

UNIVERSIDAD NACIONAL DE JAÉN

FACULTAD DE INGENIERÍA



**UNIVERSIDAD NACIONAL
DE JAÉN**

**CARRERA PROFESIONAL DE INGENIERÍA FORESTAL
Y AMBIENTAL**

**IMPACTO DE PESTICIDAS SOBRE LA FERTILIDAD DEL
SUELO Y LA RESTAURACIÓN DE SU MICROBIOTA EN
EL DISTRITO BELLAVISTA, CAJAMARCA, 2022**

**INFORME FINAL DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO
PROFESIONAL DE INGENIERO FORESTAL Y AMBIENTAL**

Autor: Bach. Herrera Sarango, Anderson.

Asesor: Dr. Garay Román, Juan Manuel.

Línea de investigación: Conservación, manejo y aprovechamiento de los recurso naturales

JAÉN-PERÚ 2025

Anderson Herrera Sarango

IMPACTO DE PESTICIDAS SOBRE LA FERTILIDAD DEL SUELO Y LA RESTAURACIÓN DE SU MICROBIOTA EN EL DISTRITO B...

-  Quick Submit
-  Quick Submit
-  Universidad Nacional de Jaen

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:old::1:3250013918

46 Páginas

Fecha de entrega

14 may 2025, 11:48 a.m. GMT-5

8970 Palabras

Fecha de descarga

14 may 2025, 11:52 a.m. GMT-5

47.711 Caracteres

Nombre de archivo

DISTRITO_BELLAVISTA_CAJAMARCA_1_-anderson_herrera_sarango.pdf

Tamaño de archivo

2.4 MB

 UNIVERSIDAD NACIONAL DE JAÉN
Dr. Alexander Huamán Mera
Responsable de la Unidad de Investigación de la Facultad de Ingeniería

ACTA DE SUSTENTACIÓN

El día 29 de mayo del año 2025, siendo las 10:00 horas, se reunieron los integrantes del Jurado en las instalaciones de la escuela profesional de ingeniería forestal y ambiental

Presidente : Mg. Annick Estefany Huaccha Castillo

Secretario : Dr. Wagner Colmenares Mayanga

Vocal : Dr. Cirilo Mario Caira Mamani, para evaluar la Sustentación del informe final:

() Trabajo de Investigación

(X) Tesis

() Trabajo de Suficiencia Profesional

Titulado:

Impacto de pesticidas sobre la fertilidad del suelo y la restauración de su microbiota en el distrito Bellavista, Cajamarca 2022", presentado por el bachiller: Anderson Herrera Sarango de la Escuela Profesional de Ingeniería Forestal y ambiental de la Universidad Nacional de Jaén.

Después de la sustentación y defensa, el Jurado acuerda:

(X) Aprobar

() Desaprobar

(X) Unanimidad

() Mayoría

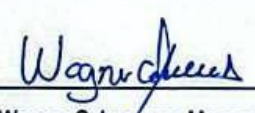
Con la siguiente mención:

a) Excelente	18, 19, 20	()
b) Muy bueno	16, 17	(16)
c) Bueno	14, 15	()
d) Regular	13	()
e) Desaprobado	12 ó menos	()

Siendo las 10:40 horas del mismo día, el Jurado concluye el acto de sustentación confirmando su participación con la suscripción de la presente.


Mg. Annick Estefany Huaccha Castillo

Presidente


Dr. Wagner Colmenares Mayanga

Secretario


Dr. Cirilo Mario Caira Mamani

Vocal

Escaneado con CamScanner

"Nombre del Año"

ANEXO N°06:

**DECLARACIÓN JURADA DE AUTENTICIDAD Y DE NO PLAGIO
DE LA TESIS O TRABAJO DE INVESTIGACIÓN (PREGRADO)**

Yo, **ANDERSON HERRERA SARANGO**, egresado de la carrera Profesional de **INGENIERIA FORESTAL Y AMBIENTAL** de la Facultad de **INGENIERIA** de la Universidad Nacional de Jaén, identificado (a) con DNI 75803666

Declaro bajo juramento que:

1. Soy Autor del trabajo titulado:

"IMPACTO DE PESTICIDAS SOBRE LA FERTILIDAD DEL SUELO Y LA RESTAURACION DE SU MICROBIOTA EN EL DISTRITO BELLAVISTA, CAJAMARCA, 2022".

Asesorado por DR. JUAN MANUEL GARAY ROMAN.

El mismo que presento bajo la modalidad de asesor para optar; el Título Profesional/Grado Académico de **INGENIERIA FORESTAL Y AMBIENTAL..**

2. El texto de mi trabajo final respeta y no vulnera los derechos de terceros, incluidos los derechos de propiedad intelectual. En el sentido, el texto de mi trabajo final no ha sido plagiado total ni parcialmente, para la cual he respetado las normas internacionales de citas y referencias de las fuentes consultadas.
3. El texto del trabajo final que presento no ha sido publicado ni presentado antes en cualquier medio electrónico o físico.
4. La investigación, los resultados, datos, conclusiones y demás información presentada que atribuyo a mi autoría son veraces.
5. Declaro que mi trabajo final cumple con todas las normas de la Universidad Nacional de Jaén.
6. Soy consciente de que el hecho de no respetar los derechos de autor y hacer plagio, es objeto de sanciones universitarias y/o legales.

El incumplimiento de lo declarado da lugar a responsabilidad del declarante, en consecuencia; a través del presente documento asumo frente a terceros, la Universidad Nacional de Jaén y/o la Administración Pública toda responsabilidad que pueda derivarse por el trabajo final presentado. Lo señalado incluye responsabilidad pecuniaria incluido el pago de multas u otros por los daños y perjuicios que se ocasionen.

Fecha: Jaén, 9 de julio del 2025.



Nombre: Anderson Herrera Sarango
DNI: 75803666

ÍNDICE

RESUMEN

ABSTRACT

I.	INTRODUCCIÓN	mm
II.	MATERIAL Y MÉTODOS.....	mm
	2.1 Población, muestra y muestreo	mm
	2.1.1 Población	mm
	2.1.2 Muestra.....	mm
	2.1.3 Muestreo	mm
	2.2 Metodología	mm
	2.2.1 Método.....	mm
	2.3 Técnica.....	mm
	2.4 Procedimiento	mm
III.	RESULTADOS	mm
IV.	DISCUSIÓN	mm
V.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	mm
VI.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	mm
	AGRADECIMIENTO	mm
	DEDICATORIA	mm
	ANEXOS	mm

ÍNDICE DE TABLAS

Pág.

Tabla 1 <i>Modelo estadístico de superficie de respuesta.....</i>	<i>vv</i>
Tabla 2 <i>Ingredientes para la restauración del suelo arrocero</i>	<i>bb</i>
Tabla 3 <i>Calidad del suelo por su conductividad eléctrica.....</i>	<i>nn</i>
Tabla 4 <i>Niveles de pH de suelos</i>	<i>nn</i>
Tabla 5 <i>Calidad del suelo por su ratio C/N.....</i>	<i>nn</i>
Tabla 6 <i>Modelo estadístico de superficie de respuesta.....</i>	<i>nn</i>
Tabla 7 <i>Conductividad eléctrica de suelo arrocero superficial y suelo restaurado</i>	<i>nn</i>
Tabla 8 <i>Valores del pH de suelo arrocero superficial y suelo restaurado</i>	<i>nn</i>
Tabla 9 <i>Análisis microbiológico de suelo arrocero superficial</i>	<i>nn</i>
Tabla 10 <i>Análisis microbiológico de suelo arrocero restaurado</i>	<i>nn</i>
Tabla 11 <i>Determinación del índice C/N del suelo en suelo arrocero superficial</i>	<i>nn</i>
Tabla 12 <i>Determinación del índice C/N del suelo después de la restauración.....</i>	<i>nn</i>
Tabla 13 <i>Diseño Box–Behnken para el suelo arrocero superficial y restaurado</i>	<i>nn</i>
Tabla 14 <i>Análisis de varianza para el índice C/N</i>	<i>nn</i>
Tabla 15 <i>Parámetros de optimización</i>	<i>nn</i>

ÍNDICE DE FIGURAS

Pág.

Figura 1 Letreros de identificación para el muestreo de suelo.....	mm
Figura 2 Plano topográfico de la zona de estudio, CP. Tamborapa, Bellavista	mm
Figura 3 Muestreo de suelo arrocero superficial antes de la biorremediación.....	mm
Figura 4 Construcción de las estacas para los puntos de muestreo	mm
Figura 5 Tamizado del abono orgánico a partir de estiércol	mm
Figura 6 Labranza del terreno según corresponda la fórmula.....	mm
Figura 7 Preparación del estiércol de bovino y porcino	mm
Figura 8 Análisis de la conductividad eléctrica.....	mm
Figura 9 Medición del pH del suelo.....	mm
Figura 10 Señalización de los puntos de muestreo y control en pozas de arroz.....	mm
Figura 11 Conductividad eléctrica antes y después de la restauración del suelo	mm
Figura 12 Acidez del suelo antes y después de la restauración del suelo.....	mm
Figura 13 Puntos de suelo arrocero intervenidos para su restauración	mm
Figura 14 Muestreo del suelo restaurado	mm
Figura 15 Diagrama de Pareto para el índice C/N	mm
Figura 16 Efectos principales para el índice C/N.....	mm

RESUMEN

El uso de pesticidas en el cultivo de arroz ha generado impactos negativos en la fertilidad del suelo y la microbiota edáfica. La investigación evaluó este impacto en el distrito Bellavista, Cajamarca. Los resultados del análisis físico, químico y microbiológico en suelo arrocero superficial fueron: conductividad 2.55 dS/m, pH 5.20 y un índice carbono/nitrógeno C/N entre 7.6 – 8.6. Una microbiota igual a 10^5 bacterias, 10^3 hongos y 6×10 nematodos. Esto indicó que el uso intensivo de pesticidas redujo significativamente la microbiota del suelo y alteró su equilibrio químico, disminuyendo su fertilidad. Como estrategia se implementó un diseño de superficie de respuesta Box-Behnken con diferentes niveles de labranza, estiércol bovino/porcino y NPK líquido, con el objetivo de determinar la mejor fórmula de restauración del suelo. Se logró mejorar estos indicadores: Conductividad eléctrica 0.38 dS/m, pH igual a 6.27, el índice C/N entre 10.9 y 14.6 C/N. Una microbiota de 10^7 bacterias, 10^6 hongos y 10^2 nematodos. La optimización estadística determinó un índice C/N óptimo de C/N = 15.2 mediante el tratamiento de labranza cada cinco días, 700 g/m² de estiércol bovino/porcino y 1000 mL/m² de NPK líquido. Se evidenció incremento de actividad microbiana, e incremento de la fertilidad del suelo.

Palabras claves: Pesticida, fertilidad de suelo, microbiota.

ABSTRACT

The use of pesticides in rice cultivation has generated negative impacts on soil fertility and soil microbiota. The research evaluated this impact in the Bellavista district, Cajamarca. The results of the physical, chemical and microbiological analysis in superficial rice soil were: conductivity 2.55 dS/m, pH 5.20 and a carbon/nitrogen index C/N between 7.6 – 8.6. A microbiota equal to 10^5 bacteria, 10^3 fungi and 6×10 nematodes. This indicated that the intensive use of pesticides significantly reduced the soil microbiota and altered its chemical balance, decreasing its fertility. As a strategy, a Box-Behnken response surface design was implemented with different levels of tillage, bovine/pig manure and liquid NPK, with the aim of determining the best soil restoration formula. These indicators were improved: Electrical conductivity 0.38 dS/m, pH equal to 6.27, C/N index between 10.9 and 14.6 C/N. A microbiota of 10^7 bacteria, 10^6 fungi and 10^2 nematodes. Statistical optimization determined an optimal C/N index of C/N = 15.2 through the treatment of tillage every five days, 700 g/m² of bovine/pig manure and 1000 mL/m² of liquid NPK. An increase in microbial activity and an increase in soil fertility were evident.

Keywords: Pesticide, soil fertility, microbiota.

I. INTRODUCCIÓN

La problemática investigada se relacionó con terrenos agrícolas impactados por el uso continuo de pesticidas como el carbendazim, que es un fungicida utilizado para el control de plagas y patógenos del arroz; así mismo, fertilizantes químicos para el mejoramiento de la producción arrocerá. La investigación fue realizada en dos hectáreas de suelo arrocerá en el centro poblado Tamborapa del distrito Bellavista, sector beneficiado por su clima tropical para el cultivo de arroz además el cauce del río Tabaconas cruza este valle por medio del centro poblado incentivando de esta forma el cultivo de arroz dependiente de grandes volúmenes de recurso hídrico. La problemática se centró sobre la fertilidad del suelo medido por el índice carbono/nitrógeno. Según Sela (2021), el suelo es un ecosistema complejo que alberga una diversidad de microorganismos fundamentales para el reciclaje de nutrientes, la descomposición de materia orgánica y la formación de estructuras estables que favorecen su fertilidad. Sin embargo, la aplicación constante de agroquímicos puede alterar el equilibrio microbiano, reduciendo la población de bacterias y hongos beneficiosos y promoviendo la proliferación de especies resistentes o patógenas (Roman *et al.*, 2021). Estos cambios pueden traducirse en una menor disponibilidad de nutrientes para las plantas, una estructura del suelo deteriorada y una reducción de su capacidad para retener agua y carbono. El uso de pesticidas en la agricultura ha sido una herramienta clave para el control de plagas y el incremento de la productividad en los cultivos. Sin embargo, su uso indiscriminado y recurrente ha generado una preocupación ambiental debido a los impactos negativos sobre la calidad del suelo y su microbiota (Mehjin *et al.*, 2019). El uso intensivo de pesticidas ha planteado interrogantes sobre su efecto en la fertilidad del suelo y la capacidad de este para regenerar su comunidad microbiana esencial para la sostenibilidad de los ecosistemas agrícolas. La “**causa**” del problema siempre es lo mismo, uso continuo y desmedido de pesticidas (derivados de hidrocarburos en la mayoría de los casos) como medio de lograr una rentable cosecha arrocerá, a pesar del potencial impacto que significa para el medio ambiente y los seres humanos (Ali *et al.* 2018). El “**efecto**” de utilizar pesticidas (herbicidas, fungicidas,

etc.) continuamente en cualquier cultivo, y mayor frecuencia en cultivos arroceros; es que, siendo aplicados al follaje de las plantas, en el 99 % de los casos estas sustancias químicas impactan al suelo afectando la vida de microorganismos (microbiota) presentes en el suelo superficial, produciendo mortalidad de microorganismos, restándole calidad edáfica y fertilidad al suelo según afirmó Mehjin *et al.* (2019). Esta investigación aportó información relevante para la toma de decisiones en la gestión sostenible del suelo, promoviendo prácticas agrícolas que permitan mantener la productividad sin comprometer la salud del ecosistema. Con ello, se espera contribuir al desarrollo de estrategias de manejo que minimicen los efectos negativos de los pesticidas y favorezcan la restauración de la microbiota del suelo en beneficio de la seguridad alimentaria. Los pesticidas son utilizados para combatir las plagas que afectan el cultivo de arroz (MINAM, 2016), sin ellos no es posible lograr cosechas rentables de arroz. Este fenómeno ha convertido el uso de pesticidas (sobre todo en monocultivos, como el arroz) en una forma de impacto ambiental del suelo. Chaves *et al.* (2013) mencionó que la calidad de un suelo se mide por la presencia de materia orgánica y una determinada comunidad microbiana. El impacto es agravado cuando estos pesticidas químicos son acumulados en la capa superficial del mantillo del suelo, eliminando progresivamente la microbiota del suelo. Sin embargo, todas estas sustancias químicas derivadas del petróleo son la mayoría de las veces son transportadas por la humedad alojándose en cada rincón del suelo (MIDAGRI, 2016). Actualmente, los cultivos son sensibles a la proliferación de plagas que merman la productividad agrícola, esto obliga el uso de fungicidas para eliminar hongos y herbicidas como el glifosato para eliminar maleza de las plantaciones (Moore, 2001). Generalmente, los productos químicos impactan el suelo en su microbiota y fertilidad del suelo (medido en su ratio Carbono/Nitrógeno) esta problemática fue materia de investigación en este informe.

Jaén es esencialmente agrícola y el cultivo muy requerido que se desarrolla dos campañas durante el año es la producción del arroz. Actualmente, el manejo agronómico del arroz requiere de fuertes dosis de urea como fuente de fertilización y una amplia gama de herbicidas para lograr una cosecha con cierta rentabilidad. Sin embargo, la urea $[\text{CO}(\text{NH}_2)_2]$ es un fertilizante relacionando continuamente con la contaminación ambiental por cuanto la oxidación de los iones amonio NH_4^+ a iones nitrato NO_3^- libera iones hidrógeno contribuyendo a la acidez en el suelo (Ramírez, 2018). Además, su alto porcentaje de nitrógeno dentro de su composición (46 % N) convierte al suelo dependiente de este

nutriente para cada ciclo o campaña agrícola. De otra parte la disolución de las sustancias nitrogenadas como el NO_3^- produce eutrofización de mantos freáticos subterráneos. De otro lado, Mehjin *et al.* (2019) investigó el impacto de los pesticidas sobre la microbiota del suelo por su impacto ambiental. Para determinar la influencia de los pesticidas hicieron un recuento de los microorganismos del suelo y actividades microbianas. Observaron que la adición de herbicidas a base de glifosato 48 % e insecticidas como el *Alfa* cipermetrina 10 % y el malation 50 % cuando fueron agregados por separado al suelo a 0, 50, 100 y 200 ppm (mg/kg) e incubados en el laboratorio a 30 °C obtuvieron resultados que demostraron que la adición de los tres pesticidas mencionados disminuyó significativamente la microbiota y actividades y recuentos de bacterias, hongos y actinomicetos del suelo. Detectaron que el efecto observado dependía del tipo y cantidad de plaguicida, así como de la duración. Las actividades microbianas y el N° de bacterias, hongos y actinomicetos fueron inversamente proporcional a la concentración de plaguicidas añadidos al suelo. A mayor concentración con malation encontraron menor actividad microbiana de bacterias, hongos y actinomicetos.

Wang *et al.* (2016) investigaron el impacto sobre el suelo por tebuconazol y carbendazim que son fungicidas agrícolas. Realizaron un experimento de mesocosmos para determinar la disipación y efectos individuales y combinados de tebuconazol y carbendazim sobre las propiedades microbianas (respiración basal, ureasa, fosfatasa alcalina, invertasa y deshidrogenasa). La disipación de tebuconazol y carbendazim se vio afectada por la concentración de los fungicidas al aplicarse individualmente. Concentraciones moderadas y altas de tebuconazol inhibieron significativamente la respiración del suelo y las actividades enzimáticas. Es decir, se vio afectada la fertilidad del suelo expresada por su ratio carbono/nitrógeno. Así, Roman *et al.* (2021) investigaron la toxicidad del fungicida triazol para una amplia gama de organismos no objetivo. Presentaron información sistemática de efectos producidos sobre la microbiota y actividad del suelo en enzimas del suelo por los fungicidas triazólicos: ciproconazol, difenoconazol, epoxiconazol, flutriafol, hexaconazol, metconazol, miclobutanilo, paclobutrazol, propiconazol, tebuconazol, tetraconazol, triadimenol, triadimefón y triticonazol. Efectos de fungicidas triazoles sobre la actividad del suelo son dependientes de la dosis. Las altas dosis de triazoles afectan fuertemente la estructura microbiana del suelo y disminuyen su población además de las actividades de las enzimas edáficas. Concluyeron que los fungicidas pueden afectar el suelo ya sea por su efecto directo aplicación contra patógenos fúngicos transmitidos por el suelo y también

indirectamente rociándolos sobre superficies foliares. Así mismo, Baémaga *et al.* (2019) investigaron la contaminación por plaguicidas como seria amenaza de suelos agrícolas. Los niveles en el suelo ejercen efectos negativos sobre organismos del suelo al disminuir su biodisponibilidad y, en consecuencia, disminuyen la calidad del suelo, expresadas en su ratio C/N. Tuvieron como objetivo evaluar el efecto de una mezcla de *espiroxamina*, *tebuconazol*, y *triadimenol* (S+Te+Tr) sobre el suelo en base a proliferación de microorganismos y su actividad del suelo (carbono/nitrógeno). Y, Chaves *et al.* (2013) evaluaron agroquímicos como: Glifosato, Bispiribac, Azoxystrobin y Malatión, en dosis comerciales, en un diseño experimental de bloques con medidas repetidas. El recuento de microorganismos fue en muestras de suelo rizosférico usando la metodología de transectos. Contaron bacterias Gram (+), Gram (-), actinomicetos, y los grupos funcionales fijadores de nitrógeno y solubilizadores de fósforo, junto con los hongos *Trichoderma spp.*, *Fusarium spp.* y *Penicillium spp.* Los hongos, los actinomicetos y los solubilizadores de fósforo fueron los microorganismos más afectados por los agroquímicos, con reducciones en su abundancia. Las bacterias presentaron comportamiento variable dependiendo del agroquímico y los fijadores de nitrógeno fueron estimulados por los tratamientos. Estos resultados indicaron que los agroquímicos utilizados impactan de diferente manera a los microorganismos responsables de la descomposición de la materia orgánica. Ramírez-Campos (2018) recopiló información sobre los aspectos relevantes respecto al uso de pesticidas y su impacto en ecosistemas naturales y la salud. Los resultados fueron utilizados por la necesidad de contrarrestar el efecto negativo de las plagas, enfermedades y malezas sobre el rendimiento de los cultivos. Los efectos ambientales generados son resultado de la intensificación y extensión agrícola como base de la alimentación en la población mundial. Además, existen muchos reportes de casos por contaminación de residuos tóxicos en las diferentes regiones del mundo. La investigación se realizó en base al objetivo general: Evaluar el impacto de los pesticidas empleados sobre la fertilidad y la restauración de su microbiota en el distrito Bellavista, en Cajamarca, 2022. Y, se planificaron los siguientes objetivos específicos: Análisis físico, químico (pH, C/N) y microbiológico del suelo arrocero superficial, adaptación de un sistema de evaluación del efecto de pesticidas en suelo arrocero, Determinar la dosis de restauración con mejor respuesta de C/N y aplicar un diseño estadístico superficie de respuesta para restauración del suelo.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Población, muestra y muestreo

2.1.1 Población:

La población se conformó por terrenos dedicados al cultivo de arroz del distrito Bellavista, Cajamarca. Sobre el terreno evaluado se adaptó el sistema un área de dos hectáreas de suelo y perímetro de 701.35 m. dedicado al cultivo de arroz la cual se intervino para la investigación. La altitud del terreno fue 700 msnm, T° máxima 31 °C, T° mínima 23 °C, adyacente al río Tabaconas que cruzó el centro poblado Tamborapa. La zona intervenida está basada al monocultivo arrocerero.

2.1.2 Muestra

Las muestras de suelo fueron extraídas de las pozas de arroz, cada poza tuvo largo 40 m. y ancho 20 m. La calicata tuvo largo: 30 cm. ancho: 30 cm. y 5 cm. de profundidad. Cada muestra obtenida pesó 250 gramos. El suelo extraído fue del horizonte cero “O”, es decir de un suelo típico arrocerero y de condiciones superficiales.

Por otra parte, después de aplicar el tratamiento de biorremediación se extrajo suelo de cada uno de los 13 puntos de tratamiento. Para ello cada punto de suelo fue identificado con un letrero. De esta manera se individualizó el análisis de suelo de cada muestra por separado.

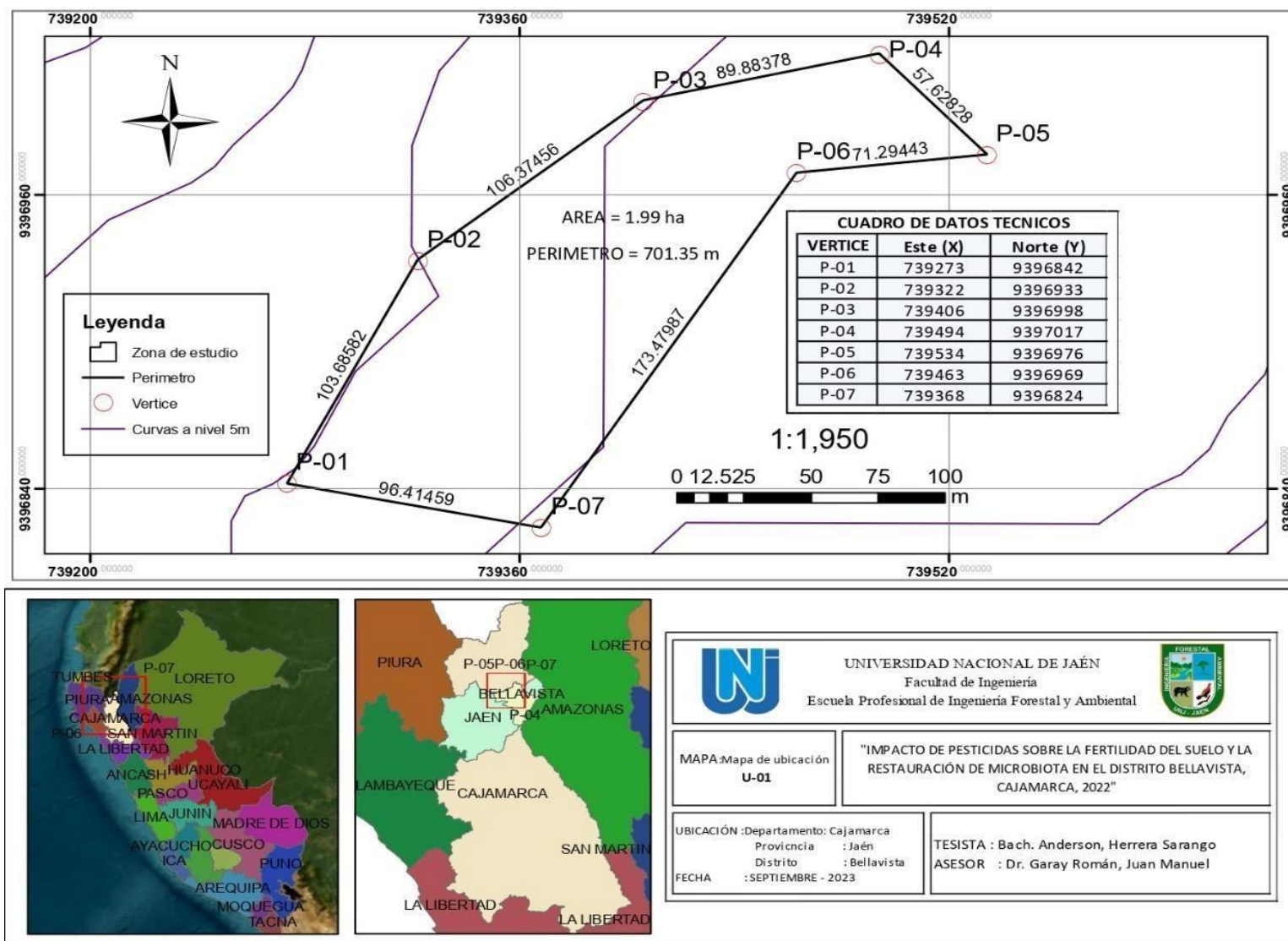
Figura 1

Construcción de las estacas para los puntos de muestreo



Figura 2

Plano topográfico de la zona de estudio, CP. Tamborapa, Bellavista



2.1.3 Muestreo

Según Beyers *et al.* (2005) la microbiota del suelo es hallada superficialmente a una profundidad máxima de dos pulgadas (cinco centímetros). Para el muestreo de suelo sin tratamiento y de suelo restaurado se siguió la técnica descrita en el D.S. N° 002-1013 MINAM. Se retiró escombros extraños al suelo y con una pala se delineó una calicata cuadrada de 30 cm por lado. El suelo extraído se etiquetó en una bolsa negra con el número del punto de muestreo. Esta actividad se realizó sobre el suelo basada en dos condiciones:

a) Suelo superficial arrocero

Para el análisis microbiológico del suelo y de la determinación del índice carbono/nitrógeno C/N en un Laboratorio especializado, se extrajeron 13 muestras de 250 gramos cada una en puntos designados al azar. Luego se embalaron y sellaron para su traslado respectivo.

Para el análisis físico, químico que midió la conductividad eléctrica y el pH se tomaron 13 muestras de suelo al azar cada una de 250 gr, las cuales fueron trasladadas al Laboratorio de la Universidad Nacional de Jaén.

Figura 3

Muestreo de suelo arrocero superficial antes de la biorremediación



b) Suelo arrocero restaurado

El suelo arrocero restaurado fue aquel suelo que recibió las distintas formulaciones de biorremediación aplicadas de forma concordante al diseño estadístico establecidos en las tablas 1 y 2. Antes del muestreo se realizó la señalización de 13 puntos de muestreo sobre el área designada para la investigación. Cada punto de control estuvo delimitado por un área cuadrada de un metro por cada lado, y rotulado con un letrero numerado

para su identificación al momento de extraerse el suelo. La señalización de los 13 puntos fue señalada dentro del perímetro de la poza de arroz materia de la investigación.

Figura 4

Letreros de identificación para el muestreo de suelo



Muestreo del estiércol

Se pesó un total de 10 kilogramos de estiércol (compuesto por cinco kg de estiércol bovino y cinco kg de estiércol de cerdo). Se procedió al secado natural de ambos sólidos, al cabo de siete días se mezclaron y estrujaron hasta una textura fina y se pesaron en cantidades establecidos en el diseño referido de las **tablas 1 y 2**. Así, se envasaron formulas embolsadas de 100, 400 y 700 gramos de estiércol bovino/porcino, en una proporcionalidad de 1:1. Es decir, cada muestra de estiércol contenía el 50 % de estiércol de bovino y 50 % de estiércol porcino.

Figura 5

Tamizado del abono orgánico a partir de estiércol



2.2 Metodología

La metodología ejecutó los 13 tratamientos aplicados con tres dosis de biorremediación y tres variables diferentes y todos los resultados procesados al mismo tiempo de forma que cada tratamiento fue independiente el uno del otro.

2.2.1 Método

Se intervinieron dos pozas de arroz, en el que se demarcaron 13 puntos de muestreo: P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7, P8, P9, P10, P11, P12, P13, acorde a la figura 2. Cada punto intervenido en la poza de arroz fue de un metro cuadrado, además limpiado de todo objeto extraño como raíces, hojas secas o piedras. Y, con una pala se extrajo suelo en un área de 30 x 30 cm.

Tabla 1

Modelo estadístico de superficie de respuesta

Nº	Labranza (días) “A”	Estiércol de bovino/cerdos (gr/m ²) “B”	NPK líquido (mL/m ²) “C”
1	-	-	0
2	+	-	0
3	-	+	0
4	+	+	0
5	-	0	-
6	+	0	-
7	-	0	+
8	+	0	+
9	0	-	-
10	0	+	-
11	0	-	+
12	0	+	+
13	0	0	0

Fuente: Adaptación de Ward *et al.* (2008).

Interpretación:

La tabla 1 estableció las condiciones de restauración para cada punto del muestreo del

terreno arrocero. Por ejemplo, para el punto de muestreo 2 se trabajó con las condiciones: labranza (+), estiércol de bovino/cerdo (-) y NPK líquido (0); con estas especificaciones de la tabla 1, se fijaron valores de acuerdo al diseño establecidos en la tabla 2. Esto fue que para este punto señalado se aplicó una labranza (15 días), estiércol de bovino/porcino (100 gr/m²) y NPK líquido (600 mL/m²). Y, así se trabajó para cada punto de restauración de suelo. Después del tratamiento aplicado, mediante un análisis se determinó el punto con mejor respuesta C/N debido a la restauración orgánica.

Tabla 2

Ingredientes para la restauración del suelo arrocero

Nivel de concentración	Labranza (días) “A”	Estiércol de bovino/porcino (1:1) (gr/m²) “B”	NPK líquido (mL/m²) “C”
Mínimo (-)	5	100	200
Medio (0)	10	400	600
Máximo (+)	15	700	1000

Nota: Adaptado de Ward *et al.* (2008).

Interpretación:

Cada punto de suelo arrocero previamente identificado fue labrado cada 5, 10 o 15 días según le correspondió en el diseño establecido en la tabla 1. También recibió 100, 400 o 700 de estiércol preparado para cada punto según correspondió al diseño referido. Finalmente, cada punto señalado de suelo recibió 200, 600 o 1000 mL/m² de NPK según correspondió al diseño.

2.3 Técnica:

La técnica empleada fue experimental en la cual se manipuló un área de suelo dedicado al cultivo de arroz. Que se trabajó bajo la hipótesis de ser un suelo impactado en su biota microbiana y por ende su fertilidad por el uso frecuente de pesticidas. Se realizó la manipulación de las siguientes variables independientes:

Labranza del terreno:

Con la manipulación de esta variable cada 5, 10 y 15 días se logró homogenizar el estiércol de bovino / cerdo con el terreno arrocero, de forma que fue más eficiente el contacto de los microorganismos con el suelo a restaurado.

Figura 6

Labranza del terreno según corresponda la fórmula



Estiércol de bovino/porcino:

Fue importante esta variable pues su presencia garantizó una buena conversión de la materia orgánica a través del metabolismo de las bacterias presentes en el estiércol de bovino y porcinos.

Figura 7

Preparación del estiércol de bovino y porcino



NPK líquido:

La fuente nutritiva de nitrógeno, fósforo y potasio, permitió un crecimiento rápido de las colonias de bacterias, lo cual garantizó una descomposición más eficiente de la materia orgánica. Se utilizó de forma diluida con agua (1:10).

2.3 Procedimiento

El procedimiento consistió en actividades que llevaron cumplir cada objetivo.

Objetivo 1: Análisis físico, químico (pH, C/N) y microbiológico del suelo arrocero superficial.

Análisis físico:

Conductividad eléctrica:

Su importancia radicó en el conocer su contenido salino en total, sin especificar necesariamente los elementos de las sales. Su determinación se realizó en el Laboratorio de la Universidad Nacional de Jaén. Los niveles determinados de conductividad eléctrica alto, medio o bajo fue recogida de la publicación de Sela (2021).

Método: mediante un sensor de conductividad denominado multi parámetro.

Suspensión 1:5 (suelo: agua)

- Se mezcló 1 parte de suelo seco con 5 partes de agua destilada.
- Se agitó la mezcla durante un tiempo determinado y luego se deja en reposo.
- Se midió la conductividad del extracto con un electrodo del conductímetro.

Figura 8

Análisis de la conductividad eléctrica



Tabla 3

Calidad del suelo por su conductividad eléctrica

Clasificación	Conductividad eléctrica (dS/m) 1:5 (suelo: agua)
La salinidad afecta insignificadamente, la mayoría de los cultivos crecerán bien	< 0.4
<i>Sólo los cultivos sensibles se verán afectados negativamente</i>	0.5 – 1.6
Los cultivos moderadamente tolerantes a la sal se ven afectados	1.7 – 2.4
<i>Fuertes condiciones salinas. Sólo los cultivos muy tolerantes a la sal crecerán bien. Los rendimientos de la mayoría de los cultivos se reducirán.</i>	2.5 – 3.2
Sólo unos pocos cultivos muy tolerantes a la sal	> 3.3

Fuente: Sela (2021).

Análisis químico:

pH:

El pH señaló si el suelo mantiene una acidez adecuada para los cultivos. Su determinación se realizó aplicando el método potenciometría. Para la interpretación se utilizó la tabla 4 que describió los niveles de acidez de un suelo. Ésta prueba se realizó para cada una de las muestras referidas en la tabla 1.

Método: mediante un sensor de conductividad denominado multi parámetro.

Suspensión 1:2.5 (suelo: agua)

- Se mezcló 10 g de suelo seco con 25 ml (relación 1:2.5) de agua destilada o desionizada.
- Se agitó la mezcla durante 30 a 60 minutos para alcanzar el equilibrio.
- Se midió el pH con un pH-metro calibrado instalado en el multi parámetro del Laboratorio de la Universidad Nacional de Jaén.

Tabla 4

Niveles de pH de suelos

Rango del pH	Clasificación
< 5.4	Fuertemente ácido Toxicidad por aluminio (Al) o manganeso (Mn). Puede tener deficiencias de molibdeno. Deficiencia de Ca, Mg y K (Por posible lixiviación). Actividad microbiana reducida
5.5-6.4	<i>Moderadamente ácida</i>
6.5-6.9	Ligeramente ácida
7.0	<i>Neutral</i>
7.1-7.5	Ligeramente alcalina
7.6-8.3	<i>Moderadamente alcalina</i>
> 8.4	Fuertemente alcalina

Fuente: Hazleton & Murphy (2007).

Figura 9

Medición del pH del suelo



Análisis C/N:

Para esta prueba se recurrió a un laboratorio especializado para conocer el índice carbono/nitrógeno existente en cada punto del suelo biorremediado. La importancia de este análisis fue en base a lo expresado por Roman *et al.* (2021) que afirmaron que el índice C/N en el suelo influye directamente sobre la fertilidad del suelo, el cual expresa el carbono y nitrógeno descompuesto por la microbiota existente en el suelo. Es decir, este índice es un indicador indirecto sobre la presencia de microbiota en el suelo.

Tabla 5

Calidad del suelo por su ratio C/N.

Clase	Ratio C/N
Alta	> 16
Media	10 - 16
Baja	< 10

Fuente: Baćmaga *et al.* (2019).

Análisis microbiológico:

Se aplicó el método: Recuento en placa (Unidades Formadoras de Colonias por gramo de suelo), cuyo procedimiento fue el siguiente:

- Se diluyó una muestra de suelo en agua estéril y se siembra en medios de cultivo específicos (agar nutritivo).
- Se incubó a temperatura adecuada (25-37°C) durante 24-72 horas.
- Se contó las colonias microbianas para la densidad poblacional (UFC/gr suelo).

Objetivo 2: Adaptación de un sistema de evaluación del efecto de pesticidas en suelo arrocerero

La adaptación del sistema de evaluación se realizó *in situ* sobre el terreno arrocerero prestado para la investigación que consistió en un terreno de dos hectáreas, sobre el cual se señaló trece puntos de muestreo. Cada punto de muestreo fue limpiado y descubierto para el muestreo y ejecución de la restauración del suelo mediante un proceso de biorremediación. Para este fin fue necesario los instrumentos: barreta, machete y pala. Cada punto fue identificado con un letrero numerado para la evaluación respectiva durante la investigación.

Figura 10

Señalización de los puntos de muestreo y control en pozas de arroz



Objetivo 3: Determinar la dosis de restauración con mejor respuesta de C/N

La determinación de esta dosis fue resultado de aplicar un modelo de optimización mediante un diseño de superficie de respuesta con los niveles de la tabla 1 y 2.

Tabla 6

Modelo estadístico de superficie de respuesta

Nº	Labranza (días) “A”	Estiércol de bovino/porcino (gr/m ²) “B”	NPK líquido (mL/m ²) “C”	Índice C/N (*)
1	5	100	600	<i>a</i>
2	15	100	600	<i>b</i>
3	5	700	600	<i>c</i>
4	15	700	600	<i>d</i>
5	5	400	200	<i>e</i>
6	15	400	200	<i>f</i>
7	5	400	1000	<i>g</i>
8	15	400	1000	<i>h</i>
9	10	100	200	<i>i</i>
10	10	700	200	<i>j</i>
11	10	100	1000	<i>k</i>
12	10	700	1000	<i>l</i>
13	10	400	600	<i>ll</i>

Fuente: Adaptación de Ward *et al.* (2008).

(*) Resultados laboratorio.

Interpretación:

El punto 1, recibió 100 gramos/m² de estiércol (bovino-porcino), 600 mL de NPK líquido y se labró cada 5 días.

El punto 2, recibió 100 gramos/m² de estiércol (bovino- porcino), 600 mL de NPK líquido y se labró cada 15 días.

El punto 3, recibió 700 gramos/m² de estiércol (bovino- porcino), 600 mL de NPK líquido y se labró cada 5 días.

El punto 4, recibió 700 gramos/m² de estiércol (bovino- porcino), 600 mL de NPK líquido y se labró cada 15 días.

El punto 5, recibió 400 gramos/m² de estiércol (bovino- porcino), 200 mL de NPK líquido y se labró cada 5 días.

El punto 6, recibió 400 gramos/m² de estiércol (bovino- porcino), 200 mL de NPK líquido y se labró cada 15 días.

El punto 7, recibió 400 gramos/m² de estiércol (bovino- porcino), 1000 mL de NPK líquido y se labró cada 5 días.

El punto 8, recibió 400 gramos/m² de estiércol (bovino-cerdo), 1000 mL de NPK líquido y se labró cada 15 días.

El punto 9, recibió 100 gramos/m² de estiércol (bovino-cerdo), 200 mL de NPK líquido y se labró cada 10 días.

El punto 10, recibió 700 gramos/m² de estiércol (bovino- porcino), 200 mL de NPK líquido y se labró cada 10 días.

El punto 11, recibió 100 gramos/m² de estiércol (bovino- porcino), 1000 mL de NPK líquido y se labró cada 10 días.

El punto 12, recibió 700 gramos/m² de estiércol (bovino- porcino), 1000 mL de NPK líquido y se labró cada 10 días.

El punto 13, recibió 400 gramos/m² de estiércol (bovino- porcino), 600 mL de NPK líquido y se labró cada 10 días.

El punto 14, no recibió nada por ser la muestra control o testigo del proceso.

Objetivo 4: Aplicar un diseño estadístico superficie de respuesta para restauración del suelo.

Para la ejecución de este objetivo, se empleó el software Statgraphics Centurion 18. El diseño Box-Behnken con factores se estructuró de la siguiente manera:

- Se establecieron tres niveles por cada factor (bajo, medio y alto) y 13 experimentos.
- Se generaron combinaciones de factores en pares, manteniendo las demás variables en su nivel medio.

Por ejemplo, para un diseño con tres factores (A, B y C), los experimentos se organizarían en combinaciones tales como:

- (-1, +1, 0)
- (+1, -1, 0)
- (-1, 0, +1)
- (+1, 0, -1)
- (0, -1, +1)
- (0, +1, -1)
- Punto central (0, 0, 0) repetido varias veces para evaluar la variabilidad experimental.

El tratamiento de datos permitió comparar el efecto de los tratamientos en cada punto identificado. El modelo cuadrático que se ajustó a los datos obtenidos en un diseño Box-Behnken se expresó de la siguiente manera: La variable dependiente (Y) generó modelos de segundo orden (cuadrático) como se muestra en la siguiente ecuación:

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^2 \beta_{ii} X_i + \sum_{i=1}^2 \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{i=1}^2 \beta_{ij} X_i X_j$$

Donde:

Y: es la variable dependiente predicha.

β_0 : Coeficiente intercepto.

β_i , β_{ii} y β_{ij} : Coeficientes del modelo lineal, cuadrático e interacción, respectivamente

X_i y X_j : Valores codificados de las variables independientes.

El diseño Box-Behnken es una herramienta poderosa para la optimización de procesos debido a su eficiencia y menor requerimiento de recursos experimentales. Su aplicación en diversos campos permite modelar respuestas cuadráticas de manera efectiva, facilitando la toma de decisiones basada en datos experimentales bien estructurados. Este enfoque es ampliamente recomendado cuando se requiere evaluar interacciones y efectos no lineales sin incurrir en un alto número de ensayos experimentales.

III. RESULTADOS

3.1 Primer objetivo: Análisis físico, químico (pH, C/N) y microbiológico del suelo arrocero superficial.

Análisis físico:

Conductividad eléctrica:

Método: Analítico.

Equipo: Multi-parámetro de la UNJ.

Unidad de medida: dS/m (deci Siemens por metro).

Tabla 7

Conductividad eléctrica de suelo arrozero superficial y suelo restaurado

N° de muestra de suelo	Suelo arrocero superficial	Suelo arrocero restaurado
	dS/m	dS/m
1	2.80	0.41
2	2.40	0.34
3	2.50	0.38
4	2.90	0.41
5	2.50	0.38
6	2.90	0.37
7	2.40	0.42
8	2.00	0.39
9	2.30	0.37
10	2.90	0.39
11	2.50	0.41
12	2.80	0.40
13	2.30	0.37
Promedio	2.55	0.38

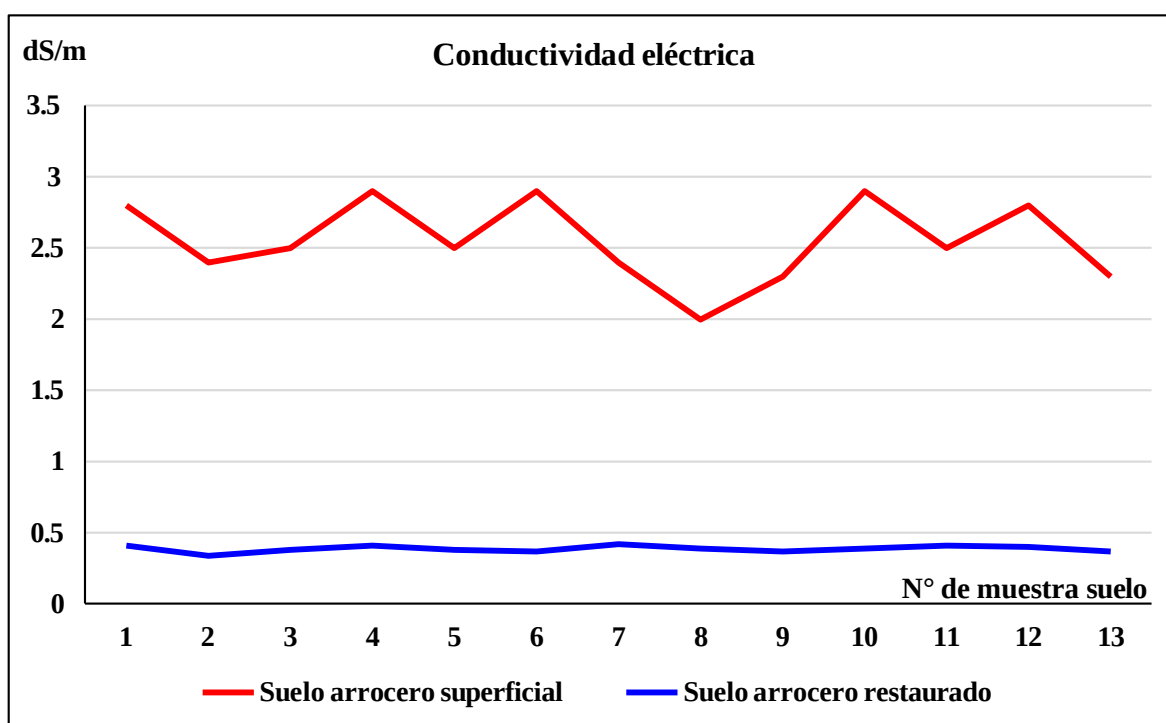
Fuente: Datos analizados por el tesista en Laboratorio UNJ.

Interpretación:

De acuerdo a la tabla 7, el suelo arrocero superficial y en condiciones naturales presentó una conductividad eléctrica de 2.55 mS/cm que interpretado con los valores que publicó Sela (2021) se tuvo un suelo arrocero con fuertes condiciones salinas. Sólo los cultivos muy tolerantes a la sal crecerán bien. Los rendimientos de la mayoría de los cultivos se reducirán, pues en opinión del autor los valores típicos no superan la unidad expresada en mS/cm. En cambio, el suelo arrocero restaurado desde el punto de vista ideal para el cultivo, presentó una conductividad de 0.38 mS/cm indicador de una muestra de suelo óptimo. Esto fue resultado de la presencia bacteriana que realizó su metabolismo regulando el contenido de sales en el suelo.

Figura 11

Conductividad eléctrica antes y después de la restauración del suelo



Análisis químico:

pH

Método: Analítico.

Equipo: Multi-parámetro de la UNJ.

Unidad de medida: Adimensional.

Tabla 8*Valores del pH de suelo arrocero superficial y suelo restaurado*

N° de muestra	Suelo arrocero superficial	Suelo arrocero restaurado
	pH	pH
1	4.30	6.50
2	5.70	6.40
3	5.50	6.10
4	5.20	6.20
5	4.90	6.70
6	5.80	6.50
7	5.10	6.30
8	4.80	6.30
9	5.30	6.10
10	4.70	5.80
11	5.60	6.20
12	5.40	6.30
13	5.50	6.20
Promedio	5.20	6.27

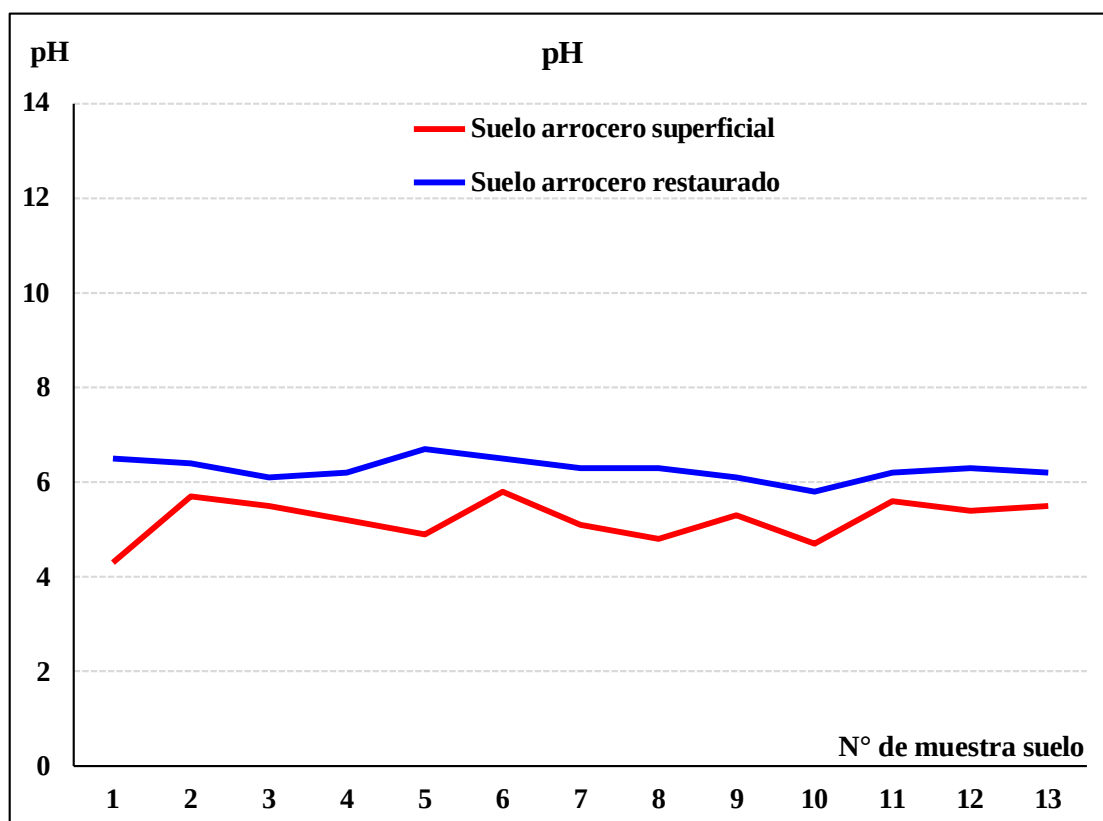
Fuente: Datos analizados por el tesista en Laboratorio UNJ.

Interpretación:

Según estos resultados, el suelo arrocero superficial y en condiciones naturales presentó un pH promedio de 5.20 que comparado con los valores publicados por Hazleton & Murphy (2007) este suelo presentó características fuertemente ácidas con actividad microbiana reducida. Esto es muy posiblemente explicado por el uso frecuente de pesticidas para el arroz, cuyo efecto aparte de erradicar plagas foliares, también merma la microbiota edáfica (Mehjin *et al.*, 2019). El suelo arrocero restaurado presentó un pH promedio de 6.27 lo que se explica por el contenido de materia orgánica sobre cada punto de muestreo, tal como afirmó Reytez y Barreto (2011) que la materia orgánica tiene la propiedad de modificar las propiedades del suelo.

Figura 12

Acidez del suelo antes y después de la restauración del suelo



Análisis microbiológico:

El suelo sin tratamiento y en condiciones naturales presentó el siguiente análisis microbiológico en el suelo.

Tabla 9

Análisis microbiológico de suelo arrozero superficial

Microorganismos	UFC /gr suelo
Bacterias	10^5
Hongos	10^3
Nematodos	6×10

Fuente: Análisis microbiológico Rivelab SAC.

Tabla 10*Análisis microbiológico de suelo arrocero restaurado*

Microorganismos	UFC /gr suelo
Bacterias	10 ⁷
Hongos	10 ⁶
Nematodos	10 ²

Fuente: Análisis microbiológico Rivelab SAC.

Índice carbono/nitrógeno C/N de suelo superficial**Tabla 11***Determinación del índice C/N del suelo en suelo arrocero superficial*

Nº	Labranza (días) “A”	Estiércol de bovino/cerdos (gr/m ²) “B”	NPK líquido (mL/m ²) “C”	C/N Suelo arrocero superficial
1	5	100	600	7.8
2	15	100	600	8.3
3	5	700	600	7.8
4	15	700	600	8.1
5	5	400	200	8.6
6	15	400	200	7.9
7	5	400	1000	7.6
8	15	400	1000	8.1
9	10	100	200	7.8
10	10	700	200	7.7
11	10	100	1000	8.2
12	10	700	1000	8.1
13	10	400	600	8.2

Fuente: Resultados C/N, reportados por Laboratorio Rivelab SAC.

Interpretación:

Determinado el balance C/N de las trece muestras de suelo se dedujo que la calidad de fertilidad del suelo arrocero estuvo (C/N= 7.6–8.6) por debajo de los estándares mencionados por Moore (2001) que expresó: Alto C/N: >16; medio C/N: 10-16 y bajo C/N: <10.

3.2 Segundo objetivo: Adaptación de un sistema de evaluación del efecto de pesticidas en suelo arrocero

Figura 13

Puntos de suelo arrocero intervenidos para su restauración



Mediante este sistema se logró que no se interviniera con urea ni pesticidas en el área donde se estacaron los puntos de muestreo, de forma que se aplicó el tratamiento de restauración respetándose la cadena de custodia de los puntos señalados,

Figura 14

Muestreo del suelo restaurado



3.3 Tercer objetivo: Determinar la dosis de restauración con mejor respuesta de C/N

Tabla 12

Determinación del índice C/N del suelo después de la restauración

Nº	Labranza (días) “A”	Estiércol de bovino/porcino (gr/m ²) “B”	NPK líquido (mL/m ²) “C”	C/N Suelo arrocero restaurado
1	5	100	600	10.9
2	15	100	600	11.5
3	5	700	600	14.6
4	15	700	600	12.8
5	5	400	200	12.4
6	15	400	200	12.9
7	5	400	1000	12.3
8	15	400	1000	11.6
9	10	100	200	12.8
10	10	700	200	14.4
11	10	100	1000	13.8
12	10	700	1000	12.8
13	10	400	600	11.2

Fuente: Datos observados, según análisis de laboratorio.

Interpretación:

Conocido el índice C/N del suelo restaurado, se concluyó que el suelo incrementó su índice C/N de (C/N = 7.6 – 8.6) hasta un C/N de (C/N = 10.9 – 14.6) lo cual situó al suelo arrocero en condiciones medias o regulares para el cultivo arrocero, según Moore (2001).

3.4 Cuarto objetivo: Aplicar un diseño estadístico Box-Behnken para fórmulas de restauración del suelo

Tabla 13

Diseño Box – Behnken para el suelo arrocero superficial y restaurado

Nº	Labranza (días) “A”	Estiércol de bovino/porcino (gr/m ²) “B”	NPK líquido (mL/m ²) “C”	C/N Suelo arrocero superficial	C/N Suelo arrocero restaurado
1	5	100	600	7.8	10.9
2	15	100	600	8.3	11.5
3	5	700	600	7.8	14.6
4	15	700	600	8.1	12.8
5	5	400	200	8.6	12.4
6	15	400	200	7.9	12.9
7	5	400	1000	7.6	12.3
8	15	400	1000	8.1	11.6
9	10	100	200	7.8	12.8
10	10	700	200	7.7	14.4
11	10	100	1000	8.2	13.8
12	10	700	1000	8.1	12.8
13	10	400	600	8.2	11.2

Fuente: Datos observados, según análisis de laboratorio.

Análisis estadístico

Los datos hallados fueron procesados mediante Statgraphics Centurion XVIII para conocer la optimización del proceso.

Algoritmo para la optimización del proceso de restauración:

$$\begin{aligned} \text{Índice C/N} = & 13.4194 - 0.163333 \cdot \text{LABRANZA} - 0.000222222 \cdot \text{ESTIÉRCOL} - \\ & 0.007125 \cdot \text{NPK} + 0.019 \cdot \text{LABRANZA}^2 - 0.000466667 \cdot \text{LABRANZA} \\ & \cdot \text{ESTIÉRCOL} - 0.0000125 \cdot \text{LABRANZA} \cdot \text{NPK} + 0.0000102778 \cdot \\ & \text{ESTIÉRCOL}^2 + 6.25\text{E-}7 \cdot \text{ESTIÉRCOL} \cdot \text{NPK} + 0.000005625 \cdot \text{NPK}^2 \end{aligned}$$

Tabla 14*Análisis de varianza para el índice C/N*

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado medio	Razón-F	Valor-P
A:LABRANZA	0.10125	1	0.10125	0.38	0.5639
B:ESTIÉRCOL bovino-porcino	9.90125	1	9.90125	37.29	0.0017
C:NPK	0.08	1	0.08	0.30	0.6067
AA	0.833077	1	0.833077	3.14	0.1367
AB	1.96	1	1.96	7.38	0.0419
AC	0.0025	1	0.0025	0.01	0.9265
BB	3.15923	1	3.15923	11.90	0.0182
BC	0.0225	1	0.0225	0.08	0.7827
CC	2.99077	1	2.99077	11.26	0.0202
Error total	1.3275	5	0.2655		
Total (corr.)	19.5493	14			

Fuente: Statgraphics Centurion 18.

R-cuadrada = 93.2095 %

R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 80.9866 %

Error estándar del est. = 0.515267

Error absoluto medio = 0.23

Optimización de la respuesta

Meta: maximizar

Valor óptimo = Índice C/N = 15.2

Tabla 15*Parámetros de optimización*

Factor	Bajo	Alto	Óptimo
LABRANZA	5.0	15.0	5.00003
ESTIÉRCOL bovino-porcino	100.0	700.0	699.999
NPK	200.0	1000.0	1000.0

Fuente: Statgraphics Centurion 18.

Figura 15

Diagrama de Pareto para el índice C/N

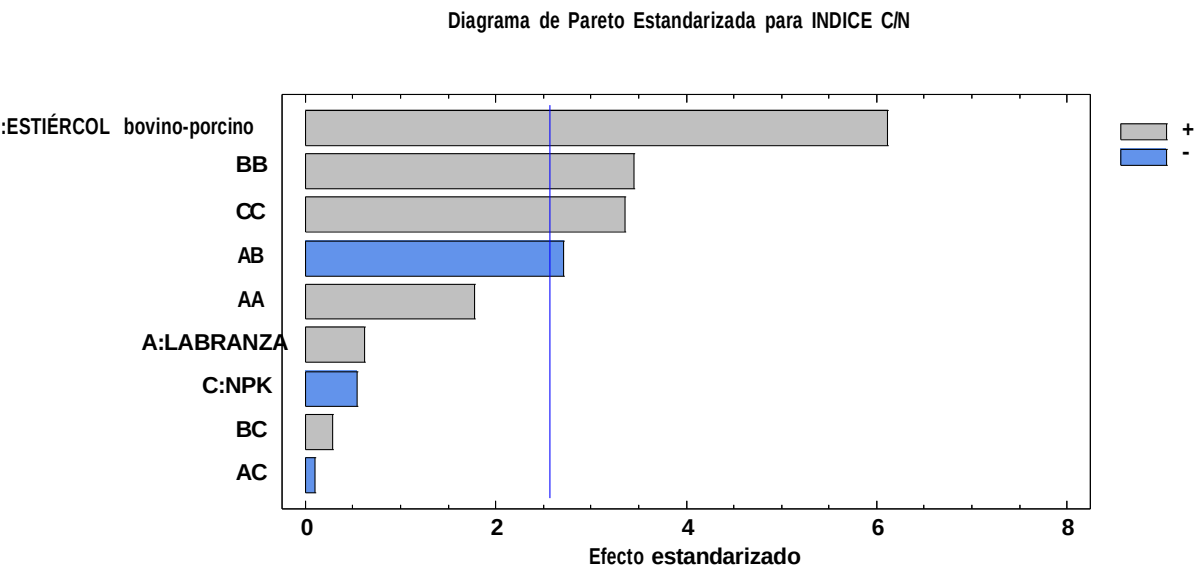
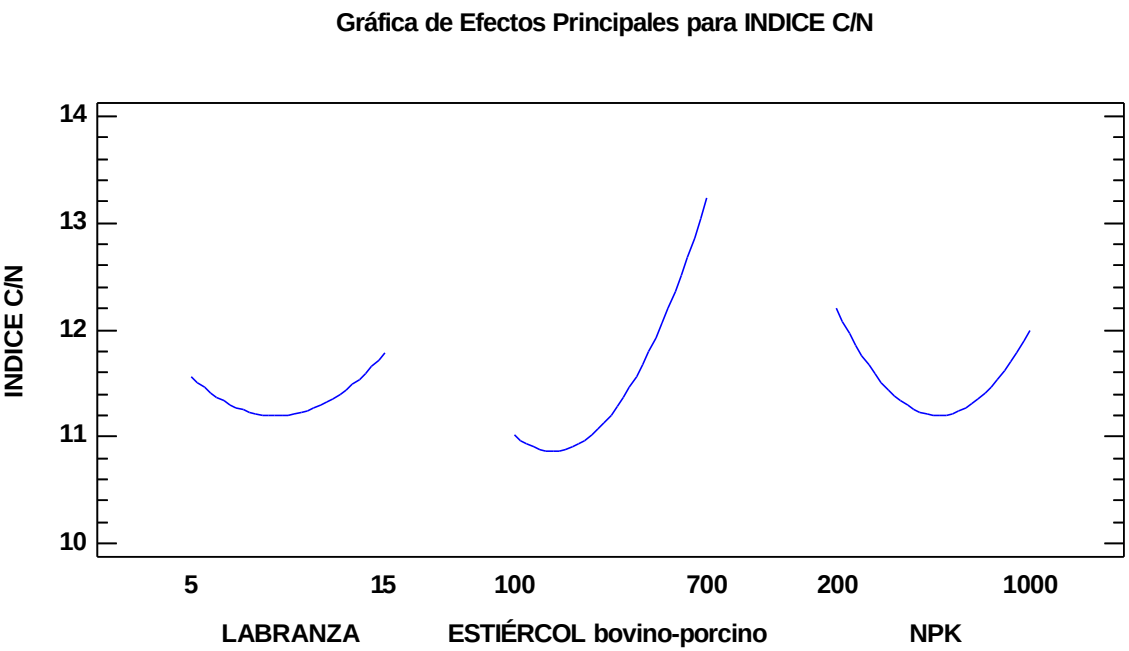


Figura 16

Efectos principales para el índice C/N



IV. DISCUSIÓN

La investigación fue dedicada a evaluar el daño e impacto a suelos arroceros por el empleo reiterado de pesticidas durante el cultivo de arroz. El trabajo inició caracterizando el suelo arrocero física y químicamente, hallando una conductividad de 2.55 dS/m y un pH de 5.20 en promedio, esto reveló condiciones de impacto edáfico pues según Sela (2021) la conductividad eléctrica mostró niveles superiores a la tolerancia de un cultivo; y, sobre la acidez Hazleton & Murphy (2007) manifestaron condiciones fuertemente ácidas que puso en riesgo la absorción de metales pesados procedentes de los fertilizantes fosfatados. Sin embargo, después de la restauración aplicada se mejoró el suelo a las condiciones: Conductividad eléctrica de 0.38 dS/m y un pH de 6.27 en promedio; la acidez del suelo arrocero es justificada por Ramírez (2018) al notar que el cultivo de arroz es fuertemente dependiente de la urea para su producción, que la urea expone la oxidación de los iones amonio NH_4^+ a iones nitrato NO_3^- liberando iones hidrógeno contribuyendo de esta forma recurrente cada vez a un incremento de la acidez del suelo. Por otra parte, Hussain *et al.* (2009) al evaluar la microbiota de los suelos arroceros sostuvo impacto de los pesticidas sobre el suelo arrocero, coincidiendo con esta investigación que determinó microbiológicamente la escasa presencia de 10^5 bacterias, 10^3 hongos y 6×10 nematodos en condiciones habituales. Que después de aplicar restauración a los puntos de muestreo se alcanzó 10^7 bacterias, 10^6 hongos y 10^2 nematodos; valores aceptables para un suelo agrícola según justificó Ali *et al.* (2018). Es decir, la fertilidad del suelo fue constatada por el índice carbono-nitrógeno (C/N), para ello se referenció a Carrero y Romero (2023) cuando citó a Radočaj *et al.* (2021): *La relación carbono-nitrógeno (C/N) del suelo representa un indicador de la calidad y fertilidad del suelo, que tiene un gran impacto en gestión de tierras agrícolas para la agricultura ecológica*; así también citó a Zhang *et al.* (2016): *Debido a la alta correlación con la inmovilización y mineralización del suelo, la relación C/N del suelo se reconoce como un indicador confiable de la fertilidad del suelo.*

Por otra parte, Moore (2001) sostuvo que, debido al cambio climático, los cultivos en general son sensibles a la proliferación de plagas que merman la productividad agrícola, obligando el uso de pesticidas, como fungicidas para eliminar hongos y herbicidas como el glifosato para eliminar maleza de las plantaciones; esto coincide con la actual investigación que determinó una baja microbiota del suelo asociada al uso recurrente de pesticidas y concordante con una baja fertilidad del suelo. En el mismo sentido, Mehjin *et al.* (2019)

observaron que la adición de herbicidas a base de glifosato 48 % e insecticidas en una concentración al suelo de 0, 50, 100 y 200 ppm (mg/kg) disminuyó significativamente la microbiota expresada en recuentos de bacterias, hongos y actinomicetos del suelo. Según Streletskii *et al.* (2022) la fertilidad del suelo es consecuencia del índice carbono/nitrógeno por la descomposición de la materia orgánica a cargo de los microorganismos presentes en ella. Este concepto, se refrendó con lo encontrado en el promedio del suelo arrocero superficial que según análisis químico tuvo un balance C/N entre (C/N = 7.6 – 8.6); que en opinión de Baćmaga *et al.* (2016) la pérdida de microbiota influye sobre el índice de fertilidad hasta un nivel bajo. Y, después de la restauración aplicada al suelo se restauró alcanzando un balance de fertilidad de C/N entre (C/N = 10.9 – 14.6) lo que connotó un nivel medio según la misma referencia. En este sentido, Chaves *et al.* (2013) mencionaron que la calidad de un suelo mide la presencia de materia orgánica y una determinada comunidad microbiana y sobre todo que el impacto del suelo es agravado cuando pesticidas químicos son acumulados en la capa superficial del mantillo del suelo, eliminando progresivamente la microbiota del suelo. Por otra parte, Ramírez-Campos (2018) relacionó el impacto ambiental como resultado de la intensificación agrícola como lo es el monocultivo del arroz en el distrito de Bellavista. No cabe duda del impacto al suelo por pesticidas, y para la restauración del suelo Baćmaga *et al.* (2019) recomendaron la proliferación de microorganismos en el suelo para garantizar actividad metabólica interviniente en el balance de carbono/nitrógeno. En este sentido Carrero y Romero (2023) optimizaron su biorremediación utilizando 2000 g de estiércol doméstico (formado por 400 g de aves, 600 g de cuy y 1000 g de ganado vacuno); 300 g de NPK con una mecanización del suelo cada 2 días; obtuvieron una acidez pH 6.24, conductividad eléctrica 0.61 dS/cm, 9.04 % de carbono orgánico, 0.36 % de nitrógeno total y 241 ppm de fósforo total; en tanto, que la actual investigación maximizó el proceso de restauración utilizando 700 gramos de estiércol bovino/cerdos, 600 mL de NPK líquido por cada metro cuadrado y una labranza cada cinco días; que restauró el balance C/N a 14.6; con varias fórmulas de restauración (tabla 13) se obtuvo una restauración de la acidez, conductividad eléctrica del suelo, y sobre todo se recuperó la microbiota del suelo afectado por pesticidas para la presente investigación. Lo más importante fue elevar el número de microorganismos por cada gramo de suelo afectado. Así de importante es que, Chaves *et al.* (2013) incidió en el recuento de microorganismos en las muestras de suelo rizosférico usando la metodología de transectos. Contaron bacterias Gram (+), Gram (-), actinomicetos, y los grupos funcionales fijadores de nitrógeno y solubilizadores de fósforo.

V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones:

- El análisis físico, químico y microbiológico del suelo arrocero superficial arrojó una conductividad eléctrica de 2.55 dS/m, un pH igual a 5.20. En tanto que el índice carbono/nitrógeno C/N alcanzó valores entre 7.6 – 8.6; es decir alcanzó un promedio igual a 8.01. por otra parte, el análisis microbiológico mostró una microbiota igual a 10^5 bacterias, 10^3 hongos y 6×10 nematodos.
- El sistema de evaluación para medir el efecto de pesticidas sobre el suelo arrocero consistió en la identificación de 13 puntos de muestreo de suelo arrocero, dentro de un terreno que desarrolló el monocultivo de arroz por más de 25 años de actividad agrícola. La restauración se llevó a cabo mediante labranza del terreno (cada 5, 10 y 15 días), estiércol de bovino/cerdos (100, 400 y 700 gr/m²) y NPK líquido (220, 600 y 1000 mL/m²). Mediante este sistema se logró que no se interviniera con urea ni pesticidas en el área donde se estacaron los puntos de muestreo, de forma que se aplicó el tratamiento de restauración respetándose la cadena de custodia de los puntos señalados,
- El índice carbono/nitrógeno del suelo superficial arrocero impactado por el uso recurrente de pesticidas, después de la restauración arrojó un índice carbono/nitrógeno (C/N) entre 10.9 y 14.6. El mayor índice se logró en aquel suelo que recibió: labranza cada cinco días, 700 gr/m² de estiércol de bovino:porcino en proporción 1:1 y 200, 600 y 1000 mL/m² de NPK. Además, el suelo arrocero restaurado arrojó conductividad eléctrica 0.38 dS/m, pH igual a 6.27, mientras que el análisis microbiológico arrojó una microbiota de 10^7 bacterias, 10^6 hongos y 10^2 nematodos.
- La variable con mayor significancia estadística fue del estiércol de bovino-porcino con un valor-P igual a $0.0017 < 0.05$, R-cuadrada = 93.2095 %, y parámetros de optimización igual a 5 días de labranza, 699.999 gr de estiércol bovino-porcino y 1000 mL/m² de NPK líquido, para un índice óptimo de C/N = 15.2. El diagrama de Pareto evidenció el mayor efecto estandarizado (ver figura 15) y de forma similar lo reflejó la figura de efectos principales.

Recomendaciones:

- A los agricultores dedicados al cultivo de arroz, se recomienda utilizar abonos orgánicos como el compost por su alta concentración de microbiota. De forma que se evite la acidez no controlada del suelo, pues el uso reiterado de pesticidas es contribuir a un ciclo recurrentes de actividades que exponen a la planta la absorción de metales pesados.
- A la Universidad Nacional de Jaén, a través de la carrera profesional de Ingeniería Forestal y Ambiental fomentar investigaciones con responsabilidad social que respondan a atender problemas típicos y que afectan la calidad de los suelos por el continuo empleo de pesticidas como el cultivo de arroz.
- A las distintas Agencias Agrarias del Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego de Cajamarca, en especial a las existentes en esta región de Cajamarca, a promover el uso de abonos domésticos en base a estiércol de animales menores, para ayudar a la recuperación de la microbiota de los suelos impactados, de forma que se logre una alternativa diferente al uso frecuente de fertilizantes inorgánicos.

VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Baćmaga, M., Kucharski, J. & Wyszowska, J. (2019). Microbiological and biochemical properties of soil polluted with a mixture of spiroxamine, tebuconazole, and triadimenol under the cultivation of *Triticum aestivum* L. *Environ Monit Assess* 191: 416.
- Beyers, J. L., Brown, J. K., Busse, M. D., DeBano, L. F., Elliot, W. J., Ffolliott, P. F., Jacoby, G. R., Knoepp, J. D., Landsberg, J. D., Neary, D. G., Reardon, J. R., Rinne, J. N., Robichaud, P. R., Ryan, K. C., Tiedemann, A. R. & Zwolinski, M. J., (2005). *Wildland Fire in Ecosystems: Effects of Fire on Soil and Water*. Editors Neary, Daniel G.; Ryan, Kevin C.; DeBano, Leonard F., *Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-42-Vol.4*. Ogden, UT: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station.
- Carrero, J. y Romero, J. (2023). *Restauración de la biota edáfica de un suelo rozado mediante la biorremediación en el distrito la coipa, región Cajamarca*. [Tesis para optar el título de Ingeniero Forestal y Ambiental. Universidad Nacional de Jaén].
- Chaves, G., Ortiz, M. L. y Ortiz, L. Y. (2013). Efecto de la aplicación de agroquímicos en un cultivo de arroz sobre los microorganismos del suelo. *Acta Agronómica*. 62(1), p 66-72.
- EPA (Environmental Protection Agency). U.S. (1984). Characterization of Hazardous Waste Sites - A Methods Manual: Volume II. Available Sampling Methods, Second Edition. EPA-600/4-84-076.
- Gianfreda, L., Rao, M.A.; Piotrowska, A., Palumbo, G., Colombo, C. (2005). Soil enzyme activities as affected by anthropogenic alterations: Intensive agricultural practices and organic pollution. *Sci. Total Environ*, 341, 265–279.
- Jaramillo, A. C., Echavarría, A. M. y Hormaza, A. (2013). Diseño Box-Behnken para la optimización de la adsorción del colorante azul ácido sobre residuos de flores. *Revista*

- Ingeniería y Ciencia. Vol. 9, N° 18, pp. 75–91, julio-diciembre. 2013.
- Hazleton & Murphy (2007) *Interpreting Soil Test Results, What do all the numbers mean.* CSIRO Publishing.
- Mehjin, A .M., Rawaa, M. H., Ibtiha, A K. & Abdullah, A T. (2019). Effect of pesticides on soil microorganisms. *Journal of Physics: Conf. Series* 1294 (2019) 072007.
- Moore, G. (2001). *Soil guide. A handbook for understanding and managing agricultural soils.* Agriculture Western Australia Bulletin N° 4343.
- Ministerio del Ambiente - MINAM (2016).
- Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego – MIDAGRI (2016).
- Radočaj, D., Juriši'c, M. & Antonić, O. (2021). Determination of soil C:N suitability zones for organic farming using an unsupervised classification in eastern Croatia. *Ecological Indicators* 123 (2021) 107382.
- Ramírez-Campos, M. A. (2018). El uso de pesticidas en la agricultura y su desorden ambiental. *Rev. enferm. Vanguard*; 6(2): 40-47.
- Reyez, M. y Barreto, L. (2011). Efecto de la materia orgánica del suelo en la retención de contaminantes. *Épsilon*. Issue 16. Artículo 3.
- Roman, D. L., Voiculescu, D. I., Filip, M., Ostafe, V. & Isvoran, A. (2021). Effects of Triazole Fungicides on Soil Microbiota and on the Activities of Enzymes Found in Soil: A Review. *A Review. Agriculture* 2021, 11, 893.
- Sela G. (2021). *Fertilización y riego - teoría y mejores prácticas*, Editorial Independently published. Spanish Edition. ASIN: B09KN663P6, ISBN-13: 979-8756945706.
- Wang, C.; Wang, F.; Zhang, Q.; Liang, W. (2016). Individual and combined effects of tebuconazole and carbendazim on soil microbial activity. *Eur. J. Soil Biol.*, 72, 6–13.

Ward, A. J., Hobbs, P. J., Holliman P. J., and Jones, D. L. (2008). Optimisation of the anaerobic digestion of agricultural resources. *Bioresour. Technol.*, 99: 7928-7940.

Zhang, S., L., Huang, J., Mu, L., Huang, Y., Zhang, X. & Sun, Y., (2016). Spatial heterogeneity of soil C:N ratio in a mollisol watershed of Northeast China: spatial heterogeneity of soil C:N ratio in a mollisol watershed *Land Degrad. Dev.*, 27 (2) (2016), pp. 295-304.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a nuestra Santa Madre de Dios y a nuestro Padre eterno por darnos la vida de poder terminar nuestra investigación.

XX

XX

Anderson

DEDICATORIA

Dfsdfasdfsadfsd
f
fasdfasdfsadfa
Sdfasdfa
Sdfasdfsadfsadf
Asdfsadfsadf
asdfsadfsadfsadf.

Anderson

ANEXOS

ANEXO 1: Reporte de laboratorio 1

REQUERIMIENTO DE ANALISIS FÍSICO QUIMICO MICROBIOLÓGICO

LABORATORIO UNJ

13 MUESTRAS DE 250 GRAMOS:
CONDUCTIVIDAD ELECTRICA
PH

LABORATORIO RIVELAB SAC

13 MUESTRAS DE 250 GRAMOS:
ANÁLISIS MICROBIOLÓGICO SUELO ARROCERO SUPERFICIAL
ÍNDICE C/N SUELO ARROCERO SUPERFICIAL

ANÁLISIS MICROBIOLÓGICO SUELO ARROCERO RESTAURADO
ÍNDICE C/N SUELO ARROCERO RESTAURADO

ANEXO 2: Reporte de laboratorio 2