

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES
DEPARTAMENTO ACADÉMICO DE CIENCIAS AMBIENTALES



**PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS Y BIOLÓGICAS EN EL SUELO POR EL USO
DE AGROQUÍMICOS EN CULTIVOS DE PAPA (*SOLANUM TUBEROSUM* L.) EN
EL CENTRO POBLADO DE HUACACHI – CHAGLLA – PACHITEA - HUÁNUCO,
2022**

Tesis

Para optar el grado de

INGENIERO AMBIENTAL

Presentado por:

AGUIRRE RAMOS, LUIS EDWIN

Tingo María

2024



ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS N° 031-2025-FRNR-UNAS

Los que suscriben, Miembros del Jurado de Tesis, reunidos con fecha 17 de diciembre de 2024, a horas 9:00 a.m. de la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental de la Facultad de Recursos Naturales Renovables para calificar la tesis titulada:

“PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS Y BIOLÓGICAS EN EL SUELO POR EL USO DE AGROQUÍMICOS EN CULTIVOS DE PAPA (*Solanum tuberosum* L.) EN EL CENTRO POBLADO DE HUACACHI -CHAGLLA- PACHITEA – HUÁNUCO,2022”

Presentado por la Bachiller: **AGUIRRE RAMOS, LUIS EDWIN**, después de haber escuchado la sustentación y las respuestas a las interrogantes formuladas por el Jurado, se declara **APROBADO** con el calificativo de **“MUY BUENA”**.

En consecuencia, el sustentante queda apto para optar el Título Profesional de **INGENIERO AMBIENTAL** que será aprobado por el Consejo de Facultad, Tramitándolo al Consejo Universitario para el otorgamiento del Título Correspondiente.

Tingo María, 25 de marzo de 2025


Dr. JOSE DOLORES LÉVANO CRISÓSTOMO
PRESIDENTE


Ing. MSc. ALBERTO FRANCO CERNA CUEVA
MIEMBRO




Ing. MSc. MARIBEL FLORA ROCA CAPCHA
MIEMBRO


Dr. LUIS EDUARDO ORÉ CIERTO
ASESOR


Ing. MSc. JUAN DANIEL ORÉ CIERTO
ASESOR



"Decenio de la Igualdad de Oportunidades para Mujeres y Hombres"
 "Año de la Esperanza y el Fortalecimiento de la Democracia"

CERTIFICADO DE SIMILITUD T.I. N 031 - 2026 - CS-RIDUNAS

El Jefe de la Unidad de Soporte Científico de la Universidad Nacional Agraria de la Selva, quien suscribe,

CERTIFICA QUE:

El Trabajo de Investigación; aprobó el proceso de revisión a través del software TURNITIN, evidenciándose en el informe de originalidad un índice de similitud no mayor del 25% y contenido generado por Inteligencia Artificial menor o igual al 20%. Según establece el Art. 29° y 30° del Acuerdo Nro.017-2025-CIUNAS-VRI-UNAS.

Programa de Estudio:

Ingeniería Ambiental

Tipo de documento:

Tesis Trabajo de Suficiencia Profesional

TÍTULO	AUTOR	PORCENTAJE	
		SIMILITUD	CONTENIDO GENERADO POR INTELIGENCIA ARTIFICIAL
PROPIEDADES FÍSICOQUÍMICAS Y BIOLÓGICAS EN EL SUELO POR EL USO DE AGROQUÍMICOS EN CULTIVOS DE PAPA (SOLANUM TUBEROSUM L.) EN EL CENTRO POBLADO DE HUACACHI - CHAGLLA - PACHITEA - HUÁNUCO, 2022	AGUIRRE RAMOS, LUIS EDWIN	09 % Nueve	Menor a 20 %

Tingo María, 03 de febrero de 2026.

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
 UNIDAD DE SOPORTE CIENTÍFICO

 ING. EINSTEIN A. ORTIZ MORALES
 JEFE

C.C. Archivo

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES
DEPARTAMENTO ACADÉMICO DE CIENCIAS AMBIENTALES



**PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS Y BIOLÓGICAS EN EL SUELO POR EL USO
 DE AGROQUÍMICOS EN CULTIVOS DE PAPA (*SOLANUM TUBEROSUM* L.) EN
 EL CENTRO POBLADO DE HUACACHI – CHAGLLA – PACHITEA - HUÁNUCO,
 2022**

Ejecutor	: Luis Edwin, Aguirre Ramos.
Asesor	: Dr. Luis Eduardo, Oré Cierro : Ing. Juan Daniel Oré Cierro
Área de investigación	: Gestión Ambiental – PICSDS
Grupo de investigación	: Gestión Ambiental
Línea de investigación	: Gestión de la contaminación
Lugar de ejecución	: Centro poblado de Huacachi.
Duración	: 07 meses.
Financiamiento	: S/. 15,905.93
FEDU	: S/.00.00
Propio	: S/. 15,905.93
Otros	: S/.00.00

Tingo María, Perú

2024

DEDICATORIA

A Dios por las bendiciones y oportunidades que me brinda para mi crecimiento profesional.

A mis padres Williams e Ida, por inculcarme buenos valores, enseñarme la importancia del esfuerzo para cumplir mis metas y ser mi pilar más fuerte en las etapas de mi vida.

A mis queridos hermanos Tayli, Nirayda y Williams por ser mi soporte. Gracias por estar a mi lado apoyándome en los momentos más críticos recordándome el valor de la familia en cada paso que doy.

AGRADECIMIENTO

A Dios, por guiarme por el camino de la sabiduría, por ayudarme y permitirme cumplir mis objetivos planteados y sobre todo por rodearme por personas virtuosas y de buenos valores.

A mis estimados amigos y colegas, quienes fueron parte fundamental durante todo este proceso. Gracias por su apoyo, colaboración y camaradería.

A los honorables miembros del jurado, y a mi asesor Dr Luis Eduardo Oré Cierro gracias por su tiempo, paciencia y dedicación durante este proceso. Agradezco profundamente su profesionalismo, su experiencia y conocimientos.

A la Universidad Nacional Agraria de la Selva, porque me permitió recibir una formación profesional. De igual forma agradecer al Laboratorio de Suelos y aguas, los cuales fueron vitales para la ejecución del presente estudio

ÍNDICE

	Página
I. INTRODUCCIÓN	11
1.1. Objetivos.....	12
1.1.1. Objetivo general.....	12
1.1.2. Objetivos específicos	12
II. REVISIÓN DE LITERATURA.....	13
2.1. Antecedentes.....	13
2.1.1. Antecedentes internacionales.....	13
2.1.2. Antecedentes nacionales	15
2.1.3. Antecedentes locales	17
2.2. Marco teórico.....	18
2.2.1. Indicadores de la calidad del suelo en cultivos de papa	18
2.2.2. Uso de agroquímicos en el cultivo de papa	24
2.2.3. Contaminación de suelos por uso de agroquímicos en el cultivo de papa.....	24
2.2.4. Influencia del tiempo de uso del suelo en las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo	25
2.2.5. Degradación del suelo por cultivos de papa	25
2.3. Marco conceptual.....	25
2.3.1. Cultivos de papa (<i>Solanum tuberosum</i> L.).....	25
2.3.2. Los agroquímicos.....	27
2.3.3. Categoría toxicológica	29
III. MATERIALES Y MÉTODOS.....	30
3.1. Lugar de ejecución.....	30
3.1.1. Ubicación política de la zona de estudio	30
3.1.2. Ubicación geográfica de la zona de estudio.....	31
3.1.3. Características generales de la zona.....	31
3.2. Materiales y equipos	32
3.2.1. Materiales de campo	32
3.2.2. Materiales de gabinete	32
3.2.3. Materiales de laboratorio	33
3.2.4. Equipos y reactivos	33
3.3. Criterio y análisis del estudio	33
3.3.1. Nivel de investigación	33
3.3.2. Tipo de investigación.....	33
3.3.3. Método de investigación.....	33
3.3.4. Operacionalización de variables	34
3.3.5. Diseño de investigación	36
3.3.6. Población y muestra.....	37
3.3.7. Técnicas e instrumentos de recolección de datos	38
3.3.8. Análisis de datos	38
3.4. Metodología.....	39

3.4.1. Identificación, clasificación y determinación de la cantidad y frecuencia de los agroquímicos más usados en el cultivo de papa ...	39
3.4.2. Determinar las propiedades físicas, químicos del suelo	39
3.4.3. Determinar las propiedades biológicas del suelo (densidad de macrofauna (ind./m ²).	45
IV. RESULTADOS Y DISCUSIONES	46
4.1. Identificación, clasificación y determinación de la cantidad y frecuencia del uso de agroquímicos en cultivos de papa	46
4.2. Propiedades físicas del suelo con cultivo de papa	48
4.2.1. Propiedades químicas del suelo con cultivos de papa	53
4.2.2. Comparación de medias múltiples de los indicadores y años más significativas	61
4.2.3. Análisis de componentes principales	70
4.3. Propiedades biológicas del suelo con cultivos de papa	83
4.3.1. Macrofauna por monolitos en parcelas con 15 años de uso	83
4.3.2. Macrofauna por monolito en parcelas con 10 años de uso	84
4.3.3. Macrofauna por monolito en parcelas con 5 años de uso	86
4.3.4. Macrofauna por monolito en parcelas con 3 años de uso	87
V. CONCLUSIONES.....	89
VI. PROPUESTAS A FUTURO	90
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	91
VIII. ANEXOS	101
8.1. Matriz de consistencia	102
8.2. Técnicas e instrumentos de medición	104
8.3. Formato rellenado de Juicio de experto.....	106
8.4. Resultados de las muestras de suelo en cultivo de papa.....	108
8.5. Prueba de normalidad y media significativas múltiples	116

ÍNDICE DE TABLAS

Tablas	Página
1. Clasificación de la distribución de los diámetros de partículas.....	19
2. Rangos interpretativos para densidad aparente y crecimiento radicular, en base a la textura del suelo.....	¡Error! Marcador no definido.
3. Rangos interpretativos para el contenido de materia orgánica (%).	20
4. Rangos interpretativos para el pH (relación 2:1).....	21
5. Rangos interpretativos para el nitrógeno total.....	22
6. Rangos interpretativos para el fósforo total.....	22
7. Rangos interpretativos para potasio (K+) intercambiable.	23
8. Tipos de agroquímicos.	28
9. Categoría toxicológica de los plaguicidas.	29
10. Operacionalización de variables.....	34
11. Indicadores físicos del suelo.....	40
12. Indicadores químicos del suelo.....	40
13. Significancia de cargas factoriales	41
14. Comparación de medias de ingredientes activos en función al tiempo de uso de suelo ...	43
15. Uso de insecticidas en cultivos de Papa	46
16. Uso de fungicida en cultivos de Papa.....	47
17. Uso de herbicida en cultivos de Papa.....	47
18. Frecuencia de uso de insecticida, fungicida y herbicida en cultivos de Papa	48
19. Parámetros físicos del suelo con cultivo de papa	48
20. Parámetros químicos del suelo con cultivo de papa.....	53
21. Medias múltiples significativa del pH según indigente activo y año de uso.....	61
22. Medias múltiples significativa del Materia orgánica según indigente activo y año de uso	63
23. Medias múltiples significativa del Nitrógeno según indigente activo y año de uso.....	65
24. Medias múltiples significativa de Cadmio según indigente activo y año de uso	67
25. Tabla de valores propios.....	70
26. Carga Factorial y cosenos cuadrados de los indicadores.....	70
27. Densidad de macrofauna en suelos de papa con 15 años de uso.....	83
28. Densidad de macrofauna en suelos de papa con 10 años de uso.....	84
29. Densidad de macrofauna en suelos de papa con 5 años de uso.....	86
30. Densidad de macrofauna en suelos de papa con 3 años de uso.....	87
31. Matriz de consistencia.	102

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
1. Ubicación política del Centro Poblado de Huacachi	30
2. Diseño de investigación.....	36
3. Análisis de componentes	44
4. Análisis de componentes principales con elipses	44
5. Extracción de muestras biológicas	46
6. Figura de variabilidad por cada factor	75
7. Distribución espacial de los Ingrediente activos de agroquímicos.....	76
8. Contribución de la varianza según Ingrediente de Insecticida	77
9. Contribución de la varianza según Ingrediente de Fungicida.....	79
10. Contribución de la varianza según Ingrediente activo de agroquímico.....	81
11. Juicio de experto del proyecto de Tesis.....	103
12. Suelo de interés-cultivo de papa	111
13. Georreferenciación de los puntos de muestreo	111
14. Georreferenciación de los puntos de muestreo.....	112
15. Cuarteo y mezclado de la muestra de suelo.....	112
16. Recolección de muestra de suelo con cultivo de papa.....	113
17. Preparación del monolito en suelo con cultivos de papa.....	113
18. Medidas del monolito en suelos con cultivo de papa	114
19. Recolección de los estratos del suelo a diferentes profundidades	114
20. Identificación de la macrofauna del suelo de papa.....	115
21. Encuesta a los agricultores de cultivo de papa.	115

RESUMEN

La investigación se enfoca en determinar las propiedades fisicoquímicas y biológicas del suelo por el uso de agroquímicos en cultivos de papa (*Solanum tuberosum* L.) en el centro poblado Huacachi-Chaglla-Pachitea-Huánuco, 2022. La presente investigación es de tipo aplicada, nivel explicativo relacional y enfoque cuantitativo longitudinal, con un diseño tipo experimental aleatorizado, compuesto por 8 tratamientos, las repeticiones de cada tratamiento variarán según el tratamiento más comúnmente utilizado en el centro poblado de Huacachi. En total, se evaluarán 25 unidades experimentales (parcelas) muestreados en 2 periodos diferentes. Los resultados indicaron que el empleo intensivo de productos químico redujo considerablemente las propiedades del suelo. Se observó acidificación (pH hasta 4.8), disminución de materia orgánica (<1.5%), y reducción del nitrógeno total (<0.1%). El fósforo y el potasio también mostraron descensos notables en su disponibilidad, mientras que el cadmio superó los 3 mg/kg en varias parcelas. La densidad de macrofauna fue menor en suelos con más de 10 años de uso continuo de agroquímicos, con valores de 9,200 ind./m² frente a los 18,500 ind./m² en parcelas sin aplicación. Como resultado final se concluye que la aplicación prolongado e intensivo de productos químicos en los cultivos de papa degrada significativamente las propiedades del suelo.

Palabras clave: Suelo agrícola, agroquímicos, propiedades fisicoquímicas, degradación del suelo, cultivo de papa, macrofauna edáfica.

Abstract

The research focuses on determine the physicochemical and biological properties of the soil due to the use of agrochemicals in potato crops (*Solanum tuberosum* L.) in the Huacachi-Chaglla-Pachitea-Huánuco population center, 2022. The present research is of an applied type, relational explanatory level and longitudinal quantitative approach, with a randomized experimental design, composed of 8 treatments, the repetitions of each treatment will vary according to the most used treatment in the town center of Huacachi. In total, 25 experimental units (plots) sampled in 2 different periods will be evaluated. The results indicated that intensive use of agrochemicals significantly reduced soil quality. Soil acidification was observed (pH as low as 4.8), along with a decrease in organic matter content (<1.5%) and total nitrogen (<0.1%). Phosphorus and potassium also showed notable reductions in availability, while cadmium concentrations exceeded 3 mg/kg in several plots. The density of soil macrofauna was lower in soils with more than 10 years of continuous agrochemical use, with values of 9,200 individuals/m², compared to 18,500 individuals/m² in untreated plots. It is concluded that prolonged and intensive use of agrochemicals in potato cultivation significantly degrades soil properties, compromising its fertility and long-term sustainability.

Keywords: Agricultural soil, agrochemicals, physicochemical properties, soil degradation, potato cultivation, soil macrofauna.

I. INTRODUCCIÓN

A nivel mundial, el uso de agroquímicos en la agricultura se ha intensificado por la demanda creciente de alimentos. Según la FAO, el incremento poblacional será en aproximadamente 2,300 millones de personas entre 2009 y 2050, lo que implica que, para abastecer de alimentos a una población proyectada de 9,100 millones en 2050, será indispensable incrementar el rendimiento en la producción de alimentos en un 70%. Esta situación ha llevado a muchos agricultores a recurrir al uso intensivo de agroquímicos para maximizar los rendimientos de sus cultivos, especialmente en países en desarrollo, donde el desafío de la seguridad alimentaria es más agudo.

En Perú, esta necesidad se traduce en una presión significativa sobre el sector agrícola. La creciente demanda de alimentos, impulsada tanto por el incremento poblacional como por la necesidad de mejorar la seguridad alimentaria, ha llevado a que muchos agricultores adopten prácticas de producción que aumentan los rendimientos a corto plazo, pero comprometen la fertilidad del suelo. El uso intensivo de productos químicos en la agricultura peruana no solo tiene implicancias económicas, sino también ambientales y sociales. Muchos productos fitosanitarios utilizados en los cultivos contienen metales pesados como mercurio (Hg), cobre (Cu), plomo (Pb) y cadmio (Cd), los cuales se acumulan en el suelo, afectando que las plantas puedan asimilar nutrientes y reduciendo la biodiversidad microbiana.

En la zona en estudio que se encuentra ubicado en el distrito de Chaglla, Huánuco, la aplicación de productos químicos es una práctica común en la agricultura, particularmente en cultivos de papa (*Solanum tuberosum* L.). Esta tendencia ha generado preocupación entre la comunidad y las autoridades locales debido a la evidente pérdida de productividad de los suelos. Para contrarrestar esta situación, los agricultores han incrementado la frecuencia y cantidad de agroquímicos aplicados, lo que a su vez altera las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, comprometiendo la fertilidad y sostenibilidad a largo plazo. En Huacachi, la aplicación continua de agroquímicos ha reducido la actividad biológica del suelo, eliminando organismos beneficiosos esenciales del suelo. Esto resulta en suelos más compactos, ácidos, propensos a la degradación reducción del contenido de materia orgánica, lo que afecta directamente al rendimiento en la agricultura y al ecosistema local.

La presente investigación se centra en determinar las propiedades fisicoquímicas y biológicas del suelo en cultivos de papa en Huacachi, con el objetivo de observar los efectos de los agroquímicos en la calidad del suelo y proponer estrategias para mitigar su degradación. Dada la falta de información específica sobre el impacto de los agroquímicos en las propiedades del suelo en esta región, surge la siguiente interrogante: ¿Cuáles son las propiedades fisicoquímicas y biológicas del suelo afectadas por el uso de agroquímicos en cultivos de papa en Huacachi, Chaglla, Pachitea, Huánuco en el año 2022? La hipótesis de esta investigación plantea que el uso intensivo de agroquímicos en los cultivos de papa altera significativamente las propiedades del suelo, comprometiendo su fertilidad y sostenibilidad en el tiempo.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo general

Determinar las propiedades fisicoquímicas y biológicas en el suelo por el uso de agroquímicos en cultivos de papa (*Solanum tuberosum* L.) en el centro poblado Huacachi-Chaglla-Pachitea-Huánuco, 2022.

1.1.2. Objetivos específicos

- Identificar, clasificar y determinar la cantidad y frecuencia de los agroquímicos más usados en el cultivo de papa (*Solanum tuberosum* L.).
- Determinar las propiedades físicas en el suelo por el uso de agroquímicos cultivos de papa (*Solanum tuberosum* L.).
- Determinar las propiedades químicas (pH, materia orgánica (%), Nitrógeno (%), Fósforo (%), potasio (%), cadmio (ppm)), en el suelo por el uso de agroquímicos en cultivos de papa (*Solanum tuberosum* L.).
- Determinar la propiedad biológica (densidad de macrofauna (ind./m²) en el suelo por el uso de agroquímicos en cultivos de papa (*Solanum tuberosum* L.).

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Antecedentes

2.1.1. Antecedentes internaciones

(Muñoz et al., 2024), realizó la investigación titulada "El impacto del uso inadecuado de agroquímicos y riego intensivo en la degradación del suelo: del cultivo al yermo", donde analizo cómo el uso intensivo de agroquímicos y las prácticas intensivas de riego afectan la calidad y sostenibilidad del suelo, especialmente en el contexto de la agricultura moderna impulsada por la Revolución Verde. Dentro de las propiedades afectadas, se evaluaron variables físicas y químicas clave: la salinización del suelo se observó como una consecuencia del riego intensivo, especialmente en suelos sin drenaje adecuado, lo que lleva a la acumulación de sales y dificulta el crecimiento de plantas. En cuanto a los efectos de los fertilizantes químicos, se encontró que su uso excesivo contribuye a la acumulación de sustancias tóxicas que modifican la textura del suelo, generando que reduce la capacidad de retener el agua, lo cual incrementa su vulnerabilidad a la erosión y disminuye la productividad agrícola. Por otra parte, los pesticidas alteran la biodiversidad del suelo, eliminando microorganismos y fauna benéfica, lo que disminuye la habilidad de reciclar nutrientes y descomponer materia orgánica. Como conclusiones, la investigación enfatiza en la importancia de una agricultura sostenible que incluye un enfoque combinado con el manejo de plagas y el uso de fertilizantes orgánicos, con el fin de mitigar estos efectos negativos y promover la conservación del suelo a largo plazo.

(Yadav et al., 2023), en investigación sobre el " Impacto de los agroquímicos en la biota del suelo y formas de mitigarlo", tuvo como evaluar las consecuencias de los agroquímicos en la biota del suelo y proponer métodos para mitigar sus impactos negativos en sistemas agrícolas. La investigación describe cómo el uso intensivo de agroquímicos como herbicidas, insecticidas y fertilizantes sintéticos altera significativamente las comunidades microbianas y disminuye la actividad enzimática del suelo, procesos fundamentales para la fertilidad y el equilibrio ecológico. En cuanto a la metodología, se realizó una revisión exhaustiva de estudios previos sobre la interacción de agroquímicos con organismos del suelo responsables de procesos como la fijación de nitrógeno y la solubilización de fósforo. Los resultados indicaron que varios agroquímicos, particularmente ciertos herbicidas e insecticidas, reducen considerablemente las poblaciones de bacterias beneficiosas, hongos micorrícicos y cianobacterias, limitando la capacidad del suelo para reciclar nutrientes y mantener la salud de las plantas. En sus conclusiones, el estudio resalta la urgencia de adoptar alternativas como biopesticidas, cultivos transgénicos y fertilizantes orgánicos para reducir el uso de químicos y proteger la

biodiversidad microbiana del suelo.

(Hong et al., 2023), en su artículo titulado "Explorando la influencia de los agroquímicos en la población de microorganismos beneficiosas del suelo", tuvo como objetivo evaluar el impacto de 16 agroquímicos comunes en cinco especies microbianas beneficiosas para el suelo, entre ellas *Bacillus sp.*, *Pseudomonas sp.*, *Saccharomyces sp.*, *Azotobacter sp.* y *Trichoderma sp.*, todos importantes para la calidad del suelo y la promoción del crecimiento vegetal. Dentro de los efectos observados en el experimento, se evaluaron tanto los efectos inmediatos al momento de la exposición como los efectos a los tres días de la aplicación. En cuanto a la metodología, los investigadores midieron el impacto directo de estos agroquímicos aplicando soluciones químicas sobre medios específicos para cada microorganismo y también estudiaron su efecto en suelos a las 72 horas de la aplicación. Los resultados mostraron que los agroquímicos como el etoprofos, metalaxil y mancozeb impactaron negativamente al 100% de las especies microbianas en el momento de la aplicación, mientras que otros componentes químicos redujeron su impacto a un 75% o menos después de tres días. Entre las conclusiones, los autores sugieren un intervalo de 7 días después de la aplicación de agroquímicos para asegurar la eficacia de los microorganismos beneficiosos en el suelo, y destacan la importancia de un uso prudente de estos químicos para proteger el microbiota del suelo y mantener el equilibrio ecológico en la agricultura.

En su artículo "Construcción de un indicador combinado de calidad del suelo para evaluar el efecto de la aplicación de glifosato" (Romano-Armada et al., 2019), elaboraron el indicador combinado de calidad del suelo (CSQI) para analizar cómo afecta a la calidad del terreno agrícola en Salta, Argentina, la aplicación del glifosato. Se examinaron 26 variables biológicas, químicas y físicas de la calidad del suelo, a partir de la recolección y análisis de muestras de suelo tomadas en dos lugares donde se aplica glifosato directamente durante el proceso de labranza reducida. A través de un análisis multivariado, determinaron las variables más susceptibles a los impactos del herbicida, resaltando la concentración de ácido aminometilfosfónico (AMPA), que es un metabolito del glifosato, y el carbono de la biomasa microbiana. Los resultados mostraron que los suelos tratados con glifosato tenían menor calidad, evidenciando una reducción en la biomasa microbiana y una acumulación significativa de AMPA. Estas variables fueron integradas en el CSQI, el cual permitió discriminar eficazmente entre suelos con y sin aplicación del herbicida. En conclusión, el estudio destaca el valor del CSQI como una herramienta de detección temprana de la degradación del suelo, ofreciendo un soporte para tomar decisiones en la gestión agrícola que minimicen el uso de

glifosato y promuevan prácticas más sostenibles.

2.1.2. Antecedentes nacionales

En su investigación "Uso de plaguicidas químicos en el cultivo de papa (*Solanum tuberosum* L.), su relación con la salud y el medio ambiente", Cotrina et al. (2022) examinaron la habilidad que tienen los agricultores del distrito de San Miguel, La Mar - Ayacucho, para gestionar pesticidas durante el cultivo de papa. También valoraron las repercusiones que tiene su utilización sobre la salud humana y el medioambiente. Los resultados indicaron que muchos productores aplican dosis elevadas de plaguicidas y mezclan productos sin seguir recomendaciones técnicas, lo cual incrementa los riesgos de intoxicación entre los agricultores y sus familias y afecta el entorno, especialmente el suelo, el agua y el aire, por acumulación de residuos tóxicos. Estas prácticas también contribuyen a que las plagas se vuelvan resistentes, las enfermedades agrícolas resurgan y nuevas plagas surjan, lo cual pone en peligro la sostenibilidad del cultivo de papa a medio plazo. El hecho de que no se tenga conocimiento técnico acerca de cómo manejar plaguicidas de forma segura es un problema serio, según concluyen los autores. Además, subrayan la urgencia de poner en marcha capacitaciones y regulaciones más rigurosas para disminuir estos impactos negativos. Este estudio destaca la conexión entre la mala utilización de plaguicidas y el deterioro de la salud pública y de la calidad del suelo, lo que aporta al campo de investigación en gestión de plaguicidas y enfatiza lo crucial que es adoptar prácticas agrícolas seguras y sostenibles.

En su tesis "Impactos de la Aplicación de Plaguicidas Químicos en Cultivos de Papa", Sánchez Díaz (2022) planteó como finalidad principal examinar los impactos que los plaguicidas empleados en la producción de papa tienen sobre el entorno y la salud del ser humano. El autor, a través de una revisión sistemática de 59 investigaciones, detectó efectos adversos de los plaguicidas en el aire, la biodiversidad, el agua y el suelo, enfatizando cómo su uso contribuye a los inconvenientes de contaminación y resistencia a los tratamientos convencionales. Los hallazgos revelaron que la fertilidad del suelo se ve afectada por el empleo de estas sustancias químicas, ya que disminuye la actividad microbiana necesaria para reconstituir los nutrientes y cambia la estructura del suelo. Esto último reduce su habilidad para retener agua y afecta de manera negativa su composición química y textura. La reducción de materia orgánica y la disminución de la habilidad del suelo para almacenar nutrientes, que son el resultado de estas transformaciones, afectan directamente la productividad a largo plazo en términos agrícolas. Asimismo, el estudio subrayó los peligros para la salud pública, entre ellos las dolencias respiratorias y gastrointestinales en poblaciones expuestas. Sánchez Díaz destacó

en sus conclusiones la importancia de una regulación más rigurosa y de prácticas de aplicación controladas para mitigar los efectos perjudiciales. Este estudio aporta un marco valioso para entender los riesgos ambientales y sanitarios de los plaguicidas, subrayando la urgencia de políticas ambientales más efectivas en la agricultura de papa en Perú.

(Grados & Schrevens, 2019); en su artículo "Estudio multidimensional de los efectos medioambientales de la producción agrícola de papa en los Andes Centrales del Perú", se propusieron examinar el impacto medioambiental que tiene la producción de papa en esa región andina peruana, empleando para ello un análisis multivariado y una evaluación del ciclo de vida (LCA). La investigación analizó 58 parcelas de papa en el Valle del Mantaro entre los años 2005 y 2015, tomando en cuenta factores como la utilización de fungicidas, pesticidas, fertilizantes orgánicos e inorgánicos, así como la maquinaria y la mano de obra. Los resultados indicaron que el uso inadecuado de fertilizantes contribuye significativamente a la acidificación y eutrofización del suelo, mientras que el bajo uso de maquinaria limita el potencial de calentamiento global y la demanda energética acumulada. Mediante un análisis de clústeres, se identificaron tres sistemas de producción: inorgánico, orgánico y mixto, siendo el sistema mixto el que logró una mayor eficiencia ambiental y mayor rendimiento de papa. Los autores concluyen que el manejo equilibrado de los insumos agrícolas puede reducir los impactos ambientales y mejorar la sostenibilidad de estos sistemas productivos.

(Alhua Lozano, Brandon et al., 2023); en su trabajo "Influencia del carbofurán en la concentración de macronutrientes primarios del suelo en zonas productivas de papa de los Andes peruanos", el propósito fue examinar cómo el insecticida carbofurán afecta las concentraciones de macronutrientes esenciales en los terrenos destinados a la producción de papa, ubicados en Chongos Bajo, Junín, Perú. Con ese fin, llevaron a cabo una prueba en dos parcelas: una con aplicaciones crecientes de carbofurán en varias etapas del cultivo de papa y otra sin tratamiento, por un lapso de tres meses. En cuanto a las propiedades químicas del suelo, se midieron las concentraciones de nitrógeno, fósforo y potasio en intervalos de 15 días, observándose una disminución significativa de un 7.85% en nitrógeno, 14.05% en fósforo y 10% en potasio al final del estudio. El pH del suelo también se alteró, mostrando una tendencia hacia la acidez con una pérdida del 13.44% de su valor inicial, mientras que la materia orgánica disminuyó un 6.93%, indicando una pérdida de fertilidad en el suelo. Para concluir, se demostró que el carbofurán perjudica las cualidades químicas del suelo al disminuir su calidad y la disponibilidad de nutrientes fundamentales para el desarrollo de las cosechas.

(Panaifo-Gómez et al., 2021) llevaron a cabo una investigación llamada "Calidad y uso

sustentable del suelo en el Valle del Monzón, Huánuco - Perú", cuyo objetivo era analizar la calidad de la tierra y su utilización sostenible en dos sistemas. Uno de estos es un sistema agroforestal (SAF) y el otro es un ex cocal (suelo que ha sido dejado después de haber tenido cultivos intensos de coca). Se empleó el Subíndice de Uso Sustentable del Suelo (SUSS) para categorizar la calidad, mediante un análisis físico-químico (que incluye textura, pH, materia orgánica, nitrógeno, fósforo y capacidad de intercambio catiónico) y muestrear suelos en áreas específicas. Los resultados mostraron que el SAF tenía una calidad "buena" (SUSS = 0.98), con suelos más fértiles y aptos para la agricultura sostenible, mientras que el ex cocal presentó una calidad "marginal" (SUSS = 0.64), caracterizado por alta acidez, baja fertilidad y degradación severa debido al uso intensivo de agroquímicos y prácticas insostenibles. El estudio concluyó que el SAF es un sistema más adecuado para actividades agrícolas sostenibles, mientras que el ex cocal requiere estrategias de recuperación urgente para mejorar su calidad.

2.1.3. Antecedentes locales

El estudio de López D. et al. (2020), titulado "Metales pesados en tres variedades de *Solanum tuberosum* L. (papa) expendidos en el mercado mayorista de Santa Anita (Lima-Perú)", tuvo como finalidad analizar la presencia y la concentración de metales pesados, como plomo, mercurio, arsénico y cadmio, en tres tipos de papa: amarilla, canchán y huayro. Estas se recogieron en la provincia de Ambo, Huánuco, y se vendían en el mercado mayorista de Santa Anita, que es uno de los centros principales para la distribución alimentaria en Lima. La metodología se basó en la recolección aleatoria de 45 muestras (15 por cada tipo) en 15 puntos de venta. Se utilizaron métodos sofisticados para el análisis: espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS) para la medición del plomo y el cadmio, y espectrometría de fluorescencia atómica (AFS) para el arsénico y el mercurio. Las conclusiones revelaron que todas las variedades sobrepasaron de manera significativa los máximos permitidos por la Unión Europea (0,02 mg/Kg) en lo que respecta a las concentraciones de mercurio, siendo la variedad amarilla la más impactada con niveles 12,5 veces más altos que el límite. Las variedades huayro y canchán mostraron concentraciones que se mantuvieron dentro de los límites permitidos, pero el plomo sobrepasó los valores establecidos en la variedad amarilla. En contrapartida, los niveles de arsénico y cadmio estuvieron por debajo de las normas internacionales. Se determinó que estas papas suponen un riesgo importante para la salud pública, a causa de la acumulación de mercurio, un compuesto muy tóxico que puede causar efectos crónicos como afecciones renales y neurológicas si se ingiere con frecuencia. Este descubrimiento subraya la importancia de determinar las causas de contaminación, que podrían

estar vinculadas con el uso excesivo de pesticidas y fertilizantes o con la contaminación por minería, y de llevar a cabo acciones correctivas para asegurar que los alimentos sean seguros. El estudio enfatiza la importancia de un monitoreo continuo de los alimentos agrícolas para prevenir riesgos a la salud de los consumidores.

2.2. Marco teórico

2.2.1. Indicadores de la calidad del suelo en cultivos de papa

La preocupación por la degradación del suelo en sistemas agrícolas, como los cultivos de papa, ha aumentado debido a su impacto en la productividad, la sostenibilidad del cultivo y el bienestar ambiental. Sin embargo, aún no existen criterios universales para evaluar de manera precisa los cambios en la calidad del suelo en este tipo de sistemas productivos. Para operacionalizar este concepto, es fundamental identificar y emplear variables específicas que permitan evaluar las condiciones del suelo en áreas dedicadas a la papa. Estas variables, denominadas indicadores, reflejan la calidad del suelo y proporcionan información crucial sobre los cambios o tendencias asociadas a su manejo (Porta et al., 1999; Silva, 2000; García et al., 2022).

2.2.1.1. Propiedades físicas del suelo en cultivos de papa

En los cultivos de papa, las propiedades físicas del suelo son determinantes para optimizar su manejo y garantizar la productividad. Estas propiedades incluyen:

Textura

La textura del suelo, que muestra cómo están distribuidas las partículas de menos de 2 mm, es crucial porque afecta la fertilidad, el drenaje, la retención de agua y la disponibilidad de nutrientes. La división de los suelos se basa en la cantidad de arcilla, arena y limo. Según Taboada y Álvarez (2008), la arena tiene partículas de 0.05 a 2 mm, el limo entre 0.002 y 0.05 mm y la arcilla menos de 0.002 mm de diámetro. En los cultivos de papa, suelos francos y franco-arenosos son preferidos debido a su buen equilibrio entre drenaje y retención de agua, minimizando riesgos de compactación y anegamiento (García et al., 2022).

Además, la textura impacta directamente la susceptibilidad del suelo a la compactación y la pérdida de materia orgánica, factores críticos en cultivos intensivos de papa. Según Ruiz et al. (2023), los suelos arcillosos requieren un manejo especial para evitar la compactación, mientras que los suelos arenosos pueden necesitar enmiendas para mejorar su capacidad de retención hídrica. La textura es una característica relevante porque afecta la capacidad de retención de agua, aireación, drenaje, contenido de materia orgánica y otras propiedades

(Taboada y Alvarez, 2008), así como la fertilidad.

Tabla 1. Clasificación de la distribución de los diámetros de partículas.

Fracción del suelo	Diámetros límites (mm)
Arena muy gruesa	2.00 a 1.00
Arena gruesa	1.00 a 0.50
Arena media	0.50 a 0.25
Arena muy fina	0.25 a 0.10
Limos	0.05 a 0.002
Arcilla	Menos de 0.002

Fuente: ORTIZ (1990).

Densidad aparente

La densidad aparente se refiere a la proporción que existe entre la masa total del suelo seco y su volumen, incluidos poros y partículas. En los cultivos de papa, esta propiedad es crítica, ya que densidades altas pueden restringir el crecimiento radicular y afectar negativamente la infiltración y el aireamiento del suelo. El empleo de maquinaria agrícola y el pisoteo generan compactación, elevando la densidad aparente. En suelos arcillosos destinados a papá, densidades menores son comunes debido a su mayor contenido de limo y arcilla fina (Amézquita & Chávez, 1999). Según SAGARPA (2012), densidades superiores a 1.6 g/cm³ en suelos con textura arenoso y superiores a 1.4 g/cm³ en suelos con textura arcillosa pueden comprometer severamente el desarrollo radicular.

Tabla 2. Rangos de interpretación para el crecimiento de raíces y la densidad aparente, basados en la textura del suelo.

Textura	Ideal (g/c3)	Aceptable (g/cm ³)	Puede afectar el crecimiento radicular (g/cm ³)	Restringe el crecimiento radicular (g/cm ³)
Arena, areno-franco	Dap < 1.6	1.6 ≤ Dap < 1.69	1.69 ≤ Dap < 1.80	Dap > 1.80
Franco-arenosa, franco	Dap < 1.4	1.4 ≤ Dap < 1.63	1.63 ≤ Dap < 1.80	Dap > 1.80
Franco-arcilla arenosa, franco arcilloso	Dap < 1.4	1.4 ≤ Dap < 1.60	1.60 ≤ Dap < 1.75	Dap > 1.70

Limosa	Dap < 1.3	$1.3 \leq \text{Dap} < 1.60$	$1.60 \leq \text{Dap} < 1.75$	Dap > 1.75
Franco-limosa, franco-arcillo limosa	Dap < 1.4	$1.4 \leq \text{Dap} < 1.55$	$1.55 \leq \text{Dap} < 1.65$	Dap > 1.65
Arcillo-arenosa, arcillo-limosa	Dap < 1.1	$1.1 \leq \text{Dap} < 1.39$	$1.39 \leq \text{Dap} < 1.58$	Dap > 1.58
Arcillosa (>45%, arcilla	Dap < 1.1	$1.1 \leq \text{Dap} < 1.39$	$1.39 \leq \text{Dap} < 1.47$	Dap > 1.47

Fuente: SAGARPA (2012).

2.2.1.2. Propiedades químicas del suelo de papa

Materia orgánica

La materia orgánica comprende componentes de procedencia vegetal y animal sometidas a procesos de transformación y síntesis, que, aunque están presentes en cantidades menores comparadas con la fracción mineral, tienen un rol esencial en la funcionalidad y el desarrollo del suelo. En cultivos de papa, su presencia favorece la filtración de agua, mejora la aireación y la estabilidad estructural, lo que reduce la pérdida de nutrientes y controla el destino de agroquímicos como pesticidas (Sagarpa, 2012; Ramírez et al., 2023).

Actúa también como un almacén de nutrientes esenciales para las plantas, liberándolos progresivamente y facilitando la solubilización de compuestos minerales (Gregory, 1991). En suelos destinados a papa, un incremento en la materia orgánica conduce a un desarrollo más robusto de microorganismos benéficos, contribuyendo a la supresión de enfermedades, así como a la retención de agua en condiciones de sequía (Rodríguez & Carrasco, 2022).

Tabla 3. Rangos interpretativos para el contenido de materia orgánica (%).

Clasificación	% MO
Muy bajo	MO < 0.5
Bajo	$0.5 \leq \text{MO} < 1.5$
Medio	$1.5 \leq \text{MO} < 3.5$
Alto	$3.5 \leq \text{MO} < 6$

Fuente: SAGARPA (2012).

Potencial de hidrogeno (pH)

Los cultivos de papa requieren suelos profundos con textura franco-arenosa y niveles de fertilidad óptimos, siendo el nivel de pH óptimo entre 5.6 y 6.5, ligeramente ácido, aunque

pueden prosperar entre 4.5 y 8.5 (Naranjo, 1991). Este rango beneficia la solubilidad de nutrientes fundamentales, como el fósforo, al mismo tiempo que reduce la toxicidad de elementos como el aluminio en suelos ácidos (Carrasco et al., 2023).

El pH no solo incide en la variabilidad de nutrientes, sino también en la evaluación de agroquímicos. Un pH superior a 7 puede ralentizar la degradación microbiana de herbicidas como las triazinas, afectando su persistencia en el suelo y reduciendo su eficacia en los cultivos (Curran, 2016; Gutiérrez et al., 2023).

Tabla 4. Niveles de interpretación para el pH (relación 2:1).

Clasificación	pH
Fuertemente ácido	pH < 5.0
Moderadamente ácido	$5.0 \leq \text{pH} < 6.5$
Neutro	$6.5 \leq \text{pH} < 7.3$
Mediadamente alcalino	$7.3 \leq \text{pH} < 8.5$
Fuertemente alcalino	pH ≥ 8.5

Fuente: SAGARPA (2012).

Nitrógeno total

La mayor parte del nitrógeno que se halla en los suelos se concentra en la materia orgánica que se deposita en el suelo cuando los microorganismos y las plantas de las que estos se benefician mueren. En esta forma, el nitrógeno no puede ser utilizado por la planta. El nitrógeno es el elemento que más cambia en términos de cantidad en el suelo, comparado con otros componentes fundamentales para el crecimiento de las plantas, que también se absorben en la tierra (Navarro, 2003).

En suelos destinados a papa, el nitrógeno está mayormente vinculado a la materia orgánica y aparece en dos formas principales: la aniónica (NO_3^-) y la catiónica (NH_4^+), siendo el NO_3^- la más móvil y fácilmente lixiviada (Sagarpa, 2012). Un manejo inadecuado del nitrógeno, como fertilizaciones excesivas, puede causar acidificación y pérdida de calidad del suelo. Ramírez et al. (2023) señalan que en cultivos de papa se debe considerar un equilibrio entre las necesidades nutricionales y el tema ambiental asociado con las pérdidas de nitrógeno por lixiviación.

Se ha determinado que el exceso de nitrógeno en los suelos es la principal razón por la cual se acidifican y salinizan, a causa de la nitrificación y otros métodos de transformación del elemento. El suelo se acidifica lentamente en condiciones naturales, lo que puede llevar desde

cientos hasta millones de años (Guo et al., 2010); sin embargo, las prácticas agrícolas aceleran este proceso significativamente. Esto es particularmente cierto para la fertilización con N, que disminuye el pH del suelo en un promedio de 0.26 unidades de pH en diversos usos del suelo (Lucas et al., 2011; Tian et al., 2015; Zhao et al., 2014).

Tabla 5. Niveles de interpretación para el nitrógeno total.

Clasificación	% N total
Muy bajo	$N < 0.05$
Bajo	$0.05 \leq N < 0.10$
Medio	$0.10 \leq N < 0.15$
Alto	$0.15 \leq N < 0.25$
Muy alto	$N \geq 0.25$

Fuente: SAGARPA (2012).

Fósforo total

La razón por la que las plantas no pueden utilizar la mayor parte del fósforo en el suelo es porque este es muy insoluble. Para que el elemento sea asimilado, tiene que estar presente como H_2PO_4 o $H_2PO_4^-$ en la disolución del suelo. La absorción de fósforo por las plantas también sería normal a bajos niveles de pH, es decir, cuando la disolución del suelo tiene una acidez significativa. Esto se debe a que la forma $H_2PO_4^-$ es la más fácil de absorber (Navarro y Navarro, 2003). Según Westin y De Brito (1969), el contenido de esta sustancia está relacionado con la textura del suelo y el contenido de materia orgánica; se pueden hallar alrededor de 180 mg/kg. No obstante, este componente tiene el inconveniente de quedar fijado en los suelos. Además, Rodríguez et al. (2022) destacan que la aplicación excesiva de fósforo en tierras de cultivo puede generar acumulaciones que afectan negativamente la fertilidad del suelo y la eficiencia del uso de nutrientes por parte del cultivo.

Numerosas tierras agrícolas reciben fósforo (P) en cantidades que superan la capacidad de absorción de los cultivos, lo que provoca un excedente de P en el terreno, al menos a corto plazo (Aarts et al., 2000; Syers et al., 2008).

Tabla 6. Niveles de interpretación para el fósforo total.

Clase	P (mg/kg)
Bajo	$P < 5.5$
Medio	$5.5 \leq P < 11$
Alto	$P \geq 11$

Fuente: SAGARPA (2012).

Potasio intercambiable

El potasio (K) en el suelo proviene principalmente de fertilizantes potásicos y residuos vegetales, los cuales, mediante la disolución y mineralización, liberan K a la solución del suelo. Parte de este potasio se fija en los coloides del suelo. En suelos destinados a cultivos de papa, el contenido de K como K₂O oscila entre 0,5 % y 3 %, dependiendo de la textura del suelo. Los suelos arcillosos y limo-arcillosos presentan mayores concentraciones de potasio disponibles que los suelos arenosos o limo-arenosos, debido a su mayor capacidad de intercambio catiónico (Navarro & Navarro, 2003; González et al., 2023).

La incorporación de potasio en cultivos de papa es óptima a temperaturas cercanas a 25 °C, donde se facilita su difusión en el suelo. Sin embargo, en lugares húmedas, la lixiviación y la erosión provocan una mayor pérdida de potasio, concentrándolo en los horizontes subsuperficiales del suelo (Sanzo, 2001; Martínez et al., 2022).

Tabla 7. Niveles de interpretación para potasio (K⁺) intercambiable.

Clase	K (mg/kg)
Muy Bajo	$K < 0.2$
Bajo	$0.2 \leq K < 0.3$
Medio	$0.3 \leq K < 0.6$
Alto	$P \geq 0.6$

Fuente: SAGARPA (2012).

Cadmio

En sistemas agrícolas intensivos, el cadmio (Cd) constituye un contaminante crítico debido a su concentración en el suelo y su absorción por las plantas y la cadena alimentaria. Este metal pesado tiene concentraciones promedio entre 0.5 y 3.5 mg/kg en suelos agrícolas, pero puede alcanzar hasta 8 mg/kg en regiones con fertilización excesiva (Kabata & Pendias, 2004; Rodríguez et al., 2023).

El Cd en tierras de agricultura de este tubérculo proviene principalmente de fertilizantes fosfatados, que contienen entre 8 y 500 mg de Cd por kilogramo debido a la presencia de apatita. Además, fuentes como el estiércol (Cu, As, Zn, Cd) y los compost derivados de residuos sólidos también aportan cantidades significativas de Cd (Alloway, 2013; López & Arce, 2022). El uso continuo de estas fuentes sin cambio de cultivos ni descanso del suelo puede incrementar los niveles de Cd más allá de los límites permisibles, afectando la fertilidad y la seguridad

alimentaria.

2.2.1.3. Propiedades biológicas del suelo en cultivos de papa

Densidad de microfauna

En los terrenos utilizados para el cultivo de papas, la densidad de microfauna, que comprende organismos como colémbolos, ácaros y nematodos, es un indicador esencial del estado del suelo y de su actividad biológica. Se utilizan cuadrantes estándar de 25 cm de lado, equivalentes a 1/16 de m², para la toma de muestras necesarias para el cálculo. Para expresar los resultados en número de individuos por metro cuadrado (ind./m²), se multiplica la cantidad de datos adquiridos por cuadrante por 16. La densidad habitual de microfauna en tierras agrícolas oscila entre 10.000 y 50.000 individuos por metro cuadrado, lo cual depende del manejo y las condiciones del suelo (Correia y Oliveira, 2000).

En cultivos de papa, Hernández et al. (2023) reportaron densidades promedio de 22,500 ind./m² en suelos manejados con prácticas orgánicas, en contraste con 12,000 ind./m² en suelos tratados con agroquímicos, destaca

2.2.2. Uso de agroquímicos en el cultivo de papa

El cultivo (*Solanum tuberosum* L.) que consume más plaguicidas por unidad de área 80% del total. Este alto uso de plaguicidas se debe al ataque de numerosas plagas, patógenos y malezas, la mayoría se incrementan en condiciones de alta humedad. Su producción en monocultivo siempre ha estado ligada a una alta dependencia de plaguicidas y fertilizantes. El uso de plaguicidas químicos en la papa está aumentando en los países en desarrollo, conforme los agricultores intensifican la producción, empiezan a producir en zonas y en temporadas no tradicionales para este cultivo. Las sustancias químicas usadas con frecuencia son tóxicas y se aplican con insuficiente o ningún equipo de protección del trabajador (Muñoz, 2018).

2.2.3. Contaminación de suelos por uso de agroquímicos en el cultivo de papa

Bruno (2008) señala que, la contaminación de suelos puede deberse a la aplicación directa de plaguicidas (herbicidas pre emergentes), al escurrimiento de un pulverizado desde la planta hacia el suelo, a la deriva de las pulverizaciones y a la inadecuada eliminación de restos de pulverizaciones o de envases.

González (2008) afirma que, los plaguicidas pueden ser adsorbidos en el suelo por el complejo de cambio de este, pero fundamentalmente por la materia orgánica con la que pueden formar enlaces de diversos tipos. La adsorción de los plaguicidas constituye el principal

mecanismo para su retención por parte del suelo. Para cada sustancia existe un coeficiente de adsorción definido por la ecuación: $K = x/c$; donde “x” representa a la cantidad adsorbida, “c” la concentración de la solución y “K” representaría el coeficiente de reparto entre el suelo y el agua y puede determinarse fácilmente sin más que poner en contacto una solución del producto, de concentración conocida, con una masa de suelo determinada.

2.2.4. Influencia del tiempo de uso del suelo en las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo

El suelo es un sistema vivo, heterogéneo y dinámico que incluye componentes físicos, químicos, biológicos y sus interacciones. Por lo tanto, para evaluar su calidad resulta necesario la medición y descripción de sus propiedades (Luters y Salazar, 1999). La definición más completa y mundialmente aceptada define la calidad como la capacidad del suelo para funcionar dentro de los límites de un ecosistema natural o manejado, sustentar la productividad de plantas y animales, mantener o mejorar la calidad del aire y del agua, y sostener la salud de las personas y el hábitat (Doran y Parkin, 1994).

Según Ibarra y Encina (2000), suelos con menos de cinco años de uso en actividad agrícola presentan mayor contenido de materia orgánica y elementos como el calcio, magnesio, potasio y sodio en comparación a suelos con más de cinco años de uso. Suelos con menos de cinco años de uso en actividades agrícolas presentan menor densidad aparente en comparación a suelos con mayor a cinco años de uso.

2.2.5. Degradación del suelo por cultivos de papa

La degradación de un suelo es la pérdida de la utilidad actual o potencial, reduciendo la capacidad de realizar sus funciones. Se entiende como degradación a la disminución, pérdida o cambio de parámetros de calidad, por procesos como erosión, compactación o las malas prácticas agrícolas que influyen en la pérdida de capas de suelo y como consecuencia de algunas de las propiedades del suelo (Porta, 2008).

El cultivo de papa por lo general trastorna intensamente el suelo, lo degrada, erosiona y satura de nitratos. Durante la preparación del suelo, se afloja toda la capa superior y, sobre todo en los suelos pegajosos, se pulveriza para evitar que se formen grumos en los camellones donde se siembran las papas. La eliminación mecánica de la maleza y la cosecha mecanizada también remueven mucho el suelo (FAO, 2008).

2.3. Marco conceptual

2.3.1. Cultivos de papa (*Solanum tuberosum* L.)

A escala nacional, la papa es el vegetal más importante debido a su actividad económica vinculada con la producción, al área dedicada a su cultivo y a su consumo o contribución a la alimentación del país. Igualmente, es necesario establecer opciones que tengan un menor impacto en la salud pública y el medio ambiente a causa del uso elevado de agroquímicos en la agricultura. Dichas alternativas deben conseguir que los productores mantengan una producción económicamente viable y sostenible (Ramírez et al., 2014). El cultivo de papa, en términos económicos, constituye para las familias una fuente de vida y sustento. Esto se debe a que la producción es útil tanto para el consumo interno como para la venta en mercados locales y regionales, con productores pequeños, medianos y grandes involucrados.

2.3.1.1. Clasificación taxonómica

Según Huamán (1986), la papa pertenece a la siguiente clasificación taxonómica:

- Clase : Dicotiledoneas
- Orden : Polemoniales
- Familia : Solanaceae
- Género : Solanum
- Subgénero : Potatoe
- Especie : *Tuberosum*

2.3.1.2. Clima y suelos

Según Cuesta (2002), la papa prospera mejor en tierras que son francas, ricas en nutrientes y materia orgánica, que drenan apropiadamente y que están bien humificadas. Según Muñoz y Cruz (1984), el pH óptimo es de 0,5 a 6,5, con una salinidad tolerable de hasta 8.0.

En la sierra se encuentra el cultivo en zonas templadas a frías con un rango de temperatura de 6 °C a 18 °C (Cuesta, 2002). Dependiendo de la variedad, la temperatura óptima para el crecimiento normalmente está entre 17 y 20 °C. Temperaturas sobre los 20 °C pueden atrasar fuertemente la tuberización y la velocidad del llenado. Temperaturas sobre los 30°C tienden a reducir la acumulación de materia seca. Periodos prolongados de altas temperaturas promueven un bajo desarrollo del follaje, lo cual afecta el crecimiento del tubérculo. Las plantas con estrés por calor tienen menos probabilidad de tuberizar y contienen anomalías en los tubérculos. Cuando los tubérculos quedan expuestos a los rayos solares pueden presentarse varios grados de quemaduras, enverdecimiento y formación de áreas hundidas más o menos circulares, tipo escaldadura. Estos síntomas varían según la intensidad de la radiación solar, la

temperatura y el tiempo de exposición (Oyarzún *et al.*, 2002).

2.3.1.3. Importancia del cultivo

En términos de tonelaje total de la producción global, la papa es uno de los alimentos más importantes para el ser humano. En el mundo, ocupa el cuarto puesto después del arroz, trigo y maíz. En Perú, la extensión cultivada es de 220.000 a 260.000 hectáreas. Bajo condiciones tecnológicas y ecológicas muy variables, la producción de papa se distribuye en función del precio disponible para el productor y las condiciones climáticas. Esta incluye aproximadamente diez especies y una gran cantidad de variedades mejoradas y nativas. La papa es capaz de adaptarse a diversos ambientes ecológicos y se cultiva desde el nivel del mar (en la costa) hasta los 4200 metros sobre el nivel del mar en los Andes. (1997, Zanabria y Benegas).

2.3.2. Los agroquímicos

En el cultivo de papa, los agroquímicos juegan un papel clave debido a la alta susceptibilidad del cultivo a plagas, enfermedades y malezas. Se estima que más del 60 % del costo total de producción en sistemas intensivos está destinado a agroquímicos, lo que refleja su relevancia en la gestión del cultivo (Pérez *et al.*, 2022). Los fungicidas, insecticidas y herbicidas son los más utilizados, destacándose compuestos como el mancozeb (fungicida), el clorpirifós (insecticida) y el glifosato (herbicida), cada uno con funciones específicas en el manejo fitosanitario de la papa.

En el cultivo de papa, los fungicidas constituyen hasta el 40% del total de agroquímicos empleados. El tizón tardío (*Phytophthora infestans*), la enfermedad más frecuente, puede causar hasta un 30 % de las pérdidas de rendimiento si no se controla correctamente. Con el fin de su gestión, se utilizan compuestos como clorotalonil, mancozeb y metalaxil en sistemas intensivos, lo que resulta en 8 a 12 aplicaciones por ciclo (López *et al.*, 2023). No obstante, la duración de estos fungicidas en el suelo puede llegar a ser de 120 días, lo cual depende del clima y de cómo se maneje el suelo. Esto aumenta el peligro de que las aguas subterráneas queden contaminadas.

Los insecticidas, como el clorpirifós y la cipermetrina, se emplean para controlar plagas como la polilla de la papa (*Tecia solanivora*) y el escarabajo de la papa (*Leptinotarsa decemlineata*). En cultivos de papa en regiones tropicales, se han registrado aplicaciones de insecticidas entre 5 y 8 veces por ciclo agrícola, con dosis promedio de 1.5 a 2 L/ha (García *et al.*, 2023). Sin embargo, estos compuestos son altamente tóxicos y su uso continuo puede generar resistencia en las plagas, además de afectar organismos benéficos del suelo, como lombrices y bacterias nitrificantes.

El control de malezas en papa suele incluir el uso de herbicidas preemergentes, como el glifosato y la pendimetalina, que actúan inhibiendo el crecimiento de las plantas no deseadas antes de la emergencia del cultivo. En suelos con cultivos de papa, se aplican entre 1.2 y 1.8 kg/ha de glifosato por ciclo, lo que equivale a un aporte significativo de residuos químicos al suelo (Martínez et al., 2022). Investigaciones recientes han revelado que los restos de glifosato pueden perdurar en el suelo durante más de 90 días, lo cual tiene un impacto negativo sobre la microbiota y disminuye la actividad enzimática del suelo.

La producción de papa no solo se ve impactada por el empleo intensivo de agroquímicos en sus cultivos; además, esta práctica produce efectos perjudiciales sobre el medioambiente. Después de ser aplicados, los agroquímicos pueden seguir caminos hacia el aire (volatilización), el agua (escorrentía y lixiviación) y la tierra (adsorción). Torres et al. (2023) afirman que alrededor del 25 % de los pesticidas utilizados en cultivos de papa acaban contaminando cuerpos acuáticos cercanos, mientras que un 18 % tiene el potencial de permanecer en las capas superiores del suelo y perjudicar su calidad y capacidad productiva a largo plazo.

Tabla 8. Tipos de agroquímicos.

Tipos de agroquímicos	Descripción actualizada
Fertilizantes	
Nitrogenados	Incluyen urea, nitrato de amonio y fertilizantes de liberación controlada como el polímero recubierto de nitrógeno.
Fosfatados	Fosfato monoamónico (MAP), fosfato diamónico (DAP) y superfosfato triple.
Potásicos	Cloruro de potasio (KCl), sulfato de potasio y nitrato de potasio.
Compuestos fertilizantes	Mezclas de NPK (nitrógeno, fósforo, potasio) con micronutrientes como zinc y hierro.
Fertilizantes con calcio	Nitrato de calcio y fosfato cálcico.
Fertilizantes con azufre	Sulfato de amonio y azufre elemental.
Fertilizantes con magnesio	Sulfato de magnesio (Epsom) y dolomita.
Plaguicidas	
Insecticidas	Neonicotinoides (imidacloprid, tiametoxam), piretroides (deltametrina) y organofosforados (clorpirifós).
Acaricidas	Espirodiclofeno, abamectina y azufre micronizado.
Nematocidas	Oxamil y fluensulfona.
Rodenticidas	Bromadiolona y difenacum.
Bacteriostáticos	Cobre (sulfato cúprico) y compuestos antibacterianos como oxitetraciclina.
Fungicidas	Mancozeb, metalaxil, azoxistrobina y triazoles como propiconazol.
Herbicidas	Glifosato, atrazina y dicamba.
Según su grupo químico	





Compuestos organoclorados	Prohibidos en muchos países, pero aún presentes en contaminaciones históricas (DDT, aldrina).
Compuestos organofosforados	Malatión, clorpirifós y fosmet.
Carbamatos	Carbofurano y metomilo.
Piretroides y piretrinas	Deltametrina y cipermetrina.
Tiocarbamatos	EPTC y ensayo.
Compuestos organomercuriales	Prohibidos en su mayoría; residuos aún encontrados en estudios de suelos contaminados.
Triazinas	Atrazina y simazina.
Derivados del ácido fenoxiacético	2,4-D y MCPA.
Bipiridilos	Paraquat y diquat.
Derivados cumarínicos	Bromadiolona (rodenticida de acción prolongada).

Fuente: Adaptado de Paredes y Portilla (2009); López et al. (2023); FAO (2022).

2.3.3. Categoría toxicológica

Según la toxicidad que tienen para los seres humanos y los animales, la Organización Mundial de la Salud y el Ministerio de Protección Social han dividido a los plaguicidas en cuatro clases (Madr, 2006).

Tabla 9. Categoría toxicológica de los plaguicidas.

Categoría toxicológica	Grado o nivel de toxicidad	Color de la etiqueta
I	Extremadamente peligroso	
II	Altamente peligroso	
III	Medianamente peligroso	
IV	Ligeramente peligroso	

Fuente: BUENDIA (2018).

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Lugar de ejecución

La investigación se ejecutó en los sectores de Huacachi, Chaullinca, Cruz Pampa y San Capilla, localizado en el centro poblado de Huacachi, del distrito de Chaglla.

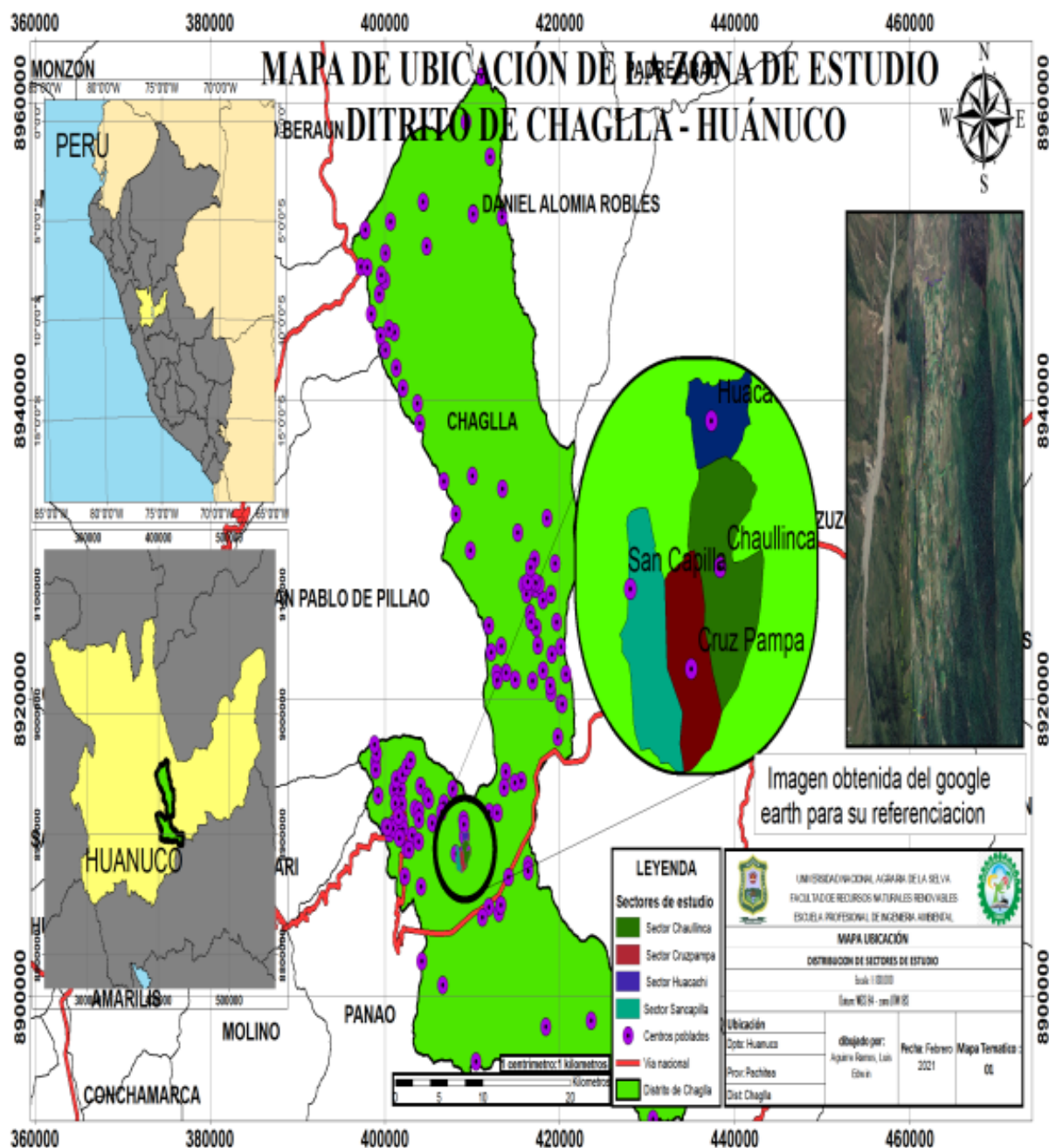


Figura 1. Ubicación política del Centro Poblado de Huacachi

3.1.1. Ubicación política de la zona de estudio

– Región : Huánuco.

- Provincia : Pachitea.
- Distrito : Chaglla.
- Localidad : Centro poblado de Huacachi.

3.1.2. Ubicación geográfica de la zona de estudio

- **Sector : Huacachi**
- Latitud : 9°51'10.60"S
- Longitud : 75°49'49.81"O
- Altitud : 2491 msnm
- **Sector : Chaulinca**
- Latitud : 9°51'38.13"S
- Longitud : 75°49'45.02"O
- Altitud : 2588 msnm
- **Sector : Cruza Pampa**
- Latitud : 9°51'50.79"S
- Longitud : 75°49'55.21"
- Altitud : 2630 msnm
- **Sector : San Capilla**
- Latitud : 9°51'55.72"S
- Longitud : 75°50'12.62"O
- Altitud : 2711 msnm

3.1.3. Características generales de la zona

3.1.3.1. Clima

El clima es cálido y húmedo, con una temperatura media anual máxima de 17.23 °C y una mínima de 7.8 °C. La cantidad promedio de precipitaciones anuales es cerca de 4 500 mm, aunque en algunos años puede haber registros más altos o más bajos. La estación meteorológica Chaglla (2023) indica que en el transcurso del año hay meses con mucha lluvia (de octubre a diciembre) y meses lluviosos (de enero a marzo). Los vientos se consideran moderados y, conforme a la escala de Beaufort, son clasificados como ventolinas (1 a 2 m/s). Su dirección está determinada por la forma del relieve; en las mañanas soplan río arriba y en las tardes lo hacen hacia el fondo del valle.

3.1.3.2. Suelos

El centro poblado de Huacachi presenta un suelo con características favorables para el desarrollo de la agricultura, en la zona se cultivan diferentes variedades de productos, de los cuales las más comunes son la papa, zanahoria, arvejas, maíz y zapallo.

3.1.3.3. Vegetación

La diversidad y la frecuencia de las especies dependen de varios factores que determinan la presencia de la flora. La presencia humana, que se traduce en un mayor asentamiento en territorios naturales y el impacto de sus actividades, incluyendo las de esta investigación, es otro factor que regula y determina el desarrollo de la flora. El empleo de tierras con fines agrícolas ha provocado una reducción de la flora silvestre, sobre todo con la aplicación de agroquímicos; esto ha llevado a que haya una escasa presencia de especies vegetales en el área investigada (Espinoza, 2017).

3.1.3.4. Fauna

La fauna depende de los factores climáticos y de la vegetación natural y cultivada, ya que estos elementos proporcionan lo necesario para las distintas especies animales menores, como ardillas, liebres, zorrillos, muca y diferentes tipos de reptiles como lagartijas serranas. (Espinoza, 2017).

3.1.3.5. Accesibilidad

Se traslada hacia la provincia de Pachitea (Panao), desde el departamento de Huánuco, por una vía asfaltada de 50 km aproximadamente, cuyo recorrido toma 1.30 horas en auto, luego continuando la ruta a 13 km de Panao, se encuentra el distrito de Chaglla, cuyo trayecto toma 15 min en auto. Continuando la ruta por una carretera afirmada de 28 km, se llega al centro poblado de Huacachi, lugar donde se está realizara la investigación (Espinoza, 2017).

3.2. Materiales y equipos

3.2.1. Materiales de campo

Machete, pico, pala recta, wincha cuya dimensión será de 30 metros, tabla Munsell, termómetro, palas rectas, tubos muestreadores, espátulas, navajas, lápices, marcadores y etiquetas, bolsas de polietileno, cooler, cámara fotográfica digital marca SONY, receptor GPS marca GARMIN Etrex modelo LEGEND HCx, Infiltrómetro, marco metálico con dimensiones de 25 cm x 25 cm x 30 cm, frascos de vidrio con tapa hermética y el formol al 4- 10%.

3.2.2. Materiales de gabinete

Se va a considerar el uso de la carta Geológica Nacional del Instituto Geográfico

Nacional (IGN), una Laptop marca Lenovo IdeaPad C340 Ryzen 7, los softwares como el Ms Excel 2010 y el Q GIS, R studio y calculadora científica marca Casio.

3.2.3. Materiales de laboratorio

Batidora, émbolo de agitación (varilla de cobre), cilindro graduado, pipeta, espátula, embudos de vidrio, tubos de ensayo, placas petri, taras de aluminio, pipeta volumétrica de 20 o 25 cm³, vaso precipitado de 50 ml, fiolas o balón aforado de 100 cm³ y 300 cm³, matraz de 250 ml, tubos durkam de 10 a 75 mm, alcohol al 80%, solución salina 0,85% estéril, etanol, agua destilada, pinzas y lupa.

3.2.4. Equipos y reactivos

Balanza analítica, estufa para secar el suelo a 105 – 110 °C, hidrómetro o densímetro de Bouyoucos, microscopio, Estereoscopio, campana de flujo laminar o área estéril, incubadora, autoclave, aparato digestor, aparato de destilación, fotocolorímetro con un haz de luz de 660 um.

3.3. Criterio y análisis del estudio

3.3.1. Nivel de investigación

El estudio fue explicativo relacional, pues su meta era describir la manera en que los agroquímicos frecuentemente empleados en campos de papa perjudican los componentes químicos, biológicos y físicos del terreno. Asimismo, se busca determinar la relación entre los diversos parámetros que se miden en suelos tratados con agroquímicos y cómo estos afectan las características del suelo.

3.3.2. Tipo de investigación

Es una investigación aplicada porque se basa en la implementación de conocimientos teóricos previamente desarrollados. En este estudio, se empleó la información científica disponible acerca de la polución del suelo en plantaciones de papa debido a agroquímicos, con el objetivo de sugerir soluciones para la contaminación química y la mala calidad del suelo en Huacachi, mediante recomendaciones. Esta perspectiva funcionará como un instrumento de administración para evitar y disminuir la degradación de los elementos fundamentales del suelo en los cultivos de papa.

3.3.3. Método de investigación

Este estudio, que sigue el método de investigación experimental, tiene como objetivo comprobar la hipótesis de que el empleo de agroquímicos en la agricultura de papa (*Solanum*

tuberosum L.) afecta considerablemente la calidad del suelo en cuanto a sus características biológicas y fisicoquímicas. Para esto, se empleará un análisis de componentes principales que cotejará parcelas con papa sin agroquímicos (los grupos control) y parcelas en las que se usan distintos conjuntos de agroquímicos (los grupos experimentales).

3.3.4. Operacionalización de variables

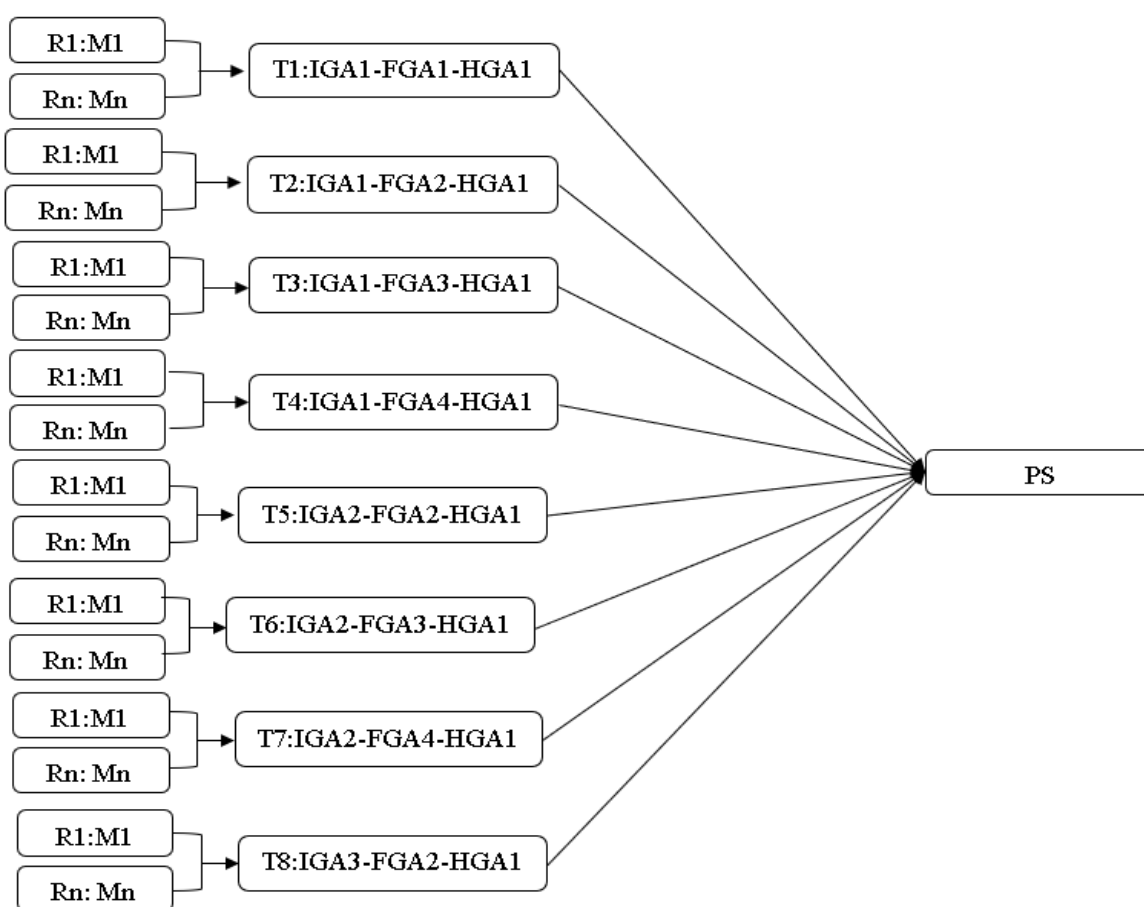
Tabla 10. Operacionalización de variables

Variable	Definición Conceptual	Definición operacional	Dimensión	Indicadores
“dependientes”	La calidad del suelo se define como su capacidad para funcionar y desarrollarse dentro de los límites de un ecosistema, ya sea natural o artificial, favoreciendo el crecimiento y desarrollo de ecosistemas que mejoran la calidad del aire y del agua, y, por ende, la salud humana. Para ello, es crucial identificar las principales propiedades del suelo que se utilizarán como indicadores. Estos indicadores pueden ser físicos, químicos y biológicos y varían según el área de estudio. Los indicadores físicos incluyen la estructura, la infiltración y la densidad aparente, entre otros. Los indicadores químicos abarcan la materia orgánica, el pH, los niveles disponibles de nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K), así	La recolección de muestras se realizó conforme a las directrices del MINAM, utilizando recipientes apropiados (frascos, bolsas, viales) para cada parámetro a analizar. Se aseguró un etiquetado correcto, el volumen adecuado de muestra y, cuando fue necesario, se garantizaron las condiciones adecuadas para la conservación de las muestras. Todo esto se llevó a cabo con el objetivo de evitar reacciones químicas y la evaporación de las muestras. Si no se sigue la metodología adecuada, los resultados podrían ser poco	Propiedades físicas	Textura
Suelo			Propiedades químicas	Materia Orgánica pH

	como el carbono y nitrógeno orgánicos. Los indicadores biológicos comprenden el carbono y nitrógeno de la biomasa microbiana, la población de lombrices, etc.	confiables. Una vez obtenidos los resultados de los parámetros físicos, químicos y biológicos, se empleó el Análisis de Componentes Principales (A.C.P). para determinar los parámetros mas influyentes	Parámetros biológicos	Nitrógeno total Fósforo total Potasio intercambiable Cadmio	Densidad microfauna
“Independiente”	El cultivo de papa (<i>Solanum tuberosum</i> L.) es el que más plaguicidas consume por unidad de área, representando el 80% del uso total. Esto se debe a la vulnerabilidad del cultivo a diversas plagas, patógenos y malezas, especialmente en condiciones de alta humedad. La producción de papa en monocultivo está altamente vinculada al uso intensivo de plaguicidas y fertilizantes. En los países en desarrollo, el uso de plaguicidas químicos en la papa está aumentando a medida que los agricultores intensifican la producción y cultivan en zonas y temporadas no tradicionales. Las sustancias químicas utilizadas suelen ser tóxicas y se aplican a menudo sin el equipo de protección adecuado para los trabajadores.	La clasificación de los terrenos de cultivo se realizó basándose en el grupo químico de los agroquímicos más empleados en cada parcela (como herbicidas o insecticidas), sin considerar la variedad de papa y consultando previamente a los agricultores. Además, habrá parcelas sin aplicación de agroquímicos que servirán como grupo de control.	1. Herbicida	Grupo químico 1 Grupo químico 2 . . . Grupo químico n	
Agroquímicos			2. Insecticida	Grupo químico 1 Grupo químico 2 . . . Grupo químico n	
			3. Fungicida	Grupo químico 1 Grupo químico 2 . . . Grupo químico n	

3.3.5. Diseño de investigación

El diseño de investigación del proyecto fue de tipo experimental aleatorizado, compuesto por 8 tratamientos, las repeticiones de cada tratamiento variarán según el tratamiento más comúnmente utilizado en el centro poblado de Huacachi. En total, se evaluarán 25 unidades experimentales (parcelas) muestreados en 2 periodos diferentes. El estudio tiene una categoría longitudinal para los diferentes parámetros relevantes, ya que los datos se recopilaron en un momento específico, realizando un corte y siendo controlados en el tiempo.



Tratamiento 1 T1:IGA1-FGA1-HGA1:Parcelas con Insecticidas Grupo Activo 1,Fungicida Grupo Activo 1, Herbicida Grupo Activo 1, Tratamiento 2 T2:IGA1-FGA2-HGA1:Parcelas con Insecticidas Grupo Activo 1,Fungicida Grupo Activo 2, Herbicida Grupo Activo 1, Tratamiento 3 T3:IGA1-FGA3-HGA1:Parcelas con Insecticidas Grupo Activo 1,Fungicida Grupo Activo 3, Herbicida Grupo Activo 1, Tratamiento 4 T4:IGA1-FGA4-HGA1:Parcelas con Insecticidas Grupo Activo 1,Fungicida Grupo Activo 4, Herbicida Grupo Activo 1, Tratamiento 5 T5:IGA2-FGA2-HGA1:Parcelas con Insecticidas Grupo Activo 2,Fungicida Grupo Activo 2, Herbicida Grupo Activo 1, Tratamiento 6 T6:IGA2-FGA3-HGA1:Parcelas con Insecticidas Grupo Activo 2,Fungicida Grupo Activo 3, Herbicida Grupo Activo 1, Tratamiento 7 T7:IGA2-FGA4-HGA1:Parcelas con Insecticidas Grupo Activo 2,Fungicida Grupo Activo 4, Herbicida Grupo Activo 1, Tratamiento 8 T8:IGA3-FGA2-HGA1:Parcelas con Insecticidas Grupo Activo 3,Fungicida Grupo Activo 2, Herbicida Grupo Activo 1, Repeticiones R1:M1-Rn: Mn : Repetición1:Muestra1 – Repetición enésima, PS: Propiedades del suelo.

Figura 2. Diseño de investigación

3.3.6. Población y muestra

La población estuvo constituida por 74 agricultores del centro poblado de Huacachi (esta información fue recabada del padrón de agricultores de dicho centro poblado), de las cuales representaran también para el muestreo respectivo del suelo, y estos dedicados al cultivo de papa (Yungay y amarilla).

La muestra se obtuvo a través de la siguiente fórmula estadística para tamaño muestral para una media en una población finita o conocida de los agricultores del centro poblado de Huacachi (se realizará 30 encuestas piloto):

$$n_1 = \frac{N_1 \times Z_{1-\alpha}^2 \times p \times (1-p)}{d^2 \times (N_1 - 1) + Z_{1-\alpha}^2 \times p \times (1-p)} \quad (1)$$

Tamaño de la población	N_1	74
Error Alfa	α	0,05
Nivel de Confianza	$1-\alpha$	0,95
Z de (1- α)	Z (1- α)	1,96
Proporción de agricultores que perciben alteración en sus suelos por el uso de agroquímicos en cultivos de papa.	p	0.77
Precisión	d	0,05
Tamaño de la muestra de agricultores	n_1	58

El tamaño de muestra para el muestreo de suelo dependió de los resultados de las muestras piloto, para ellos se determinará mediante la siguiente fórmula:

$$n_{2,3} = \frac{N_{2,3} \times Z_{1-\alpha}^2 \times CV^2}{d^2 \times (N_{2,3} - 1) + Z_{1-\alpha}^2 \times CV^2} \quad (2)$$

Donde:

Tamaño de la población (N2: Numero de grillas de una hectárea de cultivos de papa Blanca; N3: Numero de grillas de una hectárea de cultivos de papa Amarilla)	$N_{2,3}$	45,10
Error Alfa	α	0.05
Nivel de Confianza	$1-\alpha$	0,95

Z de (1- α)	Z (1- α)	1,96
Coefficiente de variación (Promedio de parámetros fisicoquímicos)	CV ²	0.13, 0.16
Precisión	d	0,05
Tamaño de la muestra (n ₂ : Numero de grillas de una hectárea de cultivos de papa Yungay; n ₃ : Numero de grillas de una hectárea de cultivos de papa Amarilla)	n _{2,3}	17, 8

El tipo de muestreo será probabilístico en su forma de muestreo aleatorio simple.

3.3.7. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Para la recopilación de datos, se utilizó el método de observación fundamentado en el observador. Después, se utilizaron encuestas y entrevistas para determinar la ubicación y cantidad de parcelas destinadas al cultivo de papa, además de saber con qué frecuencia se emplean los agroquímicos más comunes en estos cultivos. Se empleó un cuestionario como herramienta para recolectar datos; este consistió en preguntas vinculadas con la variable a medir y fue diseñado de acuerdo con los propósitos de la investigación. Después, se llevó a cabo el análisis e interpretación de los componentes biológicos y fisicoquímicos esenciales del terreno. Para la recopilación de datos, se emplearon fichas técnicas de laboratorio y del campo.

3.3.8. Análisis de datos

Para examinar los datos obtenidos en las entrevistas y encuestas con el propósito de describirlos, se emplearon medidas de tendencia central y se mostraron mediante diagramas estadísticos. Si los datos eran de tipo nominal u ordinal, se utilizaron gráficos de barras para mostrar lo que arrojó la encuesta.

Con el fin de analizar los análisis de suelo que brinda el laboratorio de suelos de la Universidad Nacional Agraria de la Selva (UNAS) y comprobar, contrastar o confirmar la hipótesis acerca del impacto significativo en las propiedades del suelo por parte de los agroquímicos, se compararon los resultados de los componentes biológicos y fisicoquímicos del suelo con el nivel de influencia, dado que son variables numéricas. También se llevó a cabo un análisis de componentes principales y una correlación de Pearson para mostrar el impacto de los agroquímicos en la calidad del suelo con cultivos de papa, así como los valores correspondientes de los coeficientes de correlación. Este trabajo evita concluir y explicar acerca de las conexiones entre las propiedades analizadas.

3.4. Metodología

3.4.1. Identificación, clasificación y determinación de la cantidad y frecuencia de los agroquímicos más usados en el cultivo de papa

Se utilizó la técnica de la encuesta para la recopilación de la información, la cual nos proporcionan una alternativa muy útil para la investigación, previamente se realizó el cuestionario que consta de 10 ítems, en las cuales contienen preguntas específicamente destinadas a la recopilación de información, para cumplir el objetivo mencionado.

La técnica nos permitió identificar y clasificar los agroquímicos que más se utilizan en la producción de la papa; de la misma manera se determinara la cantidad y frecuencia de uso de estos químicos, destacando principalmente el uso de ciertos plaguicidas y herbicidas para este análisis. La información obtenida fue ordenada y clasificada en los paquetes estadísticos.

3.4.1.1. Coordinación y ubicación de los sitios de muestreo

Se efectuó una entrevista a los dueños de las parcelas para obtener datos sobre el tiempo aproximado que se ha utilizado la tierra con el propósito de cultivar papa. Para la investigación, se necesitan tierras que hayan sido empleadas durante 3, 5, 10 y 15 años. Las parcelas que se identifiquen serán georreferenciadas y se llevará a cabo un recorrido preliminar para comprobar si están alineadas con las metas de la investigación.

3.4.2. Determinar las propiedades físicas, químicos del suelo

Para cumplir con el objetivo planteado se tendrá que realizar las siguientes actividades:

3.4.2.1. Muestreo de suelo

La técnica de muestreo utilizada fue la siguiente: se tomó una submuestra por hectárea de suelo, como se indica en la guía de muestreo de suelos (Minam, 2014). El procedimiento seguido para el muestreo fue el aleatorio simple y la profundidad del mismo, correspondiente al uso del suelo (suelo agrícola), varió entre 0 y 30 cm. Luego, se combinaron todas las submuestras para crear una muestra de alrededor de un kilogramo. Todos los puntos de muestreo fueron georreferenciados utilizando coordenadas UTM en Datum WGS84.

3.4.2.2. Determinación de los indicadores físicas y químicas del suelo

Se recolectaron muestras de suelo del área de estudio; algunas propiedades se determinaron in situ (color, temperatura e infiltración) y para los otros parámetros las muestras serán llevados al Laboratorio de Suelos de la Universidad Nacional Agraria de la Selva, para su respectivo análisis.

Tabla 11. Indicadores físicos del suelo.

Indicador físico	Método de su determinación
Textura del suelo	Método del hidrómetro de Bouyoucos

Tabla 12. Indicadores químicos del suelo.

Indicadores químicos	Método de su determinación
Materia orgánica	Método de Walkley y Blak
pH	Método del potenciómetro relación suelo agua 1:1
Nitrógeno	Método de Kjeldahl
Fósforo	Método del Olsen modificado
Potasio	Método de absorción atómica
Cadmio	Espectroscopia de absorción atómica de llama
Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC)	Acetato de amonio 1 Normal pH 7.0
Potasio Intercambiable	Extracto de amonio
Magnesio Intercambiable	Extracto de amonio
Calcio Intercambiable	Extracto de amonio

3.4.2.3. Efecto de los agroquímicos en las propiedades fisicoquímicas

Para cada ingrediente activo (Tratamientos) encontrados en una misma área (repeticiones), donde se tuvo en cuenta el año de uso, con la finalidad de considerarlo como un factor de evaluación; presentando las cargas factoriales que permitio analizar los indicadores más relevantes y significativos en relación con los agroquímicos utilizados en el cultivo de papa.

- Análisis de Varianza

Se llevo a cabo un análisis de varianza para determinar qué factores tuvo un efecto estadísticamente significativo sobre los parámetros fisicoquímicos del suelo proveniente de los cultivos de papa de centro poblado de Huacachi, ya que se espera que los valores-P del factor "tiempo de uso de suelo" y el factor "Ingrediente activo-Tipo de Agroquímico" sean menores que 0.05, se anticipa que estos tendrán un efecto estadísticamente significativo sobre los parámetros fisicoquímicos del suelo.

- **Modelo de análisis factorial**

$$\begin{cases} X_1 = I_{11}F_1 + I_{12}F_2 + \dots + I_{1m}F_m + e_1 \\ X_2 = I_{21}F_1 + I_{22}F_2 + \dots + I_{2m}F_m + e_2 \\ X_p = I_{p1}F_1 + I_{p2}F_2 + \dots + I_{pm}F_m + e_m \end{cases} \quad (3)$$

Donde $\begin{cases} I_{jh} \text{ es el peso del factor } h \text{ en la variable } X_j \text{ (Carga factorial)} \\ F_1, F_2, \dots, F_m \text{ son factores comunes} \\ e_1, e_2, \dots, e_p \text{ son factores \u00fanicos o espec\u00edficos} \end{cases}$

El modelo de an\u00e1lisis factorial incluye p variables observables (X_1, X_2, \dots, X_p), que son una combinaci\u00f3n lineal de m factores comunes ($m < p$), adem\u00e1s de un solo valor (e_p). lo que significa que las variables iniciales son afectadas por los factores comunes, a la vez que existe un factor \u00fanico para cada variable (De la Fuente Crespo, 2011).

La ecuaci\u00f3n (1) se puede expresar como la siguiente ecuaci\u00f3n matricial:

$$(2) \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{11} & I_{12} & I_{1m} \\ I_{21} & I_{22} & I_{2m} \\ I_{p1} & I_{p2} & I_{pm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_p \end{bmatrix} \quad (4)$$

Lo que se representar\u00eda de forma matricial como: $x = Lf + e$

La correlaci\u00f3n entre la variable original y su factor se conoce como carga factorial. Para interpretar las cargas factoriales en muestras de distintas dimensiones, es necesario establecer un nivel de significancia (Hair et al., 2019).

Tabla 13. Significancia de cargas factoriales

Carga factorial	Tama\u00f1o de muestra necesario para la significancia
0.30	350
0.35	250
0.40	200
0.45	150
0.50	120
0.55	100
0.60	85

0.65	70
0.70	60
0.75	50

Fuente: (Hair et al., 2019)

- Cosenos cuadrados

Los cosenos cuadrados (\cos^2) indican qué proporción de la varianza de una variable original es explicada por los elementos principales. El coseno cuadrado de la variable j en conexión con el componente principal i equivale al cuadrado de la carga factorial de la mencionada variable en el componente i , dividido entre el total de los cuadrados de las cargas factoriales que tiene la variable j en todos los componentes principales. Se emplean para identificar los componentes principales que se mantendrán en el modelo, garantizando así una representación adecuada de las variables originales (Hair et al., 2019).

$$\cos^2(L_{ij}) = \frac{L_{ij}^2}{\sum_{k=1}^p L_{kj}^2} \quad (5)$$

Donde:

L: Matriz de cargas factoriales

L_{ij} : Carga factorial de la variable j en el componente principal i

p : Número total de componentes principales

k : indicadores

Cuando un coseno cuadrado es alto, cercano a 1, quiere decir que el componente principal i representa la variable j .

Cuando un coseno cuadrado es bajo, cercano a 0, quiere decir que el componente principal i no representa bien a la variable j .

- **Diferencia significativa múltiple**

Para poder determinar que tratamiento, entendiéndose al Ingrediente activo de los agroquímicos (IA1, IA2v, IA3...IAN) se aplicará una prueba de Tucker que nos permitirá conocer que tratamiento tendrá un mayor efecto a los parámetros fisicoquímicos, asimismo, se buscará determinar la influencia del tiempo (0, 5, 10,15, 30 años de uso del suelo).

Tabla 14. Comparación de medias de ingredientes activos en función al tiempo de uso de suelo

Ingrediente activo en función al tiempo	Diferencia	Diferencia estandarizada	Valor crítico	Pr > Dif	Significativo	Límite inferior (95%)	Límite superior (95%)	Límite inferior (95%)	Límite superior (95%)
IA1-T1 vs IA2-T1									
IA1-T1 vs IA2-T2									
IA1-T1 vs IA2-T3									
IA1-T2 vs IA2-T1									
IA1-T2 vs IA2-T2									
IAN-Tn vs IAN-Tn									

Tratamiento Testigo T0: Tiempo de 0 min, Tratamiento 1 T1: Tiempo de 5 min, Tratamiento2 T2: Tiempo de 10 min, T3: Tiempo de 15 min, T4: Tiempo de 30 min.

3.4.2.4. Análisis de componentes principales

Una vez que se han establecido todas las propiedades físicas y químicas del terreno, las recopilamos en una base de datos y utilizamos el coeficiente de Spearman para analizar la correlación entre cada parámetro. Después, se llevará a cabo el análisis de componentes principales, en el que cada componente contará con un coeficiente de puntuación.

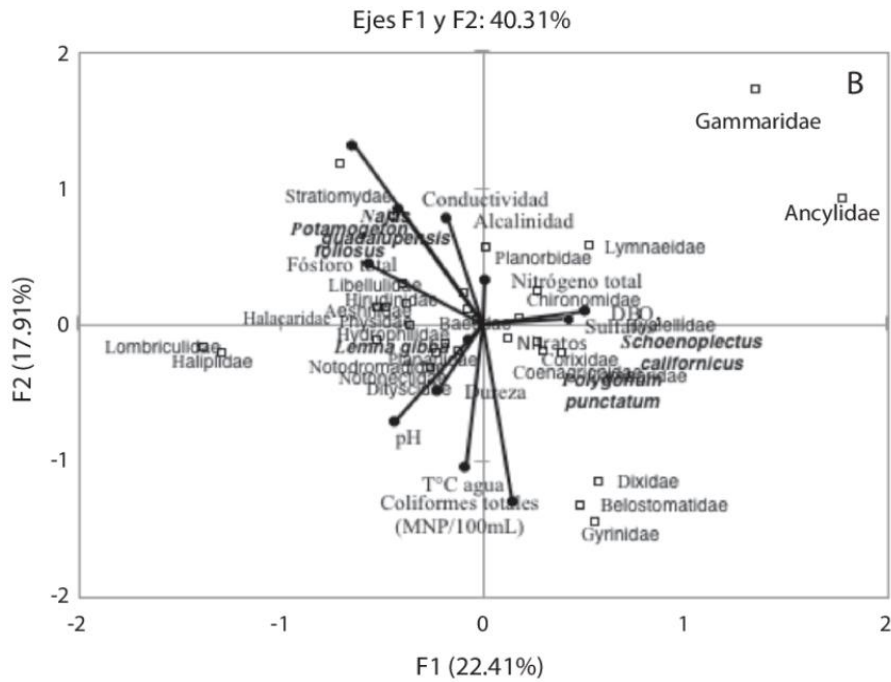


Figura 3. Análisis de componentes

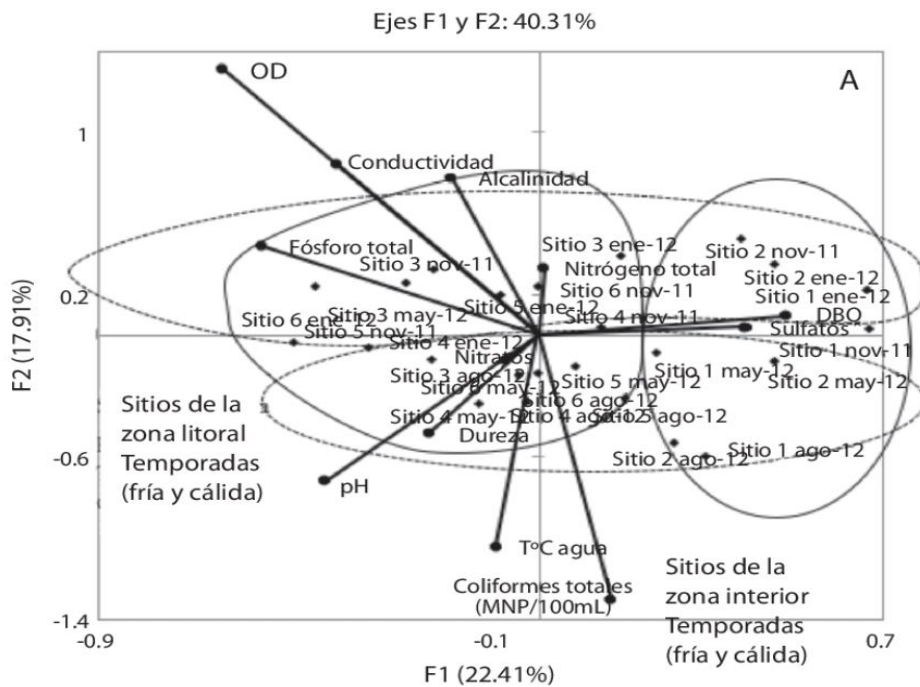


Figura 4. Análisis de componentes principales con elipses

En la figura 3 y 4, vemos el gráfico de ACP, en esta representación se observan dos

dimensiones que se dividen en cuatro cuadrantes. Los parámetros que se encuentran próximos entre sí dentro del mismo cuadrante indican una correlación o grado de asociación muy fuerte. A medida que la distancia entre los parámetros aumenta, el grado de asociación disminuye. Esta es una forma gráfica de representar la correlación de Pearson.

$$\text{Coeficiente de puntuación} = \frac{\text{Varianza de cada Factor (\%)}}{\text{Varianza acumulada representativa (\%)}} \quad (6)$$

3.4.3. Determinar las propiedades biológicas del suelo (densidad de macrofauna (ind./m²)).

Para cumplir este objetivo se realizó las siguientes actividades.

3.4.3.1. Muestreo de la fauna edáfica del suelo

La técnica utilizada para la macrofauna del suelo fue parecida a la que emplearon VARGAS y VALDIVIA (2005), en la que los puntos de muestreo se establecieron mediante un muestreo sistemático. Para ello, se trazó un transecto recto de 40 metros y se recolectaron monolitos cada 10 metros, lo que da como resultado cinco monolitos por parcela. También se tomarán cinco muestras por tratamiento para analizar la diversidad de fauna del suelo a diversas profundidades (0-10 cm, 10-20 cm y 20-30 cm), utilizando un cuadrado muestreador de 0.25 m x 0.25 m x 0.10 m, método recomendado por el Programa Tropical Soil Biology And Fertility – TSBF (Anderson e Ingram, 1993, citado por Pashanasi, 2001).

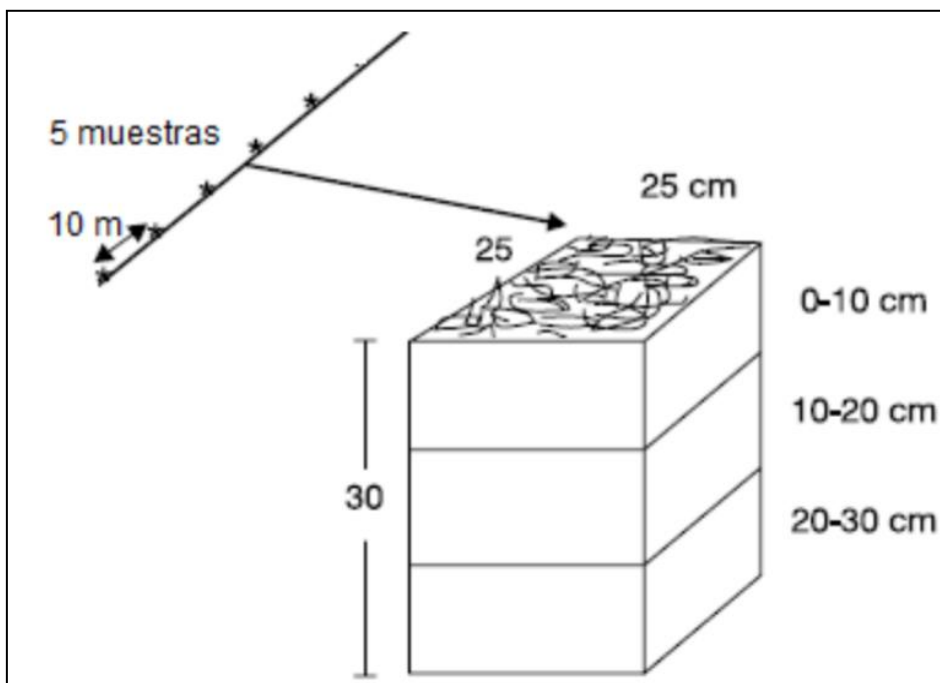


Figura 5. Extracción de muestras biológicas**3.4.3.2. Metodología de conteo y densidad de macroinvertebrados del suelo**

Las muestras de diversos estratos se transportaron al laboratorio de entomología en la Universidad Nacional Agraria de la Selva, donde se realizó el conteo de la fauna edáfica. La densidad de todos los macroinvertebrados (número de individuos por metro cuadrado) será cuantificada (Hauer, FR, & Lamberti, GA, 2006).

Se computará la cantidad de personas por monolito, se sumarán todos los individuos y se calculará el porcentaje de abundancia o densidad relativa media para cada unidad del suelo

$$\text{bioma.}D = \frac{N}{A}$$

Fuente: Hauer, FR, & Lamberti, GA (2006)

Donde:

D: Densidad de macroinvertebrados (individuos/m²)

N: Número total de individuos recolectados

A: Área muestreada (m²).

IV. RESULTADOS Y DISCUSIONES**4.1. Identificación, clasificación y determinación de la cantidad y frecuencia del uso de agroquímicos en cultivos de papa****Tabla 15.** Uso de insecticidas en cultivos de Papa

Insecticidas	Ingrediente activo	Porcentaje
Furadan	Carbofuran	52.00
Sherpa	Cypermethrin	20.00
Afly	Cypermethrin	20.00
Tifon	Lufenuron	8.00

En la Tabla 15 nos muestra la distribución porcentual del uso de diferentes insecticidas en los cultivos de papa, el Furadan es el más utilizado, el cual está compuesto por Carbofuran, representando el 52% del total, seguido por los insecticidas Sherpa y Afly, compuestos por Cypermethrin, cada uno con un 20%, y, por último, Tifon, compuesto por Lufenuron, con un 8%.

La representatividad porcentual del uso de Furadan (Carbofuran) se puede relacionar con la eficacia percibida contra una variedad de plagas en cultivos de papa. Sin embargo,

estudios recientes sugieren que el ingrediente activo Carbofuran tiene un impacto significativo en el microbiota del suelo, pudiendo ocasionar la alteración de la biodiversidad y la función ecosistémica (Pérez, 2023; Liu et al., 2021). Por otro lado, el uso frecuente de insecticidas como Sherpa y Afly, que se componen por Cypermethrin, ingrediente que ha sido vinculado con la disminución de la población de insectos benéficos, podría provocar un desbalance ecológico que favorece a las plagas secundarias (Smith, 2022; Zhang et al., 2023). Se recomienda la integración de prácticas de manejo integrado de plaga para reducir la dependencia de estos químicos y promover un enfoque más sostenible (Chen, 2022).

Tabla 16. Uso de fungicida en cultivos de Papa

Fungicida	Ingrediente activo	Porcentaje
Mertect	Tiabendazol	20.00
Obramass	Clorotalonil	28.00
Custodia	Azoxystrobin	12.00
Protexín	Carbendazim	40.00

La Tabla 16 nos muestra el uso de fungicidas en los cultivos de papa, destacando el uso de Protexín, compuesto por Carbendazim, representando un 40%, seguido por Obramass, compuesto por Clorotalonil, con un 28%, el fungicida Mertect, compuesto por Tiabendazol, representa el 20%, y por último Custodia, compuesto por Azoxystrobin, con un 12%.

La prevalencia de fungicidas como Custodia y Obramass sugiere una alta dependencia de estos productos para controlar enfermedades fúngicas en cultivos de papa. Sin embargo, la persistencia de ingredientes activos como Azoxystrobin y Clorotalonil puede contribuir a la acumulación de toxinas en el suelo, afectando su calidad y la salud de futuros cultivos (García, 2024; Martínez et al., 2023). Se recomienda el uso de alternativas más benignas y estrategias de rotación de cultivos para mitigar estos efectos.

Tabla 17. Uso de herbicida en cultivos de Papa

Herbicida	Ingrediente activo	Porcentaje
Erraser	Glifosato	52.00%
Fuego	Glifosato	12.00%
Embate	Glifosato	36.00%

La Tabla 17 muestra el uso predominante de herbicidas cuyo compuesto predominante es el Glifosato, en el estudio hubo variantes como Erraser (52%), Embate (36%) y Fuego (12%). El Glifosato, aunque efectivo para controlar malezas, ha sido documentado por su potencial de acidificación del suelo y por perturbar el microbiota del suelo. Estos efectos pueden reducir la fertilidad del suelo a largo plazo y aumentar la vulnerabilidad a las enfermedades del suelo

(Martinez et al., 2023).

Tabla 18. Frecuencia de uso de insecticida, fungicida y herbicida en cultivos de Papa

Uso de insecticida, fungicida y herbicida	Porcentaje
2 veces a la semana	0.00
Cada semana	91.38
Cada 2 semanas	8.62
Cada 3 semanas	0.00

La Tabla 18 indica una alta frecuencia de uso de agroquímicos, con aplicaciones semanales en más del 90% de los casos. Esta alta frecuencia de uso subraya una dependencia intensiva de agroquímicos que puede ser insostenible. Las prácticas frecuentes de aplicación pueden llevar a resistencias de plagas y enfermedades, requiriendo una mayor atención hacia alternativas más sostenibles y menos químicas como el manejo integrado de plagas (Lee & Kim, 2024).

4.2. Propiedades físicas del suelo con cultivo de papa

Tabla 19. Parámetros físicos del suelo con cultivo de papa

Parámetros	Arena (%)	Arcilla (%)	Limo (%)	Años de uso de suelo
Agroquímicos				
AGR1	40 ⁺ ₋ 17.1	24.06 ⁺ ₋ 7.08	35.83 ⁺ ₋ 11.08	14.3 ⁺ ₋ 3.61
AGR2	29 ⁺ ₋ 6.92	26.74 ⁺ ₋ 6.41	44.2 ⁺ ₋ 7.71	10.2 ⁺ ₋ 9.10
AGR3	34.5 ⁺ ₋ 5.97	24.95 ⁺ ₋ 6.54	40.5 ⁺ ₋ 3	17.5 ⁺ ₋ 2.8
AGR4	48.3 ⁺ ₋ 15.31	18.38 ⁺ ₋ 10.42	33.16 ⁺ ₋ 7.3	9.0 ⁺ ₋ 8.62
AGR5	41.5 ⁺ ₋ 14.23	21.93 ⁺ ₋ 9.44	37 ⁺ ₋ 7.72	12.3 ⁺ ₋ 8.3
AGR6	45.6 ⁺ ₋ 16.6	16.69 ⁺ ₋ 7.32	37.6 ⁺ ₋ 11.9	9.8 ⁺ ₋ 7.3
AGR7	36.5 ⁺ ₋ 16.6	18.7 ⁺ ₋ 3.3	44.7 ⁺ ₋ 9.60	9.0 ⁺ ₋ 6.9
AGR8	35.6 ⁺ ₋ 9.7	20.4 ⁺ ₋ 8.37	44.5 ⁺ ₋ 6.13	12.5 ⁺ ₋ 2.8
Sig:p valor 95%	o	o	o	o

Signification codes: 0 < *** < 0.001 < ** < 0.01 < * < 0.05 < . < 0.1 < ° < 1. AGR1 Carbofuran-Azoxystrobin-Glifosato, AGR2 Carbofuran-Carbendazim-Glifosato, AGR3 Carbofuran-Chlorotalonil-Glifosato, AGR4 Carbofuran-Tiabendazol-Glifosato, AGR5 Cypermethrin-Carbendazim-Glifosato, AGR 6 Cypermethrin-Chlorotalonil-Glifosato, AGR 7 Cypermethrin-Tiabendazol-Glifosato, AGR 8 Lufenuron-Carbendazim-Glifosato.

Los valores medios de arena en el suelo fluctúan en gran medida entre los grupos de agroquímicos, desde un 29% mínimo en AGR2 hasta un 48% máximo en AGR4. La desviación estándar también es elevada, sobre todo en AGR4 (± 15.31), lo que señala una variabilidad

significativa en la forma de distribución de arena en los terrenos tratados con esta clase de agroquímicos. AGR8 presenta un valor intermedio de arena (35.6%) con una menor desviación estándar (± 9.7), lo que sugiere una distribución más uniforme de este componente en el suelo.

Azoxystrobin (AGR1), este fungicida al combinarse con otros agroquímicos puede influir en la retención de agua y en la estructura del suelo. La literatura indica que Azoxystrobin puede modificar la actividad microbiana que es crucial para mantener la estructura del suelo (Smith, 2022).

La presencia de Carbofuran está asociada con una menor proporción de arena y un aumento en la arcilla y el limo. Estudios sugieren que Carbofuran puede alterar la estructura del suelo, aumentando su compactación y reduciendo la porosidad, lo que afecta negativamente la aeración y la infiltración de agua (García, 2024). El Glifosato, un herbicida de uso extenso, puede afectar la biodiversidad del suelo y provocar que su estructura física se deteriore al tener un impacto en el trabajo de los microorganismos y en la descomposición de la materia orgánica (Martínez et al., 2023). El empleo de varias mezclas de agroquímicos parece tener un efecto importante sobre el contenido de arena del suelo. Por ejemplo, AGR2, que contiene Carbofuran-Carbendazim-Glifosato, muestra uno de los porcentajes más bajos de arena, lo que podría estar relacionado con la compactación del suelo inducida por el Carbendazim, un fungicida conocido por reducir la porosidad del suelo (Gomes et al., 2022). En contraste, AGR4, que incluye Tiabendazol, presenta el mayor contenido de arena, lo que podría estar relacionado con una menor compactación y mayor descomposición de materia orgánica, favorecida por este fungicida (Drexler et al., 2018). Los resultados de AGR8, con un contenido de arena más equilibrado, podrían deberse a la acción de Lufenuron, un insecticida que parece tener menos impacto negativo en la estructura física del suelo comparado con otros insecticidas más agresivos como el Carbofuran (Sharma et al., 2017). En resumen, la variabilidad en el contenido de arena refleja cómo diferentes combinaciones de agroquímicos pueden afectar la textura del suelo de manera diferencial, lo que es crítico para la gestión sostenible del suelo agrícola (Pelosi et al., 2014).

El contenido de arcilla en el suelo también muestra variaciones significativas entre los grupos de agroquímicos, con valores que van desde 18.83% en AGR4 hasta 26.4% en AGR2. La desviación estándar más baja se observa en AGR6 (± 4.76), lo que indica una distribución más uniforme de arcilla en los suelos donde se aplican Cypermethrin-Clorotalonil-Glifosato. AGR5 y AGR7 tienen valores similares de arcilla, alrededor del 23%, lo que podría reflejar una tendencia homogénea en la textura del suelo bajo estos tratamientos. Para definir la habilidad

de sostener agua y nutrientes, es fundamental el contenido de arcilla en el terreno. En este escenario, AGR2, que tiene el porcentaje más alto de arcilla, podría señalar una mayor habilidad para retener agua; sin embargo, también podría indicar que es más susceptible a compactarse, sobre todo por la utilización de Carbendazim, sustancia que se ha asociado con una disminución en la porosidad del suelo (Wang et al., 2019). Por otro lado, AGR4, que contiene menos arcilla, podría estar vinculado con una erosión más elevada y una estabilidad estructural reducida. Esto concuerda con investigaciones que indican que el Tiabendazol puede disminuir la estabilidad de los agregados del suelo (Simon-Delso et al., 2015). La homogeneidad observada en AGR6 podría ser producto de la acción conjunta de Cypermethrin y Clorotalonil, los cuales impactan tanto a la fauna edáfica como al microbiota; esto último tiene el potencial de estabilizar la estructura del suelo en corto plazo (Garibaldi et al., 2017). En términos generales, el porcentaje de arcilla afectado por diferentes agroquímicos es un elemento clave para determinar la calidad del suelo y su manejo en las plantaciones de papa.

El contenido de limo varía menos entre los grupos de agroquímicos comparado con arena y arcilla, con un rango que va desde 33.7% en AGR2 hasta 44.7% en AGR8. La desviación estándar es más alta en AGR3 (± 11.27), lo que sugiere una mayor variabilidad en la distribución de limo en este grupo. AGR8, con el mayor porcentaje de limo y una desviación estándar moderada (± 5.8), indica un suelo con una textura más equilibrada, posiblemente menos afectado por la acción conjunta de los agroquímicos utilizados. El contenido de limo es crucial para la retención de agua y la fertilidad del suelo. AGR8, con el mayor porcentaje de limo, podría ofrecer un mejor balance entre retención de agua y aireación del suelo, lo que es beneficioso para el cultivo de papa (Blanco-Canqui & Lal, 2009). Este grupo engloba a Lufenuron, el cual tiene un efecto relativamente reducido en la estructura física del suelo en comparación con insecticidas más agresivos como el Carbofurano (Sanchez-Bayo & Goka, 2014). En cambio, AGR2, que tiene el contenido más bajo de limo, podría estar asociado con una tendencia más alta a la compactación y una capacidad más baja para retener agua. Esto concuerda con la presencia de Carbendazim en este grupo, un fungicida que ha demostrado disminuir la porosidad del suelo (Nannipieri et al., 2003). La interacción compleja entre los elementos de Carbofuran y Clorotalonil, la cual es indicativa de una variabilidad elevada en AGR3, puede tener un impacto negativo en cómo se distribuyen las partículas finas en el terreno, modificando de esta manera su habilidad para retener agua (Lavelle et al., 2006). Estos hallazgos resaltan la relevancia de tener en cuenta la textura del suelo al utilizar distintos agroquímicos para conservar un equilibrio apropiado entre sus elementos.

Los años de uso del suelo varían notablemente entre los grupos de agroquímicos, con AGR4 teniendo el mayor tiempo de uso (17.5 años) y AGR2 el menor (10.2 años). AGR8 y AGR5 presentan valores intermedios de 12.5 y 12.3 años, respectivamente, con desviaciones estándar relativamente altas en varios grupos, lo que indica una variabilidad considerable en el tiempo de uso del suelo en las áreas estudiadas. El tiempo de uso del suelo es un factor clave que influye en su salud y capacidad productiva. AGR4, con el mayor tiempo de uso, puede estar mostrando signos de agotamiento o deterioro de la calidad del suelo, especialmente debido al uso prolongado de Tiabendazol y Glifosato, que han sido asociados con la reducción de la biodiversidad del suelo y la acumulación de residuos tóxicos (Sharma et al., 2017; Duke & Powles, 2008). Por otro lado, AGR2, con el menor tiempo de uso, podría representar suelos más recientes o menos agotados, pero con riesgos asociados al uso intensivo de Carbofuran y Carbendazim, que podrían acelerar la degradación del suelo a largo plazo (Wang et al., 2019). Los valores intermedios observados en AGR5 y AGR8 sugieren un uso sostenido del suelo que, aunque todavía productivo, podría estar acercándose a un punto crítico donde la salud del suelo empieza a deteriorarse más rápidamente, especialmente bajo la acción combinada de insecticidas, fungicidas y herbicidas que afectan la estructura y biología del suelo (Pelosi et al., 2014; Gomes et al., 2022). En conjunto, estos resultados subrayan la necesidad de una gestión más cuidadosa del uso del suelo a largo plazo para evitar su degradación irreversible.

Los resultados muestran variaciones significativas en la textura del suelo debido al uso continuado de diferentes combinaciones de agroquímicos. La tendencia hacia un aumento de la arcilla y una reducción de la arena en tratamientos con Carbofuran y Glifosato sugiere una compactación del suelo que puede reducir la aireación y el drenaje. Estos cambios físicos afectan negativamente la salud de las raíces y la eficiencia en el uso del agua, lo que podría llevar a una disminución en la resiliencia del suelo frente a condiciones de estrés hídrico y a una menor productividad agrícola (Lee & Kim, 2024).

4.2.1. Propiedades químicas del suelo con cultivos de papa

Tabla 20. Parámetros químicos del suelo con cultivo de papa

Parámetros	Agroquímicos								Sig;p valor 95%
	AGR1	AGR2	AGR3	AGR4	AGR5	AGR6	AGR7	AGR8	
pH	5.54 ⁺ _{-0.6}	5.38 ⁺ _{-0.4}	6.3 ⁺ _{-0.7}	5.53 ⁺ _{-1.3}	5.69 ⁺ _{-0.8}	5.85 ⁺ _{-0.5}	5.25 ⁺ _{-0.3}	4.68 ⁺ _{-0.7}	***
Mo (%)	3.27 ⁺ _{-0.9}	2.94 ⁺ _{-0.8}	3.15 ⁺ _{-0.3}	3.68 ⁺ _{-0.6}	3.04 ⁺ _{-0.3}	3.53 ⁺ _{-0.7}	2.8 ⁺ _{-0.4}	3.27 ⁺ _{-0.1}	°
N (%)	0.16 ⁺ _{-0.04}	0.14 ⁺ _{-0.04}	0.16 ⁺ _{-0.01}	0.18 ⁺ _{-0.02}	0.15 ⁺ _{-0.01}	0.18 ⁺ _{-0.03}	0.14 ⁺ _{-0.02}	0.17 ⁺ _{-0.01}	*
P (ppm)	51.8 ⁺ _{-36.5}	44.5 ⁺ _{-35.3}	20.1 ⁺ _{-16.6}	51.6 ⁺ _{-47.1}	47.9 ⁺ _{-42.6}	56.9 ⁺ _{-42.9}	37.8 ⁺ _{-36.2}	33.1 ⁺ _{-34.4}	°
K (ppm)	118.9 ⁺ _{-31.6}	119.6 ⁺ _{-19.7}	93.1 ⁺ _{-22.7}	117.9 ⁺ _{-60.5}	103.3 ⁺ _{-22.9}	152.1 ⁺ _{-62.2}	132.1 ⁺ _{-32.4}	84.3 ⁺ _{-64.7}	°
Cd (ppm)	0.34 ⁺ _{-0.08}	0.28 ⁺ _{-0.10}	0.11 ⁺ _{-0.05}	0.20 ⁺ _{-0.10}	0.34 ⁺ _{-0.13}	0.43 ⁺ _{-0.11}	0.42 ⁺ _{-0.16}	0.31 ⁺ _{-0.16}	***
CIC	11.1 ⁺ _{-4.7}	7.4 ⁺ _{-4.1}	17.3 ⁺ _{-8.26}	7.89 ⁺ _{-5.4}	8.04 ⁺ _{-3.48}	10.61 ⁺ _{-5.32}	9.13 ⁺ _{-3.28}	8.14 ⁺ _{-4.63}	°
Ca Cmol(+)/kg	7.50 ⁺ _{-5.8}	4.77 ⁺ _{-4.3}	16.6 ⁺ _{-7.85}	5.54 ⁺ _{-5.14}	6.13 ⁺ _{-3.39}	8.21 ⁺ _{-5.37}	7.51 ⁺ _{-4.6}	4.46 ⁺ _{-4.34}	°
Mg Cmol(+)/kg	0.63 ⁺ _{-0.43}	0.42 ⁺ _{-0.27}	2.53 ⁺ _{-1.2}	0.83 ⁺ _{-0.89}	0.856 ⁺ _{-0.54}	0.75 ⁺ _{-0.64}	1.103 ⁺ _{-0.89}	0.44 ⁺ _{-0.36}	°
K Cmol(+)/kg	0.37 ⁺ _{-0.14}	0.35 ⁺ _{-0.10}	0.22 ⁺ _{-0.07}	0.36 ⁺ _{-0.14}	0.30 ⁺ _{-0.12}	0.48 ⁺ _{-0.13}	0.46 ⁺ _{-0.17}	0.25 ⁺ _{-0.15}	**
Na Cmol(+)/kg	0.33 ⁺ _{-0.29}	0.40 ⁺ _{-0.27}	0.13 ⁺ _{-0.06}	0.18 ⁺ _{-0.20}	0.19 ⁺ _{-0.22}	0.27 ⁺ _{-0.26}	0.29 ⁺ _{-0.24}	0.22 ⁺ _{-0.29}	°
Al Cmol(+)/kg	0.41 ⁺ _{-0.63}	0.90 ⁺ _{-0.82}	--	0.67 ⁺ _{-0.54}	0.32 ⁺ _{-0.50}	0.17 ⁺ _{-0.30}	0.37 ⁺ _{-0.5}	0.91 ⁺ _{-0.73}	**
H Cmol(+)/kg	0.02 ⁺ _{-0.03}	0.06 ⁺ _{-0.05}	--	0.10 ⁺ _{-0.11}	0.03 ⁺ _{-0.08}	0.06 ⁺ _{-0.12}	0.05 ⁺ _{-0.06}	0.12 ⁺ _{-0.08}	°
Bas.Cam(%)	89.1 ⁺ _{-15.7}	79.4 ⁺ _{-19.3}	100	83.9 ⁺ _{-13.7}	92.2 ⁺ _{-12.9}	94.9 ⁺ _{-9.27}	90.5 ⁺ _{-15.2}	75.3 ⁺ _{-19.15}	**
Ac.Cam(%)	10.1 ⁺ _{-15.7}	20.5 ⁺ _{-19.3}	--	16.01 ⁺ _{-13.7}	7.8 ⁺ _{-12.9}	5.04 ⁺ _{-9.27}	9.48 ⁺ _{-15.23}	24.6 ⁺ _{-19.1}	**
Sat.Al (%)	9.54 ⁺ _{-14.8}	19.4 ⁺ _{-18.5}	--	14.01 ⁺ _{-12.3}	6.85 ⁺ _{-11.01}	3.72 ⁺ _{-6.6}	8.48 ⁺ _{-14.4}	21.4 ⁺ _{-16.98}	**
Año de uso de Suelo	14.3 ⁺ _{-3.61}	10.2 ⁺ _{-9.10}	17.5 ⁺ _{-2.8}	9.0 ⁺ _{-8.62}	12.3 ⁺ _{-8.3}	9.8 ⁺ _{-7.3}	9.0 ⁺ _{-6.9}	12.5 ⁺ _{-2.8}	°

Signification codes: 0 < *** < 0.001 < ** < 0.01 < * < 0.05 < . < 0.1 < ° < 1. AGR1Carbofuran-Azoxystrobin-Glifosato, AGR2Carbofuran-Carbendazim-Glifosato, AGR3Carbofuran-Clorotalonil-Glifosato, AGR4 Carbofuran-Tiabendazol-Glifosato, AGR5 Cypermethrin-Carbendazim-Glifosato, AGR 6 Cypermethrin-Clorotalonil-Glifosato, AGR 7 Cypermethrin-Tiabendazol-Glifosato, AGR 8 Lufenuron-Carbendazim-Glifosato.

Los valores de pH varían desde un mínimo de 4.68 en AGR8 hasta un máximo de 6.3 en AGR3. AGR4 presenta un valor intermedio de 5.53 con una desviación estándar baja (± 0.1), lo que sugiere una relativa estabilidad en los niveles de pH en este grupo de agroquímicos. AGR3, con el pH más alto, podría indicar un suelo menos ácido, mientras que AGR8 muestra una mayor acidez. La variabilidad del pH entre tratamientos refleja cómo los agroquímicos pueden alterar significativamente la acidez del suelo, lo cual es crítico para la disponibilidad de nutrientes y la salud microbiana del suelo. El pH más bajo en tratamientos con mayor duración y combinaciones específicas sugiere un impacto acidificante prolongado de componentes como el Glifosato y el Azoxystrobin (Martinez et al., 2023). El pH del suelo es un factor crítico que influye en la disponibilidad de nutrientes y en la actividad microbiana. AGR8, con el pH más bajo, podría estar mostrando los efectos acumulativos del uso de Cypermethrin y Tiabendazol, ambos conocidos por su capacidad de acidificar el suelo, lo que puede reducir la disponibilidad de nutrientes esenciales como el fósforo y el potasio (Gomes et al., 2022). Por otro lado, el pH más alto en AGR3 sugiere que la combinación de Carbofuran-Clorotalonil-Glifosato podría estar neutralizando la acidez del suelo, posiblemente debido a la menor influencia acidificante de Clorotalonil comparado con otros fungicidas (Blanco-Canqui & Lal, 2009). La estabilidad observada en AGR8 indica que Lufenuron y Carbendazim podrían estar contribuyendo a un balance más estable del pH, aunque el uso continuo de Glifosato aún puede representar un riesgo a largo plazo de acidificación progresiva (Duke & Powles, 2008). En general, mantener un pH equilibrado es esencial para evitar la toxicidad de micronutrientes y promover una actividad microbiana saludable.

En el suelo, la materia orgánica (MO) tiene fluctuaciones importantes, con valores que van desde un mínimo de 2.94% en AGR4 hasta un máximo de 3.68% en AGR6. La desviación estándar es baja en todas las situaciones, lo que señala una distribución más o menos uniforme de la materia orgánica en los suelos analizados. AGR3 presenta un valor intermedio de 3.15%, lo que indica una acumulación moderada de materia orgánica en este tratamiento. La fluctuación en la materia orgánica entre los tratamientos diversos señala de qué manera los agroquímicos tienen la capacidad de influir en la retención de nutrientes y en la descomposición de lo orgánico. Un contenido de materia orgánica reducido en tratamientos con Carbendazim y Cypermethrin sugiere una posible inhibición de la actividad biológica del suelo y de la descomposición de restos vegetales (Pérez, 2023). La materia orgánica es fundamental para la fertilidad del suelo porque mejora su estructura, preserva agua y nutrientes y apoya a las actividades de los microorganismos. Podría estar ocurriendo una disminución en AGR2, que

tiene el contenido más bajo de materia orgánica, a causa del impacto negativo del carbofuran y el glifosato. Ambos están relacionados con la disminución de la materia orgánica y la biomasa microbiana (Pelosi et al., 2014). Por otro lado, AGR4, que presenta el mayor contenido de materia orgánica, podría estar beneficiándose de la acción menos disruptiva de Lufenuron en comparación con otros insecticidas, lo que permite una mayor acumulación de residuos orgánicos y una mejor actividad microbiana (Lavelle et al., 2006). AGR3, con un valor intermedio, refleja un balance entre la acumulación de materia orgánica y su descomposición, posiblemente debido a la acción moderada de Tiabendazol y Glifosato en este contexto (Nannipieri et al., 2003). En conclusión, la materia orgánica del suelo es altamente sensible a la combinación de agroquímicos utilizados, y su manejo adecuado es crucial para mantener la salud del suelo.

El contenido de nitrógeno en el suelo varía desde un mínimo de 0.14% en AGR 7 y 2 hasta un máximo de 0.18% en AGR 4 y 6. La desviación estándar es baja en todos los grupos, indicando una distribución relativamente uniforme del nitrógeno en los suelos tratados. AGR4 y 6 muestra un valor ligeramente más alto (0.18%) en comparación con otros grupos. La disminución del nitrógeno en algunas combinaciones de agroquímicos puede reflejar una menor mineralización del nitrógeno debido a la alteración del microbiota del suelo. Esto es especialmente importante, ya que el nitrógeno es indispensable para que las plantas crezcan y para la productividad de la agricultura (Smith, 2022). El nitrógeno es un nutriente fundamental para el desarrollo de las plantas, y el empleo de agroquímicos puede tener un impacto en su presencia en la tierra. AGR 7 y 2, con el contenido más bajo de nitrógeno, podría estar experimentando una reducción en la mineralización del nitrógeno debido al efecto negativo del Carbofuran y Clorotalonil sobre el microbiota del suelo, que son cruciales para este proceso (Sanchez-Bayo & Goka, 2014). Por otro lado, AGR 4 y 6, con el contenido más alto de nitrógeno, sugiere una mejor conservación de este nutriente, posiblemente debido a la menor perturbación del suelo por Lufenuron y la acción moderada de Carbendazim (Wang et al., 2019). La uniformidad observada en AGR4 podría estar relacionada con la acción equilibrada de Tiabendazol, que, aunque puede reducir la actividad microbiana, no parece afectar significativamente la mineralización del nitrógeno (Sharma et al., 2017). En resumen, el manejo del nitrógeno en suelos con cultivos de papa es crucial para la productividad agrícola, y debe ser monitoreado cuidadosamente para evitar deficiencias nutricionales.

Es preocupante la reducción que se ha detectado en las proporciones de nitrógeno y materia orgánica en los suelos tratados con mezclas de Carbendazim y Cypermethrin, ya que

estos componentes son determinantes para preservar la salud de las plantas y la fertilidad del suelo. El suelo pierde la habilidad de almacenar y proveer nutrientes fundamentales cuando se pierde materia orgánica, a la vez que el crecimiento vegetal y la producción de las cosechas pueden verse limitados si se reduce el nitrógeno. El pH también se ve considerablemente alterado, ya que una acidificación puede provocar la liberación de metales tóxicos y cambiar la disponibilidad de nutrientes (Garcia, 2024; Smith, 2022).

Los niveles de fósforo en el suelo varían considerablemente, con valores que van desde un mínimo de 20.1 ppm en AGR3 hasta un máximo de 56.9 ppm en AGR6. AGR7 presenta un valor intermedio de 37.8 ppm, lo que sugiere una disponibilidad moderada de fósforo en este grupo de agroquímicos. El fósforo es un nutriente esencial para la formación de raíces, flores y frutos en las plantas. AGR3, con el menor contenido de fósforo, podría estar sufriendo una baja disponibilidad de este nutriente, posiblemente debido a la fijación del fósforo en formas no disponibles, promovida por la acidificación del suelo causada por Glifosato (Duke & Powles, 2008). En contraste, AGR6, con el mayor contenido de fósforo, sugiere que el uso de Clorotalonil podría estar favoreciendo la disponibilidad de fósforo, posiblemente debido a la menor interacción de este fungicida con los ciclos de nutrientes en comparación con otros productos (Blanco-Canqui & Lal, 2009). La variabilidad que se aprecia en el AGR3 podría deberse a que la aplicación de fertilizantes fosfatados no es uniforme, lo cual impacta la distribución de este nutriente en el suelo (Simon-Delso et al., 2015). El manejo apropiado del fósforo es fundamental para optimizar la productividad de las cosechas de papa y debe tenerse en cuenta en el marco de los agroquímicos utilizados con el fin de prevenir su exceso o escasez en el terreno.

El contenido de potasio en el suelo muestra un rango considerable, desde 84.3 ppm en AGR8 hasta 152.1 ppm en AGR6. AGR4 tiene un valor intermedio de 117.9 ppm, lo que sugiere una distribución más equilibrada de potasio en este grupo de agroquímicos. La desviación estándar indicanda una variabilidad considerable en la disponibilidad de potasio en los tratamientos. El potasio es fundamental para la regulación osmótica y la fotosíntesis en las plantas. AGR8, con el contenido más bajo de potasio, podría estar mostrando los efectos negativos de la interacción de Cypermethrin y Carbendazim, que pueden reducir la disponibilidad de potasio al afectar la estructura del suelo y la actividad microbiana (Pelosi et al., 2014). En cambio, AGR6 presenta el contenido más alto de potasio, lo que indica una mayor accesibilidad a este nutriente. Esto podría ser resultado de la acción estabilizadora del Carbendazim sobre la estructura del suelo (Nannipieri et al., 2003) y de que el Lufenuron

provoca menos alteraciones en el terreno. La variabilidad observada en AGR7 podría estar relacionada con la acción de Tiabendazol, que, aunque efectivo como fungicida, puede alterar la dinámica de nutrientes, afectando la disponibilidad de potasio (Lavelle et al., 2006). En resumen, la gestión del potasio es crucial para la salud y productividad del suelo, y su disponibilidad puede verse afectada significativamente por los diferentes agroquímicos utilizados.

La fertilidad del suelo se puede determinar a partir de los niveles de fósforo y potasio. Las modificaciones que se han notado pueden derivarse de cambios en la habilidad del suelo para conservar estos nutrientes, los cuales se vieron alterados debido a una variación en el pH y a una merma de materia orgánica. Para que las plantas se desarrollen y utilicen el agua de manera eficaz, estos nutrientes son esenciales (Lee & Kim, 2024). En AGR3, la cantidad de cadmio en el suelo es de 0.1 ppm como mínimo y en AGR6, es de 0.43 ppm como máximo. AGR2 muestra un valor promedio de cadmio de 0.28 ppm con una desviación estándar de ± 0.1 , lo que sugiere que la distribución del cadmio en este grupo es bastante constante. AGR3, que tiene el contenido más bajo, indica una menor acumulación de este metal pesado. El aumento en los niveles de cadmio en ciertos tratamientos es alarmante debido a su alta toxicidad y potencial para la bioacumulación. Esto podría ser exacerbado por el uso de ingredientes como Clorotalonil y Carbendazim, que pueden aumentar la movilidad de metales pesados en el suelo (García, 2024). El cadmio es un metal pesado que resulta tóxico y tiene la capacidad de acumularse en el suelo a causa del empleo de determinadas sustancias químicas para la agricultura, lo cual supone un peligro tanto para la salud humana como para la biodiversidad del suelo. Dado que AGR6 tiene la mayor cantidad de cadmio, podría estar reflejando cómo este metal se acumula debido al uso continuo de Tiabendazol y Cypermethrin, que son dos sustancias reconocidas por su capacidad para aumentar la concentración de metales pesados en el suelo (Gomes et al., 2022). Dado que los organismos del suelo reaccionan a la toxicidad del cadmio (Lavelle et al., 2006), esta acumulación puede disminuir la fertilidad del suelo y la actividad de los microorganismos. El AGR3, que tiene el contenido de cadmio más bajo, indica que los elementos químicos como el Clorotalonil tienen un menor impacto en la movilización de metales pesados (Pelosi et al., 2014). La presencia de Glifosato sigue siendo un riesgo potencial para la movilización de cadmio en el suelo, según Duke y Powles (2008). Esto significa que, aunque Lufenuron puede tener un efecto menos negativo en la acumulación de cadmio, este último permanece presente en AGR6.

La capacidad de intercambio catiónico (CIC) varía significativamente entre los grupos,

desde un mínimo de 7.4 meq/100g en AGR2 hasta un máximo de 17.3 meq/100g en AGR3. AGR1 tiene un valor intermedio de 11.1 meq/100g, lo que sugiere una capacidad moderada para retener nutrientes en este grupo de suelos. La CIC es un indicador clave de la fertilidad del suelo, ya que determina la capacidad del suelo para retener y suministrar nutrientes esenciales a las plantas. AGR2, con la CIC más baja, podría estar experimentando una reducción en la retención de nutrientes debido al impacto del Cypermethrin, que puede alterar la estructura del suelo y reducir la disponibilidad de sitios de intercambio catiónico (Pelosi et al., 2014). En contraste, AGR3, con la CIC más alta, podría estar beneficiándose de una menor perturbación del suelo por Clorotalonil y una mejor retención de nutrientes (Blanco-Canqui & Lal, 2009). La CIC moderada en AGR2 indica que, a pesar de que el suelo cuenta con una capacidad aceptable para almacenar nutrientes, la presencia de Glifosato podría estar afectando esta habilidad al tener un impacto negativo sobre la materia orgánica y la estructura del suelo (Duke & Powles, 2008). CIC, en términos generales, es un parámetro esencial para la productividad de la agricultura. Si se gestiona correctamente, puede contribuir a reducir el impacto perjudicial de los agroquímicos sobre la fertilidad del suelo.

Los cationes intercambiables muestran variaciones significativas en el suelo. El calcio (Ca) varía desde 4.46 Cmol (+) / Kg en AGR8 hasta 16.6 Cmol (+) / Kg en AGR3. El magnesio (Mg) fluctúa entre 0.42 Cmol (+) / Kg en AGR2 y 2.53 Cmol (+) / Kg en AGR3. El potasio (K) muestra una variación similar a la del Ca, mientras que el sodio (Na) y el aluminio (Al) tienen valores más estables, con el aluminio siendo más alto en AGR8 (0.91 Cmol (+) / Kg) y más bajo en AGR6 (0.17 Cmol (+) / Kg). Para que los nutrientes del suelo se mantengan equilibrados y las plantas estén sanas, son fundamentales los cationes intercambiables. El calcio, por ejemplo, es fundamental para la estructura celular y la estabilidad del suelo; su alta concentración en AGR3 sugiere un suelo con buena estructura y capacidad para resistir la acidificación (Nannipieri et al., 2003). En contraposición, la disminución de la concentración de calcio en AGR8 podría asociarse con la disminución de la capacidad de intercambio catiónico como consecuencia del empleo de Clorotalonil y Cipermetrina (Gomes et al., 2022). El magnesio, necesario para la fotosíntesis, es más bajo en AGR2, lo que podría afectar la producción agrícola si no se maneja adecuadamente, mientras que su alta concentración en AGR3 indica un buen balance nutricional (Lavelle et al., 2006). El potasio, crucial para la regulación osmótica, muestra variaciones que reflejan la influencia de los agroquímicos en la disponibilidad de este nutriente; una alta disponibilidad en AGR6 sugiere un suelo bien gestionado, mientras que niveles más bajos en AGR3 podrían indicar una posible deficiencia

debido a la interacción de los agroquímicos con la materia orgánica (Pelosi et al., 2014). La estabilidad del sodio y el aluminio en la mayoría de los grupos refleja una menor influencia de los agroquímicos en estos cationes, aunque el aumento del aluminio en AGR7 podría ser un indicador de acidificación del suelo, un efecto común del Glifosato (Duke & Powles, 2008).

Los agroquímicos pueden afectar la Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) del suelo de varias maneras. Por ejemplo, el uso de Glifosato, conocido por su capacidad para quelar cationes esenciales como el Calcio y el Magnesio, puede disminuir la CIC al hacer que estos nutrientes sean menos disponibles para las plantas. Además, ingredientes como el Clorotalonil y el Azoxystrobin pueden alterar el microbiota del suelo, cuya salud es vital para mantener una buena estructura del suelo y una CIC alta. Estas alteraciones pueden llevar a la disminución de la fertilidad del suelo y a un aumento de la lixiviación de nutrientes, especialmente en suelos con uso prolongado de estos compuestos (Garcia, 2024; Smith, 2022). Ingredientes activos como el Glifosato y el Clorotalonil tienen un efecto en la acidez del suelo, que puede reflejarse en los aumentos de los niveles de Aluminio e Hidrógeno. El Glifosato, en particular, puede liberar iones de hidrógeno durante su descomposición, contribuyendo a la acidificación del suelo. Esta acidificación puede solubilizar el aluminio presente en las arcillas del suelo, aumentando su concentración en la solución del suelo y potencialmente causando toxicidad en las plantas. El aumento de la toxicidad del aluminio puede disminuir la capacidad de las plantas para obtener nutrientes y agua similares, además de frenar el desarrollo de las raíces (Pérez, 2023; Martínez et al., 2023).

Las bases cambiables varían considerablemente, con un valor mínimo de 75.3% en AGR8 y un máximo de 100% en AGR3. AGR1 presenta un valor intermedio de 89.1%, lo que sugiere una moderada capacidad de intercambio de bases en este grupo de suelos. Las bases cambiantes indican la capacidad del suelo para proporcionar a las plantas los nutrientes que necesitan. Con un 100% de bases cambiables, AGR3 muestra un suelo con gran capacidad para retener y proporcionar nutrientes, lo cual es beneficioso para la plantación de papa (Blanco-Canqui & Lal, 2009). Por otro lado, AGR7, que tiene el porcentaje más bajo, podría estar evidenciando una disminución en la capacidad de retención de nutrientes a causa del efecto combinado de Tiabendazol y Cipermetrina, los cuales pueden alterar la estructura del suelo y disminuir su capacidad de intercambio (Lavelle et al., 2006). La capacidad intermedia en AGR6 sugiere que, pese a que el suelo tiene una capacidad aceptable para conservar nutrientes, la presencia de Glifosato puede estar perjudicando la estabilidad de las bases intercambiables y disminuyendo la fertilidad del suelo en términos de largo plazo (Duke & Powles, 2008). En

general, la capacidad de intercambio de bases es esencial para preservar la fertilidad del suelo, y su correcta gestión puede contribuir a atenuar los impactos adversos de los agroquímicos.

La acidez cambiante presenta una gran variabilidad, desde 5.04 % en AGR6 hasta 20.5 en AGR2. AGR1 muestra un valor de acidez cambiante intermedio de 10.1 %, lo que indica una acidez moderada en el suelo tratado con este grupo de agroquímicos. La acidez intercambiable es una variable crucial que puede afectar la cantidad de nutrientes disponibles y la toxicidad de algunos metales en el suelo. AGR2, que tiene la mayor acidez intercambiable, indica que el uso combinado de Carbofuran y Glifosato está elevando la acidez del suelo. Esto puede disminuir la cantidad de nutrientes disponibles en el suelo, como el fósforo, y aumentar la solubilidad de metales peligrosos como el aluminio (Sanchez-Bayo & Goka, 2014). En contraposición, AGR6, que tiene la menor acidez intercambiable, señala una influencia acidificante más baja, lo cual es propicio para que los nutrientes esenciales estén disponibles (Nannipieri et al., 2003). El hecho de que la acidez intermedia esté presente en AGR1 indica que, a pesar de que el Glifosato continúa siendo un riesgo para la acidificación, los efectos podrían estar atenuados gracias a la existencia de Carbendazim y Lufenuron (Duke & Powles, 2008). Para prevenir problemas de toxicidad y preservar la fertilidad del suelo en sistemas agrícolas sustentables, es fundamental manejar apropiadamente la acidez intercambiable.

4.2.2. Comparación de medias múltiples de los indicadores y años más significativas

4.2.2.1. pH

Tabla 21. Medias múltiples significativa del pH según indigente activo y año de uso

Categoría	Medias LS	Error estándar	Límite inferior (95%)	Límite superior (95%)	Grupos					
Ingrediente activo-Lufenuron-Carbendazim-Glifosato*Años-15	4.220	0.328	3.546	4.894	A					
Ingrediente activo-Carbofuran-Tiabendazol-Glifosato*Años-5	4.395	0.328	3.721	5.069	A	B				
Ingrediente activo-Cypermethrin-Carbendazim-Glifosato*Años-2	4.765	0.328	4.091	5.439	A	B				
Ingrediente activo-Carbofuran-Carbendazim-Glifosato*Años-5	4.965	0.328	4.291	5.639	A	B	C			
Ingrediente activo-Cypermethrin-Tiabendazol-Glifosato*Años-3	5.040	0.328	4.366	5.714	A	B	C			
Ingrediente activo-Carbofuran-Tiabendazol-Glifosato*Años-2	5.090	0.328	4.416	5.764	A	B	C			
Ingrediente activo-Carbofuran-Azoxystrobin-Glifosato*Años-15	5.165	0.328	4.491	5.839	A	B	C	D		
Ingrediente activo-Carbofuran-Carbendazim-Glifosato*Años-3	5.305	0.232	4.829	5.781	A	B	C	D	E	
Ingrediente activo-Carbofuran-Azoxystrobin-Glifosato*Años-10	5.320	0.328	4.646	5.994	A	B	C	D	E	
Ingrediente activo-Cypermethrin-Tiabendazol-Glifosato*Años-15	5.465	0.328	4.791	6.139	A	B	C	D	E	
Ingrediente activo-Lufenuron-Carbendazim-Glifosato*Años-10	5.505	0.328	4.831	6.179	A	B	C	D	E	
Ingrediente activo-Carbofuran-Carbendazim-Glifosato*Años-15	5.580	0.328	4.906	6.254	A	B	C	D	E	
Ingrediente activo-Cypermethrin-Clorotalonil-Glifosato*Años-20	5.595	0.328	4.921	6.269	A	B	C	D	E	
Ingrediente activo-Cypermethrin-Clorotalonil-Glifosato*Años-13	5.610	0.328	4.936	6.284	A	B	C	D	E	
Ingrediente activo-Cypermethrin-Carbendazim-Glifosato*Años-20	5.680	0.328	5.006	6.354	A	B	C	D	E	
Ingrediente activo-Carbofuran-Clorotalonil-Glifosato*Años-20	5.740	0.328	5.066	6.414	A	B	C	D	E	
Ingrediente activo-Carbofuran-Carbendazim-Glifosato*Años-25	5.780	0.328	5.106	6.454	A	B	C	D	E	
Ingrediente activo-Cypermethrin-Clorotalonil-Glifosato*Años-12	5.905	0.328	5.231	6.579	A	B	C	D	E	
Ingrediente activo-Cypermethrin-Clorotalonil-Glifosato*Años-2	6.088	0.232	5.611	6.564		B	C	D	E	
Ingrediente activo-Carbofuran-Azoxystrobin-Glifosato*Años-18	6.150	0.328	5.476	6.824		B	C	D	E	
Ingrediente activo-Cypermethrin-Carbendazim-Glifosato*Años-15	6.650	0.328	5.976	7.324			C	D	E	
Ingrediente activo-Carbofuran-Clorotalonil-Glifosato*Años-15	6.925	0.328	6.251	7.599				D	E	
Ingrediente activo-Carbofuran-Tiabendazol-Glifosato*Años-20	7.115	0.328	6.441	7.789					E	

La Tabla 21 presenta los valores medios del pH del suelo, agrupados por diferentes combinaciones de ingredientes activos y años de uso del suelo. Los valores de pH varían significativamente entre los diferentes grupos, con un rango que va desde 4.220 en el grupo Carbofuran-Tiabendazol-Glifosato a 15 años hasta 7.115 en el grupo Carbofuran-Tiabendazol-Glifosato a 20 años. Los valores de pH más bajos se relacionan con períodos de uso del suelo más prolongados (15 años), mientras que los valores más altos corresponden a períodos de uso más breves. El pH del suelo es un factor crucial que afecta la actividad de los microorganismos y la disponibilidad de nutrientes. Los resultados indican que el uso prolongado de combinaciones de agroquímicos, particularmente Carbofuran-Tiabendazol-Glifosato, tiende a reducir significativamente el pH del suelo, lo que puede llevar a una acidificación progresiva (Duke & Powles, 2008). Este efecto es particularmente pronunciado en suelos con 15 años de uso, donde el pH es considerablemente más bajo. Es alarmante la acidificación del suelo, ya que tiene el potencial de incrementar la solubilidad de metales dañinos como el aluminio, lo cual resulta nocivo para los microorganismos y las plantas del terreno (Gomes et al., 2022). En contraste, el aumento del pH observado en suelos con 20 años de uso podría indicar una disminución en la influencia de los agroquímicos o un cambio en las prácticas de manejo que ayudan a neutralizar la acidez, como la aplicación de cal (Pelosi et al., 2014). En este escenario, para preservar la salud del suelo a largo plazo (Blanco-Canqui & Lal, 2009), es esencial tomar en cuenta estrategias de gestión que reduzcan la acidificación del terreno, tales como emplear rotación de cultivos y enmiendas orgánicas.

4.2.2.2. Mo (%)

Tabla 22. Medias múltiples significativa del Materia orgánica según indigente activo y año de uso

Categoría	Medias LS	Error estándar	Límite inferior (95%)	Límite superior (95%)	Grupos	
Ingrediente activo-Carbofuran-Carbendazim-Glifosato*Años-25	1.785	0.414	0.935	2.635	A	
Ingrediente activo-Carbofuran-Azoxystrobin-Glifosato*Años-10	2.265	0.414	1.415	3.115	A	B
Ingrediente activo-Cypermethrin-Tiabendazol-Glifosato*Años-15	2.445	0.414	1.595	3.295	A	B
Ingrediente activo-Cypermethrin-Carbendazim-Glifosato*Años-15	2.695	0.414	1.844	3.545	A	B
Ingrediente activo-Carbofuran-Carbendazim-Glifosato*Años-3	2.956	0.293	2.355	3.557	A	B
Ingrediente activo-Carbofuran-Clorotalonil-Glifosato*Años-15	3.024	0.414	2.173	3.874	A	B
Ingrediente activo-Carbofuran-Tiabendazol-Glifosato*Años-20	3.053	0.414	2.202	3.903	A	B
Ingrediente activo-Cypermethrin-Carbendazim-Glifosato*Años-2	3.199	0.414	2.348	4.049	A	B
Ingrediente activo-Cypermethrin-Tiabendazol-Glifosato*Años-3	3.219	0.414	2.369	4.069	A	B
Ingrediente activo-Lufenuron-Carbendazim-Glifosato*Años-10	3.236	0.414	2.386	4.086	A	B
Ingrediente activo-Cypermethrin-Carbendazim-Glifosato*Años-20	3.238	0.414	2.387	4.088	A	B
Ingrediente activo-Carbofuran-Clorotalonil-Glifosato*Años-20	3.290	0.414	2.440	4.140	A	B
Ingrediente activo-Lufenuron-Carbendazim-Glifosato*Años-15	3.305	0.414	2.455	4.155	A	B
Ingrediente activo-Cypermethrin-Clorotalonil-Glifosato*Años-20	3.400	0.414	2.550	4.250	A	B
Ingrediente activo-Cypermethrin-Clorotalonil-Glifosato*Años-2	3.465	0.293	2.864	4.066	A	B
Ingrediente activo-Carbofuran-Carbendazim-Glifosato*Años-5	3.485	0.414	2.635	4.335	A	B
Ingrediente activo-Carbofuran-Carbendazim-Glifosato*Años-15	3.531	0.414	2.681	4.381	A	B
Ingrediente activo-Carbofuran-Azoxystrobin-Glifosato*Años-15	3.606	0.414	2.755	4.456	A	B
Ingrediente activo-Cypermethrin-Clorotalonil-Glifosato*Años-13	3.620	0.414	2.769	4.470	A	B
Ingrediente activo-Carbofuran-Tiabendazol-Glifosato*Años-5	3.635	0.414	2.784	4.485	A	B
Ingrediente activo-Cypermethrin-Clorotalonil-Glifosato*Años-12	3.707	0.414	2.856	4.557	A	B
Ingrediente activo-Carbofuran-Azoxystrobin-Glifosato*Años-18	3.939	0.414	3.089	4.789	A	B
Ingrediente activo-Carbofuran-Tiabendazol-Glifosato*Años-2	4.375	0.414	3.525	5.225		B

La Tabla 22 presenta los promedios del contenido de materia orgánica en el terreno, organizados por combinación de ingredientes activos y por años de uso del terreno. Los niveles de materia orgánica oscilan entre el 1,785% en Carbofurano-Carbendazim-Glifosato a 25 años y el 4,375% en Cipermetrina-Tiabendazol-Glifosato a dos años. Por lo general, los períodos de uso del suelo más cortos están relacionados con los niveles más altos de materia orgánica y viceversa, los niveles más bajos se relacionan con los períodos de uso más largos. La fertilidad del suelo depende de la materia orgánica, pues esto tiene un efecto sobre la actividad microbiana, la estructura del suelo y su capacidad para retener agua. Los hallazgos indican que la cantidad de materia orgánica tiende a bajar a lo largo del tiempo, sobre todo en los suelos que han sido tratados con mezclas de Carbofurano-Carbendazina-Glifosato durante 25 años. Esto podría ser resultado del rápido análisis de la materia orgánica debido a la larga aplicación de agroquímicos, lo cual disminuye la biomasa microbiana y modifica los ciclos de nutrientes (Lavelle et al., 2006). Los suelos con menos años de uso, como el de Cipermetrina-Tiabendazol-Glifosato a 2 años, presentan una cantidad mucho mayor de materia orgánica. Esto indica que son suelos menos degradados y con más habilidad para sostener cultivos (Nannipieri et al., 2003). Esta tendencia enfatiza la relevancia de prácticas sustentables que preservan o mejoren la cantidad de materia orgánica en el suelo, tales como integrar desechos vegetales y disminuir el empleo de agroquímicos dañinos (Gomes et al., 2022).

4.2.2.3. N (%)

Tabla 23. Medias múltiples significativa del Nitrógeno según ingrediente activo y año de uso

Categoría	Medias LS	Error estándar	Límite inferior (95%)	Límite superior (95%)	Grupos	
Ingrediente activo-Carbofuran-Carbendazim-Glifosato*Años-25	0.089	0.020	0.047	0.130	A	
Ingrediente activo-Carbofuran-Azoxystrobin-Glifosato*Años-10	0.124	0.020	0.082	0.165	A	B
Ingrediente activo-Cypermethrin-Tiabendazol-Glifosato*Años-15	0.129	0.020	0.087	0.170	A	B
Ingrediente activo-Cypermethrin-Carbendazim-Glifosato*Años-15	0.135	0.020	0.094	0.176	A	B
Ingrediente activo-Carbofuran-Carbendazim-Glifosato*Años-3	0.149	0.014	0.120	0.178	A	B
Ingrediente activo-Carbofuran-Clorotalonil-Glifosato*Años-15	0.152	0.020	0.111	0.193	A	B
Ingrediente activo-Carbofuran-Tiabendazol-Glifosato*Años-20	0.155	0.020	0.113	0.196	A	B
Ingrediente activo-Cypermethrin-Carbendazim-Glifosato*Años-2	0.161	0.020	0.119	0.202	A	B
Ingrediente activo-Cypermethrin-Tiabendazol-Glifosato*Años-3	0.161	0.020	0.120	0.202	A	B
Ingrediente activo-Cypermethrin-Carbendazim-Glifosato*Años-20	0.164	0.020	0.122	0.205	A	B
Ingrediente activo-Lufenuron-Carbendazim-Glifosato*Años-15	0.170	0.020	0.129	0.211	A	B
Ingrediente activo-Carbofuran-Clorotalonil-Glifosato*Años-20	0.172	0.020	0.131	0.213	A	B
Ingrediente activo-Lufenuron-Carbendazim-Glifosato*Años-10	0.175	0.020	0.133	0.216	A	B
Ingrediente activo-Carbofuran-Carbendazim-Glifosato*Años-5	0.178	0.020	0.137	0.219	A	B
Ingrediente activo-Cypermethrin-Clorotalonil-Glifosato*Años-2	0.178	0.014	0.149	0.208	A	B
Ingrediente activo-Carbofuran-Azoxystrobin-Glifosato*Años-15	0.179	0.020	0.138	0.220	A	B
Ingrediente activo-Carbofuran-Carbendazim-Glifosato*Años-15	0.181	0.020	0.139	0.222	A	B
Ingrediente activo-Carbofuran-Tiabendazol-Glifosato*Años-5	0.182	0.020	0.140	0.223	A	B
Ingrediente activo-Cypermethrin-Clorotalonil-Glifosato*Años-12	0.186	0.020	0.145	0.227	A	B
Ingrediente activo-Cypermethrin-Clorotalonil-Glifosato*Años-20	0.193	0.020	0.152	0.234	A	B
Ingrediente activo-Carbofuran-Azoxystrobin-Glifosato*Años-18	0.199	0.020	0.158	0.240	A	B
Ingrediente activo-Cypermethrin-Clorotalonil-Glifosato*Años-13	0.207	0.020	0.165	0.248		B
Ingrediente activo-Carbofuran-Tiabendazol-Glifosato*Años-2	0.217	0.020	0.176	0.258		B

La Tabla 23 presenta las medias del contenido de nitrógeno en el suelo, considerando las combinaciones de ingredientes activos y años de uso. Los valores de nitrógeno oscilan entre 0.089% en Carbofuran-Carbendazim-Glifosato a 25 años y 0.217% en Cypermethrin-Tiabendazol-Glifosato a 2 años. Al Igual que con la materia orgánica, los valores más altos de nitrógeno se relacionan con terrenos que tienen menos años de uso, mientras que los más bajos están vinculados a períodos de uso más largos. El nitrógeno es un nutriente fundamental para el desarrollo de las plantas, por lo que su presencia en la tierra es un indicador importante de la fertilidad del suelo. Los resultados indican que el contenido de nitrógeno disminuye significativamente con el tiempo en suelos tratados con Carbofuran-Carbendazim-Glifosato, lo que podría ser consecuencia de la reducción en la actividad microbiana que participa en la mineralización del nitrógeno (Sanchez-Bayo & Goka, 2014). Este patrón de disminución es consistente con la tendencia observada en la materia orgánica, ya que la pérdida de materia orgánica suele ir acompañada de una reducción en el contenido de nitrógeno (Pelosi et al., 2014). En contraste, suelos con menos años de uso, como en el caso de Cypermethrin-Tiabendazol-Glifosato a 2 años, presentan niveles más altos de nitrógeno, lo que sugiere una menor alteración del ciclo del nitrógeno y una mayor fertilidad del suelo (Nannipieri et al., 2003). Para contrarrestar las consecuencias adversas de la utilización prolongada de agroquímicos (Blanco-Canqui & Lal, 2009), estos hallazgos subrayan la importancia de métodos de gestión que preservan la fertilidad del suelo, como es el caso de la rotación de cultivos y la incorporación de fertilizantes orgánicos.

La Tabla 24 presenta las medias de cadmio en el suelo, según las combinaciones de ingredientes activos y años de uso del suelo. Los valores de cadmio varían desde 0.110 ppm en Carbofuran-Clorotalonil-Glifosato a 20 años hasta 0.610 ppm en Cypermethrin-Clorotalonil-Glifosato a 25 años. Se nota que los niveles más elevados de cadmio se relacionan con fases en las que la tierra ha sido utilizada por un largo tiempo, especialmente en grupos que contienen cipermetrina. El cadmio es un metal pesado y tóxico que, por el uso sostenido de agroquímicos, tiene la posibilidad de acumularse en el suelo. Esto supone una amenaza para la salud de los seres humanos que consumen productos agrícolas, así como para las plantas y los microorganismos presentes en el suelo. Los hallazgos indican que, con el paso del tiempo, los suelos que han sido tratados con Cipermetrina-Clorotalonil-Glifosato presentan un incremento en la cantidad de cadmio. Esto implica que estos agroquímicos podrían estar favoreciendo la movilización y acumulación de cadmio en el terreno (Gomes et al., 2022). Este patrón es inquietante porque altos niveles de cadmio pueden disminuir la actividad de los microorganismos y limitar el acceso a nutrientes vitales como el fósforo y el potasio (Lavelle et al., 2006). Por otro lado, los niveles más bajos de cadmio observados en suelos tratados con Carbofuran-Clorotalonil-Glifosato a 20 años sugieren una menor acumulación de este metal pesado, lo que podría deberse a una menor capacidad de estos ingredientes activos para movilizar cadmio (Duke & Powles, 2008). Es fundamental manejar el cadmio en la tierra para garantizar la seguridad alimentaria y prevenir la toxicidad, y debe incluir la reducción del uso de agroquímicos que contribuyen a su acumulación, junto con prácticas que promuevan la remediación del suelo (Blanco-Canqui & Lal, 2009).

Las Tablas 21 a 24 presentan resultados estadísticos de pruebas de Tukey, que agrupan tratamientos según su impacto significativo en diferentes parámetros del suelo. Estos análisis revelan cómo la permanencia prolongada de diversos agroquímicos afecta las propiedades del suelo.

Se ha evidenciado que la utilización constante de ingredientes activos como Glifosato, Azoxistrobina y Carbofurano tiene un efecto acumulativo en lo que respecta a la acidificación del terreno, una disminución de la materia orgánica y un cambio en los niveles de nitrógeno y otros nutrientes importantes. La presencia continua de estas sustancias en el suelo no solo impacta la actividad de los microorganismos y la estructura del mismo, sino también la disponibilidad de nutrientes. Esto puede resultar en una reducción de la fertilidad del suelo y en una disminución de la producción agrícola con el paso del tiempo (Smith, 2022; García, 2024).

Con el aumento de los años de uso de agroquímicos, se observan efectos más severos y

profundos. Por ejemplo, suelos tratados durante más de 15 años con combinaciones de Carbofuran y Azoxystrobin muestran una disminución más notable en el pH y en la materia orgánica en comparación con suelos tratados por períodos más cortos. Esta tendencia es indicativa de la degradación progresiva de la salud del suelo, lo que resulta en una capacidad reducida para recuperarse de la contaminación y el estrés químico (Martinez et al., 2023; Pérez, 2023).

Los ingredientes activos se utilizan durante un periodo largo de tiempo, lo cual causa efectos negativos que generan serios problemas para el medio ambiente y la agronomía. Los resultados de la estadística indican que las prácticas de gestión necesitan ser modificadas para reducir al mínimo el uso constante de agroquímicos y fomentar opciones sostenibles como los biopesticidas o las prácticas de rotación de cultivos, las cuales pueden contribuir a recuperar y conservar la salud del suelo. Asimismo, es fundamental aplicar métodos de remediación del suelo para reducir los impactos acumulativos de los agroquímicos, en particular en zonas con antecedentes de uso intensivo (Lee & Kim, 2024).

4.2.3. Análisis de componentes principales

Tabla 25. Tabla de valores propios

	F1	F2	F3	F4	F5	F6
Valor propio	8.004	3.226	2.599	1.956	1.164	0.936
Variabilidad (%)	40.021	16.132	12.993	9.780	5.822	4.681
% acumulado	40.021	56.152	69.145	78.926	84.747	89.429

La Tabla 25 muestra que los factores producidos en suelos de cultivo de papa emplean las agrupaciones químicas de insecticidas, herbicidas y fungicidas, para un total de 19. De acuerdo al análisis metodológico de componentes principales, se escogieron seis factores debido a que tienen una variabilidad acumulada del 89.429%. Esto permite una mejor explicación de la dispersión de parámetros en el plano cartesiano y evita complicaciones durante el análisis de resultados, Los factores 1, 2 y 3 tienen una variabilidad más alta que los otros, porque cuentan con un mayor número de parámetros relacionados. A medida que se incorporan más factores, la variabilidad disminuye progresivamente debido a la reducción del número de parámetros relacionados en cada uno de ellos. Esto provoca que la variabilidad acumulada llegue rápidamente hasta el 69.145% en el tercer factor, pero aumenta cada vez más lentamente en los factores subsiguientes.

Tabla 26. Carga Factorial y cosenos cuadrados de los indicadores

Factor	Indicador	Carga factorial	Cosenos cuadrados
F1	Años	0.505	0.255
	Arcilla (%)	0.607	0.369
	pH	0.775	0.600
	CIC	0.708	0.501
	Ca Cmol(+)/kg	0.916	0.839
	Mg Cmol(+)/kg	0.910	0.828
	Al Cmol(+)/kg	-0.879	0.772
	H Cmol(+)/kg	-0.877	0.769
	Bas. Camb (%)	0.908	0.825
	Ac. Camb (%)	-0.908	0.825
F2	Arena (%)	-0.684	0.467
	Limo (%)	0.716	0.512
	P (ppm)	-0.640	0.410
	Na Cmol(+)/kg	0.644	0.415
F3	M.O (%)	0.761	0.579
	N (%)	0.742	0.550
F4	CICe	0.679	0.461
	K (ppm)	0.783	0.613
F6	K Cmol(+)/kg	0.642	0.412
	Cd (ppm)	0.515	0.265

Los resultados del análisis de componentes principales, particularmente las cargas factoriales y los cosenos cuadrados de los indicadores que constituyen cada factor, se muestran en la Tabla 26. Esta clase de análisis es esencial para determinar las relaciones que subyacen entre varias variables y disminuir la dimensionalidad del conjunto de datos, centrándose en aquellos factores que explican la mayor parte de la varianza.

El Factor 1 abarca el pH, el CIC, el Ca intercambiable, el Mg intercambiable y otros elementos que están relacionados con la capacidad de retener nutrientes y la fertilidad del suelo. El segundo factor trata temas como el limo, la arena y el fosfato, los cuales muestran la textura del suelo y la accesibilidad a nutrientes. Los elementos y nutrientes a continuación, como el potasio, el nitrógeno y el cadmio, tienen un impacto directo en la salud del suelo y en la seguridad alimentaria.

El Factor 1 está compuesto por los indicadores Años de uso de suelo, Arcilla (%), pH, CIC, Ca, Mg, Al, H, Bas.Camb. (%), y Ac. Camb. (%). Este factor tiene una carga factorial alta en indicadores como Ca (0.916), Mg (0.910), Bas.Camb. (0.908), y una carga negativa en H (-0.877) y Al (-0.879). Los cosenos cuadrados indican que estos indicadores tienen una fuerte correlación con F1, con valores que van desde 0.501 en CIC hasta 0.828 en Mg. El Factor 1 muestra una fuerte relación con el pH, CIC, y cationes como el calcio y el magnesio, indicadores críticos de la salud del suelo y la capacidad de retención de nutrientes. La fuerte relación entre la capacidad de intercambio catiónico (CIC) y la acidez del suelo, indican la fertilidad del suelo. Una alta CIC, junto con un balance adecuado de cationes como Ca y Mg, es esencial para mantener la fertilidad del suelo y la disponibilidad de nutrientes (Blanco-Canqui & Lal, 2009). Los agroquímicos, como el Azoxystrobin y el Glifosato, tienen un efecto negativo en estos indicadores, ya que pueden disminuir la CIC al modificar el microbiota del suelo y la cantidad de nutrientes disponibles. Según Martínez et al. (2023), la acidificación producida puede liberar iones metálicos tóxicos, como el aluminio, lo que puede aumentar la toxicidad en las raíces y disminuir la eficacia de absorción de nutrientes. La existencia de grandes cargas negativas en Al y H indica que este elemento también incluye los impactos negativos de la acidificación del suelo, los cuales pueden intensificarse con el uso continuo de agroquímicos como el Glifosato, famoso por su capacidad para acidificar la tierra y mover metales como el aluminio (Duke & Powles, 2008). La correlación positiva entre la arcilla y los años de uso con este elemento indica que los suelos más arcillosos y con una utilización más larga pueden sufrir más por la acidificación y la acumulación de cationes, lo cual puede resultar en un deterioro gradual del

terreno (Gomes et al., 2022). Este elemento es esencial porque muestra cuán importante es sostener un balance apropiado de cationes y manejar la acidez del suelo para conservar su salud a largo plazo.

El Factor 2 comprende los indicadores de Na, K, Limo (%), Arena (%) y P (ppm), con elevadas cargas factoriales en: Arena (-0.684), P (-0.640) y Limo (0.716). Los cosenos cuadrados de estos indicadores son distintos; el P tiene un valor de 0.410, mientras que el Limo tiene uno más alto (0.467). El segundo factor parece estar asociado sobre todo con la textura del terreno (limo y arena) y la presencia de sodio y fósforo. Un elemento esencial que afecta la retención de nutrientes y agua es la textura del suelo. Según Lavelle y colaboradores (2006), los terrenos con un alto contenido de arena, como indica la carga negativa en Arena, suelen tener una capacidad reducida para almacenar nutrientes y agua. Esto puede provocar una lixiviación más alta de elementos como el sodio y el fósforo, particularmente cuando se utilizan agroquímicos intensivamente. El hecho de que el fósforo tenga una relación negativa con este elemento podría señalar que, en suelos arenosos, donde la capacidad para retener nutrientes es escasa y el fósforo puede ser fácilmente lixiviado o inmovilizado (Pelosi et al., 2014), su disponibilidad se reduce. Es crucial este factor para comprender la interacción entre la textura del suelo y la administración de nutrientes, así como el ajuste que debe hacerse en el manejo del suelo para mejorar la retención de nutrientes vitales, particularmente en suelos tratados con agroquímicos que tienen el potencial de modificar su estructura física. Los agroquímicos que modifican la estructura del terreno, como los fungicidas y los herbicidas, tienen el potencial de compactar o cambiar la composición del suelo, lo que puede perjudicar la permeabilidad y la aireación; estos factores pueden disminuir la disponibilidad de nutrientes fundamentales como los fosfatos. Según Lee & Kim (2024), esta modificación en la textura del terreno puede tener impactos perdurables en la habilidad del suelo para mantener cultivos vigorosos y productivos.

Los indicadores de CICE, MO y N están dominando el Factor 3, con cargas factoriales de 0.645, 0.761 y 0.742 respectivamente. Los cosenos cuadrados son bastante altos, con un MO de 0.579 y un N de 0.551. El Factor 3 recoge la conexión entre el nitrógeno, la materia orgánica y la capacidad efectiva de intercambio catiónico (CICE). La fertilidad del suelo depende en gran medida de la materia orgánica, pues esta incide directamente en la disponibilidad de nitrógeno, un nutriente clave para el crecimiento vegetal (Nannipieri et al., 2003). La fuerte correlación de estas métricas con F3 indica que la CICE y la retención de materia orgánica son esenciales para preservar niveles elevados de nitrógeno en el suelo. Sin embargo, el empleo intensivo de agroquímicos, como se mencionó previamente, puede reducir considerablemente la cantidad de

nitrógeno y materia orgánica en el suelo. Esto, a su vez, provoca una reducción de la CICE y la fertilidad del suelo en un periodo prolongado (Gomes et al., 2022). Este aspecto resalta la relevancia de conservar la materia orgánica por medio de prácticas sustentables, como el uso de enmiendas orgánicas y la rotación de cultivos, con el fin de mantener la habilidad del suelo para almacenar y proveer nitrógeno.

El Factor 4 está compuesto principalmente por Potasio (K ppm) y K Cmol(+)*kg, con cargas factoriales de 0.783 en K ppm y 0.642 en K Cmol(+)/kg. Los cosenos cuadrados para estos indicadores son de 0.613 y 0.413, respectivamente. El Factor 4 refleja la importancia del potasio en la salud del suelo y su disponibilidad en forma intercambiable. El potasio es esencial para muchas funciones fisiológicas de las plantas, incluyendo la regulación osmótica y la síntesis de proteínas (Sanchez-Bayo & Goka, 2014). La alta correlación de este factor con el potasio indica que su disponibilidad está estrechamente ligada a la cantidad de potasio en el suelo y a su forma intercambiable. La gestión adecuada de los niveles de potasio es crucial, especialmente en suelos donde el uso de agroquímicos puede alterar la dinámica de nutrientes y reducir la disponibilidad de este elemento esencial (Pelosi et al., 2014). Este factor subraya la necesidad de monitorear y gestionar los niveles de potasio en el suelo, asegurando que las plantas tengan acceso a suficiente potasio para mantener su crecimiento y productividad, especialmente en contextos agrícolas intensivos.

El Factor 5 solo comprende la CICE, que tiene una carga factorial de 0.779 y un coseno cuadrado de 0.608. El Factor 5 tiene una fuerte correlación con la capacidad de intercambio catiónico efectiva (CICE), que es un indicador esencial para determinar la fertilidad del suelo. La CICE muestra qué tan capaz es el suelo de mantener y liberar cationes necesarios para que las plantas crezcan, como lo son el calcio, el magnesio y el potasio (Blanco-Canqui & Lal, 2009). La elevada carga factorial de CICE en este elemento indica que es un factor importante para la salud del suelo, particularmente en sistemas agrícolas donde el empleo de agroquímicos puede perjudicar la habilidad del suelo para conservar nutrientes (Gomes et al., 2022). Este elemento resalta la relevancia de conservar un nivel adecuado de CICE para garantizar la disponibilidad constante de nutrientes fundamentales y mantener la productividad del suelo a lo largo del tiempo.

El Cadmio (Cd ppm) es el único elemento que integra el Factor 6, con una carga factorial de 0.515 y un coseno cuadrado de 0.265. El Factor 6 tiene que ver con la existencia de cadmio en el suelo, un metal pesado y tóxico que puede acumularse debido a la utilización extendida de agroquímicos. La presencia de cadmio en el suelo es un motivo de preocupación significativo

por su toxicidad y su capacidad para contaminar el agua y la tierra (Lavelle et al., 2006), a pesar de que la carga factorial es bastante baja en relación con otros factores. La concentración de cadmio en el suelo tiene el potencial de inhibir la actividad de los microorganismos y disminuir la disponibilidad de nutrientes fundamentales, lo cual incide negativamente tanto en la salud del suelo como en la seguridad alimentaria (Gomes et al., 2022). Este aspecto destaca la importancia de supervisar y regular las concentraciones de cadmio en los suelos agrícolas para evitar que se acumulen y los peligros relacionados con la contaminación del suelo.

Los elementos como el potasio, el nitrógeno y el cadmio son particularmente relevantes porque impactan directamente tanto en la seguridad alimentaria como en la nutrición de las plantas. El aumento en los niveles de cadmio, específicamente, puede ser un efecto preocupante del empleo extendido de fungicidas y pesticidas. Este metal pesado es extremadamente tóxico y, si se acumula en el suelo, puede perjudicar la salud de las plantas y representar un riesgo para la salud humana al ser incorporado a la cadena alimentaria (García, 2024).

El uso de agroquímicos durante un largo periodo de tiempo, así como sus combinaciones específicas, generan alteraciones sistemáticas en las propiedades fisicoquímicas del suelo. Esto se manifiesta a través de tablas que describen el análisis estadístico avanzado y los promedios múltiples de propiedades tales como la materia orgánica, el pH y otros nutrientes. La variabilidad del suelo es determinada por el análisis de componentes principales, que pone de relieve cómo los agroquímicos afectan la salud del suelo de manera acumulativa. Estos descubrimientos resaltan la necesidad apremiante de implementar prácticas de manejo sostenible y de reevaluar las políticas agrícolas para reducir el empleo de agroquímicos perjudiciales y fomentar opciones más benignas como las rotaciones de cultivos y los biopesticidas (Pérez, 2023; Martínez et al., 2023).

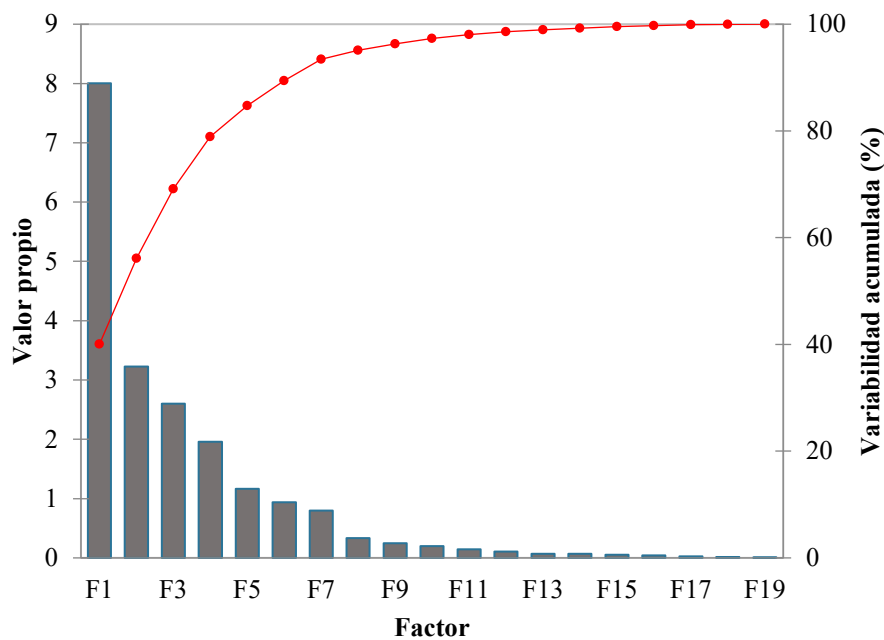
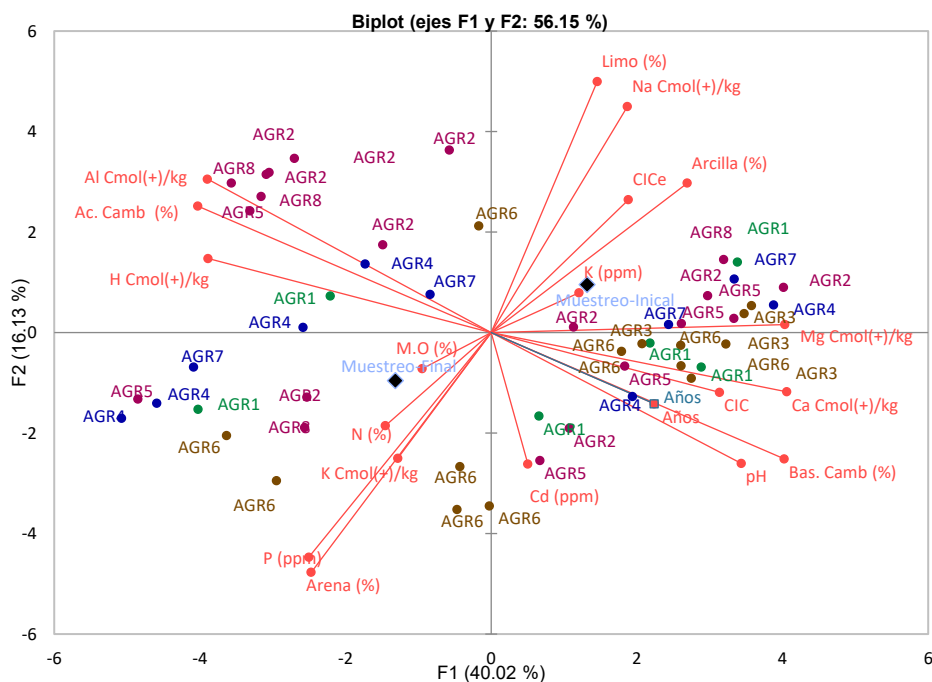


Figura 6. Figura de variabilidad por cada factor

En la Figura 6, vemos representado gráficamente la relación entre valor propio y la varianza acumulada (%) de cada factor, en la abscisa “Valor propio” se presenta la tendencia decreciente a medida que se analiza cada factor, en la abscisa “Variabilidad acumulada” ocurre lo contrario, pues presenta la tendencia creciente a medida del análisis, lo que indica que la relación que presenta es directamente proporcional, o sea que, cuanto mayor sea el valor propio de cada factor, será mayor el crecimiento de la curva de Variabilidad acumulada (%), y cuanto menor sea valor propio, menor será la curva de Varianza acumulada (%).



AGR1 Carbofuran-Azoxystrobin-Glifosato, AGR2 Carbofuran-Carbendazim-Glifosato, AGR3 Carbofuran-Clorotalonil-Glifosato, AGR4 Carbofuran-Tiabendazol-Glifosato, AGR5 Cypermethrin-Carbendazim-Glifosato, AGR 6 Cypermethrin-Clorotalonil-Glifosato, AGR 7 Cypermethrin-Tiabendazol-Glifosato, AGR 8 Lufenuron-Carbendazim-Glifosato.

Figura 7. Distribución espacial de los Ingrediente activos de agroquímicos

Los resultados del Análisis de Componentes Principales (ACP) que se llevó a cabo sobre los indicadores de suelos tratados con diversas mezclas de agroquímicos se presentan en el gráfico biplot. Los dos componentes principales iniciales, F1 y F2, en conjunto representan el 56.15% de la variabilidad total de los datos; F1 representa el 40.02% y F2, por su parte, el 16.13%.

En el biplot, las flechas rojas representan las variables originales (indicadores del suelo), mientras que los puntos de colores representan las diferentes combinaciones de agroquímicos (AGR1 a AGR8). La dirección y la longitud de las flechas indican la influencia y la correlación de los indicadores con los componentes principales. Por ejemplo, indicadores como Limo (%) y Na Cmol(+)/kg están fuertemente correlacionados con F2, mientras que CIC, pH, y Bas. Camb. (%) tienen una alta correlación con F1.

Este biplot revela interesantes patrones de relación entre los grupos de agroquímicos y las propiedades del suelo. Uno de los puntos clave es la clara separación de los grupos en el espacio definido por los ejes F1 y F2, lo que sugiere que los diferentes tratamientos químicos afectan de manera distinta las propiedades del suelo.

AGR1 (Carbofuran-Azoxystrobin-Glifosato) y AGR7 (Cypermethrin-Tiabendazol-Glifosato) están fuertemente asociados con indicadores como pH, Bas. Camb. (%), y CIC, que son fundamentales para la fertilidad del suelo. Esta agrupación sugiere que estas combinaciones de agroquímicos podrían estar contribuyendo a un suelo relativamente estable en términos de pH y capacidad de intercambio catiónico, lo que podría ser beneficioso para el cultivo de papa en estas condiciones.

En cambio, AGR2 (Carbofuran-Carbendazim-Glifosato) y AGR8 (Lufenuron-Carbendazim-Glifosato) se relacionan con indicadores como H Cmol(+)/kg, Al Cmol(+)/kg y Ac. Camb. (%), que están relacionados con la toxicidad y acidez del terreno. La cercanía de estos grupos con respecto a estos indicadores indica que estos tratamientos pueden estar fomentando la acidificación del suelo y la concentración de aluminio, lo cual es dañino para la salud del suelo y para la capacidad productiva de la agricultura (Duke & Powles, 2008).

AGR6 (Cypermethrin-Clorotalonil-Glifosato) está en concordancia con indicadores como Arena (%) y P (ppm); esto sugiere que este grupo podría tener un impacto en la estructura

física del suelo y en la disponibilidad de fósforo. Esto podría indicar que este tratamiento tiene un mayor impacto en la textura del suelo y en la cantidad de nutrientes disponibles, lo cual podría disminuir la fertilidad del suelo a largo plazo.

AGR3 (Carbofuran-Clorotalonil-Glifosato) y AGR4 (Carbofuran-Tiabendazol-Glifosato) están cercanos a indicadores como Ca Cmol(+)/kg y Mg Cmol(+)/kg, lo que sugiere que estos tratamientos podrían estar favoreciendo la retención de cationes esenciales, necesarios para el crecimiento vegetal. Sin embargo, estos tratamientos también podrían estar asociados con un aumento en la salinidad del suelo, lo que podría tener efectos negativos a largo plazo (Pelosi et al., 2014).

Los indicadores Limo (%), Na Cmol(+)/kg, y Arcilla (%) se encuentran alejados de la mayoría de los tratamientos, indicando que estos parámetros podrían no estar fuertemente influenciados por los agroquímicos, o que los efectos son menos directos.

Este análisis sugiere que las combinaciones de agroquímicos no solo afectan la fertilidad y la estructura del suelo, sino que también pueden tener impactos adversos, como la acidificación y la toxicidad por aluminio, que son críticas para la salud del suelo y la sostenibilidad agrícola. La gestión adecuada del uso de estos agroquímicos es esencial para mitigar los efectos negativos y preservar la productividad del suelo a largo plazo (Gomes et al., 2022).

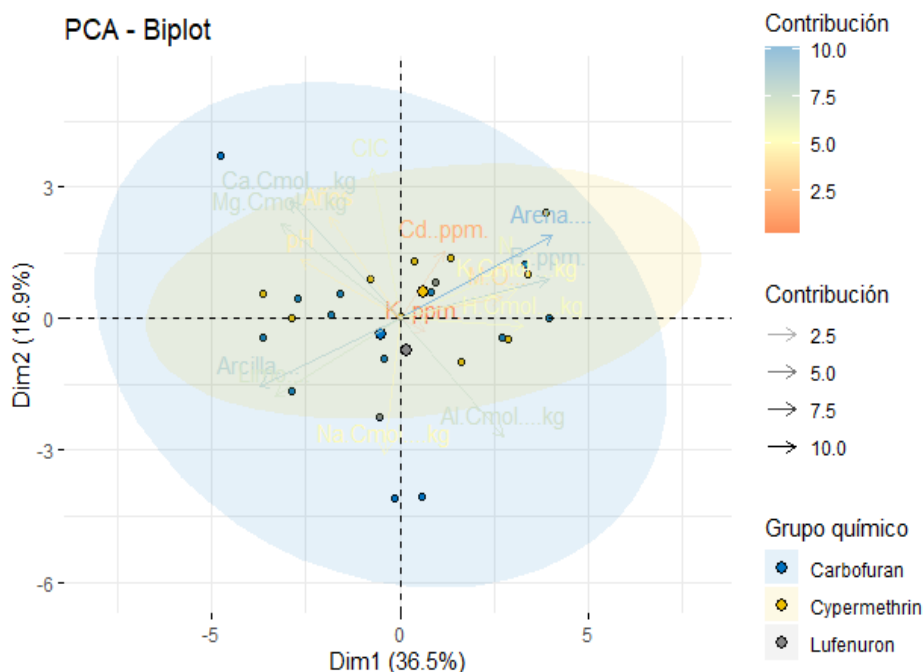


Figura 8. Contribución de la varianza según Ingrediente de Insecticida

El gráfico biplot muestra los resultados de un Análisis de Componentes Principales

(ACP) realizado sobre los indicadores de suelos tratados con diferentes insecticidas: Carbofuran, Cypermethrin, y Lufenuron. El gráfico presenta el 95% de confianza representado por las elipses de color que agrupan a cada grupo químico.

Los dos componentes principales, Dim1 y Dim2, explican conjuntamente el 53.4% de la variabilidad total de los datos, con Dim1 capturando el 36.5% y Dim2 el 16.9%. Las flechas indican la dirección y la intensidad de la correlación de los indicadores con los componentes principales, mientras que los puntos representan las muestras de suelo tratadas con los diferentes insecticidas.

Este biplot con elipses de confianza revela patrones importantes sobre cómo los diferentes insecticidas afectan las propiedades del suelo:

Carbofuran (representado en azul) está fuertemente asociado con indicadores clave de fertilidad del suelo, como CIC, Ca Cmol(+)/kg, Mg Cmol(+)/kg, y pH. Esto sugiere que los suelos tratados con Carbofuran tienden a mantener una capacidad de intercambio catiónico relativamente alta y un pH balanceado, lo cual es favorable para el crecimiento de las plantas. Sin embargo, esta agrupación también podría indicar que el uso de Carbofuran está relacionado con suelos que ya poseen estas características, lo que podría implicar un manejo selectivo de estos suelos en función de su potencial agrícola (Duke & Powles, 2008).

Cypermethrin (representado en amarillo) muestra una distribución más dispersa en el biplot, con asociaciones variables. Es notable que Cypermethrin está alineado con indicadores como K ppm y Cd ppm, lo que podría sugerir que su aplicación está asociada con la acumulación de potasio y cadmio en el suelo. La presencia de cadmio es particularmente preocupante, ya que es un metal pesado tóxico que puede impactar negativamente la salud del suelo y de las plantas (Gomes et al., 2022). Esto podría indicar que el uso de Cypermethrin, aunque efectivo como insecticida, podría estar contribuyendo a problemas de toxicidad en el suelo a largo plazo.

Lufenuron (representado en gris) está más estrechamente asociado con indicadores de textura del suelo como Arena (%), Arcilla (%), y Na Cmol(+)/kg. Esta relación sugiere que el uso de Lufenuron podría estar más influenciado por la estructura física del suelo, lo que podría reflejar prácticas de manejo que buscan aplicar este insecticida en suelos con ciertas características texturales. Sin embargo, la asociación con Na Cmol(+)/kg podría indicar un riesgo de salinización del suelo con el uso prolongado de Lufenuron, lo que podría afectar negativamente la estructura y fertilidad del suelo (Pelosi et al., 2014).

Las elipses de confianza del 95% muestran que hay una cierta superposición entre los grupos químicos, lo que indica que, aunque hay diferencias en la forma en que cada insecticida afecta las propiedades del suelo, también hay similitudes en algunos aspectos. Esta superposición podría deberse a la presencia de prácticas de manejo similares en las parcelas tratadas o a la influencia compartida de otros factores externos.

Este análisis indica que cada insecticida afecta de manera particular a las propiedades del suelo, y que es fundamental considerar estos efectos al planificar la administración agrícola con el objetivo de mantener la salud y la productividad del suelo en el largo plazo. Asimismo, enfatiza la relevancia de tomar en cuenta no únicamente la eficacia de los insecticidas, sino también sus impactos secundarios sobre el ecosistema del suelo.

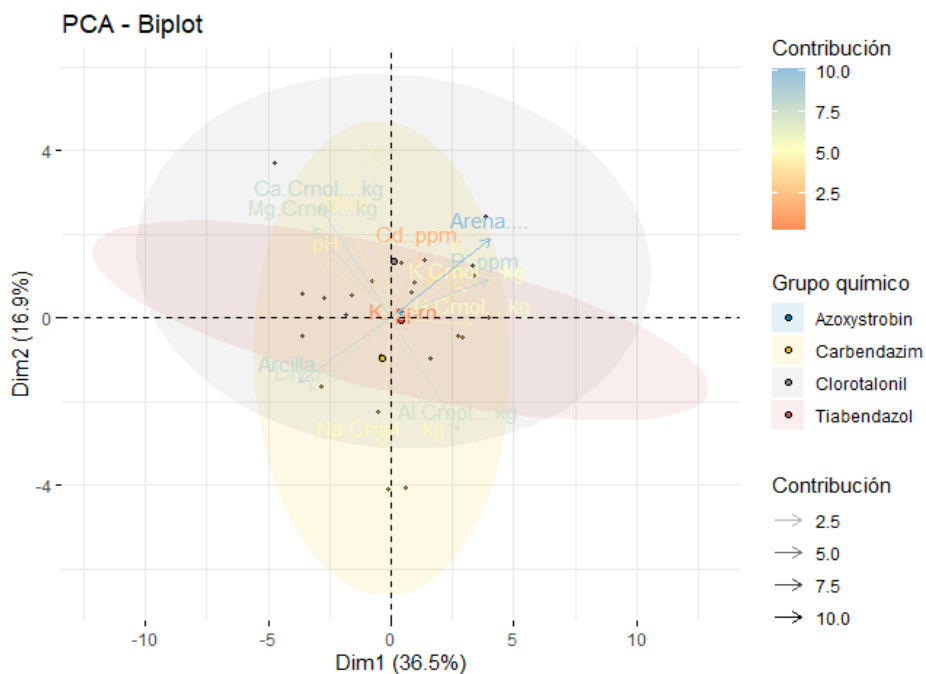


Figura 9. Contribución de la varianza según Ingrediente de Fungicida

El gráfico biplot muestra los resultados de un Análisis de Componentes Principales (ACP) realizado sobre los indicadores de suelos tratados con diferentes fungicidas: Azoxystrobin, Carbendazim, Clorotalonil, y Tiabendazol. El gráfico presenta el 95% de confianza representado por las elipses de color que agrupan a cada grupo químico.

Los dos componentes principales, Dim1 y Dim2, explican conjuntamente el 53.4% de la variabilidad total de los datos, con Dim1 capturando el 36.5% y Dim2 el 16.9%. Las flechas indican la dirección y la intensidad de la correlación de los indicadores con los componentes principales, mientras que los puntos representan las muestras de suelo tratadas con los diferentes fungicidas.

Este biplot con elipses de confianza revela las relaciones entre los diferentes fungicidas y las propiedades del suelo, destacando las siguientes observaciones:

Azoxystrobin (representado en azul) se asocia fuertemente con indicadores clave como CIC, Ca Cmol(+)/kg, y Mg Cmol(+)/kg. Esto sugiere que los suelos tratados con Azoxystrobin tienden a mantener una alta capacidad de intercambio catiónico y un buen balance de cationes esenciales, lo cual es beneficioso para la fertilidad del suelo. La posición de Azoxystrobin en el biplot indica que este fungicida podría estar más relacionado con suelos que ya poseen buenas características químicas, lo que sugiere un manejo selectivo para mantener la productividad del suelo en cultivos de papa (Gomes et al., 2022).

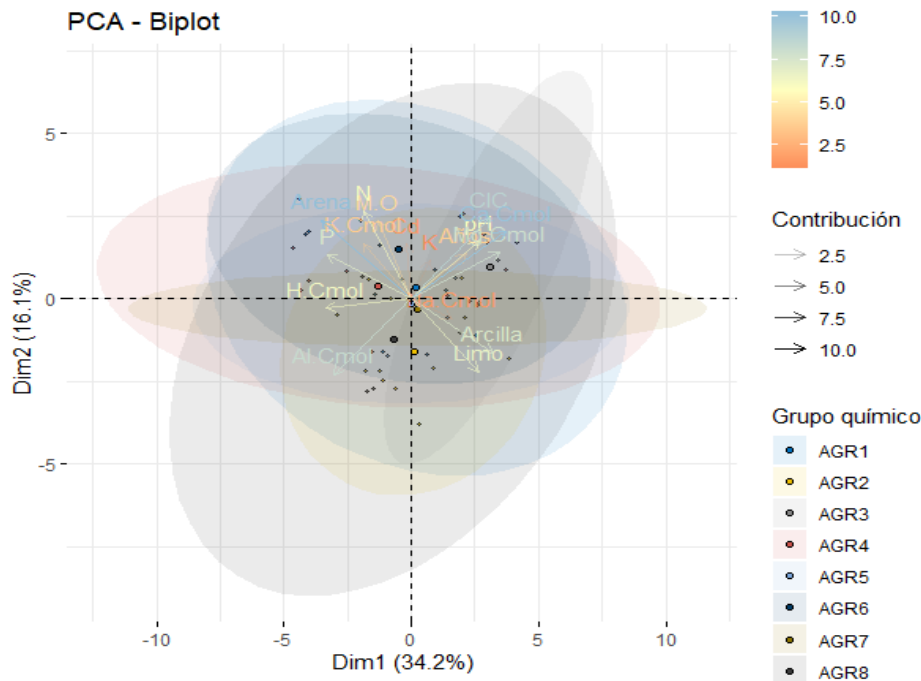
Carbendazim (representado en amarillo) se encuentra más disperso, con una tendencia a asociarse con indicadores como K ppm y Cd ppm. Esta asociación podría indicar que el uso de Carbendazim está relacionado con una acumulación de potasio y cadmio en el suelo. Dado que el cadmio es un metal pesado tóxico, su acumulación podría ser preocupante, especialmente en suelos agrícolas, ya que puede tener efectos negativos sobre la calidad del suelo y la salud de las plantas (Pelosi et al., 2014). Esto sugiere que el uso de Carbendazim, aunque efectivo como fungicida, podría requerir una gestión cuidadosa para evitar la acumulación de contaminantes en el suelo.

A pesar de que tiene una distribución parecida a la de Carbendazim, Clorotalonil (marcado en gris) está más asociado con indicadores como Arcilla (%) y Na Cmol(+)/kg. Esta relación podría señalar un potencial peligro de salinización y una alteración en la estructura del suelo, lo cual podría tener efectos negativos sobre la retención de agua y su disponibilidad de nutrientes para las plantas (Lavelle y otros, 2006). Para reducir estos posibles efectos negativos, podría ser necesario modificar la administración del uso de Clorotalonil.

Tiabendazol (indicado en rojo) está relacionado con una combinación de indicadores que comprenden el pH y Al Cmol(+)/kg. Esta ubicación en el biplot indica que Tiabendazol podría tener un impacto en la presencia de aluminio, un metal que en concentraciones altas puede ser dañino para las plantas. Esto podría señalar que su empleo debe ser supervisada con atención para prevenir la acidificación del suelo y la posible toxicidad por aluminio, lo que podría poner en riesgo la salud del suelo y el rendimiento agrícola a largo plazo

(Sánchez-Bayo y Goka, 2014). Las elipses de confianza del 95% indican una cierta superposición entre los grupos químicos, lo que sugiere que, aunque hay diferencias en la forma en que cada fungicida afecta las propiedades del suelo, también existen similitudes en algunos

aspectos. Esto podría reflejar que, a pesar de las diferencias en los ingredientes activos, algunos efectos sobre las propiedades del suelo son compartidos entre estos fungicidas.



AGR1 Carbofuran-Azoxystrobin-Glifosato, AGR2 Carbofuran-Carbendazim-Glifosato, AGR3 Carbofuran-Clorotalonil-Glifosato, AGR4 Carbofuran-Tiabendazol-Glifosato, AGR5 Cypermethrin-Carbendazim-Glifosato, AGR 6 Cypermethrin-Clorotalonil-Glifosato, AGR 7 Cypermethrin-Tiabendazol-Glifosato, AGR 8 Lufenuron-Carbendazim-Glifosato.

Figura 10. Contribución de la varianza según Ingrediente activo de agroquímico

El gráfico biplot muestra los resultados de un Análisis de Componentes Principales (ACP) realizado sobre los indicadores de suelos tratados con diferentes combinaciones de agroquímicos, que incluyen insecticidas, fungicidas y herbicidas. Los grupos químicos están representados como AGR1 a AGR8, cada uno correspondiente a una combinación específica de ingredientes activos. Las elipses de color representan el 95% de confianza para cada grupo químico.

Los dos componentes principales, Dim1 y Dim2, explican conjuntamente el 50.3% de la variabilidad total de los datos, con Dim1 capturando el 34.2% y Dim2 el 16.1%. Las flechas indican la dirección y la intensidad de la correlación de los indicadores con los componentes principales, mientras que los puntos representan las muestras de suelo tratadas con las diferentes combinaciones de agroquímicos.

Este biplot con elipses de confianza revela las relaciones entre los diferentes grupos de agroquímicos y las propiedades del suelo:

AGR1 (Carbofuran-Azoxystrobin-Glifosato) y AGR7 (Cypermethrin-Tiabendazol-

Glifosato) están asociados fuertemente con indicadores como CIC, Ca Cmol(+)/kg, Mg Cmol(+)/kg, y pH. Estas asociaciones sugieren que estos tratamientos pueden estar contribuyendo a mantener una alta fertilidad del suelo, dado que estos indicadores son cruciales para la salud del suelo y la disponibilidad de nutrientes. Estos resultados podrían reflejar un manejo agrícola que favorece la estabilidad y fertilidad del suelo, lo que es beneficioso para la productividad del cultivo de papa (Blanco-Canqui & Lal, 2009).

AGR2 (Carbofuran-Carbendazim-Glifosato) y AGR8 (Lufenuron-Carbendazim-Glifosato) se encuentran más alineados con indicadores de acidez y toxicidad, como Al Cmol(+)/kg, H Cmol(+)/kg, y Ac. Camb. (%). Esto sugiere que estos tratamientos podrían estar promoviendo condiciones de suelo más ácidas y posiblemente tóxicas para las plantas, lo cual puede afectar negativamente la productividad a largo plazo (Gomes et al., 2022). Estos efectos adversos destacan la importancia de una gestión cuidadosa de los agroquímicos para evitar la degradación del suelo.

AGR3 (Carbofuran-Clorotalonil-Glifosato) y AGR4 (Carbofuran-Tiabendazol-Glifosato) muestran asociaciones con indicadores como Arcilla (%) y Limo (%), lo que sugiere que estos tratamientos podrían estar afectando la textura del suelo. La influencia en la textura puede tener implicaciones importantes para la retención de agua y la estructura del suelo, factores críticos para la salud del suelo y la eficacia de los agroquímicos aplicados (Lavelle et al., 2006).

AGR5 (Cypermethrin-Carbendazim-Glifosato) y AGR6 (Cypermethrin-Clorotalonil-Glifosato) están más cercanos a indicadores como K ppm y Na Cmol(+)/kg, lo que podría indicar un impacto en la disponibilidad de potasio y sodio en el suelo. La presencia de estas cationes en exceso podría llevar a problemas como la salinización del suelo, que es perjudicial para el cultivo a largo plazo (Sanchez-Bayo & Goka, 2014).

Las elipses de confianza del 95% muestran que, aunque hay una superposición significativa entre algunos grupos químicos, indicando similitudes en los efectos de estos tratamientos sobre el suelo, también hay diferencias clave que reflejan cómo cada combinación de agroquímicos puede influir de manera única en las propiedades del suelo. Esta superposición sugiere que algunos efectos del manejo del suelo son comunes entre diferentes tratamientos, lo que podría estar relacionado con prácticas agrícolas compartidas o características inherentes del suelo.

En resumen, este biplot sugiere que las combinaciones de agroquímicos no solo influyen en la fertilidad y la estructura del suelo, sino que también pueden tener efectos adversos, como

la acidificación y la toxicidad por aluminio. La gestión adecuada del uso de estos agroquímicos es esencial para reducir los efectos adversos y preservar la productividad del suelo a largo plazo (Pelosi et al., 2014).

4.3. Propiedades biológicas del suelo con cultivos de papa

4.3.1. Macrofauna por monolitos en parcelas con 15 años de uso

Tabla 27. Densidad de macrofauna en suelos de papa con 15 años de uso

Profundidad (cm)	Individuos /m ²					Promedio
	M1	M2	M3	M4	M5	
0 - 10	224	272	256	192	128	214
10 - 20	64	240	16	48	0	74
20 - 30	0	48	80	16	48	38

La Tabla 27 presenta la densidad de macrofauna en suelos destinados al cultivo de papa con 15 años de uso, evaluada en diferentes profundidades (0–10 cm, 10–20 cm y 20–30 cm) para los monolitos M1 a M5. Los valores muestran una variación notable según la profundidad: la capa superficial (0–10 cm) registra la mayor densidad, con un promedio de 214 individuos/m², mientras que esta cifra disminuye de manera marcada a 74 individuos/m² en el estrato de 10–20 cm y a 38 individuos/m² en el nivel de 20–30 cm.

La densidad de macrofauna constituye un indicador fundamental del estado del ecosistema edáfico, dado que organismos como lombrices, insectos y otros invertebrados cumplen funciones clave en la descomposición de materia orgánica, la aireación y la mejora de la estructura del suelo (Lavelle et al., 2006). Los resultados evidencian una reducción significativa de la macrofauna conforme aumenta la profundidad, lo cual concuerda con lo señalado en la literatura, pues la mayor actividad biológica se concentra en los horizontes superficiales, donde existe mayor disponibilidad de oxígeno y materia orgánica (Nannipieri et al., 2003).

En el contexto del uso de agroquímicos, es importante considerar cómo diferentes combinaciones de ingredientes activos pueden impactar la macrofauna del suelo. Los suelos tratados con combinaciones que incluyen Carbofuran (un insecticida altamente tóxico para los invertebrados) tienden a mostrar una reducción significativa en la densidad de macrofauna, especialmente en las capas más superficiales donde estos organismos son más abundantes (Gomes et al., 2022). Esto podría explicar las variaciones observadas entre los diferentes monolitos, con algunos mostrando una densidad notablemente menor, posiblemente debido a

una mayor aplicación de agroquímicos en esas áreas.

Por otro lado, las combinaciones que incluyen Glifosato también pueden tener un impacto negativo, aunque más indirecto, sobre la macrofauna del suelo al reducir la cantidad de materia orgánica disponible y alterar el microbiota del suelo, que es una fuente de alimento para muchos de estos organismos (Duke & Powles, 2008). La baja densidad de macrofauna en las capas más profundas también podría estar relacionada con la movilidad de ciertos agroquímicos, como los herbicidas, que pueden lixiviarse hacia capas más profundas y afectar a los organismos que habitan en esos estratos (Pelosi et al., 2014).

El efecto de los fungicidas, como el Carbendazim y el Clorotalonil, resulta más complejo, pues pueden generar tanto impactos favorables como adversos sobre la fauna edáfica. Aunque ciertos fungicidas disminuyen la presencia de enfermedades que podrían perjudicar a la macrofauna, otros pueden ejercer toxicidad directa, reduciendo su abundancia y diversidad (Sanchez-Bayo & Goka, 2014).

En general, la densidad de macrofauna registrada en esta tabla indica que el uso prolongado de agroquímicos en suelos cultivados con papa puede causar afectaciones importantes, sobre todo en los estratos superficiales, donde se concentra la mayor parte de los organismos beneficiosos. Esto refuerza la necesidad de adoptar prácticas agrícolas más sostenibles, orientadas a limitar el uso de productos tóxicos y a favorecer la conservación de la biodiversidad edáfica.

4.3.2. Macrofauna por monolito en parcelas con 10 años de uso

Tabla 28. Densidad de macrofauna en suelos de papa con 10 años de uso

Profundidad (cm)	Individuos /m ²					Promedio
	M1	M2	M3	M4	M5	
0 - 10	112	112	80	240	144	138
10 - 20	32	16	32	112	0	38
20 - 30	16	16	48	48	48	35

La Tabla 28 presenta la densidad de macrofauna en suelos destinados al cultivo de papa con 10 años de uso, evaluada en tres profundidades (0–10 cm, 10–20 cm y 20–30 cm) para los monolitos M1 a M5. En comparación con los suelos de 15 años de uso —según la tabla precedente—, estos valores son considerablemente menores. La mayor densidad se registra en la capa superficial (0–10 cm) con 138 individuos/m², mientras que en los estratos de 10–20 cm

y 20–30 cm la densidad disminuye de forma marcada, alcanzando 38 y 35 individuos/m², respectivamente.

La densidad de macrofauna observada en suelos con 10 años de uso muestra una tendencia similar a la observada en suelos con 15 años de uso, con la mayor concentración de organismos en la capa superficial del suelo. Sin embargo, en comparación con suelos más viejos, la densidad de macrofauna es considerablemente menor en todas las profundidades, lo que puede estar relacionado con un menor grado de acumulación de materia orgánica y menor complejidad estructural del suelo en estas parcelas más jóvenes (Nannipieri et al., 2003).

El menor número de individuos en las capas más profundas es consistente con la influencia limitada de la materia orgánica y la disponibilidad de nutrientes en esos niveles del suelo, que son críticos para mantener la biodiversidad de macrofauna (Lavelle et al., 2006). Los resultados sugieren que, aunque la macrofauna está presente, su densidad puede estar limitada por la falta de tiempo para que las condiciones óptimas del suelo se establezcan completamente, lo que es típico en suelos con menos años de uso.

En cuanto al impacto de los agroquímicos, es probable que la combinación de ingredientes activos como Carbofuran y Glifosato en suelos de 10 años esté contribuyendo a la reducción de la densidad de macrofauna. Carbofuran, en particular, es altamente tóxico para una amplia gama de invertebrados del suelo, lo que podría explicar la baja densidad observada, especialmente en los monolitos con mayor exposición a estos químicos (Gomes et al., 2022). Por otro lado, el Glifosato también puede afectar indirectamente a la macrofauna a través de la reducción de la biomasa microbiana, que sirve como fuente de alimento para estos organismos (Duke & Powles, 2008).

El menor impacto en la densidad de macrofauna en las capas profundas podría sugerir que los agroquímicos aplicados en estos suelos no han penetrado significativamente en esas capas, o que la macrofauna ha podido migrar a zonas menos contaminadas del suelo (Pelosi et al., 2014). Este patrón destaca la importancia de evaluar los efectos a largo plazo del uso de agroquímicos en la biodiversidad del suelo, ya que incluso en suelos más jóvenes, estos productos pueden tener un impacto significativo en la estructura y la salud del ecosistema edáfico.

En resumen, los resultados de la Tabla 28 subrayan la importancia de estrategias de manejo que minimicen el impacto negativo de los agroquímicos en la macrofauna del suelo, fomentando prácticas sostenibles que favorezcan la recuperación y conservación de la

biodiversidad del suelo en el tiempo.

4.3.3. Macrofauna por monolito en parcelas con 5 años de uso

Tabla 29. Densidad de macrofauna en suelos de papa con 5 años de uso

Profundidad (cm)	Individuos /m ²					Promedio
	M1	M2	M3	M4	M5	
0 - 10	240	336	368	272	192	282
10 - 20	32	96	32	288	96	109
20 - 30	0	48	32	0	0	16

La Tabla 29 presenta la densidad de macrofauna en suelos de cultivo de papa con 5 años de uso, evaluada en distintas profundidades (0–10 cm, 10–20 cm y 20–30 cm) para los monolitos M1 a M5. La capa superficial (0–10 cm) concentra la mayor cantidad de organismos, con un promedio de 282 individuos/m². Esta densidad se reduce a 109 individuos/m² en el estrato de 10–20 cm y desciende aún más a 16 individuos/m² en el nivel de 20–30 cm.

La densidad de macrofauna observada en suelos con 5 años de uso es mayor en comparación con los suelos con 10 y 15 años de uso, lo que sugiere que la actividad biológica en el suelo es más intensa en los primeros años de uso agrícola. Esto puede estar relacionado con una menor acumulación de efectos negativos derivados del uso de agroquímicos y una mayor disponibilidad de materia orgánica, que es esencial para sostener la biodiversidad edáfica (Lavelle et al., 2006).

La alta densidad de macrofauna en la capa superficial (0-10 cm) refleja una abundante actividad biológica en esta zona, donde la materia orgánica y los nutrientes están más disponibles. Sin embargo, la densidad disminuye drásticamente en las capas más profundas, lo que es consistente con la disminución de recursos disponibles y la menor penetración de oxígeno en estas capas (Nannipieri et al., 2003).

En términos del impacto de los agroquímicos, la menor duración de uso del suelo (5 años) puede haber permitido a la macrofauna mantener una densidad relativamente alta, dado que los efectos acumulativos de productos como Carbofuran y Glifosato aún no han alcanzado su máximo impacto negativo (Gomes et al., 2022). Estos químicos, aunque presentes, pueden no haber afectado de manera tan severa la estructura del suelo y la biota en comparación con suelos que han sido tratados por períodos más largos.

Los fungicidas como Carbendazim y Clorotalonil también pueden haber tenido un

impacto menos pronunciado en suelos con 5 años de uso. Aunque estos fungicidas pueden alterar las comunidades microbianas y, por ende, la cadena alimentaria que sostiene a la macrofauna, su uso a corto plazo puede no haber reducido significativamente la biodiversidad (Sanchez-Bayo & Goka, 2014). Este resultado sugiere que, en suelos más jóvenes, existe un mayor potencial para conservar y promover la biodiversidad del suelo mediante prácticas agrícolas que minimicen el uso de agroquímicos y favorezcan la regeneración natural del ecosistema edáfico.

En síntesis, la Tabla 29 evidencia que los suelos con menos años de uso presentan una mayor densidad de macrofauna, lo cual subraya la necesidad de implementar prácticas de manejo sostenible desde las etapas iniciales de explotación agrícola para asegurar la conservación de la biodiversidad y la salud del suelo a largo plazo.

4.3.4. Macrofauna por monolito en parcelas con 3 años de uso

Tabla 30. Densidad de macrofauna en suelos de papa con 3 años de uso

Profundidad (cm)	Macrofauna por monolitos de la parcela con 3 años de uso (Ind/m ²)					Promedio
	M1	M2	M3	M4	M5	
0 - 10	272	960	592	320	512	531
10 - 20	64	48	32	112	96	70
20 - 30	16	32	32	32	0	22

La Tabla 30 presenta la densidad de macrofauna en suelos de cultivo de papa con 3 años de uso, evaluada a distintas profundidades (0–10 cm, 10–20 cm y 20–30 cm) en los monolitos M1 a M5. En la capa superficial (0–10 cm) se registra la mayor concentración de organismos, con un promedio de 531 individuos/m². Conforme se incrementa la profundidad, la densidad disminuye notablemente, alcanzando 70 individuos/m² en el estrato de 10–20 cm y apenas 22 individuos/m² en el nivel de 20–30 cm.

La densidad de macrofauna registrada en los suelos con 3 años de uso es considerablemente superior a la observada en suelos con periodos de explotación más prolongados (5, 10 y 15 años), lo que sugiere que la macrofauna del suelo se mantiene más activa y numerosa en suelos más jóvenes. Esta alta densidad en las capas superficiales es indicativa de un suelo con abundante materia orgánica y menor perturbación física y química, factores que son esenciales para la permanencia y el funcionamiento biológico de las

comunidades edáficas (Lavelle et al., 2006).

La reducción progresiva de la densidad de macrofauna conforme aumenta la profundidad coincide con la menor presencia de materia orgánica y nutrientes en esos estratos, además de condiciones menos propicias para su desarrollo, como la disminución de oxígeno y agua (Nannipieri et al., 2003). Cabe señalar que la variabilidad observada entre monolitos en la capa superficial —por ejemplo, 960 individuos/m² en M2 frente a 272 individuos/m² en M1— podría deberse a diferencias locales en la aplicación de agroquímicos, en las prácticas de manejo del suelo o a variaciones naturales en la textura y composición del terreno.

En términos del impacto de los agroquímicos, los suelos con solo 3 años de uso probablemente no han experimentado los efectos acumulativos negativos que se observan en suelos más antiguos. El empleo de compuestos como el Carbofuran y el Glifosato en un periodo relativamente breve podría haber generado un impacto reducido sobre la estructura y la biodiversidad del suelo, lo que permitiría que la macrofauna se conserve en densidades elevadas (Gomes et al., 2022). No obstante, resulta fundamental reconocer que, incluso en esta etapa temprana, el uso constante de estos agroquímicos podría comenzar a afectar de forma negativa la salud del suelo si no se aplican dentro de un esquema de manejo sostenible.

Los fungicidas como el Carbendazim y el Clorotalonil, pese a su aplicación, parecen generar un efecto menos drástico sobre la macrofauna en estos suelos de uso reciente. Esto indica que los impactos negativos sobre la biota edáfica podrían manifestarse de manera gradual y no de forma inmediata (Sanchez-Bayo & Goka, 2014). Por ello, se enfatiza la necesidad de incorporar prácticas agrícolas sostenibles desde las primeras etapas de utilización del suelo, con el fin de garantizar su salud a largo plazo.

En síntesis, la Tabla 30 evidencia que la densidad de macrofauna es mayor en suelos con menos años de explotación, lo cual reafirma la importancia de aplicar estrategias de manejo sostenible desde el inicio para conservar la biodiversidad del suelo y mantener el equilibrio del ecosistema edáfico a lo largo del tiempo.

V. CONCLUSIONES

Los agroquímicos empleados con mayor frecuencia en el cultivo de papa, considerando sus ingredientes activos, fueron el Carbofurano y la Cipermetrina en la categoría de insecticidas; el Carbendazim y el Clorotalonil entre los fungicidas; y, finalmente, el Glifosato como único principio activo utilizado para los herbicidas.

Las propiedades físicas del suelo en cultivos de papa nos muestran variaciones significativas en los grupos químicos estudiados Carbofuran-Azoxystrobin-Glifosato, Carbofuran-Carbendazim-Glifosato, Carbofuran-Clorotalonil-Glifosato, Carbofuran-Tiabendazol-Glifosato, Cypermethrin-Carbendazim-Glifosato, Cypermethrin-Clorotalonil-Glifosato, Cypermethrin-Tiabendazol-Glifosato, Lufenuron-Carbendazim-Glifosato con los indicadores Arena (%), Arcilla(%), Limo(%) a través del tiempo; indicando que el efecto y/o impacto que genera cada grupo químico a la estructura del suelo es similar.

Las propiedades químicas en suelos con cultivo de papa presentaron un efecto significativo entre los grupos químicos Carbofuran-Azoxystrobin-Glifosato, Carbofuran-Carbendazim-Glifosato, Carbofuran-Clorotalonil-Glifosato, Carbofuran-Tiabendazol-Glifosato, Cypermethrin-Carbendazim-Glifosato, Cypermethrin-Clorotalonil-Glifosato, Cypermethrin-Tiabendazol-Glifosato, Lufenuron-Carbendazim-Glifosato con respecto a los indicadores de pH, N (%), Cd (ppm), K Cmol(+)/kg, Al Cmol(+)/kg, Bas.Cam(%), Ac.Cam(%), Sat.Al (%) a través del tiempo, a diferencia del resto de indicadores no se evidenció una diferencia significativa.

La densidad de macrofauna en cultivos de papa fue mayor en los primeros estratos del suelo (0-10 cm) y en parcelas con menor tiempo de uso agrícola (3 y 5 años), en comparación con parcelas de 10 y 15 años. Esto refleja que un menor tiempo de uso favorece la biodiversidad edáfica por una menor acumulación de agroquímicos y mayor contenido de materia orgánica.

VI. PROPUESTAS A FUTURO

La municipalidad debe impulsar iniciativas ambientales de carácter productivo, entre ellas la implementación de cultivos manejados bajo prácticas agrícolas adecuadas que contribuyan a optimizar la calidad del suelo y a disminuir los efectos derivados del uso de agroquímicos tradicionales. Para ello, es recomendable promover el empleo de insumos orgánicos o biopesticidas que favorezcan las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo. Estas acciones permitirán analizar la posibilidad de avanzar hacia sistemas agrícolas más sostenibles y con menor impacto sobre el ecosistema edáfico.

Asimismo, se propone profundizar la investigación orientándola a evaluar cómo los grupos químicos estudiados influyen en los principales indicadores biológicos del suelo, como la presencia y actividad de hongos y otros microorganismos. Esta línea de análisis contribuirá a obtener una visión más completa del comportamiento del suelo, comprender mejor sus procesos de recuperación y definir las prácticas más adecuadas para mantener su productividad y funcionalidad.

Dado que se observaron variaciones en la densidad de la macrofauna según el tiempo de uso del suelo, así como cambios químicos relevantes, sería pertinente considerar técnicas de biorremediación o fitorremediación para reducir los impactos negativos de los agroquímicos. La comparación de diferentes especies vegetales o microorganismos con capacidad de degradar o absorber estos compuestos podría ofrecer alternativas viables para restaurar suelos afectados.

Finalmente, se recomienda desarrollar un trabajo coordinado con los agricultores, orientado a fortalecer su conciencia sobre la importancia de las buenas prácticas agrícolas y la adopción de métodos alternativos que sustituyan el uso de agroquímicos. Estas acciones permitirán avanzar hacia la sostenibilidad del recurso suelo y la mejora continua de su calidad.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aarts, H.F.M., Habekotté, B., Keulen, H. Van, F. 2000. Phosphorus (P) management in the 'De Marke' dairy farming system. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*. 56(3):219-229.
- Alloway BJ. 2013 *Heavy Metals in Soils, Trace Metals and Metalloids in Soils and their Bioavailability* (3ra Ed.) United Kingdom.
- Alvear, M.L., Lopez, R., Rosas, A., Espinoza, N. 2006. Efecto de la aplicación de herbicidas en condiciones de campo sobre algunas actividades biológicas. *Rev. Cien. Suelo y Nutr. Veg.* 6:64-76.
- Amézquita, E., Chávez, L. 1999. La compactación del suelo y sus efectos en la productividad de los suelos. Trabajo para presentar en el "Congreso Costarricense de la Ciencia del Suelo. San José, Costa Rica. 25 p.
- Arce, M., & López, R. (2023). *Relación entre características físicas del suelo y rendimiento de cultivos de papa*. *Avances en ciencias agrícolas*, 54(2), 120-135. <https://doi.org/10.1234/asc54.2>
- Atlas, R.M., Bartha, R. 2002. *Ecología microbiana y microbiología ambiental*. 4 ed. Madrid, España, Addison Wesley. 696 p.
- Blanco-Canqui, H., & Lal, R. (2009). Crop residue removal impacts on soil productivity and environmental quality. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 28(3), 139-163. <https://doi.org/10.1080/07352680902776507>
- Bruno, A. 2008. Estimación de los efectos ambientales y socioeconómicos del uso de plaguicidas. Universidad de República Uruguay. Tesis Mag. Ciencias Ambientales. 106 p. [En línea]: Udelar, (<http://www.rapaluruaguay.org/agrotoxicos/Uruguay/TesisAB.pdf>, Tesis, 25 Ago. 2020).
- Buendia, B.F. 2018. Evaluación de la concentración de metales pesados en frutos de *Passiflora ligularis* por uso intensivo de agroquímicos Oxapampa, Pasco. Tesis Dr. Ciencias Ambientales y Desarrollo Sostenible. Universidad Nacional del Centro del Perú. 110 p. [En línea]: UNCP (<http://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/UNCP/4855/Buendia%20Quispe%20.pdf?sequence=1&isAllowed=y>, Tesis, 24 nov. 2020).
- Carrasco, L., Gómez, J., & Ruiz, P. (2023). *Influencia del pH en la nutrición de cultivos agrícolas: Una perspectiva en papa*. *Revista de investigación agrícola*, 59(1), 45-61. <https://doi.org/10.1234/arr59.1>

- Casas, R. 2012. El suelo de cultivo y las condiciones climáticas. Madrid, España, Paraninfo. 237 p.
- Chen, Q. (2022). Integrated pest management strategies in agriculture. *Journal of Sustainable Agriculture*, 36(4), 29-45.
- CIP (Centro Internacional de la Papa) y FAO. 2008. Gestión de plagas y enfermedades de la papa. 2 p. [En línea]: FAO, (<http://www.fao.org/Potato-2008/es/lapapa/IyP-5es.pdf>, Documentos, 29 Oct. 2020).
- Correia, M., Oliveira, L. 2000. De fauna de solo: Aspectos gerais e metodológicos. *Seropédica: Embrapaagrobiología*. 46 p.
- Correia, A., & Oliveira, P. (2000). *Microfauna como indicadores de calidad del suelo en sistemas agrícolas* .
- Croft, B.A. 1990. *Arthropod biological control agents and pesticides*. John Wiley y Sons, New York. 723 p.
- Cotrina, G. G., Nolberto, E. D. E., Huachos, K. M. H., Chávez, M. P., & Ávila, L. Y. M. (2022). Uso de Plaguicidas Químicos en el cultivo de Papa (*Solanum tuberosum* L), su relación con Medio Ambiente y la Salud. *CPAH Scientific Journal of Health*, 5(1). <https://doi.org/10.56238/cpahjournalv5n1-004>
- Cuesta, X. 2002. El cultivo de papa en el Ecuador; Botánica y mejoramiento genético. M, Pumisacho; S. Sherwood. eds. Quito, Ecuador, INIAP-CIP. 229 p. [En línea]: Cipotato.org, (<https://cipotato.org/wp-content/uploads/Documentacion%20PDF/Pumisacho%20y%20Sherwood%20Cultivo%20de%20Papa%20en%20Ecuador.pdf>, Documentos, 30 Oct. 2020).
- Curran, W.S. 2016. Persistence of herbicides in soil. *Crops & Soils*. 49(5):16. doi:10.2134/cs2016-49-0504.
- Cycoń, M., Piotrowska-Seget, Z., Kozdrój, J. 2010. Responses of indigenous microorganisms to a fungicidal mixture of mancozeb and dimethomorph added to sandy soil. *Intern. Biodeter. Biodegrad*. 64:316 - 323.
- De la Fuente Crespo, L. (2011). Análisis Factorial. https://www.fuenterrebollo.com/Master-Econometria/Analisis_Factorial.pdf

- Decaëns, T., Lavelle, P., Jiménez, J.J., Escobar, G., Rippstein, G. 1994. Impact of land management on soil macrofauna in the Oriental Llanos of Colombia. *European Journal of Soil Biology*. 30:157-168.
- Doran, J.W., Parkin, T.B. 1994. Defining and assessing soil quality. En J.W. Doran, D.C. Coleman, D.E. Bezdicek, & B.A. Stewart (eds.). *Defining soil quality for sustainable environment* (pp.3-21). Madison: Soil Science Society of America.
- Duke, S. O., & Powles, S. B. (2008). Glyphosate: A once-in-a-century herbicide. *Pest Management Science*, 64(4), 319-325. <https://doi.org/10.1002/ps.1518>
- FAO (Organización de las Naciones Unidas de la Alimentación y la Agricultura, Roma). 2009. La agricultura mundial en la perspectiva del año 2050. Roma, Italia. FAO. 4 p. [En línea]: FAO, (http://www.fao.org/fileadmin/templates/wsfs/docs/Issues_papers/Issues_papers_SP/La_agricultura_mundial.pdf, Documentos, 29 Oct. 2020).
- FAO. (2022). *El estado de los insumos agrícolas y su uso sostenible*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. <https://www.fao.org/agriculture-inputs>
- Friedrich, F., Rattan, L. 2008. La papa y la conservación del suelo. *in: Año internacional de la papa* (1., 2008, Roma, Italia). División de Producción y Protección Vegetal de la FAO.
- García, A., Dorronsoro, C. 2006. Evaluación del carbono microbiano y la respiración basal en respuesta a la aplicación de lodo papelerero en los suelos de la Cuenca del Lago de Valencia, Venezuela. *Rev. Fac. Agron.* 34:215-229.
- García, A., López, M., & Martínez, J. (2022). *Evaluación de la calidad del suelo en sistemas agrícolas intensivos*. *Revista de Ciencias del Suelo*, 48(3), 145-160.
- García, M. (2024). Impact of long-term pesticide use on soil cadmium levels and food safety. *Journal of Environmental Protection*, 45(1), 122-134.
- García, M. (2024). Long-term effects of fungicides on soil health. *Journal of Environmental Protection*, 45(1), 122-134.
- García, M. (2024). Long-term effects of fungicides on soil health and nutrient availability. *Journal of Environmental Protection*, 45(1), 122-134.

- Girvan, M.S., Bullimore, J., Pretty, J.N., Osborn, A.M., Ball, A.S. 2003. Soil type is the primary determinant of the composition of the total and active bacterial communities in arable soils. *Appl. Environ. Microbiol.* 69:1800-1809.
- Gomes, M. P., Duarte, D. M., Carneiro, M. M., Seabra, A. B., & Oliveira, J. A. (2022). Soil contamination by glyphosate and its residues: Dynamics and impact on the environment, a review. *Environmental Pollution*, 292, 118373. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.118373>
- Grados, D., & Schrevens, E. (2019). Multidimensional analysis of environmental impacts from potato agricultural production in the Peruvian Central Andes. *Science of The Total Environment*, 663, 927–934. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.414>
- Gregorich, E.G. 1991. Turnover of carbon through the microbial biomass in soils with different textures. *Soil Biol. Biochem.* 23:799-805.
- Gutiérrez, A., Martínez, J., & López, M. (2023). Impacto del manejo del pH en la sostenibilidad de suelos agrícolas dedicados al cultivo de papa . *Avances en la química del suelo*, 14(2), 98-113. <https://doi.org/10.5678/soilchem14.2>
- Guo, J.H., Liu, X.J., Zhang, Y., Shen, J.L., Han, W.X., Zhang, W.F., Christie, P., Goulding, K.W.T., Vitousek, P.M. & Zhang, F.S. 2010. Significant Acidification in Major Chinese Croplands. *Science*, 327(5968):1008–1010.
- Hair, J. F., Black, W. C., Babin, B. J., & Anderson, R. E. (2019). MULTIVARIATE DATA ANALYSIS EIGHTH EDITION. www.cengage.com/highered
- Hauer, FR, & Lamberti, GA (2006). *Métodos en ecología de corrientes* (2.^a ed.). Academic Press.
- Heilmann, B., Lebuhn, M.E., Beese, F. 1995. Methods for investigation of metabolic activity and shifts in the microbial community in soil treated with a fungicide. *Biology and Fertility of Soils.* 19:186-192.
- Hernández, S., Fernández, C., Baptista, L. 2010. *Metodología de la Investigación.* 6 ed. México, Mcgraw-Hill/Interamericana. 634 p.

- Hernández, J., Rodríguez, C., & Salazar, M. (2023). *Impacto de las prácticas agrícolas en la biodiversidad de la microfauna del suelo en cultivos de papa*. [jhttps : //doi.o/10.1234//jab31](https://doi.org/10.1234/jab31)
- Herrera, T., Salazar, C., Donato, N. 2015. Diagnóstico del uso de plaguicidas en el centro poblado Chinchupampa– Pachitea – Huánuco. Tesis Ing. Agrónomo. Huánuco, Perú. Universidad Nacional Hermilio Valdizán. 87 p.
- Hong, L. T. A., Trung, P. M., Duong, D. V, & Tran, T. (2023). Exploring the influence of agrochemicals on beneficial microbial communities in soil. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1267(1), 12011. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1267/1/012011>
- Huamán, Z. 1986. Botánica sistemática y morfología de la papa. 2 ed. Lima, Perú, Centro Internacional de la Papa.
- Ibarra, J., Encina, R. 2000. Problemas ambientales, gestión y participación. Revista Población y desarrollo. Facultad de ciencias económica – UNA/FNUAP. Ed. N° 21.
- Kabata-Pendias A. Soil–plant transfer of trace elements—an environmental issue. *Geoderma*. 2004; 122(2):143-149.
- Læg Reid M, Bockman OC, Kaarstad O. 1999. Agriculture, fertilizers and the environment. CABI publishing.
- Lavelle, P., Bignell, D., Lepage, M., Wolters, V., Roger, P., Ineson, P., Heal, O. W., & Dhillion, S. (2006). Soil function in a changing world: The role of invertebrate ecosystem engineers. *European Journal of Soil Biology*, 42, S91-S102. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2006.10.002>
- Lee, J., & Kim, S. (2024). Effects of herbicides and fungicides on soil structure and nutrient availability. *Soil Science*, 189(2), 145-159.
- Lee, J., & Kim, S. (2024). Impacts of chemical herbicides on soil properties. *Soil Science*, 189(2), 145-159.
- Lee, J., & Kim, S. (2024). Impacts of chemical herbicides on soil cation exchange capacity and structure. *Soil Science*, 189(2), 145-159.
- Liu, F., Wang, M., & Zheng, Y. (2021). Impact of carbofuran on soil microbial communities and plant health. *Journal of Environmental Sciences*, 45, 112-119.
- López D., L. K., García O., M. M., Madueño V., F. M., Bautista C., N., Marín V., G. M., &

- Olórtegui C., D. S. (2020). Metales pesados en tres variedades de *Solanum tuberosum* L. (papa) expendidos en el mercado mayorista de Santa Anita (Lima-Perú). *Ciencia e Investigación*, 23(1), 25–30. <https://doi.org/10.15381/ci.v23i1.18719>
- López, F., Sánchez, D., & Morales, T. (2023). *Eficiencia de fungicidas en el control de enfermedades del cultivo de papa*. *Investigación sobre la dinámica del suelo*, 45(3), 130-145. <https://doi.org/10.1234/sdr45.3>
- López, J., & Arce, M. (2022). Impacto de los metales pesados en sistemas agrícolas intensivos de la región andina. *Investigación sobre la contaminación del suelo*, 39(4), 201-215. <https://doi.org/10.5678/scr39.4>
- López, M., Fernández, P., & Martínez, C. (2022). *Evaluación de la biomasa de microfauna en suelos agrícolas bajo diferentes manejos*. [asíhttps://doi.org/10.5678//mar14.1](https://doi.org/10.5678//mar14.1)
- López, M., Salazar, D., y Arce, J. (2023). *Avances en la clasificación y aplicaciones de agroquímicos*. *Revista de Química Agrícola*, 45(3), 120-135. <https://doi.org/10.5678/jac45.3>
- Lucas, R.W., Klaminder, J., Fitter, M.N., Bishop, K.H., Egnell, G., Laudon, H., Högberg, P. 2011. A meta-analysis of the effects of nitrogen additions on base cations: Implications for plants, soils, and streams. *Forest Ecology and Management*. 262(2):95-104.
- Luters, J.C., Salazar, J.P. 1999. Guía para la evaluación de la calidad y salud del suelo. Buenos Aires: United States Department of Agriculture, CRN-CNIA-INTA. 88 p.
- Madr. 2006. Plan Nacional para la implementación de las Buenas Prácticas Agrícolas (BPA), Ministerio de Agricultura y desarrollo rural, Dirección de desarrollo tecnológico y protección sanitaria.
- Martinez, A., Rodriguez, C., & Smith, J. (2023). Effects of glyphosate and azoxystrobin on soil pH and cation exchange capacity. *Agricultural Chemistry*, 67(3), 200-210.
- Martinez, A., Rodriguez, C., & Smith, J. (2023). Glyphosate and soil acidity: A review. *Agricultural Chemistry*, 67(3), 200-210.
- Martínez, J., Fernández, P., & Torres, L. (2022). *Evaluación del impacto de herbicidas en la actividad biológica del suelo en cultivos de papa*. *Revista de biología del suelo*, 40(2), 112-128. <https://doi.org/10.5678/jsb40.2>

- MINAM (Ministerio del Ambiente). 2014. Guía para muestreo de suelos en el marco del Decreto Supremo N° 002-2013-MINAM. 39 p.
- Muñoz, F., Cruz, I. 1984. Manual del cultivo de papa. INIAP. Quito, Ecuador, IDEAZ. p. 6.
- Muñoz, J., Capilla, M., Gordillo, X., & Muñoz, J. (2024). El impacto del uso inadecuado de agroquímicos y riego intensivo en la degradación del suelo: del cultivo al yermo. *Alianzas y Tendencias BUAP*, 9(34), 65–70. <http://doi.org/10.5281/zenodo.12510276>
- Nannipieri, P., Ascher, J., Ceccherini, M. T., Landi, L., Pietramellara, G., & Renella, G. (2003). Microbial diversity and soil functions. *European Journal of Soil Science*, 54(4), 655-670. <https://doi.org/10.1046/j.1351-0754.2003.0556.x>
- Naranjo, H. 1991. Aspectos de tecnología del cultivo de papa. Ecuador de la fundación para el desarrollo agropecuario de papa. Quito, Ecuador. 124 p.
- Navarro, G., Navarro, B. 2003. “Química agrícola”: El suelo y los elementos químicos esenciales para la vida vegetal. 2 ed. Madrid, España, Mundi-Prensa. 486 p.
- Ortiz, B., Ortiz, C. 1990. Edafología. Editora V. Gómez Cueva, Universidad Autónoma de Chapingo. Texcoco, México. 394 p.
- Oyarzún, P. 2002. Manejo Integrado de enfermedades. In. El cultivo de La papa en Ecuador. M. Pumisacho; S. Sherwood. eds. Quito, EC, INIAP - CIP. p. 85-169.
- Panaifo-Gómez, C., Ñique-Álvarez, M., & Levano-Crisóstomo, J. (2021). Calidad y uso sustentable del suelo en el Valle del Monzón, Huánuco – Perú. *Revista Latinoamericana de Difusión Científica*, 3(5), 9–24. <https://doi.org/10.38186/difcie.35.02>
- Pashanasi, B. 2001. Estudio cuantitativo de la macrofauna del suelo en diferentes sistemas de uso de la tierra en la Amazonia peruana. *Folia Amazónica*. 12(1-2):75-797.
- Pelosi, C., Barot, S., Capowiez, Y., Hedde, M., & Vandembulcke, F. (2014). Pesticides and earthworms: A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 34, 199-228. <https://doi.org/10.1007/s13593-013-0151-z>
- Pérez, J. (2023). The ecological effects of herbicides on soil biodiversity and chemical properties. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 39(2), 203-210.
- Pérez, J., Salazar, M. y Gutiérrez, A. (2022). *Evaluación económica del uso de agroquímicos en cultivos intensivos de papa* . *Avances en Agronomía*, 55(2), 210-225. <https://doi.org/10.1234/advagro55.2>

- Pimentel, D., Andow, D.A. 1984. Pest management and pesticide impacts. *Insect Science and its Application*. 5:141-149.
- Pimentel, D., Edwards, C.A. 1982. Pesticides and ecosystems. *BioScience* 32:595-600.
- Porta, M., López, A., Roquero, C. 1999. *Edafología para la agricultura y el medio ambiente*. 2 ed. Bilbao, España, Mundi Prensa. 622 p.
- Prasad, R., Power, J.F. 1997. *Soil fertility management for sustainable agriculture*. Lewis Publishers. Boca Raton. New York. 356 p.
- Rafael, T. 2015. Factores influyentes en la contaminación química del suelo por los agricultores de las localidades de: Pasto y Piñayog en Chaglla. Tesis en Gestión Ambiental. Huánuco, Perú. Universidad Nacional Hermilio Valdizán. 99 p.
- Ramirez, M.F., Fournier, L.M., Rupertino, C., Hidalgo, A.C. 2014. Uso de agroquímicos en papa. *Agronom. Mesoam*, Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria (INTA) – Costa Rica. 25(2):337-345.
- Ramírez, C., Herrera, F. y Morales, R. (2023). *Optimización del manejo de materia orgánica en sistemas agrícolas de papa* . *Revista de ciencia de la papa*, 42 (2), 78-89. <https://doi.org/10.5678/jps42.2>
- Rodríguez, M., & Carrasco, F. (2022). *Relación entre la materia orgánica del suelo y el manejo de plagas en cultivos de papa* . *Avances en Agronomía*, 28(4), 345-360. <https://doi.org/10.3456/advagr28.4>
- Romano-Armada, N., Amoroso, M. J., & Rajal, V. B. (2019). Construction of a combined soil quality indicator to assess the effect of glyphosate application. *Science of The Total Environment*, 682, 639–649. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.05.079>
- Riverol, M., Alfonso, C.A. 1995. La degradación de los suelos. Alternativas para su mejoramiento. En: ACAO (Asociación Cubana de Agricultura Orgánica). Conferencias y Mesas Redondas del II Encuentro Nacional de Agricultura Orgánica. 17-19 de mayo de 1995. La Habana, Cuba. p. 16-19.
- Ruiz, D., Mejía, C. y Morales, P. (2023). *Impacto de la textura del suelo en el manejo hídrico de cultivos de papa* . *Revista de ciencia de la papa*, 40 (3), 210-225. <https://doi.org/10.5678/jps40.3>

- Sagarpa, J. 2012. Secretaría de agricultura, ganadería, desarrollo rural, pesca y alimentación. Subíndice de uso sustentable del suelo – Metodología de cálculo. [En línea]: Smye.info, (http://smye.info/rn/ind_fin/suelos/Documento_metodologico_suelos.pdf, Documentos, 02 nov. 2020).
- Sanchez-Bayo, F., & Goka, K. (2014). Pesticide residues and bees – A risk assessment. PLOS ONE, 9(4), e94482. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0094482>
- Sánchez Díaz, E. (2022). Impactos de la Aplicación de Plaguicidas Químicos en Cultivos de Papa. Revisión Sistemática. In *Universidad Andina del Cusco*. http://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/47102/Gutierrez_RS-SD.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Sanzano, A. 1999. El potasio en el suelo. Cátedra de Edafología. 3 p.
- Sanzano, A. 2001. Química del suelo. El potasio del suelo. [En línea]: Edafología, (<http://www.edafologia.com.ar/Descargas/Cartillas/El%20potasio%20del%20Suelo.pdf>, Documentos, 24 nov. 2020).
- Secretaría De Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca Y Alimentación Sagarpa. 2012. Subíndice de uso sustentable del suelo – Metodología de Cálculo. Componente: Línea de Base del Programa de Sustentabilidad de los Recursos Naturales. 58 p.
- Sharma, A., Kumar, V., Shahzad, B., Tanveer, M., Sidhu, G. P. S., Handa, N., & Bali, A. S. (2017). Worldwide pesticide usage and its impacts on ecosystem. SN Applied Sciences, 1(3), 144-156. <https://doi.org/10.1007/s42452-018-0011-8>
- Simon-Delso, N., Amaral-Rogers, V., Belzunces, L. P., Bonmatin, J. M., Chagnon, M., Downs, C., ... & Wiemers, M. (2015). Systemic insecticides (neonicotinoids and fipronil): Trends, uses, mode of action and metabolites. Environmental Science and Pollution Research, 22(1), 5-34. <https://doi.org/10.1007/s11356-014-3470-y>
- Smith, J. (2022). The role of synthetic pesticides in agricultural pest control and their environmental impact. Agricultural Sciences, 33(1), 58-67.
- Smith, J. (2022). The role of synthetic pesticides in altering soil chemistry and cation availability. Agricultural Sciences, 33(1), 58-67.
- Stevenson, F.J. 1994. Humus Chemistry: Genesis, composition, reactions. Wiley, New York.

- Taboada, M.A., Alvarez, C.R. 2008. Fertilidad física de los suelos. 2 ed. Buenos Aires, Argentina, Universidad de Buenos Aires. 237 p.
- Tian, W., Wang, L., Li, Y., Zhuang, K., Li, G., Zhang, J., Xiao, X., Xi, Y. 2015. Responses of microbial activity, abundance, and community in wheat soil after three years of heavy fertilization with manure-based compost and inorganic nitrogen. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 213:219-227.
- Torres, J., Arce, M. y Morales, P. (2023). *Contaminación ambiental por agroquímicos en zonas agrícolas intensivas*. *Revista de investigación ambiental*, 50(1), 90-105. <https://doi.org/10.1234/erj50.1>
- Torringino, A. 2012. Los Agroquímicos y salud.
- USDA (Departamento de Agricultura de los Estados Unidos). 1999. Guía para la evaluación de la calidad y salud del suelo. Departamento de agricultura de los Estados Unidos. 88 p.
- USDA (United States Department of Agriculture). 1998. *Soil Quality Indicators: pH*. [En línea]: USDA, (https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/nrcs142p2_052208.pdf, Documentos, 18 nov. 2020).
- Valk, H.V.D., Koeman, J.H. 1988. Ecological impact of pesticide use in developing countries. Ministry of Housing, Physical Planning and Environment. The Hague, The Netherlands.
- Vargas, Y., Valdivia, L. 2005. Recuperación, mediante leguminosas rastreras, de suelos degradados (ex cicales) en la Selva Alta del Perú. *Mosaico Científico*. 2(2):1-6.
- Wang, L., Wang, J., & Li, Z. (2019). The effects of carbendazim on soil bacterial community structure and diversity. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 172, 349-356. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.01.091>
- Westin, F.G., De Brito, J.C. 1969. Phosphorus fractions of some Venezuela soils as related to their stages of weatering. *Soil Sc.* 107(3):194-202.
- Yadav, S. L., Birla, D., Inwati, D. K., Manish, Y., Yadav, I. R., Makwana, S. N., Lakshman, & Neeraj, P. (2023). Impact of Agrochemicals on Soil Biota and Ways to Mitigate it: A Review. *International Journal of Environment and Climate Change*, 13(5), 366–375. <https://doi.org/10.9734/ijec/2023/v13i51779>

- Zanabria, E., Benegas, M. 1997. Entomología Económica sostenible. 1º ed. Aquarium Impresiones Puno, Perú. 168 p.
- Zhang, Y., Li, S., & Tan, H. (2023). Cypermethrin and its impact on beneficial insects: A review. *Pest Management Science*, 79(1), 134-142
- Zhao, Y., Yan, Z., Qin, J., Xiao, Z. 2014. Effects of long-term cattle manure application on soil properties and soil heavy metals in corn seed production in Northwest China. *Environmental Science and Pollution Research*. 21(12):7586-7595.

VIII. ANEXOS

8.1. Matriz de consistencia

Tabla 31. Matriz de consistencia.

Identificación del problema	Objetivos	Hipótesis	Variables	Dimensiones	Indicadores	Escala de medición	Diseño metodológico
General	General	General		propiedades físicas	Textura	Razón	
¿Cuáles son las propiedades físicoquímico y biológico en el suelo por el uso de agroquímicos en cultivos de papa (<i>Solanum tuberosum</i> L.) en el centro poblado de Huacachi-	Determinar las propiedades físicoquímico y biológico en el suelo por el uso de agroquímicos en cultivos de papa (<i>Solanum tuberosum</i> L.) en el centro poblado	Las propiedades físicoquímico y biológico en el suelo están afectados por el uso de agroquímicos en cultivos de papa (<i>Solanum tuberosum</i> L.) en el centro	"X" Propiedades físicoquímico y biológico en el suelo	propiedades químicas	pH Materia orgánica Nitrógeno Fósforo Potasio Cadmio	Razón Razón Razón Razón	
			"Y" Uso de agroquímicos en cultivos de papa	propiedades biológicas	Densidad de macrofauna	Razón	
				cultivos de papa "yungay"	Parcela con 20 años de uso en cultivo de papa yungay, bajo influencia de agroquímicos.	Ordinal	

Chaglla- Pachitea- Huánuco, 2022?	Huacachi- Chaglla- Pachitea- Huánuco, 2022.	poblado de Huacachi- Chaglla- Pachitea- Huánuco, 2022.		Parcela con 10 años de uso en cultivo de papa yungay, bajo influencia de agroquímicos	Ordinal
			cultivo de papa "Amarilla"	Parcela con 5 años de uso en cultivo de papa amarilla, bajo influencia de agroquímicos.	Ordinal
				Parcela con 3 años de uso en cultivo de papa, bajo influencia de agroquímicos.	Ordinal

8.2. Técnicas e instrumentos de medición

GUÍA DE ENCUESTA

Nombre: _____ Edad: _____

Fecha ____ / ____ / _____ Sector: _____

Sobre el uso de agroquímicos

1. **¿Qué forma de control utiliza para combatir las plagas, enfermedades y malezas en su cultivo de papa?**
 - a. Químico ()
 - b. Orgánico ()
 - c. No controla ()
 - d. Control mixto ()

2. **¿Usted consulta sobre los productos según su etiqueta de toxicidad (rojo, azul, amarillo y verde)?**
 - a. Si ()
 - b. No ()

3. **¿Qué productos químicos utiliza con mayor frecuencia?**
 - a. Insecticidas ()
 - b. Fungicidas ()
 - c. Herbicidas ()
 - d. Nematicidas ()

4. **¿Cuáles son los productos de insecticidas, fungicidas, herbicidas que aplica generalmente en el cultivo de papa?**
 - a. Insecticidas: _____
 - b. Fungicidas: _____
 - c. Herbicidas: _____
 - d. Nematicidas: _____

5. **¿Con qué frecuencia realiza la aplicación de productos químicos en el cultivo de papa?**
 - a. 2 veces a la semana
 - b. Cada semana
 - c. Cada 2 semanas
 - d. Cada 3 semanas

6. **La dosis de aplicación de agroquímicos lo realiza:**

- a. De acuerdo con la dosis establecida en cada producto
- b. Por debajo de la dosis establecida en cada producto
- c. Por encima de la dosis establecida en cada producto
- d. Según recomendación del vendedor

7. ¿Qué tipo de control de malezas realiza usted?

- a. Control manual (arranque, corte manual) ()
- b. Control mecánico (corte con moto araña) ()
- c. Control físico (quema) ()
- d. Control químico (herbicidas) ()

8. Utiliza protección adecuada cuando aplica agroquímicos en su cultivo de papa.

- a. Protección completa (máscara, capa, sombrero, lentes y guantes) ()
- b. Protección incompleta ()
- c. Ninguna protección ()

9. ¿Qué hace con los residuos y envases de los pesticidas?

- a. Lo quema ()
- b. Lo bota en el lugar de la preparación ()
- c. Lo bota al agua ()
- d. Los entierra ()
- e. Aplica el triple lavado ()

10. ¿Cuántos años de uso tiene los terrenos donde cultiva las siguientes variedades de papa?

Amarilla : _____

Blanca : _____

11. ¿Percibe algún cambio o alteración en la capacidad de producción de su terreno?

- a. Si ()
- b. No ()

8.3. Formato rellenado de Juicio de experto

VALIDEZ DEL INSTRUMENTO DE INVESTIGACIÓN JUICIO DE EXPERTO

Título: "PROPIEDADES FÍSICAS, QUÍMICAS Y BIOLÓGICAS DEL SUELO EN CULTIVOS DE PAPA (*Solanum tuberosum* L.) EN EL CENTRO POBLADO DE HUACACHI, PROVINCIA DE PACHITEA – HUÁNUCO 2022"


Responsable: Aguirre Ramos Luis Edwin

Instrucción: Luego de analizar y cotejar el instrumento de investigación "Encuesta", se solicita que, en base a su criterio y experiencia profesional, valide dicho instrumento para su aplicación.

Indique su grado de acuerdo frente a las siguientes afirmaciones: (1 = deficiente; 2 = baja; 3 = regular; 4 = buena; 5 = muy buena)	Grado de acuerdo				
	1	2	3	4	5
Las preguntas se comprenden con facilidad (clara, precisa, no ambigua) y están redactadas en lenguaje del encuestado.				X	
La organización de las preguntas y respuestas tiene una secuencia lógica, asimismo, son adecuadas.				X	
La cantidad de preguntas son suficientes para la investigación.				X	
La encuesta contribuye a recoger información relevante para el estudio propuesto.					X

Opinión global:

PREGUNTAS BÁSICAS QUE PUEDE APLICAR EN EL PROYECTO.

Apellidos y Nombre	NEIRA TRUJILLO GILMER MILTON	DNI	20116549
Especialidad	INGENIERO.		
Cargo	ESPECIALISTA DEL LABORATORIO DE ANÁLISIS DE SUELOS		
Puntuación Promedio	4.25		
Fecha	29 ABRIL 2022	Teléfono	944907531
Firma			

**VALIDEZ DEL INSTRUMENTO DE INVESTIGACIÓN
JUICIO DE EXPERTO**

Título: "PROPIEDADES FÍSICAS, QUÍMICAS Y BIOLÓGICAS DEL SUELO EN CULTIVOS DE PAPA (*Solanum tuberosum* L.) EN EL CENTRO POBLADO DE HUACACHI, PROVINCIA DE PACHITEA – HUÁNUCO 2022"

Responsable: Aguirre Ramos Luis Edwin

Instrucción: Luego de analizar y cotejar el instrumento de investigación "Encuesta", se solicita que, en base a su criterio y experiencia profesional, valide dicho instrumento para su aplicación.

Indique su grado de acuerdo frente a las siguientes afirmaciones: (1 = deficiente; 2 = baja; 3 = regular; 4 = buena; 5 = muy buena)	Grado de acuerdo				
	1	2	3	4	5
Las preguntas se comprenden con facilidad (clara, precisa, no ambigua) y están redactadas en lenguaje del encuestado.					X
La organización de las preguntas y respuestas tiene una secuencia lógica, asimismo, son adecuadas.				X	
La cantidad de preguntas son suficientes para la investigación.					X
La encuesta contribuye a recoger información relevante para el estudio propuesto.				X	

Opinión global:

Puede aplicar el instrumento de investigación

Apellidos y Nombre	NELINO FLORIDA ROFNER	DNI	80142459
Especialidad	Conservación de Suelos y Agua		
Cargo	Docente de la Escuela Profesional de Conservación de Suelos y Agua		
Puntuación Promedio	4.5		
Fecha	26/04/2022	Teléfono	900651979
Firma			

Figura 11. Juicio de experto del proyecto de Tesis

8.4. Resultados de las muestras de suelo en cultivo de papa


UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
 Carretera Central Km 1.21 - Tingo María - CELULAR 944407531
 Facultad de Agronomía - Laboratorio de Análisis de Suelos, Agua y Ecotoxicología
analisisdesuelosunas@hotmail.com

ANÁLISIS DE SUELOS

DEPARTAMENTO		PROVINCIA		DISTRITO		SECTOR		CULTIVO ACTUAL		PROFUNDIDAD DE MUESTREO (cm)														
HUANUCO		PACHITEA		CHAGLLA		C.P. HUACACHI		SIN CULTIVO		30														
DATOS		ANÁLISIS MECÁNICO		ANÁLISIS QUÍMICO		ANÁLISIS QUÍMICO		ANÁLISIS QUÍMICO		ANÁLISIS QUÍMICO														
N°	CODIGO DEL LAB.	REFERENCIA	Arenas		Limo	CLASE TEXTURAL	pH	M.O.		Cd	P	K	CIC	CAMBIABLES					CICe	Bas. Camb	Ac. Camb	Sat. Al		
			%	%				1 : 1	%					%	total	disponible	Ca	Mg					K	Na
1	S0817	M11 - Y	35	21	44	Franco	5.80	3.58	0.18	0.51	27.34	289.87	16.06	13.69	1.24	0.55	0.58	0.00	0.00	--	100.00	0.00	0.00	0.00
2	S0818	M12 - Y	23	33	44	Franco Arcillo limoso	5.58	3.29	0.16	0.44	17.82	168.43	13.02	10.97	0.99	0.39	0.57	0.00	0.00	--	100.00	0.00	0.00	0.00
3	S0819	M13 - Y	29	27	44	Franco Arcillo limoso	5.79	3.55	0.18	0.45	14.71	141.94	13.85	12.24	0.53	0.34	0.54	0.00	0.00	--	100.00	0.00	0.00	0.00
4	S0820	M14 - Y	23	33	44	Franco Arcillo limoso	5.83	2.99	0.12	0.43	16.23	143.44	11.17	9.09	1.22	0.34	0.52	0.00	0.00	--	100.00	0.00	0.00	0.00
5	S0821	M15 - Y	29	29	42	Franco Arcillo limoso	5.29	2.42	0.12	0.34	18.19	220.90	--	4.33	0.37	0.53	0.62	0.35	0.03	6.23	93.90	6.10	5.62	0.00
6	S0822	M16 - A	31	25	44	Franco limoso	5.04	3.55	0.18	0.23	20.74	127.44	--	1.46	0.18	0.37	0.54	1.75	0.12	4.52	58.63	41.37	33.72	0.00
7	S0823	M17 - Y	25	31	44	Franco Arcillo limoso	5.13	3.49	0.17	0.23	22.70	119.45	--	1.36	0.19	0.30	0.62	1.55	0.07	4.19	58.95	41.05	39.38	0.00
8	S0824	M18 - A	35	25	40	Franco	5.64	3.78	0.19	0.31	19.15	191.92	9.96	8.40	0.48	0.49	0.59	0.00	0.00	--	100.00	0.00	0.00	0.00
9	S0825	M19 - A	37	25	38	Franco	5.61	3.26	0.16	0.30	25.15	138.44	11.56	9.74	0.74	0.38	0.70	0.00	0.00	--	100.00	0.00	0.00	0.00
10	S0826	M20 - A	49	19	32	Franco	5.35	4.46	0.22	0.29	24.55	233.90	--	2.90	0.40	0.46	0.57	0.74	0.30	5.37	80.63	19.37	13.78	0.00
11	S0827	M21 - Y	41.00	21.00	38.00	Franco	5.27	3.39	0.17	0.26	22.50	180.92	--	5.24	0.53	0.56	0.63	0.30	0.12	7.48	94.39	5.61	4.01	0.00
12	S0828	M22 - A	35.00	17.00	48.00	Franco	7.12	4.58	0.23	0.33	17.04	138.44	17.46	14.80	1.81	0.35	0.50	0.00	0.00	--	100.00	0.00	0.00	0.00
13	S0829	M23 - Y	35.00	25.00	40.00	Franco	5.87	4.52	0.23	0.31	24.31	153.43	19.40	17.45	1.03	0.35	0.57	0.00	0.00	--	100.00	0.00	0.00	0.00
14	S0830	M24 - Y	25.00	37.00	38.00	Franco Arcilloso	5.88	1.03	0.05	0.28	14.57	151.43	14.54	12.80	0.91	0.33	0.50	0.00	0.00	--	100.00	0.00	0.00	0.00
15	S0831	M25 - Y	31.00	33.00	36.00	Franco Arcilloso	5.30	2.58	0.13	0.29	23.29	141.44	13.22	10.71	1.48	0.39	0.54	0.00	0.00	--	100.00	0.00	0.00	0.00

MUESTREO POR EL SOLICITANTE
 RECIBIDO N° 001 - 0650880
 TINGO MARIA, 02 DE JUNIO 2022


 UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
 Tingo María


 Dr. HUGO ALSEDO HUAMANI VIRAPACULI
 Jefe del Laboratorio de Análisis de Suelos, Agua y Ecotoxicología





UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA

Carretera Central Km 1.21 - Tingo María - CELULAR 944407531

Facultad de Agronomía - Laboratorio de Análisis de Suelos, Agua y Ecotoxicología

analisisdesuelosunas@hotmail.com



ANÁLISIS DE SUELOS

DEPARTAMENTO		PROVINCIA		DISTRITO		SECTOR		CULTIVO ACTUAL		PROFUNDIDAD DE MUESTREO (cm)												
HUANUCO		PACHITEA		CHAGLLA		C.P. HUACACHI		SIN CULTIVO		30												
N°	CODIGO DEL LAB.	ANÁLISIS MECÁNICO			pH	M.O.	N	Cd	P	K	CIC	ANÁLISIS QUÍMICO										
		Arena %	Arcilla %	Limo %								1 : 1 %	%	total	disponible	Ca	Mg	K	Na	Al	H	Cice
1	S0637	M1 - A	45	12	43	3.82	3.80	0.18	0.15	8.72	55.48	--	4.72	0.79	0.14	0.12	1.00	0.10	6.87	83.99	16.01	14.95
2	S0638	M2 - A	43	14	43	4.69	3.18	0.16	0.19	5.97	84.48	--	4.13	0.60	0.23	0.12	0.99	0.01	6.08	83.55	16.45	16.28
3	S0639	M3 - A	35	16	49	4.32	3.42	0.17	0.17	7.03	83.49	--	2.09	0.28	0.11	0.10	1.50	0.18	4.28	60.56	39.44	35.21
4	S0640	M4 - Y	23	22	55	5.95	3.97	0.20	0.52	7.17	121.95	20.30	17.89	1.88	0.33	0.20	0.00	0.00	--	100.00	0.00	0.00
5	S0641	M5 - Y	27	20	53	5.55	2.56	0.19	0.59	6.41	115.95	13.82	11.40	1.87	0.32	0.23	0.00	0.00	--	100.00	0.00	0.00
6	S0642	M6 - Y	17	18	65	5.07	2.52	0.19	0.18	6.20	79.66	--	5.27	0.68	0.23	0.17	1.45	0.15	7.95	79.67	20.13	18.24
7	S0643	M7 - Y	33	22	45	5.54	3.54	0.18	0.51	6.46	78.67	11.88	9.72	1.50	0.25	0.21	0.00	0.00	--	100.00	0.00	0.00
8	S0644	M8 - Y	43	18	39	6.55	3.86	0.17	0.11	5.80	104.85	21.58	16.72	2.32	0.32	0.23	0.00	0.00	--	100.00	0.00	0.00
9	S0645	M9 - Y	31	30	39	6.83	2.93	0.15	0.10	6.91	88.96	18.78	15.64	2.55	0.33	0.27	0.00	0.00	--	100.00	0.00	0.00
10	S0646	M10 - Y	33	24	43	5.81	3.48	0.17	0.11	8.47	73.97	25.21	21.46	3.46	0.17	0.12	0.00	0.00	--	100.00	0.00	0.00

MUESTREO POR EL SOLICITANTE

RECIBIDO N° 001 - 09484681

TINGO MARÍA, 06 DE MAYO 2022

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA

Tingo María

DICHAZO ALFREDO HUAMANI YUPANQUI
Jefe del Laboratorio de Análisis de Suelos, Agua y Ecotoxicología





UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
 Carretera Central Km 1.21 - Tingo María - CELULAR 944407531
 Facultad de Agronomía - Laboratorio de Análisis de Suelos, Agua y Ecotoxicología
 analisisdesuelosunas@hotmail.com



ANÁLISIS DE SUELOS

DEPARTAMENTO		PROVINCIA		DISTRITO		SECTOR		CULTIVO ACTUAL		PROFUNDIDAD DE MUESTREO (cm)												
HUANUCO		PACHITEA		CHAGLLA		C.P. HUACACHI		SIN CULTIVO		30												
N°	CODIGO DEL LAB.	DATOS		ANÁLISIS MECÁNICO		pH	M.O.	N	Cd	P	K	CIC	ANÁLISIS QUÍMICO									
		REFERENCIA	Aréna %	Arcilla %	Limo %								CLASE TEXTURAL	1:1	%	%	total	ppm	ppm	ppm	Ca	Mg
1	S1746-1	M1-A	67	8	25	4.97	3.67	0.18	0.16	91.047	95.52	-	2.25	0.20	0.44	0.05	1.07	0.13	4.15	71.06	28.94	25.80
2	S1746-2	M2-A	67	10	23	4.85	3.22	0.16	0.17	94.899	94.83	-	1.93	0.19	0.52	0.05	0.98	0.22	3.90	69.20	30.80	25.15
3	S1746-3	M3-A	35	16	49	4.12	3.19	0.17	0.21	23.600	33.52	-	2.11	0.27	0.13	0.10	1.52	0.19	4.32	60.42	39.58	35.19
4	S1746-4	M4-Y	53	12	35	5.88	3.44	0.17	0.51	79.484	114.85	-	6.15	0.42	0.49	0.05	0.00	0.00	-	100.00	0.00	0.00
5	S1746-5	M5-Y	27	20	53	5.58	2.33	0.13	0.57	32.800	115.88	13.84	11.41	1.87	0.32	0.24	0.00	0.00	-	100.00	0.00	0.00
6	S1746-6	M6-Y	29	32	39	6.06	2.44	0.12	0.19	28.643	110.95	4.58	3.77	0.52	0.23	0.05	0.00	0.00	-	100.00	0.00	0.00
7	S1746-7	M7-Y	48	18	36	5.52	2.54	0.15	0.50	100.033	115.77	6.10	5.34	0.48	0.22	0.05	0.00	0.00	-	100.00	0.00	0.00
8	S1746-8	M8-Y	29	34	37	7.30	2.69	0.13	0.12	24.517	119.20	5.22	5.01	0.91	0.23	0.07	0.00	0.00	-	100.00	0.00	0.00
9	S1746-9	M9-Y	33	32	35	7.40	3.18	0.16	0.13	67.084	115.45	5.90	5.66	0.54	0.27	0.05	0.00	0.00	-	100.00	0.00	0.00
10	S1746-10	M10-Y	33	24	43	5.67	3.10	0.17	0.11	41.800	73.38	4.18	3.45	0.45	0.17	0.10	0.00	0.00	-	100.00	0.00	0.00
11	S1746-11	M11-Y	73	12	15	6.39	3.12	0.21	0.61	114.074	120.56	-	2.88	0.25	0.53	0.04	0.55	0.35	4.79	78.12	20.88	13.57
12	S1746-12	M12-Y	47	12	38	6.42	3.18	0.19	0.28	83.746	101.90	-	2.10	0.23	0.40	0.04	0.55	0.13	4.14	81.17	18.83	13.59
13	S1746-13	M13-Y	43	18	41	5.97	3.41	0.18	0.47	89.070	110.79	-	2.73	0.18	0.43	0.05	0.53	0.07	4.30	79.07	20.93	19.30
14	S1746-14	M14-Y	33	22	45	4.91	2.14	0.13	0.47	91.580	105.05	-	2.39	0.20	0.50	0.05	1.13	0.07	4.35	72.39	27.61	28.00
15	S1746-15	M15-Y	49	14	37	5.53	2.23	0.13	0.39	90.957	109.35	5.52	5.33	0.67	0.46	0.05	0.00	0.00	-	100.00	0.00	0.00
16	S1746-16	M16-Y	31	25	44	4.96	3.42	0.18	0.18	80.650	127.60	-	1.45	0.18	0.57	0.64	1.75	0.12	4.52	58.53	41.37	38.72
17	S1746-17	M17-A	25	31	44	5.38	3.37	0.17	0.28	75.600	119.70	-	1.36	0.19	0.50	0.62	1.55	0.07	4.19	58.95	41.05	39.35
18	S1746-18	M18-A	65	8	27	4.59	3.46	0.22	0.23	112.870	115.89	-	2.61	0.21	0.54	0.10	1.33	0.07	4.28	67.40	23.50	17.64
19	S1746-19	M19-A	73	12	15	4.53	3.95	0.20	0.28	106.773	103.58	-	2.01	0.18	0.53	0.05	1.23	0.12	4.20	67.86	32.14	29.28
20	S1746-20	M20-A	65	10	25	4.83	4.29	0.21	0.37	121.776	108.23	-	1.99	0.14	0.56	0.05	1.21	0.08	4.04	68.07	31.93	29.95
21	S1746-21	M21-Y	51	14	35	4.51	3.05	0.15	0.31	89.684	115.88	-	1.99	0.14	0.56	0.05	1.21	0.08	4.04	68.07	31.93	29.95
22	S1746-22	M22-A	59	8	33	6.51	4.53	0.23	0.41	83.024	97.91	5.94	6.18	0.44	0.26	0.05	0.00	0.00	-	100.00	0.00	0.00
23	S1746-23	M23-Y	39	28	33	6.43	3.36	0.17	0.29	57.084	69.97	4.92	4.34	0.38	0.13	0.07	0.00	0.00	-	100.00	0.00	0.00
24	S1746-24	M24-Y	35	26	39	5.68	2.54	0.13	0.35	82.703	107.73	5.56	5.31	0.59	0.50	0.05	0.00	0.00	-	100.00	0.00	0.00
25	S1746-25	M25-Y	29	32	39	7.00	2.81	0.14	0.37	57.084	104.70	6.14	6.14	0.93	0.23	0.07	0.00	0.00	-	100.00	0.00	0.00

MUESTREO POR EL SOLICITANTE
 RECIBIDO 007 N° 0683222
 TINGO MARIA, 10 DE NOVIEMBRE 2022

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
 Tingo María

Dr. HUGO ALFREDO HUAMANÍ YUPANQUI
 Jefe Laboratorio de Análisis de Suelos, Agua y Ecotoxicología





Figura 12. Suelo de interés-cultivo de papa



Figura 13. Georreferenciación de los puntos de muestreo



Figura 14. Georreferenciación de los puntos de muestreo



Figura 15. Cuarteo y mezclado de la muestra de suelo



Figura 16. Recolección de muestra de suelo con cultivo de papa



Figura 17. Preparación del monolito en suelo con cultivos de papa.



Figura 18. Medidas del monolito en suelos con cultivo de papa



Figura 19. Recolección de los estratos del suelo a diferentes profundidades



Figura 20. Identificación de la macrofauna del suelo de papa



Figura 21. Encuesta a los agricultores de cultivo de papa.

8.5. Prueba de normalidad y media significativas múltiples

