

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA EN CONSERVACIÓN DE
SUELOS Y AGUA



VARIABILIDAD ESPACIAL EN LOS INDICADORES DE FERTILIDAD DE SUELO
BAJO SISTEMA CONVENCIONAL EN CULTIVO DE *Solanum Tuberosum L.* EN
PANAO- PACHITEA

Tesis

Para optar el título de:

INGENIERO EN CONSERVACIÓN DE SUELOS Y AGUA

PRESENTADO POR:
MARIA ROSSY HUAMAN CIERTO

Tingo María – Perú 2025



ACTA DE SUSTENTACION DE TESIS N° 123-2025-FRNR-UNAS

Los que suscriben, Miembros del Jurado de Tesis, reunidos con fecha 09 de octubre de 2025, a horas 11: a.m. en la Escuela Profesional de Ingeniería en Conservación de Suelos y Agua de la Facultad de Recursos Naturales Renovables para calificar la tesis titulada:

**“VARIABILIDAD ESPACIAL EN LOS INDICADORES DE FERTILIDAD DE SUELO
BAJO SISTEMA CONVENCIONAL EN CULTIVO DE *Solanum Tuberosum* L. EN
PANAOPACHITEA”**

Presentado por la Bachiller: **HUAMAN CIERTO, MARIA ROSSY** 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, la sustentante queda apto para optar el Título Profesional de **INGENIERO EN CONSERVACION DE SUELOS Y AGUA**, que será aprobado por el Consejo de Facultad, Tramitándolo al Consejo Universitario para el otorgamiento del Título Correspondiente.

Tingo María, 13 de noviembre de 2025


Dr. JOSE DOLORES LEVANO CRISOSTOMO
PRESIDENTE


Ing. MSc. ERLE OTTO J. BUSTAMANTE SCAGLIONI
MIEMBRO


Ing. MSc. MARCO ANTONIO DUEÑAS TUESTA
MIEMBRO




Dr. NELINO FLORIDA ROFNER
ASESOR



UNAS

VICERRECTORADO DE
INVESTIGACIÓN

INSTITUTO DE
INVESTIGACIÓN

UNIDAD DE SOPORTE
CIENTÍFICO
REPOSITORIO INSTITUCIONAL

"Decenio de la Igualdad de Oportunidades para Mujeres y Hombres"
"Año de la recuperación y consolidación de la economía peruana"

CERTIFICADO DE SIMILITUD T.I. N° 406 - 2025 - 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 en Conservación de Suelos y Agua

Tipo de documento:

Tesis	X	Trabajo de Suficiencia Profesional	
-------	---	------------------------------------	--

TÍTULO	AUTOR	PORCENTAJE	
		SIMILITUD	CONTENIDO GENERADO POR INTELIGENCIA ARTIFICIAL
VARIABILIDAD ESPACIAL EN LOS INDICADORES DE FERTILIDAD DE SUELO BAJO SISTEMA CONVENCIONAL EN CULTIVO DE Solanum Tuberosum L. EN PANAQ- PACHITEA	MARIA ROSSY HUAMAN CIERTO	09% Nueve	Menor a 20 %

Tingo María, 04 de diciembre de 2025.

 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
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA EN CONSERVACION DE
SUELOS Y AGUA



VARIABILIDAD ESPACIAL EN LOS INDICADORES DE FERTILIDAD DE SUELO
BAJO SISTEMA CONVENCIONAL EN CULTIVO DE *Solanum Tuberosum L.* EN
PANAÑO- PACHITEA

Autor	: Bach. Maria Rossy Huaman Cierto
Asesor	: Dr. Nelino Florida Rofner
Programa de Investigación	: Manejo y Conservación de Suelos
Línea (s) de Investigación	: Ciencias básicas del Suelo
Eje Temático	: Propiedades físicas y químicas del suelo
Lugar de ejecución	: Distrito de Panao
Duración del trabajo	: Fecha Inicio 01/ 09/2022 Fecha Termino 31/07/2023
Financiamiento	: S/. 11 160, 6
Propio	: Si
FEDU	: No
Otros	: No

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Rofner', is located to the right of the table.

Tingo María –Perú 2022

DEDICATORIA

A dios por darme la vida y por acompañarme en cada paso que doy, él es mi luz y mi salvación, además agradezco por haber puesto en mi camino a las personas que han sido mi soporte.

A mi querida madre Margot Cierro Tarazona por su apoyo incondicional, comprensión, valor y esfuerzo me ha permitido llegar a cumplir hoy un sueño más, gracias el ejemplo de esfuerzo y perseverancia, de no tener miedo a las adversidades se convirtió ella en mi inspiración, mi motor y motivo para seguir luchando día a día en este mundo lleno de obstáculos. A mi hermana Elvira Gloria Vázquez Cierro por su confianza y el gran cariño que nos une.

A mi tío Geder y Obet por ser el ejemplo de una persona mayor que me ayudaron en mi formación profesional de la cual aprendí aciertos y de momentos difíciles, a mi padrastro y a mi Abuela Primitiva y a todos aquellos que participaron directa o indirectamente en la elaboración de esta tesis.

AGRADECIMIENTO

A Dios, tu amor y tu bondad no tienen fin, me permites disfrutar de todos mis logros que son resultado de tu ayuda, los obstáculos me sirven para mejorar como ser humano. La tesis ha sido una bendición en todo sentido y estaré agradecido, pues la meta está cumplida.

A la Universidad Nacional Agraria de la Selva mi alma mater, por haber permitido formarme, gracias a todos los docentes que fueron partícipes de este proceso, ya sea de manera directa o indirecta, gracias a todos, fueron ustedes con sus aportes, que hoy se ve reflejada en la culminación de mi paso por la universidad.

Al Dr. Nelino Florida Rofner, por el asesoramiento en la formulación del proyecto, la ejecución, redacción y sustentación de la tesis. Gracias por su paciencia, empeño y confianza deposita en mí

A los miembros del jurado Ing. M. Sc. Jose Dolores Levano Crisostomo, Ing. M. Sc. Erle Otto J. Bustamante Scaglioni, Ing. M. Sc. Marco Antonio Dueñas Tuesta por sus aportes en las correcciones de la presente investigación.

A mis amigos más cercanos que fueron en la universidad, por compartir conocimientos y formar parte fundamental en mi desarrollo profesional, manteniéndonos siempre en el camino correcto.

ÍNDICE GENERAL

	Página
DEDICATORIA	1
AGRADECIMIENTO	2
ÍNDICE DE TABLAS	6
ÍNDICE DE FIGURAS	7
RESUMEN	8
ABSTRACT.....	9
I. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Objetivos.....	2
1.1.1 Objetivo general.....	2
1.2.1 Objetivo específico.....	2
II. REVISIÓN DE LITERATURA.....	4
2.1. Sistemas de manejo.....	4
2.1.1. Variabilidad espacial de las propiedades del suelo	4
2.1.2. Geoestadística.....	5
2.2. Sistema de Información Geográfica (SIG).....	5
2.2.1. Técnicas de geoestadística y SIG	6
2.2.2. Semivarianza y semivariograma	6
2.2.3. Métodos de interpolación	9
2.3. Indicadores de fertilidad físico del suelo	14
2.3.1. Fertilidad física.....	15
2.3.2. Textura	15
2.4. Indicadores de fertilidad químico del suelo.....	16
2.4.1. pH.....	17
2.4.2. Materia Orgánica.....	17
2.4.3. Nitrógeno.....	18
2.4.4. Fósforo	19
2.4.5. Potasio.....	20
2.5. Cultivo de Papa (<i>S. tuberosum</i>)	21
2.6. Estado del arte.....	23
2.6.1. Antecedentes Internacionales	23
2.6.2. Antecedente nacional	25

2.6.3 Antecedente local.....	26
III. MATERIALES Y MÉTODOS.....	29
3.1 Lugar de ejecución.....	29
3.1.1 Características climatológicas.....	29
3.2 Materiales y equipos.....	30
3.2.1 Materiales de campo.....	30
3.2.2 Materiales de laboratorio.....	30
3.2.3 Equipos de campo.....	30
3.2.4 Equipos de laboratorio.....	30
3.3 Criterio y análisis de investigación.....	30
3.3.1 Tipo y nivel de investigación.....	30
3.3.2 Diseño de la investigación.....	30
3.4 Metodología.....	31
3.4.1 Determinación de los indicadores de fertilidad de suelo.....	31
3.4.2 Análisis exploratorio de los datos de la fertilidad del suelo.....	33
3.4.3 La distribución espacial en los indicadores de fertilidad de suelo mediante la comparación de los métodos de interpolación Kriging Ordinario (KO) y Distancia Inversa Ponderada (IDW).....	34
3.4.4 Determinación de los valores de validación geoestadística en los indicadores de fertilidad de suelo y comparar la predicción de los dos métodos de interpolación.....	34
3.5 Población y muestra.....	36
3.6 Variables en estudio.....	36
3.6.1 Variable independiente.....	36
3.6.2 Variable dependiente.....	36
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	37
4.1 Análisis exploratorio de datos de la fertilidad del suelo.....	37
4.1.1 Prueba de normalidad.....	42
4.1.2 Mapa de Voronoi.....	43
4.1.3 Análisis de Tendencia.....	45
4.1.4 Semivarianza.....	48
4.2 Determinación de la distribución espacial de los indicadores de fertilidad del suelo mediante la comparación de los métodos de interpolación Kriging Ordinario (KO) y Distancia Inversa Ponderada (IDW).....	51
4.2.1 Distribución espacial de los indicadores físicos y químicos del suelo.....	52

4.3 Determinar los valores de validación geoestadística en los indicadores de fertilidad de suelo y comparar la predicción de los dos métodos de interpolación	61
V. CONCLUSIONES	65
VI. PROPUESTAS A FUTURO	66
VII. REFERENCIAS	67
ANEXOS	76

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla	Página
1. Nombres generales y clases texturales del suelo según sus proporciones de arena, limo y arcilla	15
2. Niveles del pH	17
3. Niveles de materia orgánica.....	18
4. Niveles de contenido de nitrógeno.....	19
5. Niveles de contenido de fósforo	20
6. Niveles de contenido de potasio	20
7. Ubicación de puntos muestreados.....	31
8. Indicadores de fertilidad de suelo	32
9. Elección de modelo.....	35
10. Validación de la interpolación	36
11. Estadísticos descriptivos de los indicadores de fertilidad	37
12. Prueba de normalidad de los parámetros físicos y químicos de los suelos en estudio de acuerdo al tipo de muestra	42
13. Tendencia espacial de los datos	45
14. Parámetros del semivariograma de Kriging Ordinario	52
15. Rango de partículas de clases textuales de arcilla.....	53
16. Rango de partículas de clases textuales de arena	54
17. Rango de partículas de clases textuales de limo	55
18. Escala de nivel de pH	56
19. Niveles de materia orgánica (MO %)	57
20. Niveles de nitrógeno (N %)	58
21. Niveles de fósforo (P ppm).....	59
22. Niveles de potasio (K ppm)	60
23. Indicadores de fertilidad del suelo ME y RMSE	61
24. Indicadores de fertilidad del suelo de MSE y PE	63

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
1. Esquema de un semivariograma	7
2. Estimación de Kriging ordinario (KO) de la ubicación de interés x_0 , a partir de puntos de muestra espaciada irregularmente (puntos negros).....	13
3. Localización geográfica del área de estudio	29
4. Esquema de muestreo sistemático del fundo “Beker”	32
5. Indicadores físicoquímicos del suelo según el mapa de Voronoi	44
6. Distribución y tendencia de rango de partículas de clases texturales del suelo en función de las Coordenadas Espaciales (X, Y y Z).	46
7. Distribución y tendencia de rango de los indicadores de fertilización del suelo en función de las Coordenadas Espaciales (X, Y y Z).	47
8. Semivarianza de las partículas de clases texturales del suelo	48
9. Semivarianza de los indicadores de fertilizantes del suelo	50
10. Mapa de clase textural de arcilla por la interpolación IDW e KO.....	53
11. Mapa de clase textural de arena por la interpolación IDW e KO	54
12. Mapa de clase textural de limo por la interpolación IDW e KO	55
13. Mapa de pH del suelo por la interpolación IDW e KO.....	56
14. Mapa de materia orgánica (MO) del suelo por la interpolación IDW e KO.....	57
15. Mapa de nitrógeno (N) del suelo por la interpolación de IDW y KO.....	58
16. Mapa de fosforo (P) del suelo por la interpolación IDW e KO.....	59
17. Mapa de potasio (K) del suelo por la interpretación IDW e KO	60

RESUMEN

La investigación demuestra estudiar la variabilidad espacial en los indicadores de fertilidad del suelo bajo sistema convencional en cultivo de *Solanum tuberosum* L. en el fundo “Beker” en Panao – Pachitea. Donde tuvo una investigación tipo aplicada, de nivel descriptivo, diseño no experimental; la población de estudio estuvo conformada por un área total de 3,81 hectáreas de terrenos agrícolas pertenecientes al Fundo Beker, destinados específicamente al cultivo de papa. Mediante un muestreo no probabilístico y no aleatorio, se seleccionaron cuidadosamente 38 muestras de suelos dentro del fundo, garantizando así la representatividad del área agrícola y la pertinencia de los datos obtenidos para los fines de la investigación. Donde se concluye que los suelos del fundo “Beker” presentan alta variabilidad y deficiencias en pH, nitrógeno y fósforo, lo que demanda un manejo agrícola más técnico y localizado. El Kriging Ordinario (KO) demostró un mejor ajuste al modelo gaussiano, menores errores estadísticos y mapas más precisos que el método IDW, confirmando su mayor confiabilidad para representar la heterogeneidad edáfica. En conjunto, estas técnicas de interpolación avanzadas permiten optimizar la fertilización, reducir costos y mejorar el rendimiento de los cultivos, impulsando una agricultura más eficiente y sostenible en los sistemas convencionales del distrito de Panao.

Palabras clave: Planificación agrícola, distribución heterogénea, manejo territorial y productividad.

ABSTRACT

The research showed a study of the spatial variability of the fertility indicators for soil under a conventional system with a *Solanum tuberosum* L. crop on the “Beker” farm in Panao-Pachitea, [Peru]. The research was of an applied type, a descriptive level [and] a non-experimental design; the population of the study was made up of a total area of 3.81 acres of agricultural land belonging to the Beker farm, specifically designated for potato farming. Through a non-probabilistic and non-random sampling, thirty eight soil samples were carefully selected from within the farm, thus, guaranteeing the representations of the agricultural area and [ensuring] that the data that was obtained was relevant to the goals of the research. It was concluded that the soil from the “Beker” farm presented a high variability and deficiencies in its pH, nitrogen and phosphorous, which demands a more technical and localized agricultural management. The ordinary Kriging (OK; KO in Spanish) demonstrated a better fit to the Gaussian model, lower statistical errors and more precise maps than the IDW method, confirming it to be more trustworthy for representing the edaphic heterogeneity. Together, these advanced interpolation techniques allow for the optimization of the fertilization, to reduce the costs and to improve the yield of the crops, driving a more efficient and sustainable agriculture for the conventional systems within the Panao district.

Keywords: Agricultural planning, heterogeneous distribution, territorial management, and productivity.

I. INTRODUCCIÓN

En el Perú, la zona altoandina destaca por su extraordinaria diversidad de variedades de papa, resultado del esfuerzo articulado entre diversas instituciones dedicadas a la investigación y al desarrollo agrícola. Entre ellas, el Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA) y el Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego (MIDAGRI) lideran los programas de mejoramiento genético y transferencia tecnológica. A su vez, entidades como el Centro Internacional de la Papa (CIP), el Servicio Nacional de Sanidad Agraria (SENASA), el Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI), los Gobiernos Regionales y las Universidades Agrarias contribuyen al fortalecimiento del sector mediante investigación, asistencia técnica y monitoreo fitosanitario. Según MIDAGRI (2024), se han liberado más de 39 variedades de papa de alta calidad genética, incrementando en un 70% la productividad en más de 140 000 hectáreas altoandinas, beneficiando a cerca de 640 000 pequeños y medianos productores, quienes representan el 99% de los agricultores dedicados al cultivo de papa en el país. Estas nuevas variedades, por su valor genético, han contribuido a alcanzar rendimientos de entre 40 y 50 toneladas por hectárea, incrementando en un 60% las entradas económicas de los productores. Sin embargo, en distritos como Panao aún se registran bajos niveles de rendimiento, debido al uso inadecuado de fertilizantes químicos y la ausencia de un manejo técnico del suelo. Este escenario evidencia la necesidad de identificar los sistemas convencionales de manejo agrícola, con el fin de establecer un modelo o plan de fertilidad del suelo que considere sus condiciones físicas y químicas, optimizando el uso de nutrientes y garantizando la sostenibilidad productiva.

En ese sentido, la aplicación de herramientas estadísticas y geoestadísticas permite analizar la variabilidad espacial de los indicadores de fertilidad del suelo, proporcionando una base técnica para reconocer los patrones propios de los sistemas convencionales de manejo. La geoestadística, mediante el uso de variogramas y métodos de interpolación como el Kriging Ordinario, facilita la estimación de zonas homogéneas y la representación cartográfica de la distribución de nutrientes (Déleg, 2018). Del mismo modo, los métodos convencionales de análisis de suelo permiten obtener datos directos y precisos que, al integrarse con la geoestadística, fortalecen la interpretación de la dinámica del suelo. Según Arciniegas y Gómez (2018), el crecimiento de la agricultura intensiva exige una gestión eficiente del recurso suelo; por ello, la combinación de ambos enfoques resulta esencial para identificar, evaluar y mejorar los sistemas convencionales de manejo, orientando hacia una producción agrícola más sostenible y de mejor calidad. Donde se plantea la siguiente interrogante ¿Cuál es la variabilidad espacial respecto a los indicadores de fertilidad de suelo bajo sistema convencional en cultivo

de papa en el fundo “Beker” en el distrito de Panao- Pachitea?

La investigación se justifica por la limitada disponibilidad de información en la sierra peruana respecto a la variabilidad espacial de los indicadores de fertilidad del suelo en sistemas agrícolas convencionales, lo que dificulta la implementación de prácticas eficientes de conservación de suelos y agua y una gestión sostenible de los recursos agrícolas. En este marco, el estudio propone comparar los métodos de interpolación espacial Kriging Ordinario e Inversa de la Distancia Ponderada (IDW) como una herramienta de planificación física orientada a mejorar las prácticas de conservación en sistemas convencionales. Esta comparación permitirá identificar los patrones de distribución de nutrientes y elaborar mapas temáticos de fertilidad, los cuales servirán de base para un manejo agronómico más preciso, sostenible y eficiente del cultivo de *Solanum tuberosum* L. en el distrito de Panao, provincia de Pachitea.

Los resultados de esta investigación aportan nuevos conocimientos científicos sobre el comportamiento espacial de los indicadores de fertilidad del suelo en plantaciones de papa y sobre la eficiencia de los métodos de interpolación aplicados como herramientas de diagnóstico para el uso y conservación del suelo y agua en sistemas agrícolas convencionales. Estos métodos permitieron visualizar de manera precisa la distribución espacial de la fertilidad del suelo, facilitando la toma de decisiones técnicas y de gestión por parte de instituciones como el Centro Internacional de la Papa (CIP), el Gobierno Regional de Huánuco (GOREHCO), el Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA) y las asociaciones de productores locales, promoviendo así una gestión agronómica más sostenible y basada en evidencia espacial. De esta manera, el estudio responde al problema planteado, donde se logró contrastar parcialmente la hipótesis, si existe variabilidad espacial y el método de Kriging es el más eficiente para representar los indicadores de fertilidad del suelo bajo sistema convencional del cultivo de *S. tuberosum* en el fundo “Beker” en el distrito de Panao – Pachitea.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo general

Estudiar la variabilidad espacial respecto a los indicadores de fertilidad del suelo bajo sistema convencional en cultivo de *S. tuberosum* en el fundo “Beker” en Panao – Pachitea.

1.2.1 Objetivo específico

- Realizar el análisis exploratorio de los datos de indicadores de fertilidad (Textura, pH, M.O, N, P, K) del suelo del cultivo de *S. tuberosum* en el fundo “Beker” en Panao – Pachitea.

- Determinar la distribución espacial de los indicadores de fertilidad (Textura, pH, M.O, N, P, K) del suelo del fundo “Beker” mediante la comparación de los métodos de interpolación Kriging Ordinario (KO) y Distancia Inversa Ponderada (IDW).
- Determinar los valores de validación geoestadística en los indicadores de fertilidad de suelo en el fundo “Beker” y comparar la predicción de los dos métodos de interpolación.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Sistemas de manejo

Las variaciones espaciales del suelo pueden ser analizadas mediante técnicas geoestadísticas, las cuales permiten generar mapas de referencia que facilitan la delimitación de áreas de manejo específicas, con el objetivo de uniformizar la producción agrícola. Diversos estudios han profundizado en la comprensión de la variabilidad de las características físicas, químicas y biológicas del suelo, las cuales están estrechamente vinculadas al desarrollo de los cultivos. Estas propiedades influyen significativamente en el rendimiento, obedeciendo del grado de variación de cada medida y del impacto que dicho nivel pueda tener sobre la productividad (Ortega y Flores, 1999).

Está relacionada principalmente con el origen geológico del suelo. Sin embargo, esta variabilidad también puede ser provocada por prácticas de manejo agrícola como la labranza. Estos factores interactúan entre sí en diferentes escalas espaciales y temporales, y a su vez, pueden ser alterados localmente por procesos como la erosión y la deposición (Villacorta, 2014).

Según Mascorro y Reyes (2007) menciona que este procedimiento se aplica principalmente en zonas con baja variabilidad espacial, ya que otorga mayor relevancia a los valores de los puntos cercanos al lugar que se desea estimar. A partir de datos obtenidos en puntos específicos, se pueden construir isolíneas o curvas de nivel, que unen puntos con valores equivalentes de una determinada variable.

2.1.1. Variabilidad espacial de las propiedades del suelo

Varían por medio de un ámbito a un grado regional superior, siendo parte del resultado de factores intrínsecos (evoluciones pedo-genéticos) y extrínsecos (administración del suelo, fertilizantes y evolución de cultivos) (Panday et al., 2019).

Por otro lado, Jaramillo (2006), menciona que se caracteriza por medio de la adquisición de valores que dependerán de la ubicación y distancia entre las muestras, lo que indica que el valor adoptado por la variable en una locación dependerá activamente de la distancia y direccionamiento de otro espécimen.

El aporte del reconocimiento sobre la variabilidad de las propiedades del suelo reside en el uso de una agricultura precisa que sostenga la localización del cultivo, ya que cuando se proporciona un manejo seccionado resulta más eficiente que uno uniforme (Denton et al., 2017).

En tal sentido, Jaramillo et al. (2008) realiza una descripción acertada de su

evaluación por medio de:

- Un mapeo de interpolación.
- Control de calidad de cada punto.
- Especificación de locación y experimentos resultantes.
- Mejoramiento de la metodología.
- Perfeccionamiento al interpretar los resultados.

Diversas investigaciones señalan que la distribución espacial de las propiedades del suelo está principalmente influenciada por el uso del terreno, las prácticas de manejo, las labores de labrado y el uso de fertilizantes, todas de origen humano (Azuka y Igué, 2020).

De igual manera Sahu et al. (2020) revelan la conducta en patrones de distribución espacial del suelo en una alta variedad por medio del uso, las características topográficas y las características climáticas en el sitio de muestreo.

La variabilidad espacial del suelo puede analizarse mediante técnicas geoestadísticas, especialmente utilizando técnicas de interpolación no sesgadas como el Kriging, los cuales permiten generar mapas que facilitan la comprensión de cómo varían las propiedades del suelo en una zona específica (Sahu et al., 2020).

2.1.2. Geoestadística

La geoestadística es una subdisciplina de la estadística enfocada en identificar, estimar y representar patrones espaciales de variables regionalizadas. Su enfoque principal radica en el análisis y modelado mediante variogramas, los cuales permiten interpretar la variación existente entre mediciones tomadas a diferentes distancias. Esta herramienta resulta fundamental para examinar cómo cambian los datos en el espacio (Goovaerts, 1997).

2.2. Sistema de Información Geográfica (SIG)

Según Redrován (2018), la tecnología computarizada está conformada por cuatro componentes esenciales: hardware, software, datos y liveware. Este último se refiere al factor humano encargado de diseñar, implementar y operar los Sistemas de Información Geográfica (SIG). Para un uso eficiente del SIG, no basta con dominar el software; es indispensable que el usuario cuente con conocimientos sólidos en disciplinas vinculadas al problema que se desea analizar. De este modo, se garantiza una interpretación adecuada de los resultados y una toma de decisiones fundamentada en información espacial precisa.

Un Sistema de Información Geográfica (SIG) es una herramienta que facilita el análisis, visualización e interpretación de fenómenos relacionados con la superficie terrestre, mediante el uso de hardware y software especializados en la gestión de datos espaciales. Estas

plataformas permiten manipular y examinar información geográfica para generar insumos útiles en la toma de decisiones. Los productos derivados del SIG tienen múltiples aplicaciones y ofrecen soluciones a diversas problemáticas territoriales. Para realizar estudios espaciales, se emplean principalmente la Percepción Remota y los SIG, integrados dentro de enfoques de análisis multicriterio. No obstante, la escala del estudio limita su nivel de detalle: por ejemplo, datos elaborados a escalas de 1: 100 000 o 1: 500 000 presentan una resolución insuficiente para abordar intervenciones a nivel local, siendo más adecuados para análisis a escala de paisaje (Aguilar y Ramírez, 2015).

2.2.1. Técnicas de geoestadística y SIG

El enfoque estadístico clásico para abordar la heterogeneidad asume que las observaciones son independientes entre sí y no considera la correlación espacial. En contraste, el análisis geoestadístico incorpora las relaciones entre mediciones realizadas en puntos cercanos (Johnston et al., 2001). En esta línea, Saha et al. (2020) señala que las técnicas geoestadísticas son más apropiadas que otros métodos de interpolación para estimar las propiedades del suelo.

2.2.1.1 Autocorrelación y dependencia espacial

La autocorrelación espacial de una variable se manifiesta cuando las observaciones cercanas entre sí tienden a presentar valores similares, mientras que aquellas más alejadas muestran una menor similitud o dependencia (Griffith y Chun, 2016). Para cuantificar esta relación, se utilizan diversos indicadores espaciales, siendo el índice de Moran (I) uno de los más reconocidos y aplicados en el análisis de fenómenos naturales (Siabato y Guzmán, 2019). Su principal ventaja radica en su claridad interpretativa, ya que permite identificar el tipo de patrón espacial según las posiciones y los valores de una variable geográfica.

Estos indicadores se complementan eficazmente con modelos de semivariogramas, herramientas clave en geoestadística que permiten representar y visualizar los patrones espaciales mediante mapas, facilitando la comprensión y toma de decisiones en estudios territoriales (Oliver y Webster, 2014). Esto refuerza la utilidad del análisis espacial en disciplinas como la agricultura, donde comprender la distribución de las propiedades del suelo es esencial para una gestión eficiente y localizada.

2.2.2. Semivarianza y semivariograma

Ovalles (2001) define la semivarianza como un indicador del grado de similitud entre dos puntos de muestreo ubicados a una distancia determinada; cuanto más parecidos sean los valores entre los puntos, menor será la semivarianza, y a medida que aumenta la diferencia

entre ellos, también lo hace la semivarianza. Por lo general, cuanto menor es la distancia entre observaciones, menor es la varianza entre sus valores.

Es la representación gráfica que relaciona la semivarianza con la distancia entre puntos. Según Jaramillo et al. (2008), en esta gráfica, el conjunto de datos empíricos forma el semivariograma experimental, el cual se ajusta a un modelo teórico que permite inferir el comportamiento espacial de una variable en áreas no muestreadas. Esta herramienta resulta fundamental para estudios de variabilidad espacial, ya que facilita la comprensión de cómo se distribuyen las propiedades del suelo en el espacio y permite aplicar técnicas de interpolación más precisas, como el Kriging. Así, el semivariograma no solo describe la estructura espacial de los datos, sino que sustenta decisiones en agricultura de precisión, ordenamiento territorial y manejo sostenible del suelo.

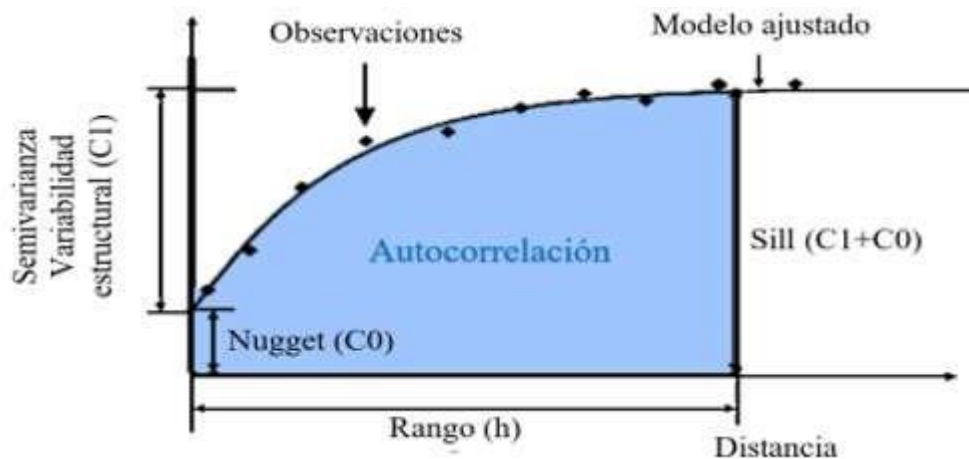


Figura 1. Esquema de un semivariograma

Un semivariograma modelado se caracteriza por varios parámetros clave que describen la estructura espacial de los datos (Mao et al., 2014):

- **Nugget o efecto pepita (C_0):** representa la variación aleatoria o error de muestreo presente en los datos, es decir, la parte de la variabilidad que no puede explicarse por la distancia entre puntos.
- **Componente estructural (C_1):** refleja la variabilidad atribuida a la estructura espacial o patrón que presentan los datos.
- **Sill o umbral ($C_0 + C_1$):** indica la varianza total observada en la muestra, siendo el valor al que tiende la semivarianza cuando se alcanza el rango.
- **Rango efectivo (h):** corresponde a la distancia a partir de la cual ya no existe correlación espacial significativa entre los puntos, es decir, más allá de esta distancia las observaciones son independientes.

- **Grado de dependencia espacial:** Este indicador es fundamental para determinar la continuidad espacial de una variable. Se calcula a partir del semivariograma experimental como el complemento de la razón entre el nugget (efecto pepita) y el sill (meseta), mediante la siguiente fórmula:

Ecuación (1)

$$\text{Grado de dependencia espacial} = 1 - \left(\frac{\text{Nugget}}{\text{Sill}} \right) \quad (1)$$

El grado de dependencia espacial (GDE) se determina a partir de la relación entre el efecto nugget y el sill, como lo expone Jaramillo (2012). También lo menciona Déleg (2018), que este indicador permite evaluar la fuerza de la dependencia espacial de los datos. Así, se considera que existe una dependencia espacial fuerte cuando los valores del GDE son inferiores al 25%, una dependencia moderada si se ubican entre el 25% y el 75%, y una dependencia débil cuando superan el 75%. Esta clasificación resulta fundamental, ya que facilita interpretar con mayor precisión la estructura espacial de la variable estudiada y orientar de manera más rigurosa la toma de decisiones en el análisis geoespacial.

Comprender e interpretar correctamente estos parámetros es esencial para modelar la distribución espacial de propiedades del suelo y tomar decisiones informadas en el manejo agrícola. Al identificar el alcance de la dependencia espacial (rango), se puede optimizar el diseño del muestreo y mejorar la precisión de los mapas generados por técnicas como el Kriging, lo que contribuye directamente a una agricultura más eficiente y sostenible.

Según ArcGis (2025), también indica los siguientes modelos:

- **Gaussiano:** Este modelo asume que la autocorrelación espacial es extremadamente alta a distancias cortas y disminuye rápidamente hacia cero a distancias mayores y es adecuado para fenómenos que cambian rápidamente con la distancia.
- **Exponencial:** Este modelo describe una disminución exponencial de la autocorrelación espacial con la distancia, donde es útil cuando la autocorrelación no desaparece completamente a una distancia finita.
- **Esférico:** Este modelo asume una disminución lineal de la autocorrelación espacial hasta un rango, después del cual la autocorrelación es cero y es ampliamente utilizado en geoestadística.
- **Circular:** Este modelo es una variante del modelo esférico, utilizado principalmente en dos dimensiones, donde se emplea cuando la variabilidad espacial es isotrópica en un plano.

2.2.3. Métodos de interpolación

El uso de tecnologías avanzadas para la recolección de datos en campo, junto con el procesamiento y almacenamiento digital, ha permitido mejorar significativamente la predicción de las propiedades del suelo. Gracias a los Sistemas de Información Geográfica (SIG), es posible representar estas propiedades en mapas digitales. Para ello, se realizan muestreos que brindan datos puntuales, y mediante métodos de interpolación se pueden estimar los valores de las variables estudiadas en lugares donde no se cuenta con observaciones directas (Lagacherie & McBratney, 2006).

Según Abdel et al. (2021), indicando que la interpolación espacial es el proceso mediante el cual se estiman los valores de una variable en zonas donde no se tomaron muestras, basándose en la información de puntos cercanos que sí fueron registrados. Esta técnica permite rellenar vacíos de información con alta precisión, aprovechando la relación espacial entre los datos, lo cual es fundamental en estudios ambientales, agrícolas y de ingeniería, donde una representación continua del territorio mejora notablemente la toma de decisiones y el análisis espacial.

La interpolación espacial es una técnica que permite estimar el valor de una variable o propiedad del suelo $f(x)$ en un punto donde no se han realizado observaciones, utilizando los valores conocidos de esa variable en varios puntos cercanos (Blanco, 2015).

Los métodos de interpolación espacial se agrupan en dos grandes categorías:

- a) Determinísticos, donde estiman valores en ubicaciones desconocidas a partir de puntos cercanos, sin considerar la estructura o autocorrelación espacial de los datos. Uno de los más conocidos es el método de Ponderación Inversa de la Distancia (IDW), que asigna mayor peso a los valores más próximos, bajo la deducción de que puntos cercanos son más similares entre sí.
- b) Geoestadísticos, donde modelan la autocorrelación espacial de los datos mediante el análisis del semivariograma. Son más robustos para fenómenos con alta variabilidad espacial.

El Kriging Ordinario (KO) es un método geoestadístico basado en la autocorrelación espacial de los datos y en el uso de semivariogramas (o funciones de covarianza) para estimar valores en ubicaciones no muestreadas. Este enfoque le permite generar predicciones precisas y mapas de incertidumbre, aprovechando la estructura espacial de los datos. Es ampliamente utilizado en estudios agrícolas y ambientales, porque al existir una estructura espacial definida, KO proporciona estimaciones robustas y coherentes (Esri, 2021).

2.2.3.1. Métodos de interpolación geoestadística

Castro et al. (2017) señalan que existen diversas metodologías de interpolación espacial aplicadas a la predicción de variables ambientales y agrícolas, las cuales se dividen en técnicas geoestadísticas y no geoestadísticas. Dentro del enfoque geoestadístico, todas las variantes se agrupan bajo la familia del Kriging, que incluye métodos como el Kriging ordinario (KO), simple (KS), universal (KU), entre otros.

A diferencia de otros métodos de interpolación, el Kriging ordinario (KO) se basa en el uso del variograma para modelar la autocorrelación espacial entre los datos, permitiendo así asignar pesos óptimos a cada punto de muestreo. Esto puede generar resultados más precisos, siempre que se cuente con un diseño de muestreo adecuado (Oliver & Webster, 2014).

Según Díaz (s.f), indica la estructura geoestadística en tres etapas:

- **Análisis exploratorio de datos:** Esta fase preliminar es crucial en cualquier análisis geoestadístico, ya que permite explorar en profundidad los datos muestrales con el objetivo de identificar tendencias, anomalías, valores atípicos y patrones espaciales significativos. Para ello, se emplean herramientas estadísticas y representaciones gráficas que facilitan la comprensión de la distribución, variabilidad y coherencia interna de los datos. Un aspecto clave en este análisis es el coeficiente de variación, la cual puede clasificarse según su magnitud: baja cuando es menor al 12%, media entre 12% y 60%, y alta cuando supera el 60%. Este proceso no solo orienta la selección de modelos adecuados, sino que también define la calidad y confiabilidad del análisis espacial posterior, siendo determinante para obtener resultados precisos y representativos (Inocencio y Florida, 2022).
- **Análisis estructural:** Se enfoca en modelar la dependencia espacial de los datos mediante la construcción de semivariogramas. Esta etapa permite entender cómo varía la similitud de los datos en función de la distancia y dirección, lo que es esencial para una modelación precisa.
- **Predicción espacial:** Utilizando los modelos obtenidos en el análisis estructural, se realizan estimaciones en ubicaciones no muestreadas mediante técnicas como el kriging. Esta etapa culmina en la generación de mapas predictivos que representan la distribución espacial del fenómeno estudiado.

También Olaya (2014), indica que los métodos de interpolación permiten estimar valores en ubicaciones donde no se han realizado mediciones, a partir de datos obtenidos en puntos conocidos. Estas técnicas resultan esenciales para completar la información espacial y

generar superficies continuas de análisis. Existen diversos métodos de interpolación, y su elección depende del tipo de variable y del patrón espacial que presentan los datos. Algunos métodos, como Kriging, IDW o Spline, son ampliamente empleados en los Sistemas de Información Geográfica (SIG) por su precisión y compatibilidad con diferentes tipos de datos geoespaciales. En el entorno de los SIG, la interpolación se implementa comúnmente mediante capas ráster bidimensionales, lo que permite representar de forma continua las variaciones de un fenómeno en el territorio y facilitar su análisis visual y estadístico. Estos procesos son fundamentales en estudios de suelos, hidrología, contaminación ambiental y planificación territorial, donde la información espacial detallada es clave para la toma de decisiones.

2.2.3.2. Métodos de ponderación de distancia inversa (IDW)

El método de ponderación por distancia inversa (IDW) es ampliamente empleado por investigadores y en software de Sistemas de Información Geográfica (SIG), ya que parte del supuesto de que los valores de los parámetros se relacionan entre sí en proporción inversa a la distancia que los separa. Durante el proceso de interpolación, la influencia de un punto sobre otro disminuye conforme aumenta la distancia entre ellos, es decir, los puntos más cercanos al lugar a estimar tienen mayor influencia en el valor calculado, mientras que los más alejados influyen menos (Pereira et al., 2022). De acuerdo con Alcaraz et al. (2016), el método de interpolación IDW se fundamenta en calcular un promedio ponderado de los valores observados en los puntos más próximos al lugar que se desea estimar. Esta técnica asigna mayor influencia a los datos más cercanos y su formulación matemática fue desarrollada por Shepard (1968), estableciendo así una base importante en los procedimientos de estimación espacial.

Demostrando la siguiente fórmula:

$$Z(x_0) = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{Z(x_i)}{d(x_0, x_i)^p}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d(x_0, x_i)^p}} \quad (2)$$

Donde:

- $Z(x_0)$: Valor estimado en el punto desconocido x_0
- $Z(x_i)$: Valor conocido en punto x_i
- $d(x_0, x_i)$: Distancia entre el punto x_0 y el punto conocido x_i
- p : Parámetro de potencia.
- n : Número de puntos conocidos usados para la estimación.

2.2.3.3. Aplicación de los SIG en la estimación espacial mediante la interpolación

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) han evolucionado mediante diversas herramientas que facilitan la recopilación, el almacenamiento y el análisis de datos con variaciones espaciales y temporales. Esto ha permitido realizar estimaciones predictivas y representarlas en mapas digitales. Gracias a los muestreos y observaciones puntuales, es posible aplicar técnicas de interpolación para estimar valores en ubicaciones donde no se ha tomado una muestra, calculando dichos valores en función de los datos disponibles en su entorno inmediato (Déleg, 2018).

Se trata de una técnica matemática que estima el valor de alguna función en un punto que no está determinado y con unos datos que también son desconocidos es decir que parte de los datos que ya reconoce y emplea una simulación de las irregularidades en esos puntos que desconoce mediante las geoestadísticas del análisis previo, donde se apartó todo el material vegetal y se simulara en el plano del terreno partiendo de la comprensión del fenómeno por cómo se obtuvieron las muestras y aparte lo que ilustra procedente a esto se proporciona el modelo de lo que se espera. Para un mejor resultado es necesario partir de métodos flexibles como en kriging para obtener una mejor simulación (Carrero, 2023).

2.2.3.4. Kriging Ordinario

El Kriging Ordinario (KO) es una técnica de interpolación empleada para estimar el valor de una variable en puntos no muestreados (x_0), utilizando la información disponible de las ubicaciones vecinas. Este proceso se basa en una combinación lineal de n muestras aleatorias cercanas. La fórmula matemática que describe este método se presenta en Pham et al. (2019).

$$Z^*(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \quad (3)$$

Donde:

- $Z^*(x_0)$ es el valor predicho del parámetro en la ubicación no medida x_0 .
 - $Z(x_i)$ es el valor medido del parámetro en la posición x_i .
 - λ_i es el coeficiente de ponderación asociado a cada punto medido, el cual determina el peso de cada valor medido en la estimación del valor predicho en x_0 .
- n es el número de posiciones dentro del área.

El coeficiente λ_i se determina considerando la distancia entre los puntos de muestreo y el punto que se desea estimar (Giraldo, 2011).

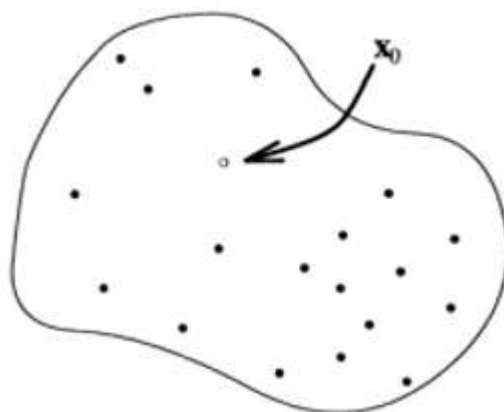


Figura 2. Estimación de Kriging ordinario (KO) de la ubicación de interés x_0 , a partir de puntos de muestra espaciado irregularmente (puntos negros).

La utilidad del Kriging Ordinario (KO) depende de las características de los datos. Este método, basado en la teoría de variables regionalizadas, parte del supuesto de que la variabilidad espacial es estadísticamente homogénea. Por ello, se emplea cuando la variable analizada cumple con la estacionariedad de segundo orden o intrínseca, lo que implica que su media es constante, aunque no conocida (Bohorquez, 2022).

El Kriging Ordinario (KO) es una de las técnicas de interpolación más empleadas para identificar y estimar la distribución espacial de las propiedades del suelo, gracias a su precisión en la generación de mapas detallados. No obstante, una de sus limitaciones es que no considera la influencia de otras variables ambientales sobre la característica analizada (Selmy et al., 2022).

Es un sistema de cálculo geoestadística que funciona con datos previos partiendo del caso de estudio se pueden usar de puntos cercanos para apreciar conjeturas calculables en coordenadas sin muestra, la formulación es a través de tomar la media variable como constante apoyándose del variograma para destinar un cálculo de similitudes y puesto todo esto en marcha determinar el valor desconocido del punto a graficar (Canchala et al., 2024).

Cuando se desea obtener campos de precipitación es importante saber que muchas veces los datos de medición no serán los correctos o bien no los tendremos, el kriging ordinario se basa específicamente en la suposición de un punto mediante los cálculos aproximados a ese punto que ya están comprobados, tomando estudios del variograma, y el valor añadido de variables secundaria para poder tomar el valor añadido de la variable como punta de eje posterior a esto se realizan los cálculos pertinentes para resultar que al apoyarse de variogramas agregados el funcionamiento de la técnica es comparable por similitudes de optimalidad (Rogelis, 2020).

2.2.3.5. Validación

La validación cruzada es una técnica esencial para evaluar la precisión de los modelos de interpolación espacial, como el Kriging Ordinario (KO) y el método de Distancia Inversa Ponderada (IDW). Consiste en excluir, uno a uno, los valores de la variable, calcular el semivariograma correspondiente sin ese dato y luego estimar el valor omitido con base en dicho semivariograma. Este proceso se repite para cada uno de los puntos muestreados, permitiendo comparar los valores estimados con los reales. El análisis de los resultados debe centrarse en identificar errores significativos, así como zonas donde se observe una clara sobreestimación o subestimación. Es importante destacar que no se recomienda ajustar automáticamente el modelo de semivariograma utilizando los residuales obtenidos de la validación cruzada, ya que esto puede derivar en una versión “mejorada” del modelo que, en realidad, produzca peores estimaciones (Escudero y Morera, 2022).

2.3. Indicadores de fertilidad físico del suelo

De acuerdo con Vistoso y Martínez (2022), la fertilidad del suelo está influenciada por factores ambientales, como las características del suelo y el clima, así como por las prácticas de manejo agronómico, tales como la labranza, fertilización, mejora del suelo, incorporación de residuos de cultivos y riego. Estas prácticas inciden directamente en la interacción entre el suelo y las plantas, afectando los diferentes sistemas de producción agrícola. En este contexto, el manejo biológico del suelo y de los nutrientes adquiere especial relevancia en la agricultura orgánica, ya que muchas de las tecnologías empleadas en este tipo de agricultura están enfocadas en conservar y gestionar adecuadamente el recurso suelo.

El suelo desempeña funciones fundamentales, como la disponibilidad de nutrientes, la formación de una estructura porosa que favorece la oxigenación, la filtración de sustancias tóxicas y el mantenimiento de niveles adecuados de fertilidad. Un suelo en buen estado de salud puede sostener la productividad biológica, a la vez que apoya el equilibrio ambiental y favorece la salud de las plantas, los animales y los seres humanos (Ecomandaga, 2018).

La fertilidad del suelo es producto de la interacción integrada entre sus propiedades físicas, químicas y biológicas. Se define como la capacidad del suelo para proporcionar los nutrientes esenciales en las cantidades y proporciones requeridas para el óptimo crecimiento y desarrollo de cultivos específicos. Además, un suelo fértil debe contar con condiciones que faciliten el contacto efectivo entre estos nutrientes y el sistema radicular de las plantas, lo que incluye una estructura adecuada, buena porosidad, retención de humedad y una biota activa. Estos factores contribuyen a una mayor eficiencia en la absorción de nutrientes y al sostenimiento de la productividad agrícola (Ruiz, 2016).

2.3.1. Fertilidad física

Se vincula con las características físicas del suelo, como la densidad, textura, estructura, porosidad y capacidad de retención de humedad, las cuales afectan directamente el aprovechamiento del recurso suelo. Estas propiedades condicionan la disponibilidad de oxígeno, el movimiento del agua, la penetración de raíces y el comportamiento químico y biológico del suelo, facilitando así la germinación de semillas, el desarrollo radicular y el soporte estructural de las plantas. Los factores físicos que influyen en la fertilidad del suelo incluyen su textura, estructura, color, composición mineral, así como su densidad aparente y real, ya que estas propiedades determinan su comportamiento funcional (Vistoso y Martínez, 2022).

2.3.2. Textura

Define la dimensión de las partículas presentes determinándolas en su estudio y describiendo su tipo; es decir, si es predominante en arcilla quien determinara una retención de agua considerable y obstruirán del paso del aire, si es de abundante limo será de buena disposición para la filtración de agua y tránsito regular de aire, de ser arenoso proporcionara un fácil drenaje y aireación, pero una baja retención de líquidos y por ende de nutrientes (Thompson y Troeh 2021).

Tabla 1. Nombres generales y clases texturales del suelo según sus proporciones de arena, limo y arcilla

Nombre textural general	Arena	Limo	Arcilla	Clase textural
	%			
Suelos arenosos (textura gruesa)	86-100	0-14	0-10	Arenoso
	70-86	0-30	0-15	Franco arenoso
Suelos francos (textura moderadamente gruesa)	50-70	0-50	0-20	Franco arenoso
Suelos francos (textura mediana)	23-52	28-50	7-27	Franco
	20-50	74-88	0-27	Franco limoso
	0-20	88-100	0-12	Limoso
Suelos francos (textura moderadamente fina)	20-45	15-52	27-40	Franco arcilloso
	45-80	0-28	20-35	Franco arenoso arcilloso
	0-20	40-73	27-40	Franco limoso arcilloso
Suelos arcillosos (textura fina)	45-65	0-20	35-55	Arcilloso arenoso
	0-20	40-60	40-60	Arcilloso limoso
	0-45	0-40	40-100	Arcilloso

Fuente: MUNDOAGRO (2023).

La Tabla 1 se presenta la clasificación textural de los suelos en función de los porcentajes de arena, limo y arcilla, permitiendo identificar la clase textural específica a partir de la proporción de cada componente. Esta clasificación es fundamental para conocer las propiedades físicas del suelo, como su capacidad de retención de agua, aireación y

fertilidad, aspectos clave para el manejo agrícola y la planificación del uso del suelo.

2.4. Indicadores de fertilidad químico del suelo

Este concepto se refiere a la habilidad del suelo para suministrar los nutrientes esenciales que permiten el crecimiento, desarrollo y rendimiento de cultivos y pastos. Dentro de las propiedades químicas del suelo, la capacidad de intercambio catiónico (CIC) y el nivel de acidez (pH) son determinantes clave en la disponibilidad de nutrientes y en la eficacia del uso de fertilizantes. La formación del suelo depende de un equilibrio entre todos sus componentes. Los minerales constituyen la base de la producción agrícola, por lo que la fertilidad química representa solo uno de los múltiples factores productivos (Vistoso y Martínez, 2022).

Las propiedades químicas del suelo constituyen un conjunto de variables esenciales que definen la calidad y aptitud agronómica de un área sometida a evaluación biofísica o fisicoquímica, y desempeñan un papel crítico en la dinámica de los nutrientes que inciden directamente en el crecimiento y rendimiento de las especies vegetales, especialmente en el contexto de cultivos de precisión. Entre los indicadores más relevantes se destacan:

- **PH del suelo:** Parámetro clave que determina el nivel de acidez o alcalinidad, afectando directamente la biodisponibilidad de los nutrientes esenciales para las plantas. Un desequilibrio en este valor puede limitar la absorción de elementos vitales como el nitrógeno, fósforo y potasio.
- **Materia Orgánica (MO):** Actúa como un indicador de fertilidad natural, ya que promueve la actividad microbiana, mejora la estructura del suelo y potencia su capacidad de retención de agua y nutrientes, condiciones fundamentales para el desarrollo sostenible del cultivo.
- **Macronutrientes primarios (N, P, K):** El nitrógeno, fósforo y potasio son elementos fundamentales que intervienen en la formación estructural, metabolismo energético y resistencia fisiológica de las plantas, siendo determinantes para un crecimiento vigoroso.

La integración y análisis de estos indicadores fisicoquímicos permite una caracterización integral del suelo, lo que facilita la toma de decisiones técnicas para definir la idoneidad del terreno en cultivos de precisión, asegurando que se elijan especies compatibles con las condiciones edáficas existentes, y garantizando así un rendimiento agronómico eficiente y sostenible (Herrera et al., 2021).

Según Campos (2019), los parámetros químicos vinculados a la salud del suelo comprenden características que influyen en las interacciones suelo-planta, la calidad del agua, la capacidad del suelo para neutralizar contaminantes y la disponibilidad de agua y nutrientes tanto para las plantas como para los microorganismos. Propone como indicadores relevantes el

contenido de materia orgánica, carbono, nitrógeno orgánico y pH, así como la disponibilidad de nitrógeno, fósforo y potasio. Estos parámetros son fundamentales para la fertilidad del suelo, ya que influyen directamente en el rendimiento de los cultivos agrícolas.

Por su parte, Martínez (2003) sostiene que la materia orgánica presente en el suelo constituye un indicador clave de su calidad, siendo uno de los elementos más importantes dentro del conjunto de compuestos esenciales para evaluar su salud. La materia orgánica es crucial para mantener la estructura del suelo, retener el agua necesaria y actuar como reserva de nutrientes disponibles para las plantas.

Es un estudio de población orgánica que indica la cantidad partículas químicas que promueven o afectan el desarrollo de un cultivo o define la presencia de microorganismos saludables para la existencia de algún nutriente provechoso para el desarrollo de una plantación, además de indicar la necesidad de sus nutrientes en cuanto a saber si es fértil o infértil un área determinada. Los indicadores químicos explican que cada cultivo tiene reactivos específicos y estudiables para determinar mediante resultados análisis químicos un posible éxito o fracaso en la supervivencia de tejidos vegetales (Herrera et al., 2021).

2.4.1. pH

Es un valor químico que determina el grado de alcalinidad o acidez de algún componente o sustancia, mediante una escala logarítmica de iones de hidrogeno en el agua que lo compone. Para encontrar un potencial de hidrogeno estable en una escala de 5, 5 y 7, 5 en los suelos es importante considerar aportar materiales en déficit que logren regular sus niveles; es decir, en suelos ácidos es necesaria la acidificación como neutralizador de niveles con cal, y en términos de alcalinización el azufre o sulfato de aluminio servirán para igualar la acidez o basicidad de los elementos presentes en la tierra (Thompson y Troeh, 2021).

Tabla 2. Niveles del pH

Nivel de acidez	Rango de pH
Extremadamente ácido	< 5,5
Moderadamente ácido	5,5 – 7,5
Alcalino	> 7,5

Fuente: USDA – Natural Resources Conservation Service (s.f)

2.4.2. Materia Orgánica

Es un indicador de fertilidad en el suelo y aún más en los que son de característica arenosa puesto que servirá para definir la capacidad de retención de flujos hídricos ya que por cada 1% de materia orgánica el suelo tiene la capacidad de retener un 1,5% de agua. Al estar compuesta por carbono, azufre, oxígeno, fósforo, hidrogeno y nitrógeno será un coadyuvante para mejorar la composición de los suelos mediante el uso del humus, proteínas

agregadas, materia fecal de ciertos animales y carbohidratos específicos (Thompson y Troeh 2021).

La relevancia atribuida a la materia orgánica (MO) se debe a su participación en procesos clave como la formación y estabilidad de los agregados del suelo, el ciclo biogeoquímico de los nutrientes, y la regulación del balance hídrico y energético. En función del nivel de MO presente, los suelos pueden ser clasificados de la siguiente forma:

Tabla 3. Niveles de materia orgánica

Nivel	Contenido %
Bajo o pobre	< 2
Medio	2 – 4
Alto	> 4

Fuente: Porta et al. (2008).

La Tabla 3 presenta una escala de clasificación del contenido porcentual de materia orgánica (MO) en el suelo, segmentada en tres niveles: bajo (<2%), medio (2–4%) y alto (>4%). Esta clasificación permite diagnosticar el estado de fertilidad del suelo, dado que la MO cumple funciones esenciales en la mejora de la estructura edáfica, la capacidad de retención hídrica, la actividad biológica y la disponibilidad de nutrientes, aspectos fundamentales para la sostenibilidad del crecimiento vegetal.

2.4.3. Nitrógeno

Según Havlin et al. (2014), las plantas no tienen la capacidad de fijar el nitrógeno presente en la atmósfera (N_2), por lo que dependen de diversas fuentes externas como microorganismos simbióticos, descargas eléctricas, la descomposición de la materia orgánica y la aplicación de fertilizantes para obtener este nutriente. Las formas en que las plantas absorben el nitrógeno son el nitrato (NO_3^-) y el amonio (NH_4^+). Cuando lo asimilan como nitrato, primero deben transformarlo en amonio para poder sintetizar aminoácidos y proteínas, proceso que consume energía. En cambio, si lo absorben directamente como amonio, pueden generar proteínas con un menor requerimiento energético.

Es el mayor gas existente en el planeta, y cumple con el más alto porcentaje de presencia en la atmósfera, puesto que su composición consiste en 2 átomos de nitrógeno lo suficientemente estables para reagruparse en cualquier materia orgánica, mineral o microorganismo existente en los suelos, para luego dirigirse a las plantas en forma de nutriente o nitrato ayudando a revitalizar la vías o conductos que lo transportan (xilema) en forma de (NO_3^-) luego se reduce a (NO_2^-) y por consiguiente a (NH_3) al terminar de ser catalizado por las enzimas de cambio. De todo este proceso sale la conclusión de un fenómeno llamado fotosíntesis (Herrera et al., 2021).

Tabla 4. Niveles de contenido de nitrógeno

Nivel	Nitrógeno (%)
Bajo	< 0,1
Medio	0,2 - 0,2
Alto	> de 0,2

Fuente: Smith (2022)

La Tabla 4 establece una escala de clasificación del contenido de nitrógeno total en el suelo, expresado en porcentaje, estructurada en tres rangos: bajo (<0,1%), medio (0,1–0,2%) y alto (>0,2%). Esta categorización permite evaluar la disponibilidad de este macronutriente fundamental para los cultivos, dada su participación directa en procesos fisiológicos como el crecimiento vegetativo, la biosíntesis de aminoácidos y proteínas, así como en el rendimiento agronómico global.

2.4.4. Fósforo

El fósforo es fundamental para la nutrición vegetal y el adecuado desarrollo de raíces y frutos, ya que es absorbido por las plantas en forma de fosfatos monoácidos y diácidos. Sin embargo, al ser un elemento con baja movilidad en el suelo, tiende a reaccionar formando compuestos fosfatados insolubles que no pueden ser aprovechados por las plantas, lo que lo convierte en uno de los nutrientes más críticos. Su relevancia está asociada al fortalecimiento del sistema radicular, la formación de semillas y flores, y al funcionamiento de células vivas, ya que interviene en la formación de nucleótidos, lecitinas y enzimas. Además, cumple un rol esencial en la transferencia de energía dentro de la planta. En el suelo, se encuentra mayormente como ion ortofosfato (H_2PO_4^-) en condiciones ácidas y como HPO_4^{2-} en ambientes alcalinos, aunque su disponibilidad en formas aprovechables es limitada (Rojas, 2006).

Es un macronutriente de presencia doble por su aparición en ésteres del ácido fosfórico y en (Pi) como iones disponibles para la absorción, es uno de los componentes que se encargaran del crecimiento de las plantas, pertenece a los ácidos nucleicos y los nucleótidos, pertenece a los procesos de síntesis y fotosíntesis que determinan el crecimiento y desarrollo de plantas, el fósforo va a existir en el suelo si la temperatura es la adecuada, la humedad es regulada y si el pH es apto para su supervivencia (Herrera et al., 2021).

Tabla 5. Niveles de contenido de fósforo

Nivel	Fósforo (ppm)
Muy Bajo	Menos de 3
Bajo	3 – 7
Adecuado	7 – 15
Alto	15 – 25
Muy Alto	Mayor de 25

Fuente: Porta et al., (2008).

La Tabla 5 establece una escala de valoración del contenido de fósforo disponible en el suelo, expresado en partes por millón (ppm), clasificada en los rangos de muy bajo, bajo, normal y alto. Esta tipificación facilita el diagnóstico de la disponibilidad fosfórica para las plantas, elemento clave en procesos fisiológicos como el desarrollo del sistema radicular y la síntesis de compuestos energéticos (ATP y ADP). Concentraciones deficientes pueden restringir la eficiencia en el crecimiento vegetal, mientras que niveles adecuados o elevados reflejan una mayor capacidad productiva del suelo.

2.4.5. Potasio

Macronutriente equilibrante y determinante en el crecimiento de plantas, se presenta en los diferentes procesos previos y posteriores a la absorción como cloruro de potasio, sulfato de potasio, sulfato de amonio y en posiciones nitrogenadas, Es un elemento amigable en el cultivo de *malum terrae* (manzana de la tierra) puesto que aportara a la maduración y calidad del fruto, además de ayudarle a resistir estrés ambiental y enfermedades por plagas (Herrera et al., 2021).

Tabla 6. Niveles de contenido de potasio

Nivel	Potasio (ppm)
Bajo	Menor de 100
Medio	100 – 240
Alto	Mayor de 240

Fuente: Porta et al. (2008).

La Tabla 6 muestra una clasificación del contenido de potasio disponible en el suelo, expresado en partes por millón (ppm), subdividido en cuatro categorías: bajo (menor de 100), medio (100 – 240) y alto (mayor de 240). Esta clasificación facilita la estimación de la disponibilidad de potasio, un macronutriente esencial que participa en procesos fisiológicos como la síntesis proteica, la regulación de la apertura estomática y la resistencia al estrés abiótico, lo que tiene un impacto directo en el rendimiento y la calidad de los cultivos.

2.5. Cultivo de Papa (*S. tuberosum*)

Es una planta productora de tubérculos originaria del altiplano andino desde hace más de 8.000 años, es sacada de su lugar de origen hacia Europa por los colonos como una curiosidad de la botánica para luego ser reproducida en todo el mundo y posicionada como uno de los principales alimentos en el planeta. Es de siembra directa para una reproducción mensual, con un área de extensión cómoda de 30x30 cm su temperatura radical de reproducción es de 7°C y 37°C, pero la de óptima reproducción y crecimiento es de 20°-25°C. solicita constancia en el riego, abonado y fumigación, además de contar con un pH de 7 se puede adaptar a cualquier terreno para ser producida. Es sensible a la aparición del escarabajo de plata, polilla de la patata, gusanos: de alambres, grises o pulgones, mildiu, alternaria y moho gris; es importante aporcar y acolchar su tierra para desarrollar mejor la nascencia y evitar malas hiervas (Serrano, 2023). A nivel global, la papa representa un cultivo de gran relevancia económica y social, siendo el cuarto alimento más consumido después del maíz, el trigo y el arroz (FAOSTAT, 2019). En el contexto peruano, ocupa el tercer lugar en superficie cultivada con 319 712 hectáreas y es el segundo cultivo con mayor volumen de producción, alcanzando las 4 776 294 toneladas. Entre las principales regiones productoras destacan Puno (742 924 t), Huánuco (668 370 t), La Libertad (466 632 t), Apurímac (411 958 t), Cusco (388 467 t) y Junín (365 684 t). Además, este cultivo constituye el sustento de aproximadamente 710 mil familias, generando alrededor de 33, 4 millones de jornales y aportando cerca del 4% al Producto Bruto Interno (PBI) agrícola del país (MINAGRI, 2017).

Huasahuasi es uno de los principales distritos productores de papa en el Perú. En el año 2 007, se cultivaron 3 175 hectáreas que generaron una producción total de 55 109 toneladas. En esta zona se conservan más de 400 variedades de papa; sin embargo, el cultivo enfrenta la presencia de diversas plagas y enfermedades que afectan su rendimiento, con consecuencias sociales, económicas y ambientales (Porras y Carlos, 2020). A nivel nacional, alrededor de 700 000 agricultores cultivan este tubérculo en aproximadamente 330 000 hectáreas distribuidas en 19 de los 24 departamentos del país (actualmente mal denominados como "regiones"), lo que posiciona al Perú como el principal productor de *S. tuberosum* en América Latina, con una producción de 5,3 millones de toneladas registrada en 2 019 (MINAGRI, 2019).

El Instituto de Investigaciones Agropecuarias [INIA] (2015) explica que el cultivo de papa atraviesa fases fenológicas claramente diferenciadas. La primera corresponde a la brotación, la cual ocurre entre los 15 y 30 días posteriores a la siembra, cuando los tubérculos semilla generan brotes visibles.

Luego se presenta la etapa de crecimiento vegetativo, que alcanza su máximo alrededor

de los 75 días, momento en el cual la planta desarrolla gran parte de su follaje y capacidad fotosintética. A partir de allí, inicia la fase de engrosamiento de los tubérculos, que se extiende hasta la maduración, la cual ocurre entre los 90 y 140 días según la variedad y las condiciones ambientales. Aunque estos datos se refieren al Norte Chico de Chile, son comparables a la Sierra peruana, donde el ciclo de producción suele durar de 4 a 5 meses, adaptándose a la estacionalidad de lluvias y a la altitud propia de la región.

Según Blog Agricultura (s.f.), el cultivo de papa pasa por cinco fases: emergencia, desarrollo vegetativo, inicio de tuberización, crecimiento de tubérculos y maduración. Cada una de estas etapas demanda condiciones específicas de humedad, temperatura y fertilidad del suelo. En la Sierra peruana, estas fases suelen extenderse por un ciclo de 120 a 150 días hasta alcanzar la producción. La elección de los meses de siembra es clave: la campaña grande (septiembre a diciembre) permite que el desarrollo vegetativo coincida con la temporada de lluvias, lo que asegura la disponibilidad hídrica para la tuberización y el llenado de los tubérculos. La campaña chica (enero a marzo) también se emplea, aunque presenta mayor riesgo por la reducción de lluvias al final del ciclo. En ambos casos, la duración del cultivo confirma que la papa blanca alcanza su cosecha en un lapso de 4 a 5 meses después de la siembra.

Tomathouse (s.f.) clasifica las variedades de papa en función de su tiempo de maduración: las tempranas llegan a cosecha en aproximadamente 60 días, las de media estación requieren entre 85 y 95 días, las semi-tardías maduran en 100 a 110 días, y las tardías superan los 110 días para alcanzar la madurez técnica. Esta clasificación permite entender que el ciclo completo del cultivo puede oscilar entre 70 y 140 días, dependiendo de la variedad cultivada. En la Sierra, sin embargo, la altitud, la temperatura más baja y la estacionalidad de las lluvias suelen extender la duración del ciclo, de modo que incluso variedades catalogadas como medianas pueden necesitar hasta 4 o 5 meses para completar su maduración y estar listas para la cosecha. Esto demuestra cómo las fases de cultivo no solo dependen de la genética de la semilla, sino también de las condiciones agroclimáticas del entorno.

De acuerdo con Smith (s.f.), el tiempo de germinación de la papa puede variar entre 2 y semanas, lo que representa la primera fase de establecimiento del cultivo. Tras esta emergencia, la planta ingresa al crecimiento vegetativo, donde desarrolla hojas y tallos que le permitirán captar energía para la posterior tuberización. Según la fuente, el ciclo completo hasta la madurez puede durar entre 70 y 120 días, lo que coincide con los periodos productivos observados en la Sierra. Sin embargo, en las zonas altoandinas la germinación puede retrasarse por las bajas temperaturas nocturnas, y las fases de tuberización y maduración se extienden

hasta alcanzar un promedio de 4 a 5 meses. Esto significa que, aunque los tiempos teóricos son más cortos, las condiciones climáticas propias de la Sierra hacen que la papa tenga un ciclo más prolongado.

Por último, Cabrera (2024) enfatiza la importancia de elegir correctamente los meses de siembra para asegurar que las fases del cultivo se desarrollen en condiciones óptimas. En la Sierra peruana, la campaña grande (septiembre a diciembre) es considerada la más favorable, ya que el inicio de las lluvias coincide con la emergencia y el crecimiento vegetativo de la planta, facilitando el llenado de tubérculos en los meses siguientes. La campaña chica (enero a marzo) también se emplea, aunque puede limitar la productividad al reducirse la disponibilidad de agua en la etapa de maduración. De este modo, el cultivo logra completar sus fases en un promedio de 4 a 5 meses, con una producción que depende tanto de la variedad como de la planificación del calendario agrícola.

2.6. Estado del arte

Se trata de un método de investigación documental el cual permite que los conocimientos se almacenen mediante la escritura, para abordar esta metodología es importante utilizar tres procedimientos que son: contextualización, clasificación y categorización; además de entender todo lo recopilado como un sinónimo solo así podrá correr libremente la información y por ende la comprensión ya que el estudio contara con más ópticas de análisis. Durante el estado de arte se pueden identificar de mejor manera factores variantes y plantear paradigmas por medio no solo del intelecto sino también desde la premonición de resultados (Escobar y Bilbao, 2020).

2.6.1. Antecedentes Internacionales

Ramírez (2024), en su tesis titulada: “Metodología Geoespacial para Procesar la Composición Química de un Suelo Destinado a la Producción de Zanahoria (*Daucus carota*), Mediante Diferentes Herramientas Software” para optar el grado académico de Ingeniero Agrónomo, en la Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales. Tiene como objetivo proponer una metodología de integración gráfica geoespacial de la composición química de una parcela experimental ubicada en la sabana de Bogotá, destinada a la producción de zanahoria (*Daucus carota*). Esta investigación desarrolló una metodología basada en la geoestadística para analizar y representar la variabilidad espacial en áreas extensas, con el fin de respaldar decisiones en el manejo agrícola. El objetivo Proponer una metodología de integración gráfica geoespacial de las propiedades químicas de una parcela experimental ubicada en la sabana de Bogotá, destinada a la producción de zanahoria (*Daucus carota*), a partir del uso de imágenes de dron y diferentes herramientas software de procesamiento. Fue de tipo aplicada, con nivel descriptivo, enfoque cuantitativo, diseño no

experimental. La población la Sabana Bogotá, la muestra puntos de malla. La técnica GRVI y GLI, los instrumentos Dron RGB, QGIS. Los resultados mostraron una baja variabilidad espacial en las propiedades químicas del suelo, aunque se identificó una correlación entre N, P y K mediante correlogramas, semivariogramas y mapas de contorno. Los índices de vegetación revelaron niveles de humedad del suelo y cobertura vegetal, indicando posibles signos de estrés hídrico en las plantas, reflejados en los mapas integrados.

Galindo et al. (2024), en su artículo científico titulado: “Análisis de Variación Espacial de la Fertilidad del Suelo para la Delimitación de Zonas de Manejo Homogéneo en Agricultura de Precisión” publicada en la revista científica Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria. Tuvo como objetivo evaluar en detalle las propiedades de fertilidad química de un suelo agrícola para determinar zonas de manejo homogéneo en el cultivo de hortalizas. La metodología de tipo aplicada, nivel descriptivo explicativo, enfoque cuantitativo, diseño no experimental. La población suelo de cultivo y 480 muestras del mismo. La técnica interpolación, PCA, clustering y QUEFTS, instrumentos software geoestadístico implementos de laboratorio. En conclusión, el estudio demostró la eficacia de combinar PCA y Kriging en fin de definir áreas de manejo, destacando que la zonificación basada en la MOS es la más adecuada para optimizar la fertilización con fósforo y potasio en la siembra de papa. Se recomienda que investigaciones futuras consideren también propiedades físicas del suelo y factores climáticos, a fin de perfeccionar las estrategias de manejo por zonas.

Gaibor et al. (2024), en su presente investigación titulada: “Eficiencia de uso del nitrógeno por el cultivo de papa (*Solanum tuberosum* L.) en suelos volcánicos de Chimborazo, Ecuador” artículo científico presentado en la revista científica Siembra de la Universidad Central del Ecuador. Tuvo por objetivo determinar la eficiencia de uso del nitrógeno (EUN) y las dosis de nitrógeno (N) necesarias para llegar a la meta de rendimiento de las variedades de papa Superchola e INIAP-Natividad. La metodología fue aplicada, nivel explicativo, enfoque cuantitativo, diseño experimental. La población cultivos de papa, la muestra dos muestras de una parcela. La técnica, Calculo de parámetros, y los instrumentos de laboratorio. Con base en los resultados que se obtuvieron, se puede concluir que el cálculo de la eficiencia agronómica de nitrógeno permite ajustar efectivamente las recomendaciones de fertilización nitrogenada para el cultivo de papa bajo las condiciones edafoclimáticas.

Zhinin (2024), en su tesis titulada: “Determinación del Índice de Calidad de Suelos a Dos Altitudes en Dos Sistemas de Labranza para el Cultivo de Papa (*Solanum tuberosum* L.) en Tunshi para optar el grado académico de Ingeniera Agrónoma en la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo”. Tuvo como objetivo determinar el índice de calidad

de suelo a dos altitudes en dos sistemas de labranza para el cultivo de papa (*Solanum tuberosum* L.) en Tunshi. La metodología de tipo aplicada, nivel descriptivo, enfoque cuantitativo, diseño experimental. La población un suelo agrícola, las 9 submuestras del suelo. La técnica muestreo compuesto de zigzag pruebas ANOVA, DMS y Tukey. Los instrumentos de laboratorio. Se concluyo que el uso de la labranza reducida o mínima en la preparación del suelo para el cultivo de papa en la estación experimental Tunshi contribuye a preservar las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo. En cambio, la labranza convencional afecta negativamente dichas propiedades, provocando compactación, baja retención de humedad, pérdida de la capa superficial, mayor velocidad de infiltración y reducción de la población de lombrices.

2.6.2. Antecedente nacional

García (2021), en su tesis titulada: “Morfología y concentración de hierro y zinc en tubérculos de clones avanzados de papas nativas (*Solanum* spp.) en Cusco” para optar el pregrado en la Universidad Nacional Agraria, La Molina. Tuvo como objetivo identificar materiales con alto contenido de micronutrientes y potencial agroindustrial para contribuir a la seguridad alimentaria en zonas altoandinas. Donde el presente estudio aplicó una metodología con un enfoque cuantitativo, de un nivel descriptivo y un diseño no experimental de corte transversal. Con una población compuesta por los clones avanzados y la muestra fue de 40 clones seleccionados por su avance en programas de mejoramiento, utilizando como técnica la observación estructurada para la morfología y el análisis químico por espectrofotometría para la concentración de micronutrientes y los instrumentos incluyeron fichas descriptivas y protocolos de laboratorio estandarizados. Los resultados mostraron una gran diversidad morfológica entre los clones, con predominio de formas oblongas, piel oscura y pulpa pigmentada. El clon 13 presentó la mayor concentración de hierro (183 mg/kg) y el clon 26 la de zinc (44 mg/kg), ambos superando ampliamente los valores estándar. Además, los clones 23 y 39 destacaron por su rendimiento agronómico (hasta 22,9 t/ha). En conclusión, algunos clones evaluados presentan características morfológicas deseables y un alto contenido de micronutrientes, lo cual los catequiza en candidatos promisorios para programas de biofortificación y mejoramiento genético orientados a combatir la desnutrición en poblaciones altoandinas.

Escudero y Morera (2022), en su tesis titulado: “Optimización del plan de Kriging ordinario mediante la validación cruzada en la estimación de recursos”, para optar el pregrado en la Universidad Privada del Norte. Tuvo como objetivo fue optimizar el plan de Krigin Ordinario mediante la validación cruzada en la estimación de recursos geológicos, 2020

Con una metodología de tipo aplicada nivel explicativo, enfoque cuantitativo y diseño no experimental. La población un yacimiento cuprífero, la muestra datos en 15 m. la técnica EDA vario grama y análisis de elementos, el instrumento un software de sondaje geológico. Concluyeron que son los planes que mejor se ajustan a los datos al comparar con los criterios de los demás planes ya sea en elipsoidal y Box.

Flores y Taípe (2023), en su tesis titulada: “Efectos de los momentos de aplicación de abono verde en la producción orgánica de *Solanum tuberosum*, variedad “Canchan” en Acobamba – Huancavelica” para optar el título profesional de Ingeniero Agrónomo en la Universidad Nacional de Huancavelica. Que tuvo como objetivo Determinar el efecto de los diferentes momentos de aplicación de abono verde en la producción orgánica de papa (*Solanum tuberosum*) variedad “Canchan” y en el NPK del suelo, en condiciones de campo de la provincia de Acobamba – Huancavelica. La metodología de tipo aplicada, nivel explicativo, enfoque cuantitativo y diseño experimental. La población y muestra 480 plantas. La técnica medición de parámetros, el instrumento un software de estadística y herramientas de medición de parámetros. Se concluye que el uso de abono verde de alfalfa impacta positivamente en las propiedades del suelo analizadas, aumentando el contenido de materia orgánica con el tratamiento AVMSA. Asimismo, se determinó que los diferentes momentos de aplicación del abono verde no afectan el desarrollo fenológico de la papa (*Solanum tuberosum*) variedad “Canchan” en condiciones de campo en la provincia de Acobamba – Huancavelica.

2.6.3 Antecedente local

Inocencio y Florida (2022), en su artículo científico titulada: “*Comportamiento Espacial de Indicadores Físicoquímicos y Calidad del Suelo en Plantación de Theobroma cacao en Padre Abad, Ucayali, Perú*” publicado en la revista científica Actualidad y Dibulgación Científica (U.D.C.A) y Div. Cient. Tuvo como objetivo, determinar el comportamiento espacial de indicadores físicoquímicos y calidad del suelo en Padre Abad, región Ucayali, Perú. Se empleó una metodología aplicada, nivel explicativo, enfoque cuantitativo, y diseño no experimental. La población Fundo Cárdenas y 28 muestras de suelo. La técnica medición de parámetros el instrumento el DBCA. Se concluyó que los valores medios encontrados de los diferentes indicadores de calidad del suelo son típicos en el trópico húmedo peruano y no son favorables para el desarrollo del cultivo de cacao y los rangos relativamente bajos indican alta variabilidad espacial, que se contrasta con el coeficiente de variabilidad media. Las variaciones, se atribuyen a diversos factores de manejo y de formación del suelo, que requieren ser estudiadas a profundidad.

Vásquez (2022), en su tesis titulada: “Distribución Especial de las Propiedades Físico Químicas del Suelo, en el Sector 3 de octubre – Distrito Hermilio Valdizán, Provincia Leoncio Prado” para optar el grado profesional de Ingeniero en Conservación de Suelos y Agua en la Universidad Nacional Agraria de la Selva. Tuvo como objetivo, Evaluar la distribución espacial por unidades fisiográfica de las propiedades fisicoquímicas del suelo, en el sector 3 de octubre – distrito Hermilio Valdizán, provincia de Leoncio Prado. La metodología de tipo aplicada, diseño no experimental de corte transversal, nivel descriptivo, enfoque cuantitativo. La población suelo de agricultura, la muestra se recolecto en puntos de interés. La técnica análisis fisiográfico y el instrumento un laboratorio. Se concluye que los suelos de la parcela evaluada presentan principalmente clases texturales franco arcilloso y franco.

Fabian (2022), en su tesis titulada: “Evaluación de la concentración de cadmio y plomo en el suelo y tubérculos, de un cultivo convencional y orgánico de papa (*Solanum tuberosum*), en el distrito de Panao, Provincia de Pachitea – Huánuco 2022” para optar el título profesional de Ingeniero Ambiental en la Universidad de Huánuco. Tuvo como objetivo, Evaluar la concentración de Cadmio y Plomo en el suelo y tubérculos, de un cultivo convencional y orgánico de papa (*Solanum tuberosum*), en el distrito de Panao, provincia de Pachitea – Huánuco 2022. Se empleó una metodología de enfoque mixto, nivel descriptivo y un diseño transversal-descriptivo. La población parcela de cultivo ½ Ha, con 3 muestras de suelo por parcela. Para la recolección de información fichajes y su análisis. Se concluye que el pico de plomo en los tubérculos (papas) emana del suelo, lo que subraya la necesidad de establecer normativas que regulen los grados de estos metales.

Aróstegui (2022), en su tesis titulada: “Distribución espacial de las propiedades del suelo en un área de producción de Palma Aceitera (*Elaeis guineensis* Jacq) de Nueva Libertad, provincia de Tocache, departamento de San Martín”, para optar el pregrado en la Universidad Nacional Agraria de la Selva. Tuvo como objetivo Estimar la distribución espacial del pH, M.O., N, P y K en el área de producción de *Elaeis guineensis* Jacq (palma aceitera) del centro poblado de Nueva Libertad, distrito de Tocache, provincia de Tocache - San Martín. La metodología fue aplicada, el nivel descriptivo, el enfoque cuantitativo, diseño no experimental de corte transversal. La población el suelo de Nueva Libertad optando a 30 muestras. La técnica el método Kriging, el instrumento el software SIG. Concluyendo que los valores demostraron que el modelo de KO es el que mejor modelo de ajuste de interpolación.

Duran (2022), en su tesis titulada: “Efecto de abonos orgánicos en el rendimiento del cultivo de papa (*Solanum tuberosum* L.) variedad Canchan en Rumichaca – Panao” para optar el pregrado en la Universidad Hermilio Valdizán. Tuvo como objetivo Evaluar el efecto

de los abonos orgánicos en el rendimiento del cultivo de papa (*Solanum tuberosum*) variedad Canchan en Rumichaca – Panao. De metodología aplicada, nivel explicativo, el diseño experimental, población de 640 plantas y la muestra fue 256 variedad de Canchán, las técnicas de materia bibliográfica y hemerográficas, y los instrumentos de fichas y libretas de campo. Concluyendo que el uso de abonos orgánicos, especialmente el guano de las Islas, mejora significativamente el rendimiento del cultivo de papa en Rumichaca, Panao, y puede ser una alternativa sostenible frente al uso de fertilizantes químicos.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Lugar de ejecución

El lugar donde se desarrolló la investigación está en la jurisdicción del centro poblado Illa Chico (Figura 3), políticamente, el centro poblado pertenece al distrito de Panao y provincia de Pachitea en la región Huánuco. En el fundo “Beker” cultiva la variedad mejorada (papa blanca) de propiedad del Sr. Edinson Beker Trinidad, ubicada en las coordenadas UTM Datum WGS-84 Zona 18S, Este 398 717 y Norte 8 909 342 con una altitud de 3 178 msnm.

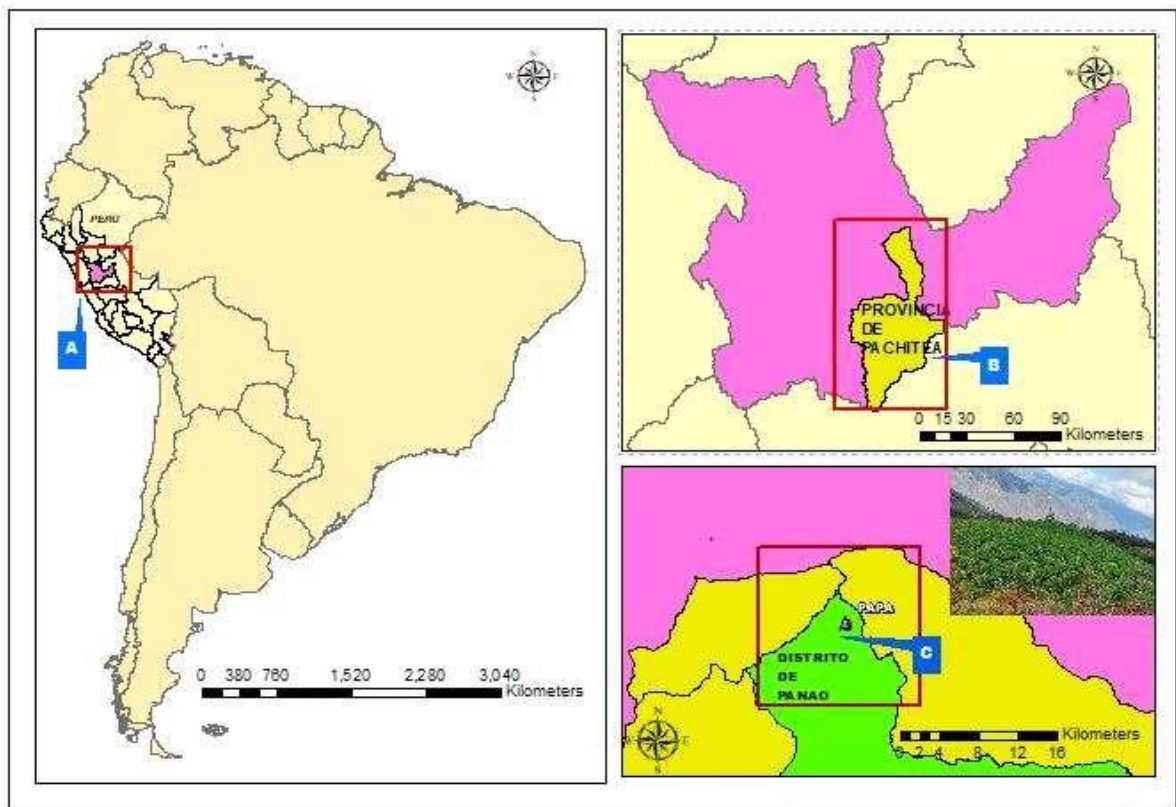


Figura 3. Localización geográfica del área de estudio

3.1.1 Características climatológicas

Las características climatológicas que presenta la jurisdicción, según el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú- SENAMHI (2022), el distrito de Panao presenta: temperatura máxima de 18, 2°C, mínima de 7,5°C y 2 097 mm de precipitaciones anuales, con régimen bimodal, una seca (junio a setiembre) y otra lluviosa (octubre a mayo). De acuerdo con la clasificación de zonas de vida y formaciones vegetales de Holdridge (2 000), el área de estudio pertenece a Estepa Montano Tropical y Bosque Húmedo Montano Bajo Tropical, se localiza a una altitud de 3 221 msnm, y el rango de precipitación es de 500 a 2 500 mm de lluvia total.

Demostrando en la zona de intervención se identificaron suelos con características edafológicas predominantemente francas y adecuadas para el cultivo de papa, evidenciando una textura, estructura y composición que favorecen el desarrollo de este tubérculo. Esta condición del suelo no solo permitió un buen drenaje y retención de humedad, sino que también proporciona un entorno nutritivo ideal para el crecimiento radicular, lo cual fue crucial para optimizar los rendimientos agrícolas y garantizar la sostenibilidad del cultivo en la región.

3.2 Materiales y equipos

3.2.1 Materiales de campo

Bolsas plásticas, etiquetas, Marcadores, botas de protección, Receptor GPS, cinta métrica y Computadora portátil,

3.2.2 Materiales de laboratorio

Se realizó el análisis de las propiedades físicas y químicas del suelo requiriendo los siguientes materiales: vasos precipitados, micropipetas, matraz de destilación, solución buffer 7,0 y 4,0, unidad de digestión mic- Kejeldahl, Probeta de diferentes medidas volumétricas, tamices, reactivos diversos, embudos de vidrio y matraz de destilación.

3.2.3 Equipos de campo

Cámara fotográfica, Receptor GPS, balanza gramera y analítica.

3.2.4 Equipos de laboratorio

Estufa, mufla, pH metro, espectrofotómetro de absorción atómica (EAA), bureta digital y espectro fotómetro UV - Visible.

3.3 Criterio y análisis de investigación

3.3.1 Tipo y nivel de investigación

La investigación fue de tipo aplicada, nivel descriptivo ya que tuvo como finalidad generar el mejor modelo geoespacial sobre los indicadores de fertilidad del suelo bajo un manejo convencional en cultivos de *S. tuberosum*. Asimismo, se desarrolló con un diseño descriptivo, al enfocarse en la determinación de indicadores físicos y químicos relacionados con la variabilidad espacial del cultivo de papa del fundo "Beker", evaluados en un momento específico.

3.3.2 Diseño de la investigación

La investigación se enmarca dentro del enfoque cuantitativo, con un diseño descriptivo o no experimental, orientado a analizar y contrastar variables sin manipularlas directamente. Se aplicó un ajuste de diseño estadístico riguroso, empleando los métodos

de interpolación espacial Kriging Ordinario (KO) y Distancia Inversa Ponderada (IDW) para evaluar las condiciones del cultivo de papa en el fundo “Beker”. Esta comparación metodológica permitió identificar con mayor precisión las variaciones espaciales del terreno y su influencia en el comportamiento agronómico del cultivo, aportando información clave para la toma de decisiones en el manejo agrícola.

3.4 Metodología

3.4.1 Determinación de los indicadores de fertilidad de suelo

La determinación de los indicadores de fertilidad (Textura, PH, M.O, N, P y K) del suelo se realizó siguiendo los siguientes pasos:

a) Delimitación del área, se comprendió en delimitar los puntos de los vértices del área del Fundo Beker que tiene un total de 3,81ha de cultivo de papa.

b) Determinación de la georreferenciación de puntos evaluados, se determinó la ubicación de cada punto de muestreo en coordenadas UTM, Datum WGS 84, zona 18L (Tabla 7) a través de un sistema de posicionamiento global (GPS).

Tabla 7. Ubicación de puntos muestreados

Punto	X	Y	Z	Punto	X	Y	Z	Punto	X	Y	Z
1	398764	8909186	3183	14	398789	8909286	3179	27	398889	8909336	3178
2	398789	8909186	3182	15	398814	8909286	3179	28	398739	8909386	3178
3	398814	8909186	3182	16	398839	8909286	3178	29	398764	8909386	3178
4	398839	8909186	3182	17	398864	8909286	3178	30	398789	8909386	3178
5	398739	8909236	3182	18	398889	8909286	3178	31	398814	8909386	3178
6	398764	8909236	3182	19	398689	8909336	3178	32	398839	8909386	3178
7	398789	8909236	3182	20	398714	8909336	3178	33	398864	8909386	3178
8	398814	8909236	3182	21	398739	8909336	3178	34	398889	8909386	3178
9	398839	8909236	3182	22	398764	8909336	3287	35	398914	8909386	3178
10	398864	8909236	3182	23	398789	8909336	3178	36	398764	8909436	3177
11	398889	8909236	3180	24	398814	8909336	3178	37	398789	8909436	3177
12	398739	8909286	3180	25	398839	8909336	3178	38	398814	8909436	3177
13	398764	8909286	3180	26	398864	8909336	3178	39	--	--	--

c) Muestreo de suelos, esto se realizó en el mes de abril donde se extrajo 38 muestras de suelo, tomando la distancia de muestra de 25 m teniendo en cuenta los resultados de los valores de rango y dependencia espacial de los diferentes indicadores fisicoquímicos en los estudios realizados por Déleg (2018) e Inocencio (2022). Además, se realizó a través del método sistemático (Figura 4), el cual consistió en trazar seis transectos paralelos a lo largo del predio.

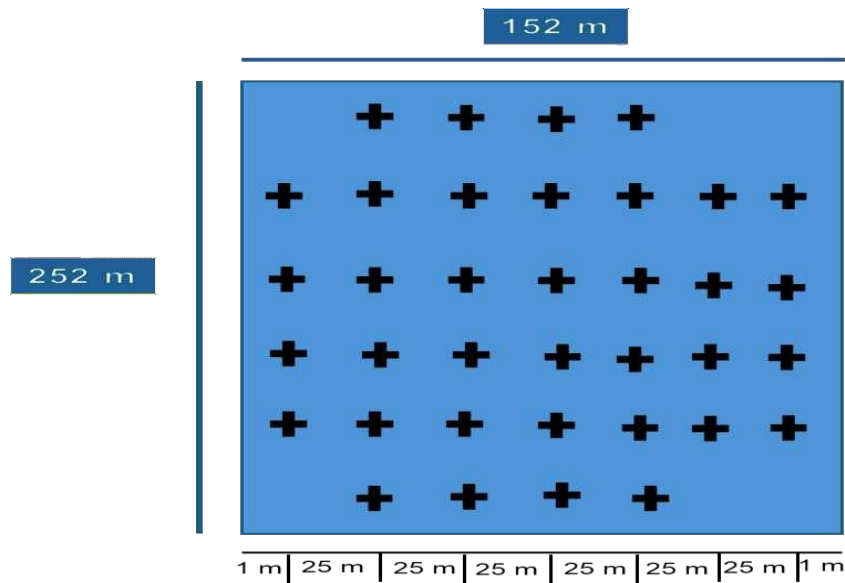


Figura 4. Esquema de muestreo sistemático del fondo “Beker”

La extracción de la muestra se llevó a cabo cuidadosamente utilizando una pala recta, con la cual se efectuó un corte en forma de “V” a una profundidad de 20 cm, garantizando una sección representativa del perfil del suelo. Donde se retiró una tajada de aproximadamente de 3 cm de grosor de una de las paredes de la cavidad, procediéndose luego a limpiar minuciosamente los laterales hasta obtener un bloque uniforme de 5 cm de ancho (Racines et al., 2021).

d) Análisis de suelo, una vez extraído las muestras las muestras se llevó a analizar en el laboratorio de suelos, agua y ecotoxicología de la Universidad Nacional Agraria de la Selva, además en la Tabla 8 muestra las propiedades fisicoquímicas que se evaluaron y los protocolos para su determinación están descritos en Bazán (2017).

Tabla 8. Indicadores de fertilidad de suelo

Indicadores físicos y químicos	Método de su determinación
Textura del suelo	Método del hidrómetro de Bouyoucos
Ph	Método electrométrico
Materia Orgánica	Método de Walkley y Black
Nitrógeno	Método de Kjeldahl
Fósforo	Método de Olsen modificado
Potasio	Método del acetato de amonio

3.4.2 Análisis exploratorio de los datos de la fertilidad del suelo

En todo análisis geoestadístico riguroso, el punto de partida fundamental es la evaluación detallada de la forma, localización y variabilidad de los datos, asegurando la ausencia de valores atípicos que puedan distorsionar los resultados. Para ello, se empleó el paquete Geostatistical Analyst de ArcGIS 10,5, el cual facilitó la visualización de la distribución espacial de una variable específica mediante herramientas gráficas exploratorias, como el histograma de frecuencias. Este gráfico permitió observar si los datos se ajustaban adecuadamente a una curva de distribución normal, es decir, con forma de campana.

Se identificaron los principales estadígrafos descriptivos, como el valor máximo, mínimo, media, mediana, desviación estándar, asimetría, curtosis y coeficiente de variación. En cuanto a las medidas de centralidad (media y mediana), estas tienden a aproximarse a un valor de 1. Por otro lado, en las medidas de forma, se espera que la curtosis se mantenga cerca o igual a 3, mientras que la asimetría debe ubicarse en un rango entre 0 y 0,5 para indicar una distribución equilibrada.

Para validar estadísticamente esta normalidad, se aplicó la prueba de Shapiro-Wilk, especialmente recomendada para muestras menores a 50 elementos, con un nivel de significancia del 5%. En los casos donde los datos no cumplieron con la normalidad requerida, se aplicaron transformaciones sugeridas por la literatura especializada, orientadas a corregir sesgos y lograr un ajuste más preciso a la distribución normal. Finalmente, se utilizó el gráfico Normal Q-Q Plot, el cual comparó visualmente la distribución empírica de los datos con un modelo teórico de distribución normal, reforzando la validez del análisis estadístico aplicado.

Asimismo, con el objetivo de evaluar la estacionariedad espacial de los datos recolectados, se empleó el mapa de Voronoi dentro del entorno de ArcGIS. Esta herramienta permitió generar polígonos en torno a cada punto de muestreo, construidos mediante las mediatrices de los segmentos que conectan una muestra con sus vecinas más próximas. Esta representación espacial facilitó una visualización clara de la distribución y cobertura de las muestras, permitiendo analizar con mayor precisión la homogeneidad o heterogeneidad del muestreo, así como detectar posibles áreas con concentración o dispersión anómala de datos.

Complementariamente, se aplicó el análisis de tendencia disponible en ArcGIS, el cual resultó fundamental para identificar direccionalidades predominantes en el comportamiento de los datos espaciales. Esta herramienta permite ajustar modelos polinomiales de diferentes órdenes para describir las posibles tendencias existentes, ya sea en el eje este- oeste o norte-sur, ayudando a determinar si los datos presentan una inclinación sistemática que pueda interferir con la suposición de estacionariedad. Gracias a esta

técnica, fue posible reconocer patrones espaciales subyacentes y validar la pertinencia de aplicar modelos geoestadísticos posteriores con mayor precisión y confiabilidad.

3.4.3 La distribución espacial en los indicadores de fertilidad de suelo mediante la comparación de los métodos de interpolación Kriging Ordinario (KO) y Distancia Inversa Ponderada (IDW)

Se hizo un muestreo aleatorio de nuestro conjunto de datos mediante la herramienta Sub Features de la extensión de Geostatistical Analyst con una división del 90% para nuestra muestra de entrenamiento es decir para el modelo y una muestra de prueba de 10% para la validación.

Después de haber explorado los datos según los criterios anteriores, se realizó la determinación de la variabilidad espacial con los dos métodos de interpolación con la muestra de entrenamiento para ello se hizo los siguientes pasos:

3.4.3.1. Modelo de interpolación con Inversa Distancia Ponderada (IDW)

Se utilizó la herramienta Geostatistical Wizard para luego seleccionar el método determinístico el modelo de Distancia Inversa Ponderada, aquí no se emplea semivariogramas, en cambio se asigna pesos y se seleccionó tomando el menor error promedio mínimo.

3.4.3.2 Modelo de interpolación con Kriging Ordinario

En este método a diferencia del método anterior se utiliza la misma herramienta y se selecciona el método geoestadístico, donde se utiliza el Kriging Ordinario, además se evaluaron los semivariogramas de cada indicador de fertilidad (Textura, Ph, M.O, N, P y K) y se eligió cuál de los semivariograma teórico (gaussiano, circular, exponencial y esférico) se ajustan más los datos, es más para obtener el grado de dependencia espacial de cada indicador se obtuvo los parámetros del semivariograma como el efecto pipeta (C_0), alcance (A) y el umbral o sill ($C_0 + C$).

Este procedimiento permite modelar la estructura de variabilidad inherente a los suelos con base en su comportamiento espacial, priorizando aquellos que presenten el menor valor, del error medio, la media estandarizada y raíz del error cuadrático medio estandarizado, garantizando así la mayor representatividad estadística del comportamiento espacial.

3.4.4 Determinación de los valores de validación geoestadística en los indicadores de fertilidad de suelo y comparar la predicción de los dos métodos de interpolación

Se determino la calidad predictiva del modelo ajustado con la misma herramienta de ARGIS, validación/ predicción, lo cual consistió en estimar los valores de un 10% de datos del test y luego comparar ese valor estimado con el valor medido, según Oliver

y Webster (2014) afirman que para poder escoger el mejor método de interpolación se debe tomar en cuenta los siguientes parámetros como es el error medio (ME) que sea próximo o cercano a 0 y la raíz del error cuadrático medio (RMSE) debe ser un valor muy pequeño a lo posible, como se observa en la siguiente tabla:

Tabla 9. Elección de modelo

Criterio	Circunstancia para ser valido
Error medio (EM)	Cercano a 0
Raíz del error cuadrático medio (RMSE)	Cercano a 1

Para la determinación del error medio (ME) y la raíz del error cuadrático medio (RMSE) se hicieron con la siguientes formulas:

$$ME = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \{Z(x_i) - \hat{Z}(x_i)\} \quad (4)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \{Z(x_i) - \hat{Z}(x_i)\}^2} \quad (5)$$

Donde:

N = tamaño de la muestra

$Z(x_i)$ = Es el valor medido en la localización i,

$\hat{Z}(x_i)$ = Es el valor predicho en la posición i.

Comparación de los métodos de interpolación

Se comparo los métodos de interpolación usando indicadores estadísticos como el error cuadrático medio (MSE), lo cual Johnston et al. (2001) menciona si este indicador presenta valores bajos indican predicaciones más precisas de punto a punto y la medida de eficiencia de predicción (E), lo cual establece la efectividad de un modelo de predicción. El primer indicador estadístico se calculó con la siguiente formula:

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (|Z(x_i) - \hat{Z}(x_i)|)^2 \quad (6)$$

La medida de eficiencia de predicción se determinó con la siguiente formula, donde n es el tamaño de la muestra, $Z(x_i)$ representa el valor observado, $\hat{Z}(x_i)$ es el valor predicho y Z medida de la muestra. Es más, si tenemos una eficiencia de predicción igual al 100% indica una perfecta predicción, asimismo los valores positivos indican que la predicción es confiable que el uso de la media muestra; pero si esta presenta valores negativos son menos confiables (Déleg, 2018).

$$E = \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Z(x_i) - \hat{Z}(x_i))^2}{\sum_{i=1}^n (Z(x_i) - \bar{Z})^2} \right) * 100 \quad (7)$$

La Tabla 10 muestra la última métrica esencial, ya que mide directamente la capacidad del método para replicar con precisión los valores reales observados, reflejando su efectividad en contextos aplicados a la ingeniería geoespacial y geotécnica.

Tabla 10. Validación de la interpolación

Campo	Circunstancia
Error cuadrático medio (MSE)	Valor muy pequeño Eficiencia de
predicción (EP)	Valores positivos de 0 al 100%

3.5 Población y muestra

La población y muestra de la presente investigación estuvieron conformadas por un área total de 3,81 hectáreas de terrenos agrícolas del Fundo Beker, específicamente destinadas al cultivo de papa, lo cual permitió un entorno representativo y controlado para la evaluación de las propiedades edafológicas. El tipo de muestreo seleccionado fue el no probabilístico y aleatorio, dado que se empleó un muestreo sistemático por conveniencia, el cual se justifica por su practicidad y eficiencia operativa. Esta estrategia metodológica permitió realizar la recolección de datos de manera ordenada y homogénea a lo largo de toda la extensión de la parcela, facilitando el acceso a zonas específicas y optimizando recursos técnicos y humanos, sin comprometer la calidad de los resultados esperados en el análisis de suelos.

3.6 Variables en estudio

3.6.1 Variable independiente

- Variabilidad espacial de la fertilidad del suelo

3.6.2 Variable dependiente

- Indicadores de fertilidad del suelo (Indicadores físicos y químicos)

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Análisis exploratorio de datos de la fertilidad del suelo

Se presentan los resultados descriptivos en la Tabla 11, relacionados con los parámetros de fertilidad del suelo del fundo Beker, con el objetivo de ofrecer una visión clara y detallada del comportamiento de cada variable analizada en el contexto del estudio.

Tabla 11. Estadísticos descriptivos de los indicadores de fertilidad

Indicador	Min	Max	\bar{X}	Me	\bar{X}/Me	SD	Sesgo	K	CV
Arena (%)	25,52	63,52	46,05	46,52	0,99	7,86	-0,19	2,98	17,07
Arcilla (%)	19,36	38,36	28,47	29,36	0,97	5,12	0,02	2,01	17,99
Limo (%)	13,12	41,12	24,96	25,12	0,99	5,80	0,46	3,43	23,22
pH	4,26	5,52	4,94	4,95	1,00	0,33	-0,09	2,09	6,71
MO (%)	0,72	4,23	2,28	2,39	0,95	1,03	0,04	1,75	45,28
N (%)	0,04	0,21	0,11	0,12	0,95	0,05	0,04	1,81	45,28
P (ppm)	1,05	7,22	3,03	2,61	1,16	1,70	0,70	2,63	56,22
K (ppm)	35,09	223,40	109,51	105,70	1,04	48,76	0,67	2,73	44,52

Según la Tabla 11 muestra la clasificación textural de los suelos basada en los porcentajes relativos de arena, limo y arcilla, lo que permite determinar la clase textural específica en cada uno de los 38 puntos de muestreo analizados. Esta clasificación es fundamental para entender el comportamiento físico del suelo, como su capacidad de retención de agua, aireación y facilidad de manejo. En cuanto al pH del suelo, se registró un valor promedio de 4,94, lo que lo ubica en la categoría de suelos extremadamente ácidos según la Tabla 2 de los indicadores de fertilidad químico del suelo. Esta acidez elevada puede limitar la disponibilidad de nutrientes esenciales y afectar negativamente la actividad microbiana, por lo que es necesario implementar prácticas correctivas, como la aplicación de enmiendas calcáreas, para mejorar las condiciones del suelo y favorecer un desarrollo óptimo y sostenible de los cultivos, evidenciándose así una consistencia significativa entre el valor de la media y la mediana, asimismo se obtuvo un rango que varía de 4,26 a 5,52 lo cual se clasifica como un nivel de acidez que va desde extremadamente ácido a fuertemente ácido, según Thompson y

Troeh (2021), un pH dentro de un rango óptimo es de 5,5 a 7, para el desarrollo vegetal por ello es fundamental incorporar enmiendas correctivas que compensen los desequilibrios existentes, permitiendo así estabilizar la acidez del sustrato y favorecer la disponibilidad de nutrientes esenciales para el desarrollo del cultivo, lo cual con los resultados mostrados no es adecuado para el cultivo, por lo cual se debe controlar el tipo de fertilizante que se está adicionando, para evitar así el deterioro en los suelos.

Asimismo, de acuerdo con lo reportado por Fabian (2022) en cultivos de papa del distrito de Panao se detectó la presencia de metales pesados, donde el contenido de plomo superó los valores máximos permisibles establecidos por el CODEX, mientras que el cadmio se mantuvo por debajo de dicho umbral, el estudio concluye que la principal fuente de estos elementos tóxicos es el propio suelo agrícola. El valor de coeficiente de variación es de 6,71% lo cual indica una baja variación (<12%), siendo este indicador el más bajo de todas las propiedades estudiadas, lo cual concuerda con los resultados reportados de otros trabajos sobre variabilidad espacial como (Inocencio y Florida, 2022).

La materia orgánica (MO) tiene un valor medio de 2,39%, según la clasificación propuesta por la (Soil Survey Staff, 1993) indica que el suelo presenta un nivel medio, mientras los valores mínimos y máximos varían de 0,72 a 4,23%. Además, el CV de la MO presentó un 45,28% por lo que es superior a los indicadores de textura y pH este valor se considera una variabilidad media, esto podría deberse al manejo intensivo o uso del suelo lo cual hace que aumente la heterogeneidad espacial de la MO. La distribución espacial de la materia orgánica (MO) en el suelo se ve condicionada por múltiples factores, entre ellos; donde las prácticas de labranza convencional que deterioran las propiedades físicas y biológicas del suelo, generando efectos como compactación, baja capacidad de retención hídrica, pérdida de la capa superficial fértil, aumento en la velocidad de infiltración y disminución de la fauna edáfica, particularmente de lombrices dado como resultado un 1, 88% de MO en cultivo de papa en la comunidad rural Tunshi en la provincia de Chimborazo (Zhinin, 2024). Asimismo, Alvarado et al. (2023) señalan que la aplicación exclusiva de abonos orgánicos no permite alcanzar un rendimiento óptimo en todas las variables evaluadas. No obstante, al integrarse con fertilizantes minerales convencionales, se observa una mejora significativa en el desarrollo y productividad de las plantas.

En el análisis de las propiedades químicas del suelo, el contenido medio de nitrógeno (N) fue de 0,12%, clasificando a los suelos evaluados dentro del nivel medio de fertilidad nitrogenada, lo cual representa una limitación crítica para el desarrollo óptimo de cultivos. Este valor refleja una disponibilidad deficiente de nitrógeno mineralizable, esencial en

los procesos fisiológicos vegetales como la síntesis de aminoácidos y el desarrollo foliar. La distribución estadística del nitrógeno evidenció un comportamiento normal, determinado por la similitud entre la media y la mediana, lo que sugiere una relativa homogeneidad en su concentración a lo largo de los puntos muestreados. El coeficiente de variación (CV) de 45,28% indica una variabilidad espacial media, muy similar a la observada en la materia orgánica (MO), reforzando la interdependencia funcional entre ambos componentes edáficos. Esta relación es fundamental, ya que la MO actúa como principal reservorio de nitrógeno en el suelo, y su descomposición regula el suministro progresivo de nutrientes. Además, se observa que la variabilidad espacial tanto del N como de la MO está fuertemente condicionada por factores edafoclimáticos. Por ejemplo, una mayor precipitación anual promedio favorece la acumulación y mineralización de materia orgánica, lo cual incrementa el contenido de nitrógeno disponible. Por el contrario, temperaturas elevadas aceleran los procesos de descomposición y volatilización, generando pérdidas significativas de estos componentes esenciales, lo cual puede comprometer la sostenibilidad y productividad de los sistemas agrícolas en suelos granulares. En este contexto, el conocimiento detallado de estas dinámicas edáficas permite proponer medidas técnicas orientadas al manejo diferenciado del suelo, como la zonificación de fertilización, aplicación localizada de enmiendas orgánicas, o ajustes en el manejo hídrico para mitigar las deficiencias y potenciar el rendimiento agrícola en condiciones variables (Lliquin et al., 2020). El nitrógeno, presente como gas en la planta, está conformado por dos átomos que pueden incorporarse a diversas formas de materia orgánica, minerales o microorganismos del suelo, permitiendo su disponibilidad como nutriente esencial para las plantas (Herrera et al., 2021). Asimismo, este elemento constituye una variable clave en la estimación de la eficiencia agronómica del nitrógeno y en el rendimiento total del cultivo de tubérculos, permitiendo ajustar de forma más precisa las recomendaciones de fertilización nitrogenada (Gaibor et al., 2024).

El fósforo tiene una media de 2,61 ppm clasificando como suelos de nivel “bajo” según la Porta et al. (2008), presentado un mayor coeficiente de variación de 56, 22% denotando una variabilidad media acercándose a una variabilidad alta lo cual esto se debería a los factores humanos que intervienen en ella, además, según lo señalado por (Rojas, 2006) el fósforo es un macronutriente que cumple un rol esencial en la transferencia de energía dentro de la planta. Su relevancia está asociada al fortalecimiento del sistema radicular, la formación de semillas y flores, y al funcionamiento de células vivas, ya que interviene en la formación de nucleótidos, lecitinas y enzimas. Su disponibilidad en el suelo depende de condiciones ambientales óptimas, como una temperatura adecuada, niveles de humedad regulados y un pH que permite su

estabilidad y absorción eficiente por parte del sistema radicular. Los datos de la media y mediana son diferentes y su diferencia es mayor que uno, el coeficiente de asimetría tiene un valor de 0,70 siendo necesario realizar una transformación de Box-Cox y la curtosis por tener un valor positivo la distribución se llama leptocúrtica lo cual hace que los datos existan una mayor concentración en torno a la media.

De acuerdo con la clasificación propuesta por Porta et al. (2008), el nivel de potasio (K) en los suelos analizados corresponde a una categoría de “bajo contenido”, sustentado en un valor promedio de 105,70 ppm. Esta concentración, aunque funcional en ciertos contextos edáficos, representa una limitación importante para cultivos exigentes en potasio. El análisis estadístico muestra un rango de 35,09 a 223,40 ppm, lo cual refleja una heterogeneidad considerable en la disponibilidad del nutriente, reforzada por un coeficiente de variación (CV) de 44,52%, indicativo de una variabilidad media a alta dentro del área de estudio. En cuanto a la normalidad de los datos, se observó que la diferencia entre la media y la mediana supera la unidad, lo cual, sumado a un coeficiente de asimetría de 0,67, indica una distribución sesgada positivamente. Esta condición sugiere la necesidad de aplicar transformaciones estadísticas para estabilizar la varianza y ajustar los datos a modelos geoestadísticos más precisos, tal como recomiendan Meijerink et al. (1994) para el análisis de suelos con distribución no normal.

Según Herrera et al. (2021), mencionan que es importante el papel del potasio como macroelemento clave para los cultivos de *Malum terrae*, pues su presencia asegura una maduración uniforme del fruto, mejora notablemente la calidad organoléptica y fortalece la estructura de la planta, aumentando su capacidad de resistencia ante estrés hídrico, térmico y ataques de plagas y enfermedades. La deficiencia de potasio no solo reduce el rendimiento y la calidad agrícola, sino que también provoca desequilibrios nutricionales que amenazan la sostenibilidad del cultivo. Por ello, desde la ingeniería de suelos, se vuelve fundamental aplicar fertilización de precisión, basada en mapas de variabilidad espacial, para corregir eficientemente estas carencias, optimizar recursos y maximizar la productividad en los suelos granulares del área de Huánuco.

La alta variabilidad registrada en los coeficientes de variación de la materia orgánica (MO), nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K) se alinea con lo planteado por Galindo et al. (2024), quienes explican que el avance de la agricultura intensiva, impulsado por el aumento de la demanda alimentaria, ha contribuido significativamente a una marcada heterogeneidad espacial en los indicadores de fertilidad de los suelos. Esta variación está estrechamente relacionada con las prácticas de manejo agronómico, especialmente en cuanto al uso diferenciado de insumos orgánicos y minerales. Evaluar dicha variabilidad resulta clave para

mejorar la eficiencia en la regulación y absorción de nutrientes. En este mismo sentido, Arciniegas y Gómez (2018) destacan que el crecimiento constante de la agricultura intensiva, motivado por la presión poblacional, ha generado un impacto directo sobre la fertilidad del suelo, cuya variabilidad espacial depende en gran parte del tipo de manejo implementado en cada sistema productivo.

De forma complementaria, Jaramillo et al. (2012) identificaron que, en los campos dedicados a la producción convencional de papa en el distrito de Panao, existe una alta variabilidad asociada a un manejo inadecuado de fertilizantes químicos y a la replicación no contextualizada de prácticas agrícolas de otras parcelas. Asimismo, China y Rodríguez (2021) reportaron concentraciones elevadas de fósforo y potasio en suelos con fuerte heterogeneidad espacial, lo cual fue atribuido a factores como la textura del suelo, en especial la presencia de minerales arcillosos, y a los niveles de materia orgánica presentes, que influyen directamente en la disponibilidad y movilidad de nutrientes.

Donde en la zona de estudio se identificaron texturas de tipo franco arcillo arenoso, franco arcilloso y franco, las cuales influyen directamente en las propiedades físicas y químicas del suelo, determinando su capacidad para contribuir con el crecimiento vegetal. Las características edáficas, como pH, la materia orgánica y los niveles de nitrógeno, fósforo y potasio (NPK), actúan como indicadores clave de fertilidad. El pH regula la disponibilidad de nutrientes, la materia orgánica mejora la capacidad de retención de agua y nutrientes y el NPK es esencial para el crecimiento óptimo de las plantas. Una caracterización detallada de estos parámetros permite determinar con mayor precisión la aptitud del terreno, facilitando así la selección del cultivo idóneo e impulsando estrategias eficientes de agricultura de precisión (Herrera et al., 2021).

Como parte de los resultados obtenidos en la presente investigación, se reconoce que el suelo cumple funciones esenciales para el desarrollo agrícola, entre ellas, la disponibilidad de nutrientes, la conformación de una estructura porosa que mejora la oxigenación, la capacidad de filtrar sustancias tóxicas y el mantenimiento de niveles óptimos de fertilidad. La presencia de estas características permite que un suelo saludable sustente la productividad biológica, contribuya al equilibrio del ecosistema y promueva la salud tanto de plantas como de animales y seres humanos (Ecomandaga, 2018).

Asimismo, se reafirma que la fertilidad del suelo es resultado de la interacción conjunta de sus propiedades físicas, químicas y biológicas. Según Ruiz (2016), esta fertilidad se manifiesta en la capacidad del suelo para suministrar nutrientes esenciales en proporciones adecuadas, permitiendo el desarrollo eficaz de cultivos. Para ello, el suelo debe poseer

condiciones que aseguren el contacto eficiente entre los nutrientes y las raíces, lo cual se logra a través de una estructura adecuada, buena porosidad, retención de humedad y actividad biológica. Estos factores son determinantes para mejorar la absorción de nutrientes y garantizar la sostenibilidad de la producción agrícola.

Además, como señala Thompson y Troeh (2021), la textura del suelo incide directamente en el comportamiento hidráulico y la dinámica de nutrientes, lo cual condiciona su potencial agrícola.

Donde el coeficiente de variación (CV) demostró valores de 17,07 % para la arena, 17,99 % para la arcilla y 23,22 % para el limo, respaldando según los criterios de Inocencio y Florida (2022), se enmarca dentro de una variabilidad estadística media. Este comportamiento evidencia que las tres fracciones texturales del suelo presentan una distribución de datos relativamente uniforme, sin grandes dispersiones extremas. Además, se confirma que los datos se ajustan a una distribución normal, respaldado por las medidas de centralidad, forma y asimetría, lo cual es crucial al momento de aplicar técnicas estadísticas o geoestadísticas más complejas.

4.1.1 Prueba de normalidad

Según la Tabla 12 presenta los resultados de la prueba de normalidad aplicada a los parámetros edáficos del fundo Beker, evidenciando el comportamiento estadístico de cada variable y permitiendo validar la idoneidad de los métodos de interpolación utilizados:

Tabla 12. Prueba de normalidad de los parámetros físicos y químicos de los suelos en estudio de acuerdo al tipo de muestra.

Variable	Estadístico	N	P-value
Arena (%)	0,982	38	0,792
Arcilla (%)	0,966	38	0,290
Limo (%)	0,971	38	0,413
pH	0,972	38	0,456
MO (%)	0,945	38	0,063
N (%)	0,946	38	0,065
P (ppm)	0,918	38	0,009
K (ppm)	0,941	38	0,045

Respecto de los resultados presentados en la Tabla 12, la aplicación de la prueba de Shapiro-Wilk permitió identificar que la mayoría de los indicadores de fertilidad del suelo se ajustan a una distribución normal ($P > 0,05$), validando el uso de métodos estadísticos

paramétricos. No obstante, se observaron excepciones notables en las variables de fósforo (P) y potasio (K), cuyos valores p fueron inferiores al umbral de significancia, indicando una desviación significativa de la normalidad. Esta situación fue confirmada mediante los análisis de asimetría y curtosis, que evidenciaron distribuciones sesgadas. Para corregir estos desajustes, se aplicaron transformaciones estadísticas como la Box-Cox, las cuales, según Escudero y Morera (2022), son técnicas que permiten mejorar el ajuste de los datos a los modelos, al estabilizar la varianza y reducir los efectos de la no normalidad, optimizando así la validez del análisis. Demostrando que los indicadores como arena, arcilla, limo y pH presentan valores p superiores a 0,05, lo que confirma su distribución normal y permite el uso de pruebas paramétricas. En cambio, la materia orgánica (MO) y el nitrógeno (N) presentan valores p cercanos al límite de significancia, por lo que su normalidad es aceptable, pero debe considerarse con precaución. Concluyendo que el fósforo y el potasio, al no cumplir el supuesto de normalidad, se recomienda el uso de métodos no paramétricos, ya que los modelos tradicionales podrían generar conclusiones erróneas. En consonancia con Escudero y Morera (2022), el uso adecuado de transformaciones y pruebas adaptadas a la naturaleza de los datos permite obtener resultados más precisos y fiables en el análisis de las propiedades edáficas.

4.1.2 Mapa de Voronoi

Según Okabe et al. (2000), los mapas de Voronoi se fundamentan en un principio geométrico sencillo pero poderoso, donde la división del espacio en regiones que corresponden a los puntos más cercanos a determinadas localizaciones, basándose en una función de distancia. Este enfoque permitió representar de forma precisa la influencia espacial de cada punto de muestreo. En la Figura 5 se observa que los polígonos generados son relativamente uniformes en tamaño, lo cual evidencia que el muestreo fue realizado de manera homogénea (Inocencio, 2022), respetando una distancia constante de 25 metros entre puntos. Este tipo de diseño fue clave para garantizar representatividad espacial y minimizar sesgos en los análisis de variabilidad del suelo.

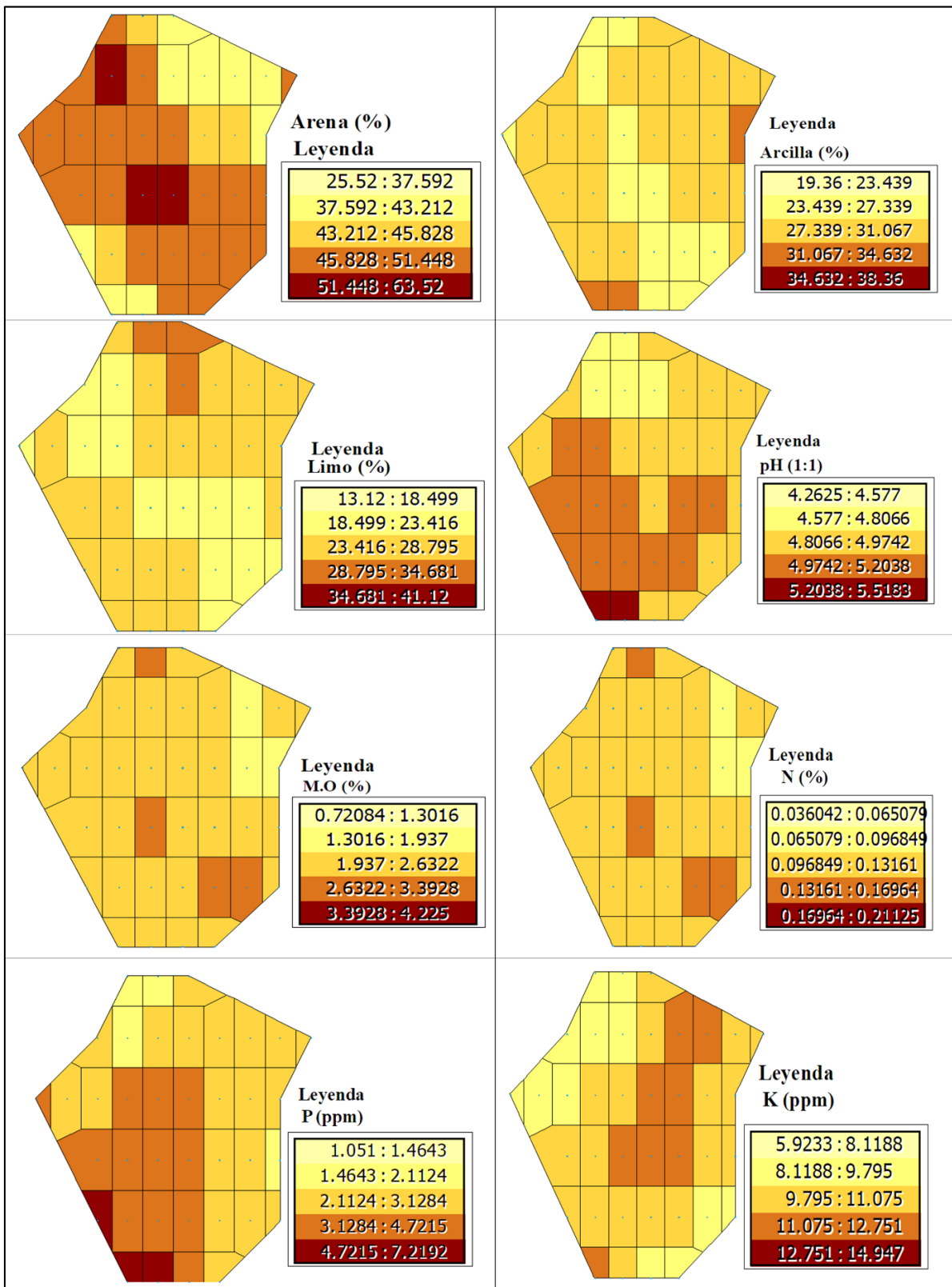


Figura 5. Indicadores fisicoquímicos del suelo según el mapa de Voronoi

Donde la Figura 5 presenta el mapa de voronoi donde los indicadores físicos químicos del suelo: textura (arcilla, limo y arena), nutrientes (K, P, MO, N), y pH. Se observa que la zona de noreste y suroeste tiende a concentrar mayores niveles de potasio (K), fósforo (P) y nitrógeno (N), así como mayor contenido de materia orgánica (MO), lo que indica una posible fertilidad natural más alta o mayor intervención agrícola en esta área. Por otro lado, las zonas periféricas muestran menores concentraciones de estos nutrientes, especialmente hacia el noroeste.

En cuanto a la textura del suelo, el noroeste y sureste presentan mayor contenido de arena, mientras que el centro y sureste tienen menos contenido de arcilla y limo, lo que sugiere diferencias en retención de humedad y fertilidad. El pH del suelo es ligeramente ácido a neutro en casi toda el área, con valores más bajos en el norte, lo que puede influir en la disponibilidad de nutrientes. En conjunto, estos mapas permiten identificar zonas con potencial agrícola y aquellas que requieren manejo específico para mejorar su productividad, como enmiendas para mejorar la acidez o fertilización localizada según deficiencias detectadas.

4.1.3 Análisis de Tendencia

La Tabla 13 muestra la evidencia de la distribución espacial de los datos edáficos correspondientes al fundo Becker, lo que permite identificar patrones de variación en las propiedades del suelo. Esta tendencia espacial resulta fundamental para comprender el comportamiento del terreno, facilitando una planificación agrícola más precisa y una gestión eficiente de los recursos, en función de las características específicas de cada zona del fundo.

Tabla 13. Tendencia espacial de los datos

Variable	TENDENCIA	
	XZ	ZY
Arena	Lineal	Cuadrática
Arcilla	Cuadrática	Cuadrática
Limo	Cuadrática	Cuadrática
pH	Cuadrática	Cuadrática
MO	Cuadrática	Lineal
N	Cuadrática	Lineal
K	Cuadrática	Cuadrática
P	Lineal	Cuadrática

En el análisis espacial, se observa que el pH presenta una tendencia cuadrática en el plano XZ, mostrando un ligero incremento de este a oeste, esta tendencia es también lo mismo en el plano ZY, aumentando de norte a sur. En el caso de la materia orgánica, presenta

una tendencia cuadrática en el plano XZ, aumentando de este a oeste mientras en el plano ZY es lineal. Por su parte, el nitrógeno revela también una tendencia cuadrática en el plano XZ, con un aumento de este a oeste; mientras que en el plano ZY mantiene una tendencia lineal descendente de norte a sur. El fósforo manifiesta una tendencia lineal creciente de este a oeste en el plano XZ, y una tendencia cuadrática creciente en sentido norte-sur en el plano ZY. Finalmente, el potasio se comporta de manera cuadrática en ambos planos, con una reducción de este a oeste en el plano XZ y un incremento de norte a sur en el plano ZY. Estos patrones evidencian la complejidad y variabilidad espacial de las propiedades del suelo, destacando la necesidad de modelarlas adecuadamente para una interpretación precisa. Complementariamente, Acosta (2022) evidencia que la humedad del suelo experimentó una disminución entre 1 990 y 1 997, se mantuvo estable entre 1 997 y 2 007, y a partir de 2 013 hasta 2 018 presentó un aumento progresivo, lo que indica una tendencia positiva en la recuperación hídrica del suelo, dato relevante para ajustar las prácticas de manejo hídrico y conservación de suelos en el área de estudio.

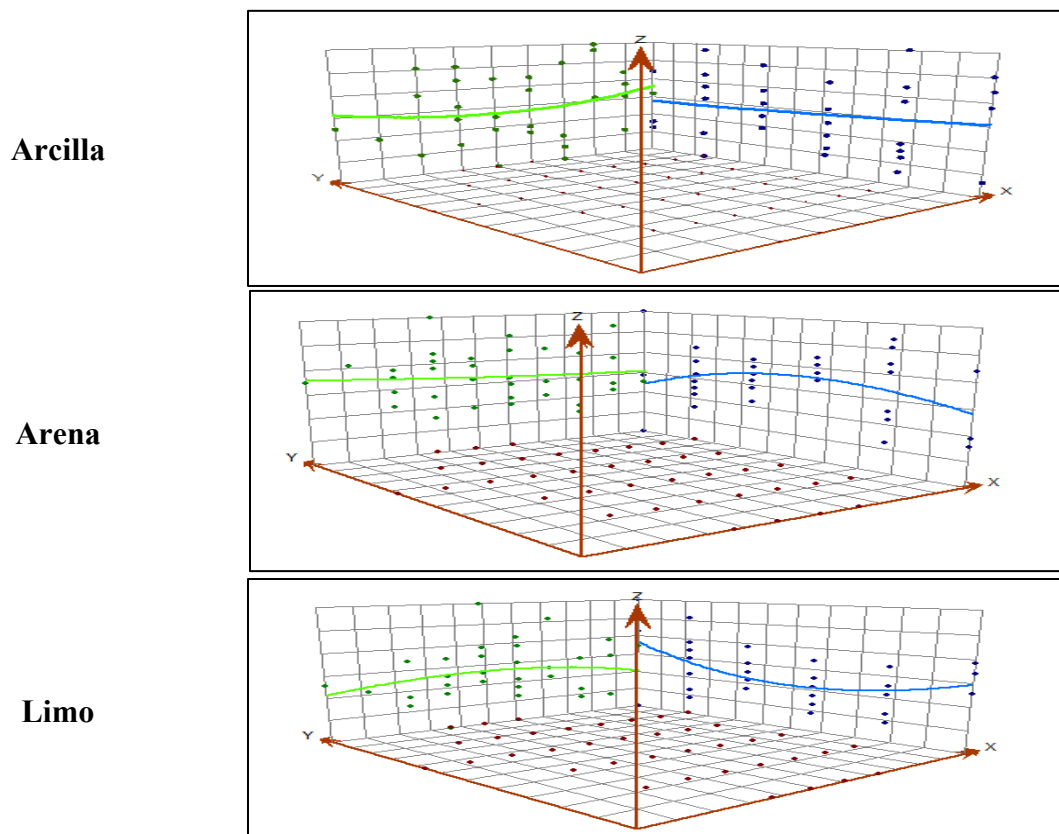


Figura 6. Distribución y tendencia de rango de partículas de clases texturales del suelo en función de las Coordenadas Espaciales (X, Y y Z).

Donde se presenta en la Figura 6 una comparación tridimensional del comportamiento de partícula del suelo, como la arcilla, la arena y el limo. Observándose que la

arcilla muestra una mayor dispersión en los datos y curvas más pronunciadas, lo que indica una mayor sensibilidad o variabilidad en la propiedad evaluada. Por el contrario, la arena presenta una respuesta más uniforme y estable, reflejando un comportamiento más predecible. El limo se posiciona entre ambos, con una variabilidad moderada. Esta representación sugiere que el tipo de suelo influye significativamente en la respuesta del parámetro analizado, siendo la arcilla la más susceptible a cambios y la arena la más estable.

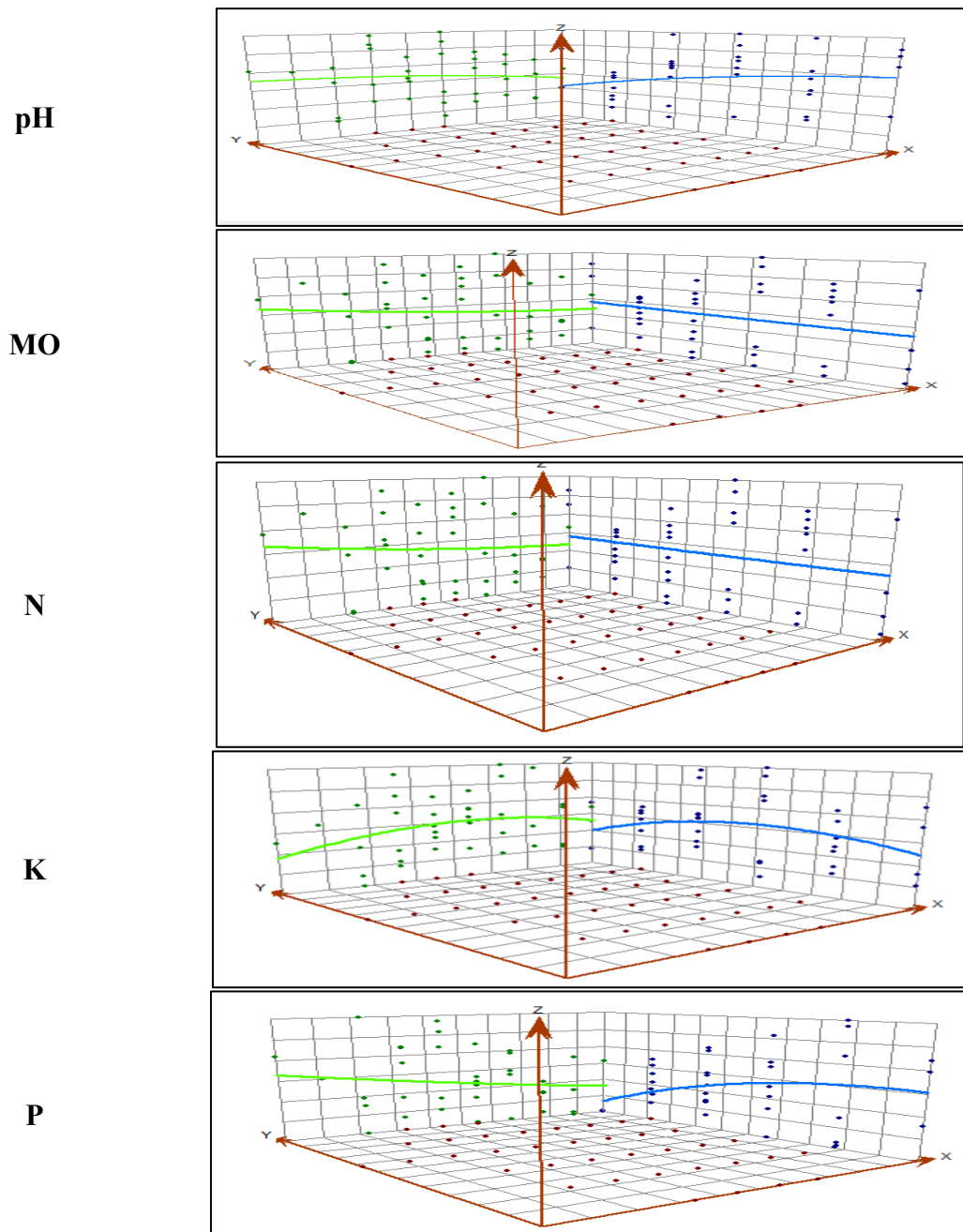


Figura 7. Distribución y tendencia de rango de los indicadores de fertilización del suelo en función de las Coordenadas Espaciales (X, Y y Z).

La Figura 7 muestra gráficos tridimensionales que representan la distribución y tendencia de distintos indicadores de fertilización del suelo, como el pH, materia orgánica

(MO), nitrógeno (N), potasio (K) y fósforo (P). Observándose que todos los nutrientes presentan una cierta variabilidad espacial, aunque con diferencias en su comportamiento. El pH muestra una distribución bastante uniforme, indicando estabilidad en las condiciones de acidez del suelo. En cambio, la materia orgánica, el nitrógeno y el potasio presentan mayores fluctuaciones, lo que sugiere una distribución más heterogénea y posiblemente asociada a variaciones en el manejo o en la naturaleza del suelo. El fósforo también muestra una variabilidad notable, aunque ligeramente más estable que el nitrógeno.

4.1.4 Semivarianza

Demostrando la semivarianza de los diferentes tipos de suelo del fundo Becker, permitiendo identificar la variabilidad espacial de sus propiedades para poder visualizar la tendencia de los datos y las relaciones de datos que son distintos.

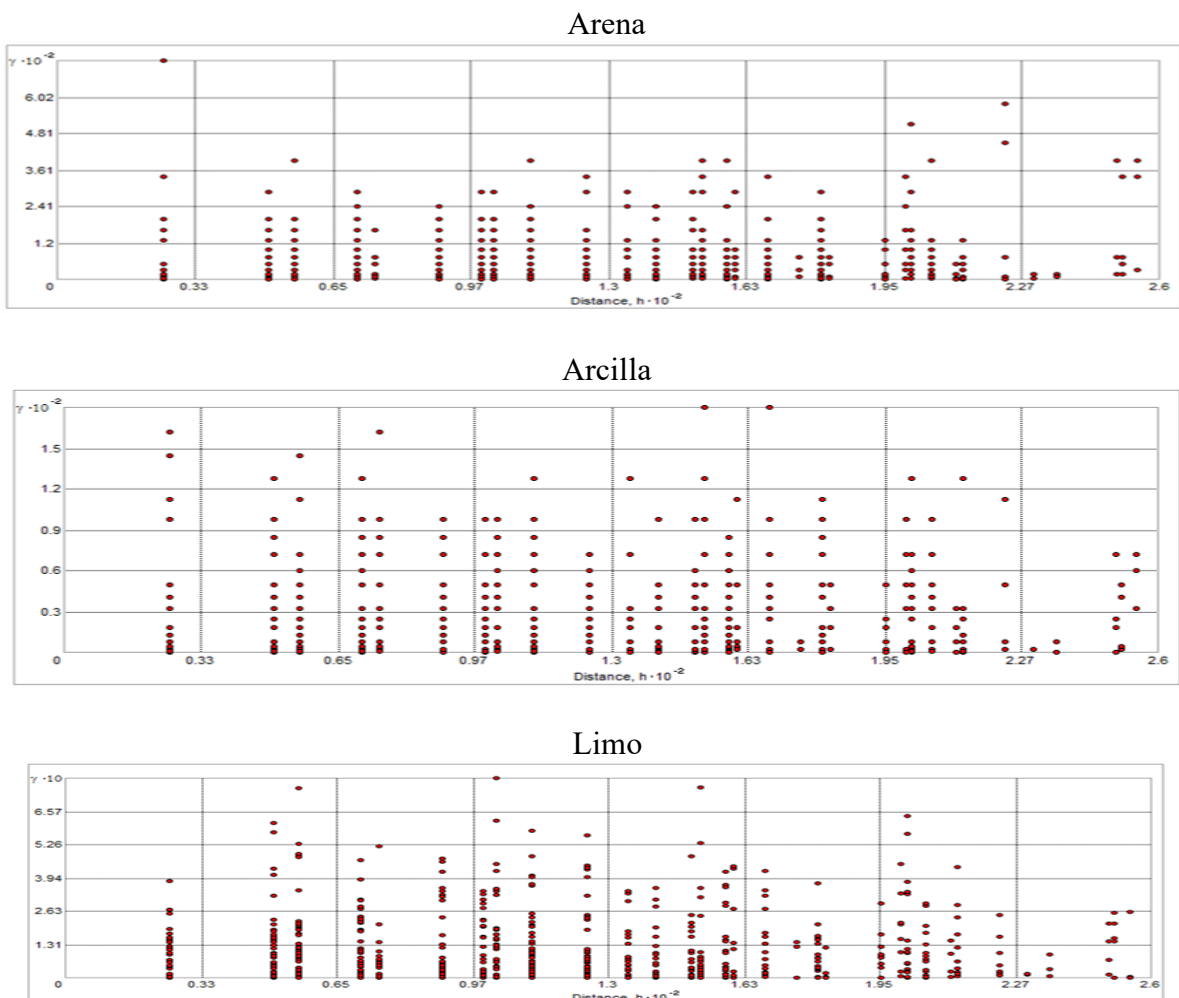


Figura 8. Semivarianza de clases textuales del suelo

Según la Figura 8 se presenta en los semivarianza experimentales de arena, arcilla y limo, revelando diferencias en sus estructuras espaciales según la distancia entre puntos. La arcilla exhibe una autocorrelación espacial moderada, mientras que el limo muestra baja semivarianza y escasa dispersión, lo que indica fuerte dependencia espacial. En contraste, la arena refleja una variabilidad más alta y dispersa, lo que evidencia una estructura espacial más compleja y definida. Estas variaciones son fundamentales para aplicar técnicas geoestadísticas como el Kriging Ordinaria, ajustando el semivariograma al comportamiento específico de cada textura. Este análisis cobra mayor relevancia al coincidir con lo planteado por Ovalles (2001), quien afirma que la semivarianza disminuye cuando aumenta la similitud entre puntos cercanos. En resumen, se resalta con mayor énfasis que el limo presenta la menor continuidad espacial, siendo la fracción menos heterogénea, seguida de la arcilla y, finalmente, de la arena.

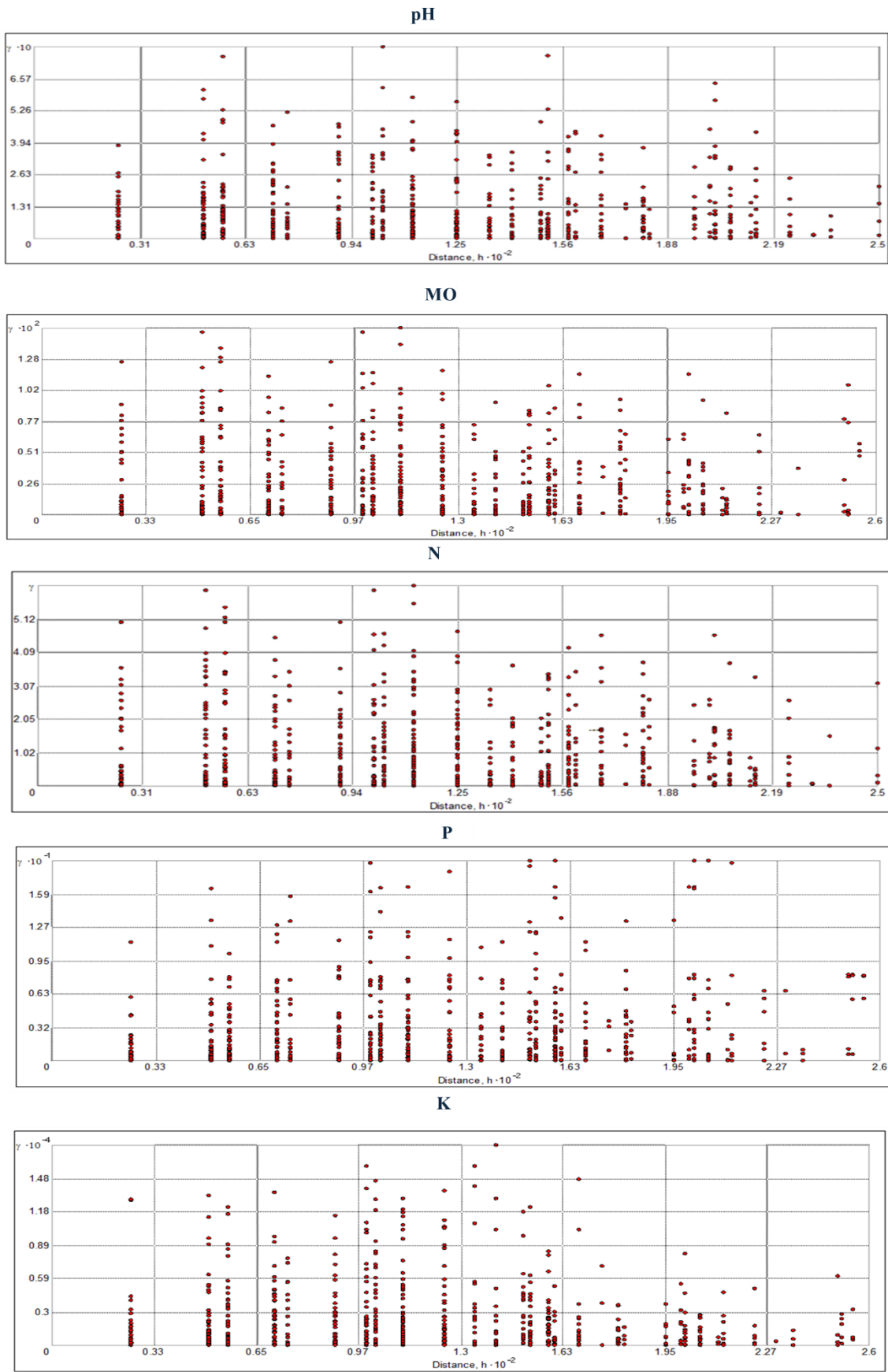


Figura 9. Semivarianza de los indicadores de fertilizantes del suelo

Donde la Figura 9 se demuestra los semivarianza de los indicadores de fertilidad del suelo donde el pH, materia orgánica (MO), nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K), permitiendo identificar cómo varía su comportamiento espacial en función de la distancia entre puntos muestreados. El pH muestra una dispersión moderada mientras en el fósforo y potasio evidencia una alta variabilidad, indicando una distribución más heterogénea. El nitrógeno manifiesta un crecimiento constante en la semivarianza presentando una baja dispersión y uniformidad indicando una buena estructura espacial lo que revela una fuerte dependencia espacial. En contraste, la materia orgánica muestra un patrón intermedio. Estos comportamientos son fundamentales para elegir el modelo teórico de semivarianza que mejor se ajuste, optimizando la precisión en técnicas de interpolación como el Kriging. En concordancia con lo planteado por Jaramillo et al. (2008), el análisis del semivarianza resulta clave para inferir valores en zonas no muestreadas, lo cual fortalece la planificación agrícola al mejorar la gestión espacial de los nutrientes del suelo.

4.2 Determinación de la distribución espacial de los indicadores de fertilidad del suelo mediante la comparación de los métodos de interpolación Kriging Ordinario (KO) y Distancia Inversa Ponderada (IDW)

Demostrando la distribución espacial de las propiedades fisicoquímicas del suelo, se estimaron los parámetros del modelo de Kriging Ordinario (KO) mediante herramientas de análisis geoestadístico en ArcGIS 10,5. Este proceso permitió seleccionar los modelos de semivariograma mejor ajustados en base a criterios como el Error Medio (EM) cercano a cero, la Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE) cercano a uno y el Error Cuadrático Medio (EAM) lo más bajo posible. Los modelos seleccionados fueron: esférico para arena, arcilla y limo, gaussiano para pH y nitrógeno (N), exponencial para materia orgánica (MO) y fósforo (P), y esférico también para potasio (K). Estos ajustes se justifican por los valores de nugget, sill y rangos obtenidos (Tabla 14), donde, por ejemplo, la arena mostró un nugget de 40,542 y un sill de 82,844, con un rango de 166,8 m; el pH un nugget de 0,080 y un sill de 0,104 con un rango de 130 m; y el potasio un nugget de 11,800 con sill de 22,983 y un rango de 125 m. Estas configuraciones permitieron modelar de manera óptima la variabilidad espacial de cada indicador y criterio clave para el manejo agrícola con precisión. Estos modelos coinciden con de Mao et al. (2014), quienes reportaron mejor ajuste con modelos esféricos, exponenciales y gaussianos para distintos parámetros del suelo.

Tabla 14. Parámetros del semivariograma de Kriging Ordinario

INDICADOR	DESCRIPCIÓN					
	TIPO	MODELO	NUGGET	SILL	RANGO (M)	GDE (%)
Arena (%)	KO	Esférico	40,542	82,844	166,800	48,938
Arcilla (%)	KO	Esférico	16,949	27,305	79,500	62,073
Limo (%)	KO	Esférico	9,474	37,180	125,000	25,481
pH	KO	Gaussiano	0,080	0,104	130,000	76,619
MO (%)	KO	Exponencial	0,850	1,180	116,500	72,037
N (%)	KO	Gaussiano	0,001	0,003	150,000	43,322
P (ppm)	KO	Exponencial	0,233	1,262	280,280	18,463
K (ppm)	KO	Esférico	11,800	22,983	125,000	51,342

En este contexto, el semivariograma experimental cumple una función fundamental al definir la estructura de correlación espacial, y sus componentes nugget, sill, rango y GDE (Grado de Dependencia Espacial), que ofrecen una visión clara de la heterogeneidad del terreno. Según China y Rodríguez (2021), un nugget bajo en comparación al sill refleja menor error de medición y mayor dependencia espacial, mientras que el rango indica hasta qué distancia los puntos están correlacionados, siendo deseable que este supere la distancia de muestreo (25 m). En el presente estudio, los rangos obtenidos (de 79,5 m a 280,3 m) confirman una adecuada escala espacial. Donde la dependencia espacial fue moderada para arcilla (62,07%) y MO (72,04%), fuerte para limo (25,48%) y fósforo (18,46%), y débil para pH (76,61%). Y estos resultados son comparables con el de Déleg (2018), quien reportó GDE entre 3, 86 y 42, 85. Finalmente, se valida que, para lograr un semivariograma confiable, es imprescindible que el valor crítico del rango permita alcanzar el sill, lo que garantiza una autocorrelación estructurada del indicador (Jaramillo et al., 2008).

4.2.1 Distribución espacial de los indicadores físicos y químicos del suelo

Se elaboraron mapas de distribución espacial de los indicadores físico-químicos del suelo utilizando los métodos de interpolación Kriging Ordinario (KO) y la Inversa de la Distancia Ponderada (IDW). Para las estimaciones realizadas mediante KO, se evaluaron diferentes modelos de semivariograma exponencial, esférico y gaussiano seleccionando en cada caso aquel que mostró el mejor ajuste estadístico, es decir, el menor error medio que sea próximo a 0 y la raíz del cuadrático medio el coeficiente más próximo a 1, con el fin de optimizar la precisión en la representación de la variabilidad espacial del suelo. Así, se determinaron los siguientes ajustes óptimos de modelo gaussiano para pH y nitrógeno (N); modelo exponencial para materia orgánica (M.O.) y fósforo (P); y modelo esférico para potasio

(K). Por otro lado, el método IDW basa sus estimaciones en combinaciones lineales de los valores de puntos cercanos, aunque puede generar patrones poco realistas con forma de “ojo de buey” alrededor de las muestras. Su precisión depende en gran medida de la varianza aleatoria, la estructura de variación y la densidad del muestreo (Fortis et al., 2010). Los mapas obtenidos mediante ambos métodos pueden consultarse con mayor detalle en el Anexo 5.

- **Clase textural del porcentaje de arcilla**

Demostrando el porcentaje de suelo de arcilla en las siguiente Tablas y Figuras:

Tabla 15. Rango de partículas de clases texturales de arcilla

Métodos	Clase Textural			
	Franco Arenoso Arcilloso	Franco Arcilloso	Arcilloso Limoso	Arcilloso
	20-35%	35-55%	40-60%	40-100%
IDW	0	19,37% – 38,36 %	0	0
KO	25,61% – 31,58%	0	0	0

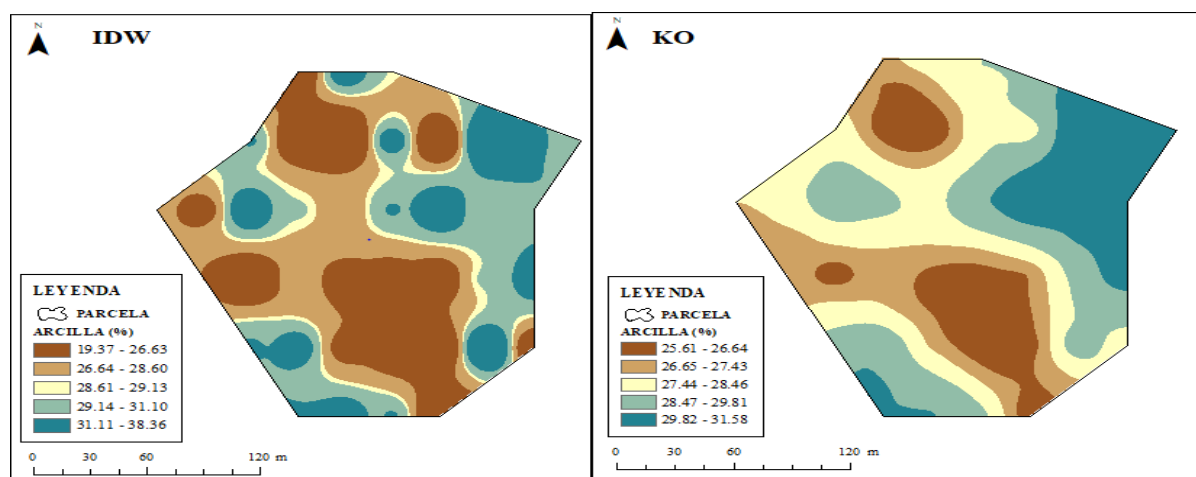


Figura 10. Mapa de clase textural de arcilla por la interpolación IDW e KO.

Como el análisis de la Tabla 15 y la Figura 10, el método Kriging Ordinario (KO) demuestra una mayor capacidad para identificar variaciones en el contenido de arcilla, mostrando un rango de distribución más amplio (25,61% a 31,58%) y permitiendo visualizar con claridad la homogeneidad espacial del suelo. Mientras con el método de la Inversa de la Distancia Ponderada (IDW) presenta rango (19,37% a 38,36%) más cercano al rango de muestreo. Además, en la representación espacial, el KO ofrece una cartografía más detallada y realista, mientras que el IDW presenta patrones artificiales tipo “ojo de buey” y zonas con escasa variabilidad. Esta diferencia se debe a la falta de un modelo teórico en el IDW, lo que restringe su utilidad en estudios donde es esencial detectar finas variaciones espaciales, como en el análisis de fertilidad de suelos destinados a cultivos exigentes como el cacao. Tal

comportamiento confirma lo señalado por Inocencio y Florida (2022), quienes advierten que los indicadores geoestadísticos revelan una considerable variabilidad espacial y bajos promedios en parámetros de fertilidad, lo cual representa una condición poco favorable para el desarrollo óptimo de este cultivo.

- **Clase textural del porcentaje de arena**

Demostrando el porcentaje de arena del suelo analizado:

Tabla 16. Rango de partículas de clases texturales de arena

Métodos	Clase Textural	
	Franco	Franco Arenoso Arcilloso
	23-52%	45-80%
IDW	0	25, 54% – 63, 51%
KO	39, 68% – 51, 07%	0

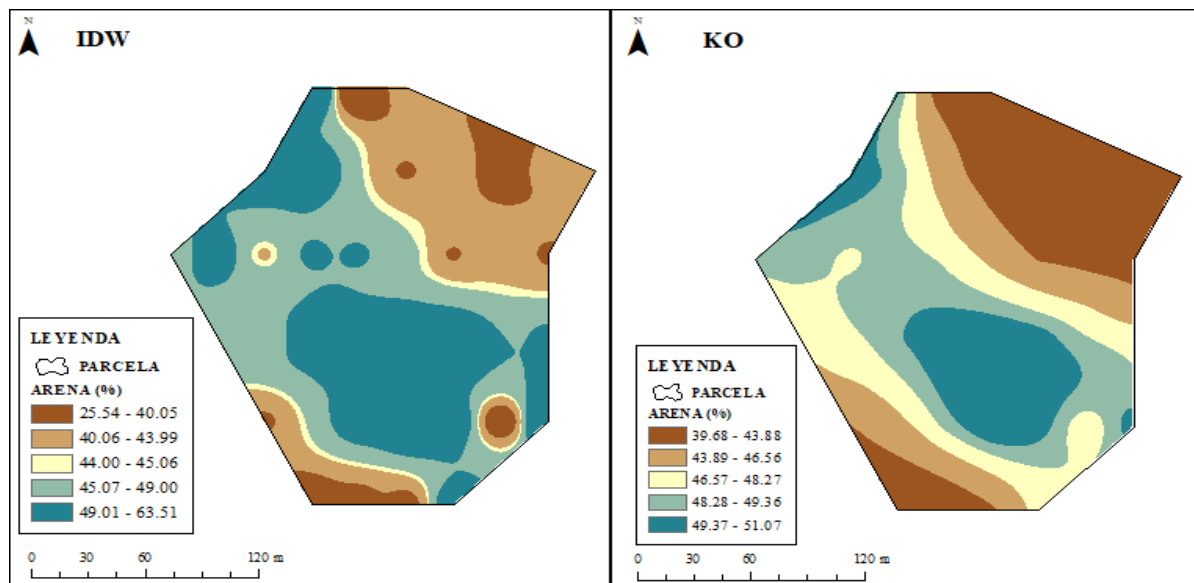


Figura 11. Mapa de clase textural de arena por la interpolación IDW e KO.

Según demostrado en la Tabla 16 y la Figura 11, el método de interpolación Kriging Ordinario (KO) ofrece una representación más precisa y coherente del contenido de partículas de arena, mostrando un rango más estrecho y definido (39,68% a 51,07%) dentro de la clase Franco. Este comportamiento contrasta con el método la Inversa de la Distancia Ponderada (IDW), que no registra valores en la clase Arenoso y presenta un rango más amplio y disperso (25,54% a 63,51%) en la clase Franco Arenoso Arcilloso. Además, los mapas texturales muestran que el KO logra reflejar una mayor homogeneidad espacial, permitiendo una interpretación más realista del terreno. En cambio, IDW genera patrones tipo “ojo de buey” y distribuciones heterogéneas que limitan su capacidad para capturar la variabilidad natural del suelo, lo que compromete su precisión en estudios detallados de textura del suelo. Estos

hallazgos se respaldan con los resultados de Aróstegui (2022), quien demostró que KO obtiene los mejores valores de error cuadrático medio en parámetros clave como pH, materia orgánica, nitrógeno, fósforo y potasio, consolidando a KO como el método más fiable y efectivo para una interpolación precisa en estudios de suelos.

- **Clase textural del porcentaje de limo**

Demostrando el porcentaje de limo en el suelo analizado:

Tabla 17. Rango de partículas de clases texturales de limo

Métodos	Clase Textural		
	Franco arenoso	Franco Limoso	Franco
	88-100%	74-88%	28-50%
IDW	0	0	13,13% – 41,11%
KO	0	0	17,64% – 33,68%

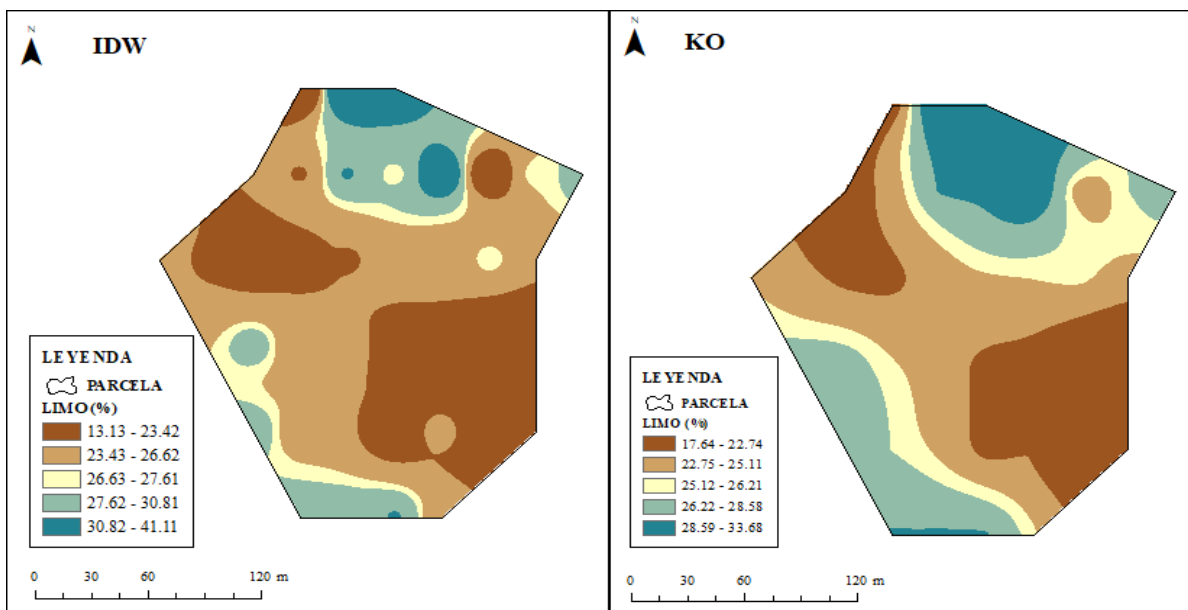


Figura 12. Mapa de clase textural de limo por la interpolación IDW e KO

Demostrando en la Tabla 17 y la Figura 12, el método Kriging Ordinario (KO) demuestra una mayor capacidad para captar la variabilidad del contenido de limo en el suelo, presentando rangos amplios y detallados entre (17,64% y 33,68%) mientras la Inversa de la Distancia Ponderada (IDW) presenta rangos de (13,13% a 41,11%) cercanos al valor de muestreo, esta amplitud evidencia su eficacia en representar con precisión la distribución espacial del limo. Los mapas generados refuerzan esta diferencia en donde el KO ofrece representaciones más homogéneas y realistas, mientras que IDW produce distribuciones heterogéneas y simplificadas, lo que restringe su utilidad en estudios que requieren un análisis

detallado de la textura del suelo. Esto subraya la eficacia de KO para identificar diferencias texturales en el área estudiada, según Sales (2022), el contenido de limo está fuertemente correlacionado con la actividad microbiana del suelo y propiedades fisicoquímicos como la saturación de aluminio, influyendo directamente en la calidad y salud del suelo.

- **Distribución espacial del pH**

Presentando el nivel de pH en el suelo analizado:

Tabla 18. Escala de nivel de pH

Métodos	Niveles		
	Extremadamente ácido	Moderadamente ácido	Alcalino
	< 5,5	5,5 – 7,5	> 7,5
IDW	4,32 – 5,47	0	0
KO	4,73 – 5,17	0	0

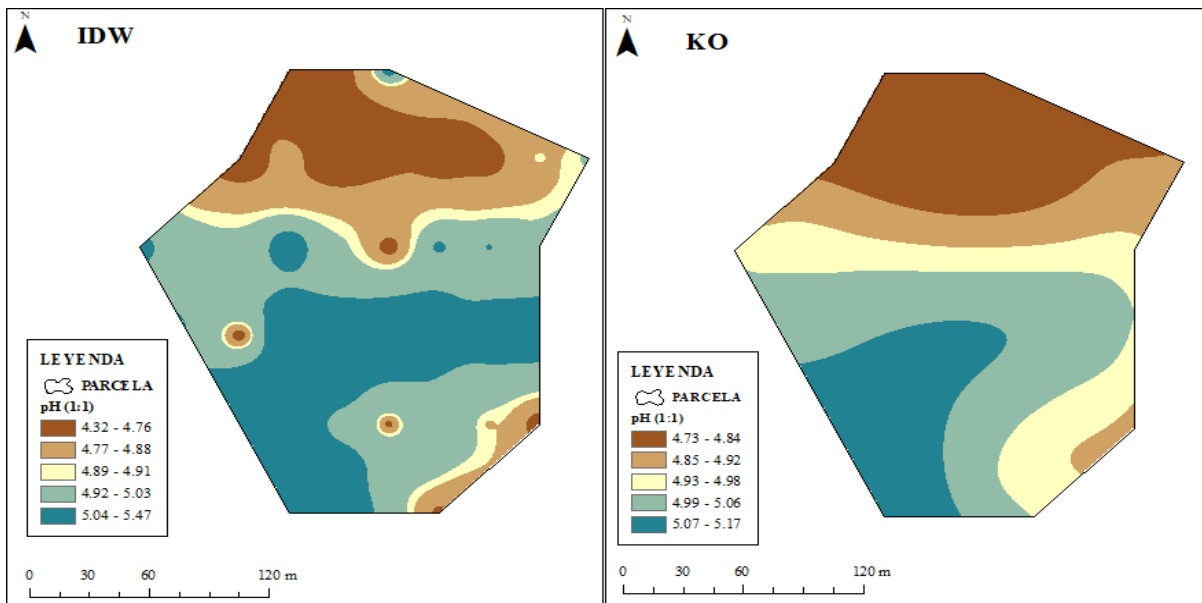


Figura 13. Mapa de pH del suelo por la interpolación IDW e KO.

De acuerdo al análisis de la Tabla 18 y la Figura 13, muestra que el método Kriging Ordinario (KO) presenta una mayor precisión al captar la distribución espacial del pH del suelo, mostrando un rango de 4,73 a 5,17. No obstante, este rango permite identificar diferencias dentro del mismo nivel ácido, generando una representación más detallada y variada del terreno. En cambio, el método de la Inversa de la Distancia Ponderada (IDW) refleja un rango más amplio (4,32 a 5,47) cercano al rango de muestreo, presentando transiciones menos suaves y mayor variabilidad, lo que limita su capacidad para mapear adecuadamente los cambios químicos del suelo. Esta diferencia pone en evidencia que KO resulta más efectivo para detectar variaciones del pH, un factor determinante para la gestión agrícola, ya que condiciona la acidez o alcalinidad del suelo y, por ende, la disponibilidad de nutrientes. Según

Thompson y Troeh (2021), mantener un pH entre 5,5 y 7,5 es esencial para una adecuada productividad, lo cual requiere enmiendas como cal en suelos ácidos o azufre en suelos alcalinos, asegurando así un equilibrio químico favorable para la salud del suelo.

- **Distribución espacial de la materia orgánica**

Presentando el porcentaje de la materia orgánica del suelo analizado:

Tabla 19. Niveles de materia orgánica (MO %)

Métodos	Niveles		
	Bajo o pobre	Medio	Alto
	< 2	2-4	> 4
IDW	0	0,78% - 4,06%	0
KO	0	1,94% - 2,71%	0

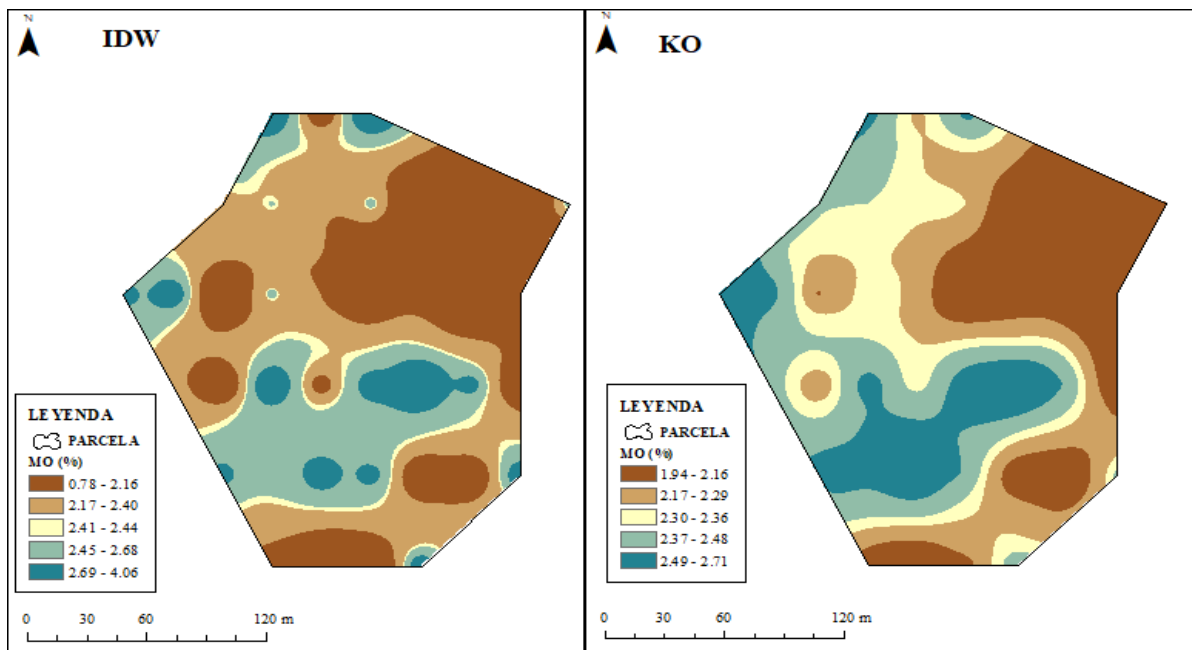


Figura 14. Mapa de materia orgánica (MO) del suelo por la interpolación IDW e KO.

De acuerdo a la Tabla 19 y la Figura 14, se evidencia una diferencia significativa en la distribución de los niveles de concentración al comparar los métodos Kriging Ordinario (KO) e Interpolación Inversa de la Distancia (IDW). El método KO presenta concentraciones únicamente en el medio, con valores que oscilan entre 1,94% y 2,71%, sin registrar presencia en los niveles bajo ni alto, lo cual genera una representación más suave y continua en el área de transición del mapa. De igual modo, el método IDW muestra concentraciones exclusivamente en el nivel medio abarcando un rango de 0,78% a 4,06%, y es más propenso a formar patrones localizados intensos, conocidos como “ojos de buey” (Figura 14) particularmente en la zona suroeste del área de estudio. Esta característica le otorga a IDW una mayor visibilidad de puntos de concentración, lo que resulta útil para destacar áreas de alta intensidad o impacto. Sin

embargo, la representación menos abrupta de KO puede ofrecer una visión más equilibrada de la variabilidad espacial. La visibilidad lograda mediante el método IDW concuerda con lo planteado por Londoño y Rincón (2022), quienes indican que la técnica del Ojo de Buey facilita una interpretación más intuitiva de los datos cuando se aplica sobre interpolaciones con clara diferenciación espacial.

- **Distribución espacial del nitrógeno (N)**

Presentando el porcentaje de nitrógeno en el suelo analizado:

Tabla 20. Niveles de nitrógeno (N %)

Métodos	Niveles		
	Bajo	Medio	Alto
	< 0,1	0,2-0,2	> 0,2
IDW	0	0,04% – 0,20%	0
KO	0,09% – 0,14%	0	0

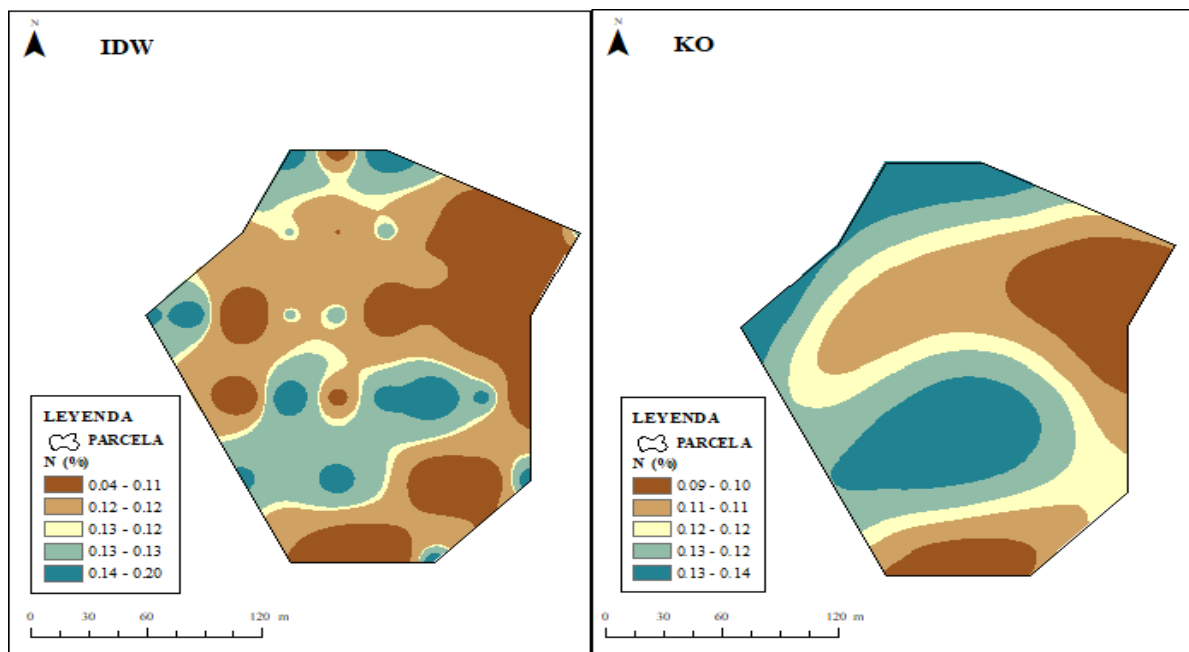


Figura 15. Mapa de nitrógeno (N) del suelo por la interpolación de IDW y KO.

De acuerdo a la información presentada en la Tabla 20 y la Figura 15, se observa que el método Kriging Ordinario (KO) proporciona un rango de nitrógeno entre 0,09% y 0,14%, concentrándose únicamente en el nivel bajo, sin registrar valores en las categorías medio ni alto. A pesar de esta limitación, el mapa generado mediante KO refleja una distribución espacial más diversa, lo que permitió identificar con mayor claridad las variaciones del contenido de nitrógeno en el suelo. Por otro lado, el método de Interpolación Inversa de la Distancia (IDW) presenta un rango más amplio (0,04% a 0,20%) también dentro del nivel medio, pero no muestra valores en los niveles bajo y alto, generando un mapa con una representación heterogénea y

escasa diferenciación espacial. Esto evidencia que, aunque ambos métodos se centran en concentraciones medias, el KO ofrece una mayor capacidad para captar la homogeneidad del terreno, siendo más eficaz para interpretar con precisión la distribución del nitrógeno en estudios de suelo. Según Havlin et al. (2014), las plantas dependen de fuentes externas de nitrógeno, ya que no pueden fijar el nitrógeno atmosférico (N_2). Absorben nitrógeno principalmente en forma de nitrato (NO_3^-) y amonio (NH_4^+), siendo la transformación del nitrato en amonio un proceso que consume más energía que la absorción directa de amonio, lo que resalta la importancia del nitrógeno en la nutrición vegetal.

- **Distribución espacial del fósforo**

Presentando el porcentaje del fósforo del suelo analizado:

Tabla 21. Niveles de fósforo (P ppm)

Métodos	Niveles				
	Muy Bajo	Bajo	Adecuado	Normal	Alto
	3<	3-7	7-15	15-25	>25
IDW	0	1,05ppm – 7,21ppm	0	0	0
KO	0	1,17ppm – 6,02ppm	0	0	0

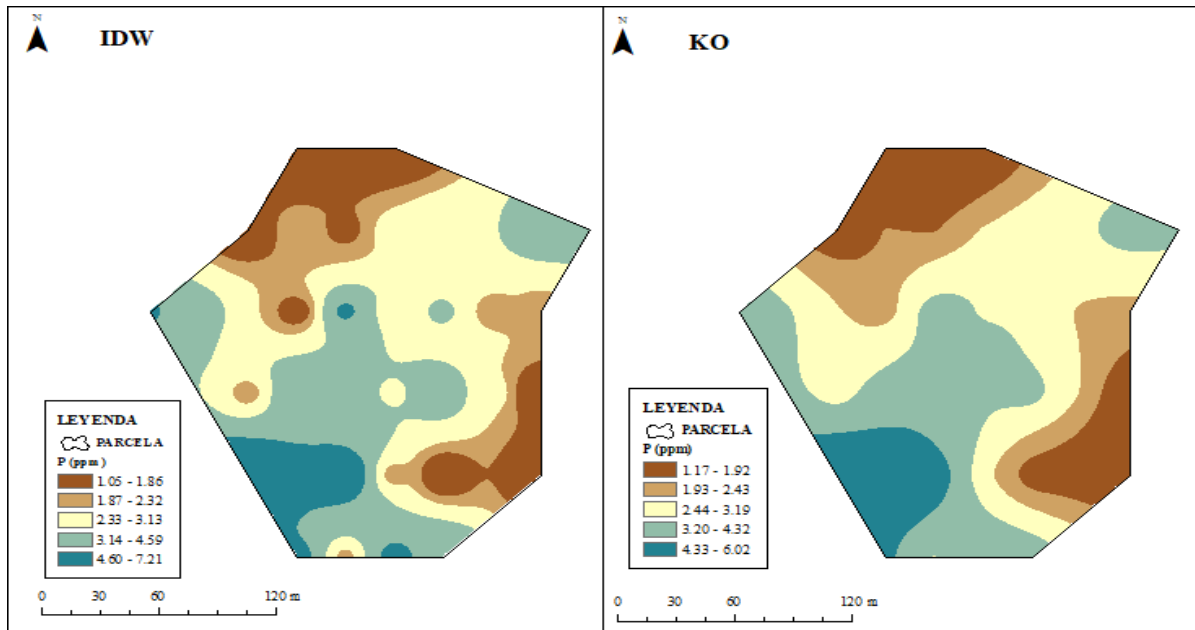


Figura 16. Mapa de fósforo (P) del suelo por la interpolación IDW e KO.

En relación con la Tabla 21 y la Figura 16, indican que los niveles del fósforo (P ppm) mediante los métodos de interpolación KO e IDW, destacando que el método Kriging Ordinario (KO) muestra un rango de 1,17 ppm a 6,02 ppm, sin registrar concentraciones en las categorías altas, pero ofreciendo una distribución espacial más diversificada. Esta representación revela una mejor capacidad del KO para captar las variaciones del fósforo en

el terreno, incluso cuando se mantiene en niveles bajos. Al contrario, del método de la Inversa de la Distancia Ponderada (IDW) presenta un rango ligeramente más amplio (1,05 ppm a 7,21 ppm), sin embargo, sus resultados carecen de diferenciación significativa, generando un mapa heterogéneo con escasa variabilidad espacial. Esta diferencia entre ambos métodos subraya que KO resulta ser más eficaz para representar con mayor homogeneidad el contenido del fósforo en el suelo. Según Herrera et al. (2021), el fósforo es un macronutriente crucial para el crecimiento de las plantas, contribuyendo a la calidad del fruto y a la resistencia al estrés ambiental y enfermedades, lo que subraya aún más la relevancia de su adecuada evaluación en el suelo.

- **Distribución del potasio (K)**

Presentando el nivel del potasio (K) del suelo analizado:

Tabla 22. Niveles de potasio (K ppm)

	Niveles		
	Bajo	Medio	Óptimo
	< 100	100 – 240	>240
IDW	0	35,13ppm – 223,29ppm	0
KO		59,95ppm – 158,31ppm	0

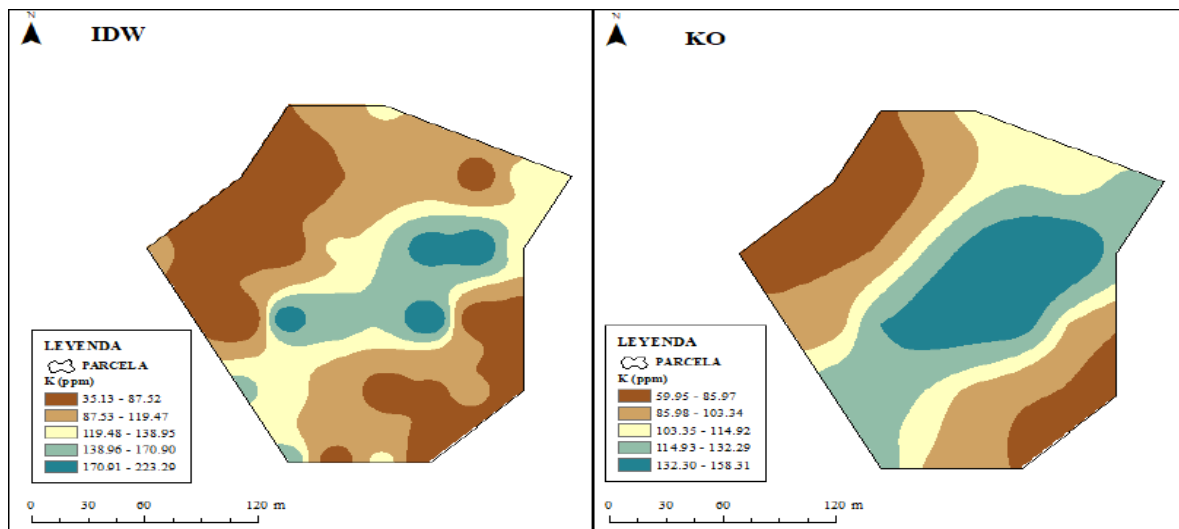


Figura 17. Mapa de potasio (K) del suelo por la interpretación IDW e KO.

Respecto a la Tabla 22 y la Figura 17, se demuestra los niveles de potasio (K ppm) mediante los métodos de interpolación KO e IDW. Donde el método Kriging Ordinario (KO) muestra un rango de 59,95 ppm a 158,31 ppm, afirmando un nivel medio, pero con una distribución espacial mucho más variada, lo que refleja una mejor capacidad para identificar diferencias en el contenido de potasio del suelo. Esta mayor homogeneidad permite una

representación más precisa de las zonas con distinta concentración del nutriente. Comparándolo con el método de la Inversa de la Distancia Ponderada (IDW) donde indica un rango más amplio (35,13 ppm a 223,29 ppm) cercanas al rango de muestreo y demostrando un nivel medio, pero con una distribución heterogénea y escasamente diferenciada, lo que indica una limitada eficacia para captar la variabilidad espacial del potasio. Esta comparación resalta la superioridad del KO al momento de mapear con detalle la distribución de nutrientes esenciales como el potasio, lo cual resulta clave para una gestión eficiente del suelo en contextos agrícolas y de planificación del uso de la tierra. Como señalan Herrera et al. (2021), el potasio es un macronutriente esencial para el crecimiento de las plantas, contribuyendo a la maduración y calidad del fruto, así como a la resistencia al estrés ambiental y a enfermedades, lo que lo convierte en un elemento clave para el cultivo.

4.3 Determinar los valores de validación geoestadística en los indicadores de fertilidad de suelo y comparar la predicción de los dos métodos de interpolación

Presentando en la siguiente tabla los valores de validación geoestadística de los indicadores de fertilidad del suelo y comparación de los métodos de interpolación:

Tabla 23. Indicadores de fertilidad del suelo ME y RMSE

MÉTODO	VARIABLE	ME	RMSE
IDW	Arena	0,3975	2,6329
	Arcilla	0,1954	3,5319
	Limo	0,3517	4,0085
	pH	-0,0224	0,2926
	MO	-0,0429	0,3445
	N	0,0074	0,0309
	K	0,1735	3,0236
	P	0,0270	0,6990
KRIGING	Arena	0,2624	2,5354
	Arcilla	0,0928	3,4040
	Limo	-0,2261	3,8522
	pH	-0,0109	0,2690
	MO	0,0097	0,3299
	N	0,0061	0,0303
	K	0,0558	2,9913
	P	0,0039	0,6484

Según la Tabla 23, se visualiza la comparación entre los métodos de interpolación espacial IDW (Inverse Distance Weighting) y Kriging Ordinario, evaluada mediante los indicadores estadísticos Error Medio (ME) y Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE),

demostrando que Kriging Ordinario ofrece estimaciones más precisas y con menor sesgo. En variables como limo y potasio, Kriging arroja valores de ME más cercanos a cero (por ejemplo, -0,2261 para limo y 0,0558 para potasio), mientras que IDW presenta errores más elevados. Asimismo, Kriging registra valores menores de RMSE en casi todas las variables analizadas, lo cual refuerza su capacidad para representar con mayor fidelidad la variabilidad espacial del suelo. Esta superioridad metodológica se acentúa en indicadores claves de fertilidad como el pH, la materia orgánica (MO) y el nitrógeno, donde Kriging muestra un desempeño más sólido y confiable. Aunque el método IDW logra resultados aceptables en algunos casos como en la estimación del nitrógeno (RMSE = 0,0309), su mayor variabilidad en los errores, especialmente en componentes como limo y arcilla, lo convierte en una opción menos precisa. En consecuencia, el método de Kriging se posiciona como la herramienta más robusta para el análisis geoestadístico del suelo, ya que permite generar mapas con menor sesgo y mayor exactitud. Tal como lo señalan Sahu et al. (2020), las técnicas de interpolación como Kriging son fundamentales para interpretar la distribución espacial de propiedades edáficas, facilitando así la toma de decisiones técnicas en el manejo agrícola y la planificación del uso sostenible del recurso suelo.

Tabla 24. Indicadores de fertilidad del suelo de MSE y EP

MÉTODO	VARIABLE	MSE	EP
IDW	Arena	6,9323	58,6131
	Arcilla	12,4742	22,9392
	Limo	16,0677	15,4331
	pH	0,0856	22,4362
	MO	0,1187	25,8161
	N	0,0010	23,6228
	K	9,1420	45,2667
	P	0,4885	50,8287
KRIGING	Arena	6,4281	61,6235
	Arcilla	11,5869	28,4204
	Limo	14,8393	21,8982
	pH	0,0724	34,4298
	MO	0,1089	31,9459
	N	0,0009	26,8647
	K	8,9476	46,4306
	P	0,4205	57,6819

Donde los resultados mostrados en la Tabla 24, entre la comparación de los métodos de interpolación espacial IDW y Kriging Ordinario, usando como indicadores el Error Cuadrático Medio (MSE) y la Eficiencia de Predicción (EP), demuestra que el Kriging Ordinario ofrece mejores estimaciones globales para la mayoría de las variables edáficas. Por ejemplo, se obtuvieron valores de MSE más bajos en Kriging para variables como limo (14,8393 vs. 16,0677) y pH (0,0724 vs. 0,0856), lo que indica un mayor ajuste a los valores reales y confirma su mayor precisión. Este resultado es consistente con lo señalado por Johnston et al. (2001), quienes afirman que un MSE reducido refleja una mayor exactitud en la predicción punto a punto. Si bien el método IDW mostró ligeras ventajas en algunos valores de EP para variables como arena, arcilla y limo, estos casos no invalidan la superioridad del Kriging Ordinario, ya que en indicadores clave de fertilidad como fósforo (P), materia orgánica (MO) y pH, también mostró un mejor desempeño en EP. Es importante considerar, como indica Déleg (2018), que valores positivos de EP entre 0 y 100% reflejan pronósticos más confiables que el uso de la media muestral, mientras que valores negativos indicarían lo contrario; en este estudio, todos los indicadores presentaron valores positivos, destacando una eficiencia de predicción que va desde 8,61 % (CIC) hasta 91,60 % (K), ubicándose dentro del rango aceptable. Aunque algunos estudios reportan mejores resultados con IDW, como mencionan Inocencio y Florida (2022), ello no contradice estos hallazgos, ya que la efectividad del método puede variar según las condiciones espaciales específicas de cada zona. En conjunto, se concluye que el Kriging Ordinario alcanza un equilibrio más favorable entre precisión global y predicción puntual, posicionándose como el método más confiable para representar la variabilidad espacial de atributos edáficos en contextos de diagnóstico y manejo agronómico.

V. CONCLUSIONES

1. Se concluye que los suelos del fundo “Beker” presentan alta variabilidad y deficiencias en pH, nitrógeno y fósforo, lo que requiere un manejo agrícola específico. El uso del Kriging Ordinario permitió una caracterización más precisa de la fertilidad del suelo, demostrando que la interpolación avanzada es esencial para optimizar la fertilización, reducir costos y favorecer una agricultura sostenible en el distrito de Panao.
2. En conclusión, el análisis exploratorio de datos evidenció una variabilidad controlada y coherente en los indicadores del suelo. Donde la textura mostró un coeficiente de variación moderado, mientras que el pH fue bajo y los demás indicadores químicos moderados. La normalidad no se cumplió para potasio y fósforo, reflejando cierta heterogeneidad. También el mapa de Voronoi confirmó un muestreo homogéneo, y los análisis de tendencia y semivarianza indicaron que la variabilidad aumenta con la distancia, lo que demuestra una estructura espacial definida y representativa del área estudiada.
3. En síntesis, el método de Kriging Ordinario (KO) demostró ser más eficiente y preciso que el IDW al representar la variabilidad espacial del terreno, proporcionando una distribución más coherente y realista de los indicadores de fertilidad del suelo. Este método permitió identificar con mayor exactitud las áreas con deficiencias nutricionales y optimizar la interpretación de parámetros críticos como el pH y la materia orgánica. Además, el semivariograma experimental mostrando una adecuada correspondencia con los modelos teóricos esférico, gaussiano y exponencial, confirmando una dependencia espacial moderada en la mayoría de los indicadores. En conjunto, estos resultados evidencian que el Kriging Ordinario ofrece mayor solidez, precisión y soporte técnico-científico en el análisis y modelado de la variabilidad edáfica del suelo.
4. Concluyendo que el Kriging Ordinario (KO) demostró ser más preciso y confiable que el método IDW en la estimación de los indicadores de fertilidad del suelo del fundo “Beker”. Su eficiencia de predicción positiva y los valores adecuados del Error medio y la Raíz del error cuadrático medio, confirmando la validez y solidez del modelo, y permitiendo una representación espacial más coherente y útil para el diagnóstico del suelo y la planificación agronómica dentro de los sistemas convencionales de producción.

VI. PROPUESTAS A FUTURO

1. Será fundamental implementar prácticas agronómicas sostenibles y eficientes dentro del sistema convencional, orientadas a corregir las limitaciones edáficas del suelo. Usando de enmiendas calcáreas para neutralizar la acidez y una fertilización técnicamente planificada que compense las deficiencias de nitrógeno, fósforo y potasio. Asimismo, el monitoreo continuo de las propiedades del suelo, junto con la aplicación de herramientas de agricultura de precisión adaptadas al sistema convencional, permitirá optimizar la eficiencia de la fertilización, mejorar la productividad del cultivo de *Solanum tuberosum* y fortalecer la sostenibilidad del sistema agrícola regional.
2. Se recomienda aplicar modelos RIM (Relación Índice-Medio) incorporando variables topográficas y factores de manejo del suelo para comprender mejor la variabilidad espacial de la fertilidad. El Kriging Ordinario se considera el método más preciso para estimar la distribución de nutrientes, y su integración en la planificación agrícola permitirá optimizar recursos, ajustar prácticas de manejo y promover una agricultura tecnificada y sostenible en zonas de alta variabilidad edáfica como Panao.
3. Se propondrá fortalecer la técnica de interpolación Kriging mediante la integración de muestreo edáfico, SIG, sensores remotos y modelos hidrológicos, para lograr una evaluación más completa de la fertilidad del suelo. Donde las limitaciones podrán reducirse con una planificación adecuada del muestreo, validación de datos y capacitación técnica. Además, incluir variables como altitud, estacionalidad y lixiviación en muestreos periódicos permitirá mejorar la precisión del análisis y fomentar una gestión agrícola más sostenible y eficiente en el cultivo de papa.

VII. REFERENCIAS

- Abdel, M., Zakarya, Y., Metwaly, M. & Koubouris, G. (2021). Deciphering soil spatial variability through geostatistics and interpolation techniques. *Sustainability (Switzerland)*, 13(1). <https://doi.org/10.3390/su13010194>
- Acosta, D. (2022). Análisis Espacial y Temporal de la Cobertura de Vegetación y Humedad del Suelo, Mediante Imágenes Landsat, en la Zona de Influencia de la Represa Cuchoquesera, Región Ayacucho. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Agraria de la Selva]. Repositorio.
- Aguilar G. & Ramírez, (2015). Monitoreo a procesos de restauración ecológica, aplicado a ecosistemas terrestres. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander Von Humboldt (IAvH). Bogotá D.C., Colombia. 250 pp.
- Alcaraz, M., Vázquez-Suñé, E., Velasco, V. & Diviu, M. (2016). Inverse Distance Weighting. En *Encyclopedia of Mathematical Geosciences* (pp. 666–672). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-85040-1_166
- Arciniegas, E. & Gómez, N. (2018). Variabilidad espacial de algunas propiedades físicas y químicas de los suelos, con diferentes sistemas de manejo [Tesis de pregrado, Universidad de los Llanos]. Repositorio UNILLANOS. <https://repositorio.unillanos.edu.co/handle/001/1375>
- Aróstegui, A. (2022). Distribución espacial de las propiedades del suelo en un área de producción de Palma Aceitera (*Elaeis guineensis* Jacq) de Nueva Libertad, provincia de Tocache, departamento de San Martín. [Tesis de pregrado, en la Universidad Nacional Agraria de la Selva]. <https://hdl.handle.net/20.500.14292/2475>
- Azuka, C., & Igué, A. (2020). Spatial variability of soil properties under different land uses in the koundri catchment, benin. *Spanish Journal of Soil Science*, 10(1), 45–64. <https://doi.org/10.3232/SJSS.2020.V10.N1.04>
- Ballabio, C., Lugato, E., Fernández, O., Orgiazzi, A., Jones, A., Borrelli, P., Montanarella, L. & Panagos, P. (2019). Mapping LUCAS topsoil chemical properties at European scale using Gaussian process regression. *Geoderma*, 355. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.113912>
- Blanco, A. (2015). Estudio de la distribución espacial y cartografía digital de algunas propiedades físicas, químicas e hidrodinámicas de suelos de la Cuenca del Segura. Facultad de Biología. Retrieved <https://digitum.um.es/xmlui/bitstream/10201/46968/1/TESIS> from ARANTZAZU

2015.pdf

- Blog Agricultura. (s.f.). *Etapas fenológicas de la papa*. Página Web
<https://blogagricultura.com/etapas-fenologicas-papa/>
- Bohorquez, J. (2022). *Estadística Espacial y Espacio-Temporal para Campos Aleatorios Escalares y Funcionales*. Universidad Nacional de Colombia.
- Cabrera, E. (2024). *¿Cuál es la mejor luna para sembrar papa?* Página Web
<https://blog.cambiagro.com/actualidad/cual-es-la-mejor-luna-para-sembrar-papa/>
- Cabrero, M. y Garcia, A. (2022.) *Análisis estadístico de datos espaciales con 2GIS y R*. Editorial Universidad Nacional de Educación a Distancias Madrid.
https://www.google.com.pe/books/edition/AN%C3%81LISIS_ESTAD%C3%8DSTICO_DE_DATOS_ESPACIAL/7N9tEAAAQBAJ?hl=es-419&gbpv=1&dq=geoestad%C3%ADstica&pg=SA2-PA78&printsec=frontcover
- Canchala, T., Carvajal, Y., Ocampo, C., Loaiza, W., Mera, J. y Triana, J. (2024). *Atlas eventos extremos de precipitación en Nariño*. Editorial, Universidad del valle. <https://www.google.com.pe/books/edition/Atlas/TdAzEQAAQBAJ?hl=es-419&gbpv=1&dq=kriging+ordinario&pg=PA80&printsec=frontcover>
- Carrero, M. (2023). *Arqueología computacional del territorio, métodos y técnicas para estudiar decisiones humanas en paisajes pretéritos*. Editorial Archaeopress Publishing TTD.
https://www.google.com.pe/books/edition/Arqueolog%C3%ADa_computacional_del_territori/dGrfEAAAQBAJ?hl=es-419&gbpv=1
- Castro, M., García, D. & Jiménez, A. (2017). Comparación de técnicas de interpolación espacial de propiedades del suelo en el piedemonte llanero colombiano. *Revista Tecnura* 21 (53), 78-95. <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2017.3.a05>
- Chen, F. & Liu, C. (2012). Estimation of the spatial rainfall distribution using inverse distance weighting (IDW) in the middle of Taiwan. *Paddy and Water Environment*, 10(3).
<https://doi.org/10.1007/s10333-012-0319-1>
- China, A., & Rodríguez, L. (2021). Comportamiento geoespacial de algunas propiedades del suelo en el cultivo de la caña de azúcar. *Revista Ingeniería Agrícola*. 11(1), e01.
<https://www.redalyc.org/journal/5862/586269368001/html/>
- Déleg, X. (2018) “Determinación de la variabilidad espacial de las características físicas del suelo en la parcela Experimental Iruquis. [Tesis de pregrado, Universidad de Cuenca]. Repositorio UCUENCA.
<http://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/30227/1/Trabajo%20de%20Titulaci%C3%B3n.pdf>

- Denton, O. A., Aduramigba-Modupe, V. O., Ojo, A. O., Adeoyolanu, O. D., Are, K. S., Adelana, A. O., Oyedele, A. O., Adetayo, A. O., & Oke, A. O. (2017). Assessment of spatial variability and mapping of soil properties for sustainable agricultural production using geographic information system techniques (GIS). *Cogent Food & Agriculture*, 3(1), 1279366. <https://doi.org/10.1080/23311932.2017.1279366>
- Díaz, M. (s.f.). Geoestadística aplicada. ESMG-MX. Recuperado de <https://www.esmg-mx.org/media/courses/geoestadistica/GeoEstadistica.pdf>
- Duran, R. (2022). *Efecto de abonos orgánicos en el rendimiento del cultivo de papa (Solanum tuberosum L.) variedad Canchan en Rumichaca – Panao*. [Tesis de pregrado, en la Universidad Nacional Hermilio Valdizán]. Recuperado de <https://hdl.handle.net/20.500.13080/7372>
- Ecomandaga. (2018). El suelo, muchos más de lo que pisamos. <https://ecomandanga.org/2018/07/12/el-suelo-mucho-mas-de-lo-que-pisamos/>
- Escobar, P. Y Bilbao, J., (2020). *Investigación y educación superior*. Editorial LULU.com. https://www.google.com.pe/books/edition/INVESTIGACION_Y_EDUCACION_SUPERIOR/W67WDwAAQBAJ?hl=es-419&gbpv=1&dq=Estado+del+arte&pg=PA39&printsec=frontcover
- Escudero, G. y Morera, J. (2022). *Optimización del plan de Kriging ordinario mediante la validación cruzada en la estimación de recursos*. [Tesis de pregrado, en la Universidad Privada del Norte]. Recuperado de <https://hdl.handle.net/11537/33089>
- Esri. (2021). Understanding ordinary kriging. En ArcGIS Desktop Help. Recuperado de <https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/latest/extensions/geostatistical-analyst/understanding-ordinary-kriging.htm>
- Fabian, Y. (2022). Evaluación de la concentración de cadmio y plomo en el suelo y tubérculos, de un cultivo convencional y orgánico de papa (*Solanum tuberosum*), en el distrito de Panao, provincia de Pachitea – Huánuco 2022. [Tesis de pregrado, en la Universidad de Huánuco]. Repositorio. <https://repositorio.udh.edu.pe/bitstream/handle/20.500.14257/4028/Fabi%c3%a1n%20C%c3%a9spedes%2c%20Ying%20Yeserton.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- FAO Food and Agriculture Organization of the United Nations. 2019. Disponible: *Faoestat*. <http://www.fao.org/faostat/en/#data>. Consultado: 1/feb/ 2019. [Links]

- Flores, J. & Taipe, M. (2023). *Efectos de los Momentos de Aplicación de Abono Verde en la Producción Orgánica de Solanum tuberosum, variedad "Canchan" en Acobamba – Huancavelica*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Huancavelica]. Repositorio. <https://apirepositorio.unh.edu.pe/server/api/core/bitstreams/0c598400-c87b-4e8f-a028-f9b3f05e0ec4/content>
- Gaibor, F., Espinosa, J., Cartagena, Y., Parra, R., Torres Carrera, C. & Alvarado-Ochoa, S. (2024). Eficiencia de uso del nitrógeno por el cultivo de papa (*Solanum tuberosum* L.) en suelos volcánicos de Chimborazo, Ecuador. [Artículo Científico Siembra, 11(2), e2665. <https://doi.org/10.29166/siembra.v11i2.2665>
- Galindo, J., Vargas, R., Martínez, C. y Franco, C. (2024). Análisis de variación espacial de la fertilidad del suelo para la delimitación de zonas de manejo homogéneo en agricultura de precisión. *Revista científica Dékamu agropec*, 5, (2), e289. <https://revista.unibagua.edu.pe/index.php/dekamuagropec/article/view/289/367>
- García, P. (2021). *Morfología y concentración de hierro y zinc en tubérculos de clones avanzados de papas nativas (Solanum spp.) en Cusco* [Tesis de pregrado de la Universidad Nacional Agraria La Molina]. <https://hdl.handle.net/20.500.12996/5065>
- Giraldo, R. (2011). Introducción a la geoestadística. Universidad Nacional de Colombia.
- González, M. y Pérez de Vargas, A. (2009). Estadística aplicada una visión instrumental. Madrid, España: Diaz de Santos Ediciones.
- Goovaerts, P. (1997). Geostatistics for natural resources evaluation. New York: Oxford University Press.
- Griffith, D., & Chun, Y. (2016). Spatial Autocorrelation and Uncertainty Associated with Remotely-Sensed Data. *Remote Sensing*, 8(7), 535. <https://doi.org/10.3390/rs8070535>
- Havlin, J., Tisdale, S., Nelson, W. & Beaton, J. (2014). *Soil Fertility and Fertilizers*, 8th Edition. Pearson.
- Herrera, J., Ramírez, L., Guzman, R y Gordon H. (2021) *Evaluación de la fertilidad del suelo y la nutrición de los cultivos*. Editorial Científico-Técnica. https://www.google.com.pe/books/edition/Evaluaci%C3%B3n_de_la_fertilidad_del_suelo_y/1GGKEAAAQBAJ?hl=es-419&gbpv=1&dq=Indicadores+de+fertilidad+fisicoqu%C3%ADmicos+del+suelo&pg=PT384&printsec=frontcover
- Inocencio, E. & Florida, N. (2022). *Comportamiento espacial de indicadores fisicoquímicos y calidad del suelo en plantación de Theobroma cacao en Padre Abad, Ucayali, Perú*. La

- Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica, 25(2), 1-10.
<http://doi.org/10.31910/rudca.v25.n2.2022.2320>
- Instituto de Investigaciones Agropecuarias [INIA] (2015). *La papa en el Norte Chico. Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Revista Redagricola.*
<https://biblioteca.inia.cl/server/api/core/bitstreams/9d777c6a-cbc3-4f55-8b47-96af6918e162/content>
- Isaaks, E. & Srivastava, R. (1989). *Applied geostatistics*. New York. New York: Oxford University Press.
- Jaramillo, D. (2006). Efecto de la variabilidad sistemática de la producción de fríjol en experimentos de fertilización. Segunda siembra. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 59 (1), 3147–3165.
http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0304-28472006000100006&lng=en&nrm=iso&tlng=es
- Jaramillo, D., González, H., & Álvarez, F. (2008). Variabilidad espacial de algunas propiedades físico - mecánicas de suelos de textura pesada. *CES Medicina Veterinaria y Zootecnia*, 3(2), 10–19. <https://doi.org/10.21615/284>
- Johnston, K., Ver Hoef, J., Krivoruchko, K., & Lucas, N. (2001). *Using ArcGIS geostatistical analyst* (Vol. 380). Esri Redlands.
- Kılıç, M., Gündoğan, R., Günal, H. & Cemek, B. (2022). Accuracy Assessment of Kriging, artificial neural network, and a hybrid approach integrating spatial and terrain data in estimating and mapping of soil organic carbon. In *PLoS ONE* (Vol. 17, Issue 5 5).
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0268658>
- Lagacherie, P. & McBratney, A. (2006). Spatial soil information systems and spatial soil inference systems: Perspectives for digital soil mapping. *Developments in Soil Science*, 31, 3–22.
- Londoño, C. y Rincón, J. (2022). *Aplicación del método del Ojo de Buey en estudios de interpolación espacial: una herramienta para la toma de decisiones en ingeniería.* *Revista Colombiana de Geomática*, 16(2), 55-67. <https://revistas.sgc.gov.co/index.php/rcg/article/view/745>
- Mao, Y., Sang, S., Liu, S., & Jia, J. (2014). Spatial distribution of pH and organic matter in urban soils and its implications on site-specific land uses in Xuzhou, China. *Comptes Rendus - Biologies*, 337(5), 332–337. <https://doi.org/10.1016/j.crv.2014.02.008>

- Marín, G., Cahui, A., Gallegos, J., Bolívar, N. y Enríquez, V. (2021). Modelamiento kriging en la tasación de precios prediales urbanos. *Revista Investigación & Desarrollo*, 21(1), 109–118. <https://doi.org/10.23881/idupbo.021.1-9i>
- Mascorro, J. & Reyes, S. (2007). Variabilidad Espacial de Diversas Propiedades Químicas del Huerto Frutícola de la FESC Campo 4/UNAM. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Autónoma de México]. Repositorio. 0625508_importante.pdf
- Meijerink, A., Brouwer, H., Mannaerts, C. & Valenzuela, C. (1994). *Introduction to the use of Geographic Information Systems for practical Hydrology*. Enschede: International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences (ITC).
- MIDAGRI (Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego). (2024). *Perfil productivo departamental*. <https://elperuano.pe/noticia/244487-midagri-variedades-de-papa-con-alta-calidad-aumentan-70-rendimiento-en-140000-hectareas>
- MINAGRI - Ministerio de Agricultura y Riego. (2017). Papa: características de la producción nacional y de la comercialización en Lima metropolitana. Ministerio de Agricultura y Riego, Dirección General de Políticas Agrarias. Lima, Perú. 13 p.
- MINAGRI - Ministerio de Agricultura y Riego. (2019). Papa: características de la producción nacional y de la comercialización en Lima metropolitana. Ministerio de Agricultura y Riego, Dirección General de Políticas Agrarias. Lima, Perú.
- Movable type Scripts (2025). Convert between Latitude/Longitude & UTM coordinates / MGRS grid references. Página Web <https://www.movable-type.co.uk/scripts/latlong-utm-mgrs.html>
- MUNDOAGRO. (2023). Empresa editorial especializada en el sector silvoagropecuario con múltiples soportes, destinada a satisfacer las necesidades de información y análisis del sector. <https://mundoagro.cl/que-nos-indica-la-textura-de-un-suelo-y-como-determinarla/#>
- Okabe, A., Boots, B., Sugihara, K., & Chiu, S. N. (2000). *Spatial tessellations: Concepts and applications of Voronoi diagrams* (2nd ed.). John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/9780470317013>
- Olaya V. (2014). *Sistemas de Información Geográfica*. https://www.icog.es/TyT/files/Libro_SIG.pdf.
- Oliver, M., & Webster, R. (2014). A tutorial guide to geostatistics: Computing and modelling variograms and kriging. *CATENA*, 113, 56–69. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2013.09.006>

- Ortega, R., & Flores, L. (1999). *Introducción al manejo sitio - específico*. Chile: Ministerio de Agricultura, Instituto de Investigaciones Agropecuarias.
- Ovalles, F. (2001). *Memorias del curso de Geoestadística Aplicada a Estudios Ambientales con Énfasis en Suelos*. Manizales: Universidad de Caldas.
- Panday, D., Ojha, R., Chalise, D., Das, S., & Twanabasu, B. (2019). Spatial variability of soil properties under different land use in the Dang district of Nepal. *Cogent Food & Agriculture*, 5(1), 1600460. <https://doi.org/10.1080/23311932.2019.1600460>
- Peña, R. (2020). *Manual técnico para la interpretación de análisis de suelos y fertilización de cultivos*. Editorial de la Facultad de Ciencias Agropecuarias Programa de Ingeniería Agronómica.
https://www.google.com.pe/books/edition/Manual_t%C3%A9cnico_para_la_interpretaci%C3%B3n/HfD6DwAAQBAJ?hl=es-419&gbpv=1&dq=variabilidad+espacial&pg=PA23&printsec=frontcover
- Pereira, L., Santos, G., Marques, E., Pires, J. & Renó, R. (2022). Construction of multidimensional geomechanical models with IDW and using R language. *Journal of South American Earth Sciences*, 116. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2022.103775>
- Petitgas, P. (1996). Geostatistics and their applications to fisheries survey data. En *Computers in fisheries research* (pp. 113–142). Springer.
- Pham, T., Kappas, M., Huynh, C. Van & Nguyen, L. (2019). Application of ordinary kriging and regression kriging method for soil properties mapping in hilly region of central Vietnam. *ISPRS International Journal of GeoInformation*, 8(3). <https://doi.org/10.3390/ijgi8030147>
- Porta, J., López, M. & Poch, R. (2008). *Introducción a la Edafología: uso y protección del suelo*. Madrid; Ediciones Mundi-Prensa
- Pucha, F. y Fries, A. (2023). *Manual de ArcGIS pro*. Editorial ArcGreek.
https://www.google.com.pe/books/edition/Manual_de_ArcGIS_Pro/wBTiEAAAQBAJ?hl=es-419&gbpv=1&dq=Distancia+Inversa+Ponderada&pg=PA88&printsec=frontcover
- Ramírez, V. (2024). Metodología geoespacial para procesar la composición química de un suelo destinado a la producción de zanahoria (*Daucus carota*), mediante diferentes herramientas software. [Tesis de pregrado, Universidad de Ciencias Ambientales y Aplicadas]. Repositorio.
<https://repository.udca.edu.co/server/api/core/bitstreams/9440fb67-fc80-46e1-beb4-0414670376bc/content>

- Redrován, K. (2018). Aplicación de sistemas de información geográfica para el análisis espacial para la variable radiación solar en la ciudad de Cuenca. [Tesis de pregrado, Universidad Politécnica Salesiana-Sede Cuenca]. Repositorio UPS, <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/15631/1/UPS-CT007681.pdf>
- Rogelis, M. (2020). *Operational flood forecasting warning an response for multi-scale flood risk in Developing citites*. Editorial CRC Press. https://www.google.com.pe/books/edition/Operational_Flood_Forecasting_Warning_a_n/pO3eDwAAQBAJ?hl=es-419&gbpv=0
- Rojas, C. (2006). Interpretación de la disponibilidad de Fósforo en los Suelos de Chile. En CAMPILLO, Ricardo. Manejo de los recursos naturales en el sistema de incentivos para 100 la recuperación de suelos degradados de la Araucanía. Temuco: Instituto de Investigaciones Agropecuarias, 43 p.
- Ruiz, G. (2016). Estudio Físicoquímico del Suelo del Sistema de Andenería del Centro Poblado Caca, Provincia de Yauyos, Lima. [Tesis de pregrado, Pontificia Universidad Católica del Perú]. Repositorio. <https://tesis.pucp.edu.pe/server/api/core/bitstreams/9990fc3b-56c1-44de-a1f3-610a174169bc/content>
- Sahu, N., Reddy, G., Kumar, N., Nagaraju, M., Srivastava, R., & Singh, S. (2020). Spatial variability of Soil Macronutrients on Basaltic landscape of Central India: A Geostatistical approach. 9, 77–86. <https://doi.org/10.37273/chesci.cs172050121>
- Selmy, S., El-Aziz, S., El-Desoky, A. & El-Sayed, M. (2022). Characterizing, predicting, and mapping of soil spatial variability in Gharb ElMawhoub area of Dakhla Oasis using geostatistics and GIS approaches. Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences, 21(6). <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2021.10.013>
- Serrano, A. (2023). *Cultivos de hortalizas, frutos rojos, aromáticos, ornamentales y beneficiosos en la Huerta ecológica*. Editorial Txetxo Serrano Ruiz de Azua. https://www.google.com.pe/books/edition/Cultivos_de_hortalizas_frutos_rojos_ arom/B6q0EAAAQBAJ?hl=es-419&gbpv=0
- Siabato, W., & Guzmán, J. (2019). La autocorrelación espacial y el desarrollo de la geografía cuantitativa. En Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía (Vol. 28, Número 1, pp. 1–22). <https://doi.org/10.15446/rcdg.v28n1.76919>
- Smith, C. (s.f.). *¿Cuánto tarda una papa en germinar?*. Página Web <https://helecho.cl/cuanto-tarda-una-papa-en-germinar/>
- Soil Survey Staff. (1993). Soil Survey Manual Usda Handbook N°18, Washington DC. 503 pp.
- Thompson, L. y Thoe, F. (2021). *Los suelos y su fertilidad*. Editorial Reverté.

- https://www.google.com.pe/books/edition/Los_suelos_y_su_fertilidad/VpIUeAAAQBAJ?hl=es-419&gbpv=1&dq=textura+del+suelo&pg=PA23&printsec=frontcover
- Tomathouse. (s.f.). *Etapas de crecimiento y periodo de maduración de la papa*. Página Web <https://esx.tomathouse.com/4/srok-sozrevaniya-kartofelya.html>
- USDA – Natural Resources Conservation Service. (s.f.). *Soil pH and Soil Health*. Recuperado de: <https://www.nrcs.usda.gov>
- Vargas, R., Galindo, J., Giraldo, R., Varón, V., Wilches, W. & Franco, C. (2023). Metodologías de interpolación y predicción espacial para el análisis de las propiedades físicas del suelo en la hoya del río Suárez (Colombia). *Siembra*, 10(1). <https://doi.org/10.29166/siembra.v10i1.4118>
- Vásquez, J. (2022). Distribución Espacial de las Propiedades Físico Químicas del Suelo, en el Sector 3 de Octubre – Distrito Hermilio Valdizán, Provincia Leoncio Prado. [Tesis para optar el grado académico de Ingeniero en Conservación de Suelos y Agua, Universidad Nacional Agraria de la Selva]. Repositorio. <https://repositorio.unas.edu.pe/server/api/core/bitstreams/14a9160f-3490-4b27-b3d8-5aa514d30ad5/content>
- Villacorta, S. (2014). Distribución espacial de las propiedades físico químicas del suelo de los palmicultores de shambillo. Recuperado el 24 de Abril de 2018, de file:///C:/Users/ACER/Downloads/TS_VJS_2014.pdf
- Vistoso, E. & Martínez, J. (2022). Importancia de la fertilidad del suelo en la producción agropecuaria.
- Webster, R. & Oliver, M. (2007). *Geostatistics for Environmental Scientists*. John Wiley & Sons, Chichester. (2.ª ed.). <http://dx.doi.org/10.1002/9780470517277>
- Ying, F. (2022). *Evaluación de la concentración de cadmio y plomo en el suelo y tubérculos, de un cultivo convencional y orgánico de papa (Solanum tuberosum), en el distrito de Panao, provincia de Pachitea – Huánuco 2022*. [Tesis de pregrado, en la Universidad de Huánuco]. Repositorio. <https://repositorio.udh.edu.pe/bitstream/handle/20.500.14257/4028/Fabi%20C%20Ying%20Yeserton.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Zhinin, F. (2024). *Determinación del Índice de Calidad de Suelo a Dos Altitudes en dos Sistemas de Labranza para el Cultivo de Papa (Solanum tuberosum L.) en Tunshi*. [Tesis de pregrado, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo - Ecuador]. Repositorio. <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/22218/1/13T01164.pdf>

ANEXOS

Panel fotográfico del campo de estudio



Figura 1. Fundo Becker



Figura 2. Toma de coordenadas con GPS



Figura 3. El cultivo de papa en el Fundo Becker

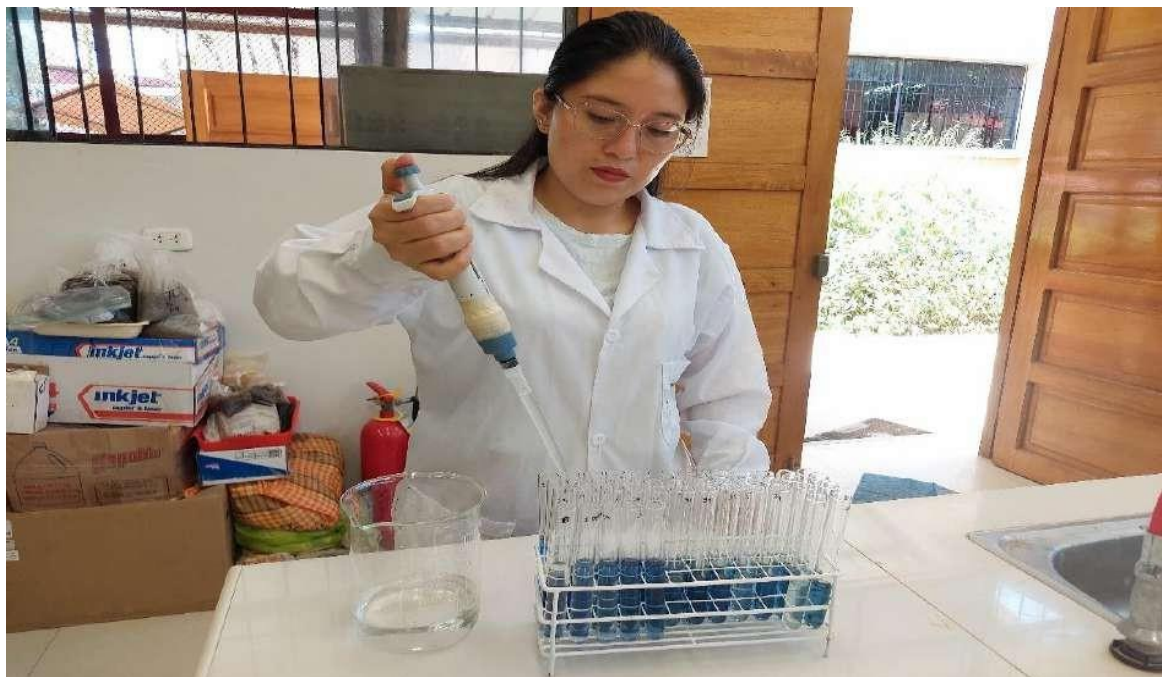


Figura 4. Adicionando 10 ml de solución de molibdato de amonio más reductor para la determinación de fosforo disponible



Figura 5. Determinando por el método de Bouyocous la clase textural.



Figura 6. El espectrofotómetro de absorción para la determinación de potasio disponible



Figura 7. Pesando muestra de suelo para la determinación de la materia orgánica



Figura 8. El espectrofotómetro de absorción para la determinación de potasio disponible



Figura 9. Determinación de muestras para potasio



Figura 10. Adicionando agua destilada



ANALISIS DE SUELOS



1. DATOS

SOLICITANTE:	MARIA ROSSY HUAMAN CIERTO	MUESTREADO POR:	MARIA ROSSY HUAMAN CIERTO
DEPARTAMENTO:	HUANUCO	FECHA DE RECEPCION:	2/05/2023
PROVINCIA:	PACHITEA	FECHA DE INCICIO DE ENSAYO:	3/05/2023
DISTRITO:	PANAO	FECHA DE REPORTE:	23/05/2023
SECTOR:	ILLA CHICO	RECIBO O FACTURA:	23014507
CULTIVO:	<i>solanum tuberosum L.</i>	OBSERVACIÓN:	--

2. RESULTADOS DEL ANÁLISIS SOLICITADO

N°	ANALISIS MECANICO				pH	M.O.	N	C	P	K	CIC	Ca	Mg	K	Na	Al	H	CICe	Bases Cambiables	Acidos Cambiables	Saturación de Aluminio	
	Arena	Arcilla	Limo	Clase Textural																		
	%	%	%																			
1	S0758-1	36	35	29	Franco Arcilloso	5.33	1.835	0.092	1.064	5.090	162.679	---	3.109	0.643	0.528	0.127	0.720	0.080	5.207	85	15	14
2	S0758-2	38	33	29	Franco Arcilloso	5.21	0.880	0.044	0.418	2.137	69.869	---	3.977	0.864	0.195	0.094	1.210	0.690	7.030	73	27	17
3	S0758-3	38	31	31	Franco Arcilloso	5.39	1.291	0.065	0.342	5.083	131.642	---	1.763	0.354	0.338	0.134	0.420	0.200	3.209	81	19	13
4	S0758-4	54	21	25	Franco Arcillo Arenoso	4.68	3.473	0.174	2.015	4.491	56.825	---	2.009	0.691	0.174	0.098	2.150	0.550	5.672	52	48	38
5	S0758-5	40	31	29	Franco Arcilloso	5.12	3.014	0.151	1.748	7.219	147.685	---	5.155	1.173	0.664	0.171	0.660	0.440	8.263	87	13	8
6	S0758-6	42	33	25	Franco Arcilloso	5.49	2.621	0.131	1.520	5.008	130.293	---	4.092	0.634	0.200	0.169	0.250	0.250	5.595	91	9	4
7	S0758-7	52	25	23	Franco Arcillo Arenoso	4.90	3.539	0.177	2.053	6.804	104.954	---	5.203	0.872	0.338	0.137	0.530	0.680	7.760	84	16	7
8	S0758-8	58	24	19	Franco Arcillo Arenoso	4.59	3.145	0.157	1.825	2.060	67.184	---	1.417	0.454	0.179	0.146	1.110	0.140	3.446	64	36	32
9	S0758-9	54	21	25	Franco Arcillo Arenoso	5.03	0.763	0.038	0.190	1.086	85.912	---	2.469	0.573	0.179	0.121	1.110	0.290	4.742	70	30	23
10	S0758-10	34	38	17	Arcilloso	4.86	1.056	0.053	0.570	1.218	92.809	---	2.558	0.769	0.177	0.053	1.200	0.610	5.366	66	34	22
11	S0758-11	60	23	17	Franco Arcillo Arenoso	4.55	3.342	0.167	1.939	1.130	58.742	---	1.080	0.503	0.092	0.025	0.810	0.250	2.760	62	38	29
12	S0758-12	48	22	29	Franco	4.50	0.760	0.038	0.306	2.051	45.280	---	1.064	0.539	0.144	0.034	0.580	0.152	2.513	71	29	23

Los Resultados presentados son válidos unicamente para las muestras ensayadas. Queda prohibida la reproducción total o parcial de este informe sin la autorización escrita del LASAE.

Los Resultados no pueden ser usados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
Tingo María

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



Carretera Central Km 1.21 - Tingo María - CELULAR 944407531



ANÁLISIS DE SUELOS



LASAE

1. DATOS

SOLICITANTE:	MARIA ROSSY HUAMAN CIERTO	MUESTREADO POR:	MARIA ROSSY HUAMAN CIERTO
DEPARTAMENTO:	HUANUCO	FECHA DE RECEPCION:	2/05/2023
PROVINCIA:	PACHITEA	FECHA DE INICIO DE ENSAYO:	3/05/2023
DISTRITO:	PANAO	FECHA DE REPORTE:	23/05/2023
SECTOR:	ILLA CHICO	RECIBO O FACTURA:	23014507
CULTIVO:	<i>solanum tuberosum L.</i>	OBSERVACIÓN:	--

2. RESULTADOS DEL ANÁLISIS SOLICITADO

N°		ANÁLISIS MECÁNICO			Clase Textural	pH	M.O. %	N %	C %	P	K	CIC	Ca	Mg	K	Na	Al	H	CICe	Bases Cambiabiles	Acidos Cambiabiles	Saturación de Aluminio
		disponible								CAMBIABLES Cmol(+)/kg						%	%	%				
		ppm	ppm	ppm						ppm	ppm		ppm	ppm	ppm					ppm	ppm	ppm
13	S0758-13	52	27	25	Franco Arcillo Arenoso	5.38	3.932	0.197	2.281	4.097	205.710	---	5.889	1.053	0.610	0.130	0.230	0.470	8.382	92	8	3
14	S0758-14	50	25	25	Franco Arcillo Arenoso	5.03	1.376	0.069	0.798	5.994	157.281	---	4.922	0.898	0.405	0.119	2.210	0.500	9.053	70	30	24
15	S0758-15	54	25	21	Franco Arcillo Arenoso	5.52	3.402	0.170	2.509	3.062	166.127	---	6.177	1.005	0.518	0.115	0.210	0.590	8.615	91	9	2
16	S0758-16	54	23	23	Franco Arcillo Arenoso	5.24	4.225	0.211	2.509	4.362	223.402	---	6.232	1.005	0.595	0.143	1.380	1.620	10.975	73	27	13
17	S0758-17	52	29	19	Franco Arcillo Arenoso	5.19	3.145	0.157	1.825	2.586	62.673	---	4.985	0.892	0.259	0.064	0.530	0.570	7.300	85	15	7
18	S0758-18	50	33	17	Franco Arcillo Arenoso	5.10	1.114	0.056	0.646	1.051	60.723	---	3.044	1.048	0.237	0.050	1.610	0.490	6.478	68	32	25
19	S0758-19	48	27	25	Franco Arcillo Arenoso	5.12	2.949	0.147	1.710	4.763	94.609	---	5.421	0.838	0.469	0.137	0.640	0.560	8.065	85	15	8
20	S0758-20	52	25	23	Franco Arcillo Arenoso	5.09	3.408	0.170	1.977	3.443	117.548	---	3.708	0.724	0.267	0.102	0.500	0.200	5.501	87	13	9
21	S0758-21	44	35	21	Franco Arcillo Arenoso	4.94	0.721	0.036	0.418	2.375	80.065	---	4.361	0.761	0.231	0.037	1.190	0.810	7.390	73	27	16
22	S0758-22	50	29	21	Franco Arcillo Arenoso	5.49	2.621	0.131	1.520	1.484	71.968	---	5.724	1.140	0.386	0.164	0.350	0.850	8.614	86	14	4
23	S0758-23	50	27	23	Franco Arcillo Arenoso	4.94	2.752	0.138	1.596	4.967	123.696	---	4.837	0.875	0.426	0.067	1.080	0.910	8.195	76	24	13
24	S0758-24	46	31	23	Franco Arcillo Arenoso	4.41	0.917	0.046	0.532	2.810	116.649	---	3.556	0.664	0.308	0.050	1.500	1.000	7.077	65	35	21

Los Resultados presentados son válidos únicamente para las muestras ensayadas. Queda prohibida la reproducción total o parcial de este informe sin la autorización escrita del LASAE.

Los Resultados no pueden ser usados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
Tingo María

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



Centro de Investigación y Referencia Científica
Laboratorio de Análisis de Suelos, Agua y Ecotoxicología
Calle 12 de Octubre N° 121 - Tingo María - CELULAR 944407531



ANÁLISIS DE SUELOS



LASAE

1. DATOS

SOLICITANTE:	MARIA ROSSY HUAMAN CIERTO	MUESTREADO POR:	MARIA ROSSY HUAMAN CIERTO
DEPARTAMENTO:	HUANUCO	FECHA DE RECEPCION:	2/05/2023
PROVINCIA:	PACHITEA	FECHA DE INICIO DE ENSAYO:	3/05/2023
DISTRITO:	PANAO	FECHA DE REPORTE:	23/05/2023
SECTOR:	ILLA CHICO	RECIBO O FACTURA:	23014507
CULTIVO:	<i>solanum tuberosum</i> L.	OBSERVACIÓN:	--

2. RESULTADOS DEL ANÁLISIS SOLICITADO

N°	ANÁLISIS MECANICO				pH	M.O.	N	C	P	K	CIC	Ca	Mg	K	Na	Al	H	CICe	Bases Cambiables	Acidos Cambiables	Saturación de Aluminio	
	Arena	Arcilla	Limo	Clase Textural																		
	%	%	%																			
25	S0758-25	40	35	25	Franco Arcilloso	5.15	2.031	0.102	1.178	3.294	196.114	---	5.515	1.403	0.554	0.094	0.320	1.280	9.166	83	17	3
26	S0758-26	44	29	27	Franco Arcilloso	5.06	1.376	0.069	0.798	2.014	213.207	---	3.145	1.773	0.428	0.068	0.580	0.320	6.314	86	14	9
27	S0758-27	40	29	31	Franco Arcilloso	4.56	1.638	0.082	0.950	2.060	124.295	---	2.188	0.819	0.374	0.068	1.150	1.200	5.799	59	41	20
28	S0758-28	50	31	19	Franco Arcillo Arenoso	4.46	2.294	0.115	1.330	1.051	35.085	---	2.176	0.495	0.167	0.038	0.320	1.110	4.306	67	33	7
29	S0758-29	54	23	23	Franco Arcillo Arenoso	4.88	2.490	0.125	1.444	2.287	58.174	---	5.665	0.925	0.292	0.089	0.680	0.320	7.971	87	13	9
30	S0758-30	46	19	31	Franco	4.26	2.097	0.105	1.216	1.661	86.362	---	3.381	0.635	0.183	0.035	2.350	0.550	7.134	59	41	33
31	S0758-31	40	33	27	Franco Arcilloso	4.73	2.687	0.134	1.558	2.640	106.453	---	5.435	0.957	0.415	0.085	0.950	0.750	8.591	80	20	11
32	S0758-32	44	19	37	Franco	4.57	1.180	0.059	0.684	3.076	117.548	---	4.462	0.837	0.303	0.071	2.130	0.210	8.013	71	29	27
33	S0758-33	36	37	17	Arcilloso	4.63	1.900	0.095	1.102	2.051	62.523	---	2.719	0.669	0.251	0.050	1.098	0.902	5.688	65	35	19
34	S0758-34	42	31	27	Franco Arcilloso	4.90	1.704	0.085	0.988	3.933	128.644	---	4.225	0.715	0.215	0.043	0.910	0.590	6.698	78	22	14
35	S0758-35	42	29	29	Franco Arcilloso	4.95	2.621	0.131	1.520	3.586	121.147	---	4.266	0.707	0.200	0.039	1.080	0.917	7.209	72	28	15
36	S0758-36	64	23	13	Franco Arcillo Arenoso	4.67	3.342	0.167	1.939	1.052	52.027	---	2.041	0.424	0.141	0.068	1.090	0.808	4.572	58	42	24
37	S0758-37	26	33	41	Franco Arcillo Limoso	4.68	1.311	0.066	0.760	1.051	94.609	---	3.338	0.751	0.164	0.055	2.210	1.590	8.108	53	47	27
38	S0758-38	44	24	33	Franco	5.24	3.801	0.190	2.205	1.083	130.893	---	4.651	0.726	0.328	0.160	0.520	0.280	6.665	88	12	8

Los Resultados presentados son válidos unicamente para las muestras ensayadas. Queda prohibida la reproducción total o parcial de este informe sin la autorización escrita del LASAE.

Los Resultados no pueden ser usados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
Tingo María

Dr. HUGO ALFREDO HUAMANI YUPANQUI

Jefe del Laboratorio de Análisis de Suelos, Agua y Ecotoxicología



Carretera Central Km 1.21 - Tingo María - CELULAR 944407531

Figuras de los semivariogramas en Kring Ordinario (KO)

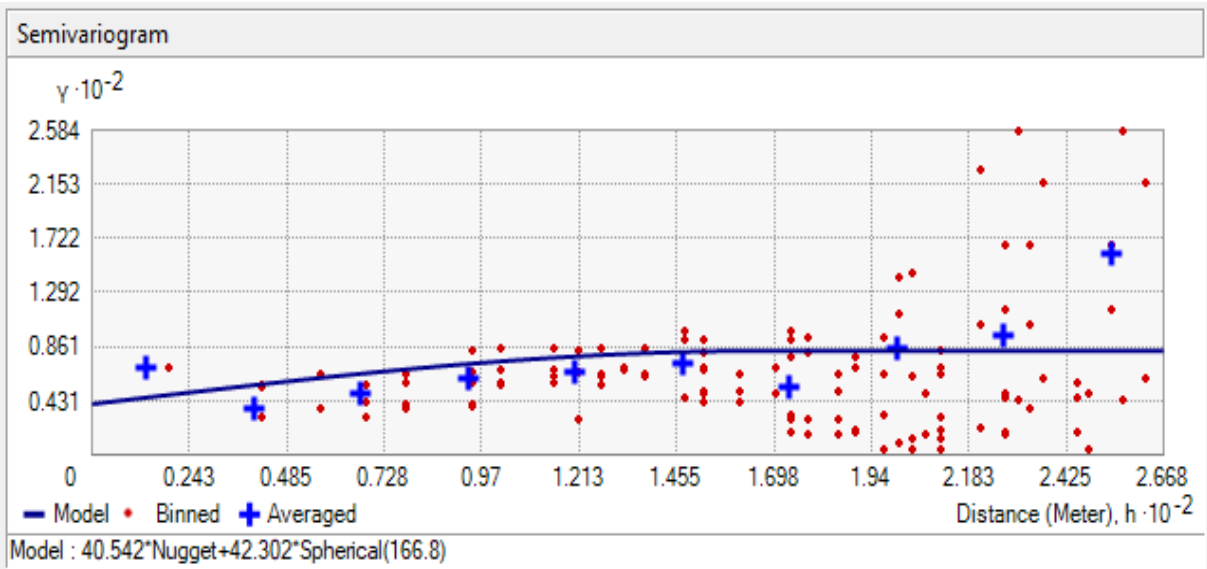


Figura 11. Arena

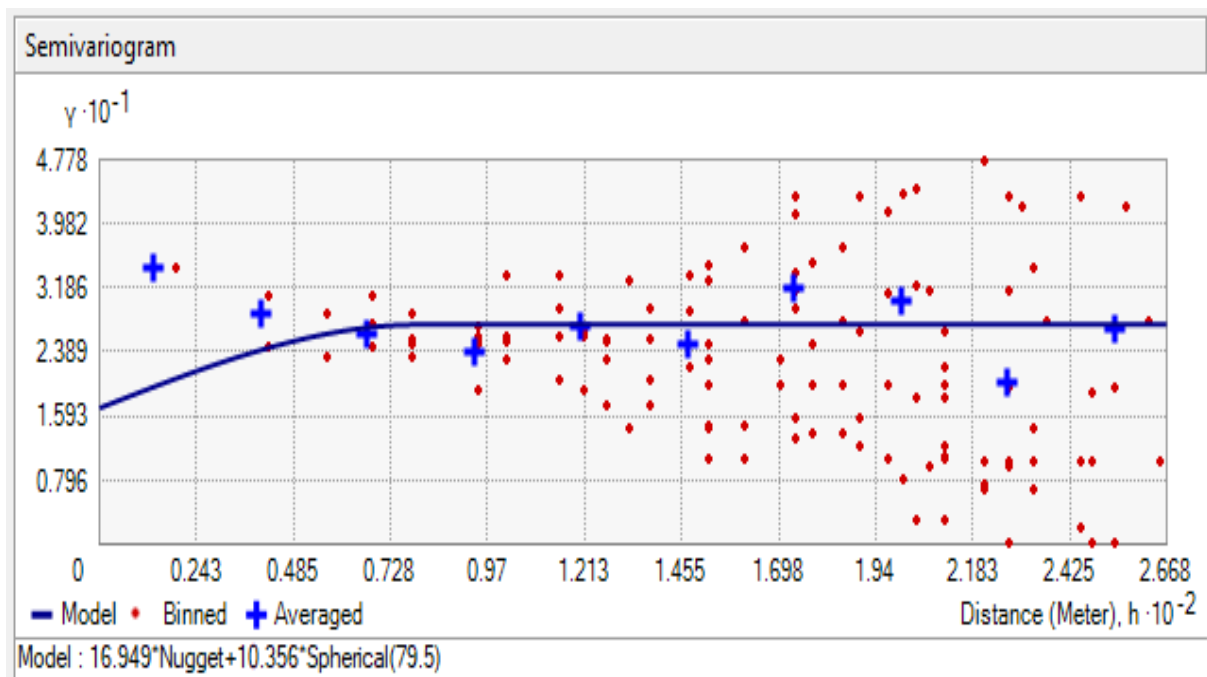


Figura 12. Arcilla

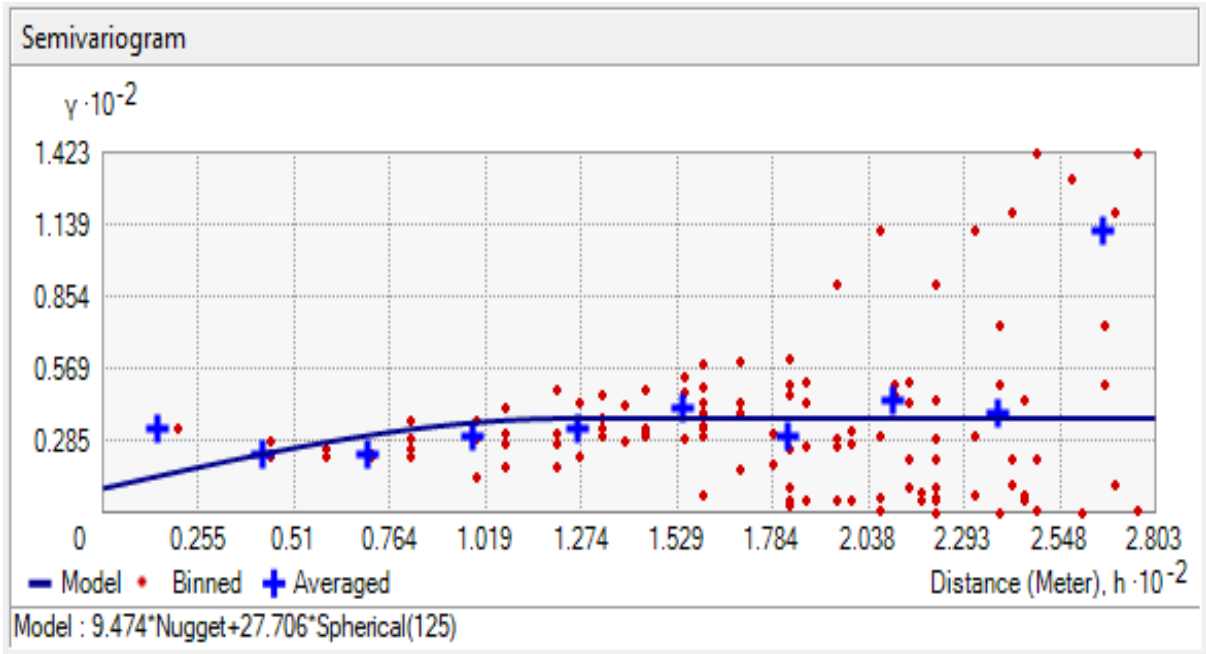


Figura 13. LIMO

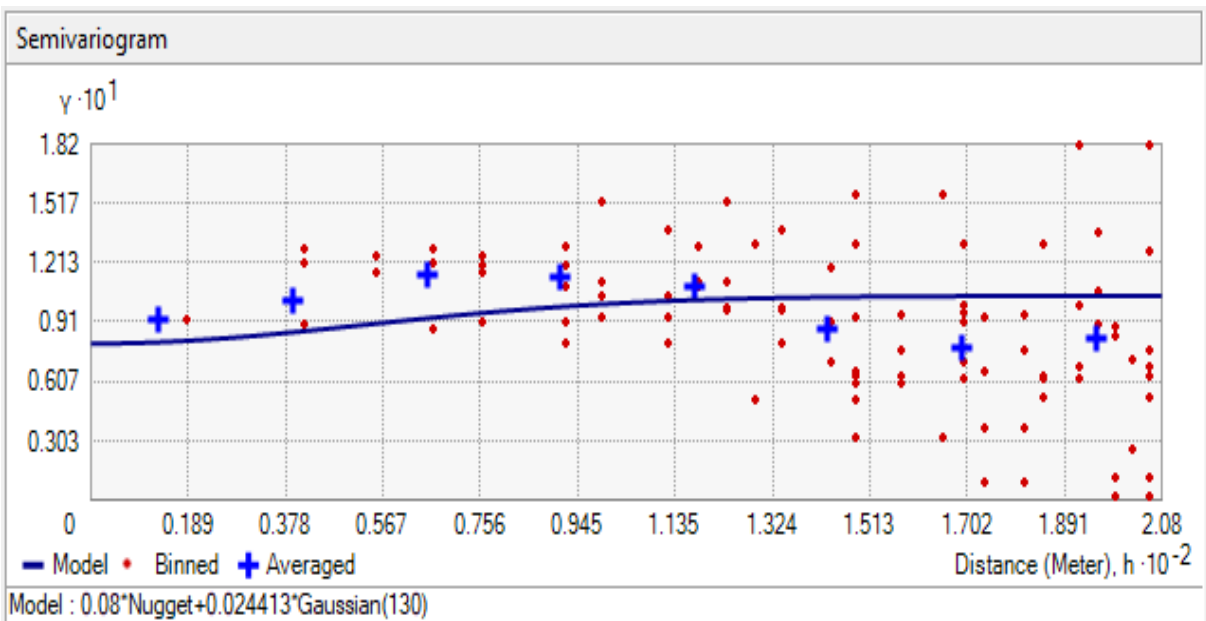


Figura 14. pH

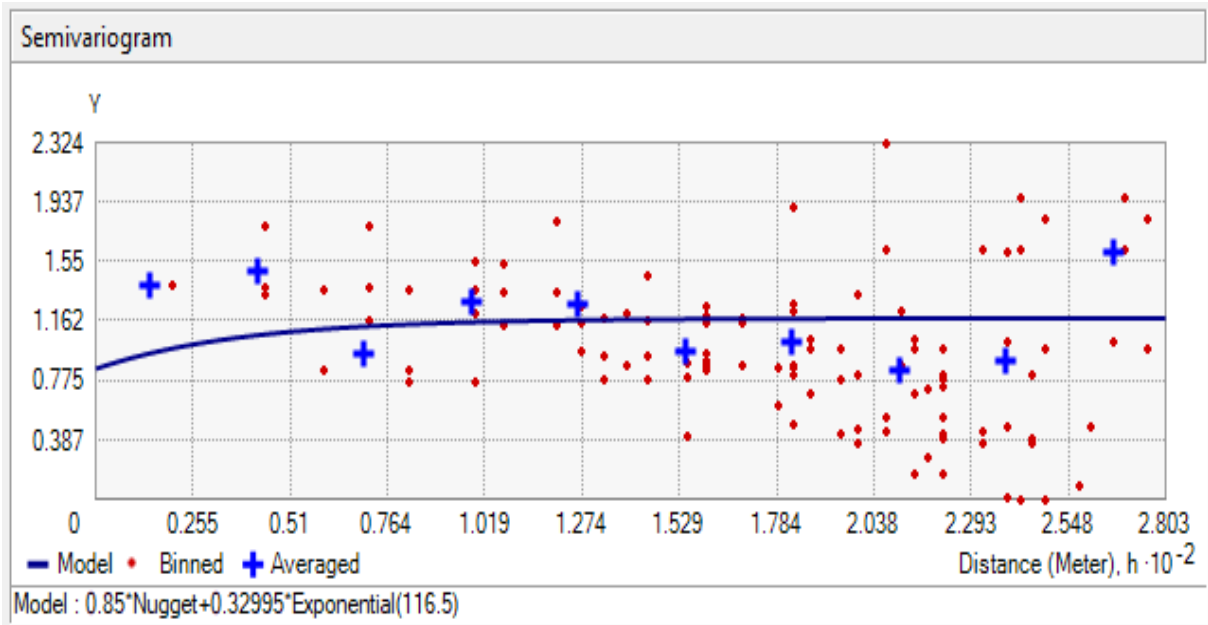


Figura 15. Materia orgánica

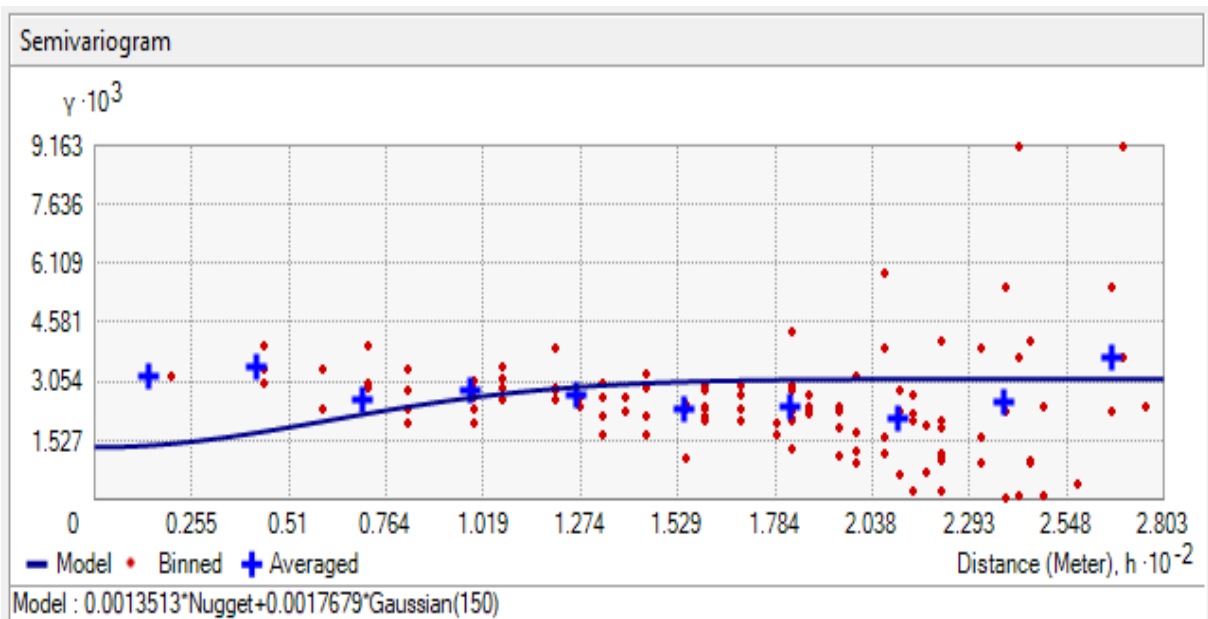


Figura 16. Nitrógeno

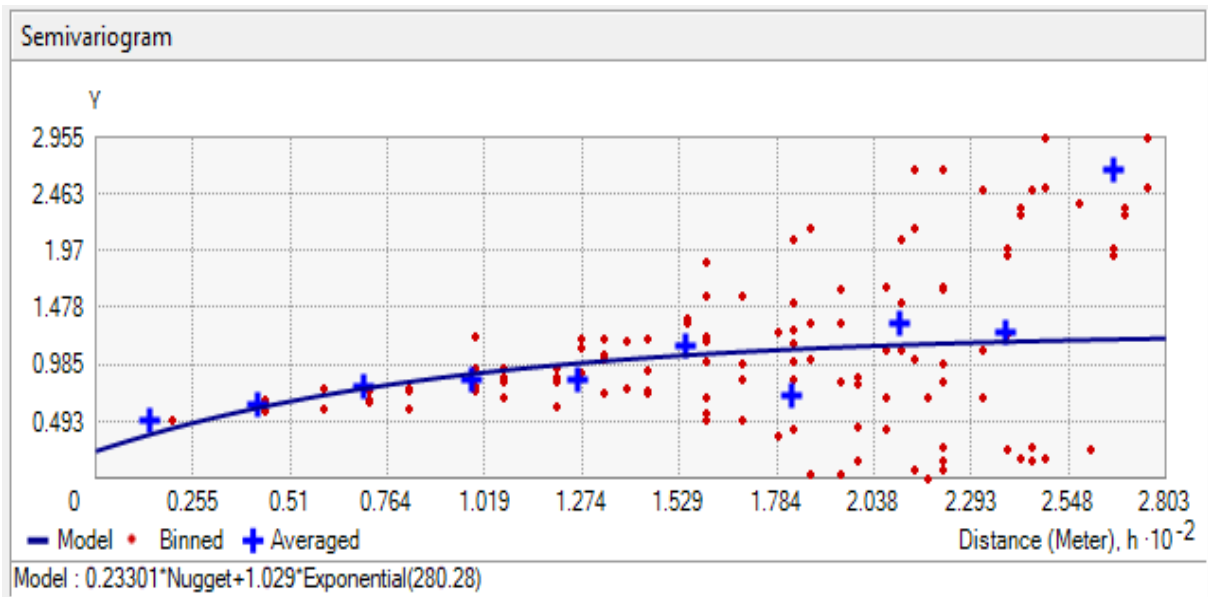


Figura 17. Fósforo

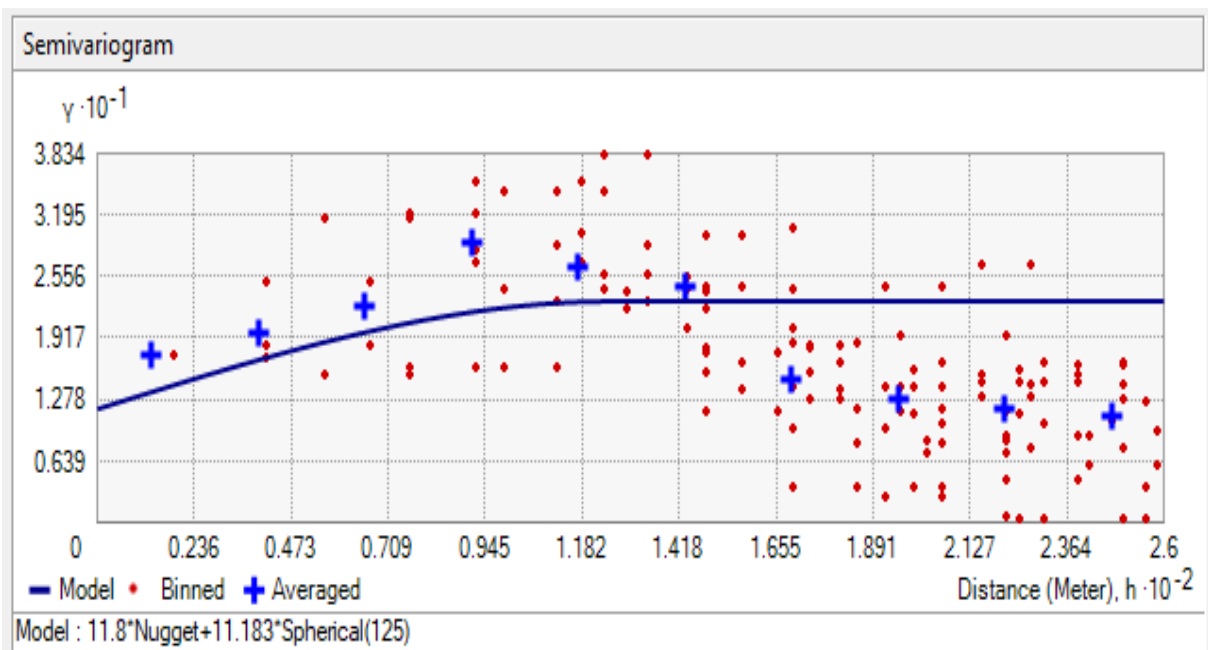


Figura 18. Potasio

Mapa de interpolación con el Kriging Ordinario (KO)

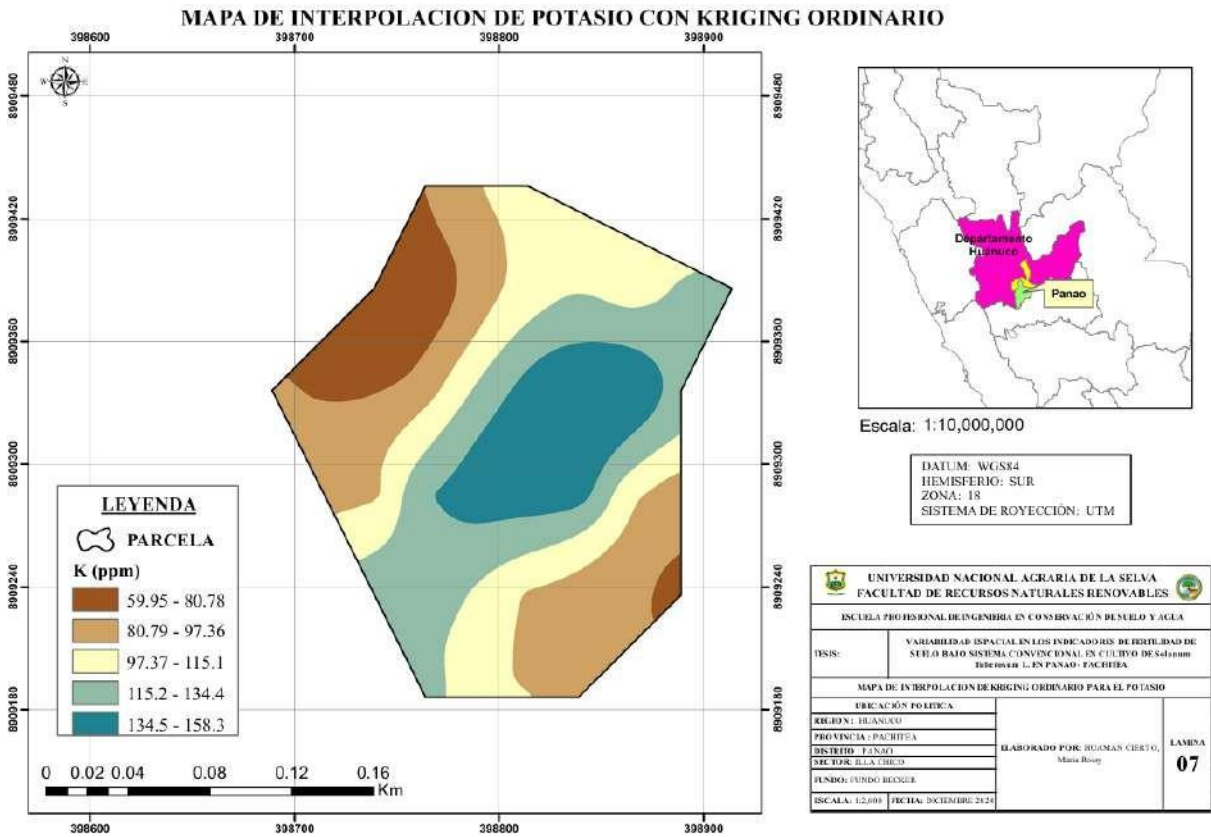


Figura 19. Mapa de la interpolación del Potasio

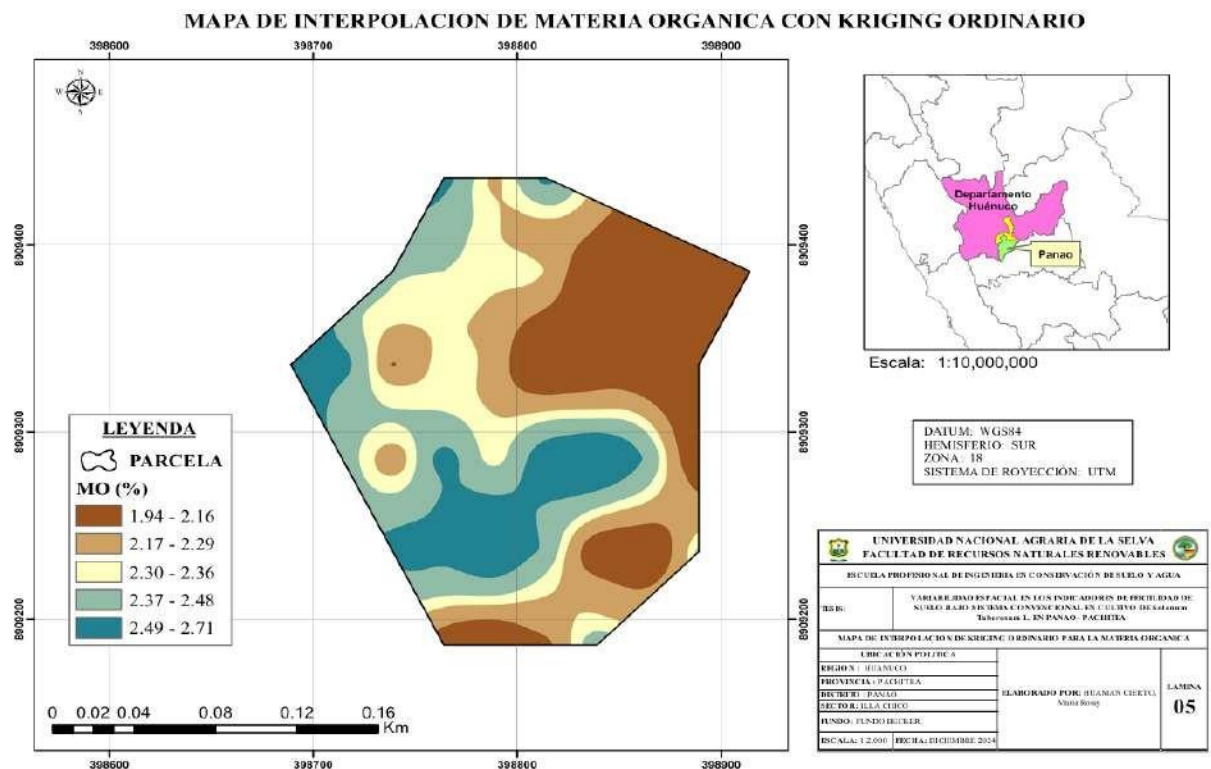


Figura 20. Mapa de la interpolación de Materia orgánica

MAPA DE INTERPOLACION DE NITRÓGENO CON KRIGING ORDINARIO

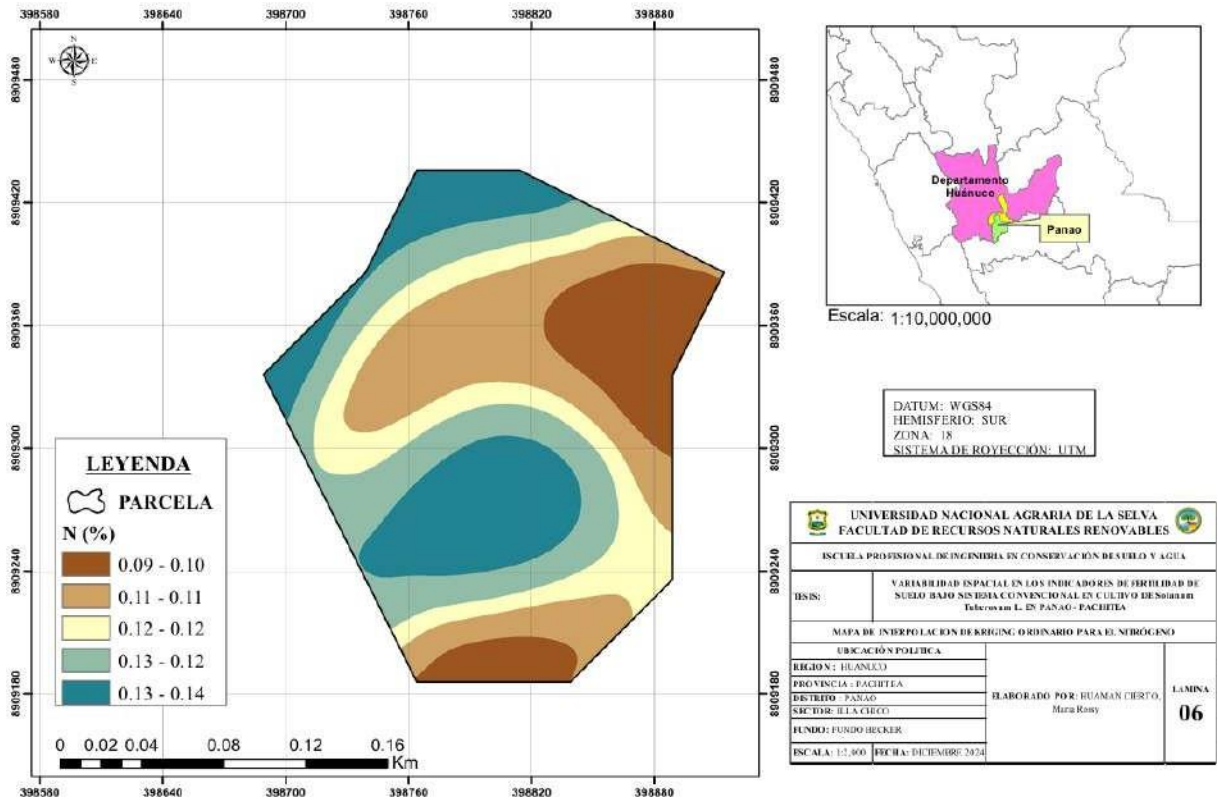


Figura 21. Mapa de la interpolación de Nitrógeno

MAPA DE INTERPOLACION DE FÓSFORO CON KRIGING ORDINARIO

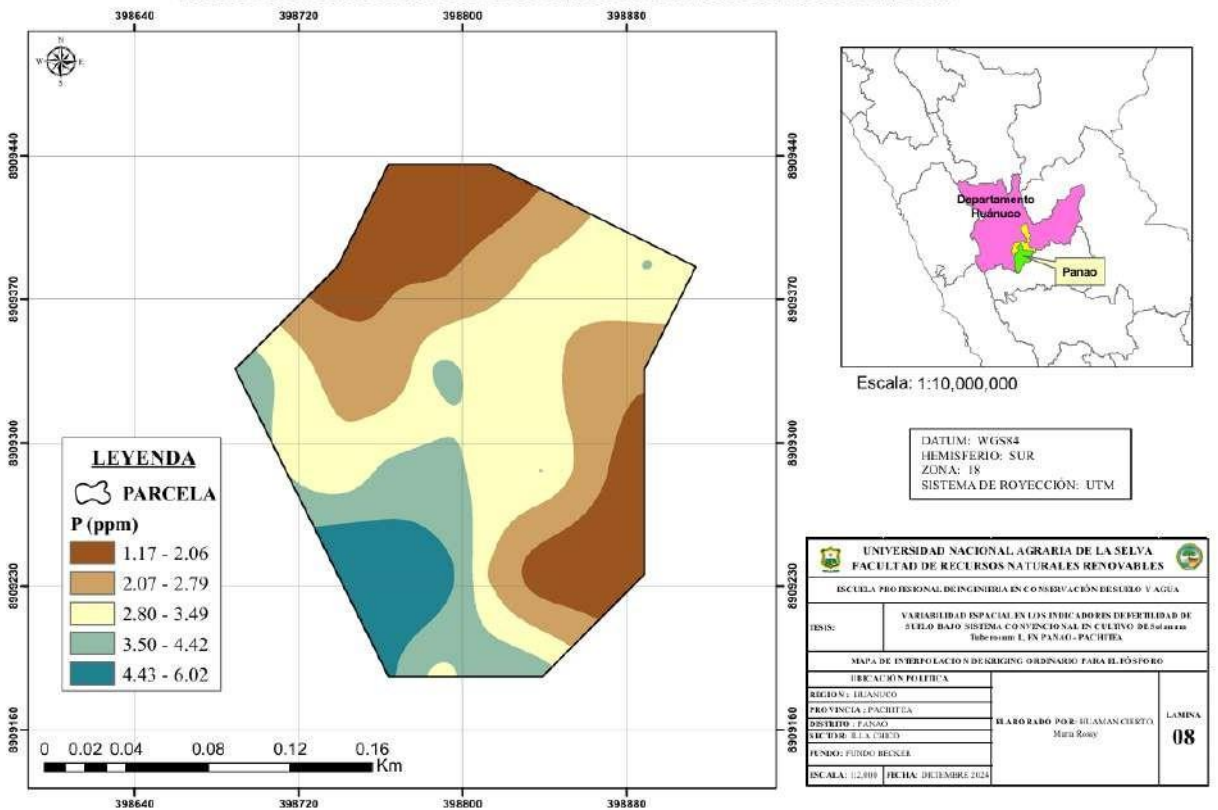


Figura 22. Mapa de la interpolación de Fósforo

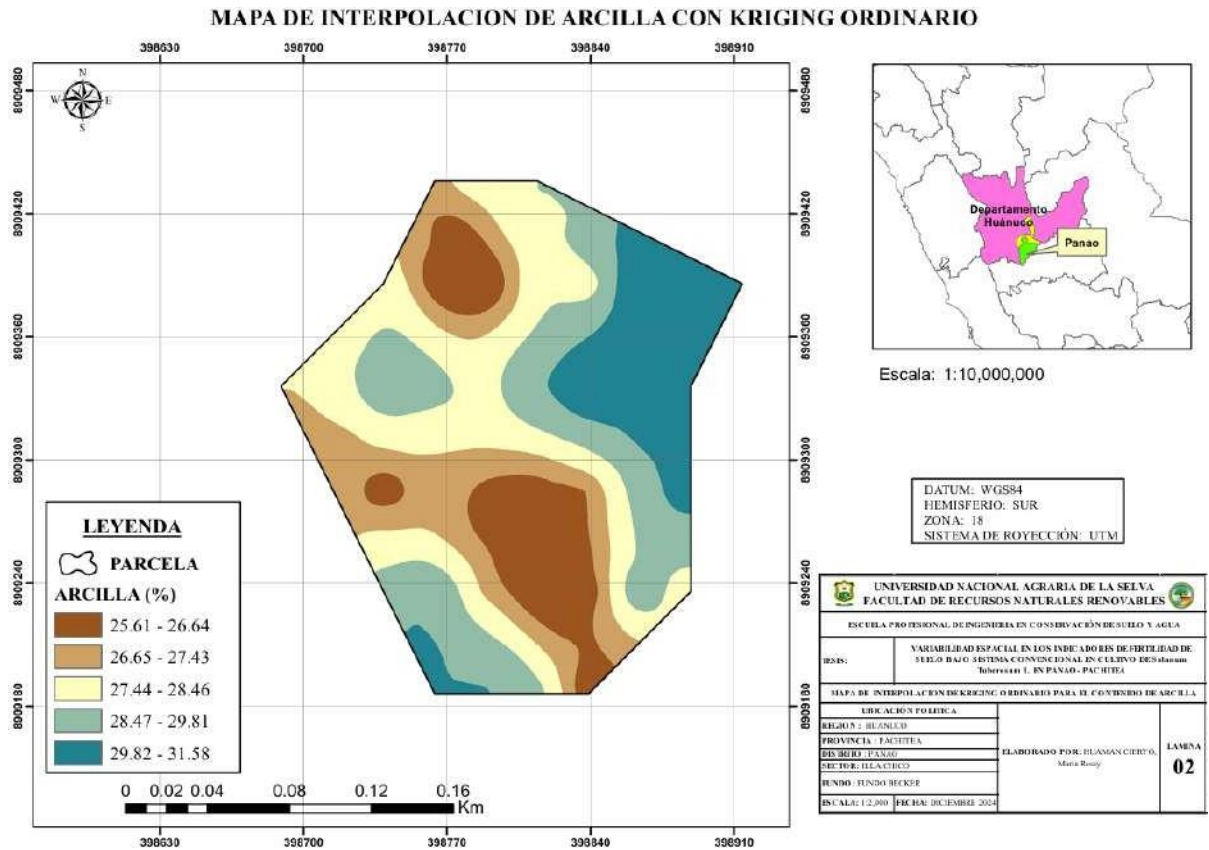


Figura 23. Mapa de la interpolación de Arcilla

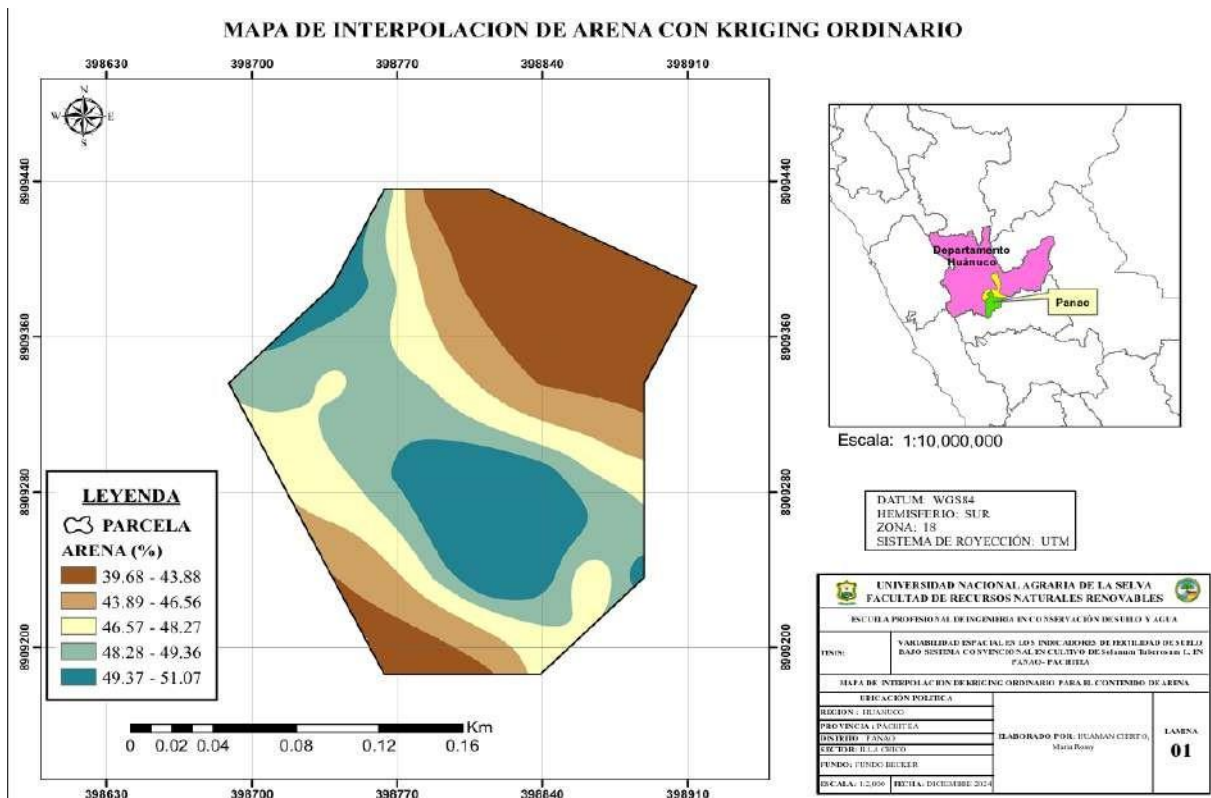


Figura 24. Mapa de la interpolación de Arena

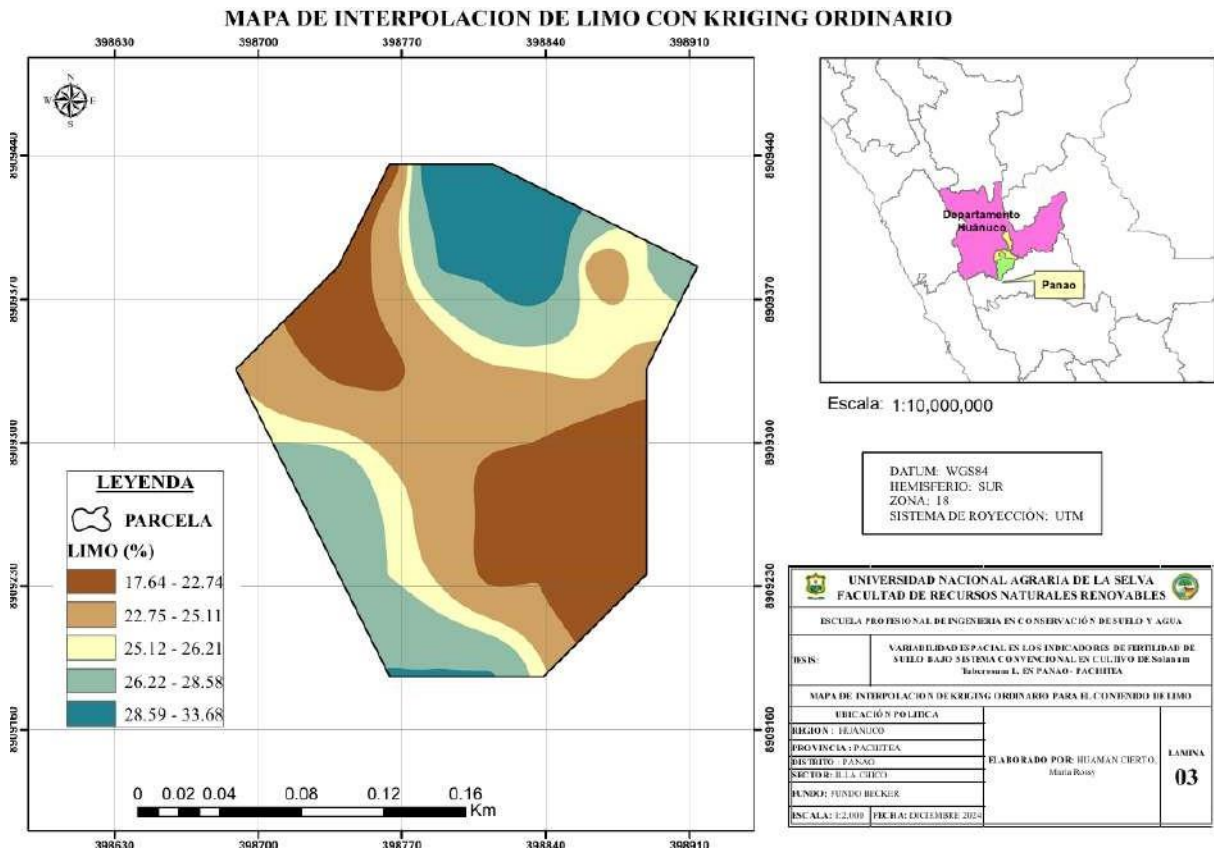


Figura 25. Mapa de la interpolación de Limo

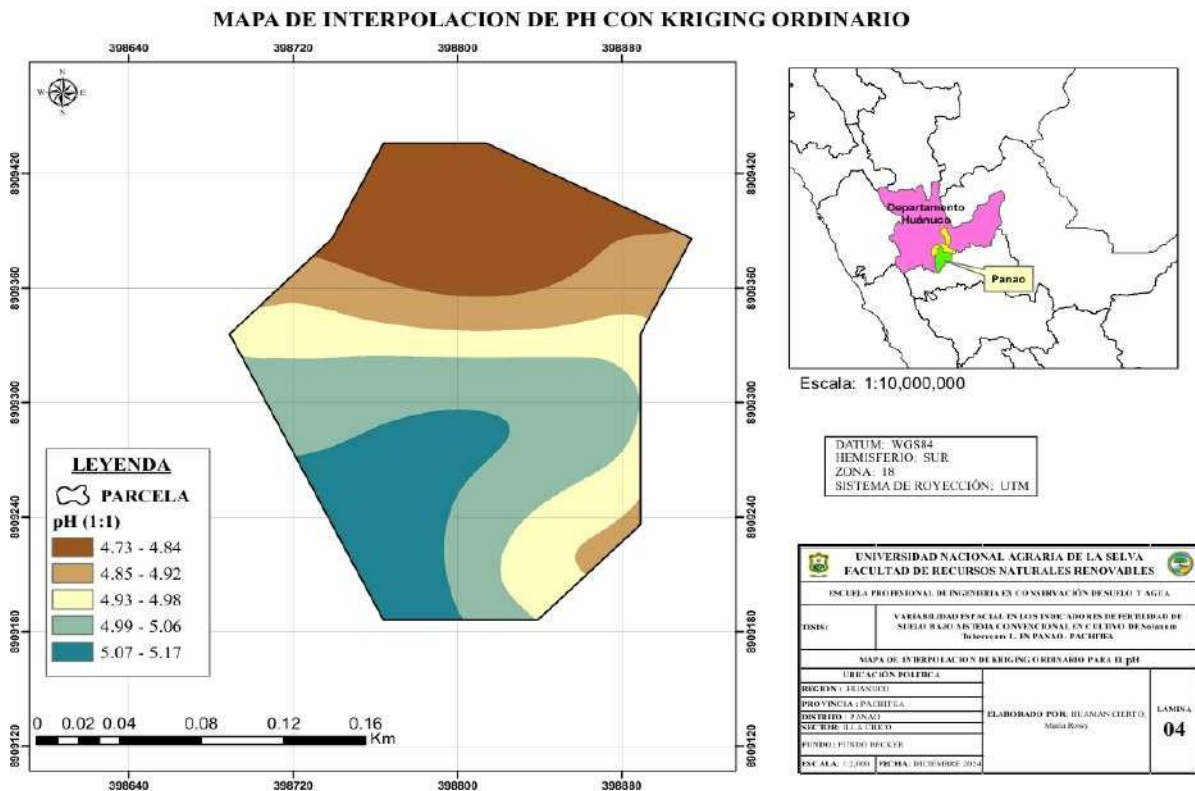


Figura 26. Mapa de la interpolación de PH

Mapa de interpolación con el Inverse Distance Weighting (IDW)

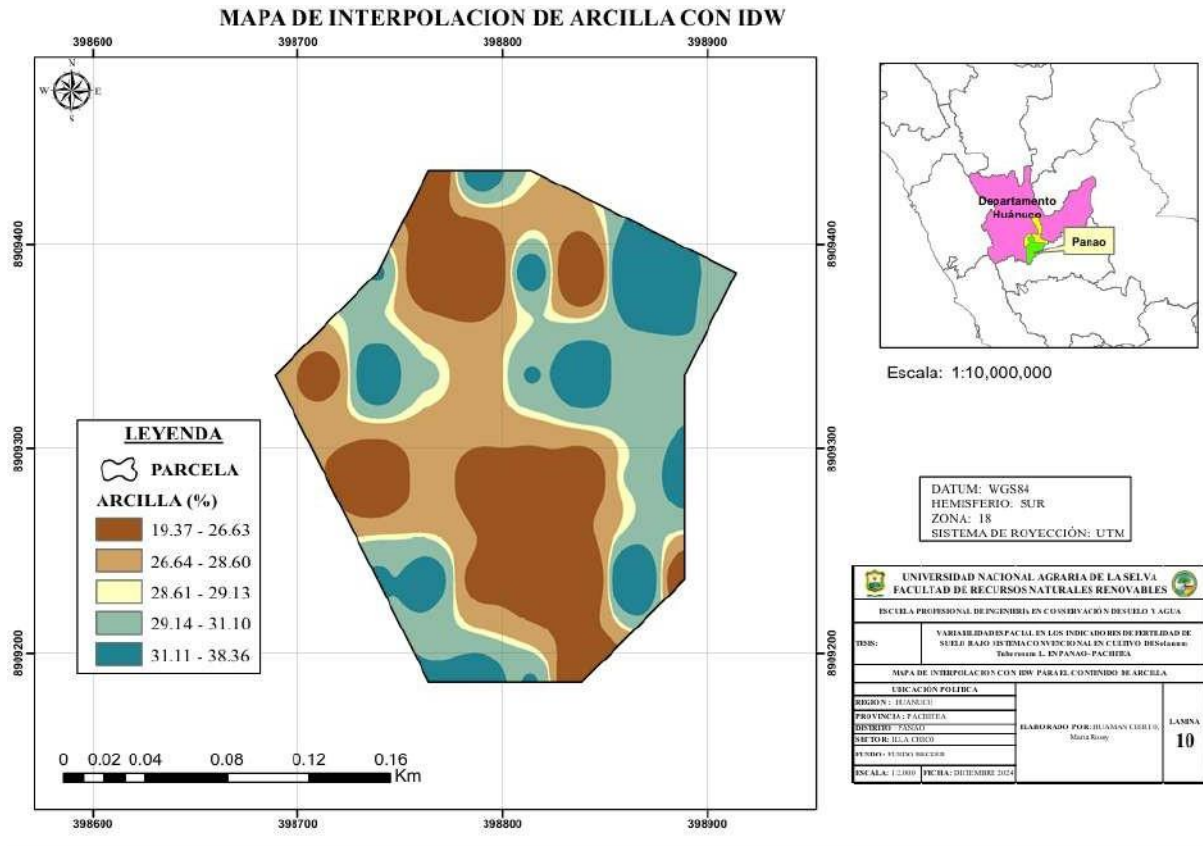


Figura 27. Mapa de la interpolación de Arcilla

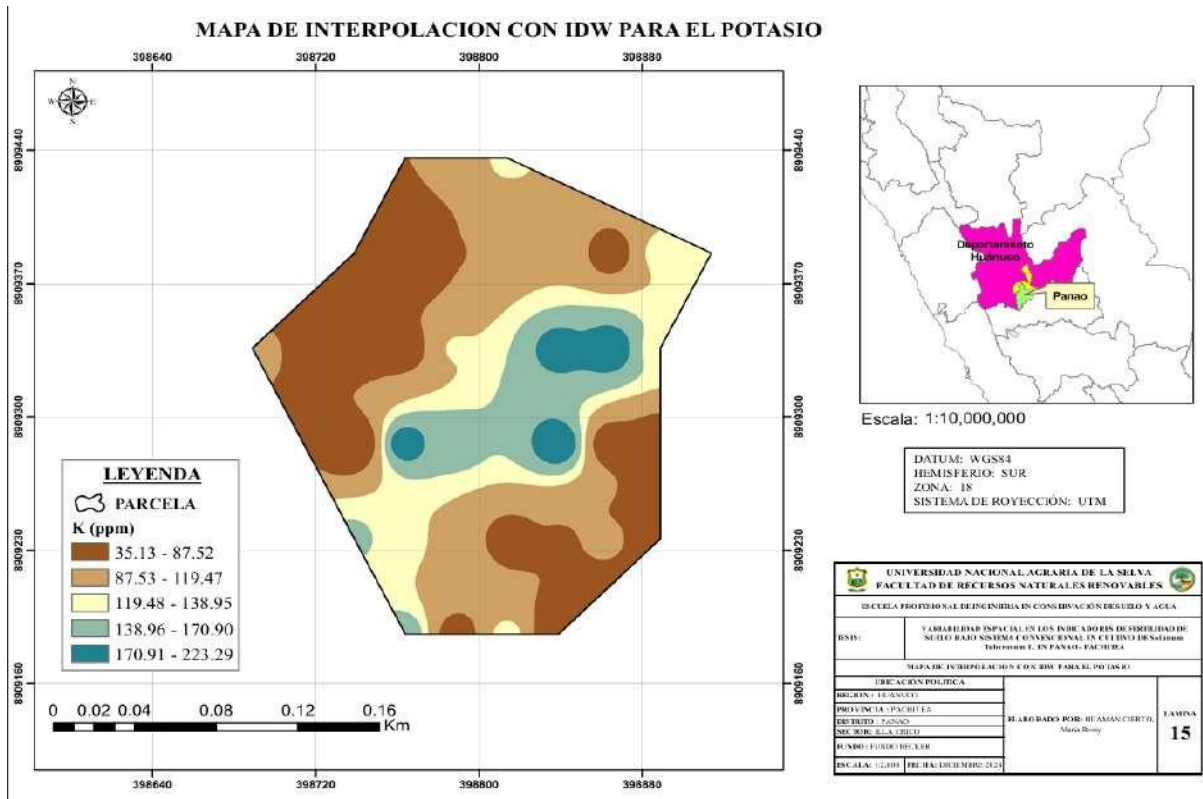


Figura 28. Mapa de la interpolación de Potasio

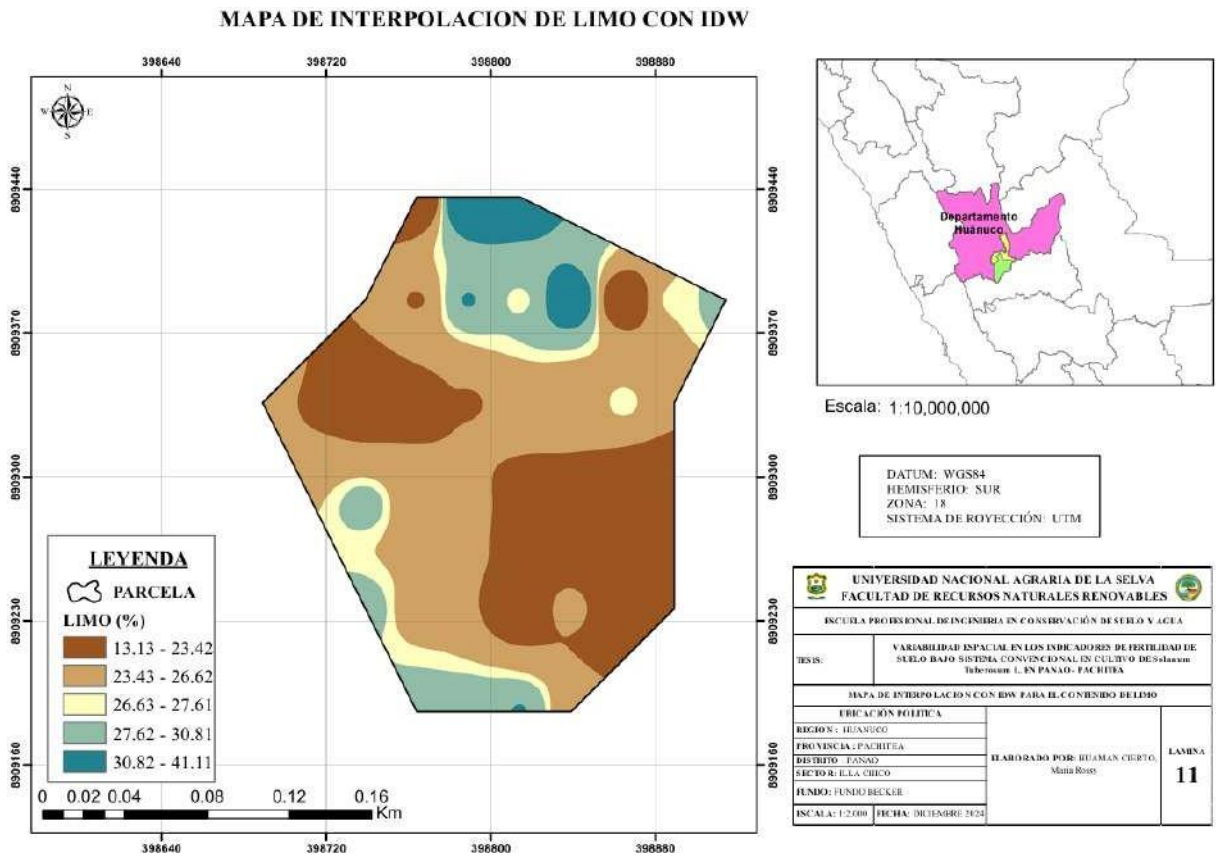


Figura 29. Mapa de la interpolación de Limo

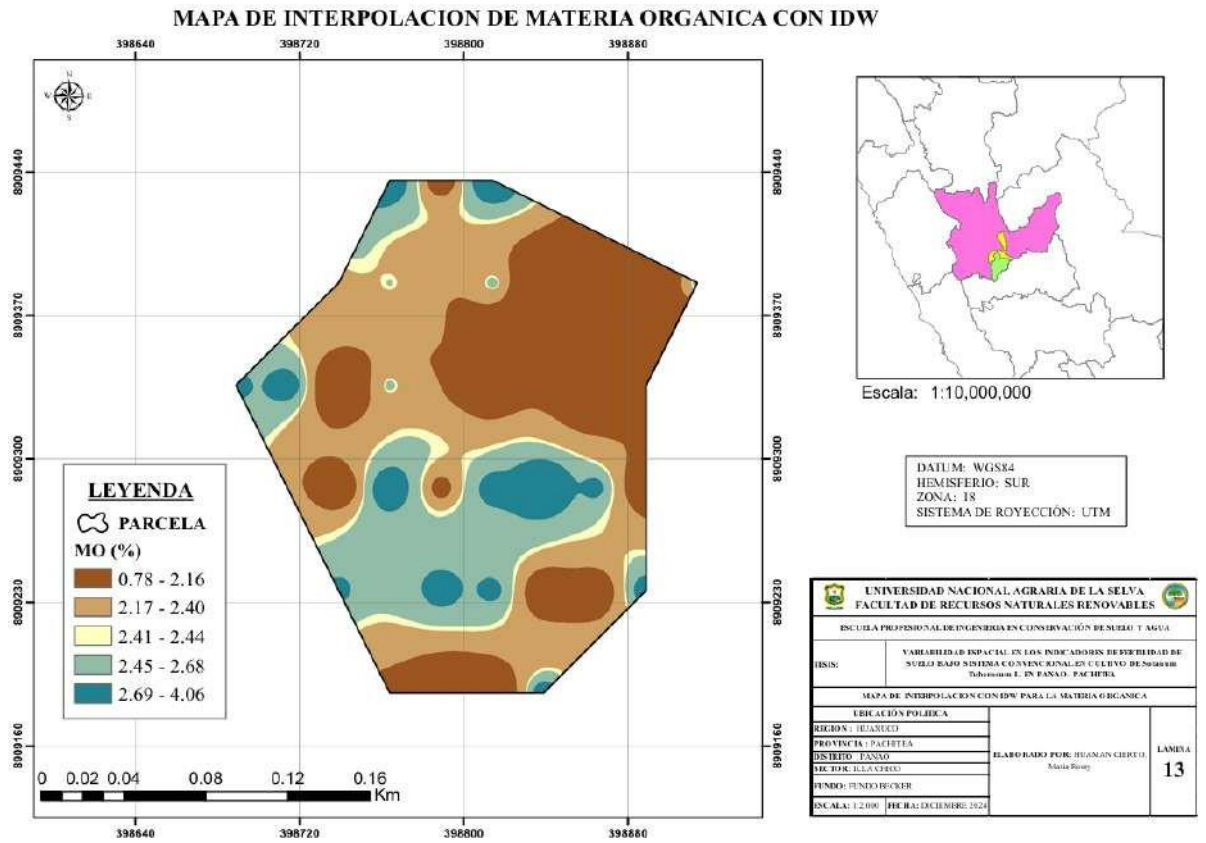


Figura 30. Mapa de la interpolación de Materia orgánica

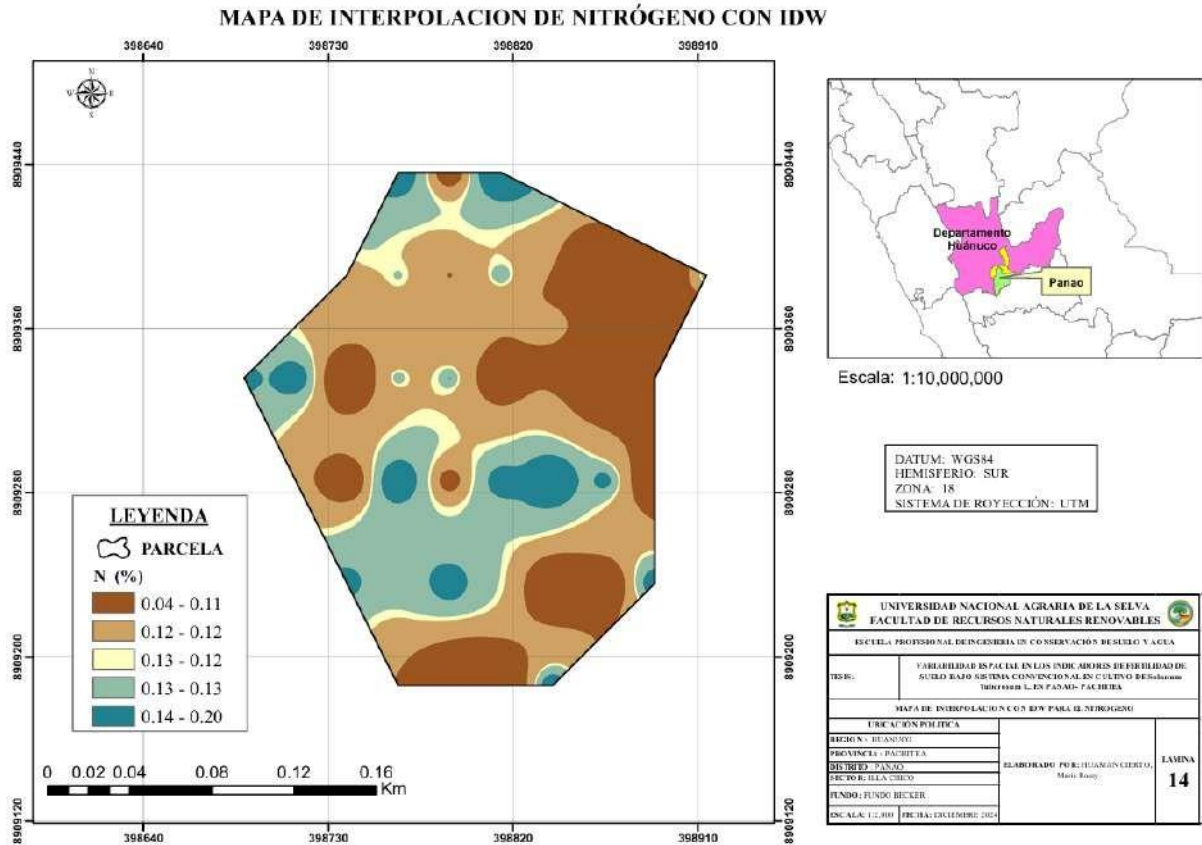


Figura 31. Mapa de la interpolación de Nitrógeno

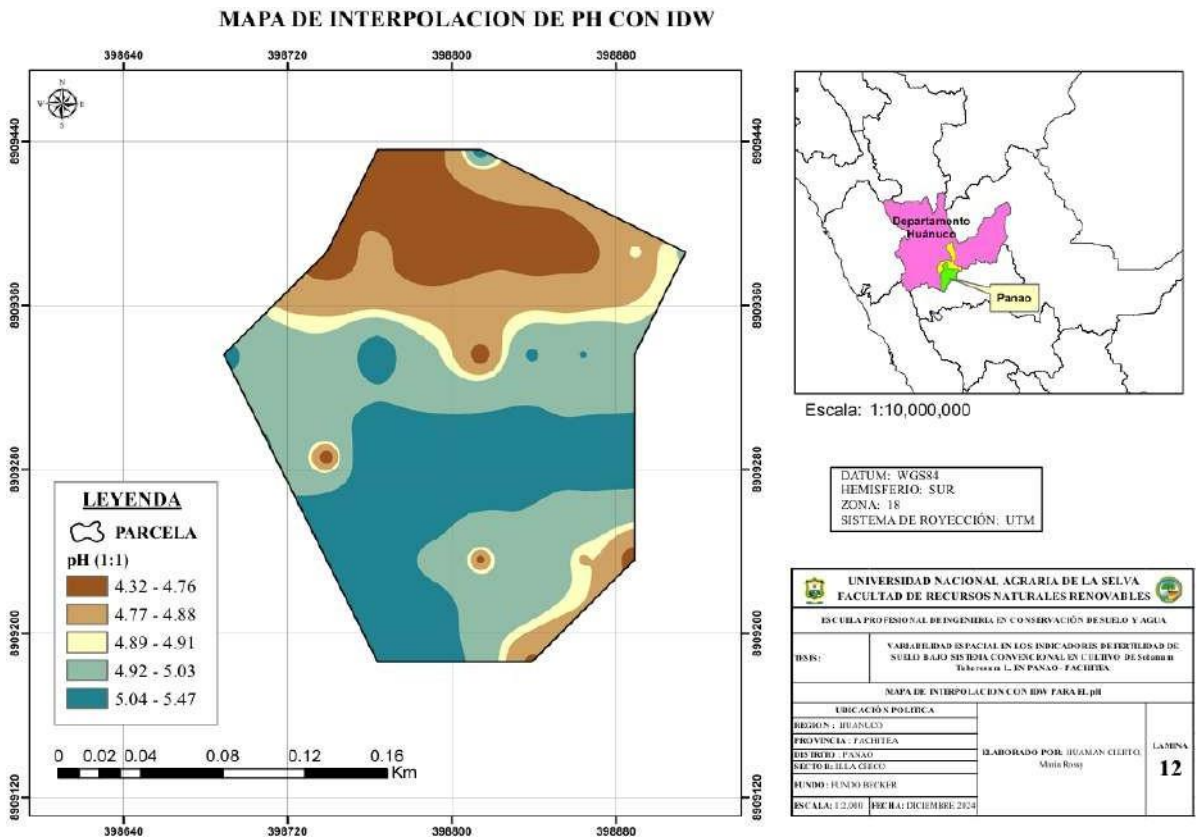


Figura 32. Mapa de la interpolación de PH

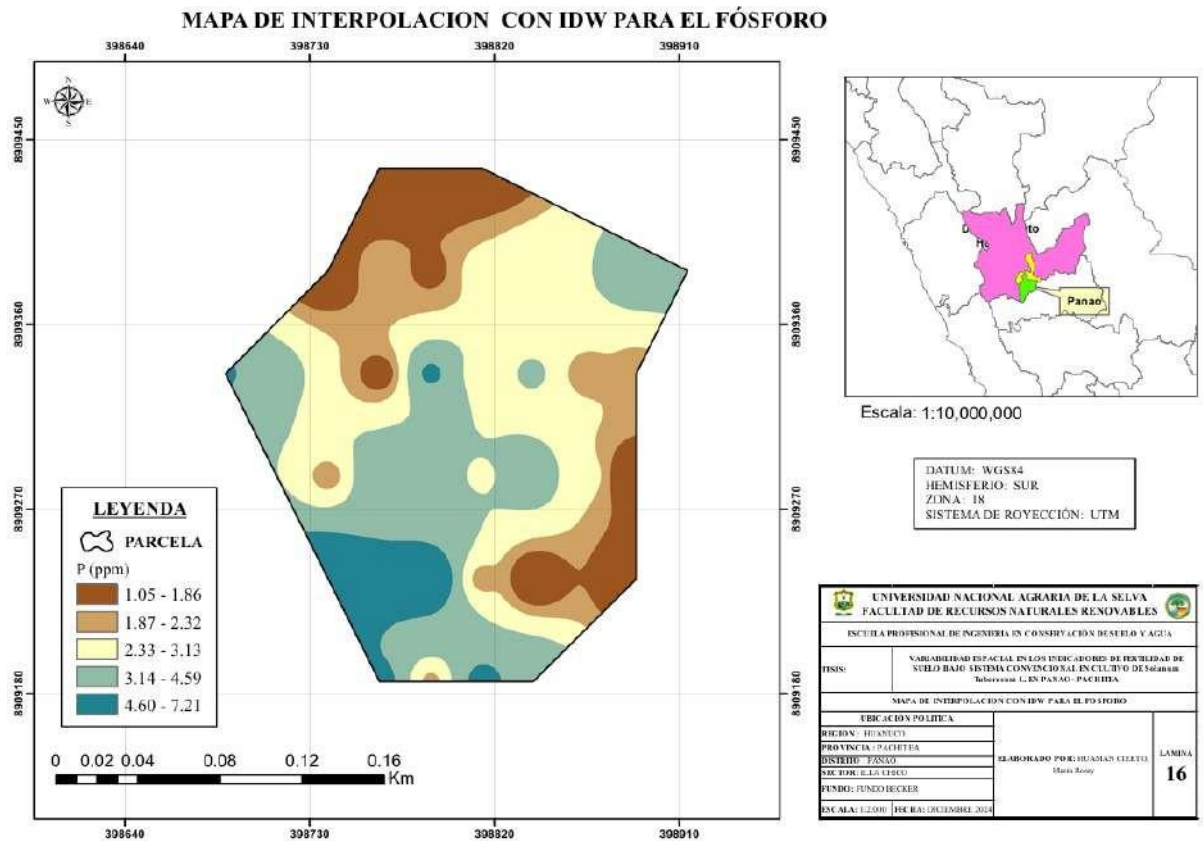


Figura 33. Mapa de la interpolación de Fósforo

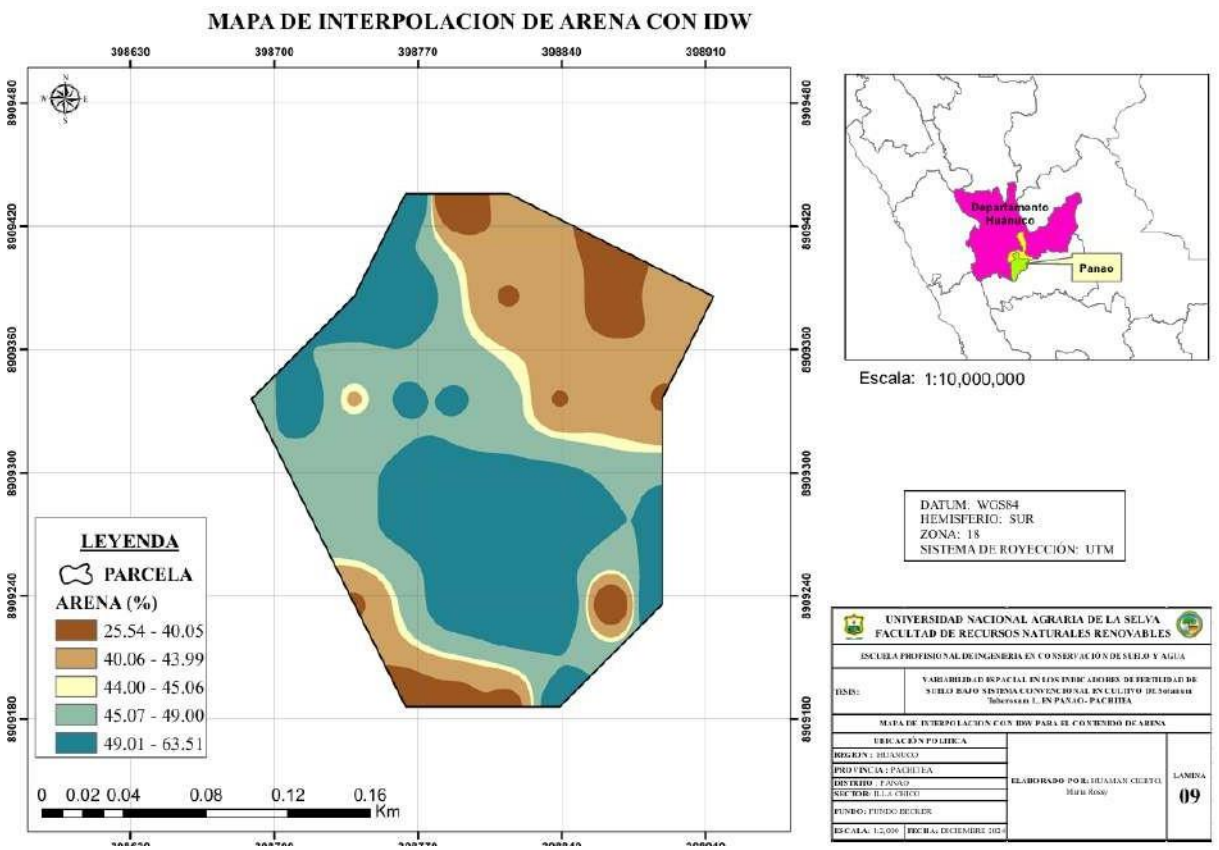


Figura 34. Mapa de la interpolación de Arena