería Agronómica



Evaluación de la calidad de suelos, en ocho fincas productoras de papa (*Solanum tuberosum* L.),
en el municipio de Silos, corregimiento de La Laguna, Norte de Santander.

Presentado por:

René Antonio Hernández

Código: 88030236

Director

Ana Francisca González Pedraza

Doctora en Ciencias y mención en Ecología

Pamplona, Colombia

2024

Tabla de Contenido

Tabla de figuras.....	6
Introducción.....	1
Planteamiento del Problema	3
Justificación.....	4
Objetivo General.....	4
Objetivos Específicos	4
Delimitación	5
Marco Teórico.....	6
Antecedentes	6
Marco contextual.....	9
Amenazas derivadas de la variabilidad climática en el municipio de Silos.....	10
Bases Conceptuales	12
Suelos.....	12
Calidad del Suelo.....	13
Indicadores de calidad del suelo.....	14
Indicadores químicos	14
Indicadores físicos.....	15
Indicadores biológicos	15
Pérdida de fertilidad de suelos	16
Propiedades fisicoquímicas del suelo	16
Textura	16
Densidad aparente.....	16
Importancia de la materia orgánica en el suelo.....	16
Índice óptimo de pH.....	17
Generalidades del cultivo de papa.....	18
Marco legal	19
Metodología.....	21
Tipo de investigación	21

Selección de los sitios de estudio y toma de muestras de suelos	21
Datos de las fincas y lotes muestreados	22
Análisis de laboratorio	23
Propiedades físicas de los suelos	23
Textura.	23
Humedad gravimétrica	24
Humedad volumétrica	24
Densidad aparente	25
Densidad real	25
Porosidad total (%).....	25
Resistencia mecánica a la penetración.	26
Características químicas de los suelos	26
pH	26
Conductividad eléctrica.....	26
Materia orgánica total	26
Evaluación de la calidad del suelo (Análisis de datos).	27
Análisis estadístico de los datos.....	27
Resultados y discusión	28
Características físicas y químicas de los suelos cultivados con papa.....	28
Conclusiones	39
Recomendaciones	40
Referencias bibliográficas	41
EVIDENCIAS	47
ANEXOS	50
Resultados estadísticos	50
MACROS Y MICROS	50

Lista de Tablas

TABLA 1. DATOS DE LOS LOTES MUESTREADOS 22

TABLA 2. COMPARACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN DEL TAMAÑO DE PARTÍCULAS ENTRE FINCAS..... 28

TABLA 3. RESULTADOS DE LA COMPARACIÓN ESTADÍSTICA ENTRE FINCAS PARA ALGUNAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DEL SUELOS 30

TABLA 4. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LAS CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS EVALUADAS EN LOS SUELOS DE LAS FINCAS ESTUDIADAS 33

TABLA 5. COMPARACIÓN DE LOS MACRONUTRIENTES Y LA CIC EN LOS SUELOS DE LAS FINCAS ESTUDIADAS..... 35

TABLA 6. COMPARACIÓN EN LA CONCENTRACIÓN DE MICRONUTRIENTES PRESENTES EN LOS SUELOS DE LAS FINCAS ESTUDIADAS 37

Lista de figuras

FIGURA 1. APTITUD DE USO DE SUELOS PARA EL SISTEMA PRODUCTIVO DE PAPA EN EL MUNICIPIO DE SILOS. FUENTE: CORPOICA (2015B).....	10
FIGURA 2 MAPAS BIOFÍSICOS DEL MUNICIPIO DE SILOS (NORTE DE SANTANDER).....	10
FIGURA 3.. MAPA SATELITAL ÁREAS DONDE SE TOMARON LAS MUESTRAS. PUNTOS ROJOS, UBICACIÓN DE LOS LOTES DONDE SE TOMARON LAS MUESTRAS. TOMADO DE: COORDENADAS TOMADAS EN CAMPO Y BUSCADAS EN LA APLICACIÓN GOOGLE MAPS.	21

Introducción

Los suelos son la base de la agricultura y el medio en el que crecen casi todas las plantas destinadas a la producción de alimentos (FAO, 2015). La producción agrícola depende enormemente de la calidad de los suelos. Según datos de la FAO (2015) el 95% de los alimentos que se consumen se producen directa o indirectamente en los suelos. Los suelos proporcionan los nutrientes esenciales, el agua, el oxígeno y el sostén para las raíces que las plantas destinadas a la producción de alimentos necesitan para crecer y florecer (FAO, 2015). Además, cumplen una función de amortiguación al proteger las delicadas raíces de las plantas de las fluctuaciones de temperatura.

La producción mundial del cultivo de papa supera los 300 millones de toneladas al año. Se trata del tercer cultivo alimentario de consumo humano en el mundo, después del arroz y el trigo, y constituye el alimento básico de aproximadamente 1.400 millones de personas (CIP, 2019). Frente al crecimiento de la población y el aumento de las tasas globales de hambre, la papa es esencial en términos de seguridad alimentaria (CIP, 2019). En Colombia, el cultivo de papa se desarrolla en 14 departamentos. Las áreas productoras están ubicadas en cotas altitudinales superiores a 2.000 msnm, con una zona óptima de producción entre 2.500 y 3.000 msnm (Fedepapa, 2019).

El cultivo de papa intensivo y extensivo ha generado importantes cambios en los ecosistemas altoandinos de Colombia (bosques altoandinos, subpáramo, páramo, ubicados por encima de 2.800 msnm. Según Van der Hammen et al., 2002, debido a los requerimientos de agroquímicos, riego y maquinaria para su producción (Cortés-Duque & Sarmiento, 2013; Tejada-Guzmán, 2020).

En tal sentido, fue necesario estudiar más de cerca los suelos en los que se cultiva papa, especialmente en el municipio de Silos, Norte de Santander.

Planteamiento del Problema

En Colombia el modelo de agricultura que se impone ha generado toda una serie de efectos negativos sobre el medio ambiente, entre los que señala el deterioro del recurso suelo, efectos sobre el recurso hídrico, efectos en los ecosistemas asociados a la agricultura, entre los que se señalan los conflictos de uso en los páramos, pérdida de humedales, desaparición de las selvas secas tropicales, reducción de la biodiversidad y adicionalmente se expresan los efectos que ha generado ese tipo de agricultura sobre la salud humana a causa del uso indiscriminado e inadecuado de plaguicidas (Guillen-López y Gómez-García, 2016).

Por tal razón, al momento de llevar a cabo alguna actividad agrícola en el suelo es necesario conocer las propiedades y fertilidad del suelo, sin embargo, el hecho de que un suelo sea fértil no quiere decir que sea productivo, ya que para que las plantas tengan un adecuado desarrollo es indispensable la presencia de ciertos niveles de parámetros humedad, pH, materia orgánica (MO), nitrógeno (N), fósforo (P), capacidad de intercambio catiónico (CIC) que permitan un buen crecimiento, un ejemplo es el P, ya que este puede estar en altas cantidades en el suelo, pero no es aprovechable por las plantas, lo cual hace que no se dé un buen desarrollo de los cultivos.

Con la realización de este trabajo investigativo se buscó describir, analizar y diagnosticar, algunas propiedades físicas y químicas de los suelos, empleados para la producción de papa, en el municipio de Silos.

Justificación

El consumo de papa en los hogares colombianos está en 99%, dato de gran importancia para el país y la región que cuenta con un área extensa para el desarrollo de gran variedad de cultivos de papa, siendo despensa para los departamentos de Santander, Norte de Santander, Arauca y centro del país.

Para la evaluación de la sustentabilidad de los sistemas de producción es necesario conocer algunas propiedades que permitan definir la calidad del suelo (García et al., 2012). Según la UPRA en el departamento de Norte de Santander, existen cerca de 73.000 ha sembradas con papa a 2018, en los municipios de Chitaga, Pamplona y Silos (FEDEPAPA y FNFP ,2020) Para el año 2019 se proyecta que estas cifras se reducirán en un 4% las hectáreas sembradas y 3.2 % las toneles cosechadas (FEDEPAPA y FNFP., 2020).

Este proyecto se enfocó en caracterizar por medio de análisis físicos y químicos en ocho fincas dedicadas al cultivo de papa, que no cuentan con un ordenamiento productivo, que permita la planificación eficiente del uso del suelo, acabando con la manera intuitiva de sembrar y dándole un mejor enfoque a cultivo.

Objetivo General

Describir las propiedades físicas y químicas de los suelos, utilizados para la producción de papa, en el municipio de Silos.

Objetivos Específicos

Analizar algunas características físicas y químicas de los suelos cultivados con papa.

Diagnosticar la calidad de los suelos de acuerdo con los datos obtenidos en campo y laboratorio.

Delimitación

El presente proyecto abarca ocho fincas cultivadas con papa ubicadas en el municipio Silos comprendido entre Bucaramanga y Pamplona, en Norte de Santander.

Marco teórico

La caracterización detallada de suelos es fundamental para la planificación y gestión sostenible de los sistemas agro-ecosistémicos. Conocer las propiedades físicas y químicas del suelo permite optimizar las prácticas agrícolas y mejorar la productividad, al mismo tiempo que se preserva la salud del ecosistema. Este tipo de estudios proporciona una base sólida para implementar prácticas agrícolas adaptadas a las condiciones específicas de cada región, lo que es esencial en la gestión sostenible de ecosistemas estratégicos.

Antecedentes

Nacionales

Rozo (2006) llevó a cabo un estudio enfocado en determinar el efecto del manejo de la fertilización sobre el rendimiento del cultivo de papa. Los resultados indican que el uso combinado de abonos orgánicos y minerales mejora significativamente la calidad del cultivo de papa, no solo por aumentar los rendimientos, sino también por incrementar el valor nutricional de las proteínas en los tubérculos.

Además, Muñoz y Lucero (2008) sugieren que las cantidades adecuadas de abono orgánico para el cultivo de papa están entre 800 y 1200 kg/ha, y que la mejor dosis de fertilizante químico es de 300 kg/ha. Estos hallazgos mostraron que el cultivo reaccionó favorablemente con dosis altas de abono orgánico y la combinación de 300 kg/ha de fertilizante químico con 800 kg/ha de abono orgánico proporcionó la mayor relación beneficio-costeo.

Miranda (2010) enfatiza que el análisis de datos multivariado es fundamental para el estudio estadístico de un grupo de variables medidas en una población de interés, permitiendo

cribar y resumir datos para garantizar mayor precisión y consistencia en el análisis, proporcionando una línea de base confiable para la producción de papa y la formulación de políticas.

Por otra parte, Alvarado y Ramírez (2016) afirmaron que el cultivo de papa es una importante fuente de empleo e ingresos en Colombia, con formas de consumo que incluyen fresco, procesado, alimento animal y materia prima para fines industriales.

Actualmente, en la finca El Limonal, sede de la Universidad Santo Tomás, se cultiva cacao, pero no se conocen bien las características físicas y químicas del suelo. Según Grateron Vargas (2020), es esencial conocer el estado inicial del suelo mediante una correcta caracterización fisicoquímica, biológica y mineralógica para evaluar y plantear estrategias adecuadas de rehabilitación y remediación.

En un estudio realizado por Castellanos et al. (2021) en seis municipios del departamento de Norte de Santander, Colombia, se seleccionaron 15 fincas por municipio, cada una con dos hectáreas de terreno delimitadas. El objetivo del estudio fue caracterizar las propiedades y la distribución de los suelos. Utilizando como base el “Estudio General de Suelos del Departamento Norte de Santander”, se llevó a cabo una caracterización geomorfológica y edafológica detallada. La descripción de los perfiles del suelo incluyó la toma de datos de campo, la excavación de calicatas y la recolección de muestras para análisis de laboratorio. Se determinaron los porcentajes de arcilla, limo y arena, y se estableció la clasificación de textura según el triángulo textural de USDA. Además, se realizó un análisis estadístico descriptivo de las variables agroquímicas (macroelementos y microelementos) y físicas utilizando el paquete estadístico SPSS.

Igualmente, la Colección Alianzas Agrosavia (2022) destaca la importancia del análisis de suelos para determinar las necesidades de nutrientes y condiciones favorables para el desarrollo óptimo de los cultivos. Factores como pH, materia orgánica, textura, capacidad de intercambio catiónico (CIC), densidad y porosidad son cruciales para la toma de decisiones en el manejo de los cultivos.

Marco contextual

Este proyecto se desarrolló en Silos un municipio situado en el departamento de Norte de Santander, ubicado a 123 kilómetros de Cúcuta, con una altitud de 2700 msnm, su término municipal limita con Mutiscua y Cácuta, al este con Chitagá y al oeste y por el sur con el departamento de Santander.

Los suelos con mejor aptitud o sin restricciones para el cultivo de papa (A1) en el municipio de Silos, se localizan cerca de la cabecera municipal y una pequeña zona al oriente del municipio, en total abarca casi un 8% del área del municipio. Los suelos A3eA3ea (Figura 1) se encuentran asociados a suelos con restricciones muy marcadas, por pendientes, alto riesgo a erosión, una marcada acidez y alta saturación de aluminio (Corpoica, 2016). Los suelos con aptitud moderada (A2t), condicionada especialmente por texturas muy finas que afectan la penetrabilidad de las raíces, corresponden a menos de 2% del municipio. Un 32% de los suelos presentan condiciones muy restringidas para el uso de papa (A3e), debido a una alta susceptibilidad a erosión por pendientes muy fuertes y suelos superficiales (Corpoica, 2016).

Algunos suelos presentan alta acidez y saturación de aluminio, por lo cual se restringe el uso, especialmente por adaptabilidad. Los suelos no aptos o no recomendados (N) se caracterizan por tener, además, de las pendientes más fuertes, suelos muy superficiales y altitud mayor a 3.500 msnm; estos suelos ocupan casi un 60 % del municipio (Corpoica, 2016).

Símbolo		Aptitud	Área (ha)
	A1	Sin restricciones a la escala	126
	A1-A3e-N	Suelos con un 40% del área sin restricciones, un 40% con severas restricciones por riesgo a la erosión, con pendientes entre 50-75% y un 20% son restringidos por pendientes superiores a 75%	5.844
	A1-A3ea-N	Suelos con un 10% del área sin restricciones, un 75% con severas restricciones por riesgo a la erosión y a la acidez, con pendientes entre 50-75% y saturación de aluminio superior a 30%, el 15% restante son suelos restringidos por pendientes superiores a 75%	268
	A2t-A3a	Moderada restricción por textura, suelos arcillosos en un 40%, suelos con severas restricciones por acidez, y suelos con saturación de aluminio por encima del 60%	210
	A2t-A3e	Moderada restricción por textura, suelos arcillosos en un 40% y suelos con severas restricciones por riesgo a la erosión con pendientes entre 50-75%	306
	A3a-N	Severas restricciones por acidez y no apto por pendiente	7.608
	A3e-N	Severas restricciones por riesgo a la erosión con pendientes entre 50-75%, no apto por pendientes	546
	A3ea-N	Severas restricciones por acidez y riesgo a la erosión, no apto por pendientes	7.270
	N	Restringidos por pendientes que superan el 75%	259
	Na	Restringidos por altitudes que superan los 3.500 m	9.155
	Afloramiento rocoso		52
	Urbano		9

Figura 1. Aptitud de uso de suelos para el sistema productivo de papa en el municipio de Silos. Fuente: Corpoica (2015b).

Amenazas derivadas de la variabilidad climática en el municipio de Silos

Lo primero es identificar o reconocer aquellos aspectos biofísicos que determinan la susceptibilidad del municipio a amenazas climáticas. La altitud y paisaje, entre otras variables, contribuyen al análisis de la susceptibilidad del territorio a eventos de inundación, sequía extrema, temperaturas altas y bajas, que podrían afectar los sistemas de producción agropecuarios (Figura 2).

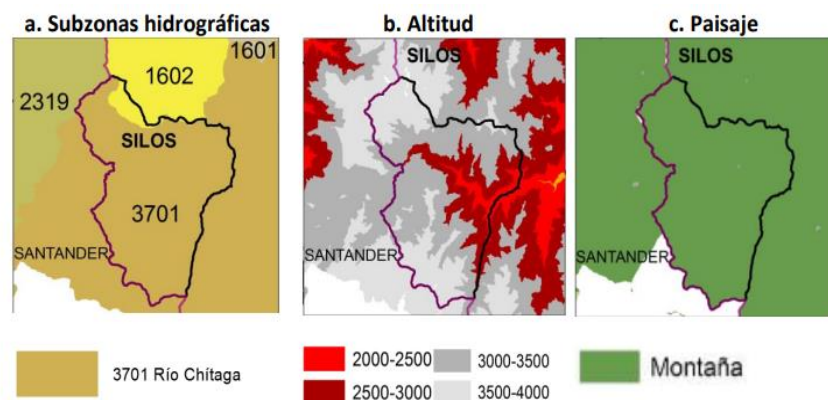


Figura 2. Mapas biofísicos del municipio de Silos (Norte de Santander) a. Subzonas hidrográficas b. Altitud. c. Paisaje. Fuente: Corpoica (2015a).

El municipio de Silos se encuentra influenciado por la subzona hidrográfica del río Chitagá. Está ubicado en un rango altitudinal entre 3.000 y 4.000 msnm, aunque en la región centro oriental del municipio se presentan altitudes entre 2.000 y 3.000 msnm. En este predomina el paisaje de montaña, el cual presenta susceptibilidad a la ocurrencia de heladas causadas por reducción en la precipitación e incremento en la fluctuación de las amplitudes térmicas (Corpoica, 2015a).

Bases conceptuales

La papa (*Solanum tuberosum* L.) pertenece a la familia botánica Solanaceae. La especie se originó y fue domesticada por primera vez en los Andes de América del Sur. En el mundo, cerca de 1400 millones de personas consumen papa regularmente, y la producción anual del cultivo sobrepasa los 300 millones de toneladas. Se reconocen más de 4000 cultivares de papas nativas que, en su mayoría, se encuentran en los Andes, y que tienen diferentes tamaños, colores y formas. Así mismo, hay 151 especies de papa silvestre de gran variabilidad genética, con características como la resistencia natural a plagas, enfermedades y condiciones climáticas (CIP, 2019).

La medición de parámetros de calidad del suelo se ha convertido en una herramienta que permite estimar el nivel de degradación del suelo y a su vez, plantear estrategias de recuperación, cimentando una base para la toma de mejores decisiones en cuanto al manejo del suelo (Vallejo Quintero, 2013). Las características fisicoquímicas del suelo deben ser conocidas por los agricultores, ya que el crecimiento, desarrollo de los cultivos, la cantidad y calidad de las cosechas, están directamente relacionados en con la riqueza nutritiva y las características de los suelos (Licona et al., 2017).

Suelos

El suelo es el medio natural dinámico en el cual ocurren transformaciones resultadas de la interacción de procesos físicos, químicos, biológicos y de actividades antrópicas. Estos procesos ocurren de forma simultánea generando un sustrato que brindará nutrientes, agua y sostén para el desarrollo de las plantas terrestres y otros organismos (Abi-Saab Arrieche, 2012). El suelo está condicionado por cinco factores formadores naturales que son: material parental, tiempo, clima, organismos y el relieve. Estos factores locales deben ser tomados en cuenta en cualquier estudio

de suelo, sin embargo, en esta investigación serán complementados con los efectos que la producción agrícola, puede tener sobre las características de estos (Vandermeer, 2011; Abi-Saab Arrieche, 2012).

En los sistemas agropecuarios, el suelo es un recurso de vital importancia, ya que constituye la base de la producción. Entre sus numerosas funciones se destacan las siguientes: es hábitat de numerosos organismos, actúa como suelo y fuente de nutrientes para las plantas, influye en la mineralización, el reciclaje y el flujo de nutrientes y energía, especialmente de la materia orgánica, y regula parte del ciclo hídrico y del clima (Gliessman, 2002; Abi-Saab Arrieche, 2012)

Calidad del Suelo

El suelo representa un factor de producción y en este estudio se busca describir las propiedades del suelo que determina la sostenibilidad de la producción en un agroecosistema, ambos conceptos definidos anteriormente, pero que en este caso se utilizarán en conjunto, debido que al evaluar calidad del suelo se busca de cierta forma conocer si es posible producir sosteniblemente en un suelo determinado (Abi-Saab Arrieche, 2012). Un suelo de buena calidad es aquel del que se pueden obtener cultivos, sanos y de alto rendimiento, con el menor impacto negativo sobre el ecosistema. Adicionalmente un suelo sano posee propiedades de regulación o amortiguación frente a perturbaciones naturales (ej. clima) o antrópicas, proporcionando un ambiente estable al crecimiento saludable de los cultivos. En otras palabras, los factores que determinan la calidad del suelo son aquellos que influyen en el crecimiento del cultivo y muchos de estos factores no son propiedades de la fertilidad propiamente dicha, como puede ser la estructura del suelo (Vandermeer, 2011; Abi-Saab Arrieche, 2012;).

Indicadores de calidad del suelo

Para evaluar las condiciones del suelo existen una serie de indicadores de calidad estandarizados que sirven como referencia (Abi-Saab Arrieche, 2012). Los indicadores permiten evaluar el estado de los suelos a través de observaciones o mediciones que nos indican si un suelo es sano, productivo o si, por el contrario; se encuentra degradado (Abi-Saab Arrieche, 2012). Los indicadores son un grupo de mediciones u observaciones definidos por investigadores que por experiencia reconocen dichos datos como relevantes y sirven de referencia para evaluar cierto sistema o recurso. Los indicadores suelen funcionar no solo para describir sino para monitorear el mismo objeto de estudio en el tiempo.

Los indicadores son una herramienta muy adecuada para evaluar y llevar seguimiento de un agroecosistema, pero si se quiere evidenciar la viabilidad de este sistema, dichos indicadores deben ser pertinentes en el tiempo, espacio, y las condiciones específicas de estudio (Abi-Saab Arrieche, 2012). Por medio de estos indicadores se podrá evaluar la calidad del suelo. Los indicadores de calidad pueden ser categorizados en cuatro grupos generales como son: indicadores químicos, físicos, biológicos, adicionalmente se pueden usar indicadores visuales del sistema productivo que ejercen influencia en la calidad del suelo.

Indicadores químicos

Dentro de la calidad del suelo está inmersa la fertilidad que puede ser evaluada por medio de indicadores químicos como el pH, Capacidad de Intercambio Catiónico, carbono orgánico total, saturación de bases, etc. De la interacción de todos estos atributos que definen la fertilidad depende la producción vegetal en los agroecosistemas. Dentro de los componentes químicos se destaca el Carbono orgánico, del cual dependen directamente la diversidad y actividad de las poblaciones de fauna edáfica y microorganismos, así como muchas otras propiedades del suelo. (Arrieche y

Clavijo, 2012). Dentro de las propiedades químicas existe un proceso que es fundamental para la fertilidad del suelo y se trata del intercambio iónico entre el complejo de cambio (fase sólida o coloidal); con la solución del suelo que es de donde pueden absorber nutrientes las plantas. El complejo de cambio contiene cationes de Ca, Mg, K, Na, etc. adsorbidos. Estos iones al ser positivos pueden ser intercambiados por iones de la misma carga de la solución del suelo, surtiéndola nuevamente de los nutrientes extraídos (Abi-Saab Arrieche, 2012).

Indicadores físicos

La calidad del suelo puede ser descrita por algunos indicadores físicos como densidad aparente, infiltración, porosidad, estructura, características de los agregados, etc. que influyen sobre diversos fenómenos como: el transporte de agua, nutrientes y aire, así como en la estimulación de procesos realizados por los microorganismos e invertebrados del suelo. Adicionalmente regula la emergencia de las plántulas, la penetración de las raíces e influye en los procesos de erosión (Vandermeer, 2011; Abi-Saab Arrieche, 2012).

Indicadores biológicos

En el suelo viven una serie de organismos; los animales o fauna edáfica ejercen una función importante con respecto al ciclo de nutrientes. Estos organismos también afectan la evolución de los suelos participando de la mezcla de partículas orgánicas y minerales, en la formación de poros y agregados por materia fecal, por estas razones los organismos son considerados un factor formador del suelo (Gliessman, 2002; López, 2005). Con respecto al ciclo de nutrientes la mesofauna y macrofauna edáfica: 1. consumen materia orgánica y la simplifican o fraccionan. 2. mezclan el suelo y aumentan la porosidad mejorando las condiciones para la mineralización de la materia orgánica. 3. aumentan la disponibilidad de nutrientes con material fecal y controlan poblaciones de microorganismos (López, 2005; Pérez, 2010).

Pérdida de fertilidad de suelos

Es la disminución de la capacidad del suelo para soportar vida, se producen cambios en sus propiedades físicas, químicas y biológicas que conllevan a su infertilidad (Suquilanda, 2017).

Propiedades fisicoquímicas del suelo

Textura

La textura del suelo se determina por el material mineral presente, se definen tres tamaños de partículas minerales existente que son: arena, arcilla y limo (López y Estrada, 2015). La textura es la combinación de las proporciones en que se encuentran estas partículas que forman el suelo, permitiendo así, determinar su funcionalidad, retención de nutrientes, fertilidad, drenaje, aireación, entre otros. Por lo tanto, los suelos con textura arenosa presentan 70% o más de partículas de arena, son permeables al agua, aire y fácilmente trabajables con reserva de nutrientes muy bajas. Los suelos arcillosos contienen más del 40% de partículas de arcilla, en cambio son pedregosos si están húmedos y muy duros cuando están secos, ricos en nutrientes, pueden formar agregados, pudiendo ser impermeables y asfixiantes. Los suelos francos o de texturas medias con un 45% de arena, 40% de limo y 15% de arcilla; por lo que presenta un equilibrio entre ellas y sus condiciones físicas y químicas son las mejores, haciendo el más apto para el cultivo (INIA, 2015).

Densidad aparente

Masa de suelo por unidad de volumen (g/cm^3 o t/m^3) que permite inferir la compactación del suelo, representando la relación entre sólidos y espacio poroso. Es una forma de evaluar la resistencia del suelo a la elongación de las raíces (Hosnne y Cedeño, 2012).

Importancia de la materia orgánica en el suelo

Según Julca, et al. (2006), la materia orgánica cumple un papel fundamental e importantes servicios ecosistémicos como:

En la estructura del suelo participa en la formación de agregados o terrones del suelo.

- Permite mayor resistencia del suelo a la erosión hídrica y eólica.
- Mejora la capacidad de infiltración, retención y almacenamiento del agua.
- Ayuda en la fertilidad del suelo, en la disponibilidad de nutrientes para las plantas.
- Captura y secuestra una parte importante del carbono presente en la atmósfera.
- Aumenta la capacidad de retención de agua y el intercambio catiónico.
- Es una fuente de reserva alimenticia para la planta.
- Favorece y aumenta la diversidad de especies microbiológicas (microorganismos).
- Aumenta la absorción solar al dar una coloración más oscura al suelo (cama caliente).

Índice óptimo de pH

El pH del suelo se considera una de las variables más importantes ya que controla varios procesos químicos, afectando principalmente la disponibilidad de los nutrientes en las plantas, mediante el control de las formas químicas de los nutrientes. En lo que se refiere al rango óptimo del pH en la mayoría de las plantas oscila entre 5,5 y 6,5; sin embargo, varias plantas se han adaptado para crecer en valores fuera del rango del pH. Los valores extremos causan problemas a los suelos y a la vegetación. Cuando el pH es menor de 5,5 el suelo tiene problemas asociados a toxicidad de aluminio, fijación de fósforo, deficiencia de calcio y magnesio entre otros. Cuando el pH es mayor de 6,5; los problemas que resultan están relacionados con la deficiencia de micronutrientes en el suelo (Rosas et al., 2017).

Generalidades del cultivo de papa

Según Sierra-Ariza et al., (2017), la importancia de la papa como alimento en la canasta básica familiar alrededor del mercado mundial es primordial. Este tubérculo es el cuarto alimento de mayor consumo en el planeta. En el año 2013 su producción fue de 368.096.362 toneladas y para Colombia de 2.788.050, en donde los departamentos de Cundinamarca y Boyacá son los mayores productores. El consumo de la papa como alimento principal en el país y el mundo se debe a su gran cantidad de nutrientes, minerales, carbohidratos y en menor medida proteína, fibra, calcio, hierro, vitamina C, que hacen un gran aporte nutritivo a la dieta básica del consumidor

Marco legal

Legislación Agropecuaria

Decreto 1843 de 1991: Reglamenta parcialmente los títulos III, V, VI, VII y XI de la Ley 09 de 1979, sobre uso y manejo de plaguicidas.

Resolución 3079 de 1995: Establece disposiciones sobre la industria, comercio y aplicación de bio-insumos, abonos, fertilizantes, enmiendas, acondicionadores de suelo, plaguicidas químicos, reguladores fisiológicos y productos afines.

Resolución 1068 de 1996: Proporciona un manual técnico para la aplicación de insumos agrícolas.

Resolución 3492 de 1998: Reglamenta la introducción, producción, liberación y comercialización de Organismos Modificados Genéticamente de uso agrícola.

Decreto 502 de 2003: Reglamenta la Decisión Andina 436 de 1998 para el registro y control de plaguicidas químicos de uso agrícola, designando al ICA como la Autoridad Nacional competente para llevar el registro y control de estos plaguicidas.

Resolución 2501 de 2003: Establece los requisitos específicos mínimos para la producción de semilla certificada de papa, definiendo las zonas aptas para dicha producción según criterios sanitarios.

Normatividad sobre el Recurso Suelo

Artículo 178 del Decreto 2811 de 1974: Los suelos deben usarse de acuerdo con sus condiciones y factores constitutivos, determinando su uso potencial basado en factores físicos, ecológicos y socioeconómicos de la región.

Artículo 179 del Decreto 2811 de 1974: El aprovechamiento de los suelos debe mantener su integridad física y capacidad productora, aplicando normas técnicas para evitar su pérdida o degradación y asegurar su conservación.

Artículo 180 del Decreto 2811 de 1974: Es deber de todos los habitantes colaborar con las autoridades en la conservación y manejo adecuado de los suelos, aplicando prácticas de conservación y recuperación necesarias.

Resolución 170 de 2009: Declara el año 2009 como el Año de los Suelos en Colombia y el 17 de junio como el Día Nacional de los Suelos, adoptando medidas para su conservación y protección.

Política para la Gestión Sostenible del Suelo (2016): Establece directrices para la gestión sostenible del suelo, basadas en la Ley 99 de 1993 y la Ley 461 de 1998, enfatizando la conservación, restauración y uso sostenible de los recursos naturales.

Ley 388 de 1997, Artículo 33: Reglamenta el ordenamiento territorial y los usos del suelo, asegurando un uso adecuado y sostenible de la tierra.

Metodología

Tipo de investigación

Se realizó una investigación descriptiva, cuantitativa de campo y laboratorio. Es descriptiva porque su objetivo es caracterizar detalladamente las propiedades y calidad del suelo en las fincas estudiadas, proporcionando una visión específica del contexto agrícola de la región. Es cuantitativa porque se basa en la recolección y análisis de datos numéricos, como pH, niveles de nutrientes y materia orgánica, utilizando métodos estadísticos para interpretar los resultados y extraer conclusiones significativas. Finalmente, es una investigación de campo y laboratorio porque implica la toma de muestras de suelo directamente en las fincas, permitiendo una evaluación precisa y contextualizada de las condiciones del suelo en el lugar de producción y los análisis se hacen a nivel de laboratorio (Gómez, 2006; Hernández et al., 2014).

Selección de los sitios de estudio y toma de muestras de suelos

El estudio se realizó en ocho fincas cultivadas con papa (*Solanum tuberosum* L.). En cada finca se tomaron dos muestras compuestas de suelo, excepto en una finca donde se tomaron cuatro muestras debido a que los lotes tienen diferentes dueños. Cada muestra compuesta se obtuvo a partir de 10 submuestras recolectadas aleatoriamente a una profundidad de 0-20 cm (Figura 3).

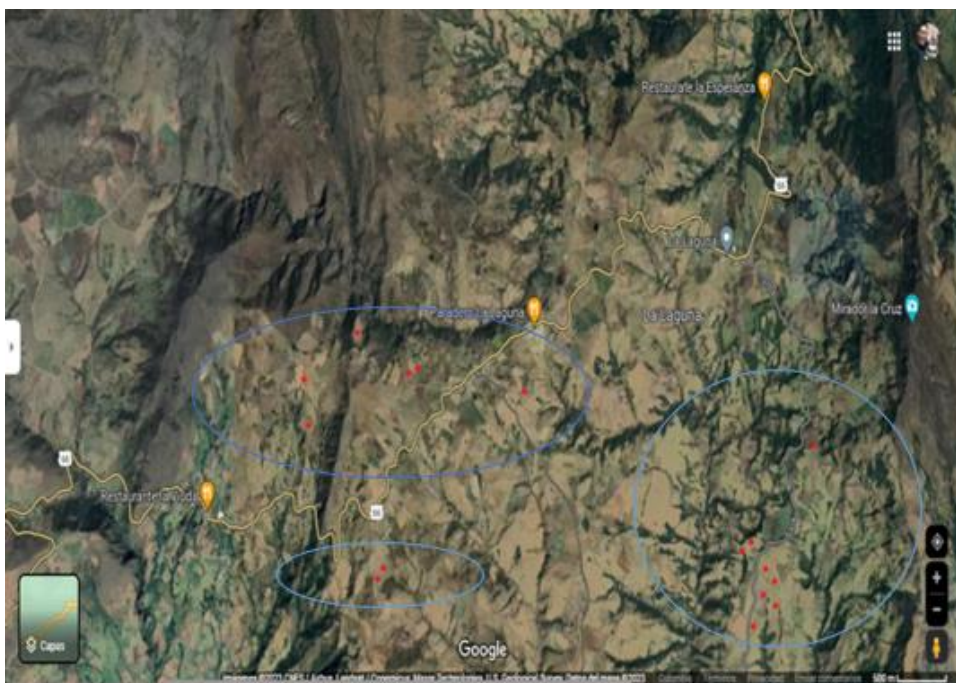


Figura 3. Mapa satelital áreas donde se tomaron las muestras. Puntos rojos, ubicación de los lotes donde se tomaron las muestras. Tomado de: *Coordenadas tomadas en campo y buscadas en la aplicación Google maps.*

Datos de las fincas y lotes muestreados

Como se mencionó previamente, las muestras de suelos se tomaron de fincas cuyos tamaños varían entre 0,7 y 1,9 hectáreas, y altitudes que oscilan entre 3.052 y 3.868 metros sobre el nivel del mar. Las pendientes de las fincas fluctuaron entre el 10 % y el 30%, siendo comunes valores del 15 % y 20 %. Todas las fincas se dedican al cultivo de papa superior (Tabla 1),

Tabla 1. Datos de los lotes muestreados

Finca	Lote	Área (ha)	Altura (msnm)	Coordenadas	Pendiente %
La Hoyada	1	1,3	3477	E003512657 N00964783	10
La Hoyada	2	1,2	3466	E03513061 N00964783	30

Los Pensamientos	2	0,8	3346	E 035225334 O 00964014	25
La Punta del Llano	4	1,1	3868	E 03513398 N 00963106	15
La Punta del Llano	5	1,5	3268	E03513398 N00963106	15
Los Tanques	6	1,0	3362	E03513978 N00965046	15
La Fortuna	8	1,9	3285	E03515082 N00964799	15
Loma del Hato	2	1,1	3080	E03517574 N00963225	20
Loma del Hato	10	1,2	3104	E03517608 N00963438	20
Loma del Hato	11	1,1	3064	E03517608 N00963438	20
Loma del Hato	12	1,2	3061	E03517608 N00963438	20
Santa Inés	13	0,8	3067	E03517168 N00963578	20
Santa Inés	14	0,7	3075	E03517317 N00963929	15
Loma del Hato	15	1,3	3052	E03517558 N00962706	20
Guayeneche	16	1	3224	E03518165 N00964475	25

Fuente: Autor

Análisis de laboratorio

Propiedades físicas de los suelos

Textura.

La textura del suelo se determinó siguiendo el método del hidrómetro de Gee y Bauder, (1986). El procedimiento consistió en pesar 40 gramos (g) de suelo seco, tamizado por la malla con diámetro de hueco menor a 2 mm. Se adicionaron 100 mL de una solución dispersante de hexametáfosfato de sodio, se agitó en una licuadora durante treinta (30) minutos y luego se transfiere a un cilindro graduado de un litro, se le adiciona agua destilada hasta completar el

volumen y se agita con una varilla de metal durante un (1) minuto para homogenizar la mezcla lo más posible. Después de terminada la agitación se introdujo el hidrómetro realizando la primera medida a los cuarenta (40) segundos. Con este valor se determinó la cantidad de arena que contiene la muestra de suelo. Esta misma operación se repitió a las 2 horas pero sin agitar la muestra, esto con el fin de determinar la cantidad de limo sedimentado. El porcentaje de arcilla se determinó por diferencia entre las otras fracciones con respecto al cien por ciento.

Humedad gravimétrica

La humedad gravimétrica (W) se determinó de acuerdo con la metodología propuesta por Gardner (1986). Sobre las mismas muestras de suelo tomadas para la determinación de la densidad aparente de allí, el porcentaje de humedad del suelo. Una vez obtenido el peso del suelo húmedo y seco se aplicó la siguiente ecuación.

$$W = \frac{(\text{Peso de suelo húmedo} - \text{Peso de suelo seco})}{\text{Peso de suelo seco}}$$

Dónde: W: contenido de humedad del suelo (%)

Humedad volumétrica

La humedad volumétrica se determinó directamente en campo con un medidor de humedad. Una vez obtenidos los datos se utilizó la siguiente fórmula:

$$\theta = \frac{V_w}{V_t} * 100$$

Dónde: θ : humedad volumétrica (%)

V_w : volumen del agua (cm³)

V_t : volumen total del suelo (cm³)

Densidad aparente

La densidad aparente se determinó siguiendo la metodología propuesta por Blake y Hartge (1986). Se tomaron muestras sin disturbar el suelo en los primeros 10 cm de profundidad con el uso de los cilindros de Kopecky de 5,08 cm de diámetro por 5 cm de altura, los cuales fueron introducidos en el suelo con la ayuda de un martillo de goma. Una vez tomadas las muestras sin perturbar, se taparon con papel aluminio y se trasladaron al laboratorio, donde se pesaron y se secaron en una estufa a 105°C por 24 horas, se dejaron enfriar y se vuelven a pesar. La densidad aparente se calculó de la siguiente manera:

$$Da = \frac{Psh}{V(1 + W)}$$

Dónde:

Da: Densidad aparente (g.cm⁻³)

Psh: Peso del cilindro de suelo traído de campo (g).

V: Volumen del cilindro metálico (cm³)

W: Humedad obtenida de la muestra secada en estufa (fracción adimensional).

Densidad real

Para la determinación de la densidad real se utilizó el método del picnómetro de Blake y Hartge (1986) para lo cual se utilizaron muestras de suelo seco y tamizado por la malla de diámetro de hueco menor de 2 mm.

Porosidad total (%)

La determinación del porcentaje de porosidad total se hizo mediante la división de los datos de la densidad aparente sobre la densidad real multiplicada por 100.

Resistencia mecánica a la penetración.

La determinación de la resistencia del suelo se realizó con un penetrómetro de bolsillo el cual se utiliza específicamente para determinar la resistencia a la penetración de las capas superiores del suelo (profundidad de medición 5 mm). Se insertó lentamente el pistón hasta que la marca grabada esté nivelada con el suelo, estas repeticiones se tomaron en la profundidad de 0-20 cm. Se tomó la lectura de la fuerza en kg/cm² de suelo tres (3) veces y se multiplicó por la lectura por 0,625 según las especificaciones del instrumento (Mogollón, 2012).

Características químicas de los suelos

Las características químicas que se evaluaron en el estudio fueron: pH, conductividad eléctrica, acidez intercambiable, materia orgánica total, nitrógeno total y disponible, fósforo total y disponible, suma de cationes y porcentaje de saturación de bases (% SB).

pH

El pH se determinó en un extracto acuoso con una relación suelo-agua de 1:2,5 por agitación durante dos horas (McLean, 1982). Se utilizará un medidor de pH marca Digital pH meter, modelo “pH-2006”.

Conductividad eléctrica

En el mismo extracto que se usará para la medición del pH del suelo, se determinará la conductividad eléctrica empleando un conductímetro HANNA, modelo HI 9033, calibrado previamente con una solución de KCL 0,040 mol/L a una temperatura de 25°C.

Materia orgánica total

La determinación del carbono orgánico total se realizó por el método de pérdidas de peso por ignición o calcinación. El método de calcinación o pérdida de peso por ignición (PMOI), cuantifica el contenido de MO a partir de diferencias gravimétricas, esto luego de ser sometida la

muestra en la mufla a una temperatura de 105 °C durante una hora, nuevamente fue sometida a la mufla a una temperatura de 450 °C durante 6 horas. El cálculo del porcentaje de materia orgánica se realizó mediante la siguiente ecuación:

$$\%PMOI = \frac{(Peso \text{ a } 105^{\circ}C) - (Peso \text{ a } 450^{\circ}C)}{(Peso \text{ a } 105^{\circ}C)} * 100$$

Evaluación de la calidad del suelo (Análisis de datos).

Una vez obtenidos los datos de la caracterización y de las propiedades químicas y físicas del suelo se compararon con los valores de referencia de suelos colombianos.

Análisis estadístico de los datos

El procedimiento estadístico empleado para procesar los datos incluyó un análisis de varianza (ANOVA) para determinar si existían diferencias significativas entre las medias de las variables medidas en las distintas fincas. Se verificaron los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas mediante pruebas de Shapiro-Wilk y Levene, respectivamente. Cuando se detectaron violaciones de estos supuestos, se aplicaron transformaciones logarítmicas a los datos para intentar corregir estas desviaciones. En caso de que las transformaciones no fueran efectivas, se utilizó la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis. Posteriormente, se realizó una prueba de comparación de medias de Tukey para identificar específicamente entre qué fincas existían diferencias significativas. Todos los análisis se llevaron a cabo utilizando el software estadístico SPSS y se consideraron significativos aquellos resultados con un valor de p menor a 0,05.

Resultados y discusión

Características físicas y químicas de los suelos cultivados con papa.

En la tabla 2 se presentan los resultados de la distribución del tamaño de partículas de los suelos de las fincas muestreadas. Los resultados del análisis de la varianza (ANOVA) aplicado después de agrupar las fincas según los lotes muestreados indican que existen diferencias significativas en el porcentaje de arena entre las diferentes fincas ($p<0,05$), mientras que no se encontraron diferencias significativas en los porcentajes de arcilla y limo ($p>0,07$).

Tabla 2. Comparación de la distribución del tamaño de partículas entre fincas

Finca	Arcilla (%)	Arcilla CV	Limo (%)	Limo CV	Arena (%)	Arena CV
La Fortuna	25,15A	0,0	4,85A	Na	70A	0,0
La Hoyada	31,80±4,88A	15,34	2,25±1,20A	53,33	66,67±4,34A	6,51
La Punta del Llano	27,93±1,09A	3,9	0,1±0,14A	140	71,98±0,95A	1,32
Loma del Hato	27,85±2,15A	7,72	6,9±3,60A	52,17	66,10±3,31A	5,01
Los Pensamientos	31,70±A	0,0	2,45A	Na	65,85A	0,0
Los Tanques	24,13±1,66A	6,87	1,8±0,21A	11,67	74,08±1,87A	2,53
Santa Inés	34,23±0,89A	2,6	3,28±1,10A	33,54	62,50±1,98A	3,17
Guayeneche	41,8A	Na	1,8A	Na	56,4B	0,0
Valor de p	0,07		0,533		0,01	

Valores promedio por finca±desviación estándar seguidos por letras mayúsculas distintas indican diferencias entre fincas para cada fracción de suelo ($p<0,05$). CV: Coeficiente de variación.

La Hoyada presenta una variación en el contenido de arcilla entre los dos lotes (35,25% y 28,35%). La diferencia en el contenido de limo y arena también indica una cierta heterogeneidad dentro de la misma finca. Los Pensamientos tiene un contenido de arcilla del 31,7%, con limo y arena distribuidos de manera que forman una clase textural consistente con otros lotes. La Punta

del Llano los dos lotes muestran una composición similar, con un contenido de arcilla ligeramente menor (27,15% y 28,7%) y casi sin limo. Los Tanques presenta una variabilidad en los porcentajes de arcilla y limo entre los dos lotes. La Fortuna muestra un contenido de arcilla del 25,15%, con limo y arena que permiten clasificarlo también como franco arcillo arenoso. Loma del Hato tiene una notable variabilidad en los porcentajes de limo entre sus lotes, lo cual podría influir en la retención de agua y en las propiedades físicas del suelo. En Santa Inés ambos lotes muestran un contenido de arcilla relativamente alto (34,85% y 33,6%). Guayeneche tiene el contenido de arcilla más alto (41,8 %), lo cual podría afectar la estructura del suelo y su capacidad de manejo.

Se puede ver que La Fortuna tiene un promedio de arcilla de 25,15 %, limo de 4,85% y arena de 70 %, pero no tiene datos suficientes para calcular la desviación estándar ni el coeficiente de variación. La Hoyada muestra un promedio de arcilla de 31,80%, con una desviación estándar de 4,88%, lo que resulta en un coeficiente de variación del 15,34%. El limo tiene un promedio de 2,25% y un coeficiente de variación del 53,33%, mientras que la arena tiene un promedio de 66,67% y un coeficiente de variación del 6,51%.

La Punta del Llano tiene un promedio de arcilla de 27,93 % y una baja variabilidad con un coeficiente de variación del 3,90 %. El limo tiene una alta variabilidad con un coeficiente de variación del 140 %. Loma del Hato presenta promedios de arcilla y arena de 27,85% y 66,10%, respectivamente, con coeficientes de variación moderados. El limo tiene un promedio de 6,90% y una variabilidad del 52,17%. Los Pensamientos, Los Tanques, Santa Inés y Guayeneche muestran variabilidad en sus contenidos de limo y arena, aunque algunos carecen de suficientes.

Estos datos sugieren que las prácticas de manejo del suelo o las condiciones naturales pueden estar influyendo más en el contenido de arena en las fincas estudiadas.

En la tabla 3 muestra los resultados de ANOVA y la prueba de comparación de medias de Tukey así como los coeficientes de variación para otras características físicas de los suelos. De acuerdo con los valores de p, se encontraron diferencias estadísticas entre fincas para todos los parámetros evaluados.

Tabla 3. Resultados de la comparación estadística entre fincas para algunas características físicas del suelos

Finca	HV (%)	HV (CV)	HG (%)	HG (CV)	RMP (kg.m-2)	RMP (CV)	Da (g.cm-3)	Da (CV)	Dr (g.cm-3)	Dr (CV)	PS (%)	Pd (CV)
La Hoyada	19,4±0,4	2,0	18,5±8,2A	44,5	1,2±0,6A	50,3	1,1±0,1	8,63	1,8±0,2	10,34	40,7±1,1	2,68
Los Pensamientos	19,7±0,0A	0,0	19,0±0,0A	0,0	0,5±0,0B	0,0	1,1±0,0	0	1,8±0,0	0,00	41,1±0,0	0
La Punta del Llano	19,5±1,7A	8,6	17,4±4,3A	24,7	0,8±0,1A	14,7	1,1±0, 2	19,82	1,9±0,2	8,85	43,7±8,8	20,11
Los Tanques	27,9±1,0B	3,7	31,4±3,3B	10,5	1,2±0,4A	29,9	0,9±0,0	1,41	1,8±0,6	30,16	43,5±16,3	37,47
La Fortuna	19,3±0,0A	0,0	21,9±0,0A	0,0	1,6±0,0A	0,0	1,2±0, 0	0	2,1±0,0	0,00	41,5±0,0	0
Loma del Hato	19,5±3,4A	17,2	21,4±1,8A	8,6	1,0±0,5	46,8	1,1±0,1	11,27	1, 9±0,2	11,11	42,6±10,7	25,04
Santa Inés	13,9±1,7C	12,5	17,6±10,9 A	62,2	1,1±0,1	10,1	1,1±0,2	19,72	1,8±0,1	5,01	41,4±8, 6	20,66
Guayeneche	18,9±0,0A	0,0	17,8±0,0A	0,0	1,2±0,0	0	1,0±0, 0	0	1,3±0,0	0,00	21,3±0,0	0
Valor de p	0,002		0,006		0,001		0,04		0,008		0,0006	

Valores promedio por finca±desviación estándar seguidos por letras mayúsculas distintas indican diferencias entre fincas para cada variable de suelo. Humedad volumétrica; HG: Humedad gravimétrica; Da: Densidad aparente; Dr: Densidad real; Porosidad; RMP: Resistencia mecánica a la penetración; Ps: Porosidad. Valores promedio ± desviación estándar; CV: Coeficiente de variación. Fuente: Autor

Los resultados del ANOVA y la prueba de Tukey muestran que HV en Los Tanques es significativamente mayor ($p<0,05$) que en las demás fincas. Por su parte, Santa Inés tiene un HV significativamente menor. La HV alta en Los Tanques indica mayor capacidad de retención de agua, lo cual es favorable para el crecimiento de cultivos en condiciones de sequía. La HV baja en Santa Inés puede indicar problemas de retención de agua, afectando negativamente la disponibilidad de agua para los cultivos.

La HG en Los Tanques es significativamente mayor, lo cual coincide con su alta HV. La alta HG en Los Tanques podría reflejar una alta capacidad de retención de humedad, beneficiando la absorción de nutrientes por las plantas. La HG uniforme en fincas como Los Pensamientos y La Fortuna indica estabilidad en la retención de humedad, favoreciendo un crecimiento uniforme de los cultivos.

La RMP más baja en Los Pensamientos sugiere menor compactación del suelo, facilitando el crecimiento radicular. La RMP más alta en La Fortuna puede limitar el crecimiento de las raíces y la absorción de agua y nutrientes. La menor Da encontrada en Los Tanques indica mayor porosidad y mejor estructura del suelo para la aireación y retención de agua. Para el caso de La Fortuna la Da mayor puede ser indicativa de compactación, lo que podría restringir el desarrollo radicular y la infiltración de agua.

La Dr es un parámetro necesario para el cálculo de la porosidad del suelo junto con la densidad aparente. De igual forma, esta variable no cambia con las condiciones de manejo sino que permite evidenciar el tipo de material mineral de los suelos. De acuerdo con los resultados los valores corresponden a los suelos tropicales compuestos principalmente por aluminosilicatos y con altos contenidos de arena. La PS mayor en La Punta del Llano y Los Tanques indica mejor aireación y facilidad para el desarrollo de las raíces de las plantas. Mientras que la PS significativamente menor en Guayeneche puede resultar en problemas de aireación y drenaje, afectando el crecimiento de las plantas.

En términos del CV de los parámetros evaluados, las fincas que presentaron mayor variabilidad fueron Loma del Hato y Los Tanques, destacándose por sus altos CV en diferentes variables, lo que indica una mayor heterogeneidad en las características del suelo. Loma del Hato mostró alto CV en HV (17,2 %), RMP (46,8%), y PS (25,04%), mientras que Los Tanques presentó

alto CV en HV (10,5 %), RMP (29,87 %), Dr (30,16 %) y PS (37,47 %). Por otro lado, las fincas que mostraron menor variabilidad, con CV de 0 % en casi todos los parámetros, fueron Los Pensamientos, La Fortuna y Guayeneche, lo que indica una gran estabilidad y uniformidad en sus características del suelo, favoreciendo un manejo agrícola más predecible y eficiente.

Los resultados para pH, conductividad eléctrica, materia orgánica de los suelos de las fincas se muestran en la tabla 4. El rango de pH varía de 4,7 en La Fortuna a 5,3 en Guayeneche. Los valores de pH están dentro del rango ligeramente fuertemente ácido a moderadamente ácido típico para suelos agrícolas de zonas tropicales húmedas. Según la literatura, el pH óptimo para la mayoría de los cultivos está entre 5,5 y 7,0, lo que indica que algunos suelos pueden necesitar enmiendas para reducir la acidez. La finca Guayeneche presenta el valor de pH más alto (5,3), mientras que La Fortuna tiene el más bajo (4,7).

En cuanto al aluminio intercambiable (Al^{3+}), los valores varían de $1,1 \pm 0,5$ cmol/kg en Loma del Hato a $2,9 \pm 0,0$ cmol/kg en Los Pensamientos. Valores elevados de aluminio intercambiable ($>2,0$ cmol/kg) pueden ser tóxicos para muchas plantas. La finca Los Pensamientos tiene los valores más altos de Al^{3+} lo que podría afectar negativamente la producción, mientras que Loma del Hato muestra la mayor variabilidad (CV=47,2%). La conductividad eléctrica (CE) varía de $0,2 \pm 0,0$ dS/m en La Fortuna y Guayeneche a $0,3 \pm 0,1$ dS/m en Los Tanques. Los valores de CE son relativamente bajos en todas las fincas, indicando niveles bajos de salinidad, lo cual es favorable para la mayoría de los cultivos. La literatura sugiere que valores de CE menores a 2 dS/m son óptimos para la mayoría de los cultivos. Los Tanques presentan la mayor variabilidad (CV=18,0%).

En términos de materia orgánica (MO), los valores varían de $1,7 \pm 0,0\%$ en Los Pensamientos a $2,8 \pm 1,4\%$ en Santa Inés. Los valores de MO son importantes para la fertilidad

del suelo. La literatura sugiere que niveles óptimos de materia orgánica deben estar por encima del 2 % para mantener una buena estructura y fertilidad del suelo. Santa Inés presenta la mayor variabilidad (CV=49,7%). El carbono orgánico (CO) varía de $1,0 \pm 0,0\%$ en Los Pensamientos a $1,7 \pm 0,1\%$ en La Punta del Llano. Valores adecuados de CO son cruciales para la salud del suelo. Según la literatura, suelos agrícolas saludables deben tener al menos 1,5% de carbono orgánico. La Punta del Llano presenta el valor más alto de CO, mientras que Los Pensamientos, con el valor más bajo, podría beneficiarse de prácticas que aumenten el carbono orgánico. Los Tanques presentan una alta variabilidad (CV=60,5%).

Tabla 4. Comparación de las características químicas evaluadas en los suelos de las fincas estudiadas

Finca	pH (2:1)	pH CV	Al int (meq.100 ⁻¹ g)	Al int (CV)	CE (mmho)	CE (CV)	MO (%)	MO (CV)	CO (%)	CO (CV)
La Hoyada	4,9 ± 0,0	0,6	2,0 ± 0,2	10,1	0,2 ± 0,0	4,7	2,4 ± 1,5	63,7	1,4 ± 0,9	69,1
Los Pensamientos	4,8 ± 0,0	0	2,9 ± 0,0	0	0,2 ± 0,0	0	1,7 ± 0,0	0	1,0 ± 0,0	0
La Punta del Llano	4,8 ± 0,0	0,2	2,8 ± 0,2	6,1	0,2 ± 0,0	11,4	2,8 ± 0,2	6,1	1,7 ± 0,1	6,1
Los Tanques	4,8 ± 0,1	2,2	2,4 ± 0,1	3,5	0,3 ± 0,1	18	2,8 ± 1,7	60,4	1,6 ± 1,0	60,5
La Fortuna	4,7 ± 0,0	0	1,9 ± 0,0	0	0,5 ± 0,0	0	1,8 ± 0,0	0	1,1 ± 0,0	0
Loma del Hato	5,1 ± 0,1	1,8	1,1 ± 0,5	47,2	0,2 ± 0,1	21,8	2,6 ± 0,4	15,8	1,5 ± 0,3	17,7
Santa Inés	4,9 ± 0,2	4,2	1,8 ± 0,1	4,8	0,3 ± 0,2	54,6	2,8 ± 1,4	49,7	1,6 ± 0,6	35,2
Guayeneche	5,3 ± 0,0	0	1,5 ± 0,0	0	0,2 ± 0,0	0	2,3 ± 0,0	0	1,4 ± 0,0	0
Valor de p	<0,05		<0,05		<0,05		<0,05		<0,05	

NOTA: Valores promedio por finca±desviación estándar seguidos por letras mayúsculas distintas indican diferencias entre fincas para cada variable de suelo. Al int: Aluminio Intercambiable; CE: Conductividad Eléctrica; MO: Materia Orgánica; CO: Carbono Orgánico; CV: Coeficiente de Variación. Fuente: Autor.

Las fincas con pH más bajo, como La Fortuna, pueden necesitar encalado para elevar el pH y mejorar la disponibilidad de nutrientes. Las fincas con altos niveles de aluminio intercambiable, como Los Pensamientos, deben implementar prácticas para reducir la toxicidad,

como el encalado y el uso de cultivos de cobertura. Además, las fincas con baja materia orgánica, también en Los Pensamientos, deben considerar la adición de compost o estiércol para mejorar la fertilidad del suelo. Las fincas con bajos niveles de carbono orgánico, nuevamente Los Pensamientos, podrían beneficiarse de la incorporación de residuos de cultivos y prácticas de manejo de carbono para mejorar la salud del suelo. Estos resultados sugieren que las fincas presentan una variabilidad considerable en términos de calidad del suelo, y se deben implementar prácticas de manejo específicas para mejorar la productividad agrícola de acuerdo con las necesidades particulares de cada finca.

Los resultados de los macronutrientes de los suelos están presentados en la tabla 5. Los resultados del ANOVA y la prueba de comparación de medias de Tukey indican que existen diferencias significativas ($P < 0,05$) en los niveles de nutrientes y en la CIC de los suelos entre las diferentes fincas. Para P se encontraron diferencias significativas entre La Hoyada y las fincas Los Pensamientos, La Punta del Llano, Los Tanques, La Fortuna, Loma del Hato, Santa Inés, y Guayeneche, así como entre Los Pensamientos y La Punta del Llano, Loma del Hato, Santa Inés, y Guayeneche. También hubo diferencias entre La Punta del Llano y Los Tanques, La Fortuna, Loma del Hato, Santa Inés, y Guayeneche.

Para el azufre (S), las diferencias fueron similares, destacando las mismas fincas. En cuanto al calcio (Ca), las diferencias se observaron entre La Hoyada y las fincas mencionadas anteriormente, así como entre Los Pensamientos y La Punta del Llano, Loma del Hato, Santa Inés, y Guayeneche, y entre La Punta del Llano y las otras fincas.

Para el magnesio (Mg), las diferencias se encontraron entre La Hoyada y las mismas fincas, así como entre Los Pensamientos y La Punta del Llano, Loma del Hato, Santa Inés, y Guayeneche. En el caso del potasio (K), hubo diferencias entre La Hoyada y las mismas fincas, así como entre

Los Pensamientos y La Punta del Llano, Loma del Hato, Santa Inés, y Guayeneche. Finalmente, para la capacidad de intercambio catiónico (CIC), las diferencias se encontraron entre La Hoyada y las fincas mencionadas, así como entre Los Pensamientos y La Punta del Llano, Loma del Hato, Santa Inés, y Guayeneche.

Tabla 5. Comparación de los macronutrientes y la CIC en los suelos de las fincas estudiadas

Finca	P (ppm)	P (CV)	S	S (CV)	Ca	Ca (CV)	Mg	Mg (CV)	K	K (CV)	Na	Na (CV)	CIC	CIC (CV)
Cmol(+).kg ⁻¹														
La Hoyada	7,6±3,9	52	6,6±7,0	106,8	1,0±0,5	47,1	0,2±0,0	16,4	0,2±0,1	30	0,1±0,0	0	3,9±0,8	19
Los Pensamientos	11,1±0,0	0,0	17,5±0,0	0,0	1,3±0,0	0,0	0,2±0,0	0,0	0,3±0,0	0,0	0,1±0,0	0	5,1±0,0	0,0
La Punta del Llano	17,7±15,5	87,6	12,7±5,2	40,6	0,8±0,5	55,2	0,2±0,0	5,7	0,3±0,1	17,9	0,1±0,0	0	4,5±0,4	9,4
Los Tanques	11,6±1,5	12,9	13,3±4,7	35,4	1,2±0,3	23,7	0,2±0,0	8,7	0,2±0,0	4,6	0,1±0,0	0	4,6±0,3	7,4
La Fortuna	15,2±0,0	0,0	27,4±0,0	0,0	1,3±0,0	0,0	0,3±0,0	0,0	0,3±0,0	0,0	0,1±0,0	0	4,3±0,0	0,0
Loma del Hato	64,5±69,3	107,4	6,3±3,7	58,7	1,4±0,3	18,2	0,3±0,0	15	0,3±0,1	24,2	0,1±0,0	0	3,6±0,5	14,4
Santa Inés	24,3±18,7	77	15,1±15,8	105,2	1,3±0,2	14,5	0,2±0,0	4,8	0,3±0,1	27,1	0,1±0,0	0	4,1±0,2	4,6
Guayeneche	23,0±0,0	0,0	3,5±0,0	0,0	2,4±0,0	0,0	0,3±0,0	0,0	0,5±0,0	0,0	0,1±0,0	0	5,1±0,0	0,0
Valor de p	0,0002		0,001		0,003		0,04		0,002				0,008	

Valores promedio por finca±desviación estándar seguidos por letras mayúsculas distintas indican diferencias entre fincas para cada variable de suelo. P: Fósforo; S: Azufre; a: Calcio; Mg: Magnesio; K: Potasio; Na: Sodio; CIC: Capacidad de Intercambio catiónico; CV: Coeficiente de variación Fuente Autor.

El análisis de los nutrientes en las fincas muestra que varias fincas están por debajo del rango óptimo de fósforo, indicando la necesidad de suplementación. En cuanto al azufre, la mayoría de las fincas están dentro del rango óptimo, aunque algunas están por debajo o por encima. La mayoría de las fincas también están dentro del rango óptimo de calcio, con algunas ligeramente por debajo. Todas las fincas están por debajo o en el límite inferior del rango óptimo de magnesio, lo que sugiere la necesidad de suplementación. Para el potasio, varias fincas están en el límite inferior o por debajo del rango óptimo, excepto Guayeneche, que está dentro del rango óptimo. Finalmente, todas las fincas están por debajo del rango óptimo de la capacidad de intercambio catiónico (CIC), lo que indica una baja capacidad de retención de nutrientes.

Las fincas con niveles de fósforo (P) por debajo del rango óptimo, como La Hoyada y Los Pensamientos, deben considerar la aplicación de fertilizantes fosfatados, y es recomendable realizar un seguimiento regular de los niveles de fósforo en el suelo para ajustar las dosis de fertilización según sea necesario. Aunque la mayoría de las fincas tienen niveles de azufre (S) dentro del rango óptimo, algunas fincas como La Hoyada y Loma del Hato presentan niveles por debajo, mientras que La Fortuna tiene niveles por encima; se recomienda monitorear regularmente los niveles de azufre y ajustar la fertilización para mantenerlos dentro del rango óptimo.

Para las fincas ligeramente por debajo del rango óptimo de calcio (Ca), como La Punta del Llano, se recomienda la aplicación de enmiendas calcáreas para mejorar los niveles de calcio y ajustar el pH del suelo. Todas las fincas, al estar por debajo o en el límite inferior del rango óptimo de magnesio (Mg), deben considerar la aplicación de fertilizantes ricos en magnesio, como sulfato de magnesio, realizando aplicaciones regulares y monitoreando los niveles de magnesio para asegurar un suministro adecuado.

Las fincas que están en el límite inferior o por debajo del rango óptimo de potasio (K), como La Hoyada y Los Tanques, deben considerar la aplicación de fertilizantes potásicos, y la finca Guayeneche, aunque está dentro del rango óptimo, también debe mantener un monitoreo regular para asegurar que los niveles de potasio se mantengan adecuados.

Finalmente, todas las fincas, al estar por debajo del rango óptimo de capacidad de intercambio catiónico (CIC), deben enfocarse en aumentar la materia orgánica del suelo mediante la adición de compost, estiércol y otros materiales orgánicos, lo que aumentará la CIC y mejorará la retención de nutrientes y la fertilidad del suelo.

Los resultados de los micronutrientes de los suelos se presentan en la tabla 6. Se destaca el hierro (Fe) con altas concentraciones, que deben ser evaluadas su repercusión en el desarrollo de las plantas, los valores de Cu y Na , no presentan variación en los diferentes lotes y son bajos los valores. Para B y Mn las cantidades evaluadas en el suelo son bajas.

Las diferencias significativas encontradas incluyen Boro (B), donde Santa Inés mostró diferencias significativas respecto a las otras fincas; Hierro (Fe), con diferencias significativas entre Los Pensamientos y las demás fincas; Cobre (Cu), en el que todos los valores están por debajo de 1 mg/kg, indicando una deficiencia generalizada; y Manganeseo (Mn), con diferencias significativas también entre Los Pensamientos y las otras fincas.

Tabla 6. Comparación en la concentración de micronutrientes presentes en los suelos de las fincas estudiadas

Finca	B	B (CV)	Fe	Fe (CV)	Cu	Mn	Mn (CV)
La Hoyada	0,1±0,0	20	241,4±90,1	37,3	1,5±0,0	2,3±0,8	35
Los Pensamientos	0,1±0,0	0,0	504,5±0,0	0,0	<1,0	5,5±0,0	0,0
La Punta del Llano	0,2±0,0	0	253,0±54,5	21,5	<1,0	3,1±1,4	45,2
Los Tanques	0,2±0,0	6,7	364,8±18,4	5,1	<1,0	2,9±0,8	27,6
La Fortuna	0,2±0,0	0,0	402,6±0,0	0,0	<1,0	4,2±0,0	0,0
Loma del Hato	0,2±0,0	12,5	332,9±85,4	25,6	<1,0	3,7±0,5	13,5
Santa Inés	0,2±0,1	55	263,8±131,0	49,6	<1,0	2,0±1,1	55
Guayeneche	0,3±0,0	0,0	435,0±0,0	0,0	<1,0	1,6±0,0	0,0
Valor de p	0,001		0,002		0,001		0,001

Valores promedio por finca±desviación estándar seguidos por letras mayúsculas distintas indican diferencias entre fincas para cada variable de suelo. B: Boro; Fe: Hierro; Cu: Cobre; Mn: Manganeseo; CV: Coeficiente de variación. Fuente: Autor.

Los valores promedio de boro en las fincas varían entre 0,1 y 0,3 mg/kg. Comparando con los valores de referencia, que oscilan entre 0,5 y 2 mg/kg para suelos agrícolas, todas las fincas están por debajo del rango óptimo, lo que indica una posible deficiencia de boro. Se recomienda aplicar fertilizantes que contengan boro para corregir esta deficiencia y mejorar la disponibilidad de este micronutriente esencial.

La concentración de hierro en las fincas varía entre 241,4 y 504,5 mg/kg. Comparando con los valores de referencia, que oscilan entre 50 y 250 mg/kg para suelos agrícolas, varias fincas, como Los Pensamientos y Guayeneche, están significativamente por encima del rango óptimo, lo que podría indicar una toxicidad de hierro. Se recomienda monitorear los niveles de hierro y, si es necesario, aplicar prácticas de manejo del suelo para reducir la disponibilidad de hierro y prevenir la toxicidad en las plantas.

Los datos de cobre en las fincas están todos por debajo de 1 mg/kg. Comparando con los valores de referencia, que oscilan entre 1 y 3 mg/kg para suelos agrícolas, todas las fincas están por debajo del rango óptimo, lo que indica una posible deficiencia de cobre. Se recomienda aplicar fertilizantes que contengan cobre para corregir esta deficiencia y mejorar la disponibilidad de este micronutriente esencial.

El promedio de la concentración de manganeso en las fincas varía entre 1,6 y 5,5 mg/kg. Comparando con los valores de referencia, que oscilan entre 10 y 50 mg/kg para suelos agrícolas, todas las fincas están por debajo del rango óptimo, lo que indica una posible deficiencia de manganeso. Se recomienda aplicar fertilizantes que contengan manganeso para corregir esta deficiencia y mejorar la disponibilidad de este micronutriente esencial.

Conclusiones

Desde el punto de vista del análisis físico (textura, humedad, densidad, porosidad y RMP) se presenta limitaciones, que hay que evaluar y hacer los respectivos ajustes agronómicos.

El pH de los suelos es moderadamente ácido lo que puede ser una limitación para el desarrollo del cultivo.

Los suelos de las fincas no presentan problemas de salinidad.

El porcentaje de materia orgánica en los lotes es bajo, limitando la disponibilidad de nutrientes, desarrollo de vida microbiana y bajo nivel de fertilidad.

Las fincas presentan deficiencia en la mayoría de macro y micronutrientes, solo el hierro presenta niveles altos, que deben ser evaluados para su posible afectación en el desarrollo de las plantas.

Recomendaciones

Se recomienda que los lotes tengan periodos de descanso, para que puedan regular las propiedades físicas y químicas.

Para los lotes cultivables de papa se recomienda hacer análisis en campo y laboratorio de los suelos en cada siembra para identificar niveles críticos de factores físico y químicos y hacer los respectivos correctivos.

Es necesario la aplicación de enmiendas calcáreas que ayuden a corregir acidez y mejorar la disponibilidad de nutrientes.

Se recomienda la aplicación de nitrógeno debido al porcentaje bajo de materia orgánica.

En cuanto a los otros macro y micronutrientes se recomienda aplicaciones para aumentar los niveles y mantenerlos.

En cuanto a los micronutrientes se recomienda la aplicación debido a sus concentraciones moderadas.

Se recomienda utilizar fertilizantes que sean amigables con el medio ambiente (composta, estiércol, turba, abono verde o humus de lombriz).

En cuanto a la aplicación de materias orgánicas, que sean libres de patógenos y bien comportadas, de sitios recomendados y con registro ICA.

Referencias bibliográficas

- Abi, R., Arrieche, S., & Neidy, L. C. (2012). Evaluación de la calidad del suelo, en el sistema productivo orgánico La Estancia, Madrid, Cundinamarca, 2012. Utilizando indicadores de calidad de suelos. Edu.co. <https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/8990/AbiSaabArriecheRosana2012.pdf?sequence=1>
- Altieri, M., & Nicholls, C. I. (2002). Sistema agroecológico rápido de evaluación de calidad de suelo y salud de cultivos en el agroecosistema de café. Universidad de California, Berkeley.
- Alvarado, A., Barrera, A., Ángel, M., & Avellaneda, R. (2016). Respuesta de la papa criolla (*Solanum phureja*) a diferentes aplicaciones de fertilización orgánico mineral en Bogotá, Cundinamarca. Edu.Co. <https://repository.udca.edu.co/bitstream/handle/11158/936/TRABAJO%20DE%20GRADO%20totalmente%20final.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Blake, G. R., & Hartge, K. H. (1986). Densidad aparente. En A. Klute (Ed.), Métodos de análisis de suelos, Parte 1—Métodos físicos y mineralógicos (2ª ed., pp. 363-382). Monografía de agronomía 9, Sociedad Estadounidense de Agronomía—Sociedad de Ciencias del Suelo de América.
- Boletín Regional No. 05. (2020). Fedepapa.com. <https://fedepapa.com/wp-content/uploads/2021/09/NACIONAL-2020.pdf>
- Centro Internacional de la Papa (CIP). (2019). Papa. <https://cipotato.org/es/potato/>
- Corpoica. (2015a). Informe del producto 1: Caracterización de la variabilidad climática zonificación de la susceptibilidad territorial a los eventos climáticos extremos, Departamento de Norte de Santander. Corpoica, Cundinamarca, Mosquera.

Corpoica. (2015b). Informe del producto 2: Mapas de aptitud agroclimática e identificación de nichos productivos por eventos de variabilidad climática para cebolla (Ocaña y La Playa), lulo (Ábrego y Teorama) y papa (Silos y Mutiscua). Corpoica, Cundinamarca, Mosquera.

Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica). (2016). Plan de manejo agroclimático integrado de papa (*Solanum tuberosum*) en Silos, Norte de Santander, Colombia. ResearchGate.

https://www.researchgate.net/publication/319403650_Plan_de_Manejo_Agroclimatico_Integrado_de_Papa_Solanum_tuberosum_en_Silos_Norte_de_Santander_Colombia/link/59a83c450f7e9b2790091fcb/download

Cortés-Duque, J., & Sarmiento, C. (Eds.). (2013). Visión socioecosistémica de los páramos y la alta montaña colombiana: Memorias del proceso de definición de criterios para la delimitación de páramos. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, IAvH.

Decreto 2811. (1974). Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente. http://www.minambiente.gov.co/images/GestionIntegraldelRecursoHidrico/pdf/normativa/Decreto_2811_de_1974.pdf

FEDEPAPA. (2004). Guía ambiental para el cultivo de la papa. Wordpress.com. <https://redjusticiaambientalcolombia.files.wordpress.com/2012/09/guia-ambiental-para-el-cultivo-de-la-papa.pdf>

Federación Colombiana de Productores de Papa (Fedepapa). (2019). Informe trimestral del subsector papa. I trimestre-2019. <https://fedepapa.com/wp-content/uploads/2017/01/Informe-de-Coyuntura-1er-Trimestre-2019.pdf>

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2015). Los suelos sanos son la base para la producción de alimentos saludables. <https://www.fao.org/soils-2015/news/news-detail/es/c/277721/>

- García, Y., Ramírez, W., & Sánchez, S. (2012). Indicadores de la calidad de los suelos: una nueva manera de evaluar este recurso. *Pastos y Forrajes*, 35(2), 125-138.
- Gardner, W. H. (1986). Contenido de agua. En A. Klute (Ed.), *Métodos de análisis de suelos, Parte 1. Métodos físicos y mineralógicos: Monografía de agronomía n.º 9 (2ª ed.)*. Sociedad Estadounidense de Agronomía, Sociedad de Ciencias del Suelo de América.
- Gee, G. W., & Bauder, J. W. (1986). Análisis del tamaño de partículas. En A. Klute (Ed.), *Methods of Soil Analysis, Part 1. Physical and Mineralogical Methods, Agronomy Monograph No. 9 (2ª ed., pp. 383-411)*. Sociedad Americana de Agronomía/Soil Science Society of America.
- Gliessman, R. (2002). *Agroecología: procesos ecológicos en agricultura sostenible*. CATIE.
- Gómez, M. (2006). *Introducción a la Metodología de la Investigación*. Brujas. Capítulo 5: Alcance y enfoque de una investigación.
- González, L. C., González-Pedraza, A. F., & Mogollón, A. E. C. (2021). Caracterización de los suelos de seis municipios en Norte de Santander. *INGE CUC*, 17(1).
- Hernández S. C., Fernández, P., & Batipsta. (2014). *Metodología de la investigación (6ª ed.)*. McGraw-Hill. Capítulo 5: Definición de alcance de la investigación
- Hosne, G., & Cedeño, J. (2012). Comparación de tres métodos para determinar la densidad y solidez en tres suelos franco arenoso de sabana. *Revista Científica UDO Agrícola*, 12(4), 861-872.
- INIA. (2015). *Semana de la Ciencia y Tecnología Jornada de Puertas Abiertas*. Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA). <http://inia.uy/Documentos/P%C3%BAblicos/INIA%20Tacuaremb%C3%B3/2015/El%20Sue>
- Julca, A., Meneses, L., Blas, R., & Bello, S. (2006). La materia orgánica, importancia y experiencias de su uso en la agricultura. *Revista IDESIA*, 24(1), 49-61.

- Licona, J. G. M. (2017). Caracterización fisicoquímica de los suelos agrícolas del distrito de riego del municipio de Repelón, Atlántico. <https://repositorio.cuc.edu.co/bitstream/handle/11323/339/1140890180-1140883978.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- López, A. (2005). Manual de edafología. Notas de clases. Universidad de Sevilla. <http://www.scribd.com/doc/51630897/46/Calculo-de-la-porosidad>
- López, G., Carlos, A., Coromoto, A., & Gómez, G. (2016). Evaluación de la producción agronómica de la papa criolla (*Solanum phureja* Juz. et Buk.) orgánica, en la vereda Monteadentro del municipio de Pamplona - Norte de Santander. Edu.co. http://repositoriodspace.unipamplona.edu.co/jspui/bitstream/20.500.12744/565/1/Guillen_Gomez_2016_TG.pdf
- López, M., & Estrada, H. (2015). Propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo. Departamento de Manejo y Conservación de Recursos Naturales Tropicales.
- McClean, E. O. (1982). Requisito de cal y pH del suelo. En A. L. Page (Ed.), Métodos de análisis de suelos. Parte 2. Propiedades químicas y microbiológicas (pp. 199-224). Sociedad Estadounidense de Agronomía, Sociedad de Ciencias del Suelo de América.
- Mogollón Lancheros, M. (2012). Comportamiento espacial de la resistencia mecánica a la penetración y su relación con propiedades físicas del suelo en áreas con diferentes usos y ocupaciones en la Sabana de Bogotá. <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/9950/822104.2012.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Muñoz, L. A., & Lucero, A. M. (2008). Efecto de la fertilización orgánica en el cultivo de papa criolla *Solanum phureja*. *Agronomía Colombiana*, 26(2), 340-346. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-99652008000200019&lng=en&tlng=es

- Parr, J., Papendick, R., Hornick, S., & Meyer, R. (1992). Soil quality: Attributes and relationship to alternative and sustainable agriculture. *American Journal of Alternative Agriculture*, 7, 5-11.
- Pérez, M. A. (2010). Sistema agroecológico rápido de evaluación de calidad de suelo y salud de cultivos. Guía metodológica. Corporación Ambiental Empresarial.
- Rosas, G., Puentes, Y., & Menjivar, J. (2017). Relación entre pH y la disponibilidad de nutrientes para cacao en un entisol de la Amazonia colombiana. *Corpoica Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 18(3), 529-541.
- Rozo, Y. (2006). Evaluación del efecto de diferentes niveles de fósforo y potasio sobre el rendimiento de papa criolla (*Solanum phureja* Juz. et Buk) en dos localidades de Cundinamarca. Facultad de Agronomía. Universidad Nacional de Colombia.
- Sierra-Ariza, L. J., Suarez-Roberto, K. D., Villamil-Carvajal, J. E., & Alvarado-Gaona, Á. E. (2017). La investigación en el cultivo de papa en la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. *Respuestas*, 22(2), 102–115. <https://doi.org/10.22463/0122820X.1211>
- Suquilanda, M. (2017). Producción orgánica de cultivos andinos. Unión de Organizaciones Campesinas del Norte de Cotopaxi.
- Tejada Guzmán, P. M., David, J., & Espinel, A. (2020). Análisis de la influencia del sistema productivo de papa en el cambio de coberturas y usos de suelo de Soracá, Colombia. *Edu.co*.
https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/52699/TESIS_TEJADA_PAULA.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Vallejo Quintero, V. E. (2013). Importancia y utilidad de la evaluación de la calidad de suelos mediante componente microbiano: Experiencias en sistemas silvopastoriles. *Colombia Forestal*, 16(1), 83-99.
- Van der Hammen, T., Pabón, J. D., Gutiérrez, H., & Alarcón, J. C. (2002). El cambio global y los ecosistemas de alta montaña. En Castaño-Urbe (Ed.), *Páramos y ecosistemas altoandinos*

de Colombia en condiciones HotSpot & Global Climatic Tensor (pp. 163-209). Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, IDEAM y Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, MAVDT.

Vandermeer, J. (2011). The ecology of agroecosystems. Jones and Bartlett Publishers.

Zamora, F., Tua, D., & Torres, D. (2008). Evaluación de cinco fuentes orgánicas sobre el desarrollo vegetativo y rendimiento del cultivo de papa. *Agronomía Tropical*, 58(3), 233-243.
http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0002-192X2008000300004&lng=es&tlng=es

EVIDENCIAS

Toma de muestras de suelo



Toma de coordenadas



Muestras de los 16 lotes para su empaque y envío



Bolsas pares envío de muestras



Toma de datos de los lotes



Tamizaje de las muestras



Toma de datos par propiedades físicas.



ANEXOS

Resultados estadísticos

MACROS Y MICROS

ONEWAY P S B AL Ca Mg K Fe Cu Mn BY Finca

/STATISTICS DESCRIPTIVES
/MISSING ANALYSIS
/POSTHOC=TUKEY ALPHA(0.05) .

Descriptivos									
		N	Media	Desviación estándar	Error estándar	95% del intervalo de confianza para la media		Mínimo	Máximo
						Límite inferior	Límite superior		
P	1,00	2	7,5650	3,93858	2,78500	-27,8218	42,9518	4,78	10,35
	2,00	2	11,0700	,00000	,00000	11,0700	11,0700	11,07	11,07
	3,00	2	17,6500	15,44321	10,92000	-121,1018	156,4018	6,73	28,57
	4,00	2	11,6200	1,49907	1,06000	-1,8486	25,0886	10,56	12,68
	5,00	2	15,2300	,00000	,00000	15,2300	15,2300	15,23	15,23
	6,00	4	79,5225	70,27697	35,13848	-32,3038	191,3488	31,38	183,64
	7,00	2	24,3050	18,74540	13,25500	-144,1157	192,7257	11,05	37,56
	8,00	2	14,4800	12,09153	8,55000	-94,1581	123,1181	5,93	23,03
	Total	18	28,9961	41,33730	9,74329	8,4396	49,5527	4,78	183,64
S	1,00	2	6,5550	7,00743	4,95500	-56,4042	69,5142	1,60	11,51
	2,00	2	17,4800	,00000	,00000	17,4800	17,4800	17,48	17,48
	3,00	2	12,7350	5,15481	3,64500	-33,5791	59,0491	9,09	16,38
	4,00	2	13,2850	4,68812	3,31500	-28,8361	55,4061	9,97	16,60

	5,00	2	27,4200	,00000	,00000	27,4200	27,4200	27,42	27,42
	6,00	4	6,5050	3,65247	1,82624	,6931	12,3169	4,01	11,92
	7,00	2	15,0500	15,82505	11,19000	-127,1324	157,2324	3,86	26,24
	8,00	2	3,3650	,24749	,17500	1,1414	5,5886	3,19	3,54
	Total	18	12,1000	8,66295	2,04188	7,7920	16,4080	1,60	27,42
B	1,00	2	,1500	,04243	,03000	-,2312	,5312	,12	,18
	2,00	2	,1000	,00000	,00000	,1000	,1000	,10	,10
	3,00	2	,1600	,00000	,00000	,1600	,1600	,16	,16
	4,00	2	,1500	,01414	,01000	,0229	,2771	,14	,16
	5,00	2	,1600	,00000	,00000	,1600	,1600	,16	,16
	6,00	4	,2375	,03862	,01931	,1760	,2990	,20	,29
	7,00	2	,2000	,11314	,08000	-,8165	1,2165	,12	,28
	8,00	2	,2700	,01414	,01000	,1429	,3971	,26	,28
	Total	18	,1850	,06290	,01482	,1537	,2163	,10	,29
Al	1,00	2	2,0350	,20506	,14500	,1926	3,8774	1,89	2,18
	2,00	2	2,8800	,00000	,00000	2,8800	2,8800	2,88	2,88
	3,00	2	2,7800	,24042	,17000	,6199	4,9401	2,61	2,95
	4,00	2	2,4300	,08485	,06000	1,6676	3,1924	2,37	2,49
	5,00	2	1,9400	,00000	,00000	1,9400	1,9400	1,94	1,94
	6,00	4	1,1450	,54714	,27357	,2744	2,0156	,63	1,88
	7,00	2	1,7800	,12728	,09000	,6364	2,9236	1,69	1,87
	8,00	2	1,0450	,67175	,47500	-4,9904	7,0804	,57	1,52
	Total	18	1,9089	,74016	,17446	1,5408	2,2770	,57	2,95
Ca	1,00	2	1,0400	,49497	,35000	-3,4072	5,4872	,69	1,39
	2,00	2	1,2800	,00000	,00000	1,2800	1,2800	1,28	1,28
	3,00	2	,8150	,44548	,31500	-3,1875	4,8175	,50	1,13
	4,00	2	1,2250	,28991	,20500	-1,3798	3,8298	1,02	1,43
	5,00	2	1,2900	,00000	,00000	1,2900	1,2900	1,29	1,29

	6,00	4	1,4275	,25025	,12512	1,0293	1,8257	1,08	1,65
	7,00	2	1,3050	,19092	,13500	-,4103	3,0203	1,17	1,44
	8,00	2	2,1100	,41012	,29000	-1,5748	5,7948	1,82	2,40
	Total	18	1,3244	,41334	,09743	1,1189	1,5300	,50	2,40
Mg	1,00	2	,2150	,03536	,02500	-,1027	,5327	,19	,24
	2,00	2	,2100	,00000	,00000	,2100	,2100	,21	,21
	3,00	2	,1750	,00707	,00500	,1115	,2385	,17	,18
	4,00	2	,2300	,02828	,02000	-,0241	,4841	,21	,25
	5,00	2	,2500	,00000	,00000	,2500	,2500	,25	,25
	6,00	4	,2425	,04500	,02250	,1709	,3141	,18	,28
	7,00	2	,2100	,01414	,01000	,0829	,3371	,20	,22
	8,00	2	,2850	,00707	,00500	,2215	,3485	,28	,29
	Total	18	,2289	,03756	,00885	,2102	,2476	,17	,29
K	1,00	2	,2000	,05657	,04000	-,3082	,7082	,16	,24
	2,00	2	,2600	,00000	,00000	,2600	,2600	,26	,26
	3,00	2	,2800	,07071	,05000	-,3553	,9153	,23	,33
	4,00	2	,2200	,01414	,01000	,0929	,3471	,21	,23
	5,00	2	,2800	,00000	,00000	,2800	,2800	,28	,28
	6,00	4	,3325	,08921	,04460	,1905	,4745	,23	,44
	7,00	2	,2950	,07778	,05500	-,4038	,9938	,24	,35
	8,00	2	,5250	,00707	,00500	,4615	,5885	,52	,53
	Total	18	,3028	,10329	,02435	,2514	,3541	,16	,53
Fe	1,00	2	241,4150	90,05005	63,67500	-567,6526	1050,4826	177,74	305,09
	2,00	2	504,5100	,00000	,00000	504,5100	504,5100	504,51	504,51
	3,00	2	253,9550	54,59571	38,60500	-236,5680	744,4780	215,35	292,56
	4,00	2	364,8250	18,33528	12,96500	200,0891	529,5609	351,86	377,79
	5,00	2	402,6300	,00000	,00000	402,6300	402,6300	402,63	402,63
	6,00	4	329,0075	83,51805	41,75902	196,1116	461,9034	240,36	435,00

	7,00	2	263,8400	164,14777	116,07000	-1210,9692	1738,6492	147,77	379,91
	8,00	2	325,0650	155,51399	109,96500	-1072,1728	1722,3028	215,10	435,03
	Total	18	334,9172	106,54909	25,11386	281,9316	387,9028	147,77	504,51
Cu	1,00	2	,7450	1,05359	,74500	-8,7211	10,2111	,00	1,49
	2,00	2	,0000	,00000	,00000	,0000	,0000	,00	,00
	3,00	2	,0000	,00000	,00000	,0000	,0000	,00	,00
	4,00	2	,0000	,00000	,00000	,0000	,0000	,00	,00
	5,00	2	,0000	,00000	,00000	,0000	,0000	,00	,00
	6,00	4	,0000	,00000	,00000	,0000	,0000	,00	,00
	7,00	2	,0000	,00000	,00000	,0000	,0000	,00	,00
	8,00	2	,0000	,00000	,00000	,0000	,0000	,00	,00
	Total	18	,0828	,35120	,08278	-,0919	,2574	,00	1,49
Mn	1,00	2	2,2750	1,13844	,80500	-7,9535	12,5035	1,47	3,08
	2,00	2	5,5200	,00000	,00000	5,5200	5,5200	5,52	5,52
	3,00	2	3,1200	1,44250	1,02000	-9,8403	16,0803	2,10	4,14
	4,00	2	2,9100	1,10309	,78000	-7,0008	12,8208	2,13	3,69
	5,00	2	4,2100	,00000	,00000	4,2100	4,2100	4,21	4,21
	6,00	4	3,4925	,56724	,28362	2,5899	4,3951	2,73	3,99
	7,00	2	2,0400	1,15966	,82000	-8,3791	12,4591	1,22	2,86
	8,00	2	2,9250	1,85969	1,31500	-13,7837	19,6337	1,61	4,24
	Total	18	3,3317	1,28182	,30213	2,6942	3,9691	1,22	5,52