

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA

FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS

ESCUELA PROFESIONAL DE AGRONOMÍA



TESIS

**“EFECTO DE TRES DOSIS DE FERTILIZACIÓN QUÍMICA SOBRE LAS
PROPIEDADES QUÍMICAS DE UN SUELO ÁCIDO EN SAN MIGUEL-CAJAMARCA”**

Para optar el título profesional de:

INGENIERO AGRÓNOMO

Presentado por el Bachiller:

DARWIN OMAR VÁSQUEZ CULQUI

ASESOR:

Dr. EDIN EDGARDO ALVA PLASENCIA

CAJAMARCA - PERÚ

-2025-

CONSTANCIA DE INFORME DE ORIGINALIDAD

1. Investigador:
DARWIN OMAR VÁSQUEZ CULQUI
DNI: N° 70933879
Escuela Profesional/Unidad UNC:
DE AGRONOMÍA
2. Asesor:
Dr. EDIN EDGARDO ALVA PLASENCIA
Facultad/Unidad UNC:
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS
3. Grado académico o título profesional
 Bachiller Título profesional Segunda especialidad
 Maestro Doctor
4. Tipo de Investigación:
 Tesis Trabajo de investigación Trabajo de suficiencia profesional
 Trabajo académico
5. Título de Trabajo de Investigación:
EFFECTO DE TRES DOSIS DE FERTILIZACIÓN QUÍMICA SOBRE LAS PROPIEDADES QUÍMICAS DE UN SUELO ÁCIDO EN SAN MIGUEL – CAJAMARCA.
6. Fecha de evaluación: **14/02/2025**
7. Software antiplagio: TURNITIN URKUND (OURIGINAL) (*)
8. Porcentaje de Informe de Similitud: **16%**
9. Código Documento: **oid:::3117:428034656**
10. Resultado de la Evaluación de Similitud:
 APROBADO PARA LEVANTAMIENTO DE OBSERVACIONES O DESAPROBADO

Fecha Emisión: 17/02/2025

<i>Firma y/o Sello Emisor Constancia</i>
 Dr. Edin Edgardo Alva Plasencia DNI: 26620894

* En caso se realizó la evaluación hasta setiembre de 2023



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA
"NORTE DE LA UNIVERSIDAD PERUANA"
Fundada por Ley N° 14015, del 13 de febrero de 1962
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS
Secretaría Académica



ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

En la ciudad de Cajamarca, a los cuatro días del mes de febrero del año dos mil veinticinco, se reunieron en el ambiente **2C - 202** de la Facultad de Ciencias Agrarias, los miembros del Jurado, designados según **Resolución de Consejo de Facultad N° 017-2025-FCA-UNC, de fecha 13 de enero del 2025**, con la finalidad de evaluar la sustentación de la **TESIS** titulada: "**EFFECTO DE TRES DOSIS DE FERTILIZACIÓN QUÍMICA SOBRE LAS PROPIEDADES QUÍMICAS DE UN SUELO ÁCIDO EN SAN MIGUEL - CAJAMARCA**", realizada por el Bachiller **DARWIN OMAR VÁSQUEZ CULQUI** para optar el Título Profesional de **INGENIERO AGRÓNOMO**.

A las once horas y cinco minutos, de acuerdo a lo establecido en el **Reglamento Interno para la Obtención de Título Profesional de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Cajamarca**, el Presidente del Jurado dio por iniciado el Acto de Sustentación, luego de concluida la exposición, los miembros del Jurado procedieron a la formulación de preguntas y posterior deliberación. Acto seguido, el Presidente del Jurado anunció la aprobación por unanimidad, con el calificativo de diecisiete (17); por tanto, el Bachiller queda expedito para proceder con los trámites que conlleven a la obtención del Título Profesional de **INGENIERO AGRÓNOMO**.

A las doce horas y treinta minutos del mismo día, el Presidente del Jurado dio por concluido el Acto de Sustentación.

Dr. Isidro Rimarachín Cabrera
PRESIDENTE

Dr. Wilfredo Poma Rojas
SECRETARIO

Ing. José Lizandro Silva Mego
VOCAL

Dr. Edín Edgardo Alva Plasencia
ASESOR

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mis padres, quienes con su amor, esfuerzo y sacrificio han sido el pilar fundamental en cada paso de mi vida. A mi madre Dionicia Culqui Carranza, por ser mi guía incondicional, por su fortaleza y por enseñarme a enfrentar los desafíos con determinación y fe; y a mi padre Gilberto Vásquez Sánchez, por su apoyo constante, por creer en mí y por inspirarme a alcanzar mis metas con perseverancia

A mis abuelos, cuyo amor, sabiduría y ejemplo han sido una fuente inagotable de inspiración en mi vida y a mis hermanos David y Elisa por su cariño que siempre me han brindado, dejando en mí una huella imborrable.

AGRADECIMIENTO

A Dios, por ser mi guía y fortaleza, y por brindarme las bendiciones, la claridad y la fuerza necesarias para superar los desafíos y culminar este trabajo.

Expreso mi más sincero agradecimiento a mi asesor, Dr. Edin Edgardo Alva Plasencia por su valiosa orientación, paciencia y dedicación a lo largo de este proceso. Su conocimiento, compromiso y apoyo constante han sido fundamentales para el desarrollo de este trabajo.

Al proyecto "Estrategias tecnológicas para incrementar la calidad del suelo, pasturas y leche en la región Cajamarca", perteneciente a la Facultad de Ingeniería en Ciencias Pecuarias de la Universidad Nacional de Cajamarca, por haberme brindado las herramientas y recursos necesarios para alcanzar los objetivos planteados y contribuir al desarrollo de este proyecto.

ÍNDICE GENERAL

Contenido	página
DEDICATORIA	i
AGRADECIMIENTO	ii
ÍNDICE GENERAL	iii
ÍNDICE DE TABLAS	vi
ÍNDICE DE FIGURAS	vii
ÍNDICE DE ANEXOS	ix
RESUMEN	x
ABSTRACT	xi
CAPÍTULO I	1
INTRODUCCIÓN	1
1.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	2
1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	4
1.2. JUSTIFICACIÓN	4
1.4. OBJETIVOS	5
1.4.1. <i>Objetivo General</i>	5
1.4.2. <i>Objetivo Específico</i>	5
1.5. HIPÓTESIS	5
CAPÍTULO II	6
REVISIÓN DE LITERATURA	6
2.1. ANTECEDENTES	6
2.2. MARCO TEÓRICO	9
2.2.1. <i>Suelo</i>	9
2.2.2. <i>Acidez del suelo</i>	9
2.2.3. <i>Propiedades químicas</i>	10
2.3. DEFINICIÓN DE TÉRMINOS	21

CAPÍTULO III.....	22
MATERIALES Y MÉTODOS.....	22
3.1. UBICACIÓN.....	22
3.2. CONDICIONES CLIMÁTICAS.....	23
3.2.1. <i>Temperatura</i>	23
3.2.2. <i>Humedad relativa</i>	23
3.2.3. <i>Precipitación</i>	24
3.3. MATERIALES.....	25
3.3.1. <i>Material de Campo</i>	25
3.3.2. <i>Materiales de Escritorio</i>	25
3.3.3. <i>Insumos o Requerimientos</i>	25
3.4. METODOLOGÍA.....	26
3.4.1. <i>Tratamientos del estudio</i>	26
3.4.2. <i>Arreglo de los tratamientos</i>	26
3.4.3. <i>Reconocimiento del área experimental</i>	27
3.4.4. <i>Toma de muestras del predio experimental</i>	28
3.4.5. <i>Escalas de interpretación de los parámetros químicos del suelo</i>	28
3.4.6. <i>Análisis del suelo</i>	30
3.4.7. <i>Preparación del terreno</i>	31
3.4.8. <i>Delimitación del área experimental</i>	31
3.4.9. <i>Instalación del experimento</i>	32
3.4.10. <i>Evaluaciones</i>	32
3.4.11. <i>Análisis estadístico</i>	32
CAPÍTULO IV.....	33
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	33
4.1. EFECTO DE LAS DOSIS DE FERTILIZACIÓN QUÍMICA EN EL PH DEL SUELO.....	33
4.2. TENDENCIA DEL PH EN EL SUELO.....	35
4.3. EFECTO DE LAS DOSIS DE FERTILIZACIÓN QUÍMICA EN LA CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA DEL SUELO.....	37
4.4. TENDENCIA DE LA CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA DEL SUELO.....	39

4.5. EFECTO DE LAS DOSIS DE FERTILIZACIÓN QUÍMICA EN LA MATERIA ORGÁNICA DEL SUELO .	41
4.6. TENDENCIA DE LA MATERIA ORGÁNICA DEL SUELO	43
4.7. EFECTO DE LAS DOSIS DE FERTILIZACIÓN QUÍMICA EN EL NITRÓGENO TOTAL DEL SUELO....	45
4.8. TENDENCIA DEL NITRÓGENO TOTAL EN EL SUELO	47
4.9. EFECTO DE LAS DOSIS DE FERTILIZACIÓN QUÍMICA EN EL FÓSFORO DISPONIBLE DEL SUELO	49
4.10. TENDENCIA DEL FÓSFORO DISPONIBLE EN EL SUELO	51
4.11. EFECTO DE LAS DOSIS DE FERTILIZACIÓN QUÍMICA EN EL POTASIO DISPONIBLE DEL SUELO	53
4.12. TENDENCIA DEL POTASIO DISPONIBLE EN EL SUELO.....	56
4.13. EFECTO DE LAS DOSIS DE FERTILIZACIÓN QUÍMICA EN LA CAPACIDAD DE INTERCAMBIO CATIONICO DEL SUELO.....	58
4.14. TENDENCIA DE LA CAPACIDAD DE INTERCAMBIO CATIONICO (CIC)	60
4.15. EFECTO DE LAS DOSIS DE FERTILIZACIÓN QUÍMICA EN LAS BASES CAMBIABLES DEL SUELO.....	63
4.16. TENDENCIA DE LAS BASES CAMBIABLES EN EL SUELO	65
4.17. EFECTO DE LAS DOSIS DE FERTILIZACIÓN QUÍMICA EN LA ACIDEZ CAMBIABLE DEL SUELO	67
2.18. TENDENCIA DE LA ACIDEZ CAMBIABLE EN EL SUELO	70
CAPÍTULO V.....	73
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIÓN.....	73
5.1. CONCLUSIONES	73
5.2. RECOMENDACIÓN.....	74
CAPÍTULO VI	75
BIBLIOGRAFÍA.....	75
CAPÍTULO VII	82
ANEXOS.....	82

ÍNDICE DE TABLAS

Contenido	página
Tabla 1 <i>Tratamientos de la investigación</i>	26
Tabla 2 <i>Interpretación del pH del suelo</i>	28
Tabla 3 <i>Interpretación de la conductividad eléctrica del suelo</i>	29
Tabla 4 <i>Interpretación del nitrógeno total del suelo</i>	29
Tabla 5 <i>Interpretación de la Materia Orgánica, Fósforo y Potasio del suelo</i>	29
Tabla 6 <i>Interpretación de la Capacidad de Intercambio Catiónico del suelo</i>	29
Tabla 7 <i>Interpretación de las Bases Cambiables del suelo</i>	30
Tabla 8 <i>Interpretación de la acidez cambiante del suelo</i>	30
Tabla 9 <i>Análisis físico químico del suelo realizado previo a la instalación del experimento</i>	31
Tabla 10 <i>Análisis de varianza (ANOVA) para el pH del suelo</i>	33
Tabla 11 <i>Prueba de Tukey para la comparación de medias del pH del suelo</i>	34
Tabla 12 <i>Análisis de varianza (ANOVA) para la conductividad eléctrica del suelo</i>	37
Tabla 13 <i>Prueba de Tukey para la comparación de medias de la conductividad eléctrica</i>	38
Tabla 14 <i>Análisis de varianza (ANOVA) para la materia orgánica del suelo</i>	41
Tabla 15 <i>Prueba de Tukey para la comparación de medias de la Materia orgánica</i>	42
Tabla 16 <i>Análisis de varianza (ANOVA) para el nitrógeno total en el suelo</i>	45
Tabla 17 <i>Prueba de Tukey para la comparación de medias del nitrógeno total en el suelo</i>	46
Tabla 18 <i>Análisis de varianza (ANOVA) para el fósforo disponible en el suelo</i>	49
Tabla 19 <i>Prueba de Tukey para la comparación de medias para el fósforo disponible en el suelo</i>	50
Tabla 20 <i>Análisis de varianza (ANOVA) para el potasio disponible en el suelo</i>	54
Tabla 21 <i>Prueba de Tukey para la comparación de medias del potasio disponible en el suelo</i> ..	54
Tabla 22 <i>Análisis de varianza (ANOVA) para la Capacidad de Intercambio Catiónico del suelo</i>	58
Tabla 23 <i>Prueba de Tukey para la comparación de medias de la Capacidad de Intercambio Catiónico</i>	59
Tabla 24 <i>Análisis de varianza (ANOVA) para las bases cambiables en el suelo</i>	63
Tabla 25 <i>Prueba de Tukey para la comparación de medias de las Bases Cambiables</i>	64
Tabla 26 <i>Análisis de varianza (ANOVA) para la acidez cambiante en el suelo</i>	68
Tabla 27 <i>Prueba de Tukey para la comparación de medias de la acidez cambiante del suelo</i> ...	69
Tabla 28 <i>Reporte de las muestras evaluadas a los dos meses después de la instalación</i>	86
Tabla 29 <i>Reporte de las muestras evaluadas a los cuatro meses después de la instalación</i>	87
Tabla 30 <i>Reporte de las muestras evaluadas a los seis meses después de la instalación</i>	88

ÍNDICE DE FIGURAS

Contenido	página
Figura 1 <i>Mapa de ubicación del área experimental</i>	22
Figura 2 <i>Temperatura registrada durante el periodo de evaluación</i>	23
Figura 3 <i>Humedad relativa registrada durante del periodo de la investigación</i>	24
Figura 4 <i>Precipitación registrada durante el periodo de la investigación</i>	24
Figura 5 <i>Distribución de las unidades experimentales</i>	27
Figura 6 <i>Diferencias de pH del suelo en cada tratamiento</i>	34
Figura 7 <i>Comportamiento del pH del suelo en función de las dosis de fertilización y el tiempo</i>	36
Figura 8 <i>Diferencias de conductividad eléctrica del suelo en cada tratamiento</i>	38
Figura 9 <i>Comportamiento de la conductividad eléctrica en función a las dosis de fertilización y el tiempo</i>	40
Figura 10 <i>Diferencias de la materia orgánica en el suelo en cada tratamiento</i>	42
Figura 11 <i>Comportamiento de la materia orgánica del suelo en función a la dosis de fertilización y el tiempo</i>	44
Figura 12 <i>Diferencias del Nitrógeno del suelo en cada tratamiento</i>	46
Figura 13 <i>Comportamiento del Nitrógeno Total en el suelo en función de las dosis de fertilización y el tiempo</i>	48
Figura 14 <i>Diferencias del fósforo disponible en el suelo en cada tratamiento</i>	50
Figura 15 <i>Comportamiento del fósforo disponible en el suelo en función de las dosis de fertilización y el tiempo</i>	52
Figura 16 <i>Diferencias del potasio disponible en el suelo en cada tratamiento</i>	55
Figura 17 <i>Comportamiento del potasio disponible en el suelo en función de las dosis de fertilización y el tiempo</i>	57
Figura 18 <i>Diferencias de la capacidad de intercambio catiónico del suelo en cada tratamiento</i>	59
Figura 19 <i>Comportamiento de la Capacidad de Intercambio Catiónico en el suelo en función de las dosis de fertilización y el tiempo</i>	62
Figura 20 <i>Diferencias de las Bases Cambiables del suelo en cada tratamiento</i>	64
Figura 21 <i>Comportamiento de las bases cambiables en el suelo en función de las dosis de fertilización y el tiempo</i>	66
Figura 22 <i>Diferencias de la Acidez Cambiable del suelo en cada tratamiento</i>	69

Figura 23 <i>Comportamiento de la Acidez Cambiable en el suelo en función de las dosis de fertilización y el tiempo</i>	71
Figura 24 <i>Fertilizante químico Urea</i>	82
Figura 25 <i>Fertilizante químico Fosfato Diamonico</i>	82
Figura 26 <i>Fertilizante químico Cloruro de Potasio</i>	83
Figura 27 <i>Instalación de la parcela experimental</i>	83
Figura 28 <i>Toma de muestras de cada unidad experimental</i>	84
Figura 29 <i>Muestreo a los dos meses después de la instalación</i>	84
Figura 30 <i>Muestreo a los seis meses después de la instalación</i>	85
Figura 31 <i>Preparación de las muestras para ser enviadas al laboratorio de la UNAS</i>	85

ÍNDICE DE ANEXOS

Contenido	página
Anexo 1. Insumos utilizados en la investigación.....	82
Anexo 2. Panel fotográfico	83
Anexo 3. Análisis de las muestras de suelos	86

RESUMEN

El presente estudio tuvo como objetivo evaluar el efecto de tres dosis de fertilización química sobre las propiedades químicas de un suelo ácido en San Miguel, Cajamarca. Se empleó un diseño de bloques completamente al azar con cuatro tratamientos, los cuales fueron dosis alta (180-60-60), dosis media (140-40-40) y dosis baja (100-20-20) de NPK y un testigo. Los resultados mostraron que las diferentes dosis de fertilización tuvieron efectos significativos en las propiedades químicas del suelo. Se observó una disminución del pH, potasio disponible y bases cambiables, acompañado de un incremento en la conductividad eléctrica y la acidez cambiante. Asimismo, se evidenció un aumento en la materia orgánica, fósforo disponible y capacidad de intercambio catiónico, destacando los mayores valores con la dosis alta para el pH (4.83), conductividad eléctrica (0.43 dS m), materia orgánica (6.07 %) y fósforo disponible (32,76 ppm). La dosis media presentó los valores más altos en potasio disponible (139.31 ppm), capacidad de intercambio catiónico (6.86), bases cambiables (61.05 %) y acidez cambiante (38.95 %). No se encontraron cambios significativos para el nitrógeno total entre tratamientos, aunque si hubo diferencia, respecto al testigo. En conclusión, las dosis de fertilización aplicadas modifican las propiedades químicas del suelo, mostrando un impacto positivo en la materia orgánica, fósforo disponible y la capacidad de intercambio catiónico, y efectos adversos en el pH, Conductividad eléctrica, potasio disponible, bases cambiables y la acidez cambiante, con una respuesta destacada en la dosis alta para la mayoría de los parámetros evaluados.

Palabras claves: Fertilización química, propiedades químicas, suelo.

ABSTRACT

The objective of this study was to evaluate the effect of three doses of chemical fertilization on the chemical properties of an acidic soil in San Miguel, Cajamarca. A completely randomized block design was used with four treatments, which were high dose (180-60-60), medium dose (140-40-40) and low dose (100-20-20) of NPK and a control. The results showed that the different doses of fertilization had significant effects on the chemical properties of the soil. A decrease in pH, available potassium and exchangeable bases was observed, accompanied by an increase in electrical conductivity and exchangeable acidity. Likewise, an increase in organic matter, available phosphorus and cation exchange capacity was evident, highlighting the highest values with the high dose for pH (4.83), electrical conductivity (0.43 dS m), organic matter (6.07%) and available phosphorus (32.76 ppm). The medium dose presented the highest values in available potassium (139.31 ppm), cation exchange capacity (6.86), exchangeable bases (61.05 %) and exchangeable acidity (38.95 %). No significant changes were found for total nitrogen between treatments, although there was a difference with respect to the control. In conclusion, the applied fertilization doses modify the chemical properties of the soil, showing a positive impact on organic matter, available phosphorus and cation exchange capacity, and adverse effects on pH, electrical conductivity, available potassium, exchangeable bases and exchangeable acidity, with a notable response at the high dose for most of the parameters evaluated.

Keywords: Chemical fertilization, chemical properties, soil.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

Cajamarca ubicada en la sierra norte del Perú, se caracteriza por presentar condiciones climáticas favorables para la instalación de cultivos. Por lo general, presenta suelos de calidad agroecológica media a baja, suelos poco profundos a medianamente profundos, de texturas medias, drenaje bueno, con alta capacidad de retención de humedad, de reacción fuertemente a ligeramente ácida, pendientes moderadamente empinadas, ligeramente rocosos y de erosión moderada. La fertilidad natural de estos suelos es media, de niveles medios a altos en materia orgánica, niveles medios en nitrógeno total, bajos a medios en fósforo disponible, medios a altos en potasio disponibles y saturación de bases media (Poma y Alcántara, 2011).

La presión demográfica, y la limitada disponibilidad de tierras agrícolas han hecho que se sobrepase su capacidad de uso, lo que sumando al mal manejo de agua de riego y las practicas inadecuadas, han determinado que los suelos agrícolas hayan perdido su potencial de producción y empobrecimiento progresivamente. Además, los desajustes sociales y económicos aunados a la falta de técnicas apropiadas en el manejo de los suelos vienen originando un significativo y dramático descenso de la productividad de las tierras agrícolas (De la Peña, 2019).

Los fertilizantes agrícolas usado como fuente de nutrientes en los cultivos, son alternativas rápidas para intensificar la producción y productividad de los cultivos, dependiendo de las cantidades y del sistema de manejo aplicado, puede convertirse en un riesgo de contaminación del ambiente. Es por eso que el uso excesivo que supera a las necesidades de las plantas contribuye a un desequilibrio en las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo (López, 2002). Considerando este contexto, la presente investigación se planteó evaluar el efecto de tres dosis de fertilización química sobre las propiedades químicas de un suelo ácido en San Miguel-Cajamarca.

1.1. Descripción del Problema

A nivel mundial, los fertilizantes químicos han sido reconocidos como herramientas clave para garantizar la seguridad alimentaria, ya que contribuyen al incremento de la productividad agrícola, lo que a su vez mejora los ingresos de las familias rurales y su calidad de vida. Sin embargo, su uso inadecuado ha generado preocupación por los impactos negativos en el medio ambiente, afectando la calidad del suelo, el agua y el aire. Según un informe de la FAO (2019), el uso excesivo o desbalanceado de fertilizantes químicos es responsable de procesos de degradación del suelo, pérdida de biodiversidad y contaminación de fuentes hídricas, generando un desafío significativo para la sostenibilidad agrícola.

En el contexto peruano, la fertilización química está directamente relacionada con la capacidad productiva de los suelos. De la Peña (2019) señala que la evaluación de los suelos agrícolas en el Perú se realiza principalmente en función del contenido de nutrientes disponibles, ya que los agricultores suelen depender de la aplicación de fertilizantes para garantizar mejores rendimientos. Sin embargo, el uso indiscriminado de estos insumos ha llevado al deterioro de las propiedades físicas, químicas y biológicas de los suelos, especialmente en las zonas donde los sistemas de manejo no están basados en principios técnicos. Según el INEI (2023), más del 50 % de los suelos agrícolas del país presentan algún grado de degradación química, incluyendo acidificación y pérdida de materia orgánica.

La región Cajamarca, caracterizada por su alta actividad agrícola, no está exenta de esta problemática. Diversos estudios realizados en esta región han evidenciado que los suelos ácidos son particularmente vulnerables al impacto de prácticas agrícolas no sostenibles, incluyendo la aplicación excesiva de fertilizantes químicos. Según Balcázar *et al.* (2015), una parte significativa de suelos agrícolas son ácidos, lo que limita significativamente la disponibilidad de nutrientes

esenciales como el fósforo y el potasio, y aumenta la toxicidad de elementos como el aluminio y el hierro. Esta situación pone en riesgo la sostenibilidad de la producción agrícola, afectando tanto a los pequeños agricultores como a las cadenas de valor locales.

En este contexto, resultó fundamental investigar el efecto de diferentes dosis de fertilización química sobre las propiedades químicas de un suelo ácido en Cajamarca, considerando variables como pH, conductividad eléctrica (C.E), materia orgánica (M.O), nitrógeno total (N), fósforo disponible (P), potasio disponible (K), capacidad de intercambio catiónico (CIC), bases cambiabes (Ca, Mg, K, Na) y ácidos cambiabes (Al, H). La falta de información científica actualizada sobre cómo las diferentes dosis de fertilizantes influyen en estas propiedades limita la capacidad de los agricultores y tomadores de decisiones para implementar prácticas más sostenibles y eficientes. Por ello, la presente investigación busca generar evidencia empírica que contribuya a mejorar el manejo de los suelos ácidos en la región, promoviendo prácticas agrícolas más sostenibles y técnicamente fundamentadas.

1.2. Formulación del Problema

¿Cuál es el efecto de tres dosis de fertilización química sobre las propiedades químicas de un suelo ácido en San Miguel-Cajamarca?

1.2. Justificación

La presente investigación, se realizó con el fin de conocer el efecto de diferentes dosis de fertilización química (NPK) en las propiedades químicas del suelo. Teniendo en cuenta que en la actualidad el uso de fertilizantes químicos para mejorar el rendimiento de los cultivos, se aplica empíricamente, generando un manejo inadecuado del suelo, provocando un gran impacto en este recurso muy importante.

Por esta razón, se realizó la presente investigación que permitió evaluar el efecto de los fertilizantes (NPK) en diferentes dosis sobre las propiedades químicas del suelo, dicha investigación, nos brindará información sobre qué impacto tiene el uso de estos fertilizantes en el suelo. A la misma vez, servirá de ayuda para futuras investigación y para recomendar si es viable aplicar fertilizantes químicos en suelos ácidos de la región Cajamarca.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo General

Evaluar el efecto de tres dosis de fertilización química sobre las propiedades químicas de un suelo ácido en San Miguel-Cajamarca.

1.4.2. Objetivo Específico

- Evaluar el efecto de las tres dosis de fertilización química en las propiedades químicas del suelo (pH, Conductividad Eléctrica, Materia Orgánica, Nitrógeno Total, Fósforo Disponible, Potasio Disponible, Capacidad de Intercambio Catiónico, Bases cambiables y Acidez cambiabile).

1.5. Hipótesis

El uso de tres dosis (alta, media y baja) de fertilización química afecta de manera significativa las propiedades químicas de un suelo ácido en San Miguel-Cajamarca.

CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Antecedentes

Ferreira (2022) evaluó el efecto de la fertilización química y yeso agrícola sobre la producción de yerba mate. Los fertilizantes empleados fueron a base de N, P₂O₅, KCl, con una dosis de 60-40-60 kg ha⁻¹. Los tratamientos empleados fueron, fertilización química, fertilización química más 2 t ha⁻¹ de yeso agrícola y un testigo. Los resultados obtenidos respecto a las propiedades químicas del suelo muestran que la dosis de fertilización química con respecto al testigo disminuyó el pH del suelo de 5.74 a 5.34, el aluminio (Al³⁺) se incrementó de 0.04 a 0.31 cmol_c kg⁻¹, el calcio (Ca) disminuyó de 0.60 a 0.59 cmol_c kg⁻¹ y el azufre (S) disminuyó de 4.67 a 4.03 mg kg⁻¹. Además, la fertilización química más el yeso agrícola con respecto al testigo disminuye los niveles de pH de 5.74 a 5.40, el aluminio (Al³⁺) aumentó de 0.04 a 0.42 cmol_c kg⁻¹, el calcio (Ca) disminuyó de 0.60 a 0.54 cmol_c kg⁻¹, mientras que el azufre (S) en el suelo respondió a la aplicación del yeso agrícola incrementando su valor de 8,55 mg kg⁻¹. Concluyendo que el pH y Al³⁺ en el suelo son afectadas por el uso del fertilizante y Ca en el suelo no presenta respuestas por la aplicación del yeso agrícola.

López *et al.* (2021) evaluó la competencia entre los iones potasio y amonio por los sitios de adsorción en una arcilla expansiva de un suelo de los Valles del Tuy, estado Miranda, Venezuela. Se añadió al suelo dosis similares de cloruro de potasio y de amonio (2,0 meq/100 g⁻¹), señalando que la arcilla montmorillonita tiene una alta capacidad para fijar potasio, dado que el 54.5 % del potasio añadido al suelo es fijado por el complejo interlamilar. Los resultados indicaron que el potasio fijado descendió drásticamente cuando aplicaron al suelo las dosis de cloruro de potasio (KCl) y amonio (NH₄Cl), además señalan que al aplicar dosis más altas de cloruro de amonio

(NH₄Cl), la fijación del potasio alcanzo niveles muy bajos de (6 %) por lo que concluyen que en el tipo de suelo estudiado, una fertilización amoniacal moderadamente baja favorecería la fijación del potasio en el suelo y con ello permanecerá protegido a las perdidas por lixiviación, lo que servirá como potencial de reserva para uso futuro de las plantas.

Quenta (2024) evaluó el efecto contaminante por la aplicación de fertilizantes químicos en la calidad de suelo cultivado con *Solanum tuberosum* en el distrito de llave. Para el experimento recolectó muestras de suelo de cultivos de *Solanum tuberosum*, los cuales, para mejorar el rendimiento de la papa, usan fertilizantes químicos, el análisis de este suelo, fue comparado con muestras de suelo que no se utiliza fertilizantes químicos. Los resultados de dicha investigación, mostraron que el contenido de potasio del suelo fertilizado fue de 815 mg kg y del suelo sin fertilizar fue de 110 mg kg. El nitrógeno en el suelo fertilizado fue de 1040 mg kg, del suelo no fertilizado fue de 500.3 mg kg. El fósforo en el suelo fertilizado fue de 48.7 mg kg, en el suelo no fertilizado fue de 8.19 mg kg; el pH en el suelo fertilizado fue de 6.31, en el suelo no fertilizado fue de 7.341; la C.E en suelo fertilizado fue de 2686 μS cm, en suelo no fertilizado fue de 240.0 μS cm y la M.O en el suelo fertilizado fue de 2.08 %, en el suelo no fertilizado fue de 1.00 %. El uso de fertilizantes químicos generó mayor impacto en las propiedades químicas del suelo, produciendo acidez edáfica.

Cisneros y Nonones (2024), quienes tuvieron como objetivo recopilar información que muestre el impacto a nivel físico, químico y biológico por el uso de los fertilizantes en los suelos agrícolas. Su estudio se basó en la recopilación de literaturas, comparando el impacto de fertilizantes químicos y orgánicos en suelos agrícolas. Los resultados revelaron que los fertilizantes químicos al no ser considerados como mejoradores del suelo, si son utilizados de manera indiscriminada e inadecuada, causa alteración de la calidad de los suelos y provoca su pérdida a

largo plazo, debido a que encontraron cambios notables en propiedades como la retención de agua, disponibilidad de nutrientes, pH, biomasa, estabilidad estructural, densidad de población bacteriana, entre otros, en comparación, los fertilizantes orgánicos aportan mejores resultados y no cambian la calidad de los suelos a diferencia de los inorgánicos. El uso de fertilizantes químicos tiene un efecto en los niveles físicos, químicos y biológicos de los suelos agrícolas.

Rodríguez y Longa (2021) evaluaron el efecto de los fertilizantes químicos y abonos orgánicos en suelos agrícolas con cultivo de papa en el distrito de Sorochuco. En el experimento se utilizó como fuentes de fertilización, fertilizantes químicos (NPK) y abonos orgánicos (guano de isla, gallinaza y un abono preparado según Rivera). Los resultados mostraron que, en el contenido de Nitrógeno total, el fertilizante químico elevó su contenido de 0.82 a 1.80 %, el abono orgánico elevó su contenido de 0.82 a 4.49 %, en cuanto al Fósforo, el fertilizante químico elevó su contenido de 0.17 a 2.17 %, el abono orgánico elevó su contenido de 0.17 a 6.33 % , en cuanto al Potasio, el fertilizante químico elevó su contenido de 0.47 a 3.80 %, el abono orgánico elevó su contenido de 0.47 a 3.91 %, en cuanto al pH, el fertilizante químico elevó su contenido de 6.75 a 7.86, mostrando una declinación a 5.42, el abono orgánico elevó su contenido de 6.75 a 8.12. también registrando una declinación a valores de 7.49; en cuanto a la materia orgánica, el fertilizante químico elevó su contenido de 3.80 a 6.83 %, también mostrando una declinación a valores de 6.20 %, el abono orgánico elevó su contenido de 3.80 a 7.7 %; en cuanto a la CIC, el fertilizante químico elevó su contenido de 4.24 a 6.79 meq 100, posterior a ello mostro una declinación a valores de 6.70 meq 100, el abono orgánico elevó su contenido de 4.24 a 8.68 meq 100, teniendo también una declinación a valores de 8.62 meq 100. Los resultados de dicha investigación demuestran que los fertilizantes químicos y orgánicos actúan de manera significativa en las propiedades químicas del suelo.

2.2. Marco Teórico

2.2.1. Suelo

El término suelo deriva del latín *Solum* que significa piso o terreno, se define como un recurso natural y componente del medio ambiente en el que se desarrolla la vida, es un ecosistema o un agro - ecosistema que constituye la principal fuente de nutrientes, agua y aire para el crecimiento de las plantas, donde se haya producido o no una génesis del suelo (formación de horizontes), por lo que su significado es aún más general ya que incluye no solo el suelo si no también las rocas, el agua, la materia orgánica y las formas de vida, aire y sustancias que intervienen directa o indirectamente en el sostenimiento de la vida vegetal (De La Peña, 2019).

El suelo es un componente fundamental de la tierra, está formado por capas de suelo (horizontes del suelo), minerales meteorizados, materiales orgánicos, agua y aire, es el producto final de los efectos combinados del tiempo y el clima, organismos (plantas, animales y humanos) y los materiales originales (rocas y minerales primarios), por lo tanto, el suelo se define de su material parental en su textura, estructura, consistencia, color y propiedades químicas, biológicas y físicas (FAO, 2023).

2.2.2. Acidez del suelo

Tasilla (2021) manifiesta que los suelos ácidos suelen tener un pH inferior a 5.5, los cuales generan una pérdida de cationes básicos (calcio, magnesio, potasio, y sodio) y una acumulación de cationes ácidos (aluminio e hidrógeno). Además, Molina y Rojas (2005) mencionan que la acidez de los suelos afecta sus propiedades químicas y biológicas, reduciendo el crecimiento de las plantas y la disponibilidad de nutrientes como el Ca, Mg, K y P, así como también la proliferación de elementos como el Al y Mn que en cantidades altas pueden ser tóxicos para las plantas.

2.2.3. Propiedades químicas

las propiedades químicas están directamente relacionadas con la calidad, disponibilidad de agua y nutrientes para las plantas, entre ellas encontramos el pH, Conductividad Eléctrica (C.E.), Materia Orgánica, Nitrógeno, Fósforo, Potasio, Bases Cambiables, Ácidos Cambiables, Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC), y Saturación de Aluminio (Bautista et al., 2004).

2.2.3.1. pH del Suelo

El pH (potencial de hidrógeno) determina el grado en que las partículas del suelo adsorben iones de hidrógeno (H^+) y es un indicador clave para catalogar el suelo como ácido o alcalino, siendo fundamental para evaluar la disponibilidad de nutrientes esenciales para las plantas, dado que influye en la solubilidad, movilidad y accesibilidad de varios elementos y contaminantes inorgánicos presentes en el suelo (FAO, 2023). El pH del suelo puede variar entre 3,5 (muy ácido) y 9,5 (muy alcalino), los suelos con un pH inferior a 5,5 suelen mostrar altos niveles de toxicidad por aluminio y manganeso, mientras que aquellos con un pH superior a 8,5 tienden a dispersarse (Soriano, 2018).

2.2.3.2. Conductividad Eléctrica (C.E.)

La conductividad eléctrica mide la capacidad de la solución del suelo para conducir corriente eléctrica, lo cual depende de la cantidad de sales disueltas presentes en dicha solución, es por eso que, a mayor conductividad eléctrica, mayor será la concentración de sales en el suelo, siendo crucial para determinar el tipo de cultivo y la variedad a sembrar, de acuerdo con su tolerancia a los niveles de salinidad (Fertilab, 2019).

La conductividad eléctrica del suelo es una medida de la concentración de sales, debido que el suelo contiene naturalmente sales disueltas, por lo que la conductividad puede ser muy baja, pero nunca nula, dado que las sales son beneficiosas para los organismos que consumen sal disuelta

en agua, pero el exceso puede afectar el crecimiento de las plantas y la actividad microbiana del suelo. Además, la conductividad también varía ampliamente dependiendo de la influencia de diversos factores, como material de origen o los factores formadores del suelo (Cremona y Enriquez, 2020).

2.2.3.3. Materia Orgánica (M.O.)

La materia orgánica presente en el suelo proviene casi en su totalidad de las plantas que han crecido sobre él, ya sea de manera directa o indirecta, a través de la fotosíntesis las plantas logran producir sustancias orgánicas esenciales para la vida utilizando la energía solar, el CO₂, el agua y los minerales solubles presentes en el suelo (De La Peña, 2019).

2.2.3.4. Elementos Nutricionales

La cantidad de nutrientes presentes en el suelo define su capacidad para sustentar organismos vivos, los nutrientes esenciales para el crecimiento y desarrollo de las plantas se dividen en macronutrientes y micronutrientes; los macronutrientes, como el carbono (C), hidrógeno (H), nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg) y azufre (S), son necesarios en grandes cantidades, por otro lado, los micronutrientes, que incluyen hierro (Fe), zinc (Zn), manganeso (Mn), boro (B), cobre (Cu), molibdeno (Mo) y cloro (Cl), se requieren en menores proporciones y la falta de alguno de estos nutrientes puede provocar deficiencias, mientras que su exceso puede causar toxicidad (FAO, 2023).

2.2.3.5. Macronutrientes

Los macronutrientes, esencialmente son requeridos en grandes cantidades para el crecimiento y desarrollo de las plantas, se encuentran divididos en 2 grupos según la disponibilidad en el suelo y la demanda de la planta, el primer grupo corresponde a los macronutrientes

principales como es el nitrógeno, fósforo y potasio, el segundo grupo pertenece a los macronutrientes secundarios como el calcio, magnesio y azufre (Tirado, 2014).

a. Nitrógeno (N)

El nitrógeno es el nutriente más limitante en la producción agrícola, por tanto, está incluido en todos los planes de abonado, excepto en los planes de fertilización de leguminosas, que son capaces de fijar nitrógeno de la atmosfera; en el suelo está estrechamente asociado con la materia orgánica, que es el único medio de almacenamiento (Andreu *et al.*, 2006).

las plantas absorben el nitrógeno en forma de nitrato (NO_3^-) y en forma de amonio (NH_4^+), por lo que cualquier otra forma de nitrógeno añadido al suelo, ya sea mineral u orgánico deberá convertirse en estas para que pueda ser absorbido por las plantas, de modo que la planta lo utilice en sus procesos fisiológicos, debido a que el nitrógeno es un constituyente de enzimas, proteínas, ADN y clorofila de la planta. (Coraspe *et al.*, 2009).

b. Fósforo (P)

Velasquez (2003) refiere que el fósforo es considerado como el segundo elemento más importante, en la nutrición de la planta, considera, además, que el fósforo es absorbido principalmente en ion ortofosfato (H_2PO_4^-) e ion fosfato (HPO_4), los cuales para su conversión requieren de humedad debido a que el fósforo es poco móvil cuando se aplica en el suelo a diferencia del Nitrógeno.

El fósforo juega un papel importante en la estimulación del desarrollo y crecimiento inicial de las raíces, lo que favorece un arranque rápido y robusto de la planta. Además, promueve la floración, acelera la madurez y contribuye a la formación de semillas, mejorando también la resistencia a bajas temperaturas (Fernández, 2007). Este elemento reacciona rápidamente con otros

compuestos del suelo, lo que resulta en la creación de formas menos solubles, por lo tanto, limita su disponibilidad para las plantas (Morales, 2002).

c. Potasio (K)

Velasquez (2003) menciona que el potasio es el tercer elemento esencial para el desarrollo de las plantas, la presencia de este nutriente favorece a la planta hacer uso más eficiente del agua y es absorbido en forma iónica (K^+).

El potasio disponible en el suelo corresponde al K presente en la solución del suelo y al K intercambiable, ambas formas de fácil absorción por las raíces de las plantas y están en equilibrio con el potasio retenido en la fase sólida del suelo, el 98 % del potasio total se encuentra en formas no disponibles para las plantas, como el K^+ retenido en los coloides del suelo, en arcillas y materia orgánica, o en la estructura de minerales primarios. Además, el potasio no disponible solo se transformará en formas accesibles con el tiempo, influenciado por factores como la humedad, temperatura del suelo y capacidad buffer, es por eso, que los suelos arcillosos requerirán mayores aplicaciones de fertilizantes potásicos en comparación con suelos de otras texturas (Vistoso y Martínez, 2020).

d. Carbono (C)

El carbono en el suelo está presente en estado de cuerpo simple (carbón) de compuestos inorgánicos como el dióxido de carbono y carbonato de calcio, también de compuestos orgánicos como la biomasa, petróleo y gas natural. Además, se considera que el suelo es el principal almacén o sumidero de carbono en el ecosistema terrestre, representando un 46 % de la materia orgánica presente en el suelo (Rojas et al., 2021).

El carbono orgánico del suelo (COS) se encuentra en forma de residuos orgánicos vegetales, animales, microorganismos en forma de humus, el COS, interviene en las propiedades

químicas del suelo, aumenta la CIC y la capacidad tampón sobre la reacción del suelo (pH); producto de la mineralización de la MOS se liberan diversos nutrientes para las plantas, muchos de los cuales son aportados en forma deficitaria por los minerales del suelo, siendo una parte del C absorbido por la planta y en menor medida perdida por la lixiviación, erosión o deposición del suelo (Martínez *et al.*, 2008).

e. Calcio (Ca)

El calcio es un nutriente esencial para el crecimiento de las raíces y fundamental como regulador del pH celular, es obtenido mediante la forma de ion calcio Ca^{2+} , así mismo, el calcio se origina a partir de la degradación de la roca madre, se encuentra en el suelo en forma de carbonato como calcita y dolomita, se puede encontrar también como sulfato, fosfato y silicato, la degradación de todos estos minerales conlleva a la aparición de calcio en la solución del suelo, las bases químicas del calcio ligadas al anión CO_3^{2-} , al hidrolizarse produce cationes OH^- el cual reemplaza a los iones ácidos de las posiciones intercambiables, neutralizando la acidez del suelo al propiciar la precipitación del aluminio como $\text{Al}(\text{OH})^3$ (Yoretce *et al.*, 2014).

f. Magnesio (Mg)

El Magnesio (Mg) también está presente como magnesita (MgCO_3) y dolomita ($\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$). Asimismo, la descomposición de la materia orgánica puede contribuir a la incorporación de este nutriente al suelo (Navarro y Navarro, 2003). El magnesio es absorbido por la planta como ion Mg^{2+} siendo el componente principal de la clorofila para la producción de la fotosíntesis (Vistoso y Martínez, 2020). El Mg^{2+} en el suelo se encuentra como constituyente de minerales, como catión intercambiable en el complejo de cambio y en la solución del suelo que posee capacidad de neutralización de la acidez del suelo (Yoretce *et al.*, 2014).

g. Azufre (S)

El azufre es un nutriente indispensable para la vida vegetal, por ser un compuesto esencial de aminoácidos, proteínas, vitaminas y coenzimas; la mayor parte del azufre que hay en el suelo procede de los sulfuros metálicos que constituye la roca madre, estos sulfatos metálicos en condiciones aeróbicas se oxidan con facilidad transformándose en sulfatos, así mismo, se puede encontrar en forma orgánica en las zonas superficiales del suelo donde se acumula una gran cantidad de restos vegetales. (Yoretce *et al.*, 2014).

2.2.3.6. Micronutrientes

Son elementos esenciales para las plantas que se requieren en pequeñas cantidades, los más estudiados en el crecimiento, desarrollo y rendimiento de los cultivos se encuentran el zinc (Zn), cobre (Cu), hierro (Fe) y manganeso (Mn), estos micronutrientes está influenciada por las propiedades físico-químicas del suelo, las cuales regulan su distribución en las diferentes fracciones del mismo; estas propiedades destacan la reacción del suelo, la concentración de carbonato de calcio, la capacidad de intercambio catiónico, la presencia de otros nutrientes en la solución del suelo, el contenido de materia orgánica y la textura del suelo (Carrizo *et al.*, 2013).

Las formas en las que se encuentra los micronutrientes en la solución del suelo, Como iones intercambiables siendo el Zn, Mn, Cu, Fe, ligados a la matriz orgánica como el Fe, Zn, Cu, Mn, B, Mo, precipitados como el Fe, Mn y adsorbidos a la fase sólida como el Zn, Cu, B, Mo (Serveñansky, 2011).

a. El zinc (Zn)

El zinc (Zn) en suelos arcillosos con baja capacidad de cambio y en suelos turbos existe mayor diferencia, este elemento predomina en suelos ácidos y en suelos alcalinos se encuentra en forma de hidróxido y carbonato de Zn “forma insoluble” (Vistoso y Martínez, 2019). Este elemento

en muy bajas cantidades es absorbido por la planta, participa en el metabolismo de auxinas, además interviene en la formación de la clorofila (Castillo *et al.*, 2018).

b. Cobre (Cu)

El Cobre (Cu) en suelos ácidos, el contenido de Cu es bajo debido a la pérdida de los mismos por lixiviación, en suelos ácidos el Cu se presenta en bajas cantidades, al disminuir el pH del suelo aumenta la solubilidad y absorción del Cu, así mismo, el cobre es constituyente de las enzimas de óxido reducción y está relacionado con el contenido de clorofila en las plantas (Vistoso y Martínez, 2019).

c. Hierro (Fe)

El hierro (Fe) en el suelo, se forman como resultado de la meteorización de minerales que contienen hierro, como el olivino, piroxeno y biotita, la mayoría de los óxidos de hierro en el suelo están en forma de Fe^{3+} (hierro férrico), que es mucho menos soluble que el Fe^{2+} (hierro ferroso) y a medida que el pH del suelo disminuye aumenta la solubilidad de hierro, y cuando el pH del suelo aumenta el hierro ferroso se oxida fácilmente a la forma férrica y se precipita fuera de la solución (Vistoso y Martínez, 2019).

d. Manganeso (Mn)

El manganeso (Mn) en suelos ácidos producen una elevada asimilación de Mn que hace que sea tóxico para las plantas, si existe una elevada cantidad de Mn se crea una capa compacta en el subsuelo superior que impide la aireación y la retención de agua, al disminuir el pH del suelo la disponibilidad y absorción del Mn aumenta en la solución del suelo (Vistoso y Martínez, 2019).

2.2.3.7. Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC)

La Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) mide la cantidad de cargas negativas presentes en las superficies de los minerales y componentes orgánicos del suelo, como la arcilla,

materia orgánica o sustancias húmicas, la capacidad refleja la cantidad de cationes que dichas superficies pueden retener, como el calcio (Ca), magnesio (Mg), sodio (Na) y potasio (K), entre otros. Además, pueden ser intercambiados por iones de hidrógeno presentes en la solución del suelo, liberados por las raíces y los suelos con baja CIC sugiere una capacidad limitada para retener nutrientes, característico de suelos arenosos o con bajo contenido de materia orgánica (FAO, 2023).

2.2.3.8. Bases Cambiables

Las bases cambiables son el Na^+ , K^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+} , siendo los cationes más representativos para determinar el grado de fertilidad del suelo, se encuentran en altas cantidades cuando un suelo está cercano o es igual a la neutralidad. Sin embargo, el alto contenido de cationes como el Ca, Mg y K, ofrecen malas posibilidades de absorción de los mismos para la planta, debido a que se encuentran en proporciones desequilibradas, considerándose suelos alcalinos (Molina, 2013).

Por otro lado, las altas precipitaciones, son causa principal de pérdida de nutrientes, en especial bases intercambiables como el calcio y el magnesio, después de haber lavado estos componentes nutricionales disueltos en el suelo, son paulatinamente ocupados por el hidrógeno lo cual lleva a que los suelos se acidifiquen perdiendo la capacidad de retener nutrientes debido a que las arcillas pierden esta capacidad al ser degradadas por el intenso lavado (Toledo, 2016).

2.2.3.9. Acidez Cambiable

La acidez cambiable es originada por la presencia de hidrógeno (H^+) resultante de la hidrólisis del Al^{3+} en solución, desplazado de los sitios de intercambio y retenido en los coloides del suelo por una fuerza de carácter electrostático, siendo el aluminio el mayor componente de la acidez intercambiable (Chung, 2019).

Calderón (2022) menciona que los suelos con un pH menor de 5,5 su acidez se debe especialmente por los iones hidrógeno que provienen de la hidrólisis del aluminio intercambiable y los suelos con un pH menor a 4 su acidez se debe a los iones de hidrógeno intercambiables.

Los suelos ácidos con concentraciones de Al^{3+} pueden alcanzar niveles que resultan tóxico para las plantas. Además, altera las propiedades biológicas reduciendo la actividad de los microorganismos que intervienen en la mineralización de la materia orgánica y la transformación de nitrógeno y azufre. También altera las propiedades químicas y disminuye la disponibilidad de fósforo debido a que forma compuestos insolubles con el Fe y Al^{3+} , dejando así de estar disponibles para las plantas (Sadeghian, 2016).

2.2.3.10. Saturación de Aluminio

El aluminio es uno de los mayores componentes presentes en la mayoría de los minerales del suelo, es el principal componente de las arcillas, cuando los iones de H^+ son absorbidos sobre una superficie de arcilla, los iones de Al son liberados en el proceso y adsorbidos en los sitios de intercambio catiónico del coloide, estos iones Aluminio intercambiables, a su vez, están en equilibrio con Aluminio disuelto en la solución del suelo, hidrolizándose y liberando H^+ ocasionando la toxicidad del suelo (Encina, 2017).

Cuando más bajo sea el pH (Principalmente <5) más soluble es el aluminio, y en altos niveles de saturación de aluminio en el suelo reducen el crecimiento de las raíces, inhibiendo su elongación y penetración en el suelo, consecuentemente reduciendo la absorción de agua y nutrientes (Nazar, 2015).

2.2.3.11. Fertilizantes Químicos

Los fertilizantes químicos son compuestos simples cuya finalidad principal es aportar elementos esenciales para el crecimiento de las plantas, se formulan artificialmente combinando

nutrientes que aumentan la fertilidad y productividad del suelo, como el nitrógeno, fósforo, potasio y azufre (INIA, 2013). El uso de fertilizantes químicos es una práctica esencial y fundamental en las operaciones agrícolas modernas, su uso requiere una gestión respetuosa con el medio ambiente debido a que las malas prácticas pueden impactar negativamente los agroecosistemas y su entorno depende de las características de cada nutriente (Grasso y Díaz, 2020).

a. Urea (N)

La urea es una sustancia nitrogenada más utilizada en el mundo como fuente de fertilización y para producirla se hacen reaccionar amoníaco y dióxido de carbono en presencia de un catalizador, del cual se obtiene una urea líquida concentrada que puede concentrarse a un más y granularse (Morales *et al.*, 2019). La urea granulada presenta un estado físico sólido, de forma granulada o perlada, en dilución posee un olor débilmente amoníaco, su fórmula molecular $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$, masa molar 60,06 g mol, densidad 1,34 g cm³, pH 4 y la solubilidad en agua es de 108g 100ml a 20 °C (Ospina, 2020).

La reacción de la urea en el suelo es afectada por factores como el agua fuente principal del proceso de hidrólisis, la temperatura, regulador de la actividad biológica, el pH del suelo es el principal factor que desencadena la volatilización del amoníaco y la capacidad de intercambio catiónico (CIC) que afecta a la volatilización, dado que, el amonio que se libera de la hidrólisis de la urea queda atrapado en sitios de intercambio (INTA, 2014).

b. Fosfato Diamónico (P₂O₅)

El fosfato Diamónico es el fertilizante más utilizado en la industria agrícola, está formulado a base de una reacción controlada de ácido fosfórico con amoníaco, al enfriarse la sustancia se solidifica en forma de gránulos y toma un color marrón inoloro, su fórmula química del Fosfato

Diamónico es $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$, masa molar 132.06g mol, densidad 1.62g cm^3 , pH 8, y soluble en agua (58g 100 ml a 20°C) (IPNI, 2019).

El fosfato Diamónio en contacto con el suelo es liberado en forma de fosfato (H_2PO_4^- , HPO_4^{2-} o PO_4^{3-}) y amonio NH_4^+ , el Fósforo (P_2O_5) es un elemento que tiene muy poca movilidad en el suelo y en consecuencia es un producto muy estable, el amonio influye significativamente sobre la disponibilidad y absorción del fósforo (Villegas y Casbis, 2016). El pH es un factor que influye enormemente sobre la solubilidad y disponibilidad del fósforo, mientras menor sea el pH la disponibilidad del fósforo es menor, siendo así que el fósforo es más disponible en el suelo, cuando está más cercano a la neutralidad (Euceda, 2022).

c. Cloruro de Potasio (KCl)

El Cloruro de Potasio es principalmente utilizado como una fuente de potasio por la nutrición vegetal, se aplica donde los suelos no pueden abastecer las cantidades de potasio requeridas por los cultivos, está compuesto por la Silvita (KCl) mezclada con la Halita (Cloruro de Sodio, NaCl), el cual forman un mineral mixto denominado silvinita, y al ser molido se forma el fertilizante cloruro de potasio teniendo un color rojo ladrillo, inoloro, su fórmula química del Cloruro de Potasio es KCl, masa molas 74.56 g mol, densidad 1.62 g cm^3 , pH >7, y soluble en agua (344 g L a 20 °C) (IPNI, 2019).

El cloruro de potasio en contacto con el suelo se disuelve rápidamente con la humedad, en suelos ácidos el KCl describe en cierta manera la reserva de acidez del suelo, en este caso el catión K^+ en la solución actúa desplazando los cationes retenidos para el complejo de cambio, además de liberar nutrientes retenidos para el consumo de las plantas y utilizado en sus procesos fisiológicos (Soriano, 2018).

2.3. Definición de Términos

Capacidad de intercambio catiónico (CIC). Suma total de cationes intercambiables que puede adsorber un suelo, expresado en miliequivalentes por 100 g de suelo, (meq 100 g). (De La Peña, 2019).

Fertilizante. Cualquier material orgánico o inorgánico de origen natural o sintético que se añade al suelo para suministrar los nutrientes esenciales al crecimiento de las plantas (De La Peña, 2019).

Macronutrientes. Es un elemento químico necesario para el crecimiento de las plantas y son usadas en grandes cantidades. Ejemplo: nitrógeno, fósforo y potasio (De La Peña, 2019).

Micronutrientes. Forman partes de los nutrientes esenciales, los cuales son requeridos en cantidades muy pequeñas como parte de diversos sistemas enzimáticos, los cuales son el boro (B), cobre (Cu), hierro (Fe), manganeso (Mn), molibdeno (Mo) y zinc (Zn) (Vistoso y Martínez, 2019).

pH. Es una propiedad química que mide el grado de acidez o alcalinidad de las soluciones acuosa, se considera que el pH es el logaritmo negativo de la actividad de los protones (H^+) en una solución acuosa (Osorio, 2012).

Suelo. Mineral no consolidado y material orgánico de la superficie de la tierra y que sirve como un medio natural para el crecimiento de las plantas terrestres (De La Peña, 2019).

CAPÍTULO III

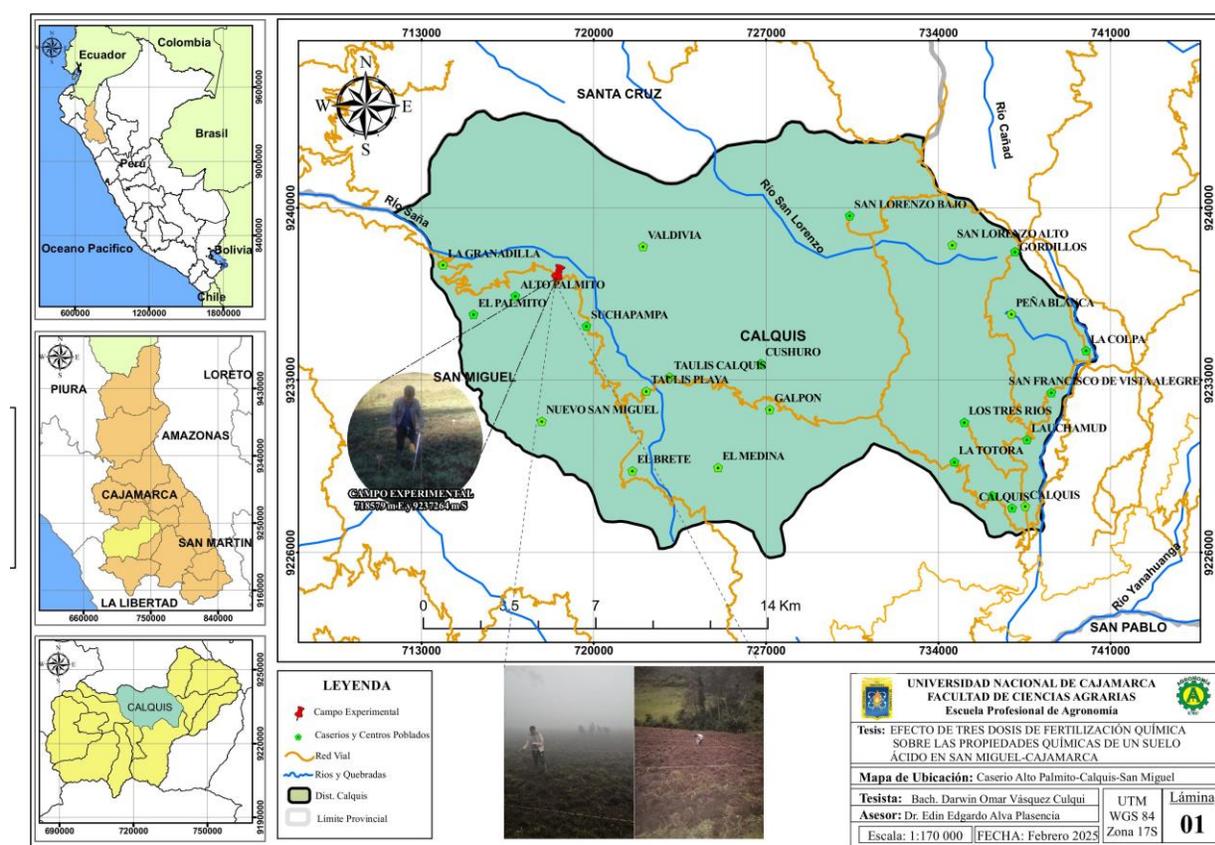
MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Ubicación

El trabajo de investigación se realizó en el caserío de Alto Palmito, distrito de Calquis, provincia de San Miguel, región Cajamarca, a una altitud de 2536 m.s.n.m., cuyas coordenadas UTM son: 718579 m E y 9237264, en zona 17 S.

Figura 1

Mapa de ubicación del área experimental



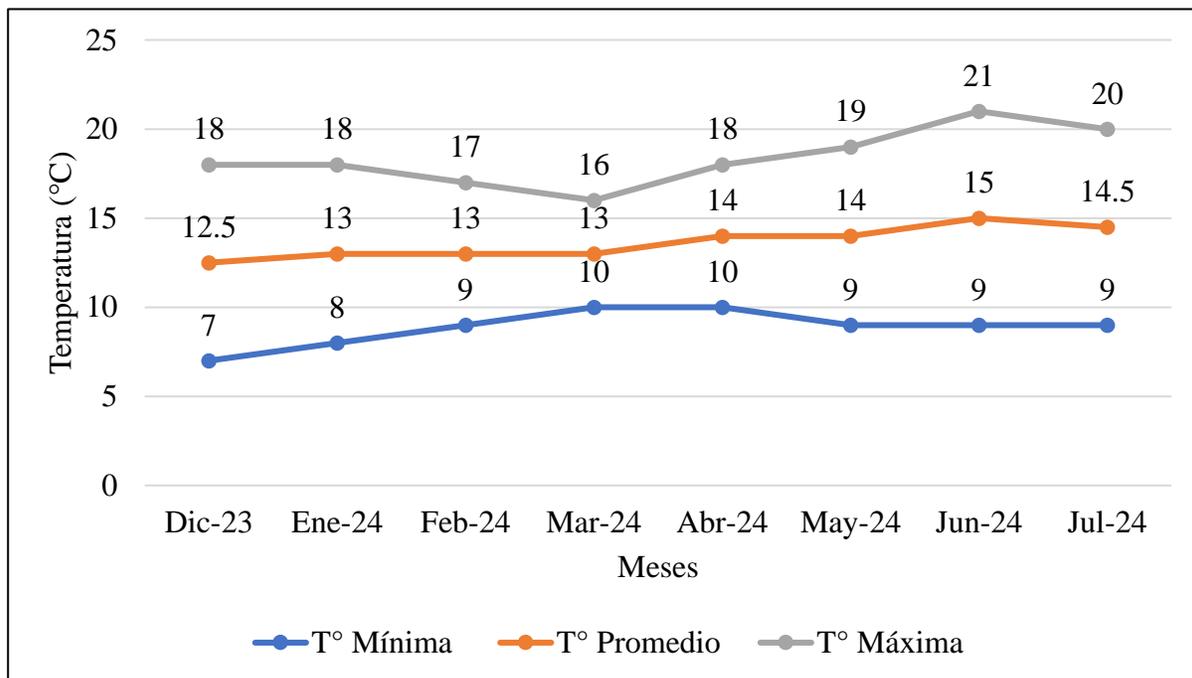
3.2. Condiciones climáticas

3.2.1. Temperatura

En la figura 2, se muestra la temperatura registrada desde el mes de diciembre del 2023 hasta el mes julio del 2024, tiempo que duró la investigación. La temperatura mínima registrada fue de 8 °C, la media fue de 13.625 °C y la máxima fue de 21 °C.

Figura 2

Temperatura registrada durante el periodo de evaluación

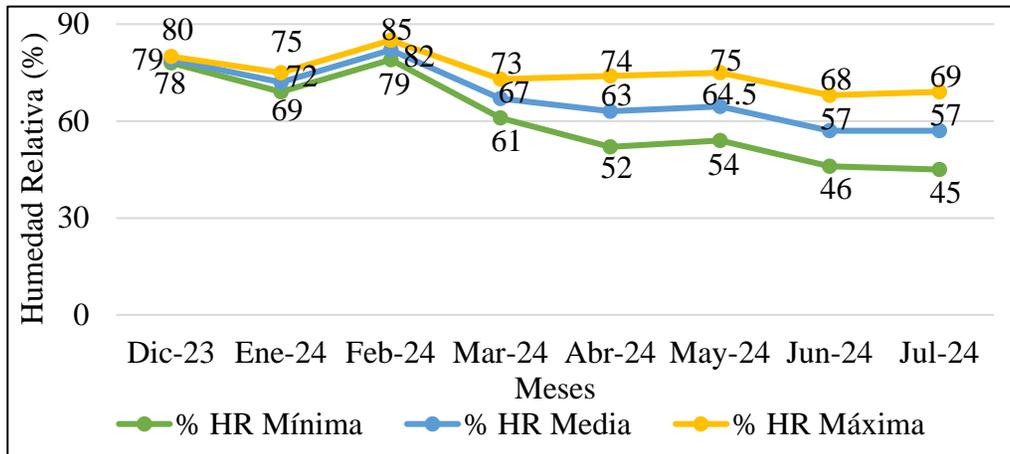


3.2.2. Humedad relativa

En la figura 3, se muestra la humedad relativa registrada desde el mes de diciembre del 2023 hasta el mes de julio del 2024, tiempo que duró la investigación. La HR mínima registrada fue de 45 %, la media fue de 63 % y la máxima fue de 85 %.

Figura 3

Humedad relativa registrada durante el periodo de la investigación

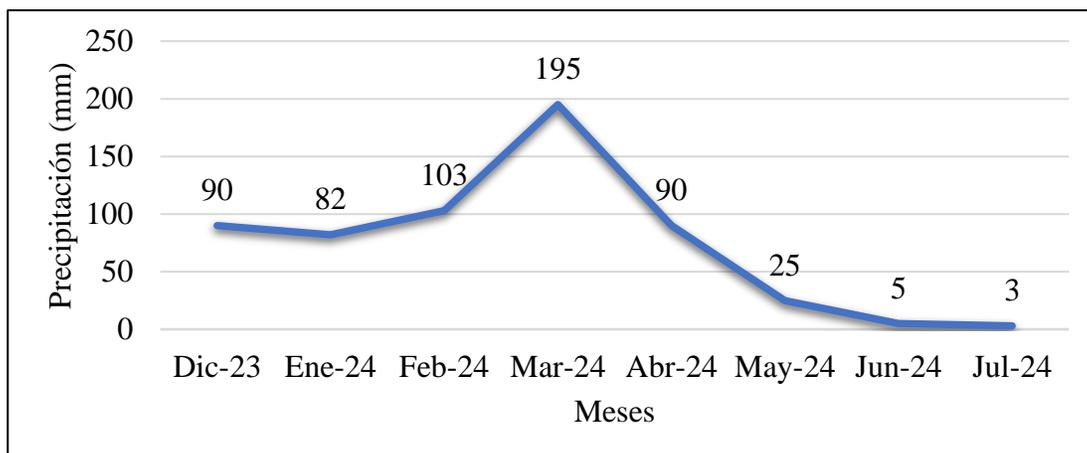


3.2.3. Precipitación

En la figura 4, se muestra la precipitación registrada desde el mes de diciembre del 2023 hasta el mes de julio del 2024, tiempo que duró la investigación. Durante el mes de diciembre al mes de abril, la precipitación fue moderada a alta. Este patrón climático tiene implicancias directas sobre la fertilización de suelos agrícolas. Durante los meses lluviosos, las condiciones óptimas de humedad en el suelo, fueron favorables para la disolución de los fertilizantes aplicados.

Figura 4

Precipitación registrada durante el periodo de la investigación



3.3. Materiales

3.3.1. Material de Campo

- Muestreador de suelos
- Cámara fotográfica
- Rafia
- Wincha
- GPS
- Estacas
- Bolsas plásticas
- Etiquetas

3.3.2. Materiales de Escritorio

- Laptop
- USB
- Impresora
- Lápiz
- Libreta de apuntes

3.3.3. Insumos o Requerimientos

- Urea (46% N)
- Fosfato Di Amónico (46% P₂O₅)
- Cloruro de Potasio (60% KCl)

3.4. Metodología

Variables

Variable Independiente: Fertilizantes químicos (Urea, Fosfato Di Amónico y Cloruro de Potasio).

Variable dependiente: Efecto en las propiedades químicas del suelo (pH, C.E, M.O, N, P, K, CIC, Bases cambiabile, Ácidos cambiabiles).

3.4.1. Tratamientos del estudio

En la tabla 1, se muestran los tratamientos, dosis y claves de cada unidad experimental en la investigación realizada.

Tabla 1

Tratamientos de la investigación

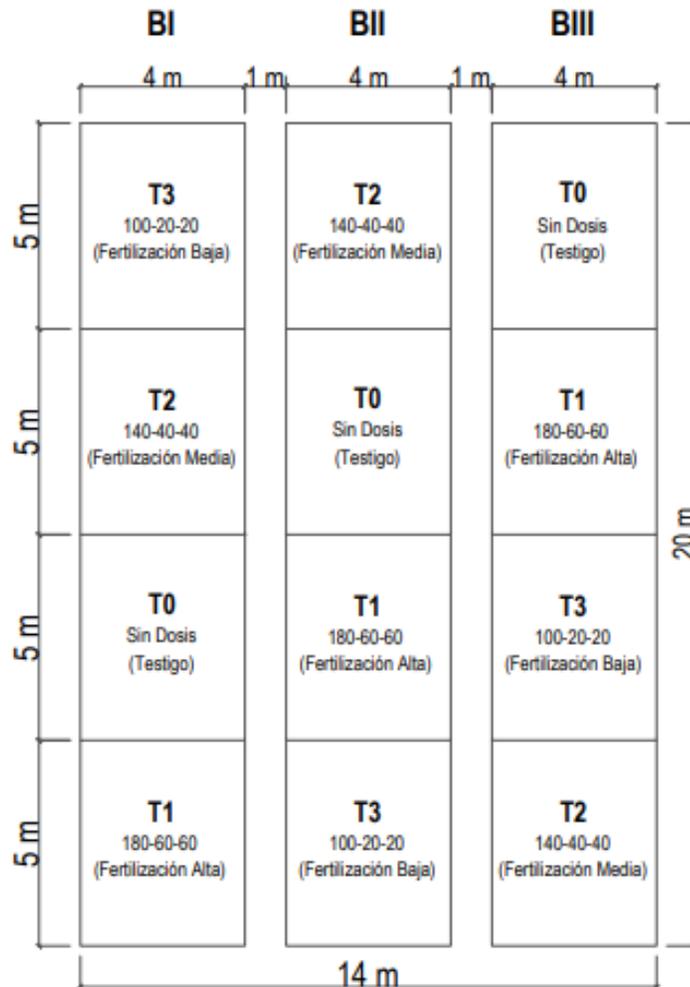
Tratamientos	Dosis (NPK)	Clave
Sin fertilización	Sin dosis	T0
Fertilización Alta	180-60-60	T1
Fertilización Media	140-40-40	T2
Fertilización Baja	100-20-20	T3

3.4.2. Arreglo de los tratamientos

La distribución de los tratamientos se encuentra detallada en la figura 5, el cual consta de 4 tratamientos y 3 repeticiones. El experimento tiene un área total de 280 m² (20 m de largo por 14 m ancho), los bloques tienen un área de 80 m² (20 m de largo por 4 m de ancho) y la separación entre bloques es de 1 m. Cada unidad experimental tuvo un área de 20 m² (4 m de ancho por 5 m de largo).

Figura 5

Distribución de las unidades experimentales



3.4.3. Reconocimiento del área experimental

El lugar donde se realizó el experimento fue en el caserío Alto Palmito, distrito de Calquis, provincia de San Miguel-Cajamarca, En el lugar del predio experimental se recolectaron datos como la temperatura, humedad relativa y precipitación, factores importantes que determinan el éxito del experimento. Además, se recolectó muestras de suelo para su respectivo análisis físico-químico el cual fue usado para tener una referencia concreta del estado del suelo y con ello se llevó a cabo el proyecto de investigación.

3.4.4. Toma de muestras del predio experimental

El método utilizado en la toma de muestra fue en Zigzag, y con ayuda de un barreno nos permitió recorrer toda el área recolectando submuestras, esto nos permitió tener una muestra representativa del predio experimental. Las submuestras recolectadas del predio se mezclaron y se sacó una muestra representativa de 1 kg, la misma que fue etiquetada e identificada para enviar al laboratorio de suelos (LASAE) de la Universidad Nacional Agraria de la Selva, donde se realizó su respectivo análisis de las propiedades físicas y químicas del suelo.

3.4.5. Escalas de interpretación de los parámetros químicos del suelo

Las escalas de interpretación facilitan la comprensión de la disponibilidad de nutrientes y la salud del suelo.

Tabla 2

Interpretación del pH del suelo

Denominación	pH
Fuertemente ácido	< 5.5
Moderadamente ácido	5.5 - 6.0
Ligeramente ácido	6.1 - 6.5
Neutro	7.0
Ligeramente alcalino	7.2 - 7.8
Moderadamente alcalino	7.9 - 8.4
Fuertemente alcalino	> 8.5

Fuente: Laboratorio de Suelos de la Universidad Nacional Agraria la Molina.

Tabla 3*Interpretación de la conductividad eléctrica del suelo*

Denominación	Conductividad Eléctrica (dS m)
Normal o nula	0 – 2
Ligeramente salino	2 – 4
Moderadamente salino	4 – 8
Fuertemente salino	8 – 15
Extremadamente salino	> 15

Fuente: Laboratorio de Análisis de Suelos y Plantas (FCA-UNC).

Tabla 4*Interpretación del nitrógeno total del suelo*

Denominación	Nitrógeno Total (%)
Bajo	< 0.10
Medio	10 - 20
Alto	> 20

Fuente: laboratorio de Análisis de Suelos, Agua y Ecotoxicología – UNAS.

Tabla 5*Interpretación de la Materia Orgánica, Fósforo y Potasio del suelo*

Denominación	Materia Orgánica (%)	Fósforo Disponible (ppm)	Potasio Disponible (ppm)
Bajo	< 2	< 7	< 100
Medio	2 - 4	7- 14	100 - 240
Alto	> 4	> 14	> 240

Fuente: Laboratorio de suelos de la Universidad Nacional Agraria – La Molina.

Tabla 6*Interpretación de la Capacidad de Intercambio Catiónico del suelo*

Denominación	CIC
Muy baja	< 4
Moderadamente baja	4 - 8
Baja	8 - 12
Moderadamente alta	12 - 20
Alta	> 20

Fuente: Laboratorio de Análisis de Suelos y Plantas (FCA-UNC).

Tabla 7*Interpretación de las Bases Cambiables del suelo*

Denominación	Bases Cambiables (%)
Bajo	< 35
Medio	35 - 80
Alto	> 80

Fuente: Laboratorio de Análisis de Suelos y Plantas (FCA-UNC).

Tabla 8*Interpretación de la acidez cambiabile del suelo*

Denominación	Acidez Cambiable (%)
Baja	< 10
Moderada	10 - 20
Alto	20 - 30
Muy alto	> 30

Fuente: Laboratorio de Análisis de Suelos y Plantas (FCA-UNC).

3.4.6. Análisis del suelo

Los resultados obtenidos del predio ubicado en el caserío Alto Palmito fueron de clase textural franco arenoso, indicador que posee gran capacidad de drenaje y retención de agua, su estructura suelta permite un fácil acceso de las raíces, permitiendo el crecimiento de ciertos cultivos; pero también puede estar propenso a problemas de erosión. Según las escalas de interpretación de los suelos comparado con el análisis químico de dicho predio se determinó que presenta un pH 5.46, fuertemente ácido; conductividad eléctrica 0.16 dS m, baja; materia orgánica 4.48 %, alta; nitrógeno total 0.22 %, alto; fósforo disponible 8.15 ppm, medio; potasio disponible 171,97 ppm, medio; capacidad de intercambio catiónico 3,79, baja; bases cambiables 69,49 %, medio y acidez cambiabile 30.51 %, alta.

Tabla 9

Análisis físico químico del suelo realizado previo a la instalación del experimento

 **NALISIS DE SUELOS** 

1. DATOS

SOLICITANTE:		MUESTREADO POR:	
DEPARTAMENTO:	CAJAMARCA	FECHA DE RECEPCION:	20/07/2023
PROVINCIA:	SAN MIGUEL	FECHA DE INICIO DE ENSAYO:	20/07/2023
DISTRITO:	CALQUIS	FECHA DE REPORTE:	
LUGAR:	-----	RECIBO O FACTURA:	
CULTIVO:		OBSERVACION:	----

2. RESULTADOS DEL ANÁLISIS SOLICITADO

N°	DATOS			ANÁLISIS MECÁNICO				pH	CE dS/m	M.O.	N	P disponible	K disponible	CIC	Ca	Mg	K	Na	Al	H	CICe	Bases Cambiables %	Acidos Cambiables %
				Arena	Arcilla	Limo	Clase Textural																
	CODIGO DEL LAB.	REFERENCIA		%	%	%		1:1	1:1	%	%	ppm	ppm		CAMBIABLES			Cmol(+)/kg					
3	S1088	LA TRAMA EL SURAL - CALQUIS	EDILBRANDE BUSTAMANTE QUISPE	54	12	35	Franco Arenoso	5.46	0.16	4.48	0.22	8.15	171.97	----	2.03	0.27	0.23	0.11	1.13	0.03	3.79	69.49	30.51

Fuente: Laboratorio de Análisis de Suelos, Agua y Ecotoxicología-UNAS

3.4.7. Preparación del terreno

La preparación del terreno se realizó a tracción animal (arada y cruza), a una profundidad de 30cm. Posterior a ello se trabajó el terreno con zapapico, con la finalidad de eliminar malezas y descompactar los terrones que hayan quedado del arado, esta acción permitió tener un terreno mullido para facilitar la incorporación de manera uniforme al aplicar los fertilizantes al suelo.

3.4.8. Delimitación del área experimental

La delimitación del área experimental permitió separar los bloques y las unidades experimentales. El experimento constó de tres bloques y cada bloque tuvo cuatro tratamientos, y el área de cada unidad experimental fue de 20 m² (4 m ancho por 5 m de largo). La separación por bloques fue de 1 m de distancia (bloque a bloque). Para delimitar los tratamientos se utilizaron estacas, rafia y letreros de identificación para cada unidad experimental.

3.4.9. Instalación del experimento

Se emplearon fertilizantes químicos (urea, fosfato diamónico y cloruro de potasio) en tres dosis de fertilización: alta (180-60-60), media (140-40-40) y baja (100-20-20) y un testigo en cada bloque del área experimental. Una vez que el fertilizante se incorporó al suelo, con ayuda de una sapa pico fue cubierto para evitar pérdidas por volatilización.

3.4.10. Evaluaciones

Las evaluaciones se realizaron a los 60, 120 y 180 días después de la aplicación de las diferentes dosis de fertilización en el suelo, haciendo un total de tres evaluaciones. La recolección de las muestras se tomó con un barreno a 30 cm de profundidad del área superficial del suelo. Posterior a ello dichas muestras fueron enviadas al laboratorio de suelos (LASAE) de la Universidad Nacional Agraria de la Selva para el análisis correspondiente.

3.4.11. Análisis estadístico

El método estadístico para determinar el efecto del fertilizante sobre las propiedades químicas del suelo fue el análisis de varianza (ANOVA), cuyo modelo se encuentra en continuación. Como test de comparaciones de medias se empleó la prueba de rango múltiple de Tukey.

$$Y_{ij} = \mu + t_i + \beta_j + E_{ij}$$

Y_{ij} = Propiedades químicas del suelo

μ = El efecto medio de la muestra

t_i = El efecto de los fertilizantes químicos

β_j = El efecto del bloque

E_{ij} = El efecto del error experimental

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Efecto de las dosis de fertilización química en el pH del suelo

En el análisis de varianza (ANOVA) realizado para evaluar el efecto de la fertilización química sobre el pH del suelo, se observa que no existen diferencias significativas en función de los bloques, debido a que el valor de significancia p-valor es de 0.068, siendo superior al 0.05. Así mismo, el valor de significancia para los tratamientos, p-valor obtenido es menor a 0.0001, siendo inferior 0.05. Esto indica que existen diferencias significativas entre los tratamientos aplicados en cuanto a su efecto sobre el pH del suelo.

El CV es 0.73 %, lo cual indica que la variabilidad de los resultados del pH del suelo dentro de cada tratamiento es baja. Además, indica que el diseño empleado en el experimento presentó un buen control sobre la variabilidad del pH del suelo.

Tabla 10

Análisis de varianza (ANOVA) para el pH del suelo

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F calculado	p-valor
Bloque	0.012	2	0.006	4.348	0.068
Tratamientos	0.772	3	0.257	190.928	<0.0001
Error	0.008	6	0.001		
Total	0.791	11			

CV = 0.73 %

La prueba de Tukey realizada para la comparación de medias del pH del suelo, la tabla 4, muestra que el tratamiento Testigo se encuentra en el grupo A, con un valor de 5.46, lo que indica que su efecto sobre el pH del suelo es significativamente diferente al de los tratamientos con dosis

de fertilización "Media", "Baja" y "Alta" que comparten la misma letra B. Entre estos últimos no existen diferencias significativas en sus efectos sobre el pH del suelo.

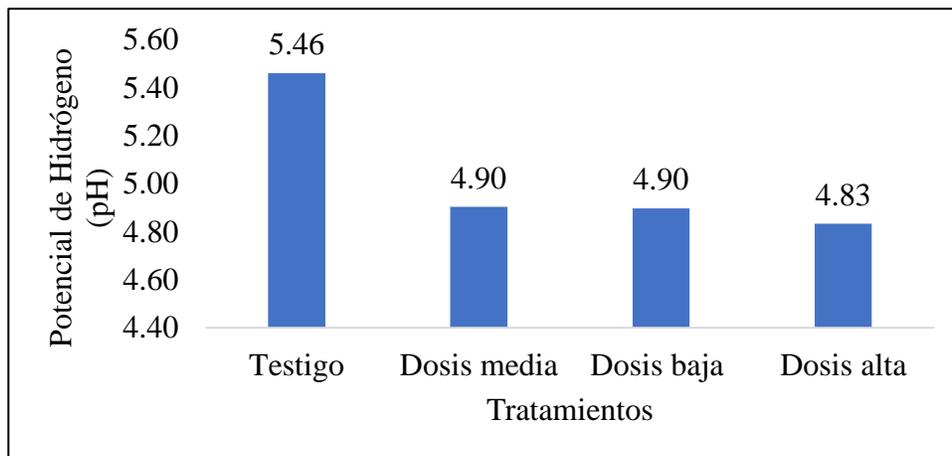
Tabla 11

Prueba de Tukey para la comparación de medias del pH del suelo

Tratamientos	pH	Agrupación
Testigo	5.46	A
Dosis media	4.90	B
Dosis baja	4.90	B
Dosis alta	4.83	B

Figura 6

Diferencias de pH del suelo en cada tratamiento



Los resultados obtenidos muestran que el tratamiento sin fertilización no tuvo efecto en el pH del suelo, mientras que los tratamientos con dosis de fertilización (alta, baja y media) disminuyeron el pH del suelo. Probablemente se deba a que los fertilizantes químicos aplicados en suelos ácidos, acidifican el suelo con mayor rapidez. tal como lo señalan Ginés y Mariscal (2002). Estos autores destacan que los fertilizantes químicos, especialmente los nitrogenados amoniacales, incrementan la acidez del suelo debido a la liberación de protones (H^+) tras la hidrólisis de la urea y la transformación del amonio en nitrato.

Por otro lado, Campillo y Sadzawka (2020) señalan que los fertilizantes amoniacales como la urea y el fosfato diamónico induce una acidificación en el proceso de nitrificación del amonio, luego de la hidrólisis de la urea a amonio se libera iones H^+ a la solución del suelo, los cuales desplazan los cationes de intercambio favoreciendo su posterior lavado del suelo, de esta manera estos iones H^+ acidifican el suelo y son los responsables de la caída del pH.

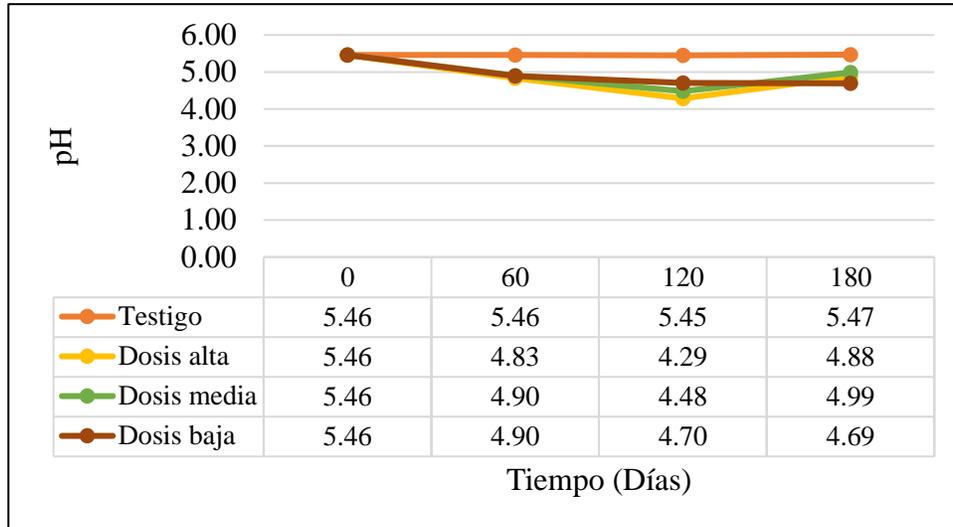
4.2. Tendencia del pH en el suelo

La figura 7, muestra como el pH del suelo cambia en función a los tratamientos de fertilización y el tiempo. Inicialmente, el pH es uniforme (5.46). A los 60 y 120 días se observa una reducción, especialmente en la dosis alta, que alcanza un mínimo de 4.29. La dosis media y baja también disminuyen, aunque en menor medida. A los 180 días, el pH en el tratamiento de fertilización con dosis alta muestra un nivel de recuperación (4.88), sugiriendo un posible efecto de estabilización en el suelo, mientras que los tratamientos con fertilización en dosis media y baja presentan cambios menores con mayor lentitud en su estabilización.

En el tratamiento testigo, donde no se aplicó fertilización, el pH del suelo se mantuvo estable a lo largo del tiempo, con valores que oscilaron entre 5.45 y 5.47, indicando que, en ausencia de fertilización, el suelo mantuvo su estado inicial sin cambios notables en su acidez.

Figura 7

Comportamiento del pH del suelo en función de las dosis de fertilización y el tiempo



En cuanto al comportamiento del pH del suelo por acción de los fertilizantes, los resultados muestran que en primera instancia disminuyó su valor por debajo del testigo y del valor inicial antes de la fertilización, teniendo en cuenta que a partir de los 120 días los suelos fertilizados presentan un comportamiento de estabilización acercándose al testigo. Esto se debe probablemente a que con el tiempo la actividad microbiana estabiliza el medio al mineralizar la materia orgánica y libera cationes básicos, como calcio y magnesio, que contribuyen a regular el pH del suelo.

Al respecto, Córdoba *et al.* (2000) refieren que los suelos ácidos tienen la capacidad de resistir cambios bruscos de sus propiedades químicas, al aplicar fertilizantes químicos. Esto tiende a disminuir el pH por sus propiedades acidificantes, posterior a ello, el poder de amortiguación del suelo tiende a recuperar su estado natural, la fauna microbiana se estabiliza y se mineraliza la materia orgánica, liberando nuevamente cationes básicos en la CIC del suelo, regularizando lentamente el pH.

4.3. Efecto de las dosis de fertilización química en la conductividad eléctrica del suelo

En el análisis de varianza (ANOVA) realizado para evaluar la conductividad eléctrica del suelo, el resultado obtenido para los bloques, señala un valor de significancia (p-valor) de 0.3939, superior al 0.05. El cual indica que no existen diferencias significativas entre los bloques. Así mismo, El valor de significancia (p-valor) para los tratamientos es menor a 0.0001, siendo inferior al 0.05. Esto afirma que existen diferencias significativas entre los tratamientos.

El CV es 8.19 %, lo cual indica que la variabilidad de los resultados de la conductividad eléctrica en el suelo dentro de cada tratamiento es baja. Además, indica que el diseño empleado en el experimento presentó un buen control sobre la variabilidad de la conductividad eléctrica en el suelo.

Tabla 12

Análisis de varianza (ANOVA) para la conductividad eléctrica del suelo

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F calculado	p-valor
Bloque	0.0011	2	0.0005	1.0925	0.3939
Tratamientos	0.1227	3	0.0409	85.104	<0.0001
Error	0.0029	6	0.0005		
Total	0.1266	11			

CV = 8.19 %

La prueba de Tukey realizada para la comparación de medias de la conductividad eléctrica del suelo, indica que existen diferencias significativas entre los tratamientos con diferentes dosis de fertilización química y el testigo. La dosis alta presentó la mayor C.E con un valor de 0.43 dS m, formando un grupo independiente A. Este resultado muestra que la aplicación de una dosis alta de fertilizante incrementa la concentración de sales en el suelo, elevando la C.E debido a la mayor cantidad de iones disueltos.

Por otro lado, las dosis baja y media presentaron valores de conductividad eléctrica de 0.25 dS m y 0.23 dS m, respectivamente, agrupándose ambos en el mismo nivel B. La similitud en sus valores indica que, aunque estos tratamientos elevan la conductividad eléctrica en comparación con el testigo, su impacto es moderado.

El tratamiento testigo, que no recibió ninguna dosis de fertilización, muestra la menor conductividad eléctrica, con un valor promedio de 0.16 dS m, formando un grupo separado C. Esto confirma que la ausencia de fertilización mantiene la conductividad eléctrica en niveles bajos, debido a la baja cantidad de iones.

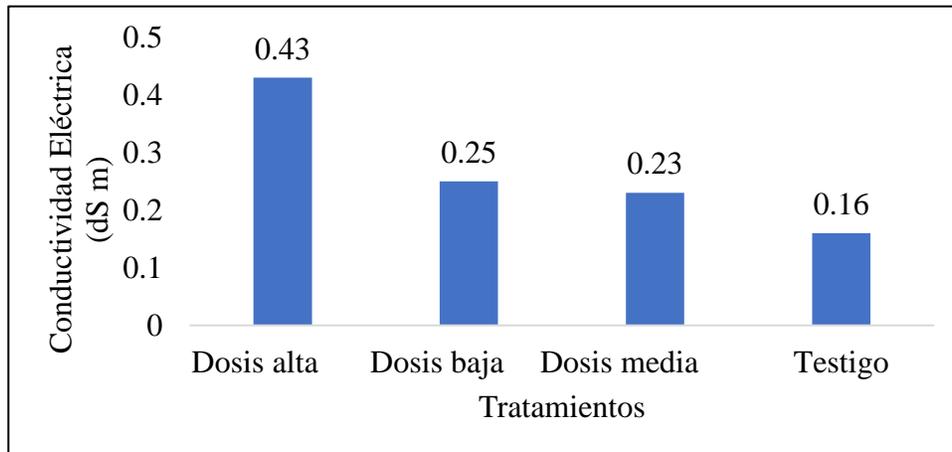
Tabla 13

Prueba de Tukey para la comparación de medias de la conductividad eléctrica

Tratamientos	Conductividad Eléctrica (dS m)	Agrupación
Dosis alta	0.43	A
Dosis baja	0.25	B
Dosis media	0.23	B
Testigo	0.16	C

Figura 8

Diferencias de conductividad eléctrica del suelo en cada tratamiento



Los resultados de la investigación revelan que la dosis alta de fertilización generó mayor aumento en la C.E del suelo, la dosis baja y media también elevaron la C.E del suelo, aunque en menor proporción, sin embargo, demuestra que la influencia de las diferentes dosis de fertilización elevan la conductividad eléctrica por encima del testigo. Estos resultados se deben probablemente a que la fertilización química aplicado en suelos ácidos generen mayor concentración de iones. Estos resultados coinciden con los de Rodríguez y Guzmán (2004), quienes refieren que los fertilizantes químicos son sales altamente solubles que incrementan la concentración de iones solubles en la solución del suelo. Insuasti (2017) menciona que los fertilizantes como los nitratos tienen una mayor contribución sobre la conductividad eléctrica debido a su mayor movilidad.

Por otro lado, Soriano (2018) refiere que los coloides de arcillas con presencia de Na^+ , reaccionan con el CO_2 disuelto de los fertilizantes y del agua de lluvia, se hidrolizan, liberando Na^+ y OH^- , como consecuencia, el medio se saliniza, aumentando la conductividad eléctrica de los suelos.

4.4. Tendencia de la conductividad eléctrica del suelo

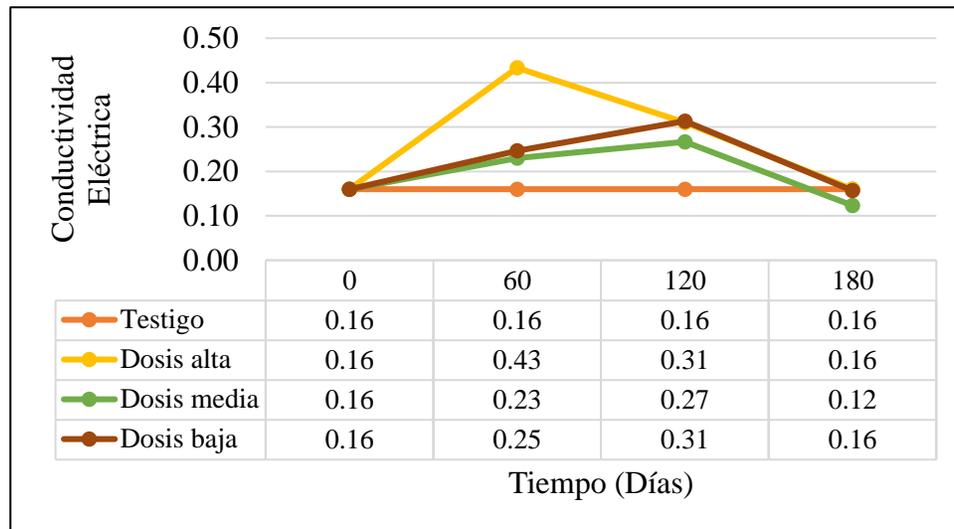
La figura 9, muestra como varía la conductividad eléctrica (CE) en el suelo en función a la dosis y el tiempo, muestra que el valor inicial de todos los tratamientos fue uniforme con un valor de 0,16 dS m. A los 60 días, la C.E aumenta notablemente en los tratamientos, destacando la dosis alta con 0.43 dS m, lo que indica acumulación de sales disueltas por la mayor cantidad de fertilizante. La dosis media y baja también presentan incrementos de 0.23 dS m y 0.25 dS m respectivamente, evidenciando que el efecto es proporcional a la dosis. El testigo, en cambio, mantiene su valor inicial de 0.16 dS m.

A los 120 días, se observa una disminución de la C.E en la dosis alta (0.31 dS m) y aumentos menores en la dosis media (0.27 dS m) y dosis baja (0.31 dS m), lo que indica una

posible interacción entre el tiempo y la capacidad de retención de sales del suelo. Este descenso podría deberse a la lixiviación de las sales, lo que reduce su concentración en el suelo. Finalmente, a los 180 días, la C.E vuelve a niveles similares a del testigo para todos los tratamientos con dosis de fertilización baja, media y alta.

Figura 9

Comportamiento de la conductividad eléctrica en función a las dosis de fertilización y el tiempo



El comportamiento de la conductividad eléctrica en función a las diferentes dosis de fertilizantes respecto al tiempo, muestra que el uso de fertilizantes químicos en suelos ácidos, sin importar la cantidad utilizada, generan un incremento de la C.E en los primeros 120 días. Sin embargo, para los 180 días la C.E tiende a estabilizarse. Este resultado se debe probablemente a que la acumulación de sales por efecto de los fertilizantes químicos es temporal, debido a que las sales son lixiviadas, reduciendo el efecto de la fertilización química en el suelo. Bejar *et al.* (2023) en su investigación, mencionan que la aplicación de fertilizantes químicos, incrementa la conductividad eléctrica debido a que, en su composición química, poseen iones solubles como el nitrato (NO_3^-), fosfato (PO_4^{3-}), y potasio (K^+). Sin embargo, con el paso del tiempo, la lixiviación de iones por altas precipitación y el proceso de intercambio catiónico, contribuyen a estabilizar la

conductividad eléctrica del suelo. Además, refiere que los suelos con mayor acidez, presenta menor C.E.

4.5. Efecto de las dosis de fertilización química en la materia orgánica del suelo

En el análisis de varianza (ANOVA) para la materia orgánica en el suelo, los resultados para los bloques, se obtuvo un p-valor de 0.2534, el cual es mayor que 0.05. Este resultado indica que no existen diferencias entre los bloques. Por otro lado, en el análisis de los tratamientos, se obtuvo un p-valor de 0.0275, el cual es menor que 0.05. Este resultado implica que existen diferencias significativas entre los tratamientos en cuanto a su efecto sobre la materia orgánica en el suelo.

El CV es 4.53 %, lo cual indica que la variabilidad de los resultados de la materia orgánica en el suelo dentro de cada tratamiento es baja. Además, indica que el diseño empleado en el experimento presentó un buen control sobre la variabilidad de la materia orgánica en el suelo.

Tabla 14

Análisis de varianza (ANOVA) para la materia orgánica del suelo

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F calculado	p-valor
Bloque	0.04	2	0.02	1.74	0.2534
Tratamientos	0.21	3	0.07	6.32	0.0275
Error	0.07	6	0.01		
Total	0.32	11			

CV = 4.53 %

La prueba de Tukey para la comparación de medias de la materia orgánica del suelo muestra una diferencia entre los tratamientos de fertilización y el testigo. La dosis alta, con 6.07 %, y la dosis baja, con 5.91 %, están agrupadas en la letra A, indicando que no presentan diferencias entre sí en el aumento de materia orgánica. Estos resultados sugieren que ambas dosis de fertilización

fueron efectivas en incrementar el contenido de materia orgánica en el suelo, superando significativamente al testigo.

La dosis media, con un valor de 5.65 %, se encuentran en el grupo AB, lo que indica que no tiene una diferencia significativa con las dosis alta y baja que se encuentra en el grupo A, pero muestra una proximidad estadística con el testigo. Esto indica que la dosis media incrementa la materia orgánica, aunque en menor medida que las dosis alta y baja.

Finalmente, el testigo, con un valor de 4.48 % de MO, se ubica en el grupo B. Este valor es menor en comparación con los tratamientos de diferentes dosis de fertilización, lo que demuestra que la ausencia de fertilización limita el contenido de materia orgánica en el suelo.

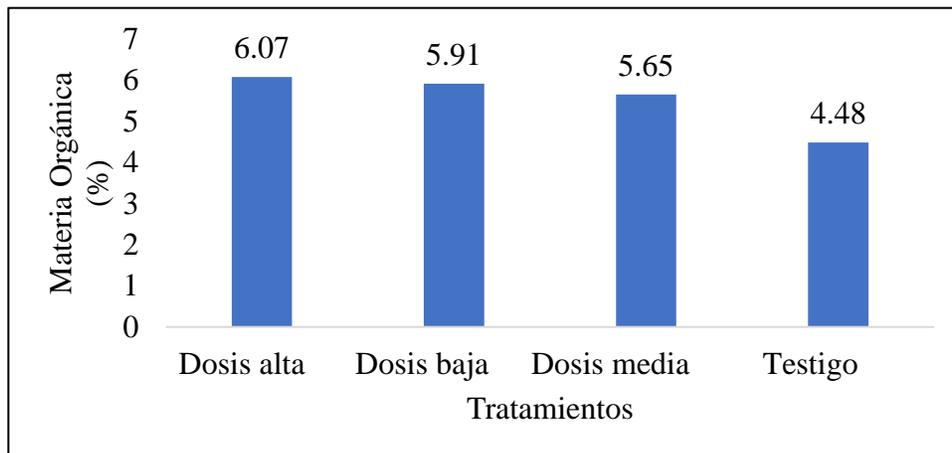
Tabla 15

Prueba de Tukey para la comparación de medias de la Materia orgánica

Tratamientos	Materia Orgánica (%)	Agrupación
Dosis alta	6.07	A
Dosis baja	5.91	A
Dosis media	5.65	AB
Testigo	4.48	B

Figura 10

Diferencias de la materia orgánica en el suelo en cada tratamiento



Los resultados de la investigación muestran que la fertilización, en sus distintas dosis, aumenta la materia orgánica del suelo en comparación con el testigo, Probablemente se deba a que la actividad microbiana del suelo aumenta y mejora la disponibilidad de la materia orgánica. Este resultado coincide con los de Arrieche y Ruiz (2014), quienes, en su estudio, con el objetivo de evaluar el efecto de la fertilización orgánica en combinación con fertilización inorgánica (NPK) en un suelo ácido y alcalino, obtuvieron que la combinación de los fertilizantes, elevó la concentración de materia orgánica tanto en el suelo ácido como en el suelo alcalino.

Rodríguez y Longa (2021) también encontraron que los fertilizantes químicos elevan el contenido de materia orgánica en el suelo de 3.8 % a 6.2 %. Además, también tiene efectos sobre el contenido de nitrógeno, fósforo, potasio, densidad y la CIC en el suelo. Al respecto, Peñaranda (2019) refiere que la materia orgánica al poseer cargas negativas en su estructura, retiene a los cationes de carga positiva de los fertilizantes como el amonio (NH_4^+), K^+ , Ca^+ y Mg^+ , los cuales hacen que eleve su disponibilidad.

4.6. Tendencia de la materia orgánica del suelo

La figura 11, muestra la variación de la materia orgánica según las dosis de fertilización. Teniendo en cuenta que el valor inicial para todos los tratamientos es de 4.48 %. A los 60 días, se observa un aumento en la materia orgánica en los tratamientos con diferentes dosis de fertilización, la dosis alta alcanzó el 6.07 %, seguido por la dosis baja con 5.91 % y la dosis media con 5.65 %. Este aumento indica que las dosis de fertilización incrementan temporalmente la materia orgánica en el suelo.

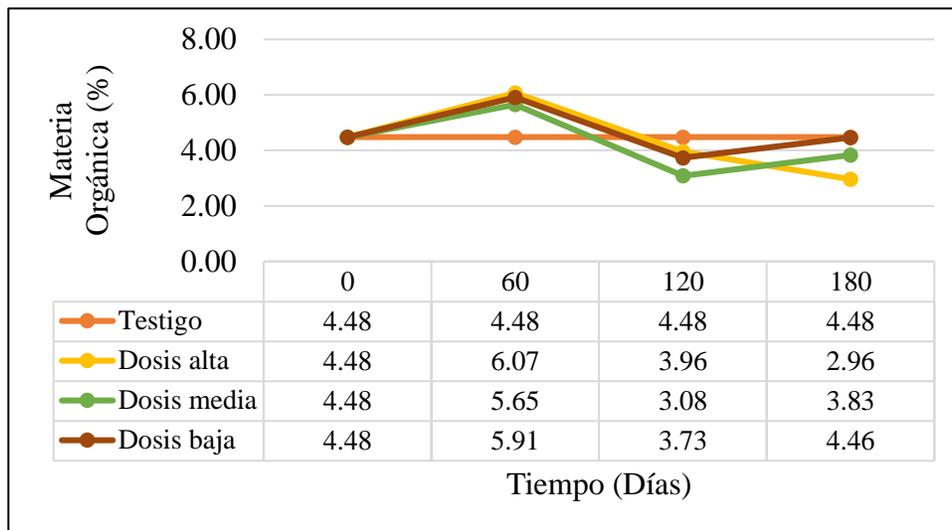
Sin embargo, a los 120 días, los tratamientos mostraron una disminución en la materia orgánica. La dosis alta desciende a 3.96 %, la dosis media a 3.08 % y la dosis baja a 3.73 %. Esta reducción podría deberse a la mineralización de la materia orgánica en el suelo, impulsada por el

aumento en la actividad microbiana como respuesta a la fertilización. El testigo mantiene un nivel constante de 4.48 %.

A los 180 días, se evidencia una tendencia hacia la estabilización de la materia orgánica en los tratamientos con dosis baja y media con ligeros aumentos de 4.46 % y 3.83 % respectivamente. En cambio, el tratamiento con dosis alta sigue su descenso con valores de 2.96 %. Esto indica que, con el tiempo, la materia orgánica tiende a disminuir en los suelos fertilizados.

Figura 11

Comportamiento de la materia orgánica del suelo en función a la dosis de fertilización y el tiempo



El comportamiento de la materia orgánica en relación a de dosis de fertilización y el tiempo, muestra que, la incorporación de los fertilizantes en las diferentes dosis, incrementa el contenido de materia orgánica del suelo. Sin embargo, a partir de los 60 días, la materia orgánica disminuye probablemente a que se ha mineralizado.

Al respecto, De la Peña (2019) sostiene que a largo plazo los fertilizantes químicos pueden disminuir las poblaciones microbiológicas y reducir el contenido de materia orgánica en el suelo. Por otro lado, Vásquez (2015) añade que la materia orgánica después de una fertilización química reduce su contenido en el suelo, esto debido al proceso de mineralización, donde los compuestos

inorgánicos más simples se transforman en formas minerales que las plantas pueden absorber, o bien, se pueden perder como lixiviados en la solución del suelo.

4.7. Efecto de las dosis de fertilización química en el nitrógeno total del suelo

En el análisis de varianza (ANOVA) realizado para el nitrógeno total en el suelo, se muestra para bloques un p-valor de 0.3409, el cual es mayor al 0.05. Este valor indica que no existen diferencias significativas. En cuanto a los tratamientos, se obtuvo un p-valor de 0.0444, el cual es menor al nivel de significancia de 0.05. Este resultado indica que los tratamientos sí producen diferencias en el contenido de nitrógeno total del suelo, es decir, que al menos uno de los tratamientos aplicados tuvo un efecto sobre los niveles de nitrógeno en comparación con los demás, reflejando que la dosificación de la fertilización influyó en el contenido de nitrógeno en el suelo.

El CV es 10.48 %, lo cual indica que la variabilidad de los resultados del nitrógeno total en el suelo dentro de cada tratamiento es baja. Además, indica que el diseño empleado en el experimento presentó un buen control sobre la variabilidad del nitrógeno total en el suelo.

Tabla 16

Análisis de varianza (ANOVA) para el nitrógeno total en el suelo

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F calculado	p-valor
Bloque	0.0022	2	0.0011	1.2943	0.3409
Tratamientos	0.0126	3	0.0042	5.0435	0.0444
Error	0.0050	6	0.0008		
Total	0.0197	11			

CV= 10.48 %

La prueba de Tukey realizada para la comparación de medias del nitrógeno total en el suelo, muestra que todos los tratamientos con dosis de fertilización alta, baja y media alcanzaron un valor de nitrógeno total en el suelo con valores de 0.30, 0.30, 0.28 respectivamente agrupándose todos en la misma categoría estadística A. Esto significa que, desde el punto de vista estadístico, no se

encontraron diferencias significativas en los niveles de fertilización respecto al nitrógeno, pero estos si distan del testigo, dado que con este se encontró el menor valor y se agrupó en la categoría B.

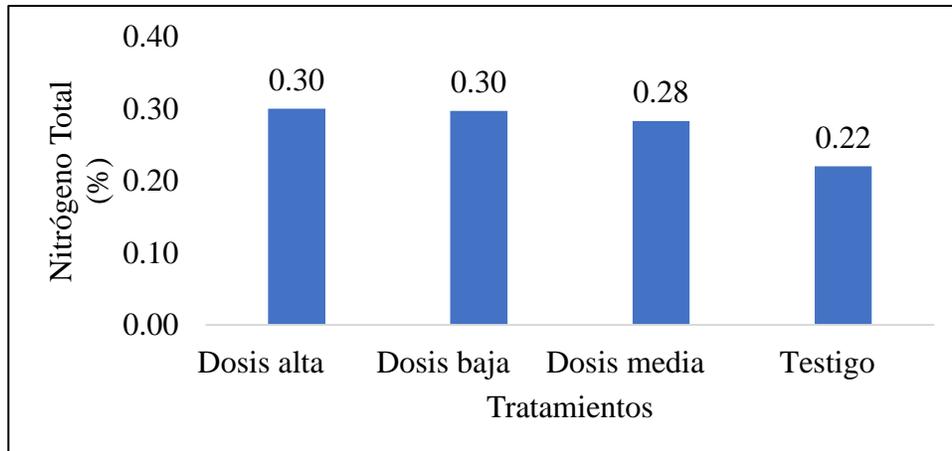
Tabla 17

Prueba de Tukey para la comparación de medias del nitrógeno total en el suelo

Tratamientos	Nitrógeno total (%)	Agrupación
Dosis alta	0.30	A
Dosis baja	0.30	A
Dosis media	0.28	A
Testigo	0.22	B

Figura 12

Diferencias del Nitrógeno del suelo en cada tratamiento



Los resultados del presente estudio revelan que las diferentes dosis de fertilización química aplicadas no mostraron diferencias estadísticamente significativas entre sí, pero si distan del testigo en el contenido de nitrógeno total del suelo.

Este comportamiento puede explicarse por los procesos de nitrificación e interacción iónica en el suelo. Siguiendo a Costa y Ocete (2020), durante la nitrificación, los iones de amonio (NH_4^+), con carga positiva, se adhieren a las partículas de materia orgánica con carga negativa. Este

mecanismo de retención previene la lixiviación del nitrógeno amoniacal. En contraste, los iones de nitrato (NO_3^-), con carga negativa, no se fijan a las partículas del suelo, quedando disponibles para la absorción por las plantas.

Tales interacciones iónicas conducen a una liberación gradual y relativamente uniforme del nitrógeno, lo que explicaría la similitud en los niveles de nitrógeno disponibles entre los diferentes tratamientos de fertilización. Este fenómeno sugiere una dinámica de estabilización del nitrógeno en el suelo que minimiza las variaciones significativas entre las distintas dosis aplicadas.

4.8. Tendencia del nitrógeno total en el suelo

La figura 13, muestra el comportamiento del nitrógeno total en el suelo, inicialmente todos los tratamientos presentan el mismo nivel de nitrógeno (0.22 %), lo que indica una condición homogénea antes de la aplicación de fertilizantes.

A los 60 días, los tratamientos con fertilización, muestran un incremento en el nitrógeno total, las dosis alta y baja mostraron un valor de 0.30 %, la dosis media con valor de 0.28 %, lo que indica que la fertilización incrementa el nitrógeno total a corto plazo. El testigo, en cambio, se mantiene constante, lo que resalta el efecto de la fertilización.

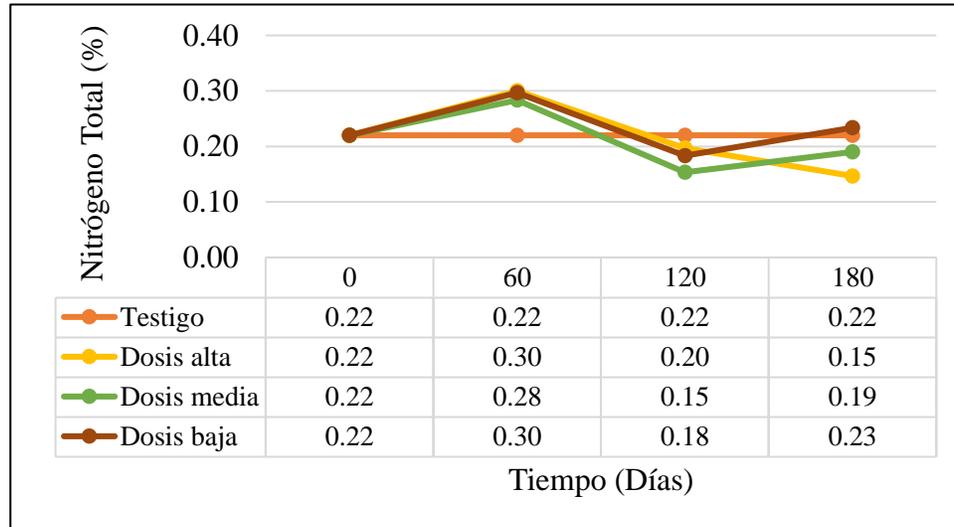
A los 120 días, se observa una notable disminución en el nitrógeno total en todos los tratamientos con fertilización, la dosis media con 0.15 %, la dosis baja con 0.18 % y la dosis alta con 0.20 %. Este descenso podría indicar la mineralización y posible absorción del nitrógeno por las plantas o su pérdida por lixiviación, reduciendo su presencia en el suelo. El testigo, en cambio, se mantiene constante.

A los 180 días, el nitrógeno total parece estabilizarse, los tratamientos con fertilización se mantienen a niveles más bajos que el testigo. La dosis baja presenta un nivel ligeramente elevado al testigo, lo que indica una posible liberación gradual del nitrógeno. La interacción entre la dosis

de fertilización y el tiempo muestra una respuesta inicial favorable, seguida de una disminución y estabilización del nitrógeno total en el suelo.

Figura 13

Comportamiento del Nitrógeno Total en el suelo en función de las dosis de fertilización y el tiempo



El comportamiento del nitrógeno total en el suelo en respuesta a las dosis de fertilización, los resultados muestran que los primeros 60 días muestra un incremento mínimo del nitrógeno total, posterior a ello se observa la estabilización de este elemento a valores iniciales. Este fenómeno se deba probablemente a que en primera instancia la aplicación de la fertilización tiene una respuesta inmediata en el suelo, aumentando el nitrógeno total, en consecuencia, este elemento está en forma disponible para la planta y puede ser aprovechado para sus procesos fisiológicos. Este resultado coincide con los de Weil y Brady (2016), donde encontraron que, al incorporar nitrógeno en un suelo ácido, el contenido de nitrógeno total del suelo tiende a elevarse principalmente en el proceso de hidrólisis de la urea y la actividad microbiana en el suelo. Además, refiere que el amonio al poseer carga positiva puede ser absorbido por partículas de materia orgánica y arcillas del suelo que tienen carga negativa. Este proceso aumenta el nitrógeno total del

suelo de forma temporal, y su estabilización en el suelo se debe a que al estar en forma disponible es absorbido por las plantas.

4.9. Efecto de las dosis de fertilización química en el fósforo disponible del suelo

El análisis de varianza (ANOVA) realizado para el fósforo en el suelo, mostró para los bloques un p - valor de 0,1335, superior al 0.05. Esto indica que las diferencias en el contenido de fósforo entre los bloques no son estadísticamente significativas. Por otro lado, el análisis para los tratamientos revela un p - valor inferior a 0.0001, lo cual es menor que 0.05. Este resultado indica que existen diferencias significativas en el contenido de fósforo en el suelo debido a los tratamientos aplicados. Lo cual implica que al menos uno de los tratamientos ha incrementado significativamente el contenido de fósforo en comparación con los demás

El CV es de 7.24 %, lo cual indica que la variabilidad de los resultados del fósforo disponible en el suelo dentro de cada tratamiento es baja. Además, indica que el diseño empleado en el experimento presentó un buen control sobre la variabilidad del fósforo disponible en el suelo.

Tabla 18

Análisis de varianza (ANOVA) para el fósforo disponible en el suelo

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F calculado	p-valor
Bloque	8.75	2	4.38	2.87	0.1335
Tratamientos	1081.36	3	360.45	236.49	<0.0001
Error	9.15	6	1.52		
Total	1099.25	11			

CV = 7.24 %

En la prueba de Tukey realizada para la comparación de medias del fósforo disponible en el suelo, se observa que existen diferencias significativas entre los tratamientos de fertilización y el testigo. El tratamiento con dosis alta, con un valor de fósforo de 32.76 ppm, se clasificó en el

grupo A, lo que indica que fue el tratamiento más efectivo para incrementar el fósforo en el suelo. Este nivel de dosis proporcionó un incremento significativo en comparación con los demás tratamientos y el testigo, reflejando que una aplicación elevada de fertilizante es eficaz para elevar notablemente el contenido de fósforo en el suelo.

La dosis media, con un valor de 16.07 ppm, se ubicó en el grupo B. Aunque este tratamiento también incrementó el fósforo en el suelo de manera significativa, su efecto fue inferior al de la dosis alta. La dosis baja, con un contenido de fósforo de 11.26 ppm, y el testigo, con 8.15 ppm, se agruparon en el grupo C, indicando que la dosis baja no fue lo suficientemente elevada como para aumentar el contenido del fósforo en comparación con la fertilización de dosis media y alta.

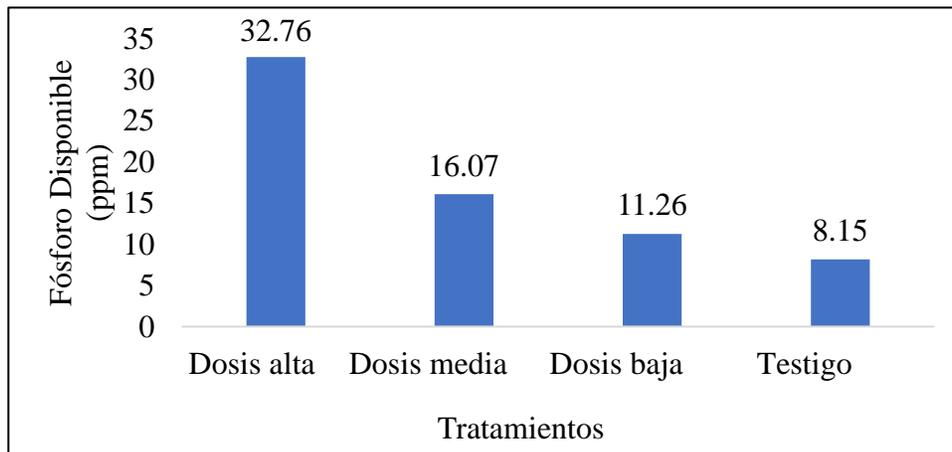
Tabla 19

Prueba de Tukey para la comparación de medias para del fósforo disponible en el suelo

Tratamientos	Fósforo disponible (ppm)	Agrupación
Dosis alta	32.76	A
Dosis media	16.07	B
Dosis baja	11.26	C
Testigo	8.15	C

Figura 14

Diferencias del fósforo disponible en el suelo en cada tratamiento



Los resultados del estudio revelan una respuesta diferencial en los niveles de fósforo según la dosis de fertilización aplicada. La dosis alta mostró el incremento más significativo en el contenido de fósforo disponible, seguida por la dosis media, mientras que la dosis baja no presentó diferencias estadísticamente respecto al testigo. Esto se debe probablemente a los procesos de transformación química del fertilizante. Durante la incorporación del fertilizante fosforado, se produce la conversión a iones fosfato (PO_4^{3-}) y ortofosfato (PO_4^{2-}), formas químicas mediante el cual los cultivos pueden utilizar este nutriente esencial para sus procesos fisiológicos.

Estos hallazgos se encuentran respaldados en la investigación de Havlin *et al.* (2014) sobre fertilidad del suelo y fertilizantes. Los autores destacan que, en suelos ácidos, la incorporación de fertilizantes fosfatados desencadena una serie de reacciones químicas que conducen a la formación de iones fosfato y ortofosfato, incrementando la concentración de fósforo disponible en la solución del suelo y, consecuentemente, su potencial de absorción por los cultivos.

4.10. Tendencia del fósforo disponible en el suelo

La figura 15, muestra el comportamiento del fósforo disponible en el suelo a lo largo del tiempo en respuesta a los tratamientos de fertilización. Inicialmente, todos los tratamientos incluyendo el testigo, presentan un valor homogéneo de 8.15 ppm de fósforo, indicando homogeneidad antes de la aplicación de fertilizantes.

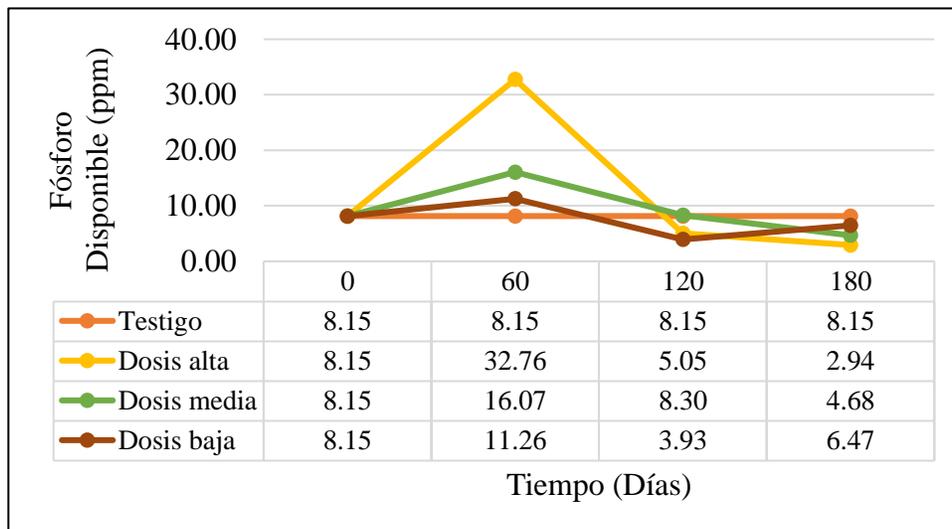
A los 60 días, se observa un incremento significativo en el fósforo disponible en la dosis alta, alcanzando 32.76 ppm, lo que sugiere una liberación rápida de fósforo debido a la fertilización. La dosis media y baja también muestran incrementos con valores de 16.07 y 11.26 ppm respectivamente, pero en menor magnitud, evidenciando una relación directa entre la cantidad de fertilizante y el aumento de fósforo.

A los 120 días, el fósforo disponible disminuye en todos los tratamientos con diferentes dosis de fertilización, la dosis baja disminuye a 3.93 ppm, la dosis alta baja a 5.05 ppm, la dosis media a 8.30 ppm. Este descenso podría atribuirse a la absorción de fósforo por las plantas o a la fijación en el suelo, lo que reduce su disponibilidad con el tiempo.

A los 180 días, se observan niveles de fósforo más estables, aunque la dosis alta y media sigue descendiendo, su velocidad disminuyó considerablemente a los valores de 2.94 y 4.68 ppm respectivamente. Por otro lado, la dosis baja tiende a estabilizarse con valores de 6.47 ppm, acercándose al valor el tratamiento testigo con valor de 8.15 ppm. El análisis refleja una interacción entre la dosis y el tiempo, con un efecto inicial marcado seguido de una disminución y eventual estabilización del fósforo disponible en el suelo.

Figura 15

Comportamiento del fósforo disponible en el suelo en función de las dosis de fertilización y el tiempo



El comportamiento del fósforo disponible en el suelo en función de las dosis de fertilización y el tiempo. Los resultados de la presente investigación, indican que los primeros 60 días el fósforo disponible en el suelo asciende de acuerdo a la dosis de fertilización aplicada, siendo más elevado

en la dosis alta, seguido de la dosis media y baja en comparación con el testigo. Posterior a este resultado inicial, el fósforo en el suelo sufre una reducción en su disponibilidad en todos los tratamientos. Esto se deba probablemente a que los iones de fósforo sean absorbidos por las plantas o retenidas por los ácidos cambiabiles. Havlin *et al.* (2014) mencionan que, cuando se aplica un fertilizante fosforado, la concentración de fósforo en la solución del suelo aumenta inicialmente, sin embargo, cuando el suelo presenta acidificación con un pH menor al 5.5, este fósforo tiende a fijarse con el hierro y aluminio, formando fosfatos de hierro y aluminio disminuyendo su disponibilidad. Además, De la Peña (2019) refiere que en suelos ácidos cuando el fósforo es fijado por el aluminio, recomienda encalar el suelo o utilizar especies y variedades tolerantes a la toxicidad del aluminio.

4.11. Efecto de las dosis de fertilización química en el potasio disponible del suelo

El análisis de varianza (ANOVA) realizado para el potasio disponible en el suelo indican que los bloques muestran el valor de significación (p-valor) de 0.6912, lo cual es mayor al 0.05. Esto indica que no existe una diferencia significativa entre los bloques. Por otro lado, el valor de significación para los tratamientos es de 0.0168, lo cual es menor a 0.05. Esto implica que existen diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos en términos del contenido de potasio en el suelo.

El CV es de 5.99 %, lo cual indica que la variabilidad de los resultados del potasio disponible en el suelo dentro de cada tratamiento es baja. Además, indica que el diseño empleado en el experimento presento un buen control sobre la variabilidad del potasio disponible en el suelo.

Tabla 20*Análisis de varianza (ANOVA) para el potasio disponible en el suelo*

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F calculado	p-valor
Bloque	63.83	2	31.92	0.39	0.6912
Tratamientos	1914.65	3	638.22	7.86	0.0168
Error	487.32	6	81.22		
Total	2465.81	11			

CV = 5.99 %

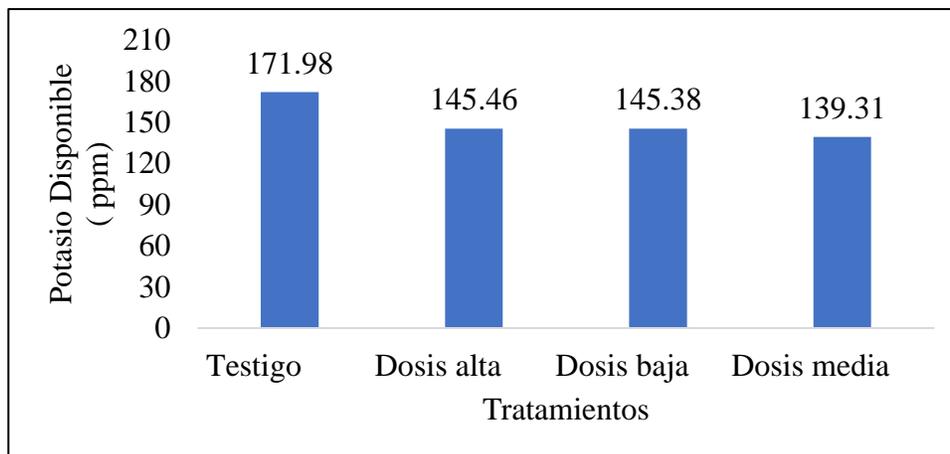
La prueba de Tukey realizada para la comparación de medias del potasio disponible en el suelo. los resultados muestran que el testigo presenta un nivel significativamente más alto de potasio (171.98 ppm) en comparación a los tratamientos con diferentes dosis de fertilización aplicada. Agrupándose así en la categoría A. Mientras que las tres dosis con fertilización alta, baja y media con valores de 145.46 ppm, 145.38 ppm y 139.31 ppm respectivamente, se agrupan en la categoría B. Esto indica que la aplicación de fertilizantes químicos al suelo, sin importar la dosis, difieren notablemente en la reducción del potasio disponible en el suelo en comparación con el testigo que no se utilizó fertilización química.

Tabla 21*Prueba de Tukey para la comparación de medias del potasio disponible en el suelo*

Tratamientos	Potasio Disponible (ppm)	Agrupación
Testigo	171.98	A
Dosis alta	145.46	B
Dosis baja	145.38	B
Dosis media	139.31	B

Figura 16

Diferencias del Potasio Disponible en el suelo en cada tratamiento



Los resultados de la presente investigación muestran que las distintas dosis de fertilización (NPK) no incrementaron el potasio disponible en comparación con el testigo. Este resultado puede deberse a que los nutrientes añadidos en los tratamientos no se encuentren en una forma inmediatamente disponible o que el potasio aplicado se haya fijado en el suelo, quedando menos accesible para las plantas.

Vistoso y Martínez (2020) refiere que el 98 % del potasio total se encuentra en forma no disponible, retenidos en los coloides de las arcillas y materia orgánica, y solo el 2 % representa el potasio disponible en la solución del suelo para las plantas. Además, López et al., (2021) menciona que, al incorporar fertilizantes a base de potasio en suelos ácidos, la alta concentración de hidrógeno (H^+) y aluminio (Al^{3+}) compiten con el potasio por los sitios de intercambio catiónico, esto favorece que el potasio aplicado se desplace hacia los sitios no intercambiables o se fije en minerales de arcilla, volviéndose no disponible para la absorción de las plantas.

4.12. Tendencia del Potasio disponible en el suelo

La figura 17, muestra el comportamiento del potasio disponible en el suelo en función de los tratamientos de fertilización con el tiempo. Teniendo en cuenta que el valor del potasio disponible al inicio fue de 171.98 ppm, presentando homogeneidad para todos los tratamientos, incluido el testigo.

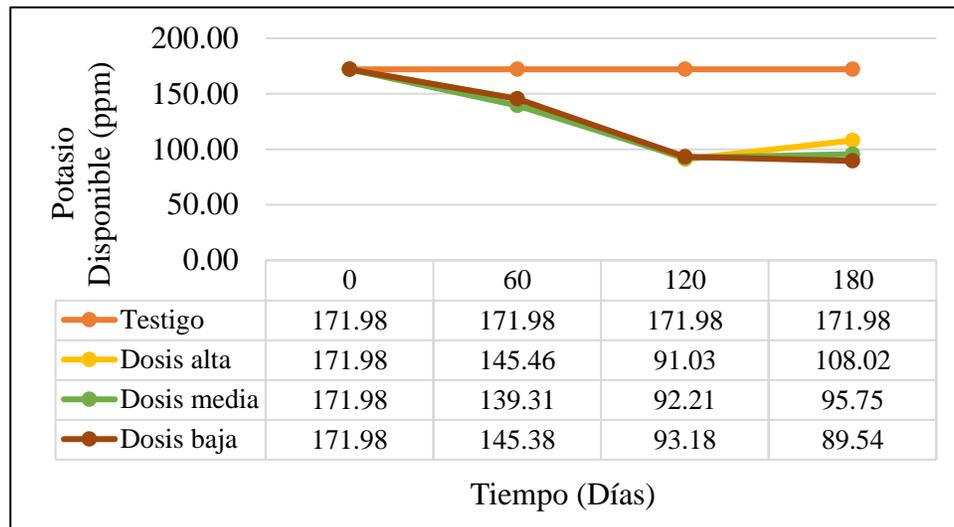
A los 60 días, se observa una disminución en los niveles de potasio en los suelos fertilizados. La dosis alta presenta 145.46 ppm, la dosis media tiene 139.31 ppm, y la dosis baja muestra 145.38 ppm. Este descenso moderado podría indicar un efecto inicial de la fertilización en la disponibilidad de potasio, posiblemente porque las plantas están absorbiendo más potasio en conjunto con el nitrógeno y fósforo añadidos. Mientras que el testigo mantiene su valor inicial.

A los 120 días, los niveles de potasio disponibles siguen disminuyendo en todos los tratamientos con diferentes dosis de fertilización, alcanzando los valores más bajos registrados en el experimento: La dosis alta con 91.03 ppm, la dosis media con 92.21 ppm y la dosis baja con 93.18 ppm. Este descenso indica una interacción continua entre la fertilización y el consumo de potasio por las plantas, que podría estar agotando las reservas de este nutriente en el suelo.

A los 180 días, los niveles de potasio en los tratamientos con diferentes dosis de fertilización muestran un nivel de recuperación, especialmente la dosis alta con 108.02 ppm y la dosis media con 95.75 ppm, mientras que la dosis baja mantiene niveles descendentes con valores de 89.54 ppm. Esto podría indicar una posible estabilización o una liberación retardada de potasio en el suelo.

Figura 17

Comportamiento del potasio disponible en el suelo en función de las dosis de fertilización y el tiempo



El comportamiento del potasio en el suelo evidenció una reducción progresiva de su contenido disponible en todos los tratamientos con diferentes dosis de fertilización a lo largo del tiempo. Este fenómeno refleja la compleja dinámica de movilización y retención de nutrientes en el suelo. El potasio (K^+), caracterizado como un catión móvil, experimenta procesos dinámicos de interacción iónica determinados por las propiedades fisicoquímicas del suelo. Su comportamiento está condicionado por mecanismos de retención en coloides arcillosos y procesos de lixiviación que modifican su disponibilidad.

Según Henao y Hernández (2002), la distribución del potasio en el suelo mantiene una relación estrecha con el pH edáfico. Las variaciones en el potencial de hidrógeno provocan cambios significativos en el equilibrio catiónico, permitiendo que el K^+ recupere su estabilidad en la solución del suelo cuando las condiciones se modifican. Además, la materia orgánica desempeña un papel fundamental al formar complejos con cationes como el aluminio, lo que contribuye a

reducir la acidez y potencialmente liberar el potasio previamente adsorbido en las estructuras arcillosas.

4.13. Efecto de las dosis de fertilización química en la capacidad de intercambio catiónico del suelo

En el análisis de varianza (ANOVA) realizado para la capacidad de intercambio catiónico (CIC) en el suelo indican que para los bloques se obtuvo un nivel de significancia (p-valor) de 0.0621. Esto indica que no existe diferencia significativa entre los bloques en términos de CIC. Así mismo, para los tratamientos, el p-valor obtenido es de 0.0002, lo cual es menor al 0.05. Este resultado indica que existen diferencias significativas en el CIC del suelo entre los distintos tratamientos de fertilización aplicados.

El CV es de 6.86 %, lo cual indica que la variabilidad de los resultados de la capacidad de Intercambio Catiónico en el suelo dentro de cada tratamiento es baja. Además, indica que el diseño empleado en el experimento presento un buen control sobre la variabilidad de la Capacidad de Intercambio Catiónico en el suelo.

Tabla 22

Análisis de varianza (ANOVA) para la Capacidad de Intercambio Catiónico del suelo

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F calculado	p-valor
Bloque	1.56	2	0.78	4.57	0.0621
Tratamientos	20.01	3	6.67	39.07	0.0002
Error	1.02	6	0.17		
Total	22.59	11			

CV= 6.86 %

En la prueba de Tukey para la comparación de medias de la capacidad de intercambio catiónico (CIC) en el suelo, los resultados indican diferencias significativas entre los tratamientos

aplicados y el testigo. Los tratamientos con dosis media (6.86), baja (6.76) y alta (6.69) de fertilización se agrupan en la categoría A, lo que indica que no presentan diferencias estadísticas entre ellas en términos de CIC. Esto indica que cualquiera de las dosis de fertilización aplicada contribuye de manera similar al aumento de la CIC en el suelo. Sin embargo, el testigo, con un valor de 3.79, se agrupa en la categoría B, lo que lo diferencia de los tratamientos con fertilización.

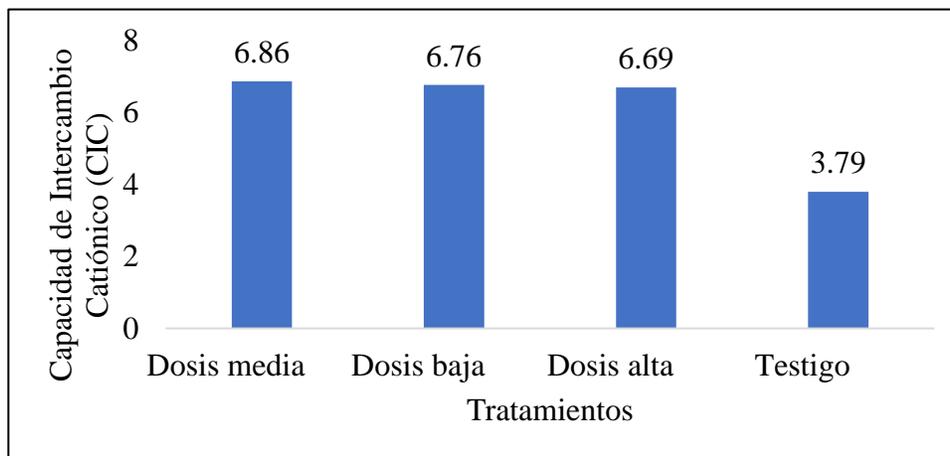
Tabla 23

Prueba de Tukey para la comparación de medias de la Capacidad de Intercambio Catiónico

Tratamientos	Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC)	Agrupación
Dosis media	6.86	A
Dosis baja	6.76	A
Dosis alta	6.69	A
Testigo	3.79	B

Figura 18

Diferencias de la Capacidad de Intercambio Catiónico del suelo en cada tratamiento



El estudio reveló un incremento significativo de la Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) en respuesta a las diferentes dosis de fertilización química, evidenciando variaciones notables respecto al tratamiento testigo. Todas las dosis aplicadas (alta, media y baja) provocaron

un aumento en el CIC, mientras que el tratamiento testigo mantuvo valores constantes, lo que sugiere un efecto directo de la fertilización sobre las propiedades fisicoquímicas del suelo. Como señala Sadeghian (2016), la adición de fertilizantes, particularmente los nitrogenados, estimula la actividad microbiana edáfica, promoviendo un incremento en la producción de materia orgánica. Este incremento orgánico representa una fuente crucial de cargas negativas que facilitan la retención de diversos cationes, tanto básicos (NH_4^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}) como ácidos (H^+ y Al^{3+}), reduciendo significativamente los procesos de lixiviación.

Los hallazgos son consistentes con la investigación de Rodríguez y Longa (2021), quienes documentaron un incremento de la CIC desde 4.24 meq 100 hasta 6.7 meq 100 tras la aplicación de fertilizantes químicos NPK. Este resultado confirma la capacidad de la fertilización para modificar sustancialmente la estructura química del suelo, aumentando su capacidad de retención y disponibilidad de nutrientes.

La fertilización química, independientemente de la dosis, actúa como un catalizador que optimiza la dinámica de intercambio catiónico, generando un ambiente edáfico más favorable para el desarrollo vegetal. El aumento de la CIC implica una mayor capacidad de retención de nutrientes, reducción de la lixiviación y consecuentemente una mejora en la eficiencia del sistema nutricional

4.14. Tendencia de la Capacidad de intercambio catiónico (CIC)

La figura 19, muestra el comportamiento de la capacidad de intercambio catiónico (CIC) en el suelo, en función de las distintas dosis de fertilización y el tiempo. Inicialmente, todos los tratamientos presentan un valor homogéneo de CIC de 3.79 cmol kg, lo que indica un estado uniforme del suelo antes de la aplicación de fertilizantes.

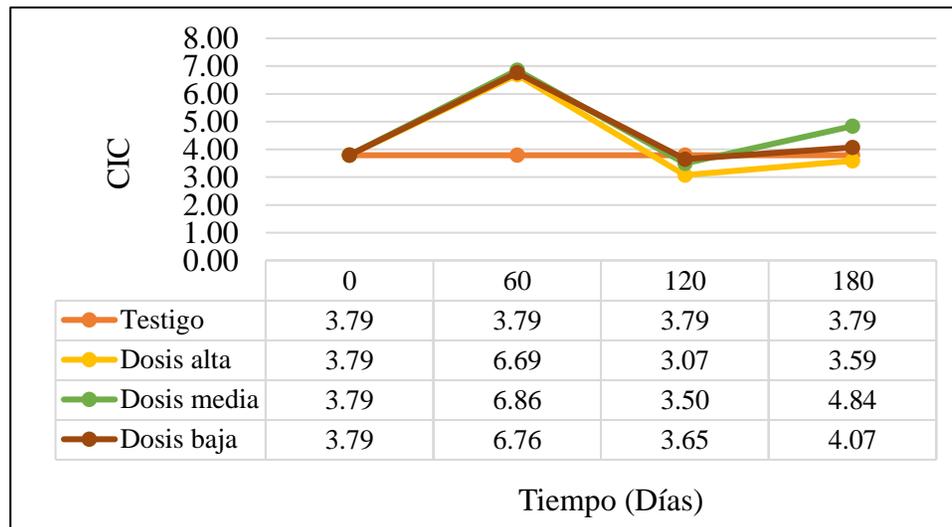
A los 60 días, se observa un aumento notable en el CIC para todos los tratamientos con dosis de fertilización en comparación con el testigo, que mantiene su valor inicial de 3.79 cmol kg. La dosis media alcanza el mayor valor con 6,86 cmol kg, seguida de la dosis baja con 6,76 cmol kg, y la dosis alta con 6,69 cmol kg. Este incremento puede estar relacionado con la mayor disponibilidad de cationes en el suelo debido a la aplicación de fertilizantes, lo cual mejora la capacidad del suelo para retener nutrientes esenciales.

En el día 120, los niveles de CIC disminuyen en los tratamientos con dosis de fertilización, volviendo a valores cercanos al testigo. La dosis alta presenta una caída más pronunciada (3,07 cmol kg), mientras que la dosis media (3.50 cmol kg) y baja (3.65 cmol kg) se estabilizan ligeramente por encima de sus niveles iniciales. Esta disminución podría ser el resultado de la absorción de cationes por las plantas, lo que reduce la cantidad de cationes intercambiables en el suelo.

A los 180 días, los tratamientos con dosis de fertilización muestran cierta recuperación en la CIC, especialmente en la dosis media con 4,84 cmol kg y en la dosis baja con 4,07 cmol kg, mientras que la dosis alta presenta un nivel de recuperación de 3,59 cmol kg. Este comportamiento sugiere que, con el tiempo, el suelo puede retener cationes, posiblemente debido a una menor demanda de nutrientes por las plantas o a la descomposición de materia orgánica que libera cationes al suelo.

Figura 19

Comportamiento de la Capacidad de Intercambio Catiónico en el suelo en función de las dosis de fertilización y el tiempo



El comportamiento de la capacidad de intercambio catiónico en relación a las diferentes dosis de fertilización química y el tiempo muestran que los primeros 60 días tiende a incrementar su contenido en todos los suelos fertilizados, posterior a ello, surge una declinación en comparación con el testigo que no muestra ningún cambio en relación a la CIC del suelo. Esto se debe probablemente a que el suelo por el poder de amortiguamiento, tiende a estabilizarse, debido a que los cationes de los fertilizantes fueron tomados por las plantas o algunos lixiviados, reduciendo así la actividad en los sitios de cambio y en consecuencia reduce la CIC del suelo.

Vásquez (2015) menciona que los fertilizantes químicos, al ser incorporados al suelo, liberan cationes como el K^+ , NH_4^+ , en la solución del suelo, interactuando con los coloides de la arcilla y la materia orgánica, por lo cual incrementa la CIC. Además, en suelos ácidos en el proceso de nitrificación del N, libera H^+ que puede desplazar a las bases de cambio y también aumentar la CIC. Al respecto, Bennardi *et al.* (2018) reportaron que estos cationes retenidos en los coloides de la materia orgánica son liberados y absorbidos por las plantas o lixiviados, la materia orgánica

tiende a estabilizarse, los sitios de intercambio reducen su actividad, finalmente, el suelo, por el poder de amortiguamiento, tiende a regresar a su estado natural, regulando la CIC del suelo.

4.15. Efecto de las dosis de fertilización química en las bases cambiables del suelo

El análisis de varianza (ANOVA) realizado para las bases cambiables en el suelo, muestra que los bloques presentaron un p-valor de 0.115, mayor al 0.05. Este resultado indica que no existen diferencias significativas entre los bloques. Por otro lado, el p-valor para los tratamientos es de 0.0239, menor al 0.05. Este resultado indica que existen diferencias significativas entre los distintos tratamientos aplicados, lo cual implica que las diferentes dosis de fertilización influyen en esta propiedad química del suelo.

El CV es de 3.63 % lo cual indica que la variabilidad de los resultados de las bases cambiables en el suelo dentro de cada tratamiento es baja. Además, indica que el diseño empleado en el experimento presentó un buen control sobre la variabilidad de las bases cambiables en el suelo.

Tabla 24

Análisis de varianza (ANOVA) para las bases cambiables en el suelo

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F calculado	p-valor
Bloque	35.98	2	17.99	3.17	0.115
Tratamientos	114.57	3	38.19	6.73	0.0239
Error	34.06	6	5.68		
Total	184.61	11			

CV = 3.63 %

La prueba de Tukey realizada para la comparación de medias de las bases cambiables en el suelo. Los resultados muestran que el tratamiento Testigo presenta el valor más alto (69.49%), y pertenece al grupo A. Este tratamiento sin intervención adicional refleja las condiciones naturales

del suelo en cuanto a la disponibilidad de bases cambiables en comparación con el tratamiento con dosis media, que se encuentra en el grupo B y presenta el valor más bajo de bases cambiables (61.05 %).

Por otro lado, los tratamientos con dosis baja (67.07 %) y alta (65.12 %) se agrupan en la categoría AB. Este agrupamiento indica que estos tratamientos no presentan diferencias significativas ni con el testigo ni con el tratamiento de dosis media. En términos prácticos, los efectos de las dosis baja y alta de fertilización sobre las bases cambiables son estadísticamente similares entre sí y también comparables al efecto del testigo.

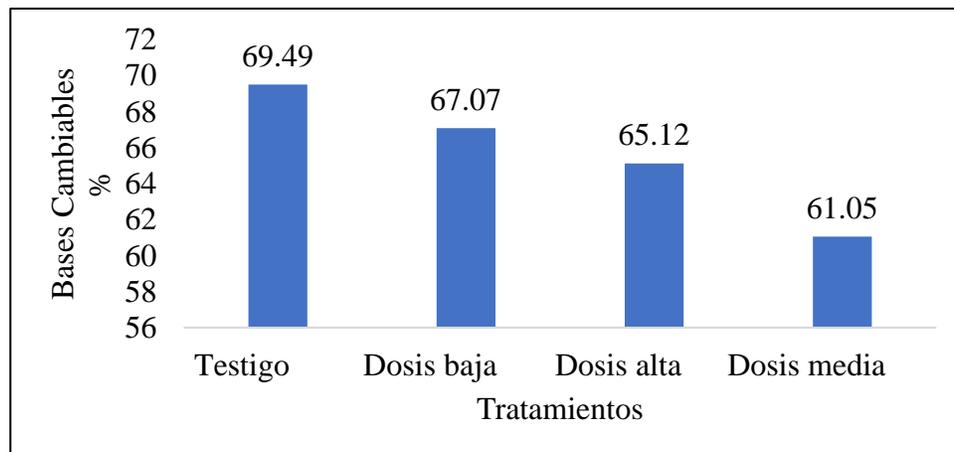
Tabla 25

Prueba de Tukey para la comparación de medias de las Bases Cambiables

Tratamientos	Bases Cambiables %	Agrupación
Testigo	69.49	A
Dosis baja	67.07	AB
Dosis alta	65.12	AB
Dosis media	61.05	B

Figura 20

Diferencias de las Bases Cambiables del suelo en cada tratamiento



Los resultados de la presente investigación muestran que las distintas dosis de fertilización (NPK) provocaron un descenso de las bases cambiables del suelo en comparación con el testigo que se mantuvo constante. Este resultado, indica que al incorporar fertilizantes químicos (NPK) al suelo, por sus características acidificantes, tienden a reducir el contenido de bases cambiables. Según Sadeghian (2003) refiere que la aplicación de fertilizantes nitrogenados al suelo, genera un excedente de H^+ , gradualmente el H^+ reemplaza a las bases de cambio, que son lavadas y transportadas a los horizontes contiguos acompañadas de iones en las aguas de percolación. Además, Osorio (2012) refiere que en suelos ácidos con pH menor a 5.5, los cationes (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+) que se encuentran en la fase intercambiable se lixivian pasando a la solución del suelo, y su espacio es reemplazado por Al^{3+} ó H^+ , en consecuencia, disminuyen las bases cambiables y la solución del suelo se acidifica.

4.16. Tendencia de las bases cambiables en el suelo

La figura 21, muestra el comportamiento de las bases cambiables en el suelo a causa de diferentes dosis de fertilización a lo largo del tiempo. Inicialmente, todos los tratamientos muestran el mismo valor de bases cambiables (69.49 %) indicando que antes de la aplicación de fertilizantes, la capacidad de cambio catiónico en el suelo es homogénea en todos los tratamientos.

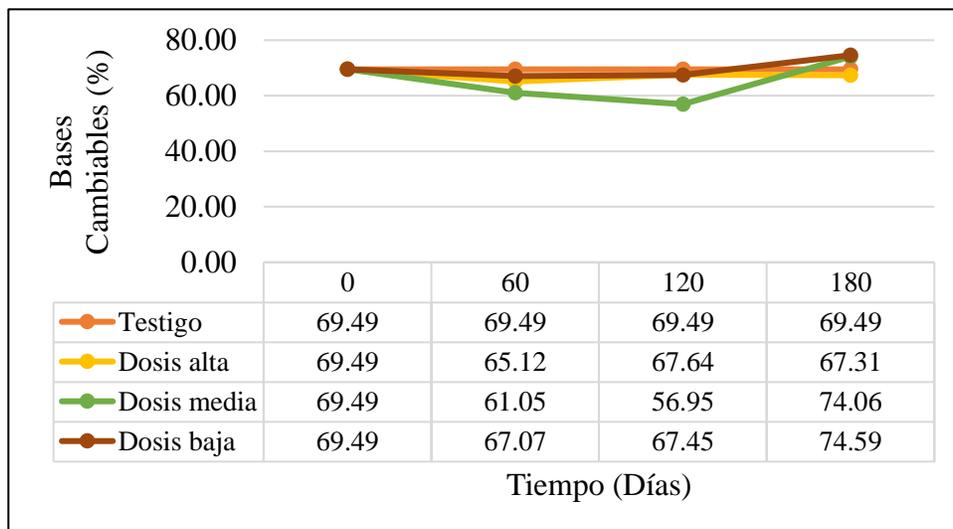
Al día 60, se observa una disminución en las bases cambiables en los tratamientos, la dosis alta con valores de 65.12 %, la dosis media con 61.05 % y la dosis baja con 67.07 %, respectivamente, mientras que el tratamiento testigo permanece constante en 69.49. Esto indica que la aplicación de fertilizantes reduce las bases cambiables del suelo. Este fenómeno podría estar relacionado con una mayor lixiviación o desplazamiento de cationes como resultado de la aplicación de fertilizantes.

Para el día 120, la tendencia se mantiene en los tratamientos con fertilización, pero es aún más marcada en la dosis media, que alcanza un valor mínimo de 56.95 %, indicando una reducción considerable en las bases cambiables. En comparación, la dosis alta y la dosis baja muestran una ligera recuperación (67.64 % y 67.45 %), lo cual podría reflejar una adaptación parcial del suelo a la fertilización.

Al día 180, los tratamientos con dosis media y dosis baja muestran un aumento significativo en las bases cambiables, con valores de 74.06 % y 74.59 %, superando incluso el valor inicial. Esto sugiere una recuperación en las bases cambiables del suelo. En el caso del tratamiento con dosis alta (T1), aunque también se observa una ligera recuperación (67.31 %), este valor sigue siendo inferior al valor inicial. El tratamiento testigo (T0) permanece sin cambios durante todo el período de observación, lo que confirma la estabilidad natural de las bases cambiables en ausencia de fertilización.

Figura 21

Comportamiento de las bases cambiables en el suelo en función de las dosis de fertilización y el tiempo



En cuanto al comportamiento de las bases cambiables por consecuencia de la fertilización y en tiempo, se observa que, en la etapa inicial, los fertilizantes reducen las bases cambiables del suelo, sin embargo, a largo plazo las bases cambiables tienden a recuperarse y estabilizarse manteniendo sus valores iniciales. Estos resultados probablemente se deban a que los fertilizantes químicos, por sus características acidificantes, aumenten la concentración de cationes como el H^+ reduciendo el contenido de bases cambiables en el suelo. La recuperación de las bases cambiables con el tiempo se deba probablemente al equilibrio natural del suelo. Estos resultados son semejantes a los de Weil y Brady (2016), quienes mencionan que, al aplicar fertilizantes nitrogenados, en formas amoniacales, en su proceso de conversión liberan H^+ y compiten con los cationes de cambio, acidificando al suelo. Además, refiere que, con el tiempo, los procesos naturales, como la mineralización de materia orgánica, la reposición de bases mediante la meteorización de minerales del suelo y el efecto tampón del suelo, permiten que estas bases cambiables vuelvan a ser adsorbidas en el complejo de intercambio del suelo.

4.17. Efecto de las dosis de fertilización química en la acidez cambiabile del suelo

El análisis de varianza (ANOVA) realizado para la acidez cambiabile en el suelo indica que no existe significación para los bloques (p -valor = 0.115). Esto indican que las diferencias entre los bloques no influyen en las diferencias de la acidez cambiabile en el suelo. Por otro lado, el análisis muestra un efecto significativo de los tratamientos sobre la acidez cambiabile, ya que el p -valor para esta fuente de variación es 0.0239, menor al 0.05. Este resultado indica que las diferentes dosis de fertilización aplicadas provocarán variaciones significativas en la acidez cambiabile del suelo.

El CV es de 6.94 %, lo cual indica que la variabilidad de los resultados de la acidez cambiante en el suelo dentro de cada tratamiento es baja. Además, indica que el diseño empleado en el experimento presenta un buen control sobre la variabilidad de la acidez cambiante en el suelo.

Tabla 26

Análisis de varianza (ANOVA) para la acidez cambiante en el suelo

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F calculado	p-valor
Bloque	35.98	2	17.99	3.17	0.115
Tratamientos	114.57	3	38.19	6.73	0.0239
Error	34.06	6	5.68		
Total	184.61	11			

CV = 6.94 %

En la prueba de Tukey realizada para la comparación de medias de la acidez cambiante en el suelo, en la tabla 20, se observa que el testigo, con un valor de acidez cambiante de 30.51 %, se ubica en el grupo B, indicando que su efecto sobre la acidez es menor en comparación con los tratamientos aplicados. Esto indica que, en ausencia de fertilización, la acidez del suelo se mantiene baja.

La dosis media (38.95 %) se encuentra en el grupo A, destacándose como el tratamiento con el mayor efecto en la acidez cambiante, lo cual indica que esta dosis es la que más contribuye a incrementar la acidez en el suelo. Este aumento puede deberse a una mayor liberación de iones de hidrógeno o a la presencia de fertilizantes que generan una reacción ácida en el suelo.

La dosis alta (34.88 %) y baja (32.93 %) se encuentran en el grupo AB, lo que indica que su efecto sobre la acidez cambiante es intermedio y no difiere entre la dosis media y el testigo. Sin embargo, ambos tratamientos aumentan la acidez en mayor medida que el testigo, pero menos que la dosis media.

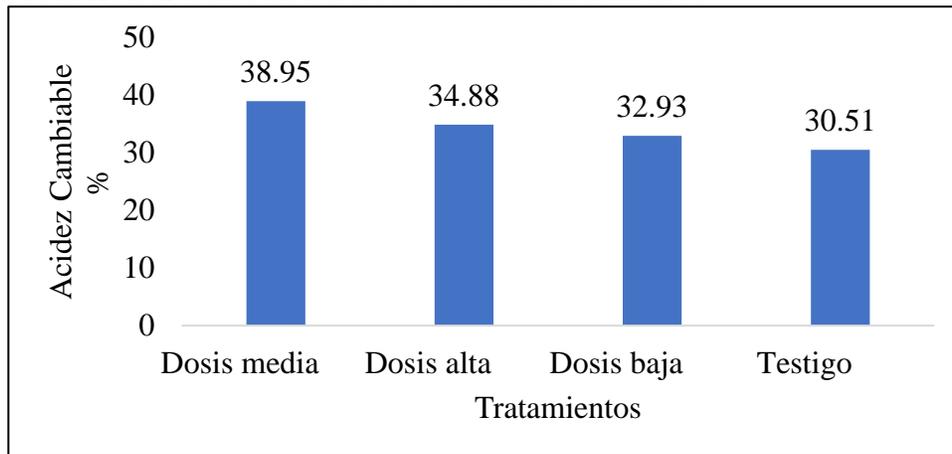
Tabla 27

Prueba de Tukey para la comparación de medias de la acidez cambiabile del suelo

Tratamientos	Acidez Cambiable %	Agrupación
Dosis media	38.95	A
Dosis alta	34.88	AB
Dosis baja	32.93	AB
Testigo	30.51	B

Figura 22

Diferencias de la Acidez Cambiable del suelo en cada tratamiento



Los resultados de la presente investigación para la acidez cambiabile en el suelo en relación a las diferentes dosis de fertilización, muestran que, de acuerdo a la cantidad de fertilización utilizada, la dosis media es quien más eleva el contenido de acidez cambiabile en el suelo, seguido de la fertilización con dosis alta y baja, aunque las últimas aumentaron la acidez cambiabile en menor cantidad, siguen siendo superiores al testigo. Estos resultados probablemente se deban a que, al incorporar fertilizantes químicos, alteren las bases de cambio e induzcan a la disminución de pH en el suelo. Sadeghian (2016) en su estudio, causas generadoras de la acidez del suelo, refiere que, la descomposición de la materia orgánica, la oxidación del azufre, la nitrificación del amonio (NH_4^+), la liberación de H^+ por las raíces cuando absorben Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^+ , los aniones

nitrate (NO_3^-), sulfate (SO_4^{2-}) and chloride (Cl^-) that come from organic and inorganic fertilizers, are leached from the exchange bases, these spaces are replaced by the acidifying cations (Al^{3+} and H^+) which generate an increase in the exchangeable acidity in the soil.

Chien *et al.* (2008) demonstrated that the nitrification of N from nitrogenous fertilizers that contain ammonium (NH_4^+) can generate acidity in the soil due to the release of hydrogen ions (H^+), where each mole of N from urea produces two moles of H^+ , and diammonium phosphate produces four moles of H^+ , this phenomenon results in the increase of soil acidity. On the other hand, Forero *et al.* (2009) mention that aluminum is in the form of oxides or aluminosilicates which are essential components of clays and other minerals, in conditions of high soil acidity, these mineral compounds begin to decompose in an accelerated manner, releasing aluminum in its soluble form (Al^{3+}) in the soil solution. Additionally, it is noted that Al^{3+} is one of the most important components of potential acidity of soils because it reacts with water, releasing hydrogen ions (H^+).

2.18. Tendencia de la acidez cambiabile en el suelo

Figure 23 shows the behavior of exchangeable acidity in the soil as a function of the doses applied during the evaluation period. Initially, all treatments present the same level of exchangeable acidity (30.51 %), which indicates that the initial conditions of the soil are homogeneous before the application of fertilizers.

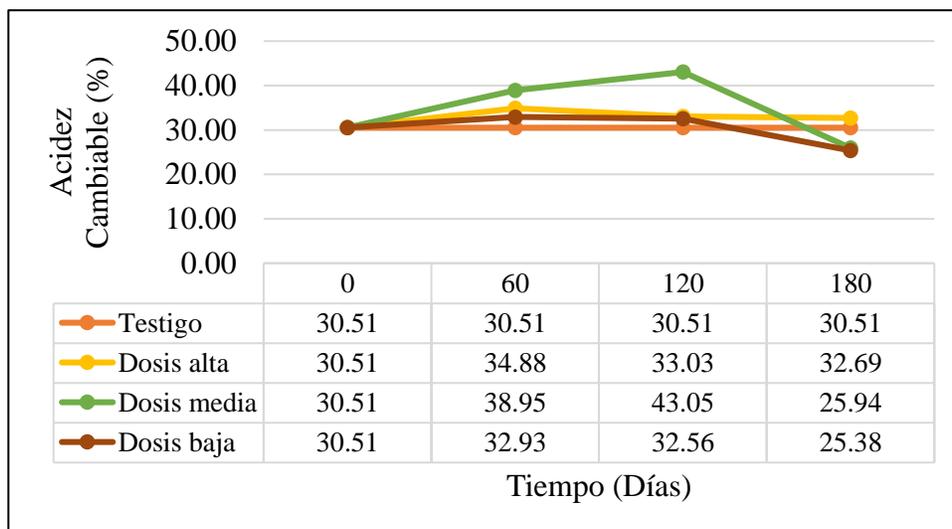
At 60 days, the treatments with fertilization show an increase in exchangeable acidity compared to the control (30.51 %). The treatment with the medium dose shows the highest increase, reaching a value of 38.95, followed by the high dose with 34.88 %, and the low dose with 32.93. This indicates that the application of fertilizers increases the exchangeable acidity of the soil.

A los 120 días, la tendencia continúa con la dosis media alcanzando su punto máximo de acidez cambiante en todo el periodo (43.05 %). En comparación, los tratamientos con dosis alta y baja experimentan una ligera reducción con valores de 33.03 % y 32.56 %, respectivamente. Esta variación refiere que el aumento inicial de la acidez en los tratamientos con fertilización es transitorio y podría estar estabilizándose a medida que el suelo se ajusta a los fertilizantes.

En el día 180, se observa una notable disminución en la acidez cambiante en los tratamientos con fertilización, la dosis media y baja, disminuyen a 25.94 % y 25.38 %. Esto representa una reducción significativa en comparación con sus valores iniciales, lo cual podría indicar un efecto de neutralización a largo plazo en estos tratamientos. El tratamiento con dosis alta también disminuye a 32.69 %, aunque en menor proporción. El tratamiento testigo se mantiene estable en 30.51 % durante todo el período, lo que resalta que los cambios observados en los demás tratamientos son el resultado de la aplicación de fertilizantes.

Figura 23

Comportamiento de la acidez cambiante en el suelo en función de las dosis de fertilización y el tiempo



El comportamiento de la acidez cambiante de acuerdo con la aplicación de diferentes dosis de fertilización y el tiempo. Se pudo observar que, después de elevarse el contenido de acidez cambiante en el suelo, surgió una declinación en todos los tratamientos con diferentes dosis de fertilización en comparación con el testigo. Esta declinación muestra valores más cercanos al valor inicial de la acidez cambiante del suelo. Estos resultados se deben probablemente a que con el tiempo las bases de cambio, el pH y la materia orgánica del suelo, logran estabilizarse por diferentes factores físicos y químicos procedentes de las reacciones. Bennardi *et al.* (2018), refieren que la alteración de la acidez cambiante del suelo por efecto de los fertilizantes, con el tiempo se estabilizan debido a la capacidad de amortiguamiento del suelo, que permite neutralizar parcialmente la acidez a medida que los iones H^+ son neutralizados en el complejo de intercambio. Además, la mineralización de la materia orgánica, dilución de minerales y actividad biológica del suelo pueden liberar cationes básicos, restaurando progresivamente la capacidad de intercambio de bases.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIÓN

5.1. Conclusiones

La investigación mostró efectos notorios de la fertilización química en las propiedades químicas del suelo, variando según la dosis aplicada. La dosis alta mostró los valores más destacados en parámetros como pH (4,83), conductividad eléctrica (0,43 dS m), materia orgánica (6,07 %) y fósforo disponible (32,76 ppm). La dosis media se caracterizó por valores superiores en potasio disponible (139,31 ppm), capacidad de intercambio catiónico (6,86), bases cambiables (61,05 %) y acidez cambiante (38,95 %). El nitrógeno total, si bien presentó variaciones respecto al testigo, no mostró diferencias estadísticamente significativas entre las diferentes dosis de fertilización.

Las diferentes dosis de fertilización química tuvieron un impacto significativo en las propiedades químicas del suelo. Se registró un efecto positivo incrementando la materia orgánica (6,07 %), el fósforo disponible (32,76 ppm), capacidad de intercambio catiónico (6,69) y el nitrógeno total (0.30 %) del suelo en comparación con el testigo.

Las dosis de fertilización química aplicadas también influyeron de manera negativa en las propiedades químicas del suelo disminuyendo el pH (4,83), potasio disponible (145,46 ppm) y bases cambiables (65,12 %), además de un incremento en la conductividad eléctrica (0,43 dS m) y la acidez intercambiable (34,88 %).

5.2. Recomendación

En los suelos ácidos del distrito de Calquis, provincia de San Miguel - región Cajamarca. Se recomienda utilizar fertilizantes químicos de manera racional, considerando que después de aplicar fertilizantes químicos hacer uso de enmiendas (encalados) o cultivos fijadores de nitrógeno al suelo. Además, se recomienda continuar evaluando los efectos que producen los fertilizantes a largo plazo, ya que los cambios observados pueden variar con el tiempo debido a procesos como lixiviación, mineralización y acidificación progresiva.

CAPÍTULO VI

BIBLIOGRAFÍA

- Andreu, J; Betrán, J; Delgado, I; Espada, J. L; Gil, M; Gutiérrez, M; Iguácel, F; Isla, R; Muñoz, F; Orús, F; Pérez, M; Quílez, D; Sin, E; Yagüe, M. R. (2006). *Fertilización Nitrogenada*. [Departamento de Agricultura y Alimentación]. Gobierno de Aragón. https://citarea.cita-aragon.es/citarea/bitstream/10532/868/1/10532-105_11.pdf
- Arrieché, I. y Ruiz, M. (2014). Efecto de la fertilización orgánica con NPK sobre la materia orgánica, y el rendimiento del maíz en suelos degradados. *Revista Observador del Conocimiento- ONCTI*, 1(2) 203-211. https://www.researchgate.net/publication/304081742_Efecto_de_la_fertilizacion_organica_con_NPK_sobre_la_materia_organica_y_el_rendimiento_del_maiz_en_suelos_degradados
- Balcázar, E; Condor, S; Carbajal, D; Echabaltéz, P; Olivera, y; Rodríguez, K. (2015). *Caracterización de suelos de la sierra del Perú*. [Monografía, Universidad Cesar Vallejo]. Repositorio Institucional UCV. https://www.academia.edu/16107436/SUELOS_DE_LA_SIERRA
- Bautista, A; Etchevers, J; Del Castillo, R; Gutiérrez, C. (2024). La calidad del suelo y sus indicadores. *Revista científica y técnica de Ecología y Medio Ambiente*, 13 (2), 90-97. https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/8708/1/ECO_13%282%29_15.pdf
- Bejar, P. S; Cantú, S. I; Hernández, F; Luna, R. E. (2023). Efecto del Manejo Orgánico y Convencional sobre las Propiedades Químicas de un Andosol. *Revista Sociedad mexicana de las ciencias del suelo*, 1(3), 135-140. https://www.smcsmx.org/files/2023/LIBRO_3_2023.pdf
- Bennardi, D; Días, A; Luciano, J; Guillermo, W; Pellegrini, A; Vázquez, M. (2018). Evaluación de la Capacidad Buffer de Suelos Ácidos de la Región Pampeana. *Revista Asociación Argentina Ciencias del Suelo*, 36 (1), 30-38. <https://www.suelos.org.ar/publicaciones/volumen3612018/pag%2030-38%20CS500%20EVALUACI%C3%93N%20DE%20LA%20CAPACIDAD%20BUFFER%20DE%20SUELOS%20C3%81CIDOS.pdf>
- Calderón, V. E. (2022). *Evaluación del Cambio de Acidez en el Suelo por Acción de la Dolomita, Mejorando las Condiciones para el Cultivo de Café Catuaí Rojo (Coffea arabica L.) en el Cantón de Chijchipani del Municipio de Caranavi del Departamento de La Paz*. [Tesis de Titulación, Universidad Mayor de San Andrés, La Paz]. Repositorio Institucional UMSA. <https://repositorio.umsa.bo/bitstream/handle/123456789/31051/PG-2757.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Campillo, R. R y Sadzawka, R. A. (2020). *La Acidificación de los Suelos. Origen y Mecanismos Involucrados*. [Instituto de Investigaciones Agropecuarias]. Repositorio INIA- Chile. <https://www.profertil.com.ar/wp-content/uploads/2020/08/la-acidificacion-de-los-suelos-origen-y-mecanismos-involucrados.pdf>

- Carrizo, M; Alesso, C; Nascimento, J y Silva del Carmen, I. (2013). Reserva de Micronutrientes y Comparación de dos Métodos de Extracción en Suelos Agrícolas Santafesinos. *Revista de la Asociación Argentina Ciencia del Suelo*, 33(1), 15-22. <http://www.scielo.org.ar/pdf/cds/v31n1/v31n1a02.pdf>
- Castillo, G. J; Ojeda, B. D; Rodríguez, H. A; González. F. A; Robles, H. L. y López, O. R. (2018). Metaloenzimas de zinc en plantas. *Revista de ciencia y tecnología de América*, 43(4), 242 – 248. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6401071>
- Chien, H; Mercedes, M. Gearhart y Collamer, D. (2008). Acidez generada por los fertilizantes nitrogenados: Nueva evaluación de los requerimientos de cal. *Revista Soil Science*, 41(1), 16-17. <https://fertilizar.org.ar/wp-content/uploads/2009/03/4.pdf>
- Chung, M. F. (2019). *Fuentes Encalantes y Fosfatadas en la Recuperación de un Suelo Ácido de Tingo María, en Maíz (Zea mays L.) en Invernadero*. [Tesis de Titulación, Universidad Nacional Agraria la Molina Lima]. Repositorio Institucional UNAML. <https://repositorio.lamolina.edu.pe/items/e1a8c28f-6e14-43a1-9b07-3d5613418adb>
- Cisneros, F y Nonones, N. (2024). Impacto del uso de fertilizantes en los suelos agrícolas. *Revista revisión sistemática de la literatura científica LACCEI*, 12(2), 1-10. https://laccei.org/LACCEI2024-CostaRica/papers/Contribution_391_final_a.pdf
- Coraspe, León; Takashi, M; Franzini, V; Contreras, C y Ocheuze, T. (2009). Absorción de formas de nitrógeno amoniacal y nítrica por plantas de papa en la producción de tubérculo-semilla. *Revista de Agronomía Tropical*, 59(1), 45-58. https://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0002-192X2009000100005
- Córdoba, A; Álvarez, A.; Carral, P y Ballesta, R. (2000). Capacidades de Amortiguamiento Potencial y Actual de Diversos Suelos Ácidos del Sistema Central. *Revista Sociedad Española de la Ciencia del Suelo*, 3(1), 99-107. <http://www.edafologia.net/revista/tomo3b/articulo99.pdf>
- Costa, M. J y Ocete, S. C. (2020). *Efecto del nitrógeno en el suelo en la fauna edáfica* [Monografía, Universidad de Granada]. Repositorio Institucional Universidad de Granada. <https://www.ugr.es/~cjl/Nitrogeno%20en%20suelos.pdf>
- Cremona, M. V y Enriquez, A. S. (2020). *Algunas Propiedades del Suelo que Condicionan su Comportamiento- El pH y la conductividad eléctrica* [INTA-CONICET]. <https://core.ac.uk/download/pdf/335290789.pdf>
- De la Peña, S. E. (2019). *El suelo y Su manejo Ecológico: Fertilizantes* (1^{ra} ed), Lima. Perú.
- Encina, O. K. (2017). Escoria Básica y Carbonato de Calcio en la Recuperación de un Suelo Ácido de Tingo María, en Maíz (Zea mays) PM 213 en Invernadero. [Tesis de Titulación, Universidad Nacional Agraria la Molina Lima] Repositorio Institucional UNAML. <http://45.231.83.156/bitstream/handle/20.500.12996/2682/P36-E55-T.pdf?sequence=8&isAllowed=y>

- Euceda, L. (2022). *El pH: ¿Qué es? ¿cómo se mide?* <https://vinculacion.unah.edu.hn/dmsdocument/16228-4-el-ph-que-es-y-como-se-mide-pdf>
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). (2019). *Código Internacional de Conducta para el Uso y Manejo de Fertilizantes*. <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/cdc2edbe-67e6-427a-9d9e-aa1431c1e405/content>
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). (2023). *¿Qué es el Suelo?*. <https://www.fao.org/soils-portal/about/definiciones/es/>
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). (2023). *Propiedades Químicas*. <https://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/clasificacion-de-suelos/sistemas-numericos/propiedades-quimicas/es/>
- Fernández, M. (2007). Fósforo: Amigo o Enemigo. *Revista Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal*, 61(2), 51-57. <https://www.redalyc.org/pdf/2231/223114970009.pdf>
- Ferreira, S; Ferreira, A; Rasche, J. (2022). Fertilización Química, Yeso Agrícola y su Efecto sobre la Producción de Yerba Mate (*Ilex paraguariensis* St. Hil.). *Revista de Estudios e Investigaciones del Saber Académico*, 18(18), 42-50. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=9784209>
- Fertilab (laboratorio de análisis agrícolas de la más alta calidad). (2019). *La Salinidad del Suelo y su Fertilidad*. <https://www.fertilab.com.mx/Sitio/notas/NTF-19-025-La-salinidad-del-suelo-y-su-fertilidad.pdf>
- Forero, U. F; Serrano, C. P; Balaguera, L. W. (2009). El aluminio en el suelo y algunas estrategias de manejo. *Revista Ciencia y Agricultura*, 1(7), 19-28. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=560058653003>
- Ginés, I. y Mariscal, I. (2002). *Incidencia de los fertilizantes sobre el pH del suelo*. https://oa.upm.es/3176/2/MARISCAL_MONO_2002_01.pdf
- Grasso, A. y Díaz, Z. (2020). *Manual de Buenas Prácticas de Manejo de Fertilización*. (2da ed). Buenos Aires – Argentina. https://www.fertilizar.org.ar/subida/BMPN/BPMN_Fertilizar102018.pdf
- Guzmán, M y Rodríguez, E. (2004). Características de los Fertilizantes para su Uso en la Fertirrigación. *Revista Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo*, 1(1), 191-202. https://www.researchgate.net/publication/257416472_CHARACTERISTICAS_DE_LOS_FERTILIZANTES_PARA_SU_USO_EN_LA_FERTIRRIGACION
- Havlin, J. (2014). *Soil fertility and fertilizers: Han introduction to nutrient management*. (8th. Ed). Chile. https://bibliotecadigital.uchile.cl/discovery/fulldisplay?vid=56UDC_INST:56UDC_INST&tab=LibraryCatalog&docid=alma991001941169703936&lang=es&context=L&adaptor=Local%20Search%20Engine&query=creator,exact,Thompson,%20Louis%20Milton,AND&mode=advanced&facet=creator,exact,Thompson,%20Louis%20Milton

- Henao, T. M y Hernández, G. E. (2002). Disponibilidad de Potasio en Suelos Derivados de Cenizas Volcánicas y su Relación con la Nutrición del Café en la Etapa Vegetativa. *Revista Centro Nacional de Investigaciones de Café (CENICAFÉ)*, 53(4), 293-305. [https://www.cenicafe.org/es/publications/arc053\(04\)293-305.pdf](https://www.cenicafe.org/es/publications/arc053(04)293-305.pdf)
- INEI (Instituto Nacional de Estadística e Informática). (2023). *Perú: Anuario de Estadísticas Ambientales 2023*. <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/5588186/4963255-peru-anuario-de-estadisticas-ambientales-2023%282%29.pdf?v=1706036917>
- INIA (Instituto Nacional de Investigación Agraria). (2013). *Aprendiendo el Manejo y Uso de los Fertilizantes Químicos*. https://repositorio.inia.gob.pe/bitstream/20.500.12955/42/1/HD-2013-Fertilizantes_quimicos.pdf
- Insuasti, B. J. (2017). *Efecto de los fertilizantes triple 20 y nitrato de potasio en pH, conductividad eléctrica en el sustrato y crecimiento de plántulas de lechuga, tomate y chile*. [Tesis de Titulación, Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, Honduras]. Repositorio Institucional Zamorano. <https://bdigital.zamorano.edu/server/api/core/bitstreams/407552b8-0532-4762-afc4-c2f56f200e66/content>
- INTA (Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria). (2014). *Reacción de los Fertilizantes en el Suelo. Volatilización de Amoníaco a partir de la Urea*. https://www.unipamplona.edu.co/unipamplona/portalIG/home_4/mod_virtuales/modulo2/9.pdf
- IPNI (International Plant Nutrition Institute). (2019). *Fuentes de Nutrientes Específicos*. [http://www.ipni.net/publication/nss-es.nsf/0/3D71CA0246B0EA8E85257BBA0059CD97/\\$FILE/NSS-ES-17.pdf](http://www.ipni.net/publication/nss-es.nsf/0/3D71CA0246B0EA8E85257BBA0059CD97/$FILE/NSS-ES-17.pdf)
- López, D; Mahia, M; Meléndez, W y López, A. (2021). Fijación de Potasio y Competencia con Amonio en un Suelo con Arcillas Expansivas. *Revista del BIOAGRO*, 33(3), 229-234. <https://revistas.uclave.org/index.php/bioagro/article/view/3387/2115>
- López, F. R. (2002). *Degradación del suelo: Causas, Procesos, Evaluación e Investigación* (2^{da} ed), Mérida, Venezuela. <http://www.serbi.ula.ve/serbiula/libros-electronicos/Libros/degradacion/pfd/librocompleto.pdf>
- Martínez, H. E; Fuentes, E. J. y Acevedo, H. E. (2008). Carbono Orgánico y Propiedades del Suelo. *Revista de la ciencia del suelo y nutrición vegetal*. 8(1), 68-96. <https://www.scielo.cl/pdf/rcsuelo/v8n1/art06.pdf>
- Molina, E y Rojas, A. (2005). Efecto del Encalado en el Cultivo de Naranja Valencia en la Zona Norte de Costa Rica. *Dialn. Revista de Agronomía Costarricense*, 29(3), 81-95. <https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/agrocost/article/view/6783/6470>

- Molina, E. (2013). *Análisis de Suelos y su Interpretación* [Centro de Investigaciones Agronómicas, Universidad de Costa Rica]. <https://www.infoagro.go.cr/inforegiones/regioncentraloriental/documents/suelos/suelos-aminogrowanalisisinterpretacion.pdf>
- Morales, A. M. (2002). *Sistema Experto Para Recomendar Estrategias de Fertilización* [Tesis de Titulación, Universidad Tecnológica de la Mixteca]. Repositorio Institucional UTM. http://jupiter.utm.mx/~tesis_dig/7669.pdf
- Morales, E. J; Arriaga, M. R; López, J. A; Martínez, Á. R y Morales, E. J. (2019). Urea (NBPT) una Alternativa en la Fertilización Nitrogenada de Cultivos Anuales. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 10(8), 1875-1886. <https://www.scielo.org.mx/pdf/remexca/v10n8/2007-0934-remexca-10-08-1875.pdf>
- Navarro, G. G. y Navarro, B. S. (2003). *Química Agrícola: El Suelo y los Elementos Químicos Esenciales para la Vida Vegetal* - Biblioteca Amazcala, (1ra ed), Madrid. https://www.academia.edu/40079634/Quimica_Agricola_Segunda_Edicion_GINES_NAVARRO_GARCIA_SIMON_NAVARRO_PLAYA
- Nazar, C. J. (2015). *Efecto del Encalado en el Crecimiento de la Valeriana Pilosa R&P en Huanico, Cajamarca*. [Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Cajamarca]. Repositorio Institucional UNC. <https://repositorio.unc.edu.pe/bitstream/handle/20.500.14074/1555/Tesis%20Javier%20Nazar%20pdf.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Osorio, N. (2012). pH Del Suelo y Disponibilidad de Nutrientes. *Revista de la Ciencia del Suelo y Nutrición Vegetal*, 4(1). 1-4. <https://www.bioedafologia.com/sites/default/files/documentos/pdf/pH-del-suelo-y-nutrientes.pdf>
- Ospina, I. (2020). *Ficha Técnica de la Urea*. <https://www.dqisa.com/wp-content/uploads/2020/12/UREA-TECNICA.pdf>
- Peñaranda, M. (2019). *Absorción edáfica de nutrientes: La actualidad técnica de la floricultura colombiana*. <https://www.metroflorcolombia.com/absorcion-edafica-de-nutrientes/>
- Poma, R. w y Alcántara, B. G. (2011). *Estudio de Suelos y Capacidad de uso Mayor del Departamento de Cajamarca*. <https://zeoot.regioncajamarca.gob.pe/sites/default/files/INFSUELOSZEE091.pdf>
- Quenta, L. J. (2024). *Efecto de la contaminación por fertilizantes químicos en la calidad de suelo de cultivo de Solanum Tuberosum en el Distrito de Ilave 2023* [Tesis de Titulación, Universidad privada san Carlos]. Repositorio Institucional ALCIRA. <https://repositorio.upsc.edu.pe/handle/UPSC/1009>
- Rodríguez, E y Longa, E. (2021). *Evaluación del efecto de los Fertilizantes Químicos y Abonos Orgánicos en Suelos agrícolas con cultivo de papa – Distrito de Sorochuco 2020* [Tesis de Titulación Univocidad Privada del Norte]. Repositorio Institucional UPN. <https://repositorio.upn.edu.pe/bitstream/handle/11537/28649/Tesis.pdf?sequence=2&isAllowed=n>

- Rojas, S. J; Brenes, G. S y Abarca, M. S. (2021). Carbono en el Suelo: Comparación entre un área de Pastos y un Bosque. *Revista de Estudios Sociales*, 23(47), 184-205. <https://www.redalyc.org/journal/666/66671467009/html/>
- Sadeghian, K. S. (2003). Efecto de la fertilización con Nitrógeno, Fósforo, Potasio y magnesio sobre las propiedades químicas de suelos cultivados en café. *Revista Centro Nacional de Investigaciones de Café (CENICAFÉ)*, 54(3), 242-257. [https://www.cenicafe.org/es/publications/arc054\(03\)242-257.pdf](https://www.cenicafe.org/es/publications/arc054(03)242-257.pdf)
- Sadeghian, K. S. (2016). *La Acidez del Suelo, una Limitante Común para la Producción de Café* [Programa de Investigación Científica Fondo Nacional del Café]. <https://www.cenicafe.org/es/publications/avt0466.pdf>
- Serveñansky, A. (2011). *Micronutrientes* [Universidad de Cuenca]. <https://www.yumpu.com/es/document/read/19654243/micronutrientes>
- Soriano, S. M. (2018). *Conductividad eléctrica del suelo* [Tesis de Maestría, Universidad Polémica de Valencia]. Repositorio Institucional UPV. <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/105110/Soriano%20-%20Conductividad%20el%C3%A9ctrica%20del%20suelo.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Soriano, S. M. (2018). *pH del suelo* [Tesis de Maestría, Universidad Polémica de Valencia]. Repositorio Institucional UPV. <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/102382/Soriano%20-%20pHdel%20suelo.pdf>
- Tasilla, S. L. (2021). *Variación de la reacción del suelo a la aplicación de cal de diferente granulometría en la Encañada – Cajamarca* [Tesis de Titulación, Universidad Nacional de Cajamarca]. Repositorio Institucional UNC. <https://repositorio.unc.edu.pe/bitstream/handle/20.500.14074/4482/TESIS-LUCIO%20TASILLA%20SALAZAR%202021.PDF?sequence=1&isAllowed=y>
- Tirado, M. R. (2014). *Absorción de Macro y Micronutrientes en Ají Escabeche (Capsicum baccatum var. pendulum) Bajo Condiciones del Valle de Cañete* [Tesis de Maestría, Universidad Nacional Agraria la Molina, Lima]. Repositorio Institucional UNALM. <https://repositorioslatinoamericanos.uchile.cl/handle/2250/1369001>
- Toledo, M. (2016). *Manejo de suelos ácidos en las zonas altas de Honduras: Dirección de Ciencia y Tecnología Agropecuaria (DICTA). (1ª ed), Honduras.* <https://repositorio.iica.int/bitstream/handle/11324/3108/BVE17069071e.pdf;jsessionid=A7A38AF77266DF8F58AEDA0E1089307?sequence=1>
- Vásquez, V. (2015). *Coloides Orgánico-Minerales del Suelo y su Importancia: Documento de la ciencia.* <https://metodo2013.blogspot.com/2015/10/coloides-organico-minerales-del-suelo.html>
- Velasquez, M. J. (2003). *El Suelo* (1ra ed), Perú. Cuzco. https://www.psi.gob.pe/wp-content/uploads/2016/03/biblioteca_boletines_el_suelo.pdf

- Villegas, T. O Y Casbis, M. G. (2016). Importancia de los Fosfatos y Fosfitos en la Nutrición de Cultivos. *Revista Acta Agrícola y Pecuaria*, 2(3), 55-61. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6201359>
- Vistoso, G. E. y Martínez, L.J. (2020). *Potasio Disponible y Fertilización en Suelos de la Región de Los Ríos* [Instituto de Investigaciones Agropecuarias]. Repositorio Institucional INIA. <https://biblioteca.inia.cl/server/api/core/bitstreams/71e9044b-07f5-4ede-9478-e05446c31fad/content>
- Vistoso, G. E. y Martínez, L. J. (2019). *Los micronutrientes del suelo* [Instituto de Investigaciones Agropecuarias]. Repositorio INIA. [https://biblioteca.inia.cl/server/api/core/bitstreams/a9d1327d-0f98-405b-8db0-030abe299f0f/content#:~:text=Los%20micronutrientes%20forman%20parte%20de,\)y%20zinc%20\(Zn](https://biblioteca.inia.cl/server/api/core/bitstreams/a9d1327d-0f98-405b-8db0-030abe299f0f/content#:~:text=Los%20micronutrientes%20forman%20parte%20de,)y%20zinc%20(Zn)
- Weil, R y Brady, N. (2018). *The nature and properties of soils*. (Fifteenth edition). EE.UU. https://www.researchgate.net/profile/Raymond-Weil/publication/287493209_The_Nature_and_Properties_of_Soil/links/5b23bfe10f7e9b0e3749ad00/The-Nature-and-Properties-of-Soil.pdf
- Yoretce, P. B; Redondo, A y Sánchez, M. (2014). *Química de los Macronutrientes y Micronutrientes del Suelo*. <https://www.calameo.com/read/003601797c0490f3fe638>

CAPÍTULO VII

ANEXOS

Anexo 1. Insumos utilizados en la investigación

Figura 24

Fertilizante químico Urea



Figura 25

Fertilizante químico Fosfato Diamónico



Figura 26

Fertilizante químico Cloruro de Potasio



Anexo 2. Panel fotográfico

Figura 27

Instalación de la parcela experimental



Figura 28

Toma de muestras de cada unidad experimental



Figura 29

Muestreo a los dos meses después de la instalación



Figura 30

Muestreo a los seis meses después de la instalación



Figura 31

Preparación de las muestras para ser enviadas al laboratorio de la UNAS



Anexo 3. Análisis de las muestras de suelos

Tabla 28

Reporte de las muestras evaluadas a los dos meses después de la instalación

ANÁLISIS DE SUELOS

SOLICITANTE: UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA
 PROCEDENCIA: CAJAMARCA

FECHA DE REPORTE: 28/06/2024
 FACTURA ELECTRONICA FE01-0000154

RESULTADOS DEL ENSAYO SOLICITADO

N°	DATOS				ANÁLISIS MECÁNICO			ANÁLISIS QUÍMICO																		
					Arena	Arcilla	Limo	Clase Textural	pH	CE	Materia Orgánica	N	C	P	K	CIC	Ca	Mg	K	Na	Al	H	CICe	Bases Cambiables	Acidez Cambiable	Saturación de Aluminio
	Ao	Arc	Lo	dS/m	M.O.	total	Orgánico		disponible	Calcio	Magnesio	Potasio	Sodio	Aluminio	Hidrógeno		%	%	%							
	CODIGO DEL LAB.	ETIQUETA	TESISTA/PROPIETARIO	CASERIO	%	%	%	1:1	1:1	%	%	%	ppm	ppm	CAMBIABLES				Cmo(+)/kg	%	%	%				
1	S24-0082	BI-T0	DARWIN OMAR	ALTO PALMITO	65.41	12.86	21.72	Franco Arenoso	5.46	0.16	4.48	0.22	2.60	8.15	171.98		2.03	0.27	0.23	0.11	1.13	0.03	3.79	69.49	30.51	29.71
2	S24-0083	BI-T1	DARWIN OMAR	ALTO PALMITO	65.41	10.86	23.72	Franco Arenoso	4.92	0.43	5.99	0.29	3.47	32.20	156.31	----	3.27	0.51	0.43	0.36	0.89	1.98	7.44	61.49	38.51	11.90
3	S24-0084	BI-T2	DARWIN OMAR	ALTO PALMITO	67.41	12.86	19.72	Franco Arenoso	4.97	0.23	5.63	0.28	3.26	15.28	134.13	----	3.10	0.50	0.40	0.39	0.83	1.90	7.12	61.72	38.28	11.59
4	S24-0085	BI-T3	DARWIN OMAR	ALTO PALMITO	69.41	8.86	21.72	Franco Arenoso	4.92	0.24	6.41	0.32	3.72	9.28	135.82	----	3.34	0.51	0.43	0.39	0.65	1.94	7.25	64.36	35.64	8.89
5	S24-0086	BII-T0	DARWIN OMAR	ALTO PALMITO	61.41	14.86	23.72	Franco Arenoso	5.46	0.16	4.48	0.22	2.60	8.15	171.98		2.03	0.27	0.23	0.11	1.13	0.03	3.79	69.49	30.51	29.71
6	S24-0087	BII-T1	DARWIN OMAR	ALTO PALMITO	69.41	10.86	19.72	Franco Arenoso	4.78	0.42	7.14	0.36	4.14	32.98	131.24	----	3.14	0.51	0.44	0.38	0.74	1.72	6.93	64.57	35.43	10.61
7	S24-0088	BII-T2	DARWIN OMAR	ALTO PALMITO	63.41	12.86	23.72	Franco Arenoso	4.89	0.24	5.81	0.29	3.37	14.32	144.01	----	3.06	0.49	0.38	0.38	0.86	2.05	7.23	59.73	40.27	11.92
8	S24-0089	BII-T3	DARWIN OMAR	ALTO PALMITO	69.41	10.86	19.72	Franco Arenoso	4.88	0.21	5.81	0.29	3.37	11.44	146.06	----	3.05	0.50	0.42	0.30	0.56	1.76	6.59	64.85	35.15	8.43
9	S24-0090	BIII-T0	DARWIN OMAR	ALTO PALMITO	69.61	10.86	19.52	Franco Arenoso	5.46	0.16	4.48	0.22	2.60	8.15	171.98		2.03	0.27	0.23	0.11	1.13	0.03	3.79	69.49	30.51	29.71
10	S24-0091	BIII-T1	DARWIN OMAR	ALTO PALMITO	69.81	10.86	19.32	Franco Arenoso	4.80	0.45	5.08	0.25	2.95	33.10	148.83	----	2.72	0.49	0.39	0.35	0.75	1.00	5.70	69.30	30.70	13.16
11	S24-0092	BIII-T2	DARWIN OMAR	ALTO PALMITO	65.41	12.86	21.72	Franco Arenoso	4.85	0.22	5.51	0.28	3.19	18.62	139.79	----	2.67	0.48	0.37	0.31	0.95	1.43	6.22	61.70	38.30	15.31
12	S24-0093	BIII-T3	DARWIN OMAR	ALTO PALMITO	67.41	10.86	21.72	Franco Arenoso	4.89	0.29	5.51	0.28	3.19	13.07	154.26	----	3.30	0.51	0.44	0.39	0.59	1.21	6.44	71.99	28.01	9.21

Fuente: Laboratorio de Análisis de Suelos, Agua y Ecotoxicología-UNAS

Tabla 29

Reporte de las muestras evaluadas a los cuatro meses después de la instalación



ANÁLISIS DE SUELOS



SOLICITANTE:	UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA	FECHA DE REPORTE:	14/10/2024
PROCEDENCIA:	CAJAMARCA	FACTURA ELECTRONICA N°	58180

RESULTADOS DEL ENSAYO SOLICITADO

N°	DATOS				ANÁLISIS MECÁNICO				ANÁLISIS QUÍMICO																	
					Arena	Arcilla	Limo	Clase Textural	pH	CE	Materia Orgánica	N	C	P	K	CIC	Ca	Mg	K	Na	Al	H	CICe	Bases Cambiables	Acidez Cambiable	Saturación de Aluminio
	Ao	Arc	Lo	dS/m	M.O.	total	Orgánico		disponible	Calcio	Magnesio	Potasio	Sodio	Aluminio	Hidrógeno		%	%	%							
	CODIGO DEL LAB.	ETIQUETA	RESPONSABLE DE LA MUESTRA	PRODUCTOR	%	%	%	1:1	1:1	%	%	%	ppm	ppm	CAMBIABLES				Cmol(+)/kg							
1	S24-0841	BI-T0	DARWIN OMAR VÁSQUEZ	12 MUESTRAS	64	15	21	Franco Arenoso	5.46	0.16	4.48	0.22	2.60	8.15	171.98		2.03	0.27	0.23	0.11	1.13	0.03	3.79	69.49	30.51	29.71
2	S24-0842	BI-T1	DARWIN OMAR VÁSQUEZ	12 MUESTRAS	60	15	25	Franco Arenoso	4.34	0.24	4.63	0.23	2.69	4.61	91.10		1.27	0.17	0.16	0.10	0.95	0.33	2.98	58.42	43.08	31.99
3	S24-0843	BI-T2	DARWIN OMAR VÁSQUEZ	12 MUESTRAS	56	15	20	Franco Arenoso	4.39	0.21	3.31	0.17	0.18	14.00	61.51		1.00	0.14	0.13	0.08	1.25	0.33	2.92	45.81	54.19	42.89
4	S24-0844	BI-T3	DARWIN OMAR VÁSQUEZ	12 MUESTRAS	56	15	29	Franco Arenoso	4.38	0.34	5.48	0.27	3.18	4.34	84.04		1.78	0.30	0.26	0.12	1.08	0.27	3.82	64.61	35.39	26.31
5	S24-0845	BII-T0	DARWIN OMAR VÁSQUEZ	12 MUESTRAS	60	15	25	Franco Arenoso	5.46	0.16	4.48	0.22	2.60	8.15	171.98		2.03	0.27	0.23	0.11	1.13	0.03	3.79	69.49	30.51	29.71
6	S24-0846	BII-T1	DARWIN OMAR VÁSQUEZ	12 MUESTRAS	64	17	19	Franco Arenoso	4.02	0.35	4.48	0.22	2.60	4.99	81.66		1.53	0.24	0.22	0.13	0.65	0.34	3.10	68.26	31.74	20.78
7	S24-0847	BII-T2	DARWIN OMAR VÁSQUEZ	12 MUESTRAS	66	15	19	Franco Arenoso	5.10	0.35	3.47	0.17	2.02	6.19	94.61		2.43	0.35	0.18	0.10	0.86	0.27	4.18	73.05	26.95	20.48
8	S24-0848	BII-T3	DARWIN OMAR VÁSQUEZ	12 MUESTRAS	64	15	21	Franco Arenoso	5.00	0.31	3.71	0.18	2.15	4.15	93.36		1.60	0.27	0.26	0.13	1.03	0.43	3.71	60.69	39.32	27.72
9	S24-0849	BIII-T0	DARWIN OMAR VÁSQUEZ	12 MUESTRAS	68	15	17	Franco Arenoso	5.46	0.16	4.48	0.22	2.60	8.15	171.98		2.03	0.27	0.23	0.11	1.13	0.03	3.79	69.49	30.51	29.71
10	S24-0850	BIII-T1	DARWIN OMAR VÁSQUEZ	12 MUESTRAS	64	15	21	Franco Arenoso	4.50	0.34	2.78	0.14	1.61	5.54	100.33		1.81	0.26	0.20	0.11	0.41	0.35	3.14	75.74	24.26	13.12
11	S24-0851	BIII-T2	DARWIN OMAR VÁSQUEZ	12 MUESTRAS	60	17	23	Franco Arenoso	3.95	0.24	2.47	0.12	1.43	4.71	120.51		1.33	0.22	0.13	0.09	0.83	0.80	3.39	51.99	48.01	24.37
12	S24-0852	BIII-T3	DARWIN OMAR VÁSQUEZ	12 MUESTRAS	58	17	25	Franco Arenoso	4.73	0.29	2.01	0.10	1.16	3.31	102.15		2.02	0.20	0.29	0.13	0.65	0.14	3.42	77.04	22.96	18.87

Fuente: Laboratorio de Análisis de Suelos, Agua y Ecotoxicología-UNAS

Tabla 30

Reporte de las muestras evaluadas a los seis meses después de la instalación



ANÁLISIS DE SUELOS



SOLICITANTE:	UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA	FECHA DE REPORTE:	14/10/2024
PROCEDENCIA:	CAJAMARCA	FACTURA ELECTRONICA N°	58180

RESULTADOS DEL ENSAYO SOLICITADO

N°	DATOS				ANÁLISIS MECÁNICO			ANÁLISIS QUÍMICO																		
					Arena	Arcilla	Limo	Clase Textural	pH	CE	Materia Orgánica	N	C	P	K	CIC	Ca	Mg	K	Na	Al	H	CICe	Bases Cambiables	Acidez Cambiable	Saturación de Aluminio
	Ao	Arc	Lo	dS/m	M.O.	total	Orgánico			disponible	Calcio	Magnesio	Potasio	Sodio	Aluminio		Hidrógeno	%	%	%						
	CODIGO DEL LAB.	ETIQUETA	RESPONSABLE DE LA MUESTRA	PRODUCTOR	%	%	%	1:1	1:1	%	%	%	ppm	ppm	CAMBIABLES			Cmo(+)/kg			%	%	%			
1	S24-0829	BI-T0	DARWIN OMAR VÁSQUEZ	12 MUESTRAS	58	17	25	Franco Arenoso	5.46	0.16	4.48	0.22	2.60	8.15	171.98		2.03	0.27	0.23	0.11	1.13	0.03	3.79	69.49	30.51	29.71
2	S24-0830	BI-T1	DARWIN OMAR VÁSQUEZ	12 MUESTRAS	60	19	21	Franco Arenoso	5.00	0.15	2.93	0.15	1.70	1.99	103.53		1.84	0.33	0.21	0.11	0.97	0.61	4.07	61.28	38.72	23.75
3	S24-0831	BI-T2	DARWIN OMAR VÁSQUEZ	12 MUESTRAS	56	19	25	Franco Arenoso	5.06	0.12	3.24	0.16	1.88	5.73	90.13		2.80	0.42	0.11	0.05	0.98	0.20	4.56	74.23	25.77	21.28
4	S24-0832	BI-T3	DARWIN OMAR VÁSQUEZ	12 MUESTRAS	58	19	23	Franco Arenoso	4.30	0.17	4.32	0.21	2.51	8.61	95.64		2.00	0.27	0.18	0.10	0.66	0.32	3.53	72.26	27.74	18.68
5	S24-0833	BII-T0	DARWIN OMAR VÁSQUEZ	12 MUESTRAS	54	17	29	Franco Arenoso	5.46	0.16	4.48	0.22	2.60	8.15	171.98		2.03	0.27	0.23	0.11	1.13	0.03	3.79	69.49	30.51	29.71
6	S24-0834	BII-T1	DARWIN OMAR VÁSQUEZ	12 MUESTRAS	58	15	27	Franco Arenoso	5.43	0.14	3.09	0.15	1.79	2.48	148.54		1.85	0.26	0.31	0.19	0.85	0.47	3.92	66.39	33.61	21.62
7	S24-0835	BII-T2	DARWIN OMAR VÁSQUEZ	12 MUESTRAS	56	17	27	Franco Arenoso	4.73	0.13	4.01	0.20	2.33	4.52	69.48		2.42	0.38	0.17	0.11	0.83	0.40	4.32	71.61	28.39	19.12
8	S24-0836	BII-T3	DARWIN OMAR VÁSQUEZ	12 MUESTRAS	62	15	23	Franco Arenoso	4.51	0.17	4.36	0.26	3.09	3.31	74.47		2.79	0.37	0.14	0.09	1.09	0.05	4.52	74.84	25.16	24.05
9	S24-0837	BIII-T0	DARWIN OMAR VÁSQUEZ	12 MUESTRAS	58	17	25	Franco Arenoso	5.46	0.16	4.48	0.22	2.60	8.15	171.98		2.03	0.27	0.23	0.11	1.13	0.03	3.79	69.49	30.51	29.71
10	S24-0838	BIII-T1	DARWIN OMAR VÁSQUEZ	12 MUESTRAS	62	17	21	Franco Arenoso	4.20	0.19	2.86	0.14	1.66	4.34	71.99		1.58	0.21	0.18	0.09	0.56	0.16	2.78	74.25	25.75	19.99
11	S24-0839	BIII-T2	DARWIN OMAR VÁSQUEZ	12 MUESTRAS	60	17	23	Franco Arenoso	5.18	0.12	4.25	0.21	2.46	3.78	127.65		3.45	0.39	0.28	0.19	1.09	0.25	5.65	76.34	23.66	19.24
12	S24-0840	BIII-T3	DARWIN OMAR VÁSQUEZ	12 MUESTRAS	62	17	21	Franco Arenoso	5.27	0.13	4.71	0.23	2.73	7.49	98.51		2.58	0.32	0.17	0.11	0.70	0.27	4.15	76.68	23.23	16.81

Fuente: Laboratorio de Análisis de Suelos, Agua y Ecotoxicología-UNAS

