

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LOS ANDES

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA PROFESIONAL DE AGRONOMÍA



Tesis

Variabilidad espacial de las propiedades edáficas de un predio agrícola en

San Pedro de Cachora – Apurímac - 2023

Asesor:

Dr.C. Alarcón Camacho, Juan

Autor:

Gutiérrez Huacac, Ernesto

Para optar al Título Profesional: Ingeniero Agrónomo

Abancay – Apurímac – Perú

2025

Acta de sustentación



Universidad
Tecnológica de los Andes
Transformando vidas



UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE AGRONOMÍA

Acta N°: 024

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TÍTULO PROFESIONAL

En la ciudad de Abancay, a los 03 días del mes de diciembre del 2025, siendo las 10:30 horas, se reunieron los integrantes del Jurado designado por Resolución Directoral N° 0199-2025-UTEA-FI-EPA de la Escuela Profesional de Agronomía, Facultad de Ingeniería:

Presidente :	Dr. Huilca Quispe Jhon
Dictaminante:	Dr. Medina Raya Francisco
Replicante :	Ing. Marrufo Montoya Rosa Eufemia

Para evaluar la sustentación, en la modalidad de:

Tesis Trabajo de suficiencia profesional

Titulada:

Variabilidad espacial de las propiedades edáficas de un predio agrícola en San Pedro de Cachora – Apurímac - 2023

Desarrollado por el (los) Bachiller (es):

Br.: Gutiérrez Huacac Ernesto

(Apellidos y Nombres)

Para optar el Título Profesional de:

Ingeniero Agrónomo

(Denominación del Título)

Concluido el acto, el Jurado dictaminó que el (la) (los) mencionado(a) (s) bachiller (es) fue (ron) APROBADO (S):

Por: Unanimidad

(Unanimidad o Mayoría) (*)

Emitiéndose el calificativo final de:

Bachiller (Apellidos y Nombres)	Calificación (**)
<u>Gutiérrez Huacac Ernesto</u>	<u>Aprobado</u>

Siendo las 13:08 pm horas concluyó la sesión, firmando los integrantes del Jurado.

Presidente: Dr. Huilca Quispe Jhon
(Dr. Mg.). (Apellidos y Nombres)

(Firma)

Dictaminante: Dr. Medina Raya Francisco
(Dr. Mg.). (Apellidos y Nombres)

(Firma)

Replicante: Ing. Marrufo Montoya Rosa Eufemia
(Dr. Mg.). (Apellidos y Nombres)

(Firma)

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LOS ANDES

Se expide la presente conforme al Libro de Actas de Sustentación de Tesis, consignado en los folios N° 208.

Ciudad Universitaria Av. Perú N°700, Abancay Central Telefónica 051 (083) 321559
Filial Cusco: Av. Grau 516. Teléfono. (084) 251565
Filial Andahuaylas, San Jerónimo, Jr. Ccatatay N°100 Teléfono (083) 421752
www.utea.edu.pe

(*): Mayoría: Dos integrantes del Jurado aprueban o desaprueban; Unanimidad: Todos los integrantes del Jurado aprueban o desaprueban, Art. 18 RGGAT.
(**): 0 a 10: Desaprobado, 11 a 15: Aprobado, 16 a 18: Aprobado Notable, 19 y 20: Aprobado con Distinción Art. 18 RGGAT.

Reporte de similitud






18% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- Bibliografía
- Coincidencias menores (menos de 10 palabras)

Fuentes principales

- 16%  Fuentes de Internet
- 2%  Publicaciones
- 10%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

Metadatos

Datos del Autor	
Apellidos y nombres	Gutiérrez Huacac, Ernesto
Tipo de Documento de Identidad	Documento Nacional de Identidad
Número de Documento de Identidad	31022356
URL ORCID	https://orcid.org/0009-0007-4899-0620
Datos del Asesor	
Apellidos y nombres	Dr. C. Alarcón Camacho, Juan
Tipo de Documento de Identidad	Documento Nacional de Identidad
Número de Documento de Identidad	31032533
URL ORCID	https://orcid.org/0000-0002-4911-7440
Datos de la Investigación	
Facultad	Ingeniería
Escuela Profesional	Agronomía
Línea de investigación	Agricultura y Ambiente
Rango de años en que se realizó la investigación	2023
Fuente de financiamiento	Autofinanciado
Porcentaje de similitud	18%
URL de OCDE	https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#4.01.06

Dedicatorio

A Dios y a las personas que pudieron hacer posible A mi adorada familia, y en especial a mi esposa Martha Pancorbo Medina el presente trabajo se llevó a cabo gracias a mis hijas Lilit Ameli, Milagros Estrella, por su comprensión y apoyo constante es por ello que dedico este trabajo a ellas,

Ernesto.

Agradecimiento

A la Universidad Tecnológico de los Andes de Abancay, por su valiosa contribución con la mejora de la calidad educativa de nuestro país, dando oportunidades y facilidades de superación a los estudiantes con la elaboración de sus trabajos de investigación. A mi asesor el Dr. C. Juan Alarcón Camacho y a mis dictaminantes Dr. Francisco Medina Raya, Ing. Jorge Luis Vílchez Casas y la M. Sc. Caballero Ramírez Sandra Creceida por compartir sus conocimientos y contribuir con el desarrollo de capacidades, quienes aspiran a mejorar en nuestra formación profesional por sus enseñanzas y dedicación e impulsar el desarrollo de mi trabajo de investigación, motivación y preocupación en los momentos más importantes de mi vida.

Ernesto.

Resumen

En la presente investigación se tuvo como objetivo determinar la variabilidad espacial de las propiedades físicas y químicas de un predio agrícola en San Pedro de Cachora – Abancay – 2023, existe una variabilidad espacial significativa en un predio del distrito de San Pedro de Cachora. Los datos fueron procesados mediante semivariogramas y el método de interpolación Kriging, generando mapas de distribución espacial, utilizando técnicas geoestadísticas. Para ello se recolectaron 16 muestras de suelo en una parcela agrícola de 2.35 hectáreas, analizándose los parámetros físicos (arena %, limo %, arcilla%), arena entre 40% y 58%, el limo entre 16.00 % y 36.00%, la arcilla un rango de 10% a 35%. Los parámetros químicos pH, nitrógeno N, Fosforo P, Potasio K y conductividad eléctrica. El pH entre 7.10 y 8.20, reflejando una ligera alcalinidad, la conductividad eléctrica entre 0.120 mS/cm y 0.360 mS/cm, el nitrógeno entre 4.00 ppm y 30.00 ppm, el Fosforo entre 9.90 ppm y 105.60 ppm, el Potasio en un rango de 129.00 ppm y 294.00 ppm, finalizando con el Ca + Mg en un rango de 9.00 ppm y 30.00 ppm.

Se concluye que la geoestadística es una herramienta valiosa para optimizar la fertilización y minimizar el impacto ambiental. Este enfoque puede revolucionar la gestión agrícola al proporcionar información detallada sobre las características del suelo.

Palabras clave: Geoestadística, variabilidad espacial, Kriging, propiedades del suelo.

Abstract

In the present investigation, the objective was to determine the spatial variability of the physical and chemical properties of the soil for agricultural uses in the district of San Pedro de Cachora - Apurímac - 2023, there is a significant spatial variability in the soil of the district of San Pedro de Cachora. The data were processed using semivariograms and the Kriging interpolation method, generating spatial distribution maps, using geostatistical techniques. For this purpose, 16 soil samples were collected in an agricultural plot of 2.35 hectares, analyzing the physical parameters (sand %, silt %, clay%), sand between 40% and 58%, silt between 16.00% and 36.00%, clay a range of 10% to 35%. The chemical parameters pH, nitrogen N, Phosphorus P, Potassium K and electrical conductivity. The pH ranged from 7.10 to 8.20, reflecting slight alkalinity; electrical conductivity ranged from 0.120 mS/cm to 0.360 mS/cm; nitrogen ranged from 4.00 ppm to 30.00 ppm; phosphorus ranged from 9.90 ppm to 105.60 ppm; potassium ranged from 129.00 ppm to 294.00 ppm; and Ca + Mg ranged from 9.00 ppm to 30.00 ppm.

It is concluded that geostatistics is a valuable tool for optimizing fertilization and minimizing environmental impact. This approach can revolutionize agricultural management by providing detailed information on soil characteristics.

Keywords: Geostatistics, spatial variability, Kriging, soil properties.

Índice general

	Pág.
Portada.....	i
Acta de sustentación.....	ii
Reporte de similitud.....	iii
Metadatos.....	iv
Dedicatorio.....	v
Agradecimiento.....	vi
Resumen.....	vii
Abstract.....	viii
Índice general.....	ix
Índice de tablas.....	xii
Índice de figuras.....	xiv
I. Introducción.....	17
II. Planteamiento del problema.....	18
2.1. Descripción y formulación del problema.....	18
2.1.1 <i>Problema general</i>	19
2.1.2 <i>Problemas específicos</i>	19
2.2 Objetivos.....	19
2.2.1 <i>Objetivo general</i>	19
2.2.2 <i>Objetivos específicos</i>	19
2.3 Justificación e Importancia.....	20
2.4 Hipótesis.....	21
2.4.1 <i>Hipótesis general</i>	21
2.4.2 <i>Hipótesis específicas</i>	21
2.5 Variables.....	21
2.5.1 <i>Variable de interés</i>	21
2.5.2 <i>Operacionalización de variables</i>	22

III. Marco teórico.....	23
3.1 Antecedentes.....	23
3.2 Bases teóricas.....	32
3.2.1 <i>Evaluación de la variabilidad espacial.....</i>	<i>32</i>
3.2.1.1 Técnicas descriptivas para evaluar la variabilidad espacial.....	32
3.2.1.2 Técnicas geoestadísticas para evaluar la variabilidad espacial.....	33
3.2.2 <i>Propiedades edáficas de un suelo agrícola.....</i>	<i>33</i>
3.2.2.1 Propiedades físicas.....	33
3.2.2.2 Propiedades químicas.....	34
3.2.2.2 Clasificación de suelos en el peru.....	39
3.3 Definición de términos.....	39
IV. Metodología.....	40
4.1 Tipo y nivel de investigación.....	40
4.1.1 <i>Tipo de investigación.....</i>	<i>40</i>
4.1.1 <i>Nivel de investigación.....</i>	<i>40</i>
4.3 Población y muestra.....	43
4.4 Instrumentos.....	43
4.5 Procedimientos.....	45
4.6 Análisis de datos.....	47
V. Resultados y discusión.....	48
5.1 Resultados.....	48
5.1.1 <i>Determinar la variabilidad espacial de los parámetros físicos utilizando el método Semivariogramas y kriging para las propiedades edáficas de un predio agrícola en el distrito de San Pedro de Cachora – Apurímac - 2023.....</i>	<i>48</i>
5.1.1.1 Arena.....	48
5.1.1.2 Limo.....	56
5.1.1.3 Arcila.....	64
5.1.2 Comprobar la variabilidad espacial de los parámetros químicos utilizando el	

método interpolación de resultados para las propiedades edáficas de un predio agrícola en San Pedro de Cachora - Abancay - 2023.....	72
5.1.2.1 pH.....	72
5.1.2.2 Conductividad eléctrica (C.E).....	80
5.1.2.3 Nitrógeno (N).....	88
5.1.2.4 Fósforo (P).....	96
5.1.2.5 Potasio (K).....	104
5.1.2.6 Ca + Mg.....	112
5.2 Discusión.....	119
VI. Conclusiones.....	121
VII. Recomendaciones.....	122
VIII. Referencias.....	123
IX Anexos.....	129

Índice de tablas

	Pág.
Tabla 1 Operacionalización de variables.....	22
Tabla 2 Contenido de arena en la parcela.....	49
Tabla 3 Estadísticos para el contenido de arena (%) medido.....	49
Tabla 4 <i>Estadísticos para el contenido de arena (%) estimado</i>	53
Tabla 5 Valor del Error Cuadrático Medio (RMSE) del contenido de arena (%).....	54
Tabla 6 Contenido de limo en la parcela.....	57
Tabla 7 Estadísticos para el contenido de arena (%) medido.....	57
Tabla 8 Estadísticos para el contenido de limo (%) estimado.....	61
Tabla 9 Valor del Error Cuadrático Medio (RMSE) del contenido de limo (%).....	62
Tabla 10 Contenido de arcilla (%) en la parcela.....	65
Tabla 11 Estadísticos para el contenido de arcilla (%) medido.....	65
Tabla 12 Estadísticos para el contenido de arcilla (%) estimado.....	69
Tabla 13 Valor del Error Cuadrático Medio (RMSE) del contenido de arcilla (%).....	70
Tabla 14 Contenido de pH en la parcela.....	73
Tabla 15 Estadísticos para el pH medido.....	73
Tabla 16 Estadísticos para el pH estimado.....	77
Tabla 17 Valor del Error Cuadrático Medio (RMSE) del pH.....	78
Tabla 18 Contenido de C.E (mS/cm) en la parcela.....	81
Tabla 19 Estadísticos para el contenido de C.E (mS/cm) medido.....	81
Tabla 20 Estadísticos para la C.E estimado.....	85
Tabla 21 Valor del Error Cuadrático Medio (RMSE) de la C.E (mS/cm).....	86
Tabla 22 Contenido de nitrógeno (N) en la parcela.....	89
Tabla 23 Estadísticos para el contenido de nitrógeno medido.....	89
Tabla 24 Estadísticos para el contenido de nitrógeno estimado.....	93
Tabla 25 Valor del Error Cuadrático Medio (RMSE) del contenido de nitrógeno.....	94
Tabla 26 Contenido de fósforo (P) en la parcela.....	97

Tabla 27 Estadísticos para el contenido de fósforo medido.....	97
Tabla 28 Estadísticos para el contenido de fósforo estimado.....	101
Tabla 29 Valor del Error Cuadrático Medio (RMSE) del contenido de fósforo (P).....	102
Tabla 30 Contenido de potasio (K) en la parcela.....	105
Tabla 31 Estadísticos para el contenido de potasio medido.....	105
Tabla 32 Estadísticos para el contenido de potasio estimado.....	109
Tabla 33 Valor del Error Cuadrático Medio (RMSE) del contenido de potasio (K).....	110
Tabla 34 Contenido de Ca + Mg en la parcela.....	113
Tabla 35 Estadísticos para el contenido de Ca + Mg medido.....	113
Tabla 36 Estadísticos para el contenido de Ca + Mg estimado.....	117
Tabla 37 Valor del Error Cuadrático Medio (RMSE) del contenido de Ca + Mg.....	118
Tabla 38 Variabilidad espacial de las propiedades edáficas de un predio agrícola en San Pedro de Cachora – Apurímac - 2023.....	129

Índice de figuras

	Pág.
Figura 1 triángulo textural.....	38
Figura 2 Ubicación política de la investigación.....	42
Figura 3 Valores del contenido de arena por cada punto muestreado.....	48
Figura 4 Histograma del contenido de arena (%).....	50
Figura 5 Semivariograma del contenido de arena (%).....	51
Figura 6 Interpolación Kriging para el contenido de arena (%).....	52
Figura 7 Histograma del contenido de arena (%) estimado.....	53
Figura 8 Gráfico de dispersión del contenido de arena (%).....	55
Figura 9 Valores del contenido de limo (%) por cada punto muestreado.....	56
Figura 10 Histograma del contenido de limo (%).....	58
Figura 11 Semivariograma del contenido de limo (%).....	59
Figura 12 Interpolación Kriging para el contenido de limo (%).....	60
Figura 13 Histograma del contenido de limo (%) estimado.....	61
Figura 14 Gráfico de dispersión del contenido de limo (%).....	63
Figura 15 Valores del contenido de arcilla (%) por cada punto muestreado.....	64
Figura 16 Histograma del contenido de arcilla (%).....	66
Figura 17 Interpolación Kriging para el contenido de arcilla (%).....	68
Figura 18 Histograma del contenido de arcilla (%) estimado.....	69
Figura 19 Gráfico de dispersión del contenido de arcilla (%).....	71
Figura 20 Valores del contenido de pH por cada punto muestreado.....	72
Figura 21 Histograma del pH.....	74
Figura 22 Semivariograma del pH.....	75
Figura 23 Interpolación Kriging para el pH.....	76
Figura 24 Histograma del pH estimado.....	77
Figura 25 Gráfico de dispersión del pH.....	79
Figura 26 Valores del contenido de la C.E por cada punto muestreado.....	80

Figura 27 Histograma de la C.E (mS/cm).....	82
Figura 28 Semivariograma de la C.E.....	83
Figura 29 Interpolación Kriging para la C.E.....	84
Figura 30 Histograma de la C.E estimado.....	85
Figura 31 Gráfico de dispersión de la C.E (mS/cm).....	87
Figura 32 Valores del contenido de nitrógeno por cada punto muestreado.....	88
Figura 33 Histograma del contenido de nitrógeno.....	90
Figura 34 Semivariograma del contenido de nitrógeno.....	91
Figura 35 Interpolación Kriging para el contenido de nitrógeno.....	92
Figura 36 Histograma del contenido de nitrógeno estimado.....	93
Figura 37 Gráfico de dispersión del contenido de nitrógeno.....	95
Figura 38 Valores del contenido de fósforo por cada punto muestreado.....	96
Figura 39 Histograma del contenido de fósforo.....	98
Figura 40 Semivariograma del contenido de fósforo.....	99
Figura 41 Interpolación Kriging para el contenido de fósforo.....	100
Figura 42 Histograma del contenido de fósforo estimado.....	101
Figura 43 Gráfico de dispersión del contenido de fósforo.....	103
Figura 44 Valores del contenido de potasio por cada punto muestreado.....	104
Figura 45 Histograma del contenido de Potasio.....	106
Figura 46 Semivariograma del contenido de potasio.....	107
Figura 47 Interpolación Kriging para el contenido de potasio.....	108
Figura 48 Histograma del contenido de potasio estimado.....	109
Figura 49 Gráfico de dispersión del contenido de potasio.....	111
Figura 50 Valores del contenido de Ca + Mg por cada punto muestreado.....	112
Figura 51 Histograma del contenido de Ca + Mg.....	114
Figura 52 Semivariograma del contenido de Ca + Mg.....	115
Figura 53 Interpolación Kriging para el contenido de Ca + Mg.....	116
Figura 54 Histograma del contenido de Ca + Mg estimado.....	117

Figura 55 Gráfico de dispersión del contenido de Ca + Mg.....	119
Figura 56 Delimitación de zona de muestreo.....	148
Figura 57 Delimitación de zona de muestreo.....	148
Figura 58 Extracción de muestra.....	149
Figura 59 Numeración de intersección de cuadrículas.....	149
Figura 60 Selección de la muestra.....	150
Figura 61 Rotulado de la muestra.....	150

I. Introducción

El suelo, lejos de ser un sustrato inerte y homogéneo, constituye un sistema dinámico y tridimensional cuya composición y funcionalidad presentan considerable heterogeneidad en el espacio. Esta condición, conocida como variabilidad espacial de las propiedades edáficas, es el resultado de la interacción compleja entre los factores formadores del suelo y se manifiesta en la distribución irregular de sus características físicas, químicas y biológicas. Propiedades determinantes para el desarrollo vegetal como la textura, la densidad aparente, la capacidad de retención de agua, el pH, el contenido de materia orgánica y la disponibilidad de nutrientes, pueden cambiar significativamente en distancias de pocos metros dentro de una misma parcela agrícola, condicionando de manera directa el potencial productivo de los cultivos. Históricamente, la gestión agrícola ha tendido a obviar esta realidad, operando bajo un paradigma de manejo uniforme que trata la parcela como una unidad homogénea, lo cual representa uno de los principales factores limitantes para la eficiencia productiva y la sostenibilidad de los agrosistemas modernos. La aplicación generalizada de insumos como fertilizantes y agua sin considerar la demanda sitio-específica conduce inevitablemente a una gestión subóptima de recursos, generando tanto zonas con deficiencias nutricionales que merman el rendimiento. Frente a esta problemática, emerge como un enfoque de gestión que reconoce y maneja la variabilidad dentro del campo, y su implementación exitosa depende de la capacidad para cuantificar y cartografiar dicha variabilidad. En este contexto, la geoestadística ofrece un conjunto robusto de herramientas para analizar la estructura espacial de las variables regionalizadas, donde el semivariograma es el instrumento clave para describir el grado de dependencia espacial de los datos, mientras que el kriging se consolida como el método de interpolación óptimo que permite estimar los valores de una propiedad en sitios no muestreados, generando mapas precisos y confiables.

II. Planteamiento del problema

2.1. Descripción y formulación del problema

La agricultura tradicional, a escala global, transita desde un paradigma de manejo uniforme hacia la agricultura de precisión, impulsada por la necesidad imperante de garantizar la seguridad alimentaria de una población creciente de manera sostenible. El enfoque tradicional, que asume la homogeneidad de las parcelas, ignora una realidad fundamental del ecosistema agrícola: la marcada variabilidad espacial de las propiedades del suelo, una condición intrínseca que limita severamente la eficiencia de los insumos, el potencial productivo de los cultivos y la sostenibilidad del recurso edáfico a largo plazo.

En el contexto peruano, esta heterogeneidad se manifiesta de forma notable, particularmente en la región andina, cuya compleja geomorfología y diversidad de pisos ecológicos configuran un mosaico de microclimas y condiciones de suelo. La agricultura nacional, y en especial la que se practica en la sierra, frecuentemente se apoya en prácticas de fertilización y manejo homogéneas que no se corresponden con la distribución real de la fertilidad en el campo, lo que deriva en un uso ineficiente de recursos como el agua y los nutrientes, costos de producción elevados y, en el largo plazo, un riesgo tangible de degradación del suelo y contaminación de cuerpos de agua por la lixiviación de agroquímicos.

La región de Apurímac, y específicamente el distrito de San Pedro de Cachora, no es ajena a esta problemática, pues su economía depende en gran medida de una agricultura desarrollada sobre laderas y valles interandinos con una notoria variabilidad natural. El problema central radica en que los productores agrícolas de la zona gestionan sus predios sin disponer de información cuantitativa sobre la distribución espacial de las propiedades físicas y químicas del suelo, tales como la textura, la materia orgánica, el pH o la disponibilidad de nutrientes. Esta falta de conocimiento conduce a la aplicación generalizada e indiscriminada de insumos y prácticas de labranza, generando zonas dentro de una misma parcela con deficiencias nutricionales que limitan el rendimiento, y otras con excesos que pueden resultar tóxicos para las plantas o ser ambientalmente perjudiciales,

comprometiendo así la rentabilidad económica de los cultivos y la sostenibilidad del agrosistema.

En consecuencia, el problema observado es la **ausencia de un diagnóstico técnico y geoespacialmente explícito** que permita comprender cómo y dónde varían las propiedades edáficas clave dentro de un predio agrícola representativo de San Pedro de Cachora. Sin esta caracterización, la implementación de estrategias de manejo sitio-específico es inviable, perpetuando un modelo agrícola de baja eficiencia y alto riesgo ambiental. Por tanto, surgen las interrogantes fundamentales que guían este trabajo.

2.1.1 Problema general

¿Cómo es la Variabilidad espacial de las propiedades edáficas de un predio agrícola en San Pedro de Cachora – Apurímac - 2023?

2.1.2 Problemas específicos

- ¿Cómo es la variabilidad espacial de los parámetros físicos utilizando el método Semivariogramas y kriging para las propiedades edáficas de un predio agrícola en San Pedro de Cachora-Apurimac-2023?

- ¿Cómo es la variabilidad espacial de los parámetros químicos utilizando el método interpolación de resultados para las propiedades edáficas de un predio agrícola en San Pedro de Cachora?

2.2 Objetivos

2.2.1 Objetivo general

Evaluar la variabilidad espacial de las propiedades edáficas de un predio agrícola en San Pedro de Cachora - Apurímac - 2023

2.2.2 Objetivos específicos

- Determinar la variabilidad espacial de los parámetros físicos utilizando el método Semivariogramas y kriging para las propiedades edáficas de un predio agrícola en San Pedro de Cachora - Apurímac - 2023

- Comprobar la variabilidad espacial de los parámetros químicos utilizando el método interpolación de resultados para las propiedades edáficas de un predio agrícola en

2.3 Justificación e Importancia

La presente investigación se justifica por la necesidad crítica de superar las limitaciones de la agricultura convencional mediante la adopción de herramientas científicas que permitan una gestión inteligente y adaptativa del recurso suelo. La coherencia del estudio radica en su diseño metodológico, el cual responde directamente al problema formulado: la falta de conocimiento sobre la heterogeneidad edáfica, pues a través del uso de técnicas geoestadísticas avanzadas como los semivariogramas y el kriging, se podrá transformar datos puntuales de muestreo en un modelo espacial continuo y visualmente interpretable, haciendo tangible la variabilidad que hasta ahora solo se intuía. Este enfoque no solo es pertinente, sino fundamental en el contexto actual, donde la optimización de recursos y la sostenibilidad ambiental ya no son una opción, sino un imperativo para la viabilidad de la agricultura.

Desde una perspectiva económica, la importancia de este estudio es directa y significativa. La generación de mapas de variabilidad espacial **ayudará** a los agricultores de San Pedro de Cachora a transitar hacia un modelo de **manejo sitio-específico**, lo que significa aplicar la cantidad correcta de fertilizantes, enmiendas y agua únicamente en las zonas que lo requieren. Esto **mejorará** drásticamente la eficiencia en el uso de insumos, reduciendo los costos de producción y, por consiguiente, aumentando la rentabilidad de las cosechas. Al evitar la sobre-fertilización en áreas ya ricas en nutrientes y corregir las deficiencias en zonas pobres, se maximiza el potencial productivo de cada metro cuadrado del predio, fortaleciendo la economía del productor.

En el plano ambiental, el impacto es igualmente profundo. La aplicación precisa de agroquímicos, guiada por los mapas generados, **ayudará** a minimizar la lixiviación de nitratos y fosfatos hacia cuerpos de agua subterráneos y superficiales, mitigando el riesgo de contaminación y eutrofización. Asimismo, un manejo diferenciado del suelo promueve su conservación a largo plazo, mejorando su estructura, su capacidad de retención de agua y su actividad biológica. De esta manera, el estudio contribuye directamente a la

construcción de un agrosistema más resiliente y sostenible, en armonía con el frágil entorno andino.

En el ámbito social y científico, esta investigación representa un aporte de gran valor. Socialmente, mejorará la capacidad técnica de los agricultores locales, proveyéndoles una herramienta de decisión que los empodera y aumenta la resiliencia de sus sistemas productivos frente a la incertidumbre climática y de mercado. Científicamente, el trabajo generará un conocimiento de base sin precedentes para la zona de San Pedro de Cachora y servirá como un modelo metodológico validado y replicable para otros valles interandinos de Apurímac y del país. La información obtenida no solo será útil para el agricultor individual, sino que también ayudará a instituciones de investigación, extensionistas y planificadores a diseñar políticas y programas de desarrollo agrícola regional mucho más efectivos y fundamentados en evidencia sólida.

2.4 Hipótesis

2.4.1 Hipótesis general

Existe una variabilidad espacial significativa en las propiedades edáficas de un predio agrícola en San Pedro de Cachora, la cual puede ser identificada y caracterizada mediante técnicas de análisis geoestadístico.

2.4.2 Hipótesis específicas

- Los parámetros físicos con el uso del método Semivariogramas y kriging para las propiedades edáficas presentan variabilidad espacial significativa en un predio agrícola del distrito de San Pedro de Cachora - Apurímac - 2023

- Los parámetros químicos con el uso del método interpolación de resultados para las propiedades edáficas presentan variabilidad espacial significativa en un predio agrícola del distrito de San Pedro de Cachora - Apurímac - 2023

2.5 Variables

2.5.1 Variable de interés

En esta investigación la **variable de interés** es la Variabilidad espacial de las propiedades edáficas de un predio agrícola, cuyas dimensiones son:

- Propiedades Físicas
- Propiedades Químicas

2.5.2 Operacionalización de variables

Tabla 1

Operacionalización de variables

Variables	Dimensión	Indicadores	Ítems
Variabilidad espacial de las propiedades edáficas de un predio agrícola	Propiedades físicas	Arena Limo Arcilla	Nominal Nominal Nominal
	Propiedades químicas	pH Conductividad eléctrica C.E. Nitrógeno Fosforo Potasio Ca + Mg	und mS/cm ppm ppm ppm Meq/100g

Nota. Elaboración propia.

III. Marco teórico

3.1 Antecedentes

Guachamin (2019), realizó un estudio denominado estudio de variabilidad espacial de propiedades químicas del suelo mediante procedimientos geoestadísticos en la comunidad Larcapamba cuyo objetivo de investigación fue caracterizar la variabilidad geoespacial de las propiedades químicas del suelo: materia orgánica, pH, fósforo, nitrógeno, calcio, magnesio, potasio y conductividad eléctrica. En tres etapas secuenciales se realizó el análisis geoestadístico: análisis exploratorio, estructural y predicción. Se recolectaron 241 muestras de suelo de los cuales 233 se emplearon en la modelación mediante el software R Project (Rgeostats) y las muestras restantes para corroborar el modelo interpolado; mientras que el geoprocésamiento se realizó en el software Arcgis. De los resultados reportados se observó la existencia de variabilidad espacial mientras que el análisis estructural determinó una dependencia lineal moderada para pH, magnesio, fósforo y conductividad eléctrica, con una relación pepita/umbral de 73.87%, 48.14%, 26.15% y 72.51% respectivamente; por otro lado, potasio mostró una dependencia lineal fuerte a causa de un efecto pepita nulo y calcio presentó una dependencia lineal débil con una relación pepita/umbral de 79.26% y por último en el caso de materia orgánica y nitrógeno no fue posible realizar el análisis estructural porque no cumplieron el análisis de normalidad. En cuanto a los modelos teóricos de semivariogramas es variable según las variables estudiadas; calcio, magnesio y la conductividad eléctrica se adaptaron mejor al modelo de seno cardinal, por otro lado, el pH se ajusta a un modelo cúbico, el fósforo al modelo gaussiano y el potasio a uno esférico. Se hizo uso del interpolador de kriging ordinario para la predicción espacial determinando, en base a eficiencia, un ajuste muy alto para pH (81.32%) y el magnesio (88.00%), de igual modo para fósforo (67.22%), calcio (62.53%) y conductividad eléctrica (76.34%) mientras que potasio (52.63%) con un ajuste regular. En cuanto a materia orgánica y nitrógeno se empleó el interpolador de distancia inversa y su verificación arrojó un ajuste muy alto en ambas variables con valores de eficiencia superiores al 83%.

Rodríguez (2015), realizó su investigación de título variabilidad espacial de las propiedades físicas y químicas en rendimiento y calidad de café, cuyo objetivo de investigación fue establecer el comportamiento espacial de las propiedades físicas y químicas del suelo y su relación con el rendimiento y calidad del café en un Typic Hapludand. Para ello se realizó muestreos de suelos al azar en 64 puntos georeferenciados, a una profundidad de 20 cm; el análisis de los datos fue mediante estadística descriptiva, geoestadística, correlaciones lineales y métodos multivariados clúster y componentes principales mientras que la interpolación fue por el método de kriging. Los resultados reportan que existe una alta variabilidad para los atributos químicos y entre baja a moderada para el atributo físico; de todos los atributos evaluados se observó dependencia a excepción del boro presente en el suelo. De otra parte, se evidenció la existencia de correlación entre los atributos del suelo (carbono orgánico) y el rendimiento; también se observó que hay correlación inversa entre la merma en trilla y el contenido de calcio en el suelo. Además, se reportaron dos grupos de atributos similares en la distribución espacial, el primero conformado por los atributos químicos y el segundo por el carbono orgánico más los atributos del suelo. El análisis clúster y de componentes principales mostraron un comportamiento similar al reportado para la distribución espacial y las correlaciones lineales en donde se observó mayor cercanía entre los atributos físicos y el aluminio más que con los atributos químicos del suelo. El análisis realizado para nitrógeno, fósforo, boro, rendimiento y profundidad de suelo mostraron poca relevancia.

Garzón et al. (2010), en su estudio titulado variabilidad espacial de algunas propiedades químicas en un entisol cuyo objetivo fue evaluar la variabilidad espacial y la relación de algunas propiedades químicas del suelo a través de múltiples técnicas estadísticas. Se recolectaron 64 muestras de suelo a una profundidad de 0.20 m determinando pH, calcio, magnesio, potasio suma de bases y relación calcio – magnesio. Seguidamente se realizó el análisis estadístico descriptivo, multivariado, geoestadístico e interpolación por el método de kriging. En consecuencia, los atributos evaluados indican una variabilidad baja o media, en donde el potasio no presentó dependencia espacial.

También existe una fuerte relación entre los cationes, de igual modo hay una relación muy estrecha entre el calcio y la suma de bases. Los mapas realizados confirman la variabilidad espacial de las propiedades lo cual indica sobre la conveniencia de aplicar los insumos agrícolas mediante tasa variada.

Acevedo et al. (2008), realizaron un estudio intitulado variabilidad espacial de propiedades químicas del suelo y su uso en el diseño de experimentos, que tuvo como objetivo caracterizar la variabilidad espacial de las propiedades químicas del suelo, materia orgánica, fósforo disponible, nitrógeno total y potasio intercambiable empleando el enfoque estadístico (coeficiente de variación y varianza) y geoestadística (semivarianza) para obtener valores representativos y mapas que muestren su comportamiento. Se llevó a cabo un muestreo de suelos con una profundidad de 20 cm en cuadrículas, con equidistancias de 25 metros obteniéndose 182 muestras en un área de 12.7 hectáreas. Con los datos señalados se hizo el análisis de la variabilidad espacial obteniéndose los siguientes valores medios, coeficientes de variación y número mínimo de determinaciones a realizar para la obtención del valor medio con un nivel del 95% de confianza, 6.97%, 3.7% y 2 que corresponde al pH; 2.3%, 25.5% y 103 para materia orgánica; 0.0115%, 24.3% y 93 del nitrógeno total; 21.34 mg/kg, 53.6% y 451 para el fósforo; 215.97 mg/kg, 70.0% y 768 para el potasio. Por otro lado, cuando se realizó el enfoque geoestadístico se halló que todas las variables evaluadas tienen estructura espacial, expresado en el semivariograma experimental, y fueron ajustados a modelos teóricos esférico, lineal, gaussiano, lineal y efecto agujero para pH, nitrógeno total, materia orgánica, fósforo y potasio respectivamente. Los autores concluyen que la variabilidad espacial de pH, materia orgánica, nitrógeno, fósforo y potasio en el suelo evaluado reportó que, a excepción del pH, estos elementos presentan una alta variabilidad.

Zarazúa (2005), llevo a cabo su estudio titulado variabilidad espacial de algunas propiedades del suelo en terrenos de uso agrícola en donde planteó como objetivo fue la evaluar mediante técnicas geoestadísticas, la variabilidad espacial de algunas propiedades del suelo inherentes a la fertilidad en tres parcelas agrícolas. Para cumplir el objetivo se

seleccionó tres parcelas agrícolas de los tipos de suelo *Vertisol pélico*, *Phaeozem háplico* y *Regosol éutrico* posteriormente se hizo un muestreo mediante cuadrículas de dimensiones 20 m x 20 m en donde se analizó las muestras tomadas determinándose: pH, capacidad de intercambio catiónico, materia orgánica, P – Bray y porcentaje de arcilla. Se realizó el análisis estadístico descriptivo de los datos obtenidos, semivariogramas y su ajuste respectivo a modelos teóricos, prueba de validación cruzada e interpolación mediante el método de kriging. Las variables que resultaron con mejor ajuste fueron representadas mediante mapas. De los resultados obtenidos se determinó que los coeficientes de variación más bajo correspondieron al pH (2.71%, 11.37% y 11.50%) y los más altos para P – Bray (32.22%, 35.50% y 37.38%). El gaussiano, el exponencial y el esférico fueron los que mayor ajuste presentaron en los modelos teóricos de semivariogramas, cuyos rangos de dependencia espacial se situaron entre 42 metros hasta 601 metros. Las variables analizadas presentaron isotropía en cada una de las parcelas evaluadas.

Mosqueira (2017), en su estudio variabilidad espacial de las propiedades físicas y químicas en un suelo agrícola en el valle del Mantaro cuyo objetivo fue determinar la distribución espacial de las propiedades físicas y químicas en un suelo agrícola en el valle del Mantaro y su relación con la topografía; para ello su objetivo de estudio (suelo agrícola) fue dividido en mallas de cuadrículas de dimensiones 10 m x 10 m las mismas que dieron lugar a 52 intersecciones posteriormente se obtuvieron muestras de suelo (20 cm de profundidad) que fueron tomadas en cada intersección. Se determinó los siguientes parámetros: el color del suelo, humedad gravimétrica, pH, capacidad de intercambio catiónico, densidad aparente, contenido de materia orgánica, cationes intercambiables, potasio y fósforo disponible y microelementos. Finalmente, estos parámetros fueron comparados mediante una correlación lineal y posteriormente someterlos a un análisis multivariado de componentes principales. Los resultados reportaron que existe una correlación significativa entre los parámetros analizados y la topografía del terreno; se han encontrado correlaciones significativas entre la capacidad de intercambio catiónico y

materia orgánica, los contenidos de hierro y zinc y el calcio intercambiable. En la parte baja del terreno se observó que hubo incremento de materia orgánica, lo contrario ocurrió en la parte alta del terreno. Las variables potasio extraíble, potasio intercambiable, manganeso, densidad aparente, manganeso y en menor medida el pH estuvo correlacionados positivamente con la altitud del terreno, encontrándose que disminuían cada uno de estos parámetros conforme la altitud disminuye.

Reátegui et al. (2018), menciona en su tesis. “Calidad de suelos en diferentes sistemas de uso de la tierra, distrito el eslabón, provincia de Huallaga-San Martín”, se interpretaron los indicadores físicos y químicos de los suelos, presentaron estructura granular y textura franco arcilloso a franco arcillo arenosos, densidad aparente del suelo se encuentran dentro de los suelos francos, temperatura promedio 26.76 °C, alta resistencia a la penetración del suelo y es un suelo profundo, pH de moderadamente ácido a neutro, contenidos medio de materia orgánica, nitrógeno, fósforo, CIC, bajo contenido de potasio y magnesio y alto contenido de calcio; se representó cartográficamente en mapas temáticos la distribución de los indicadores físicos y químicos en los diferentes sistemas de uso de la tierra utilizando el método kriging; se identificaron 11 órdenes de la clase insecta, predominando las himenópteras e isópteras en todos los sistemas, mayor densidad y biomasa se registró en los primeros 10 cm, que decrecieron con la profundidad, el bosque secundario presentó mayor densidad y biomasa que los demás sistemas, cultivo de yuca fue más diverso que los demás sistemas de uso evaluados (maíz, pasto y bosque secundario).

Ames (2019), en su tesis “Diagnóstico fisicoquímico de los componentes del suelo de la comunidad de San Antonio de Sunec”, cuyo objetivo fue hacer un diagnóstico fisicoquímico de los componentes del suelo, mediante la medición de los parámetros físico, químico, en base a los resultados obtenidos en los laboratorios SGS y el laboratorio de la Universidad Nacional de la Agraria. El área de estudio fue la totalidad de los terrenos de la comunidad campesina de San Antonio de Sunec de una extensión de 11 958.68 ha. Se tomaron 10 puntos para la determinación de la calidad del suelo. Posteriormente, se realizó

31 calicatas para la determinación de la caracterización de los suelos, realizándose los análisis físicos que fueron densidad aparente, textura, composición mecánica de los suelos. Se realizaron análisis químicos de pH, materia orgánica, fosforo y salinidad. Las muestras fueron tomadas puntualmente en un tiempo y lugar determinado escogido estratégicamente de acuerdo a los estándares establecidos en el reglamento para la ejecución del levantamiento de suelos (D.S. 013-2010-AG) y la clasificación de la taxonomía de los suelos se establecieron de acuerdo a las consideraciones y definiciones expuestas en la taxonomía de suelos de Keys of soil taxonomy. Los resultados obtenidos nos permiten tener una caracterización taxonómica de los suelos de esta comunidad campesina además al comparar y evaluar los resultados que se obtuvieron del diagnóstico fisicoquímico de los componentes del suelo de la comunidad de San Antonio de Sunec con los rangos establecidos en los Estándares de Calidad Ambiental para Suelos (D.S. 011-2017- MINAMECA) se concluye que los valores reportados son menores a los establecidos en los estándares de calidad para suelos agrícolas, tanto en metales pesados como para hidrocarburos.

Mosquera (2017), menciona en su tesis: “Variabilidad espacial de propiedades físicas y químicas en un suelo agrícola en el valle del Mantaro” que los suelos de regiones montañosas pueden mostrar una gran necesidad espacial en sus propiedades, la que puede afectar los resultados en experimentaciones de campo. La necesidad espacial de propiedades físicas y químicas en un suelo de la comunidad campesina de Aramachay (sierra central del Perú) fue evaluada con el fin de establecer las posibles interacciones entre propiedades y el alivio. El campo en estudio fue subdividido en cuadrículas de 10 mx 10 m resultando 52 intersecciones. Muestras las de la capa arable (20 cm) fueron tomadas en cada intersección. El color, la densidad aparente, la humedad gravimétrica, el pH, la capacidad de intercambio catiónico, el contenido de materia orgánica, el fósforo y el potasio disponibles, los cationes cambiabiles y los microelementos fueron determinados. Las variables cuantitativas fueron comparadas entre sí para determinar el grado de conexión lineal, y sujetas al análisis multivariado de componentes principales. Los resultados

mostraron una alta escasez espacial en la parcela estudiada, con una significativa coincidencia entre la variación del alivio y los diversos parámetros analizados, encontrándose correlaciones significativas entre la materia orgánica y la capacidad de intercambio catiónico, el calcio intercambiable y los contenidos de zinc y hierro. La materia orgánica se incrementó en las partes bajas de la parcela y resultó en las partes altas. Variables como la densidad aparente, el potasio extraíble, el potasio cambiante, el manganeso y en menor grado el pH, se correlacionaron positivamente con la altitud del terreno. Las propiedades de los suelos en las regiones montañosas pueden mostrar una alta variabilidad espacial, lo que puede afectar los resultados de la investigación de campo. Se evaluó la variabilidad espacial de las propiedades físicas y químicas del suelo en una parcela de la comunidad campesina de Aramachay (Andes centrales del Perú) para establecer posibles interacciones entre ellas y el relieve. La parcela en estudio se dividió en una cuadrícula de 10 mx 10 m, lo que resultó en 52 intersecciones. Se tomaron muestras de suelo de la rebanada del surco (20 cm de profundidad) en cada intersección. Se analizó el color del suelo, densidad aparente, contenido de humedad gravimétrica, pH, capacidad de intercambio catiónico, contenido de materia orgánica, P (Olsen) y K (acetato de amonio) disponibles, cationes intercambiables y micronutrientes. Todas las variables cuantitativas se compararon por pares para determinar la correlación lineal y se sometieron a análisis multivariado de componentes principales. Los resultados mostraron una alta variabilidad espacial en la parcela, con una correlación significativa entre la variación del relieve y la mayoría de los parámetros analizados. Se encontraron correlaciones significativas entre la materia orgánica del suelo y la capacidad de intercambio catiónico, el calcio intercambiable y los contenidos de zinc y hierro. La materia orgánica del suelo aumentó en las partes bajas de la parcela y disminuyó en las partes altas. Variables como la densidad aparente, el potasio disponible, el potasio intercambiable, el manganeso y, en menor medida, el pH del suelo, se correlacionaron positivamente con la altitud del terreno, disminuyendo conforme decrecía la altitud. Calcio intercambiable y los contenidos de zinc y hierro. La materia orgánica del suelo aumentó en las partes bajas de la parcela y disminuyó en las partes

altas. Variables como la densidad aparente, el potasio disponible, el potasio intercambiable, el manganeso y, en menor medida, el pH del suelo, se correlacionaron positivamente con la altitud del terreno, disminuyendo conforme decrecía la altitud. Calcio intercambiable y los contenidos de zinc y hierro. La materia orgánica del suelo aumentó en las partes bajas de la parcela y disminuyó en las partes altas. Variables como la densidad aparente, el potasio disponible, el potasio intercambiable, el manganeso y, en menor medida, el pH del suelo, se correlacionaron positivamente con la altitud del terreno, disminuyendo conforme decrecía la altitud.

Saquicela et al. (2022), menciona que las propiedades de los suelos con pastizales de pastoreo frecuentemente se degradan en las zonas tropicales. El objetivo de este trabajo fue revisar la literatura de la teoría y resultados del muestreo y análisis de la variabilidad espacial de las propiedades del suelo de pastizales. Se revisó la metodología, resultados y discusión de 15 artículos del tema, disponibles en las bases de datos: Scopus, SciELO, Science Direct, Scimago Journal & Country Rank, Dialnet y SpringerLink; y la teoría respectiva de 5 libros. Se encontró que a nivel mundial existen trabajos de muestreo de suelos que evalúan la variabilidad espacial de sus propiedades; mientras que a nivel nacional los muestreos no consideran dicha variabilidad. Es importante llevar a cabo en Perú investigaciones de la variabilidad espacial de propiedades del suelo de pastizales, que permitan tomar decisiones fiables para su manejo y conservación.

Aguirre (2023), en su tesis “Caracterizar los suelos por sus propiedades físicas, químicas, su capacidad de uso mayor, su clase de uso mayor y su uso actual en tres sectores de la Comunidad de Huayllati – Grau – Apurímac”, fue una investigación de nivel descriptivo, transversal, con un enfoque mixto, no experimental. La población del estudio estuvo conformada por tierras ubicadas en los tres sectores Accahuaray, Topopampa y Padroma, se realizó un muestreo aleatorio sistemático, se ha utilizado la metodología establecida por el Decreto Supremo N° 017-2009-AG, del MINAGRI, para las variables cuantitativas las muestras de suelos tomadas fueron recolectadas para su posterior análisis en laboratorio, para su caracterización, las muestras de las variables cualitativas fueron

registradas en fichas de recojo de información para su análisis. Los resultados muestran que las características de las propiedades químicas de suelos en tres sectores: Accahuaray, Topopampa y Padroma, muestra diferencias significativas (Sig.<0.050) entre las variables de los sectores, siendo el sector Padroma mostrando mejores características de las propiedades químicas frente a los otros sectores. Las características de las propiedades físicas de suelos en tres sectores: Accahuaray, Topopampa y Padroma, muestran diferencias significativas (Sig.<0.050) entre las variables de los sectores, siendo el sector de Topopampa que presenta mejores características de las propiedades físicas frente a los otros sectores. Las características de los suelos por grupo de capacidad de uso mayor en tres sectores, muestran agrupación (Sig.<0.050), con porcentajes mayores en los grupos de capacidad de uso mayor (A) tierras de cultivo en limpio. Las características de los suelos por clase de capacidad de uso mayor en tres sectores, muestran agrupación (Sig.<0.050), con porcentajes mayores en los grupos de clase de uso mayor (A2) tierras de cultivo en limpio con calidad agrología media. El uso actual de suelos de los tres sectores, muestran agrupación (Sig.<0.050), con porcentajes de cultivos y frutales, plantas de protección y cobertura, diferentes en cada sector.

Flores et al. (2021), en su tesis. “Evaluación de propiedades físicas de los suelos agrícolas del Centro de Investigación y Producción de Santo Tomas – UTEA – Abancay – Apurímac”. Es la esencia de la investigación fue evaluar las propiedades físicas de los suelos agrícolas, y para determinar cada componente se recurrió al uso del método de bouyoucos para textura, la estructura mediante el método comparativo, la densidad aparente por el método de cilindro, densidad real por picnómetro, porosidad a través de los resultados de la densidad aparente y densidad real, profundidad efectiva mediante observación y medición directa, y color del suelo a partir de las muestras y uso de la tabla Munssell e interpretación. El área total de investigación de 22.31 hectáreas fueron delimitadas en zona alta, media y baja, con sus respectivas parcelas, siendo la unidad de análisis una muestra de una parcela, haciendo un total de 20 muestras. Los resultados de textura predominan en la zona alta como franco arcilloso (48.886%), en la zona media y

baja es arcillo arenoso de (50.00 %) y (42.86 %) respectivamente. La estructura es granular y migajosa, la densidad aparente varía de 1.66 a 1.82 gr/cm³, la densidad real en promedio de 2.20 a 2.42 gr /ml; porosidad variable, de media, alta a muy alta; profundidad efectiva de moderadamente profundos a profundo, y suelos de color marrón para toda la zona de estudio. Finalmente, se clasificó los suelos según la Clasificación de Tierras por su Capacidad de Uso Mayor en suelos aptos para cultivos permanentes en la zona alta y media, y suelos de aptitud para cultivos en limpio en la zona baja.

3.2 Bases teóricas

3.2.1 Evaluación de la variabilidad espacial

De acuerdo al **INTA (2022)**, la variabilidad del suelo son las diferencias de condiciones que existe en un lote pudiendo ser niveles de nutrimentos y tipos de suelos; esto implica, como manifiesta **Fernández (2007)**, que suelos cercanos puedan presentar diferencias graduales.

Mulla et al. (2000), sostienen que la variación del suelo no solo sucede en extensiones muy grandes producto de las condiciones climáticas y material de origen, sino también, en superficies pequeñas a consecuencia de cambios topográficos que tiene efectos en el almacenamiento y transporte del agua en el perfil de suelos.

Brouder et al. (2001), indican que determinar la variabilidad espacial y el empleo de mapas facilitan un manejo específico del terreno que influye de manera favorable en el rendimiento del cultivo.

3.2.1.1 Técnicas descriptivas para evaluar la variabilidad espacial

Al respecto, **Isaaks et al. (1989)**, - **Mendenhall et al. (1997)**, sostienen que durante el proceso de evaluar la variabilidad espacial del suelo se obtienen una cantidad de datos que pueden ser descritos por técnicas estadísticas descriptivas, por ejemplo, el histograma permite conocer la distribución de frecuencias en la variable de estudio. Al respecto, **Mulla et al. (2000)**, señalan que la distribución de estos datos puede ajustarse a una forma Normal o No – normal, resultando simétrica o asimétrica.

Estos autores también señalan que el uso de medidas de tendencia central y de

dispersión resumen las distribuciones antes señaladas.

3.2.1.2 Técnicas geoestadísticas para evaluar la variabilidad espacial

Según **Giraldo (2002)**, la geoestadística se emplea para realizar análisis e inferir valores de una variable distribuida a nivel espacio – temporal que se encuentran correlacionadas con otras. El estudio de esta correlación se le denomina modelamiento de variogramas o análisis estructural mientras que la inferencia se realiza con el método de kriging para estimar valores donde no se han realizado muestreos a partir de zonas muestreadas.

Rubiano (2004), afirma que con la geoestadística se interpretan datos como variables regionalizadas mediante una función numérica que tiene distribución espacial continua aparente que cambia entre puntos, estas variaciones se representan a través de funciones matemáticas de gran complejidad que expresan posibles interacciones de componentes: componente estructural ligado a un valor medio constante, componente aleatorio correlacionado espacialmente y un error residual aleatorio.

3.2.2 Propiedades edáficas de un suelo agrícola

3.2.2.1 Propiedades físicas

Para **Zavaleta (1992)**, las propiedades físicas del suelo reflejan el comportamiento mecánico de este y representan el balance que hay entre los componentes que la conforman: partículas, contenido de agua y aire.

INTAGRI (2017), manifiesta que las propiedades físicas de un suelo resultan de la interacción que tiene lugar entre las distintas fases del mismo (suelo, agua y aire) y la proporción en la que se encuentran cada una de estas. La capacidad de sostenimiento, facilidad de penetración por el sistema radicular de los cultivos, capacidad de almacenar agua, circulación del aire y la retención de nutrientes está determinado por las propiedades físicas del suelo que a su vez influyen en el desarrollo de los cultivos.

Las propiedades físicas del suelo constituyen características fundamentales que determinan su capacidad productiva y funcionalidad ecosistémica. Según Brady y Weil (2017), estas propiedades influyen directamente en los procesos de infiltración, retención

de agua, aireación y desarrollo radicular de las plantas.

Textura del suelo: Arena, Limo y Arcilla

La textura del suelo se define como la proporción relativa de partículas minerales de diferentes tamaños: arena (2.0-0.05 mm), limo (0.05-0.002 mm) y arcilla (<0.002 mm) (Porta et al., 2014). Esta propiedad es considerada una de las más estables y fundamentales, ya que permanece invariable en el tiempo y determina numerosas características edáficas (Thompson et al., 2019).

Las partículas de **arena** son las de mayor tamaño y presentan baja capacidad de retención de agua y nutrientes debido a su limitada superficie específica. Los suelos arenosos se caracterizan por alta permeabilidad, buena aireación y facilidad de laboreo, pero también por baja fertilidad natural y susceptibilidad a la lixiviación (Hillel, 2013).

El **limo** representa partículas de tamaño intermedio que confieren al suelo propiedades moderadas en términos de retención hídrica y disponibilidad de nutrientes. Los suelos limosos poseen textura sedosa al tacto y pueden presentar problemas de compactación cuando están húmedos (Jury y Horton, 2004).

La **arcilla**, constituida por las partículas más finas, presenta alta superficie específica y carga eléctrica superficial, lo que le confiere elevada capacidad de intercambio catiónico (CIC) y retención de agua (Singer y Munns, 2006). Los suelos arcillosos son generalmente fértiles pero pueden presentar problemas de drenaje, aireación deficiente y dificultad en el laboreo (Charman y Murphy, 2016).

La distribución espacial de estas fracciones texturales en un predio agrícola determina zonas de manejo diferenciado, afectando la productividad del cultivo y las prácticas agronómicas requeridas (Corwin y Lesch, 2005). La variabilidad espacial de la textura puede originarse por procesos pedogenéticos, material parental heterogéneo o prácticas de manejo previas (Goovaerts, 1998).

3.2.2.2 Propiedades químicas

Bautista et al. (2004), al respecto sostienen que las propiedades químicas del suelo se relacionan con la calidad y disponibilidad de nutrimentos y agua para las plantas,

entre las propiedades más resaltantes, se tiene a la materia orgánica, el pH, conductividad eléctrica, fósforo, nitrógeno y potasio. Estas propiedades afectan procesos como el ciclo de nutrientes, formación del suelo, el destino de los contaminantes y la erosión.

Las propiedades químicas del suelo determinan la disponibilidad de nutrientes esenciales para las plantas y su capacidad para sostener la producción agrícola de manera sostenible. Estas propiedades son dinámicas y pueden modificarse mediante prácticas de manejo (Tan, 2011).

pH del suelo

El pH representa la concentración de iones hidrógeno (H^+) en la solución del suelo y constituye uno de los indicadores químicos más importantes, ya que afecta la disponibilidad de nutrientes, la actividad microbiana y los procesos de adsorción-desorción (Havlin et al., 2014). La escala de pH varía de 0 a 14, siendo 7 el punto neutro; valores inferiores indican acidez y superiores alcalinidad (Brady y Weil, 2017).

La disponibilidad óptima de la mayoría de los nutrientes esenciales ocurre en un rango de pH entre 6.0 y 7.5 (Mengel et al., 2001). En suelos ácidos ($pH < 5.5$), aumenta la solubilidad de elementos potencialmente tóxicos como aluminio y manganeso, mientras que disminuye la disponibilidad de fósforo, calcio y magnesio (Sumner y Noble, 2003). En suelos alcalinos ($pH > 8.0$), se reducen la disponibilidad de micronutrientes como hierro, manganeso, zinc y cobre (Fageria et al., 2011).

Conductividad eléctrica (C.E.)

La conductividad eléctrica mide la capacidad del suelo para conducir corriente eléctrica y está directamente relacionada con la concentración de sales solubles presentes en la solución del suelo (Richards, 1954). Se expresa comúnmente en deciSiemens por metro (dS/m) o miliSiemens por centímetro (mS/cm) (Rhoades et al., 1999).

Los valores de C.E. permiten clasificar los suelos según su nivel de salinidad: no salinos (C.E. < 2 dS/m), ligeramente salinos (2-4 dS/m), moderadamente salinos (4-8 dS/m), fuertemente salinos (8-16 dS/m) y extremadamente salinos (> 16 dS/m) (Ayers y

Westcot, 1985). La salinidad excesiva afecta negativamente el crecimiento vegetal debido al estrés osmótico que dificulta la absorción de agua por las raíces y provoca toxicidad por iones específicos (Munns y Tester, 2008).

La variabilidad espacial de la C.E. en predios agrícolas puede ser resultado de diferencias en el material parental, topografía, drenaje, riego inadecuado o ascenso capilar de aguas freáticas salinas (Corwin y Lesch, 2003).

Nitrógeno

El nitrógeno (N) es el nutriente más comúnmente deficiente en suelos agrícolas y el más demandado por los cultivos (Havlin et al., 2014). Se encuentra en formas orgánicas (95-98% del N total) e inorgánicas, siendo estas últimas las disponibles para las plantas: amonio (NH_4^+) y nitrato (NO_3^-) (Stevenson y Cole, 1999).

La mineralización del nitrógeno orgánico es un proceso biológico mediado por microorganismos del suelo que libera formas inorgánicas asimilables (Schimel y Bennett, 2004). Este proceso está influenciado por temperatura, humedad, pH, aireación y relación carbono/nitrógeno del material orgánico (Robertson y Groffman, 2015).

El nitrógeno presenta alta movilidad en el suelo, siendo susceptible a pérdidas por lixiviación del nitrato, volatilización del amonio, desnitrificación y erosión (Schlesinger, 2009). Esta característica contribuye significativamente a su variabilidad espacial en predios agrícolas, junto con diferencias en la materia orgánica, historia de cultivos y aplicaciones previas de fertilizantes (Mulla y McBratney, 2000).

Fósforo

El fósforo (P) es un macronutriente esencial para las plantas, participando en procesos fundamentales como la fotosíntesis, respiración, transferencia de energía (ATP) y síntesis de ácidos nucleicos (Marschner, 2012). A pesar de su abundancia en muchos suelos, generalmente se encuentra en formas poco disponibles para las plantas (Holford, 1997).

El fósforo disponible representa una fracción muy pequeña del P total del suelo (0.1-1%), ya que reacciona rápidamente con cationes metálicos formando compuestos de

baja solubilidad (Sims y Sharpley, 2005). En suelos ácidos, el P se fija principalmente con hierro y aluminio, mientras que en suelos alcalinos precipita con calcio (Sample et al., 1980).

La variabilidad espacial del fósforo en suelos agrícolas está asociada a prácticas de fertilización histórica, aplicaciones de materia orgánica, erosión, pH y contenido de arcillas (Cambardella et al., 1994). Los métodos de extracción química para determinar P disponible varían según las características del suelo: Olsen para suelos alcalinos y calcáreos, Bray-1 para suelos ácidos, y Mehlich-3 como método universal (Mallarino y Blackmer, 1992).

Potasio

El potasio (K) es el tercer macronutriente en importancia y el catión más abundante en las plantas, desempeñando funciones cruciales en la regulación osmótica, activación enzimática, fotosíntesis y translocación de fotosintatos (Römheld y Kirkby, 2010). A diferencia del nitrógeno y fósforo, el K no forma compuestos orgánicos en las plantas sino que permanece como ion libre (K^+) (Zörb et al., 2014).

El potasio en el suelo se encuentra en cuatro fracciones: estructural (90-98% del K total, no disponible), no intercambiable o fijado (1-10%), intercambiable (1-2%) y en solución (<0.2%) (Sparks y Huang, 1985). Las formas intercambiables y solubles constituyen el K disponible para las plantas (Mengel y Kirkby, 2001).

La textura del suelo influye significativamente en la dinámica del potasio: suelos arcillosos con minerales 2:1 presentan mayor capacidad de retención y fijación, mientras que suelos arenosos tienen baja reserva y son susceptibles a la lixiviación (Barré et al., 2008). La variabilidad espacial del K está relacionada con el tipo de arcilla, contenido de materia orgánica, historia de fertilización y extracción por cultivos (Mallarino et al., 1999).

Calcio + Magnesio (Ca + Mg)

El calcio (Ca) y el magnesio (Mg) son macronutrientes secundarios esenciales que frecuentemente se analizan conjuntamente debido a su similar comportamiento químico y su presencia en materiales encalantes (Fageria y Stone, 2008).

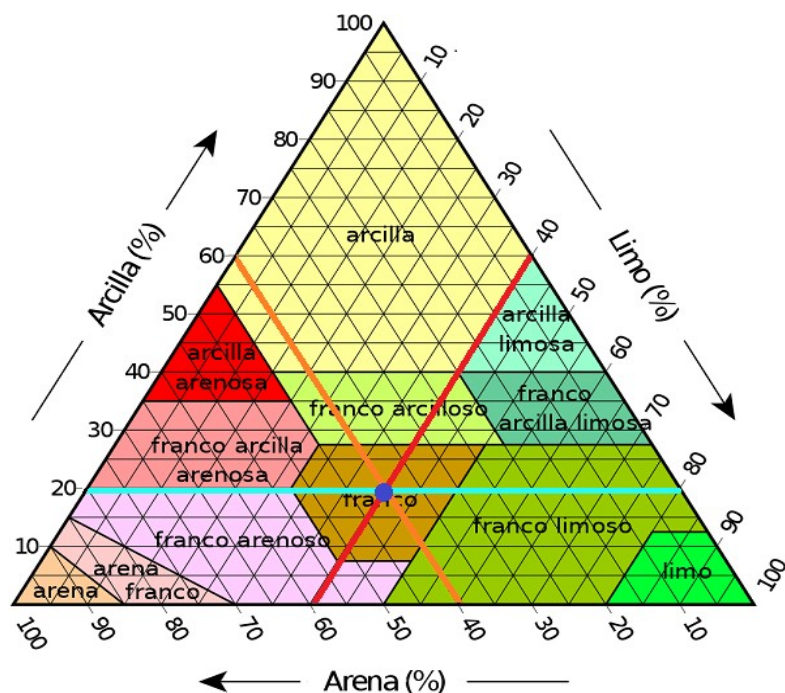
El **calcio** es fundamental para la estructura y permeabilidad de membranas celulares, división celular, elongación de raíces y como mensajero secundario en numerosas respuestas fisiológicas (White y Broadley, 2003). En el suelo, el Ca^{2+} intercambiable típicamente representa el catión dominante en el complejo de intercambio, contribuyendo a la estabilidad estructural y floculación de coloides (Sumner, 1999).

El **magnesio** es el átomo central de la molécula de clorofila y cofactor de numerosas enzimas involucradas en la síntesis de ATP y activación de procesos metabólicos (Cakmak y Yazici, 2010). La deficiencia de Mg puede ocurrir por bajos niveles absolutos o por antagonismo con exceso de K, Ca o amonio (Granssee y Führs, 2013).

La relación Ca/Mg en el complejo de intercambio catiónico afecta las propiedades físicas del suelo y la nutrición vegetal. Ratios desequilibrados pueden inducir deficiencias nutricionales incluso cuando los niveles absolutos son adecuados (McLean y Brown, 1984). La variabilidad espacial de Ca y Mg está determinada por el material parental, grado de meteorización, pH, capacidad de intercambio catiónico y prácticas de encalado (McLaughlin y Smolders, 2001).

Figura 1

Triángulo textural



Nota. McLaughlin y Smolders, (2001)

3.2.2.2 Clasificación de suelos en el peru

Se basa principalmente en la Clasificación de Tierras por su Capacidad de Uso Mayor (CTCUM), que las agrupa en 5 grupos según su aptitud: Tierras Aptas para Cultivo en Limpio (A), Cultivos Permanentes (C), Pastos (P), Aptitud Forestal (F) y Protección (X), considerando factores como el clima, relieve y suelo para promover el uso sostenible, además de sistemas como las regiones geoedáficas de la FAO.

3.3 Definición de términos

1. **Textura del suelo.** La textura del suelo es la proporción de arena, arcilla y limo que pueden estar agrupadas en gruesa, media y fina **INTAGRI (2017)**.
2. **Densidad aparente.** Se define como masa del suelo por unidad de volumen expresado en g.cm^{-3} o t.m^{-3} **Keller et al. (2010)**.
3. **pH del suelo.** La **FAO (2022)**, indica que el pH determina el grado de adsorción de iones (H^+) por las partículas del suelo e indica si un suelo está ácido o alcalino. El valor del pH se encuentra entre 3.5 (muy ácido) a 9.5 (muy alcalino).
4. **Nitrógeno del suelo.** Elemento de mayor importancia para la nutrición de los cultivos y es el que está más ampliamente distribuido en la naturaleza **FAO (2022)**.
5. **Fósforo del suelo.** El fósforo es el segundo elemento mineral de mayor importancia en la agricultura a nivel mundial **INTAGRI (2017)**.
6. **Potasio del suelo.** El potasio (K^+) es un macronutriente esencial para las plantas, las cuales necesitan cantidades elevadas de este nutriente, incluso semejantes a las necesidades del nitrógeno en algunos casos **INTAGRI (2017)**.
7. **Conductividad eléctrica.** La conductividad eléctrica mide la concentración de sales solubles que están presentes en la solución del suelo **INTAGRI (2017)**.

IV. Metodología

4.1 Tipo y nivel de investigación

4.1.1 Tipo de investigación

La presente investigación es de tipo **aplicada**, ya que su propósito fundamental es resolver un problema práctico e inmediato que afecta a los agricultores de San Pedro de Cachora. No se busca generar conocimiento teórico puro (investigación básica), sino utilizar teorías, principios y métodos científicos ya existentes —en este caso, de la edafología y la geoestadística— para generar una solución tecnológica concreta y tangible. El resultado final, que son los mapas de variabilidad espacial, constituye una herramienta de diagnóstico con una aplicación directa en la toma de decisiones para un manejo agrícola más eficiente y sostenible.

4.1.1 Nivel de investigación

La investigación es descriptiva, ya que se enfoca en medir, caracterizar y especificar las propiedades edáficas del predio en estudio. El objetivo es detallar de manera sistemática y precisa los valores de los indicadores físicos (textura, densidad aparente, etc.) y químicos (pH, materia orgánica, nutrientes) en los puntos de muestreo georreferenciados. Este nivel busca responder a la pregunta: ¿cuáles son las características del suelo en el área de estudio?

4.2 Ámbito temporal y espacial

1. Ámbito temporal.

La investigación se desarrolló, entre los meses de setiembre y diciembre del año 2023, en la comunidad campesina de San Pedro de Cachora en una superficie agrícola de 2.35 hectáreas para usos agrícola.

B. Ámbito espacial**Ubicación política**

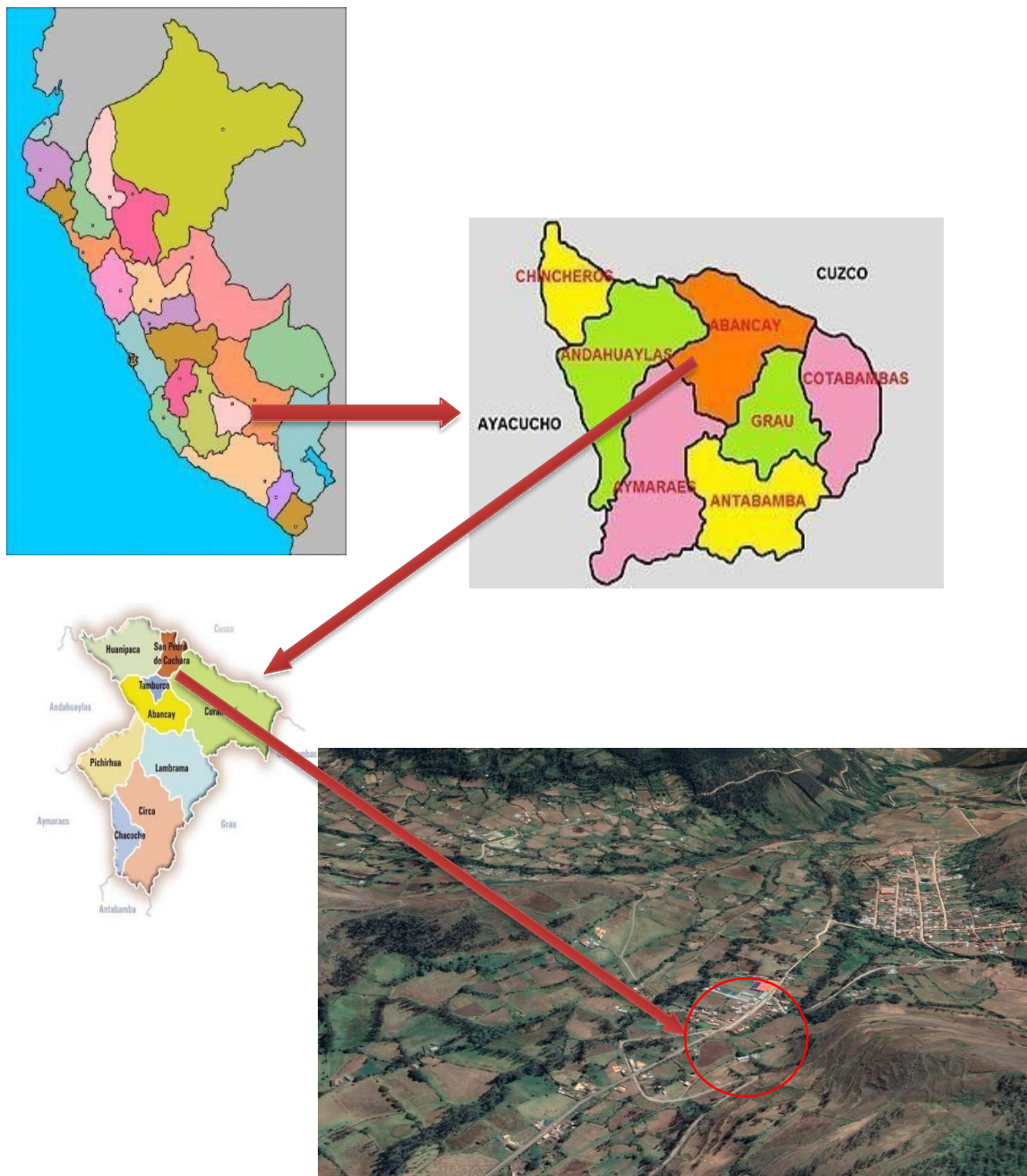
- País: Perú.
- Departamento: Apurímac
- Provincia: Abancay
- Distrito: San Pedro de Cachora
- Localidad: Paccaypata

Ubicación geográfica

- Latitud: 13° 31' 10.78" S
- Longitud: 72° 49' 04.97" O
- Altitud: 3993 msnm

Ubicación Hidrográfica

- Cuenca: Apurimac
- Subcuenca: Pachachaca
- Microcuenca: Chacamayo

Figura 2*Ubicación política de la investigación*

Nota. Adaptado de Google Earth.

4.3 Población y muestra

La investigación contempla 2.35 hectáreas (7.52 Tn de suelo húmedo) y utiliza el método del Kriging para analizar la distribución de propiedades edáficas en cada punto del área y la muestra es de 1600 kg/m³. (16 muestras)

$$1 \text{ ha} \text{-----} 10.000 \text{ m}^2$$

$$2.35 \text{ ha} \text{-----} x$$

$$2.35 \text{ ha} \times 10.000 \text{ m}^2 = 23.500 \text{ m}^2$$

$$1 \text{ ha}$$

$$23.500 \text{ m}^2 \times 0.2 \text{ m (altura del suelo)} = 4700 \text{ m}^3$$

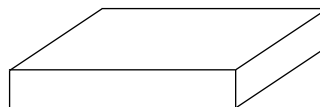
$$4700 \text{ m}^3 \times 1.600 \text{ kg/m}^3 \text{ (muestras)} = 7\,520.000 \text{ kg}$$

Convirtiendo a Tn

Ancho = 134.142 m

$$1 \text{ Tn} \text{-----} 1000 \text{ kg}$$

$$X \text{ Tn} \text{-----} 7\,520.000 \text{ kg}$$



Altura = 0.20m

Largo = 175.187 m

$$7\,520.000 \text{ kg} \times 1 \text{ Tn} = 7.52 \text{ Tn}$$

$$1000 \text{ kg}$$

4.4 Instrumentos

1.º **Sistema de posicionamiento global (GPS) Portátil:** Este fue el instrumento principal para la recolección de datos espaciales. Se utilizó un GPS de alta precisión para registrar las coordenadas geográficas (latitud y longitud) de cada punto de muestreo dentro del predio agrícola. Esta georreferenciación es el paso fundamental que vincula los datos analíticos del suelo con una ubicación específica, permitiendo el posterior análisis espacial.

2.º **Herramientas para muestreo de suelo (Pala, Barreno y Balde):** Para la extracción física de las muestras de suelo se utilizaron herramientas manuales estándar.

Se empleó una **pala recta o un barreno** para obtener submuestras a una profundidad controlada y uniforme (generalmente de 0-20 cm o 0-30 cm). Las submuestras de cada lote homogéneo se depositaron en un **balde limpio** para ser mezcladas y obtener una muestra compuesta representativa.

3.º **Bolsas de muestreo y fichas de campo:** Cada muestra compuesta se almacenó en una bolsa plástica nueva y se etiquetó con un código único. Se utilizó una **ficha de recolección de datos** o un cuaderno de campo para registrar información relevante asociada a cada punto de muestreo, como la fecha, el código de la muestra, las coordenadas GPS y cualquier observación visual sobre el terreno (ej. pendiente, color del suelo, cobertura vegetal).

- Materiales de campo
 - Yeso
- Insumos
 - Suelos (terreno)
- Herramientas de campo
 - Pico
 - Pala recta
 - Rastillo
 - Wincha
 - Cordel
 - Baldes
 - Cuaderno
 - Lapicero
 - Sobre manila A4
 - Bolsas plásticas
 - Tamizador
 - Machete

- Estaca
- Equipos de escritorio
 - Gps
 - Impresora
 - Laptop
- Instrumentos de laboratorio
 - Balanza de precisión, tamizador, pHmetro, electrodos de conductividad eléctrica y tubos de ensayos.
- Instrumentos de análisis geoespacial
 - Software de Sistema de Información Geográfica (Qgis 3.34.4) y SAGA GIS.

4.5 Procedimientos

Muestreo de suelo

El proceso de muestreo se llevó a cabo siguiendo un diseño previamente establecido, con el objetivo de obtener muestras representativas del área de estudio.

- **Delimitación de zonas de muestreo:** Se seleccionaron las zonas de muestreo en campo, las cuales fueron delimitadas mediante el uso de estacas y yeso, garantizando la correcta identificación de los puntos a muestrear.
- **Georreferenciación:** Cada punto de muestreo fue georreferenciado utilizando un receptor GPS de alta precisión, registrándose las coordenadas geográficas (latitud, longitud y altitud) para su posterior análisis espacial.
- **Extracción de muestras:** En cada punto se excavó un hoyo con forma de “V” empleando un pico y una pala recta, hasta una profundidad adecuada para el análisis del horizonte superficial del suelo. De cada lote se tomaron cinco (5) submuestras equidistantes, las cuales se homogenizaron para conformar una muestra compuesta de aproximadamente un (1) kilogramo.
- **Número total de muestras:** En total, se recolectaron dieciséis (16)

muestras de suelo representativas de toda el área de estudio, las cuales fueron debidamente rotuladas y almacenadas en bolsas plásticas herméticas para su traslado al laboratorio.

Análisis de laboratorio

Las muestras de suelo recolectadas fueron transportadas al laboratorio especializado de la Universidad Tecnológica de los Andes, donde se efectuaron los análisis físicos y químicos con el propósito de determinar los atributos edáficos relevantes para la investigación. Entre los parámetros evaluados se incluyeron textura, pH, conductividad eléctrica, fósforo, potasio, nitrógeno total y otros indicadores de fertilidad. Los procedimientos analíticos se realizaron conforme a los protocolos establecidos por la Norma Técnica Peruana (NTP) y las metodologías del Instituto Internacional de Investigación en Suelos (ISRIC).

Análisis descriptivo

Con los resultados obtenidos del laboratorio, se procedió al análisis estadístico descriptivo de todas las variables en estudio. Se calcularon medidas de tendencia central (media, mediana, moda), de dispersión (desviación estándar, coeficiente de variación) y de forma (asimetría y curtosis), con el fin de describir el comportamiento general y la distribución de los datos. Este análisis permitió identificar patrones y variaciones entre las propiedades físicas y químicas del suelo.

Análisis geoespacial

El análisis espacial de las propiedades edáficas se realizó mediante técnicas geoestadísticas.

- **Elaboración del semivariograma:** Se construyeron semivariogramas experimentales para evaluar la variabilidad espacial de cada parámetro del suelo en función de la distancia entre los puntos de muestreo.
- **Ajuste de modelos teóricos:** Los semivariogramas se ajustaron a diferentes modelos teóricos (lineal, esférico, exponencial, gaussiano, entre otros), seleccionando el que presentó el mejor ajuste según los criterios de validación cruzada

(mínimo error cuadrático medio).

- **Interpolación espacial:** Una vez ajustado el modelo, se aplicó el método de interpolación geoestadística **Kriging ordinario**, generando mapas de distribución espacial de las propiedades físicas y químicas del suelo. Estos mapas permitieron visualizar la variabilidad edáfica dentro del área de estudio y establecer zonas con características similares.

4.6 Análisis de datos

El análisis de datos en esta investigación fue estructurado en diferentes etapas, desde la preparación de los datos hasta la interpretación de los resultados.

1. Preparación de datos
 - Revisión y limpieza para asegurar que los datos recolectados en campo sean consistentes.
 - Georreferenciación de cada punto de muestro (coordenadas UTM).
2. Análisis descriptivo
 - Se generó histogramas para identificar la distribución de los datos.
3. Análisis espacial Semivariogramas y Kriging
4. Representación y visualización
 - Mapas temáticos de distribución
5. Interpretación de resultados

V. Resultados y discusión

5.1 Resultados

5.1.1 Determinar la variabilidad espacial de los parámetros físicos utilizando el método Semivariogramas y kriging para las propiedades edáficas de un predio agrícola en el distrito de San Pedro de Cachora – Apurímac - 2023

5.1.1.1 Arena

Para este parámetro se tomaron 16 muestras distribuidas (ver figura 2) en toda el área de muestreo.

Figura 3

Valores del contenido de arena por cada punto muestreado



Nota. Elaboración propia.

El análisis realizado en campo para determinar el contenido de arena (%) muestra los siguientes valores porcentuales (ver la tabla 2).

Tabla 2*Contenido de arena en la parcela*

Muestras	Coordenadas UTM WGS 84		Arena (%)
	Zona 18 Sur		
	Este	Norte	
PM1	736232	8504383	47.00
PM2	736216	8504368	40.00
PM3	736204	8504355	48.00
PM4	736195	8504350	45.00
PM5	736182	8504348	51.00
PM6	736270	8504313	54.00
PM7	736291	8504337	49.00
PM8	736280	8504345	58.00
PM9	736280	8504341	53.00
PM10	736149	8504308	55.00
PM11	736137	8504336	49.00
PM12	736239	8504307	53.00
PM13	736231	8504271	54.00
PM14	736203	8504230	41.00
PM15	736179	8504254	48.00
PM16	736193	8504286	55.00

Nota. Elaboración propia.

De acuerdo con los valores obtenidos en el muestreo, se presenta la tabla 2 en donde el valor mínimo corresponde a 40% del contenido de arena, el promedio se ubica en 50% y el máximo valor es de 58%. Por otro lado, se tiene que la desviación estándar es de 5.09% y el coeficiente de variación del 10.19%.

Tabla 3*Estadísticos para el contenido de arena (%) medido*

Estadísticos	Valor
Valor mínimo	40.00
Valor máximo	58.00
Promedio	50.00
Desviación estándar	5.09
Coeficiente de variación (%)	10.19

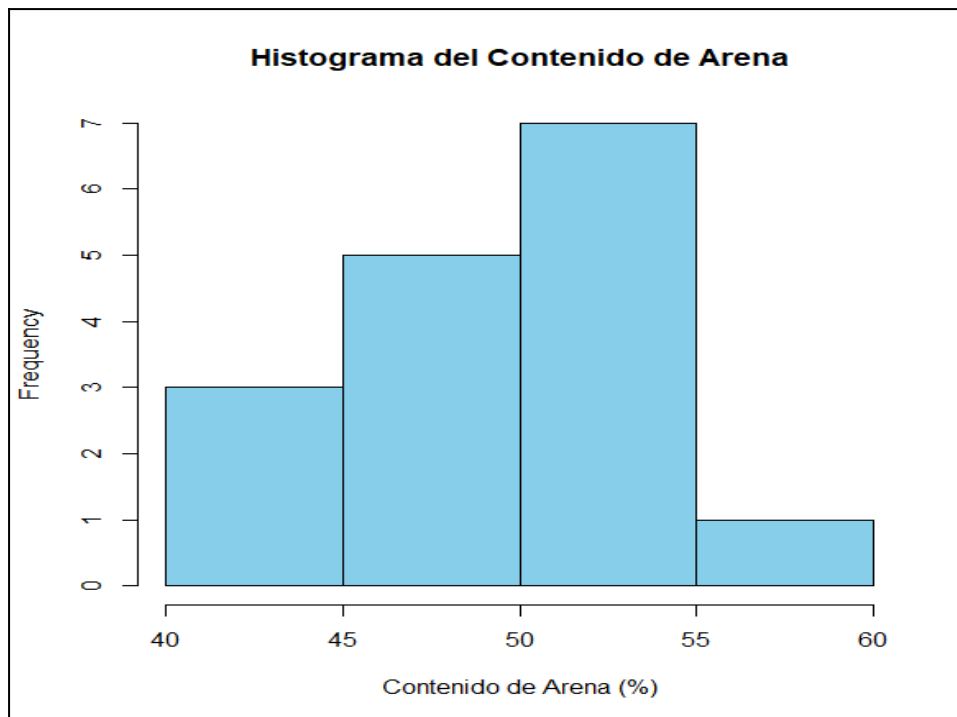
Nota. Elaboración propia.

En la figura 3, se observa el histograma del contenido de arena de un conjunto de las 16 muestras, expresado en porcentaje. La mayoría de las muestras tienen un contenido de arena entre el 50% y 55%, siendo este el rango más frecuente, mientras que los extremos, especialmente cerca del 60%, tienen una menor representación. La distribución parece concentrarse mayoritariamente entre el 45% y el 55%, con una ligera asimetría hacia valores más bajos, lo que indica que es menos común encontrar muestras

con contenido de arena por debajo del 45%. Esto sugiere que las muestras tienen niveles moderados de contenido de arena, lo que podría influir en características como la textura o la capacidad de drenaje del área de cultivo analizado.

Figura 4

Histograma del contenido de arena (%)



Nota. Elaboración propia.

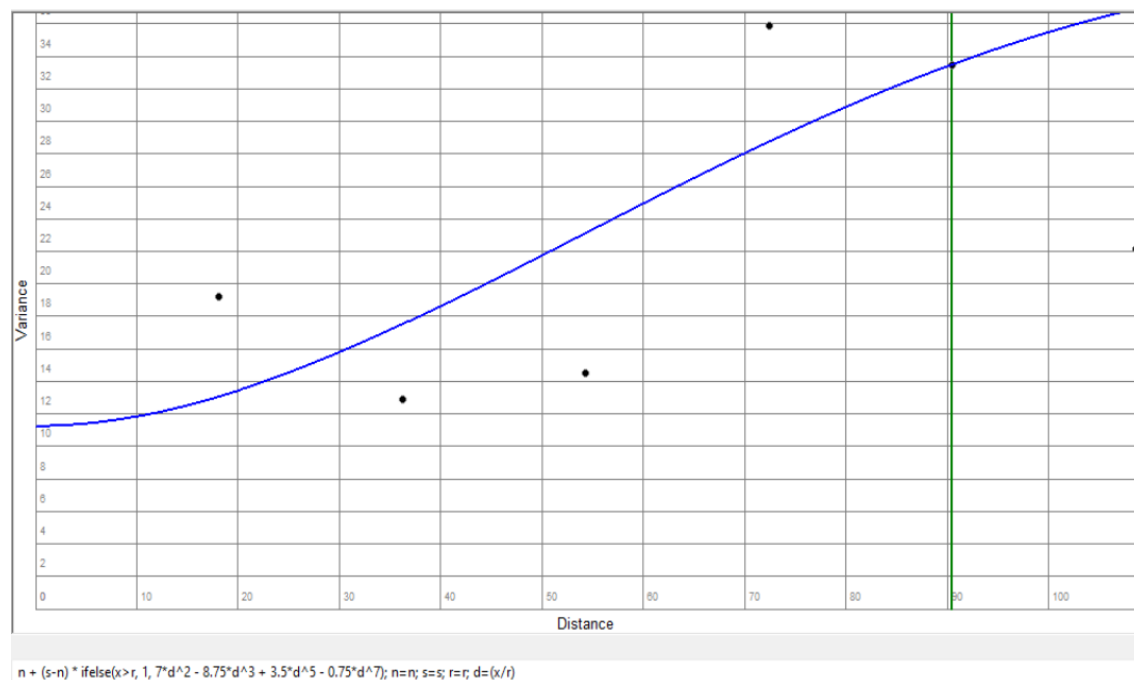
A partir de la recolección de las 16 muestras se realizó el análisis de la variabilidad espacial del contenido de arena en el área agrícola de interés. Para evaluar dicha variabilidad se construyó el semivariograma experimental utilizando las coordenadas espaciales y los valores correspondientes del contenido de arena medidas en cada muestra.

En la figura 4 se presenta el semivariograma realizado para del contenido de arena. De esta figura se observa que en el eje X (distancia) representa la separación espacial de los puntos de muestreo, mientras que en el eje Y (varianza o semivarianza) representa la similitud en los valores de las variables entre los puntos. Los puntos negros son los valores experimentales del semivariograma calculados a partir de los datos disponibles, la línea azul representa el modelo teórico (en este caso, cubico) que se ajusta a los puntos

experimentales para representar la relación espacial subyacente.

Figura 5

Semivariograma del contenido de arena (%)



Nota. Elaboración propia.

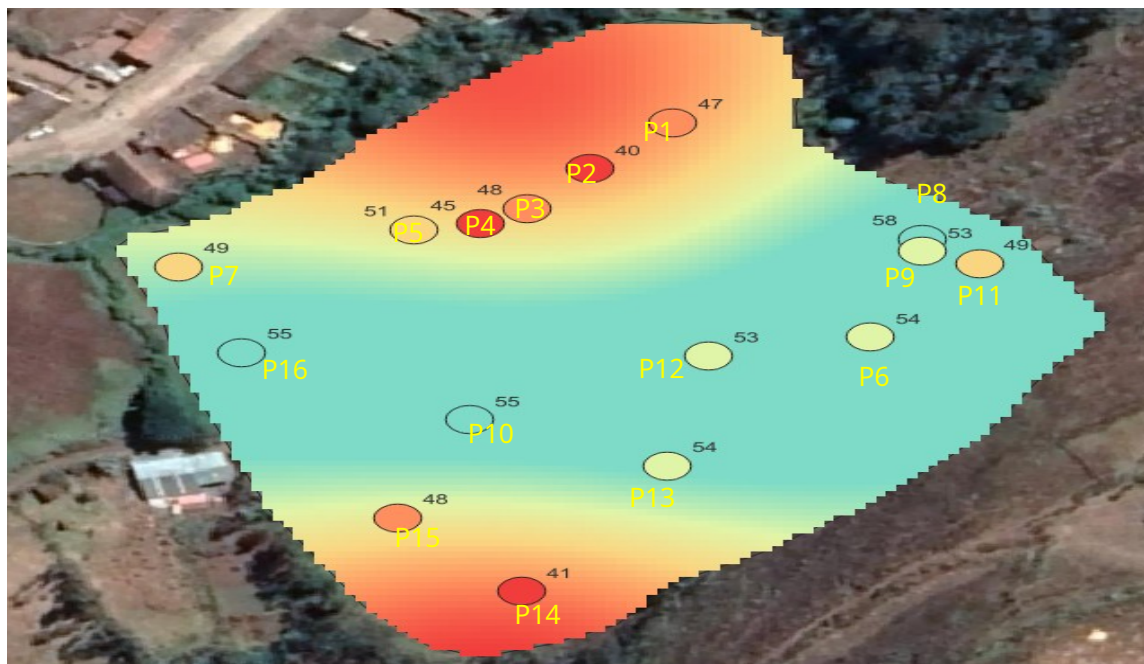
También se observa que el nugget (n), valor del origen del semivariograma, es cercano a 10 lo cual implica que existe una variabilidad del 10% en las mediciones del contenido de arena. En cuanto al sill o meseta (s), se tiene un valor de 40.08 esto significa que, en general, el contenido de arena en el campo tiene una variabilidad total que puede alcanzar hasta 40.08. A distancias muy grandes entre puntos de muestreo, esa variabilidad no se incrementa más. Y, por último, el range (r) es de 177.408 m, dentro de esa distancia, los valores de contenido de arena en los puntos cercanos tienen una cierta relación o patrón (es decir, a medida que te acercas a un punto de medición, el valor de contenido de arena será más similar al valor de un punto cercano). A distancias mayores a 177.408 metros, la relación espacial entre los puntos de medición se pierde y los valores se vuelven independientes entre sí, es decir, la variabilidad de los valores ya no está determinada por la proximidad entre puntos.

Por otro lado, el modelo tiene un ajuste del 58.90%, indicando que este modelo

cúbico explica un porcentaje moderado de la variabilidad espacial en los datos, tal como se corrobora en la figura 4 en la que se muestra la interpolación de Kriging aplicada al área de estudio, donde los valores representados en los puntos son los datos recolectados en campo sobre el contenido de arena (en este caso, porcentaje).

Figura 6

Interpolación Kriging para el contenido de arena (%)



Nota. Elaboración propia.

De esta figura 5 los círculos con colores y etiquetas numéricas representan los valores obtenidos en las mediciones de campo. Los valores más altos están asociados a los tonos más fríos (verde), mientras que los más bajos están representados en tonos más cálidos (rojo).

La interpolación de Kriging utiliza los valores puntuales para predecir los valores en el resto de la superficie. En este caso, se observa un gradiente de colores que indica cómo varía el contenido de arena (%). Por ejemplo, la zona roja indica un contenido más bajo, mientras que las áreas de color verde corresponden a valores más altos.

De los valores de interpolación obtenidos por Kriging, en la tabla 4 se presenta las estadísticas, donde se observa que el menor valor corresponde al 40% del contenido de arena, el promedio se ubica en 49.99% y el valor máximo es de 53.59%. Asimismo, se

observa que la desviación estándar es de 2.98% y el coeficiente de variación del 5.97%.

Tabla 4

Estadísticos para el contenido de arena (%) estimado

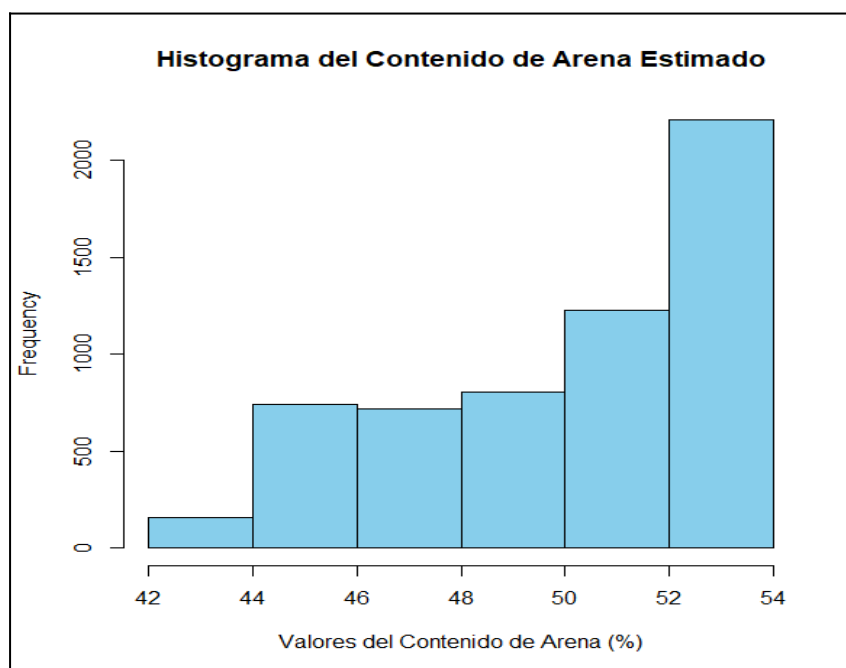
Estadísticos	Valor
Valor mínimo	40.00
Valor máximo	53.59
Promedio	49.99
Desviación estándar	2.98
Coeficiente de variación (%)	5.97

Nota. Elaboración propia.

Respecto a su distribución, en la figura 5 se observa el histograma del contenido de arena donde se muestra la distribución del contenido de arena estimado por la interpolación, expresado en porcentaje.

Figura 7

Histograma del contenido de arena (%) estimado



Nota. Elaboración propia.

El resultado de la interpolación arroja un contenido de arena entre el 52% y el 54%, siendo este el rango más frecuente, mientras que, en el extremo, especialmente cerca del 42%, tienen una menor representación. La distribución parece concentrarse mayoritariamente entre el 45% y el 50%, con una ligera asimetría hacia valores más altos, lo que indica que es menos común encontrar muestras con contenido de arena por debajo

del 42%. De manera complementaria, se evaluó el desempeño del análisis Kriging mediante la comparación directa entre los valores observados del contenido de arena y los valores estimados, utilizando como métrica el Error Cuadrático Medio (RMSE).

Tabla 5

Valor del Error Cuadrático Medio (RMSE) del contenido de arena (%)

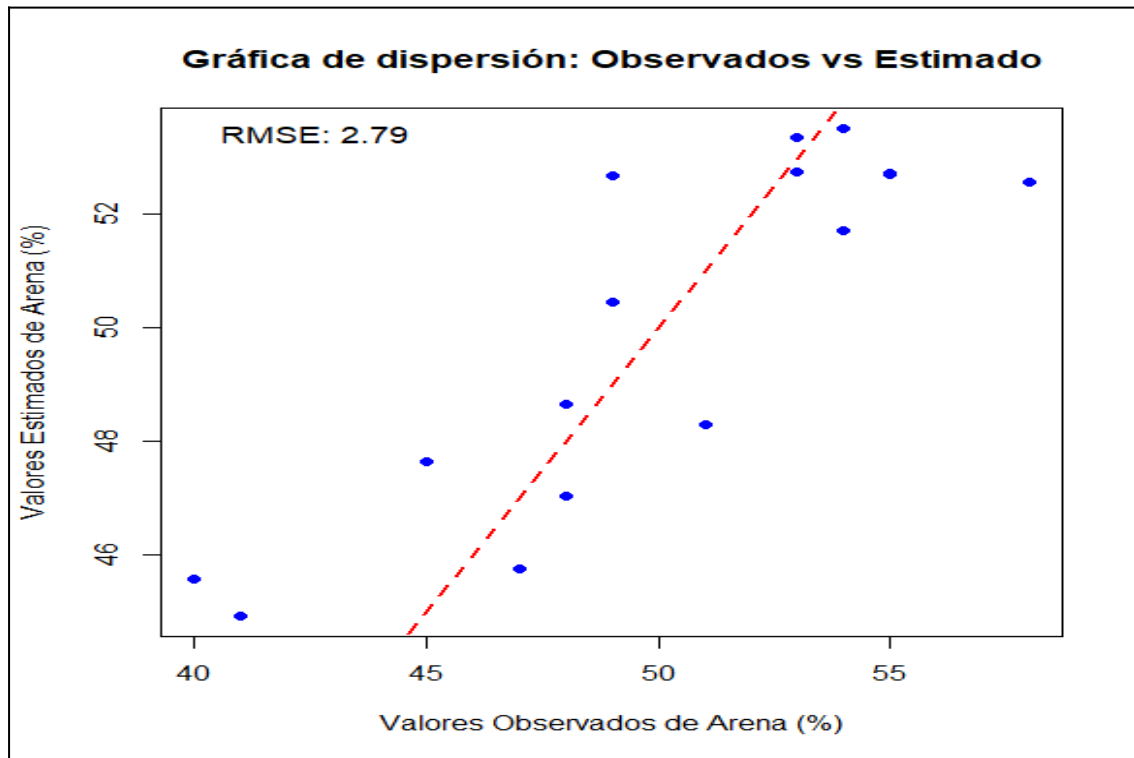
Muestras	Valor observado del contenido de arena (%)	Valor estimado del contenido de arena (%)
PM1	47.00	45.75
PM2	40.00	45.56
PM3	48.00	47.02
PM4	45.00	47.64
PM5	51.00	48.28
PM6	54.00	53.52
PM7	49.00	52.68
PM8	58.00	52.56
PM9	53.00	52.74
PM10	55.00	52.69
PM11	49.00	50.44
PM12	53.00	53.36
PM13	54.00	51.72
PM14	41.00	44.91
PM15	48.00	48.64
PM16	55.00	52.72
Error Cuadrático Medio (RMSE)		2.79

Nota. Elaboración propia.

De la tabla 5, el cálculo del RMSE arrojó un valor de 2.79, lo que indica que, en promedio, las predicciones presentan un error de aproximadamente 2.79 unidades porcentuales en comparación con los valores observados. Este resultado sugiere que las predicciones son cercanas a los valores observados, reflejando un desempeño aceptable del modelo en términos de precisión. Para complementar esta evaluación, se generó una gráfica de dispersión (figura 7) comparando los valores observados con los valores estimados. En la gráfica, los puntos cercanos a la línea de identidad (diagonal de color rojo) refuerzan la precisión del modelo, ya que indican que las predicciones se aproximan a los valores observados.

Figura 8

Gráfico de dispersión del contenido de arena (%)



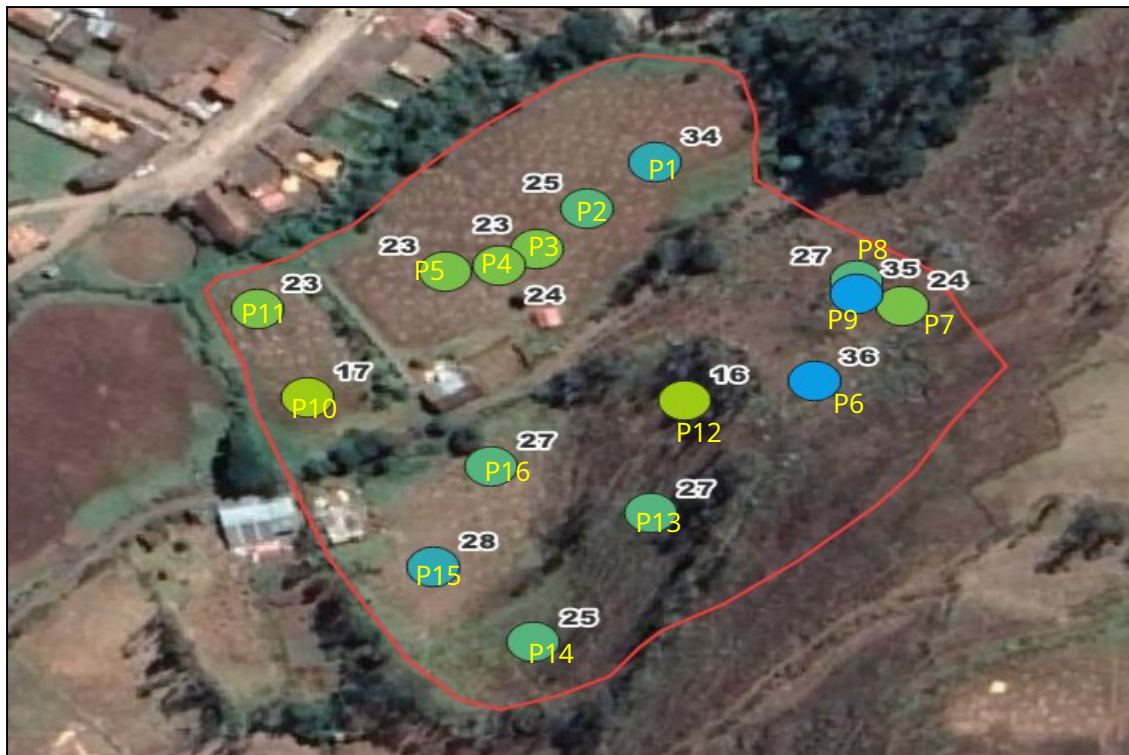
Nota. Elaboración propia.

5.1.1.2 Limo

Para este parámetro se tomaron 16 muestras distribuidas (ver figura 8) en todo el campo.

Figura 9

Valores del contenido de limo (%) por cada punto muestreado



Nota. Elaboración propia.

El análisis realizado en campo para determinar el contenido de limo (%) muestra los siguientes valores porcentuales (ver la tabla 6).

Tabla 6*Contenido de limo en la parcela*

Muestras	Coordenadas UTM WGS 84		Limo (%)
	Zona 18 Sur		
	Este	Norte	
PM1	736232	8504383	34.00
PM2	736216	8504368	25.00
PM3	736204	8504355	23.00
PM4	736195	8504350	24.00
PM5	736182	8504348	23.00
PM6	736270	8504313	36.00
PM7	736291	8504337	24.00
PM8	736280	8504345	27.00
PM9	736280	8504341	35.00
PM10	736149	8504308	17.00
PM11	736137	8504336	23.00
PM12	736239	8504307	16.00
PM13	736231	8504271	27.00
PM14	736203	8504230	25.00
PM15	736179	8504254	28.00
PM16	736193	8504286	27.00

Nota. Elaboración propia.

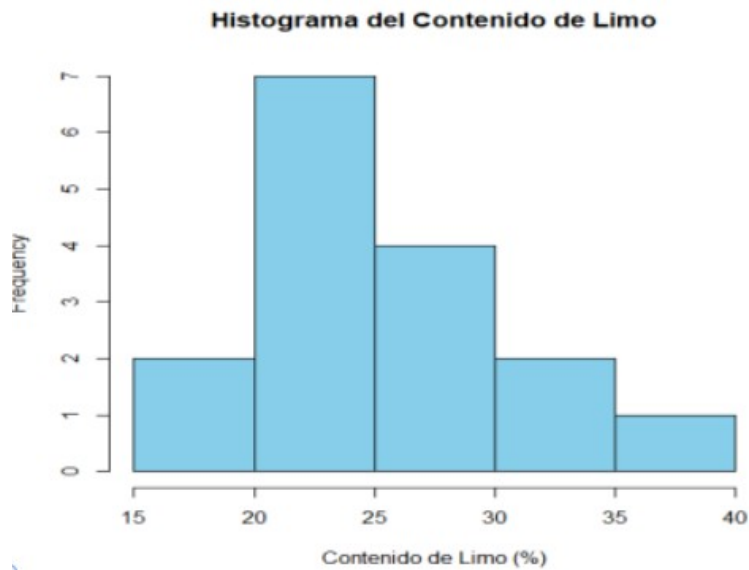
De acuerdo con los valores obtenidos en el muestreo, se presenta la tabla 6 en donde el valor mínimo corresponde a 16.00% del contenido de limo, el promedio se ubica en 25.88% y el máximo valor es de 36.00%. Por otro lado, se tiene que la desviación estándar es de 5.59% y el coeficiente de variación del 21.63%.

Tabla 7*Estadísticos para el contenido de arena (%) medido*

Estadísticos	Valor
Valor mínimo	16.00
Valor máximo	36.00
Promedio	25.88
Desviación estándar	5.59
Coeficiente de variación (%)	21.63

Nota. Elaboración propia.

En la figura 9, se observa el histograma del contenido de limo de un conjunto de las 16 muestras, expresado en porcentaje.

Figura 10*Histograma del contenido de limo (%)*

Nota. Elaboración propia.

La mayoría de las muestras tienen un contenido de limo entre el 20% y el 25%, siendo este el rango más frecuente, mientras que los extremos, especialmente cerca del 40%, tienen una menor representación. La distribución parece concentrarse mayoritariamente entre el 20% y el 30%, con una ligera asimetría hacia valores más bajos, lo que indica que es menos común encontrar muestras con contenido de limo por debajo del 40%. Esto sugiere que las muestras tienen niveles moderados de contenido de limo, lo que podría influir en características como la textura o la capacidad de drenaje del área de cultivo analizado.

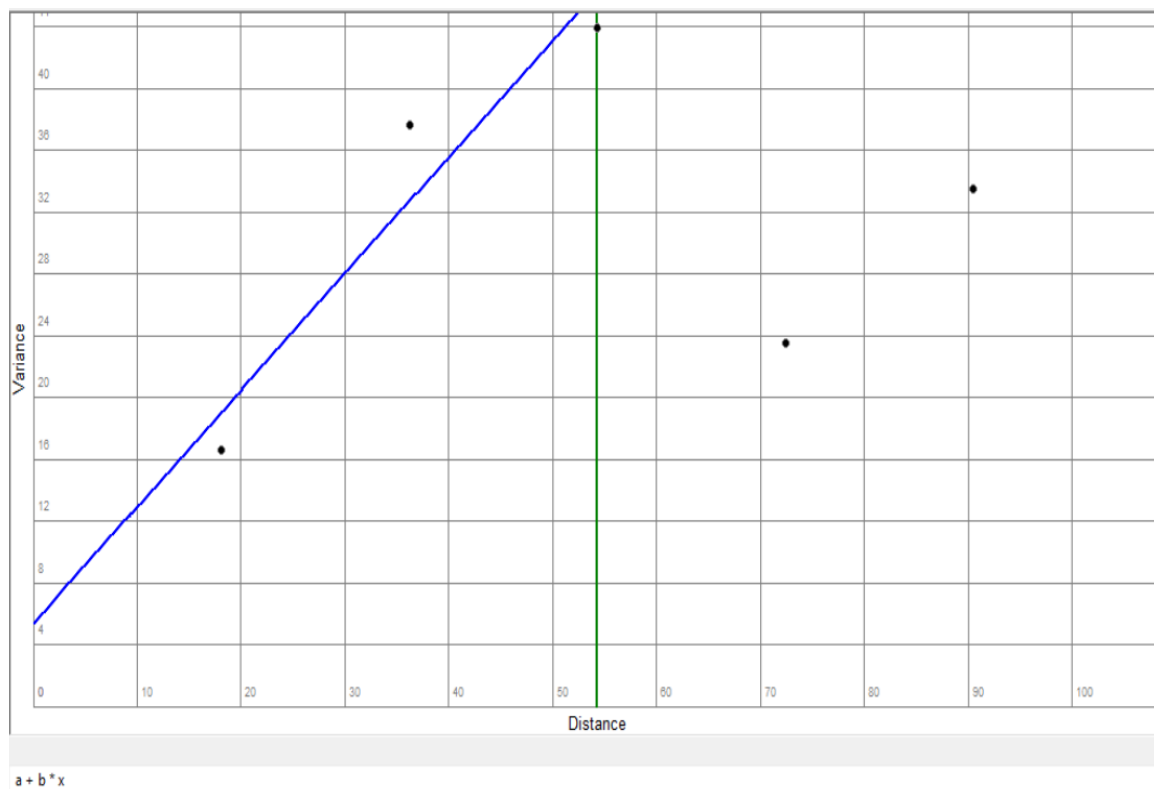
A partir de la recolección de las 16 muestras se realizó el análisis de la variabilidad espacial del contenido de limo en el área agrícola de interés. Para evaluar dicha variabilidad se construyó el semivariograma experimental utilizando las coordenadas espaciales y los valores correspondientes del contenido de limo medidas en cada muestra.

En la figura 10 se presenta el semivariograma realizado para del contenido de limo. De esta figura se observa que en el eje X (distancia) representa la separación espacial de los puntos de muestreo, mientras que en el eje Y (varianza o semivarianza) representa la similitud en los valores de las variables entre los puntos.

Los puntos negros son los valores experimentales del semivariograma calculados a partir de los datos disponibles, la línea azul representa el modelo teórico (en este caso, lineal) que se ajusta a los puntos experimentales para representar la relación espacial subyacente.

Figura 11

Semivariograma del contenido de limo (%)

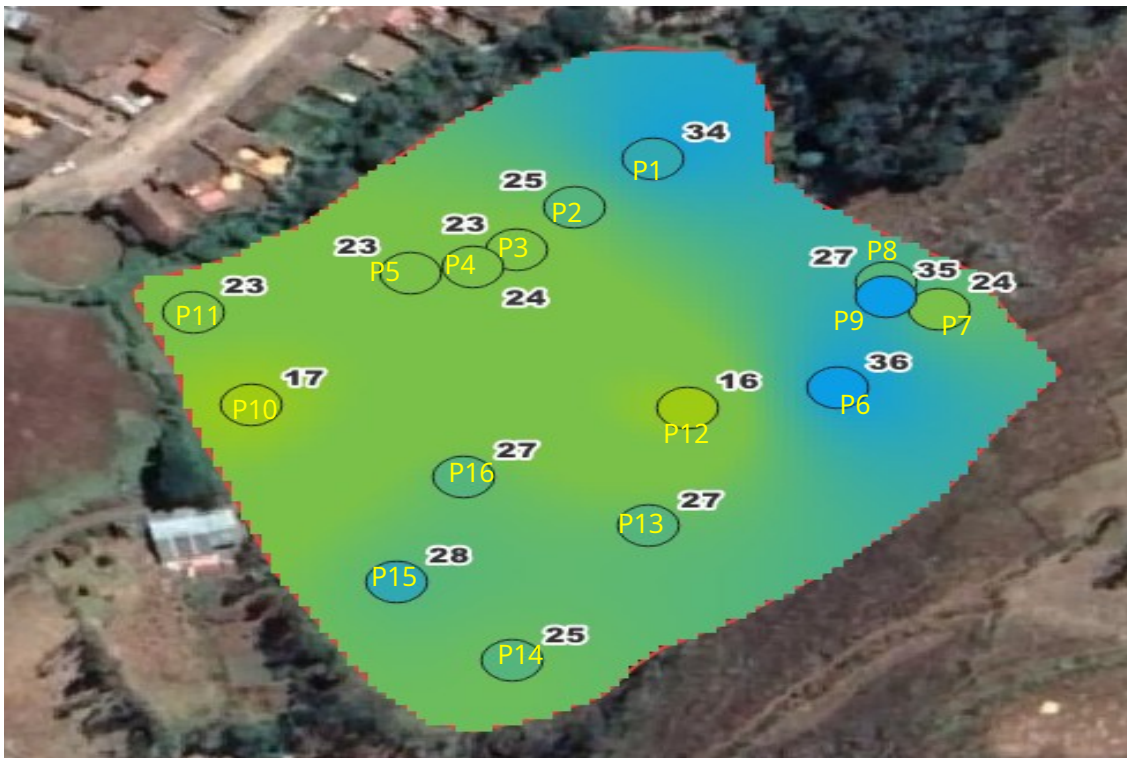


Nota. Elaboración propia.

También se observa que el rango de ajuste es de 71.63 lo cual sugiere que las muestras dentro de esta distancia están espacialmente correlacionadas. Más allá de este rango se podría asumir que las muestras son independientes. A medida que aumenta la distancia entre pares de muestras, la varianza también aumenta, como muestra la pendiente del modelo. Por otro lado, el modelo tiene un ajuste del 91.17%, indicando que este modelo lineal explica un porcentaje moderado de la variabilidad espacial en los datos, tal como se corrobora en la figura 11 en la que se muestra la interpolación de Kriging aplicada al área de estudio, donde los valores representados en los puntos son los datos recolectados en campo sobre el contenido de limo (en este caso, porcentaje).

Figura 12

Interpolación Kriging para el contenido de limo (%)



Nota. Elaboración propia.

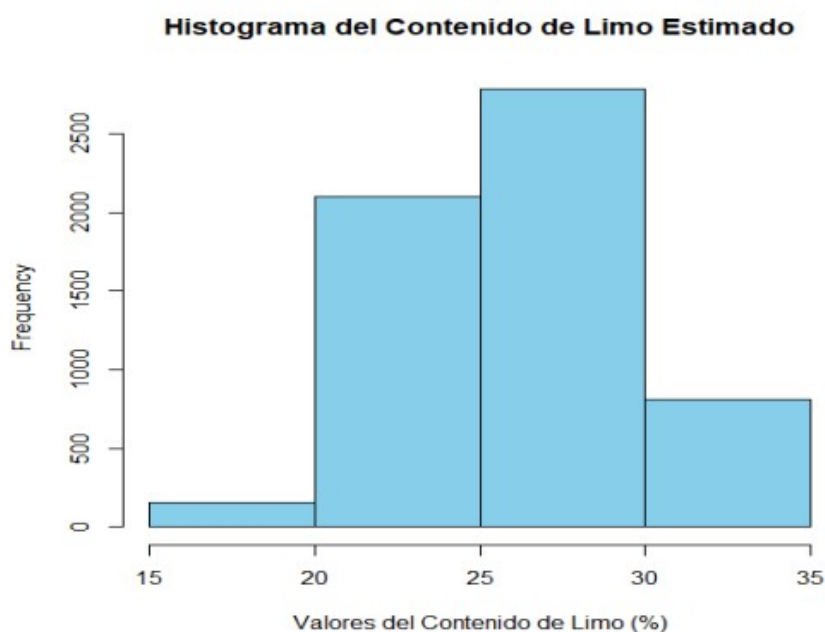
De esta figura 10 los círculos con colores y etiquetas numéricas representan los valores obtenidos en las mediciones de campo. Los valores más altos están asociados a los tonos más fríos (azul), mientras que los más bajos están representados en tonos más cálidos (verde). La interpolación de Kriging utiliza los valores puntuales para predecir los valores en el resto de la superficie. En este caso, se observa un gradiente de colores que indica cómo varía el contenido de limo (%). Por ejemplo, la zona verde indica un contenido más bajo, mientras que las áreas de color azul corresponden a valores más altos. De los valores de interpolación obtenidos por Kriging, en la tabla 7 se presenta los estadísticos, donde se observa que el menor valor corresponde al 18.25% del contenido de limo, el promedio se ubica en 25.93% y el valor máximo es de 33.59%. Asimismo, se observa que la desviación estándar es de 3.30% y el coeficiente de variación del 12.73%.

Tabla 8*Estadísticos para el contenido de limo (%) estimado*

Estadísticos	Valor
Valor mínimo	18.25
Valor máximo	33.59
Promedio	25.93
Desviación estándar	3.30
Coefficiente de variación (%)	12.73

Nota. Elaboración propia.

Respecto a su distribución, en la figura 12 se observa el histograma del contenido de limo estimado por la interpolación, expresado en porcentaje.

Figura 13*Histograma del contenido de limo (%) estimado**Nota.* Elaboración propia.

El resultado de la interpolación arroja un contenido de limo entre el 25% y el 30%, siendo este el rango más frecuente, mientras que, en el extremo, especialmente cerca del 15%, tienen una menor representación. La distribución parece concentrarse mayoritariamente entre el 20% y el 30%, con una ligera asimetría hacia valores más altos, lo que indica que es menos común encontrar muestras con contenido de limo por debajo del 15%.

De manera complementaria, se evaluó el desempeño del análisis Kriging mediante

la comparación directa entre los valores observados del contenido de limo y los valores estimados, utilizando como métrica el Error Cuadrático Medio (RMSE).

Tabla 9

Valor del Error Cuadrático Medio (RMSE) del contenido de limo (%)

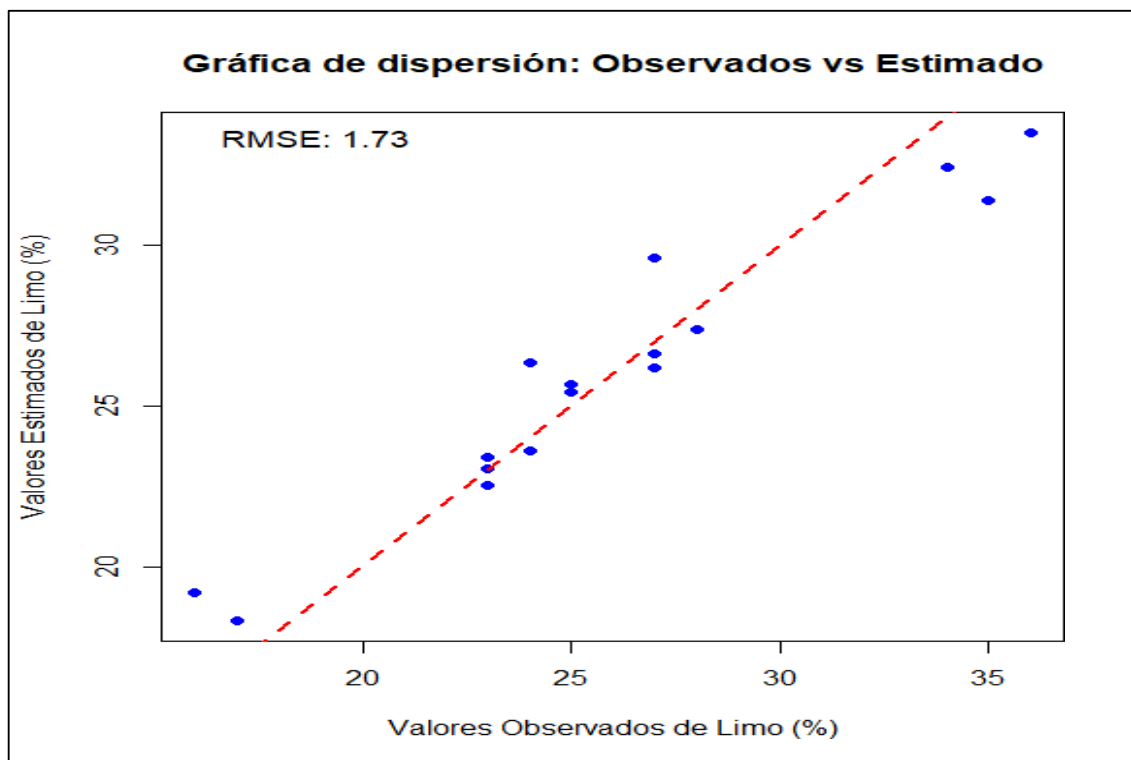
Muestras	Valor observado del contenido de arena (%)	Valor estimado del contenido de arena (%)
PM1	34.00	32.45
PM2	25.00	25.68
PM3	23.00	23.42
PM4	24.00	23.59
PM5	23.00	23.05
PM6	36.00	33.53
PM7	24.00	26.36
PM8	27.00	29.63
PM9	35.00	31.42
PM10	17.00	18.30
PM11	23.00	22.51
PM12	16.00	19.17
PM13	27.00	26.62
PM14	25.00	25.42
PM15	28.00	27.38
PM16	27.00	26.18
Error Cuadrático Medio (RMSE)		1.73

Nota. Elaboración propia.

De la tabla 9, el cálculo del RMSE arrojó un valor de 1.73, lo que indica que, en promedio, las predicciones presentan un error de aproximadamente 1.73 unidades porcentuales en comparación con los valores observados. Este resultado sugiere que las predicciones son muy cercanas a los valores observados, reflejando un desempeño aceptable del modelo en términos de precisión. Para complementar esta evaluación, se generó una gráfica de dispersión comparando los valores observados del contenido de limo con los valores de limo estimados. En la gráfica, los puntos cercanos a la línea de identidad (diagonal de color rojo) refuerzan la precisión del modelo, ya que indican que las predicciones se aproximan a los valores observados.

Figura 14

Gráfico de dispersión del contenido de limo (%)



Nota. Elaboración propia.

5.1.1.3 Arcilla

Para este parámetro se tomaron 16 muestras distribuidas (ver figura 13) en todo el campo.

Figura 15

Valores del contenido de arcilla (%) por cada punto muestreado



Nota. Elaboración propia.

El análisis realizado en campo para determinar el contenido de arcilla (%) muestra los siguientes valores porcentuales (ver la tabla 10).

Tabla 10*Contenido de arcilla (%) en la parcela*

Muestras	Coordenadas UTM WGS 84		Arcilla (%)
	Zona 18 Sur		
	Este	Norte	
PM1	736232	8504383	19.00
PM2	736216	8504368	35.00
PM3	736204	8504355	29.00
PM4	736195	8504350	31.00
PM5	736182	8504348	26.00
PM6	736270	8504313	10.00
PM7	736291	8504337	27.00
PM8	736280	8504345	15.00
PM9	736280	8504341	12.00
PM10	736149	8504308	28.00
PM11	736137	8504336	28.00
PM12	736239	8504307	31.00
PM13	736231	8504271	19.00
PM14	736203	8504230	34.00
PM15	736179	8504254	24.00
PM16	736193	8504286	18.00

Nota. Elaboración propia.

De acuerdo con los valores obtenidos en el muestreo, se presenta la tabla 10 en donde el valor mínimo corresponde a 10.00% del contenido de arcilla, el promedio se ubica en 24.12% y el máximo valor es de 35.00%. Por otro lado, se tiene que la desviación estándar es de 7.73% y el coeficiente de variación del 32.03%.

Tabla 11*Estadísticos para el contenido de arcilla (%) medido*

Estadísticos	Valor
Valor mínimo	10.00
Valor máximo	35.00
Promedio	24.12
Desviación estándar	7.73
Coeficiente de variación (%)	32.03

Nota. Elaboración propia.

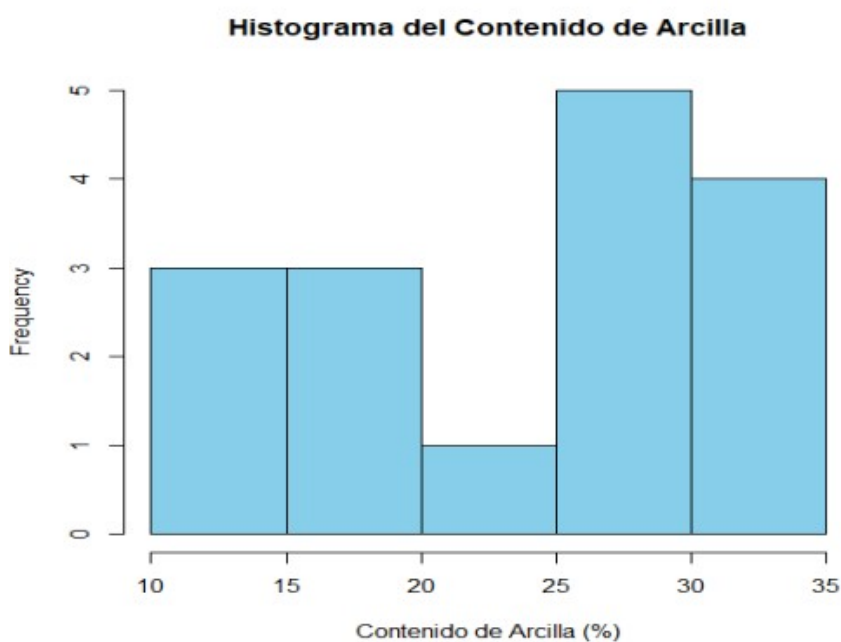
En la figura 15, se observa el histograma del contenido de arcilla de un conjunto de las 16 muestras, expresado en porcentaje. La mayor frecuencia se encuentra en el intervalo de 25% a 30%, con cinco muestras. Un segundo grupo significativo está en el intervalo de 30% a 35%, que contiene cuatro muestras.

Los intervalos de 10% a 15% y 15% a 20% contienen tres muestras cada uno, el intervalo de 20% a 25% tiene una frecuencia baja, con solo una muestra. La distribución presenta una asimetría positiva o hacia la derecha. Esto se evidencia porque hay una mayor concentración de datos (frecuencia alta) en los intervalos más altos (25% a 35%), mientras que los intervalos menores (10% a 20%) tienen menos frecuencia.

Esto sugiere que las muestras tienen niveles moderados de contenido de arcilla, lo que podría influir en características como la textura o la capacidad de drenaje del área de cultivo analizado.

Figura 16

Histograma del contenido de arcilla (%)



Nota. Elaboración propia.

A partir de la recolección de las 16 muestras se realizó el análisis de la variabilidad espacial del contenido de arcilla en el área agrícola de interés. Para evaluar dicha variabilidad se construyó el semivariograma experimental utilizando las coordenadas espaciales y los valores correspondientes del contenido de arcilla medidas en cada muestra.

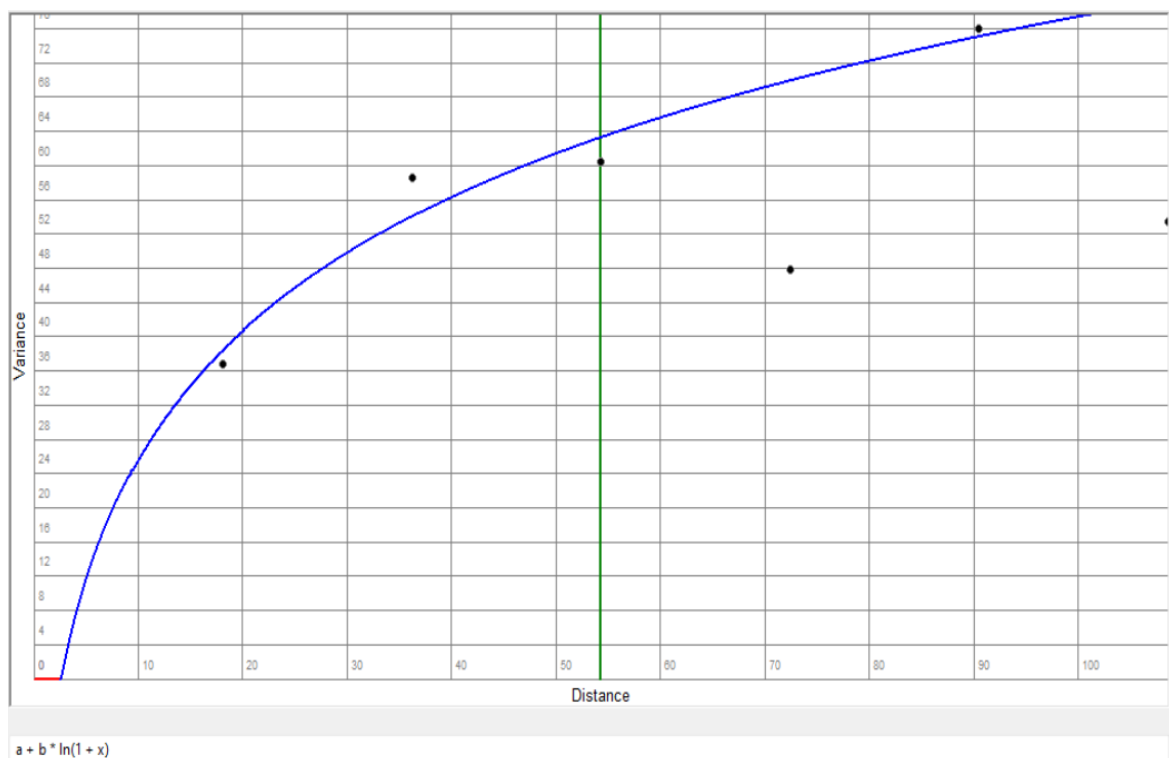
En la figura 16 se presenta el semivariograma realizado para del contenido de arcilla. De esta figura se observa que en el eje X (distancia) representa la separación

espacial de los puntos de muestreo, mientras que en el eje Y (varianza o semivarianza) representa la similitud en los valores de las variables entre los puntos.

Los puntos negros son los valores experimentales del semivariograma calculados a partir de los datos disponibles, la línea azul representa el modelo teórico (en este caso, logarítmico) que se ajusta a los puntos experimentales para representar la relación espacial subyacente.

Figura 1

Semivariograma del contenido de arcilla (%)



Nota. Elaboración propia.

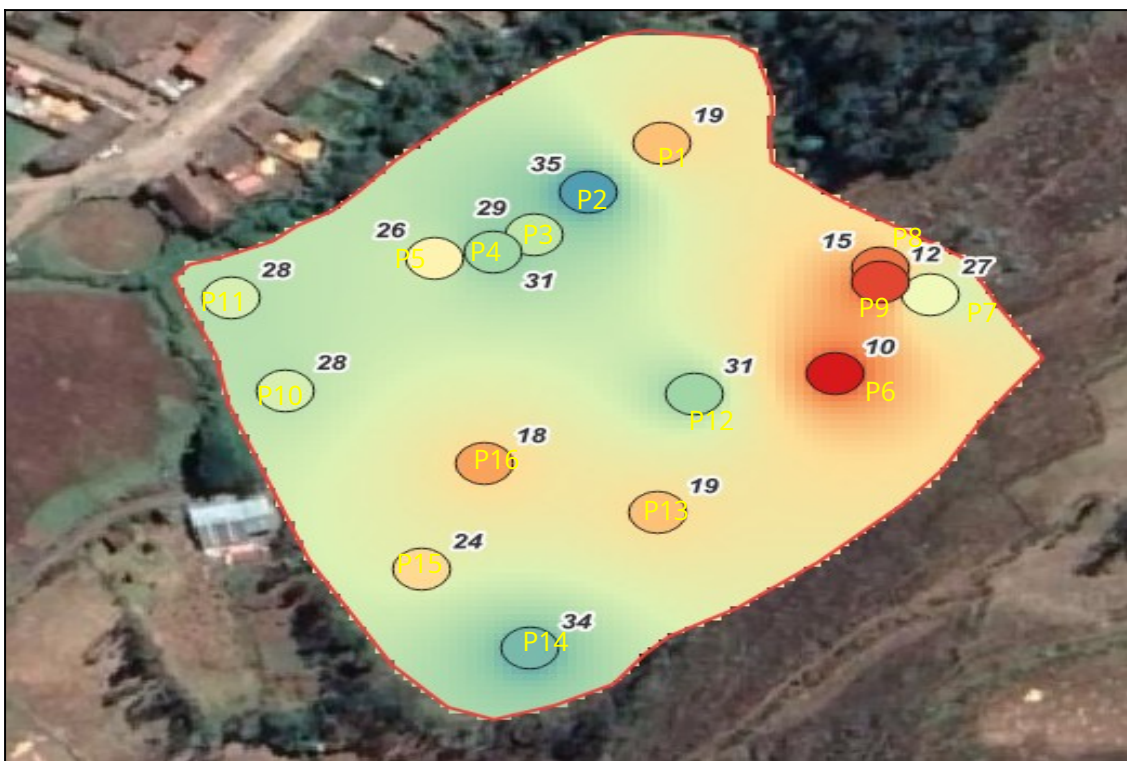
También se observa que el rango de ajuste es de 71.63 lo cual sugiere que las muestras dentro de esta distancia están espacialmente correlacionadas, más allá de ese rango la relación espacial podría no ser representativa.

Por otro lado, el modelo tiene un ajuste del 90.70%, indicando que este modelo logarítmico explica un porcentaje moderado de la variabilidad espacial en los datos, tal como se corrobora en la figura 17 en la que se muestra la interpolación de Kriging aplicada al área de estudio, donde los valores representados en los puntos son los datos

recolectados en campo sobre el contenido de arcilla (en este caso, porcentaje).

Figura 17

Interpolación Kriging para el contenido de arcilla (%)



Nota. Elaboración propia.

De esta figura 16 los círculos con colores y etiquetas numéricas representan los valores obtenidos en las mediciones de campo. Los valores más altos están asociados a los tonos más fríos (azul), mientras que los más bajos están representados en tonos más cálidos (rojo).

La interpolación de Kriging utiliza los valores puntuales para predecir los valores en el resto de la superficie. En este caso, se observa un gradiente de colores que indica cómo varía el contenido de arcilla (%). Por ejemplo, la zona naranja indica un contenido más bajo, mientras que las áreas de color azul corresponden a valores más altos.

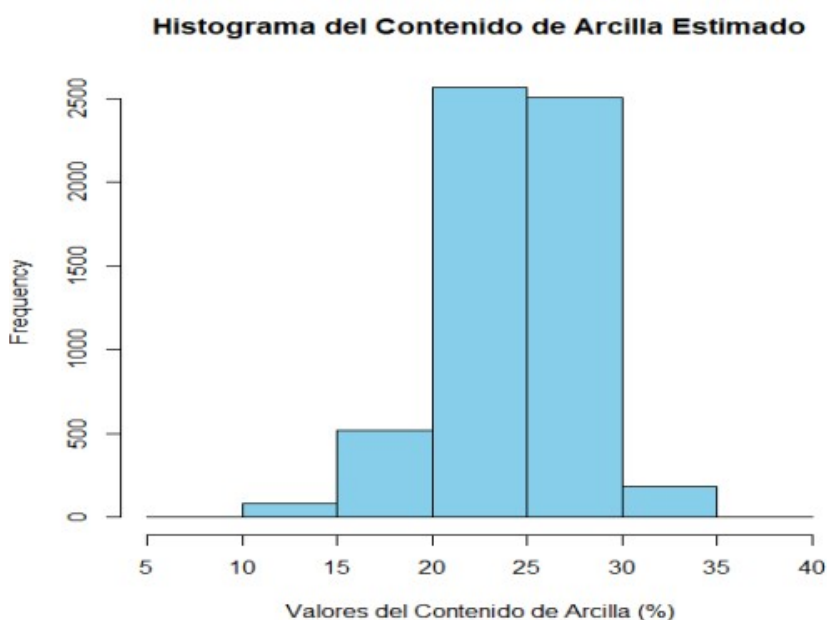
De los valores de interpolación obtenidos por Kriging, en la tabla 11 se presenta los estadísticos, donde se observa que el menor valor corresponde al 9.80% del contenido de arcilla, el promedio se ubica en 24.22% y el valor máximo es de 35.02%. Asimismo, se observa que la desviación estándar es de 3.56% y el coeficiente de variación del 14.71%.

Tabla 12*Estadísticos para el contenido de arcilla (%) estimado*

Estadísticos	Valor
Valor mínimo	9.80
Valor máximo	35.02
Promedio	24.22
Desviación estándar	3.56
Coefficiente de variación (%)	14.71

Nota. Elaboración propia.

Respecto a su distribución, en la figura 18 se observa el histograma del contenido de arcilla estimado por la interpolación, expresado en porcentaje.

Figura 18*Histograma del contenido de arcilla (%) estimado*

Nota. Elaboración propia.

El resultado de la interpolación arroja un contenido de arcilla entre el 20% y el 25%, siendo este el rango más frecuente, mientras que, en el extremo, especialmente cerca del 5%, tienen una menor representación. La distribución parece concentrarse mayoritariamente entre el 20% y el 30%, con una ligera asimetría hacia valores por debajo del 25%, lo que indica que es menos común encontrar muestras con contenido de arcilla por debajo del 25%.

De manera complementaria, se evaluó el desempeño del análisis Kriging mediante

la comparación directa entre los valores observados del contenido de arcilla y los valores estimados, utilizando como métrica el Error Cuadrático Medio (RMSE).

Tabla 13

Valor del Error Cuadrático Medio (RMSE) del contenido de arcilla (%)

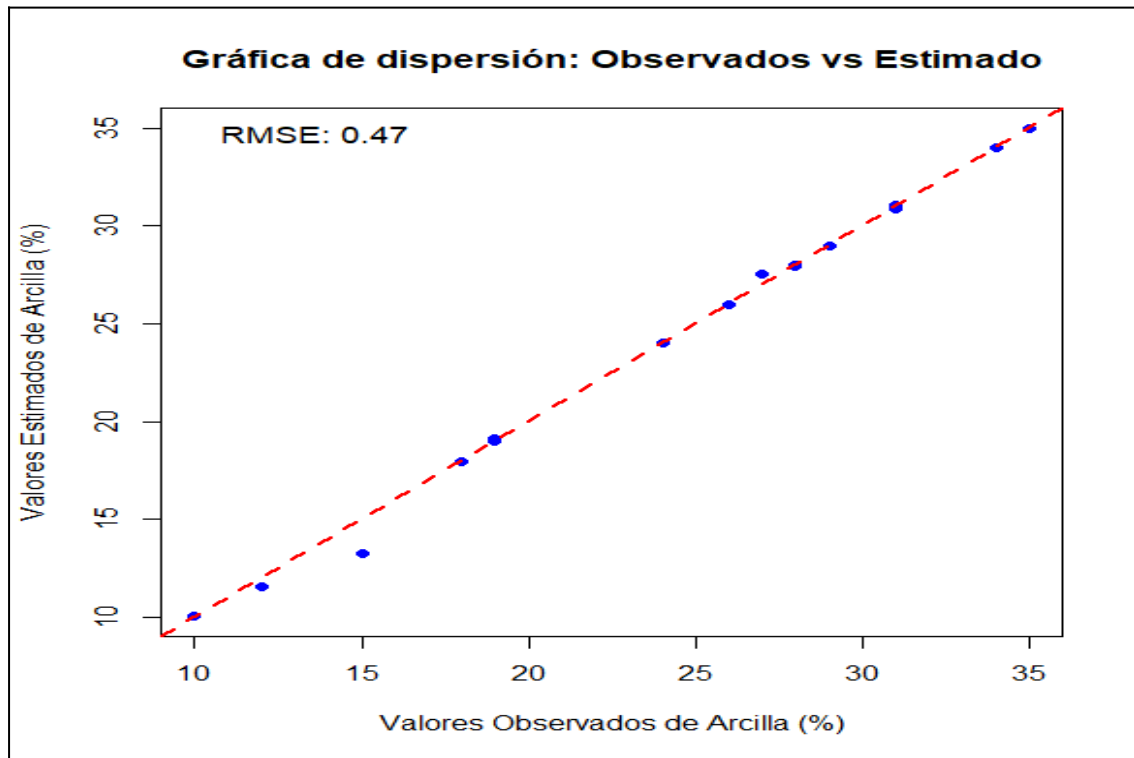
Muestras	Valor observado del contenido de arcilla (%)	Valor estimado del contenido de arcilla (%)
PM1	19.00	19.12
PM2	35.00	35.00
PM3	29.00	28.94
PM4	31.00	31.06
PM5	26.00	26.00
PM6	10.00	10.05
PM7	27.00	27.54
PM8	15.00	13.26
PM9	12.00	11.58
PM10	28.00	27.96
PM11	28.00	28.00
PM12	31.00	30.83
PM13	19.00	18.99
PM14	34.00	33.98
PM15	24.00	24.00
PM16	18.00	17.97
Error Cuadrático Medio (RMSE)		0.471

Nota. Elaboración propia.

El cálculo del error cuadrático medio (RMSE) arrojó un valor de 0.471, lo que indica que, en promedio, las predicciones presentan un error de aproximadamente 0.471 unidades porcentuales en comparación con los valores observados. Este resultado sugiere que las predicciones son muy cercanas a los valores observados, reflejando un buen desempeño del modelo en términos de precisión. Para complementar esta evaluación, se generó una gráfica de dispersión comparando los valores observados del contenido de arcilla con los valores de arcilla estimados. En la gráfica, los puntos cercanos a la línea de identidad (diagonal de color rojo) refuerzan la precisión del modelo, ya que indican que las predicciones se aproximan a los valores observados.

Figura 19

Gráfico de dispersión del contenido de arcilla (%)



Nota. Elaboración propia.

5.1.2 Comprobar la variabilidad espacial de los parámetros químicos utilizando el método interpolación de resultados para las propiedades edáficas de un predio agrícola en San Pedro de Cachora - Abancay - 2023

5.1.2.1 pH

Para este parámetro se tomaron 16 muestras distribuidas (ver figura 20) en todo el área del cultivo.

Figura 20

Valores del contenido de pH por cada punto muestreado



Nota. Elaboración propia.

El análisis realizado en campo para determinar el contenido de pH muestra los siguientes valores (ver la tabla 14).

Tabla 14*Contenido de pH en la parcela*

Muestras	Coordenadas UTM WGS 84		pH
	Zona 18 Sur		
	Este	Norte	
PM1	736232	8504383	7.30
PM2	736216	8504368	7.60
PM3	736204	8504355	7.50
PM4	736195	8504350	7.10
PM5	736182	8504348	7.30
PM6	736270	8504313	7.20
PM7	736291	8504337	7.80
PM8	736280	8504345	7.60
PM9	736280	8504341	7.50
PM10	736149	8504308	8.10
PM11	736137	8504336	7.40
PM12	736239	8504307	7.20
PM13	736231	8504271	7.20
PM14	736203	8504230	7.80
PM15	736179	8504254	8.10
PM16	736193	8504286	8.20

Nota. Elaboración propia.

De acuerdo con los valores obtenidos en el muestreo, se presenta la tabla 13 en donde el valor mínimo corresponde a 7.10 de pH, el promedio se ubica en 7.56 y el máximo valor es de 8.20. Por otro lado, se tiene que la desviación estándar es de 0.35 y el coeficiente de variación del 4.68.

Tabla 15*Estadísticos para el pH medido*

Estadísticos	Valor
Valor mínimo	7.10
Valor máximo	8.20
Promedio	7.56
Desviación estándar	0.35
Coeficiente de variación (%)	4.68

Nota. Elaboración propia.

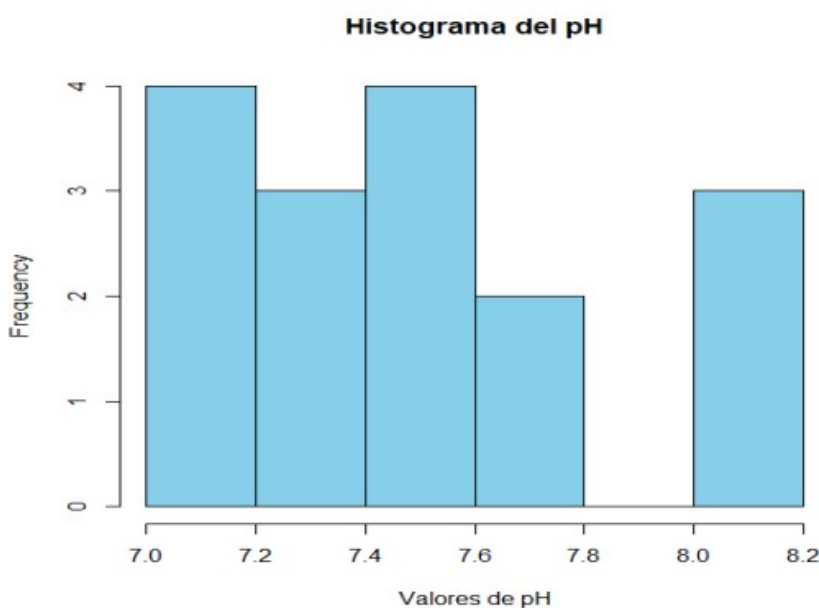
En la figura 20, se observa el histograma del pH de un total de 16 muestras en donde la mayoría de las muestras tienen un pH entre 7.0 y 7.2, siendo este el rango más frecuente, del mismo modo los valores que se ubican entre 7.4 y 7.6, la distribución parece concentrarse mayoritariamente entre el 7.0 y 7.6, sin embargo, no se evidencia simetría.

Hay un aumento en la frecuencia alrededor de los valores centrales (7.4 a 7.6), pero con un decremento *notable* en el intervalo siguiente (7.6 a 7.8).

De otra parte, los valores de pH observados se encuentran en el rango neutral (7.0) a ligeramente alcalino (8.2). Esto sugiere que el sistema bajo análisis (suelo agrícola) no presenta condiciones ácidas.

Figura 21

Histograma del pH



Nota. Elaboración propia.

A partir de la recolección de las 16 muestras se realizó el análisis de la variabilidad espacial del contenido de pH en el área agrícola de interés. Para evaluar dicha variabilidad se construyó el semivariograma experimental utilizando las coordenadas espaciales y los valores correspondientes del pH medidas en cada muestra.

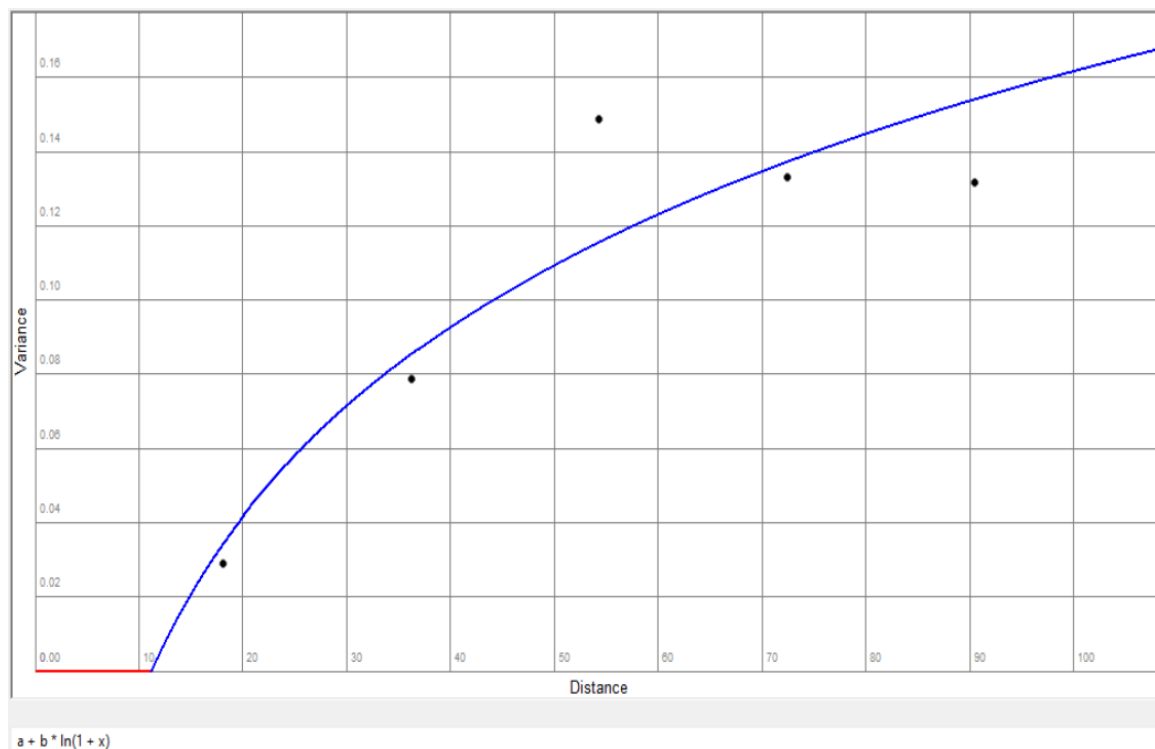
En la figura 21 se presenta el semivariograma realizado para el contenido de arena. De esta figura se observa que en el eje X (distancia) representa la separación espacial de los puntos de muestreo, mientras que en el eje Y (varianza o semivarianza) representa la similitud en los valores de las variables entre los puntos.

Los puntos negros son los valores experimentales del semivariograma calculados a partir de los datos disponibles, la línea azul representa el modelo teórico (en este caso,

logarítmico) que se ajusta a los puntos experimentales para representar la relación espacial subyacente.

Figura 22

Semivariograma del pH



Nota. Elaboración propia.

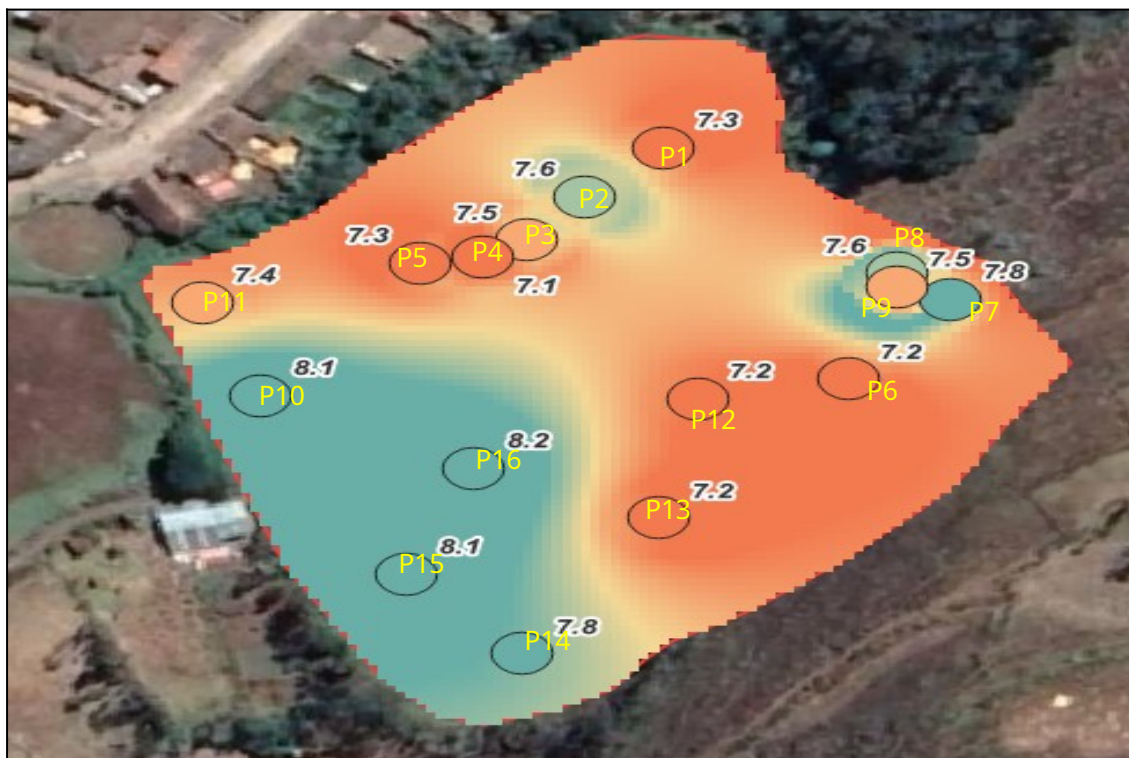
También se observa un aumento de la semivarianza a medida que aumenta la distancia, no obstante, este incremento no es lineal. El range de ajuste es de 108.54 m, dentro de esa distancia, los valores de pH en los puntos cercanos tienen una cierta relación o patrón (es decir, a medida que te acercas a un punto de medición, el valor del pH será más similar al valor de un punto cercano). A distancias mayores a 108.54 metros, la relación espacial entre los puntos de medición se pierde y los valores se vuelven independientes entre sí, es decir, la variabilidad de los valores ya no está determinada por la proximidad entre puntos.

Por otro lado, el modelo tiene un ajuste del 87.64%, indicando que este modelo logarítmico explica un porcentaje moderado de la variabilidad espacial en los datos, tal como se corrobora en la figura 22 en la que se muestra la interpolación de Kriging aplicada

al área de estudio, donde los valores representados en los puntos son los datos recolectados en campo sobre el pH del suelo.

Figura 23

Interpolación Kriging para el pH



Nota. Elaboración propia.

De esta figura los círculos con colores y etiquetas numéricas representan los valores obtenidos en las mediciones de campo. Los valores más altos están asociados a los tonos más fríos (verde), mientras que los más bajos están representados en tonos más cálidos (rojo).

La interpolación de Kriging utiliza los valores puntuales para predecir los valores en el resto de la superficie. En este caso, se observa un gradiente de colores que indica cómo varía el contenido de pH. Por ejemplo, la zona roja indica un contenido más bajo, mientras que las áreas de color verde corresponden a valores más altos.

De los valores de interpolación obtenidos por Kriging, en la tabla 16 se presenta los estadísticos, donde se observa que el menor valor corresponde a 6.99, el promedio se ubica en 7.53 y el valor máximo es de 8.35. Asimismo, se observa que la desviación

estándar es de 0.34 y el coeficiente de variación del 4.47%.

Tabla 16

Estadísticos para el pH estimado

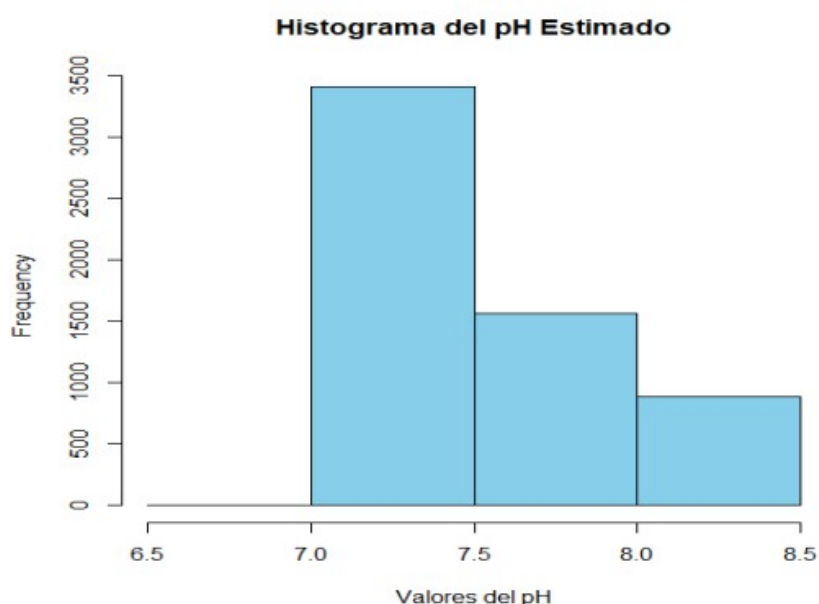
Estadísticos	Valor
Valor mínimo	6.99
Valor máximo	8.35
Promedio	7.53
Desviación estándar	0.34
Coeficiente de variación (%)	4.47

Nota. Elaboración propia.

Respecto a su distribución, en la figura 23 se observa el histograma del pH donde se muestra la distribución del pH estimado por la interpolación.

Figura 24

Histograma del pH estimado



Nota. Elaboración propia.

El resultado de la interpolación arroja un pH entre el 7.0 y 7.5, siendo este el rango más frecuente y a medida que los valores aumentan hacia 8.0 y 8.5 la frecuencia disminuye lo cual implica que haya menos valores de pH altos. La distribución parece concentrarse mayoritariamente hacia la derecha con una mayor densidad de valores en el extremo inferior.

De manera complementaria, se evaluó el desempeño del análisis Kriging mediante la comparación directa entre los valores observados del pH y los valores estimados,

utilizando como métrica el Error Cuadrático Medio (RMSE).

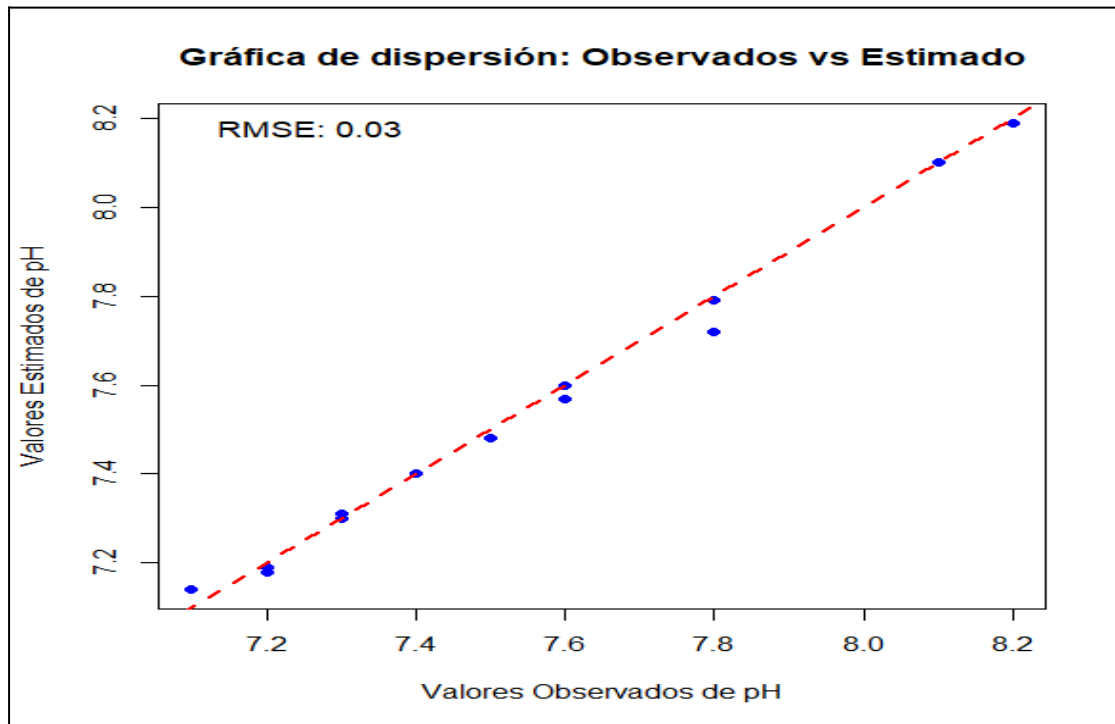
Tabla 17

Valor del Error Cuadrático Medio (RMSE) del pH

Muestras	Valor observado del pH	Valor estimado del pH
PM1	7.30	7.31
PM2	7.60	7.60
PM3	7.50	7.48
PM4	7.10	7.14
PM5	7.30	7.30
PM6	7.20	7.18
PM7	7.80	7.72
PM8	7.60	7.57
PM9	7.50	7.48
PM10	8.10	8.10
PM11	7.40	7.40
PM12	7.20	7.19
PM13	7.20	7.19
PM14	7.80	7.79
PM15	8.10	8.10
PM16	8.20	8.19
Error Cuadrático Medio (RMSE)		0.028

Nota. Elaboración propia.

De la tabla 17, el cálculo del RMSE arrojó un valor de 0.028, lo que indica que, en promedio, las predicciones presentan un error de aproximadamente 0.028 unidades porcentuales en comparación con los valores observados. Este resultado sugiere que las predicciones son cercanas a los valores observados, reflejando un buen desempeño del modelo en términos de precisión. Para complementar esta evaluación, se generó una gráfica de dispersión (figura 24) comparando los valores observados con los valores estimados. En la gráfica, los puntos cercanos a la línea de identidad (diagonal de color rojo) refuerzan la precisión del modelo, ya que indican que las predicciones se aproximan a los valores observados.

Figura 25*Gráfico de dispersión del pH*

Nota. Elaboración propia.

5.1.2.2 Conductividad eléctrica (C.E)

Para este parámetro se tomaron 16 muestras distribuidos (ver figura 26) en todo el campo.

Figura 26

Valores del contenido de la C.E por cada punto muestreado



Nota. Elaboración propia.

El análisis realizado en campo para determinar el contenido de la C.E mS/cm muestra los siguientes valores (ver la tabla 18).

Tabla 18*Contenido de C.E (mS/cm) en la parcela*

Muestras	Coordenadas UTM WGS 84		C.E (mS/cm)
	Zona 18 Sur		
	Este	Norte	
PM1	736232	8504383	0.26
PM2	736216	8504368	0.20
PM3	736204	8504355	0.26
PM4	736195	8504350	0.21
PM5	736182	8504348	0.36
PM6	736270	8504313	0.17
PM7	736291	8504337	0.26
PM8	736280	8504345	0.12
PM9	736280	8504341	0.18
PM10	736149	8504308	0.35
PM11	736137	8504336	0.28
PM12	736239	8504307	0.14
PM13	736231	8504271	0.12
PM14	736203	8504230	0.21
PM15	736179	8504254	0.29
PM16	736193	8504286	0.18

Nota. Elaboración propia.

De acuerdo con los valores obtenidos en el muestreo, se presenta la tabla 17 en donde el valor mínimo corresponde a 0.120 mS/cm de C.E, el promedio se ubica en 0.224 mS/cm y el máximo valor es de 0.360 mS/cm. Por otro lado, se tiene que la desviación estándar es de 0.074 mS/cm y el coeficiente de variación del 32.99%.

Tabla 19*Estadísticos para el contenido de C.E (mS/cm) medido*

Estadísticos	Valor
Valor mínimo	0.120
Valor máximo	0.360
Promedio	0.224
Desviación estándar	0.074
Coeficiente de variación (%)	32.99

Nota. Elaboración propia.

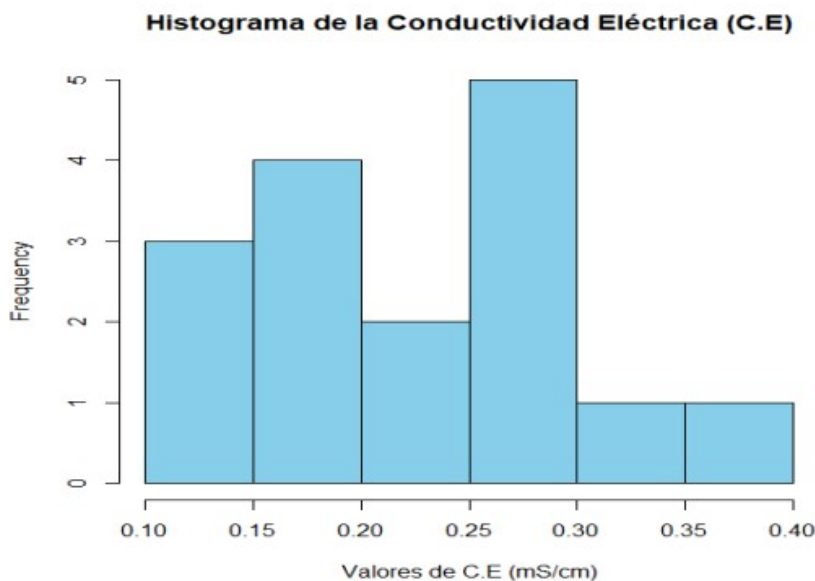
En la figura 26, se observa el histograma de la C.E de un total de 16 muestras en donde la mayoría de las muestras tienen una C.E entre 0.25 mS/cm y 0.30 mS/cm, siendo este el rango más frecuente, del mismo modo los valores que se ubican entre 0.15 mS/cm y 0.20 mS/cm, la distribución no es uniforme parece concentrarse mayoritariamente hacia la

mitad superior. Los extremos del rango (cercano a los valores de 0.10 mS/cm y 0.40 mS/cm) tiene menor frecuencia.

Esto podría señalar que los valores de conductividad tienden a ubicarse en la parte media – alta del rango observado.

Figura 27

Histograma de la C.E (mS/cm)



Nota. Elaboración propia.

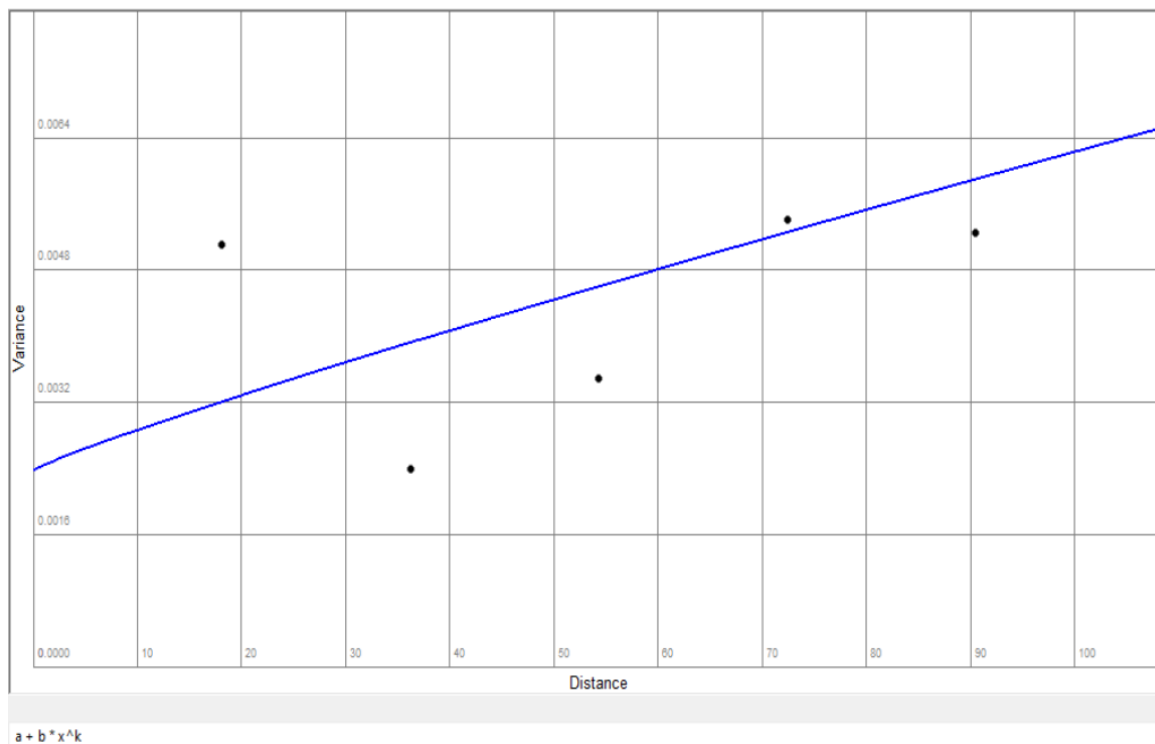
A partir de la recolección de las 16 muestras se realizó el análisis de la variabilidad espacial de la C.E en el área agrícola de interés. Para evaluar dicha variabilidad se construyó el semivariograma experimental utilizando las coordenadas espaciales y los valores correspondientes del C.E medidas en cada muestra.

En la figura 28 se presenta el semivariograma realizado para del contenido de arena. De esta figura se observa que en el eje X (distancia) representa la separación espacial de los puntos de muestreo, mientras que en el eje Y (varianza o semivarianza) representa la similitud en los valores de las variables entre los puntos.

Los puntos negros son los valores experimentales del semivariograma calculados a partir de los datos disponibles, la línea azul representa el modelo teórico (en este caso, power) que se ajusta a los puntos experimentales para representar la relación espacial.

Figura 28

Semivariograma de la C.E



Nota. Elaboración propia.

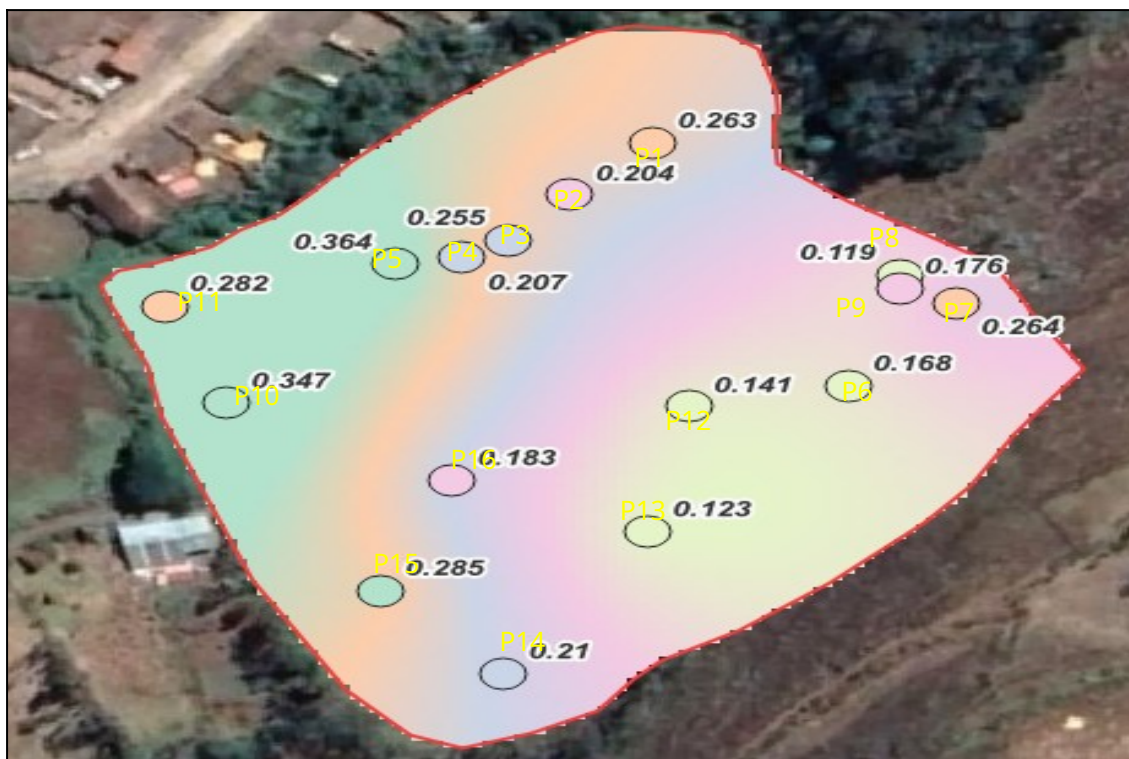
También se observa que el parámetro a (nugget) tiene un valor de 0.0023, el cual representa la variabilidad no explicada que al ser un valor muy pequeño indica que buena precisión de los datos. El parámetro b con un valor de 6.07759×10^{-5} representa el coeficiente asociado al incremento de la semivarianza con la distancia y por último, el parámetro k con un valor de 0.901 que representa el exponente del modelo indica que el aumento de la semivarianza es progresivo pero no lineal. A distancias mayores a 108.54 metros, la relación espacial entre los puntos de medición se pierde y los valores se vuelven independientes entre sí, es decir, la variabilidad de los valores ya no está determinada por la proximidad entre puntos.

Por otro lado, el modelo tiene un ajuste del 45.60%, indicando que este modelo power explica un porcentaje moderado de la variabilidad espacial en los datos, tal como se corrobora en la figura 29 en la que se muestra la interpolación de Kriging aplicada al área de estudio, donde los valores representados en los puntos son los datos recolectados en

campo sobre la C.E del suelo.

Figura 29

Interpolación Kriging para la C.E



Nota. Elaboración propia.

De esta figura los círculos con colores y etiquetas numéricas representan los valores obtenidos en las mediciones de campo. Los valores más altos están asociados a los tonos más fríos (verde intenso), mientras que los más bajos están representados en tonos más cálidos (verde claro).

La interpolación de Kriging utiliza los valores puntuales para predecir los valores en el resto de la superficie. En este caso, se observa un gradiente de colores que indica cómo varía la C.E. Por ejemplo, la zona verde claro indica un contenido más bajo, mientras que las áreas de color verde intenso corresponden a valores más altos.

De los valores de interpolación obtenidos por Kriging, en la tabla 18 se presenta los estadísticos, donde se observa que el menor valor corresponde a 0.160 mS/cm, el promedio se ubica en 0.221 mS/cm y el valor máximo es de 0.304 mS/cm. Asimismo, se observa que la desviación estándar es de 0.041 mS/cm y el coeficiente de variación del

18.94%.

Tabla 20

Estadísticos para la C.E estimado

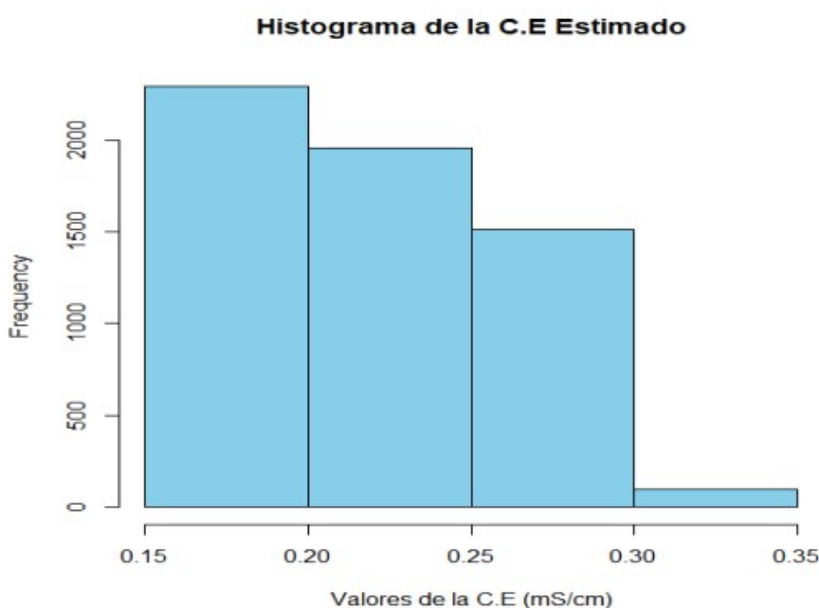
Estadísticos	Valor
Valor mínimo	0.160
Valor máximo	0.304
Promedio	0.221
Desviación estándar	0.041
Coefficiente de variación (%)	18.94

Nota. Elaboración propia.

Respecto a su distribución, en la figura 29 se observa el histograma de la C.E donde se muestra la distribución de la C.E estimado por la interpolación.

Figura 30

Histograma de la C.E estimado



Nota. Elaboración propia.

El resultado de la interpolación arroja una C.E entre el 0.15 mS/cm y 0.20 mS/cm lo cual sugiere que los valores estimados presentan valores relativamente bajos.

A medida que los valores de la C.E se incrementa la frecuencia disminuye progresivamente lo cual implica que los valores altos de la C.E son menos comunes.

Respecto a la simetría, se observa que existe una tendencia sesgada hacia la derecha donde hay valores extremos más grandes, pero menos frecuentes.

De manera complementaria, se evaluó el desempeño del análisis Kriging mediante la comparación directa entre los valores observados de la C.E y los valores estimados, utilizando como métrica el Error Cuadrático Medio (RMSE).

Tabla 21

Valor del Error Cuadrático Medio (RMSE) de la C.E (mS/cm)

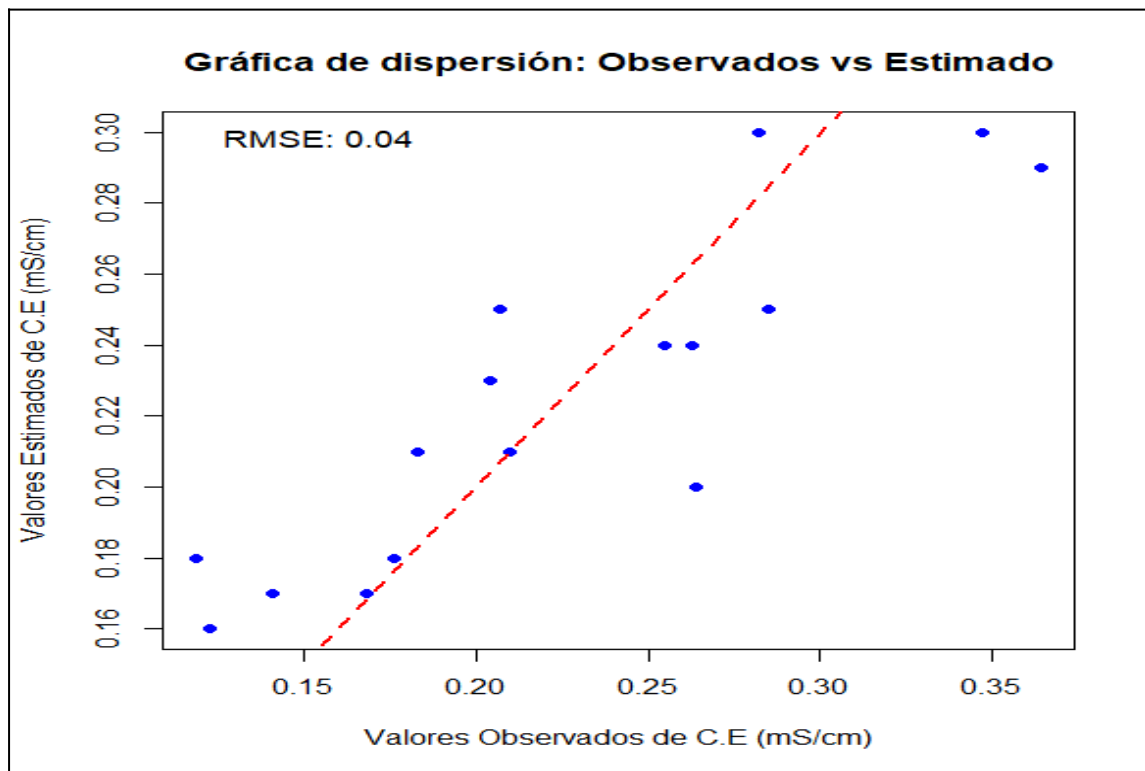
Muestras	Valor observado de la C.E	Valor estimado de la C.E
PM1	0.26	0.24
PM2	0.20	0.23
PM3	0.26	0.24
PM4	0.21	0.25
PM5	0.36	0.29
PM6	0.17	0.17
PM7	0.26	0.20
PM8	0.12	0.18
PM9	0.18	0.18
PM10	0.35	0.30
PM11	0.28	0.30
PM12	0.14	0.17
PM13	0.12	0.16
PM14	0.21	0.21
PM15	0.29	0.25
PM16	0.18	0.21
Error Cuadrático Medio (RMSE)		0.038

Nota. Elaboración propia.

De la tabla 21, el cálculo del RMSE arrojó un valor de 0.038, lo que indica que, en promedio, las predicciones presentan un error de aproximadamente 0.038 mS/cm en comparación con los valores observados. Este resultado sugiere que las predicciones son cercanas a los valores observados, reflejando un buen desempeño del modelo en términos de precisión. Para complementar esta evaluación, se generó una gráfica de dispersión (figura 31) comparando los valores observados con los valores estimados. En la gráfica, los puntos cercanos a la línea de identidad (diagonal de color rojo) refuerzan la precisión del modelo, ya que indican que las predicciones se aproximan a los valores observados.

Figura 31

Gráfico de dispersión de la C.E (mS/cm)



Nota. Elaboración propia.

5.1.2.3 Nitrógeno (N)

Para este parámetro se tomaron 16 muestras distribuidas (ver figura 31) en todo el campo.

Figura 32

Valores del contenido de nitrógeno por cada punto muestreado



Nota. Elaboración propia.

El análisis realizado en campo para determinar el contenido de nitrógeno (ppm) muestra los siguientes valores (ver la tabla 22).

Tabla 22*Contenido de nitrógeno (N) en la parcela*

Muestras	Coordenadas UTM WGS 84 Zona 18 Sur		N (ppm)
	Este	Norte	
PM1	736232	8504383	16.00
PM2	736216	8504368	14.00
PM3	736204	8504355	30.00
PM4	736195	8504350	16.00
PM5	736182	8504348	16.00
PM6	736270	8504313	10.00
PM7	736291	8504337	6.00
PM8	736280	8504345	4.00
PM9	736280	8504341	8.00
PM10	736149	8504308	12.00
PM11	736137	8504336	20.00
PM12	736239	8504307	6.00
PM13	736231	8504271	8.00
PM14	736203	8504230	8.00
PM15	736179	8504254	12.00
PM16	736193	8504286	8.00

Nota. Elaboración propia.

De acuerdo con los valores obtenidos en el muestreo, se presenta la tabla 21 en donde el valor mínimo corresponde a 4.00 ppm de nitrógeno, el promedio se ubica en 12.12 ppm y el máximo valor es de 30.00 ppm. Por otro lado, se tiene que la desviación estándar es de

6.55 ppm y el coeficiente de variación del 54.03%.

Tabla 23*Estadísticos para el contenido de nitrógeno medido*

Estadísticos	Valor
Valor mínimo	4.00
Valor máximo	30.00
Promedio	12.12
Desviación estándar	6.55
Coeficiente de variación (%)	54.03

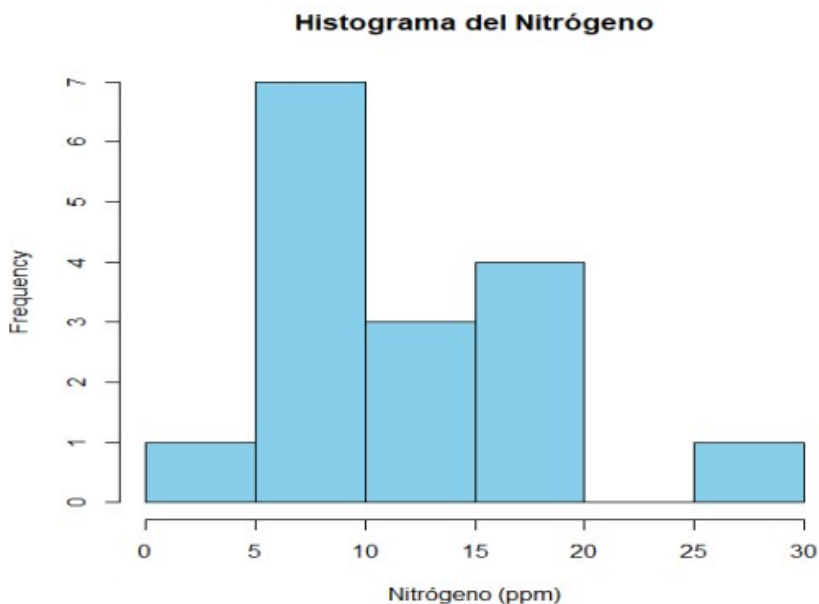
Nota. Elaboración propia.

En la figura 33 se observa el histograma del contenido de nitrógeno de un total de 16 muestras en donde la mayoría de las muestras tienen nitrógeno entre 5.00 ppm y 10.00 ppm, siendo este el rango más frecuente, del mismo modo los valores que se ubican entre

15.00 ppm y 20.00 ppm, la distribución no es uniforme hay una tendencia decreciente en el contenido de nitrógeno, existen pocos valores de nitrógeno por encima del 25.00 ppm.

Figura 33

Histograma del contenido de nitrógeno



Nota. Elaboración propia.

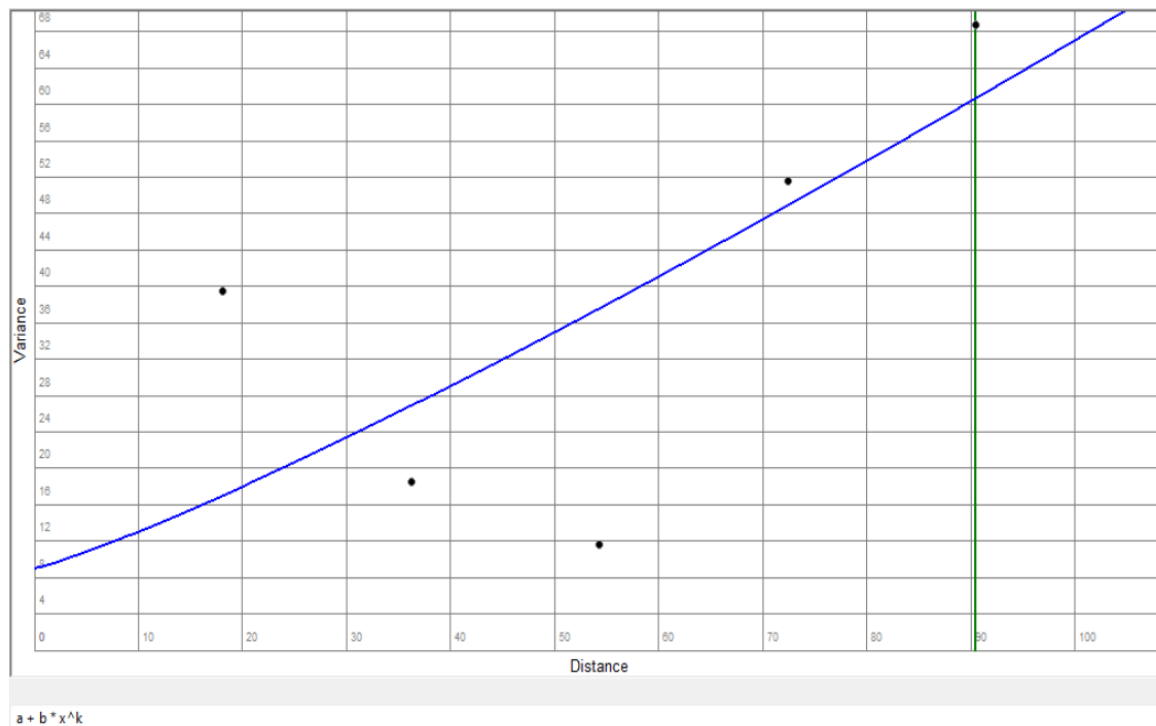
A partir de la recolección de las 16 muestras se realizó el análisis de la variabilidad espacial del contenido de nitrógeno en el área agrícola de interés. Para evaluar dicha variabilidad se construyó el semivariograma experimental utilizando las coordenadas espaciales y los valores correspondientes del contenido de nitrógeno medidas en cada muestra.

En la figura 34 se presenta el semivariograma realizado para el contenido de arena. De esta figura se observa que en el eje X (distancia) representa la separación espacial de los puntos de muestreo, mientras que en el eje Y (varianza o semivarianza) representa la similitud en los valores de las variables entre los puntos.

Los puntos negros son los valores experimentales del semivariograma calculados a partir de los datos disponibles, la línea azul representa el modelo teórico (en este caso, power) que se ajusta a los puntos experimentales para representar la relación espacial subyacente.

Figura 34

Semivariograma del contenido de nitrógeno



Nota. Elaboración propia.

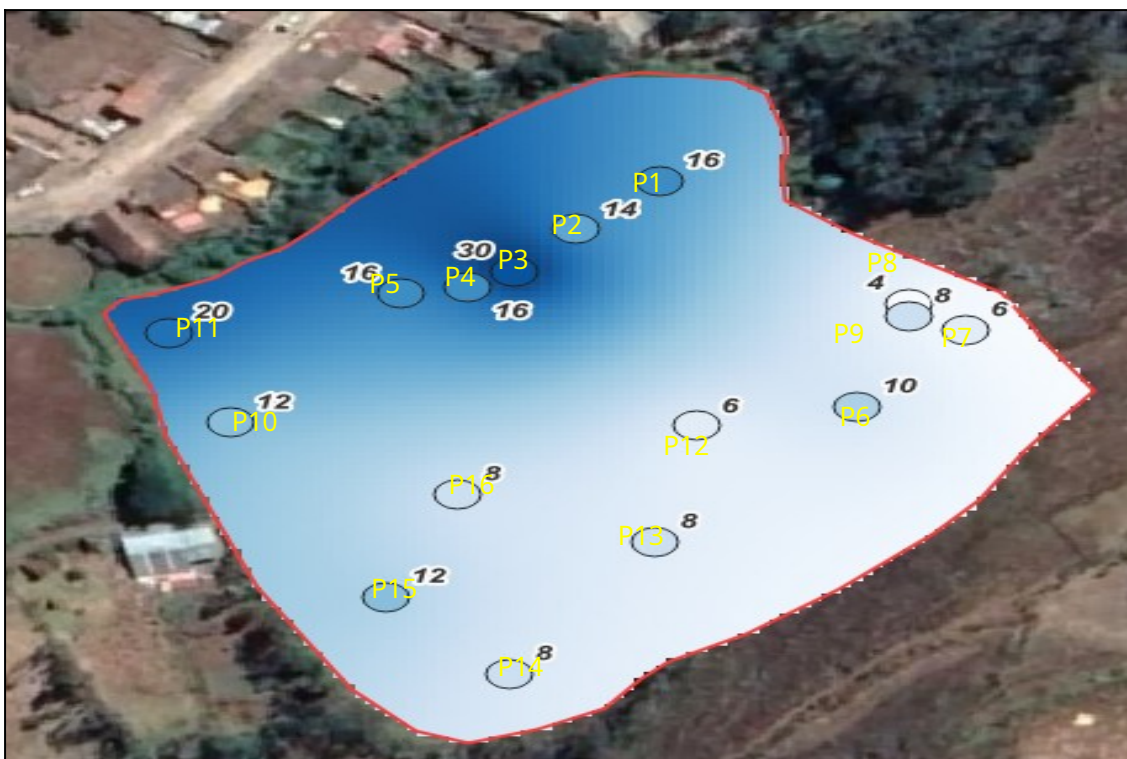
También se observa que el parámetro a (nugget) tiene un valor de 9.139, el cual representa la variabilidad no explicada que al ser un valor muy pequeño indica que buena precisión de los datos. El parámetro b con un valor de 0.278 representa el coeficiente asociado al incremento de la semivarianza con la distancia y por último, el parámetro k con un valor de 1.160 que representa el exponente del modelo indica que el aumento de la semivarianza es progresivo pero no lineal. A distancias mayores a 107.45 metros, la relación espacial entre los puntos de medición se pierde y los valores se vuelven independientes entre sí, es decir, la variabilidad de los valores ya no está determinada por la proximidad entre puntos.

Por otro lado, el modelo tiene un ajuste del 54.48%, indicando que este modelo power explica un porcentaje moderado de la variabilidad espacial en los datos, tal como se corrobora en la figura 35 en la que se muestra la interpolación de Kriging aplicada al área de estudio, donde los valores representados en los puntos son los datos recolectados en

campo sobre el contenido de nitrógeno del suelo.

Figura 35

Interpolación Kriging para el contenido de nitrógeno



Nota. Elaboración propia.

De esta figura los círculos con colores y etiquetas numéricas representan los valores obtenidos en las mediciones de campo. Los valores más altos están asociados a los tonos más fríos (azul intenso), mientras que los más bajos están representados en tonos más azul claro.

La interpolación de Kriging utiliza los valores puntuales para predecir los valores en el resto de la superficie. En este caso, se observa un gradiente de colores que indica cómo varía el contenido del nitrógeno. Por ejemplo, la zona azul claro indica un contenido más bajo, mientras que las áreas de color azul intenso corresponden a valores más altos.

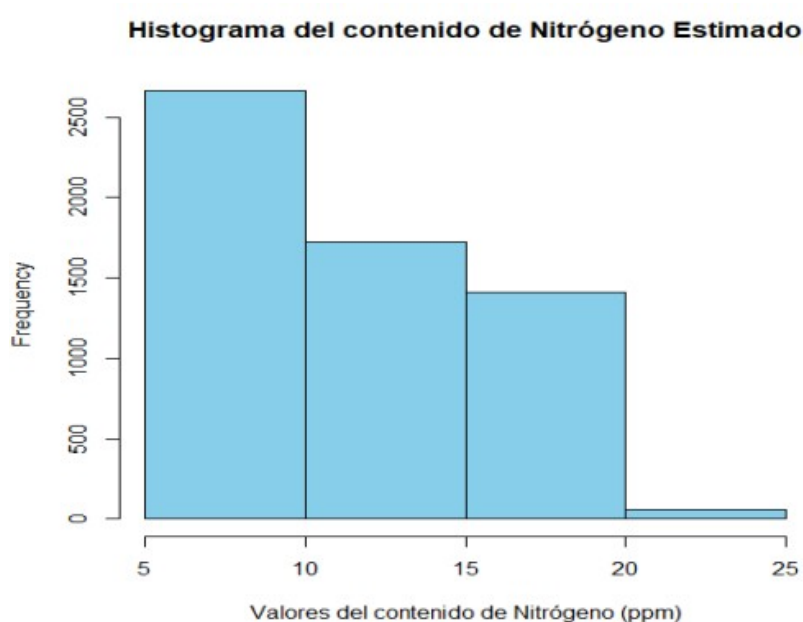
De los valores de interpolación obtenidos por Kriging, en la tabla 24 se presenta los estadísticos, donde se observa que el menor valor corresponde a 5.82 ppm, el promedio se ubica en 11.60 y el valor máximo es de 21.80. Asimismo, se observa que la desviación estándar es de 4.13 y el coeficiente de variación del 35.62%.

Tabla 24*Estadísticos para el contenido de nitrógeno estimado*

Estadísticos	Valor
Valor mínimo	5.82
Valor máximo	21.80
Promedio	11.60
Desviación estándar	4.13
Coefficiente de variación (%)	35.62

Nota. Elaboración propia.

Respecto a su distribución, en la figura 37 se observa el histograma del contenido de nitrógeno donde se muestra la distribución del contenido de nitrógeno estimado por la interpolación.

Figura 36*Histograma del contenido de nitrógeno estimado*

Nota. Elaboración propia.

El resultado de la interpolación arroja un contenido de nitrógeno entre 5.00 y 10.00 ppm, con una frecuencia de aproximadamente 2500. A medida que aumentan los valores de nitrógeno, la frecuencia disminuye. Los valores entre 10.00 y 15.00 ppm son menos frecuentes, y los valores superiores a 20 ppm tienen una frecuencia muy baja.

Esto sugiere que los valores más altos de nitrógeno son menos comunes, respecto a su simetría, la distribución parece estar sesgada hacia la derecha (asimetría positiva),

indicando que hay pocos valores altos de nitrógeno en comparación con los valores bajos.

De manera complementaria, se evaluó el desempeño del análisis Kriging mediante la comparación directa entre los valores observados del contenido de nitrógeno y los valores estimados, utilizando como métrica el Error Cuadrático Medio (RMSE).

Tabla 25

Valor del Error Cuadrático Medio (RMSE) del contenido de nitrógeno

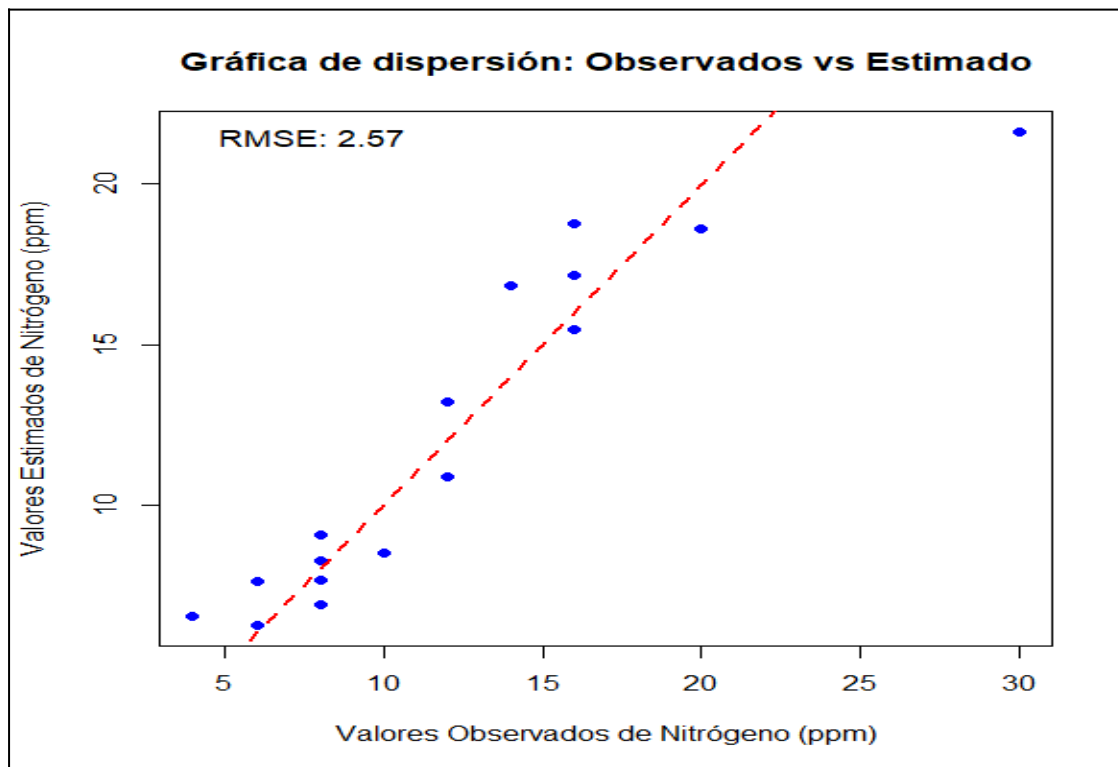
Muestras	Valor observado del N	Valor estimado del N
PM1	16.00	15.47
PM2	14.00	16.85
PM3	30.00	21.65
PM4	16.00	18.79
PM5	16.00	17.15
PM6	10.00	8.53
PM7	6.00	6.26
PM8	4.00	6.56
PM9	8.00	6.91
PM10	12.00	13.22
PM11	20.00	18.60
PM12	6.00	7.63
PM13	8.00	7.69
PM14	8.00	8.29
PM15	12.00	10.89
PM16	8.00	9.07
Error Cuadrático Medio (RMSE)		2.57

Nota. Elaboración propia.

De la tabla 25, el cálculo del RMSE arrojó un valor de 2.57, lo que indica que, en promedio, las predicciones presentan un error de aproximadamente 2.57 ppm en comparación con los valores observados. Este resultado sugiere que las predicciones son cercanas a los valores observados, reflejando un buen desempeño del modelo en términos de precisión. Para complementar esta evaluación, se generó una gráfica de dispersión (figura 36) comparando los valores observados con los valores estimados.

Figura 37

Gráfico de dispersión del contenido de nitrógeno



Nota. Elaboración propia.

En la gráfica, los puntos cercanos a la línea de identidad (diagonal de color rojo) refuerzan la precisión del modelo, ya que indican que las predicciones se aproximan a los valores observados.

5.1.2.4 Fósforo (P)

Para este parámetro se tomaron 16 muestras distribuidas (ver figura 38) en todo el campo.

Figura 38

Valores del contenido de fósforo por cada punto muestreado



Nota. Elaboración propia.

El análisis realizado en campo para determinar el contenido de fósforo (ppm) muestra los siguientes valores porcentuales (ver la tabla 26).

Tabla 26*Contenido de fósforo (P) en la parcela*

Muestras	Coordenadas UTM WGS 84 Zona 18 Sur		P (ppm)
	Este	Norte	
PM1	736232	8504383	33.00
PM2	736216	8504368	36.30
PM3	736204	8504355	105.60
PM4	736195	8504350	82.50
PM5	736182	8504348	56.10
PM6	736270	8504313	23.10
PM7	736291	8504337	16.50
PM8	736280	8504345	19.80
PM9	736280	8504341	9.90
PM10	736149	8504308	19.80
PM11	736137	8504336	33.00
PM12	736239	8504307	13.20
PM13	736231	8504271	29.70
PM14	736203	8504230	29.70
PM15	736179	8504254	9.90
PM16	736193	8504286	16.50

Nota. Elaboración propia.

De acuerdo con los valores obtenidos en el muestreo, se presenta la tabla 25 en donde el valor mínimo corresponde a 9.90 ppm de fósforo, el promedio se ubica en 33.41 ppm y el máximo valor es de 105.60 ppm. Por otro lado, se tiene que la desviación estándar es de 26.75 ppm y el coeficiente de variación del 80.06%.

Tabla 27*Estadísticos para el contenido de fósforo medido*

Estadísticos	Valor
Valor mínimo	9.90
Valor máximo	105.60
Promedio	33.41
Desviación estándar	26.75
Coeficiente de variación (%)	80.06

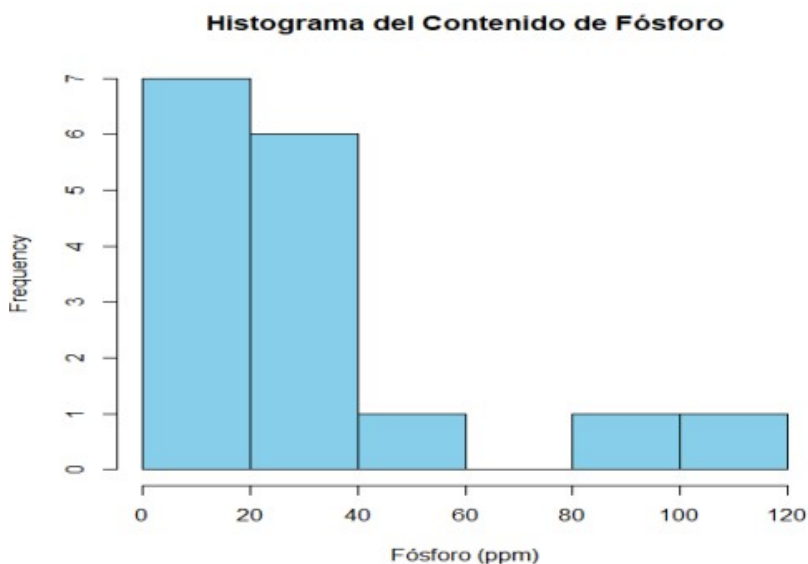
Nota. Elaboración propia.

En la figura 39 se observa el histograma del contenido de fósforo de un total de 16 muestras en donde la mayoría de las muestras tienen fósforo entre 0.00 ppm y 20.00 ppm, siendo este el rango más frecuente, del mismo modo los valores que se ubican entre 20.00 ppm y 40.00 ppm, la distribución no es uniforme hay una tendencia decreciente en el

contenido de fósforo, existen pocos valores de fósforo por encima de 80.00 ppm.

Figura 39

Histograma del contenido de fósforo



Nota. Elaboración propia.

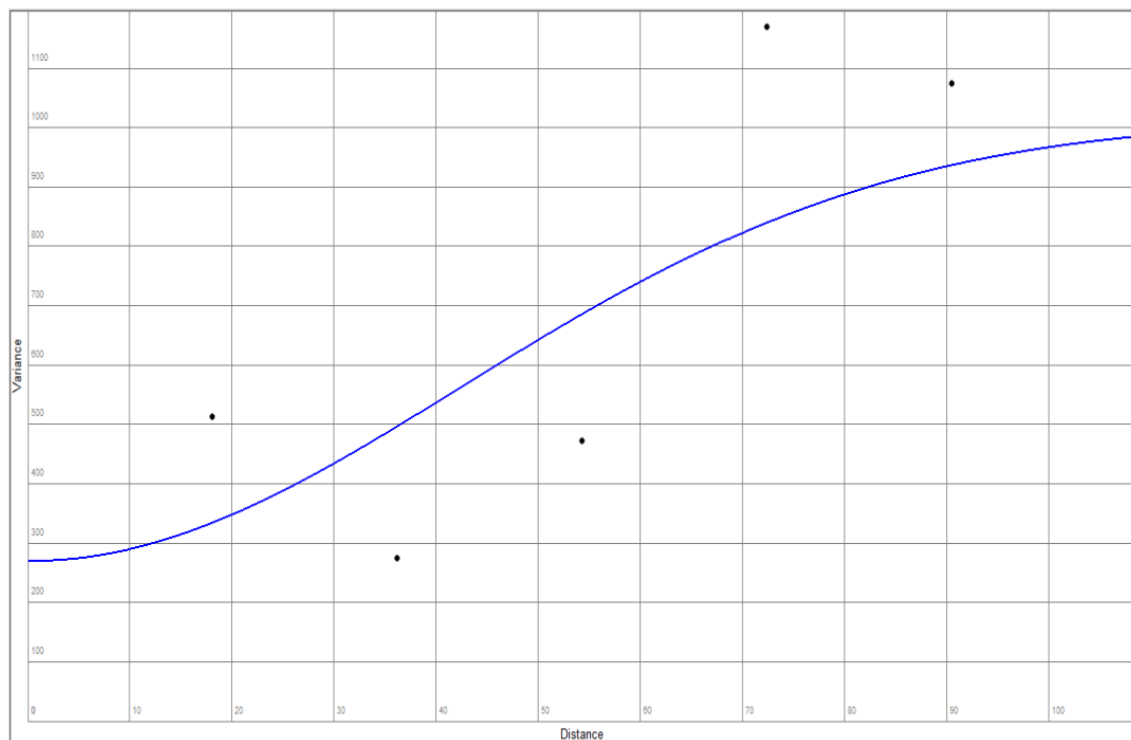
A partir de la recolección de las 16 muestras se realizó el análisis de la variabilidad espacial del contenido de fósforo en el área agrícola de interés. Para evaluar dicha variabilidad se construyó el semivariograma experimental utilizando las coordenadas espaciales y los valores correspondientes del contenido de fósforo medidas en cada muestra.

En la figura 39 se presenta el semivariograma realizado para el contenido de arena. De esta figura se observa que en el eje X (distancia) representa la separación espacial de los puntos de muestreo, mientras que en el eje Y (varianza o semivarianza) representa la similitud en los valores de las variables entre los puntos.

Los puntos negros son los valores experimentales del semivariograma calculados a partir de los datos disponibles, la línea azul representa el modelo teórico (en este caso, gaussian) que se ajusta a los puntos experimentales para representar la relación espacial subyacente.

Figura 40

Semivariograma del contenido de fósforo



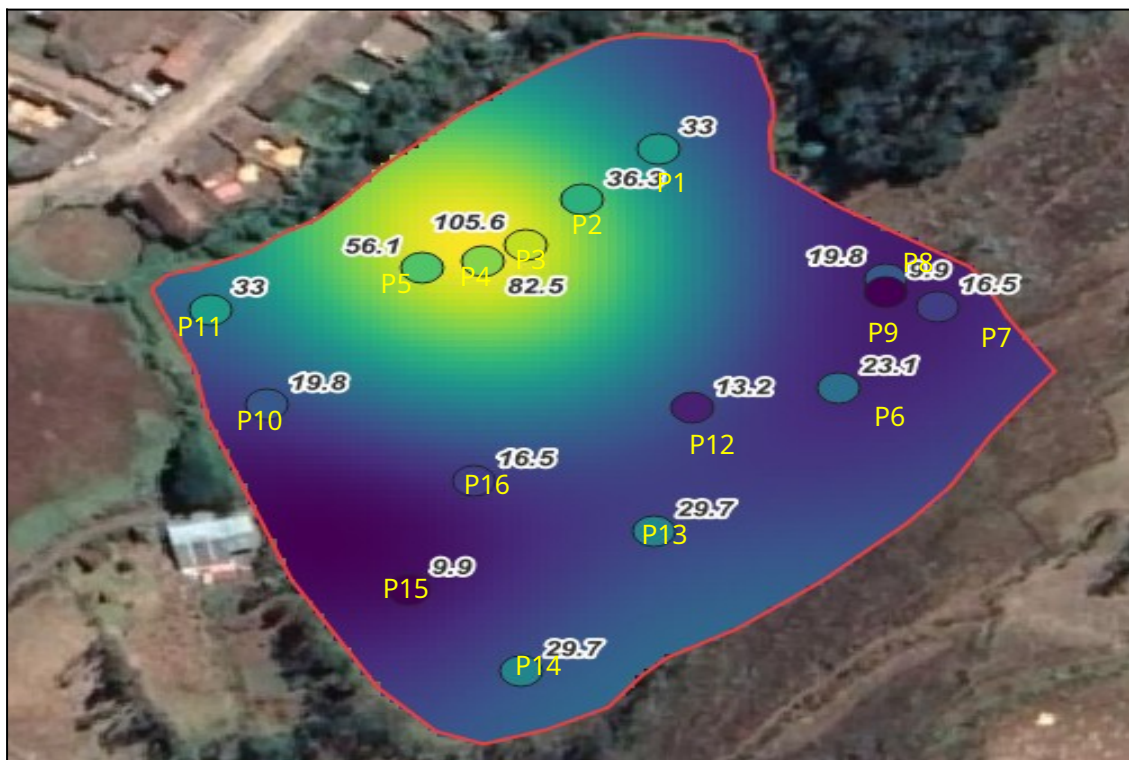
Nota. Elaboración propia.

También se observa que el nugget tiene un valor de 270.67, el cual representa la variabilidad no explicada que al ser un valor muy pequeño indica que buena precisión de los datos. El sill (s) con un valor de 1013.91 unidades de varianza que se mantiene constante a medida que aumenta la distancia y, por último, el range (r) con un valor de 59.88 m, lo cual implica que, a distancias mayores, la relación espacial entre los puntos de medición se pierde y los valores se vuelven independientes entre sí, es decir, la variabilidad de los valores ya no está determinada por la proximidad entre puntos.

Por otro lado, el modelo tiene un ajuste del 52.39%, indicando que este modelo gaussian explica un porcentaje moderado de la variabilidad espacial en los datos, tal como se corrobora en la figura 41 en la que se muestra la interpolación de Kriging aplicada al área de estudio, donde los valores representados en los puntos son los datos recolectados en campo sobre el contenido de fósforo del suelo.

Figura 41

Interpolación Kriging para el contenido de fósforo



Nota. Elaboración propia.

De esta figura 40 los círculos con colores y etiquetas numéricas representan los valores obtenidos en las mediciones de campo. Los valores más altos están asociados a los tonos de color verde claro, mientras que los más bajos están representados en tonos morado intenso.

La interpolación de Kriging utiliza los valores puntuales para predecir los valores en el resto de la superficie. En este caso, se observa un gradiente de colores que indica cómo varía el contenido del contenido de nitrógeno. Por ejemplo, la zona morado intenso indica un contenido más bajo, mientras que las áreas de color verde a verde claro corresponden a valores más altos.

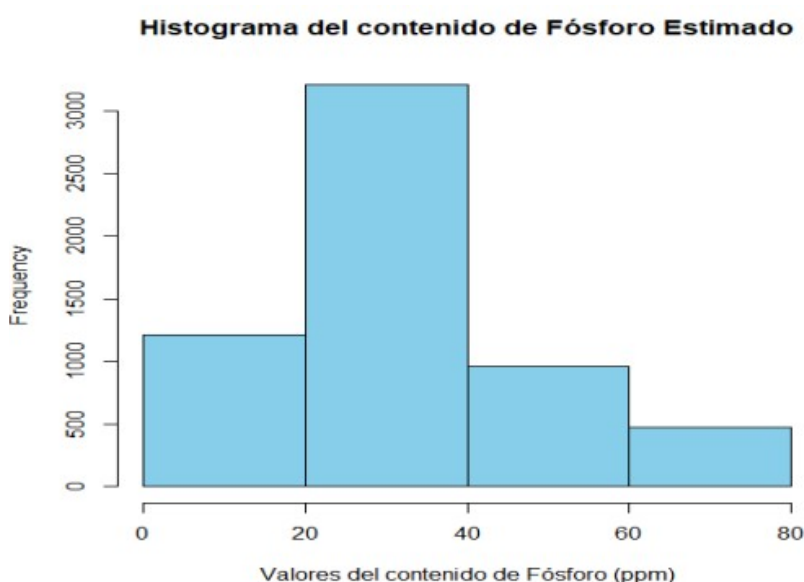
De los valores de interpolación obtenidos por Kriging, en la tabla 26 se presenta los estadísticos, donde se observa que el menor valor corresponde a 11.92 ppm, el promedio se ubica en 31.60 ppm y el valor máximo es de 70.21 ppm. Asimismo, se observa que la desviación estándar es de 14.89 ppm y el coeficiente de variación del 47.12%.

Tabla 28*Estadísticos para el contenido de fósforo estimado*

Estadísticos	Valor
Valor mínimo	11.92
Valor máximo	70.21
Promedio	11.60
Desviación estándar	14.89
Coefficiente de variación (%)	47.12

Nota. Elaboración propia.

Respecto a su distribución, en la figura 42 se observa el histograma del contenido de fósforo donde se muestra la distribución del contenido de fósforo estimado por la interpolación.

Figura 42*Histograma del contenido de fósforo estimado*

Nota. Elaboración propia.

El resultado de la interpolación arroja un contenido de fósforo entre 20.00 y 40.00 ppm, siendo los valores más frecuentes. A medida que aumentan los valores de fósforo, la frecuencia disminuye.

Respecto a la simetría, se puede observar que hay una tendencia sesgada hacia la derecha esto sugiere que los valores más altos de fósforo son menos comunes.

De manera complementaria, se evaluó el desempeño del análisis Kriging mediante la comparación directa entre los valores observados del contenido de fósforo y los valores

estimados, utilizando como métrica el Error Cuadrático Medio (RMSE).

Tabla 29

Valor del Error Cuadrático Medio (RMSE) del contenido de fósforo (P)

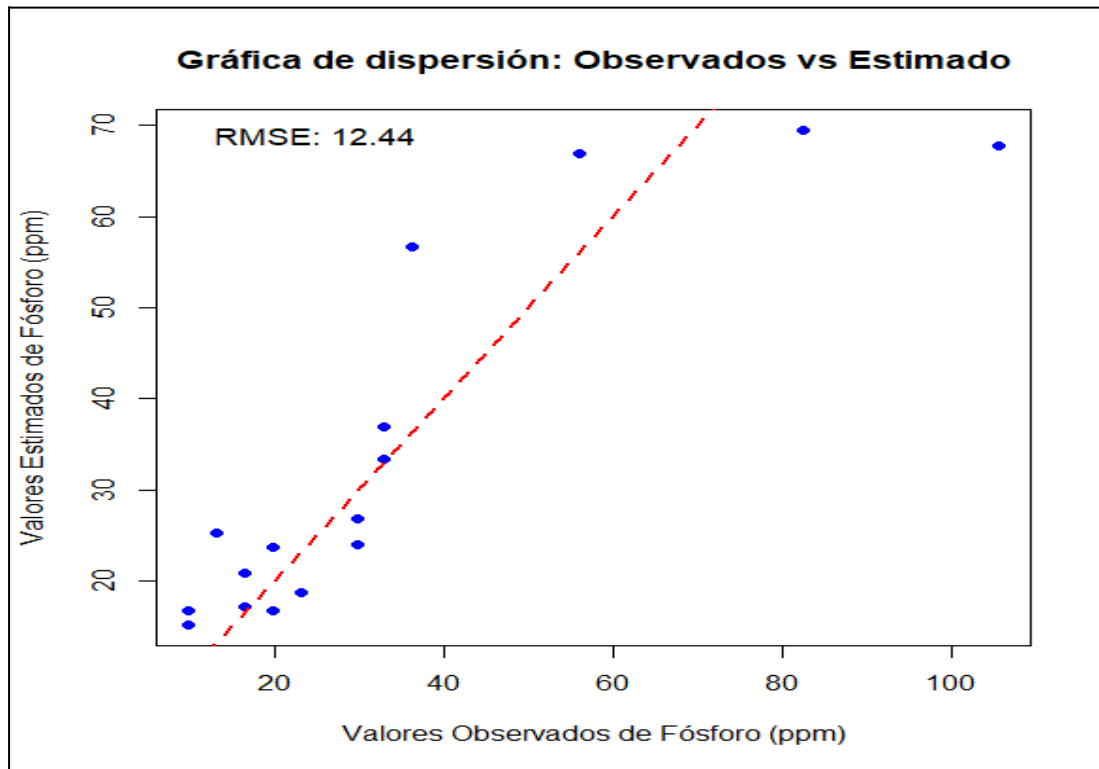
Muestras	Valor observado del P	Valor estimado del P
PM1	33.00	36.88
PM2	36.30	56.69
PM3	105.60	67.70
PM4	82.50	69.51
PM5	56.10	66.84
PM6	23.10	18.68
PM7	16.50	17.23
PM8	19.80	16.73
PM9	9.90	16.77
PM10	19.80	23.67
PM11	33.00	33.37
PM12	13.20	25.23
PM13	29.70	23.98
PM14	29.70	26.91
PM15	9.90	15.16
PM16	16.50	20.83
Error Cuadrático Medio (RMSE)		12.43

Nota. Elaboración propia.

De la tabla 29, el cálculo del RMSE arrojó un valor de 12.43, lo que indica que, en promedio, las predicciones presentan un error de aproximadamente 12.43 ppm en comparación con los valores observados. Este resultado sugiere que las predicciones no son tan cercanas a los valores observados, reflejando un desempeño moderado del modelo en términos de precisión. Para complementar esta evaluación, se generó una gráfica de dispersión (figura 42) comparando los valores observados con los valores estimados. En la gráfica, los puntos cercanos a la línea de identidad (diagonal de color rojo) refuerzan la precisión del modelo, ya que indican que las predicciones se aproximan a los valores observados.

Figura 43

Gráfico de dispersión del contenido de fósforo



Nota. Elaboración propia.

5.1.2.5 Potasio (K)

Para este parámetro se tomaron 16 muestras distribuidas (ver figura 43) en todo el campo.

Figura 44

Valores del contenido de potasio por cada punto muestreado



Nota. Elaboración propia.

El análisis realizado en campo para determinar el contenido de Potasio (K) muestra los siguientes valores expresados en ppm (ver la tabla 30).

Tabla 30*Contenido de potasio (K) en la parcela*

Muestras	Coordenadas UTM WGS 84 Zona 18 Sur		K (ppm)
	Este	Norte	
PM1	736232	8504383	207.00
PM2	736216	8504368	207.00
PM3	736204	8504355	207.00
PM4	736195	8504350	294.00
PM5	736182	8504348	294.00
PM6	736270	8504313	129.00
PM7	736291	8504337	143.00
PM8	736280	8504345	143.00
PM9	736280	8504341	159.00
PM10	736149	8504308	180.00
PM11	736137	8504336	243.00
PM12	736239	8504307	129.00
PM13	736231	8504271	143.00
PM14	736203	8504230	159.00
PM15	736179	8504254	180.00
PM16	736193	8504286	159.00

Nota. Elaboración propia.

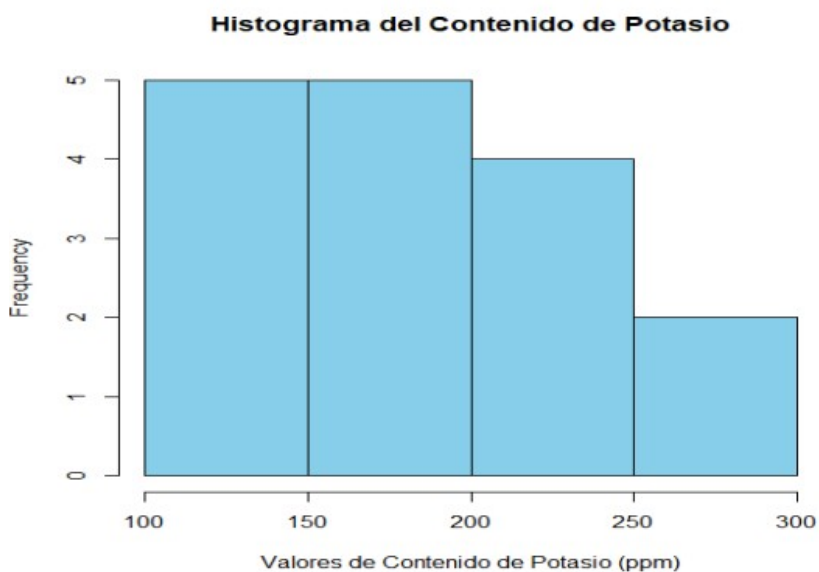
De acuerdo con los valores obtenidos en el muestreo, se presenta la tabla 29 en donde el valor mínimo corresponde a 129.00 ppm de potasio, el promedio se ubica en 186.00 ppm y el máximo valor es de 294.00 ppm. Por otro lado, se tiene que la desviación estándar es de 53.04 ppm y el coeficiente de variación del 28.52%.

Tabla 31*Estadísticos para el contenido de potasio medido*

Estadísticos	Valor
Valor mínimo	129.00
Valor máximo	294.00
Promedio	186.00
Desviación estándar	53.04
Coeficiente de variación (%)	28.52

Nota. Elaboración propia.

En la figura 45 se observa el histograma del contenido de potasio de un total de 16 muestras en donde la mayoría de las muestras tienen fósforo entre 100.00 ppm y 200.00 ppm, la distribución no es uniforme hay una tendencia decreciente en el contenido de potasio, existen pocos valores de fósforo por encima de 200 ppm.

Figura 45*Histograma del contenido de Potasio*

Nota. Elaboración propia.

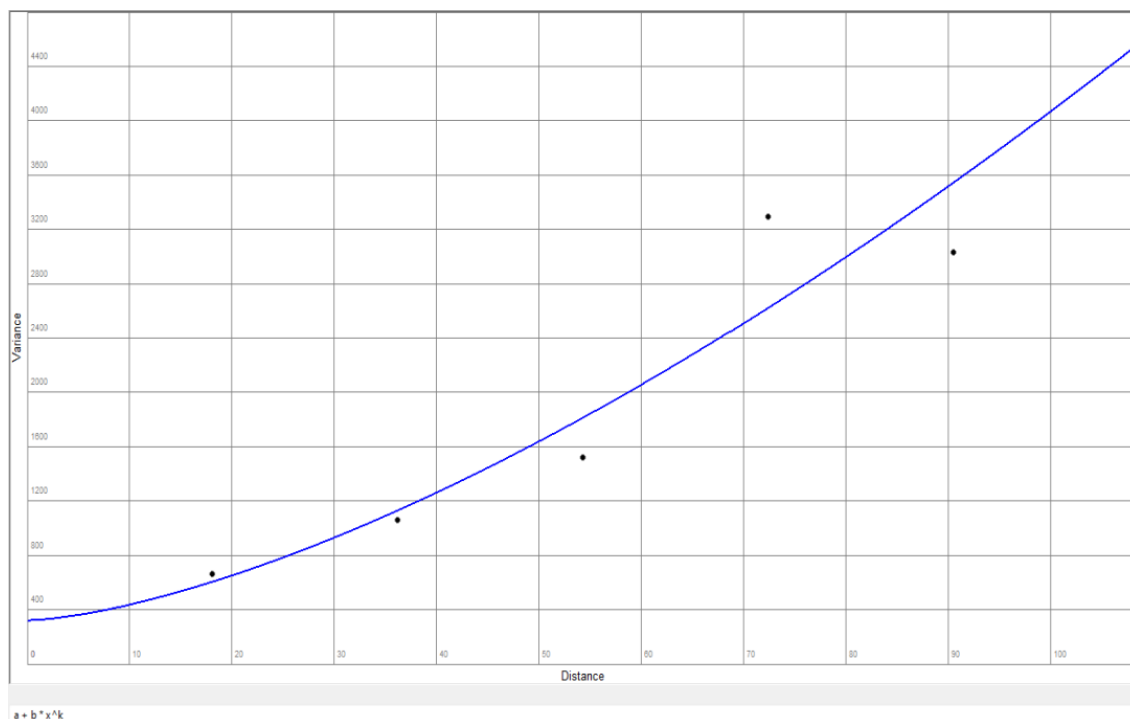
A partir de la recolección de las 16 muestras se realizó el análisis de la variabilidad espacial del contenido de potasio en el área agrícola de interés. Para evaluar dicha variabilidad se construyó el semivariograma experimental utilizando las coordenadas espaciales y los valores correspondientes del contenido de potasio medidas en cada muestra.

En la figura 45 se presenta el semivariograma realizado para el contenido de arena. De esta figura se observa que en el eje X (distancia) representa la separación espacial de los puntos de muestreo, mientras que en el eje Y (varianza o semivarianza) representa la similitud en los valores de las variables entre los puntos.

Los puntos negros son los valores experimentales del semivariograma calculados a partir de los datos disponibles, la línea azul representa el modelo teórico (en este caso, power) que se ajusta a los puntos experimentales para representar la relación espacial subyacente.

Figura 46

Semivariograma del contenido de potasio



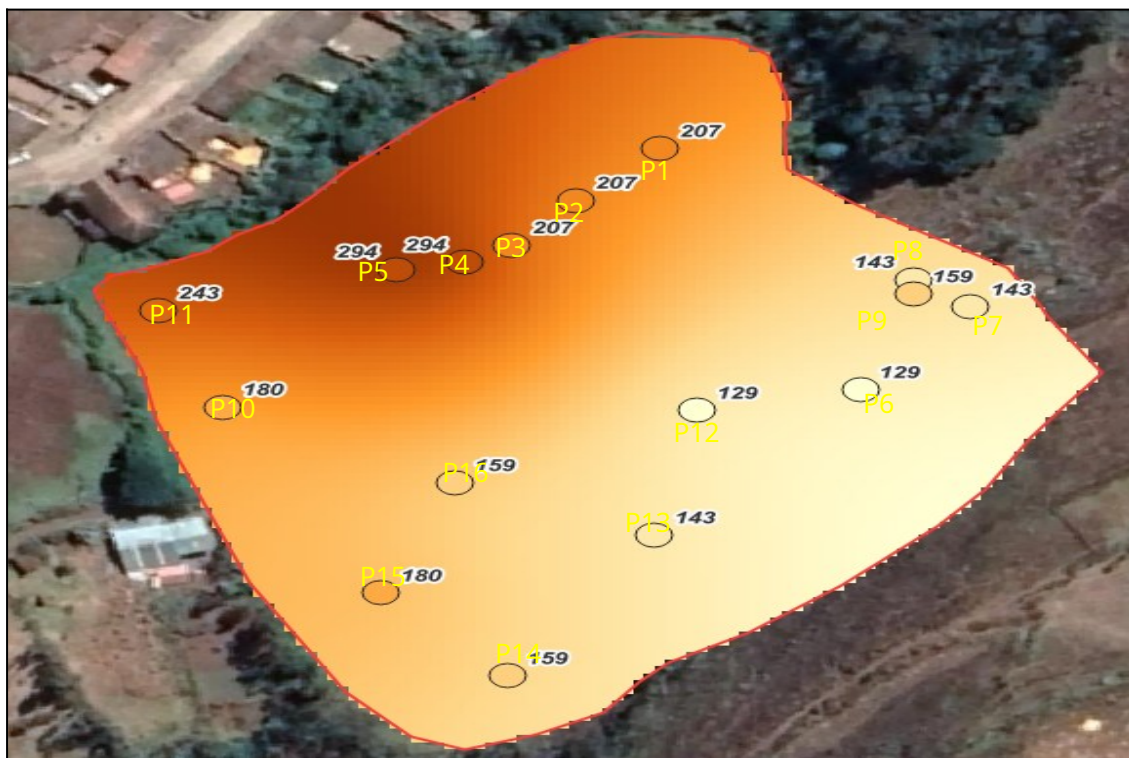
Nota. Elaboración propia.

También se observa que el parámetro a (nugget) tiene un valor de 325.867, el cual representa la variabilidad no explicada, en este caso hay una variabilidad inicial significativa. El parámetro b con un valor de 3.60 muestra que la semivarianza crece relativamente rápido con la distancia y, por último, el parámetro k con un valor de 1.50, lo cual implica que, la semivarianza crece relativamente con la distancia, dicho de otro modo, los puntos más alejados entre sí tienen una menor similitud o correlación con los valores de la variable analizada.

Por otro lado, el modelo tiene un ajuste del 93.19%, indicando que este modelo power explica un porcentaje moderado de la variabilidad espacial en los datos, tal como se corrobora en la figura 46 en la que se muestra la interpolación de Kriging aplicada al área de estudio, donde los valores representados en los puntos son los datos recolectados en campo sobre el contenido de potasio del suelo.

Figura 47

Interpolación Kriging para el contenido de potasio



Nota. Elaboración propia.

De esta figura los círculos con colores y etiquetas numéricas representan los valores obtenidos en las mediciones de campo. Los valores más altos están asociados a los tonos de color marrón intenso, mientras que los más bajos están representados en tonos marrón claro.

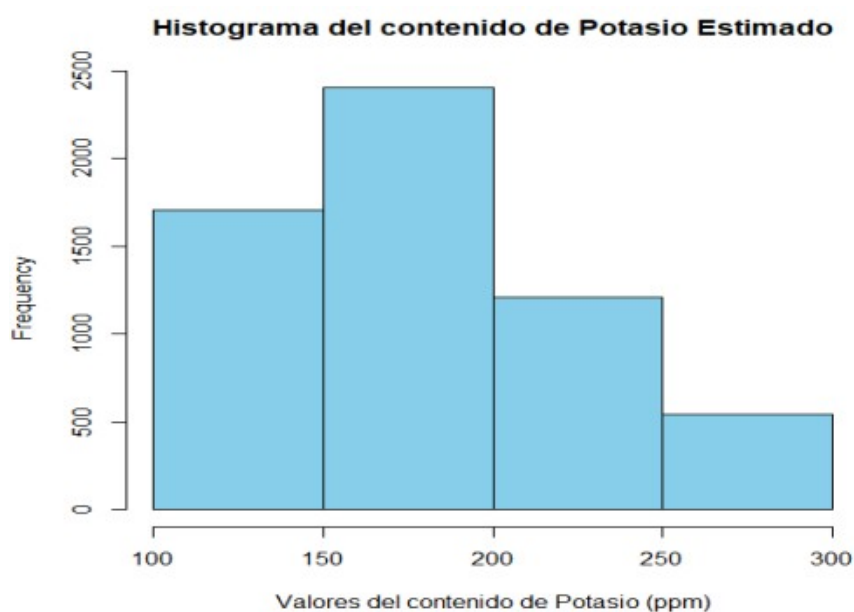
La interpolación de Kriging utiliza los valores puntuales para predecir los valores en el resto de la superficie. En este caso, se observa un gradiente de colores que indica cómo varía el contenido de potasio. Por ejemplo, la zona marrón intenso indica un contenido más alto, mientras que las áreas de marrón claro corresponden a valores más bajos. De los valores de interpolación obtenidos por Kriging, en la tabla 30 se presenta los estadísticos, donde se observa que el menor valor corresponde a 116.70 ppm, el promedio se ubica en 180.10 y el valor máximo es de 279.41. Asimismo, se observa que la desviación estándar es de 43.02 y el coeficiente de variación del 23.88%.

Tabla 32*Estadísticos para el contenido de potasio estimado*

Estadísticos	Valor
Valor mínimo	116.70
Valor máximo	279.41
Promedio	180.10
Desviación estándar	43.01
Coefficiente de variación (%)	23.88

Nota. Elaboración propia.

Respecto a su distribución, en la figura 48 se observa el histograma donde se muestra la distribución del contenido de potasio estimado por la interpolación. El resultado de la interpolación arroja un contenido de potasio entre 150.00 y 200.00 ppm, siendo los valores más frecuentes. A medida que aumentan los valores de potasio, la frecuencia disminuye. Respecto a la simetría, se puede observar que hay una tendencia sesgada hacia la derecha esto sugiere que los valores más altos de potasio son menos comunes.

Figura 48*Histograma del contenido de potasio estimado*

Nota. Elaboración propia.

De manera complementaria, se evaluó el desempeño del análisis Kriging mediante la comparación directa entre los valores observados del contenido de potasio y los valores estimados, utilizando como métrica el Error Cuadrático Medio (RMSE).

Tabla 33*Valor del Error Cuadrático Medio (RMSE) del contenido de potasio (K)*

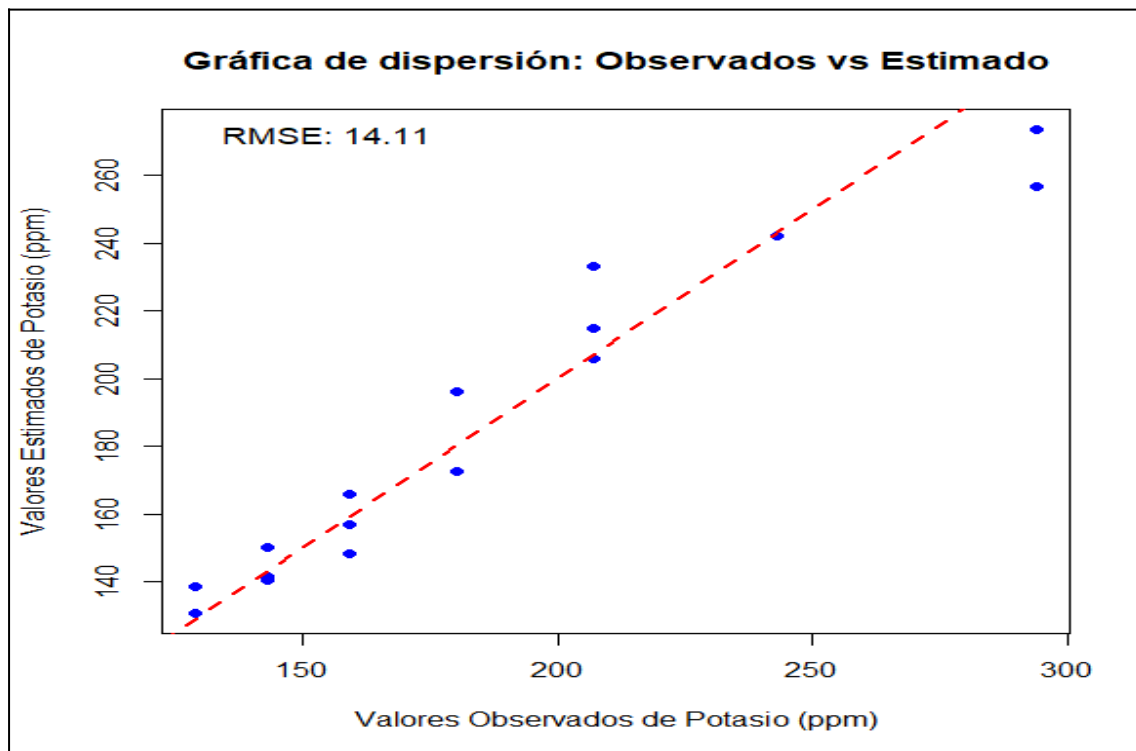
Muestras	Valor observado del K	Valor estimado del K
PM1	207.00	205.93
PM2	207.00	214.94
PM3	207.00	233.11
PM4	294.00	256.61
PM5	294.00	273.78
PM6	129.00	130.54
PM7	143.00	141.45
PM8	143.00	150.07
PM9	159.00	148.33
PM10	180.00	196.19
PM11	243.00	242.32
PM12	129.00	138.34
PM13	143.00	140.22
PM14	159.00	156.76
PM15	180.00	172.66
PM16	159.00	165.77
Error Cuadrático Medio (RMSE)		14.10

Nota. Elaboración propia.

De la tabla 33, el cálculo del RMSE arrojó un valor de 14.10, lo que indica que, en promedio, las predicciones presentan un error de aproximadamente 14.10 ppm en comparación con los valores observados. Este resultado sugiere que las predicciones son cercanas a los valores observados, reflejando un desempeño moderado del modelo en términos de precisión. Para complementar esta evaluación, se generó una gráfica de dispersión (figura 48) comparando los valores observados con los valores estimados. En la gráfica, los puntos cercanos a la línea de identidad (diagonal de color rojo) refuerzan la precisión del modelo, ya que indican que las predicciones se aproximan a los valores observados.

Figura 49

Gráfico de dispersión del contenido de potasio



Nota. Elaboración propia.

5.1.2.6 Ca + Mg

Para este parámetro se tomaron 16 muestras distribuidas (ver figura 50) en todo el campo agrícola.

Figura 50

Valores del contenido de Ca + Mg por cada punto muestreado



Nota. Elaboración propia.

El análisis realizado en campo para determinar el contenido de Ca + Mg muestra los siguientes valores expresados en ppm (ver la tabla 34).

Tabla 34*Contenido de Ca + Mg en la parcela*

Muestras	Coordenadas UTM WGS 84 Zona 18 Sur		Ca + Mg (Meq/100g)
	Este	Norte	
PM1	736232	8504383	28.00
PM2	736216	8504368	30.00
PM3	736204	8504355	25.00
PM4	736195	8504350	27.00
PM5	736182	8504348	23.00
PM6	736270	8504313	18.00
PM7	736291	8504337	22.00
PM8	736280	8504345	28.00
PM9	736280	8504341	18.00
PM10	736149	8504308	24.00
PM11	736137	8504336	23.00
PM12	736239	8504307	19.00
PM13	736231	8504271	16.00
PM14	736203	8504230	29.00
PM15	736179	8504254	16.00
PM16	736193	8504286	9.00

Nota. Elaboración propia.

De acuerdo con los valores obtenidos en el muestreo, se presenta la tabla 33 en donde el valor mínimo corresponde a 9.00 (Meq/100g) de Ca + Mg, el promedio se ubica en 22.19 (Meq/100g) y el máximo valor es de 30.00 (Meq/100g). Por otro lado, se tiene que la desviación estándar es de 5.81 (Meq/100g) y el coeficiente de variación del 26.19%.

Tabla 35*Estadísticos para el contenido de Ca + Mg medido*

Estadísticos	Valor
Valor mínimo	9.00
Valor máximo	30.00
Promedio	22.19
Desviación estándar	5.81
Coeficiente de variación (%)	26.19

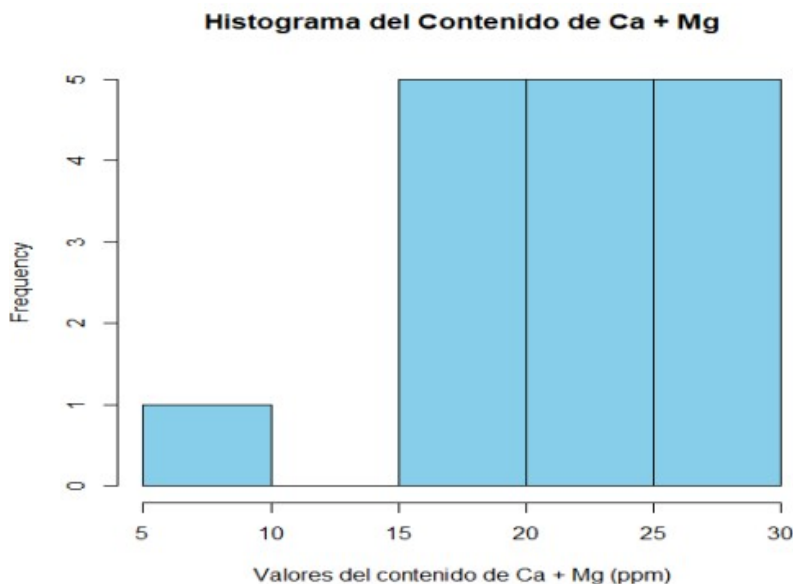
Nota. Elaboración propia.

En la figura 51 se observa el histograma del contenido de Ca + Mg de un total de 16 muestras en donde la mayoría de las muestras tienen Ca + Mg entre 15.00 (Meq/100g) y 30.00 (Meq/100g), siendo los valores más frecuentes y la distribución no es uniforme hay una tendencia decreciente en el contenido de Ca + Mg, existen pocos valores de Ca + Mg

por debajo de 10 (Meq/100g).

Figura 51

Histograma del contenido de Ca + Mg



Nota. Elaboración propia.

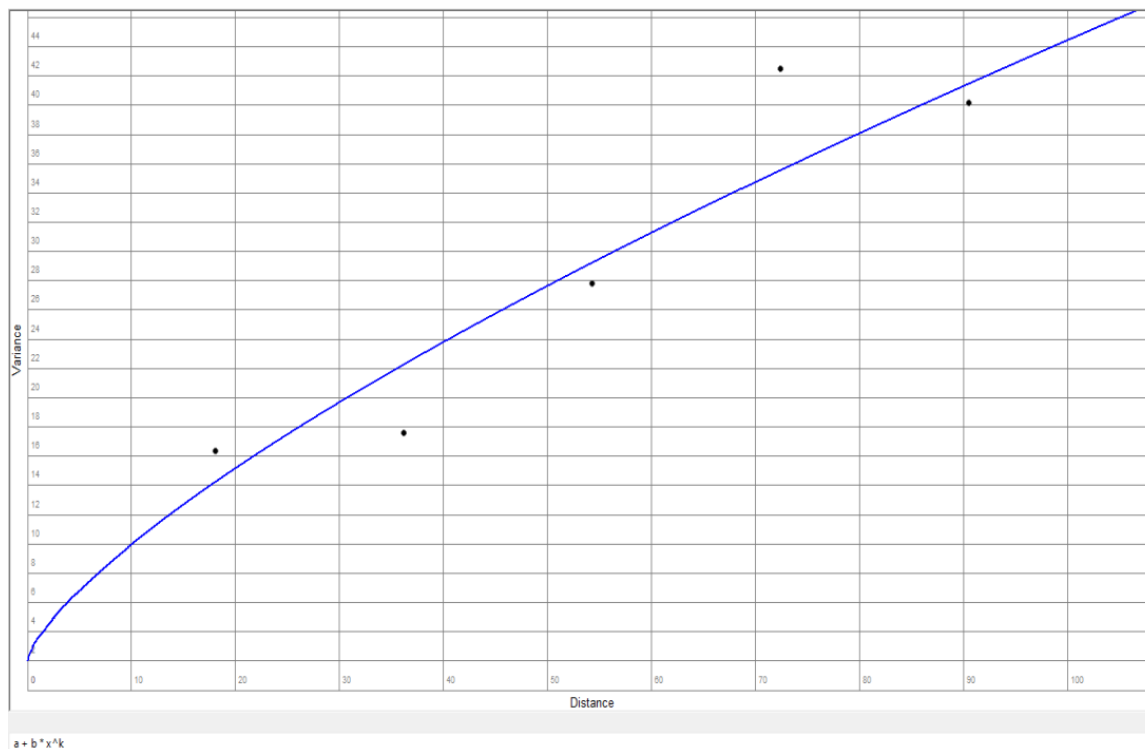
A partir de la recolección de las 16 muestras se realizó el análisis de la variabilidad espacial del contenido de Ca + Mg en el área agrícola de interés. Para evaluar dicha variabilidad se construyó el semivariograma experimental utilizando las coordenadas espaciales y los valores correspondientes del contenido de Ca + Mg medidas en cada muestra.

En la figura 52 se presenta el semivariograma realizado para el contenido de arena. De esta figura se observa que en el eje X (distancia) representa la separación espacial de los puntos de muestreo, mientras que en el eje Y (varianza o semivarianza) representa la similitud en los valores de las variables entre los puntos.

Los puntos negros son los valores experimentales del semivariograma calculados a partir de los datos disponibles, la línea azul representa el modelo teórico (en este caso, power) que se ajusta a los puntos experimentales para representar la relación espacial subyacente.

Figura 52

Semivariograma del contenido de Ca + Mg

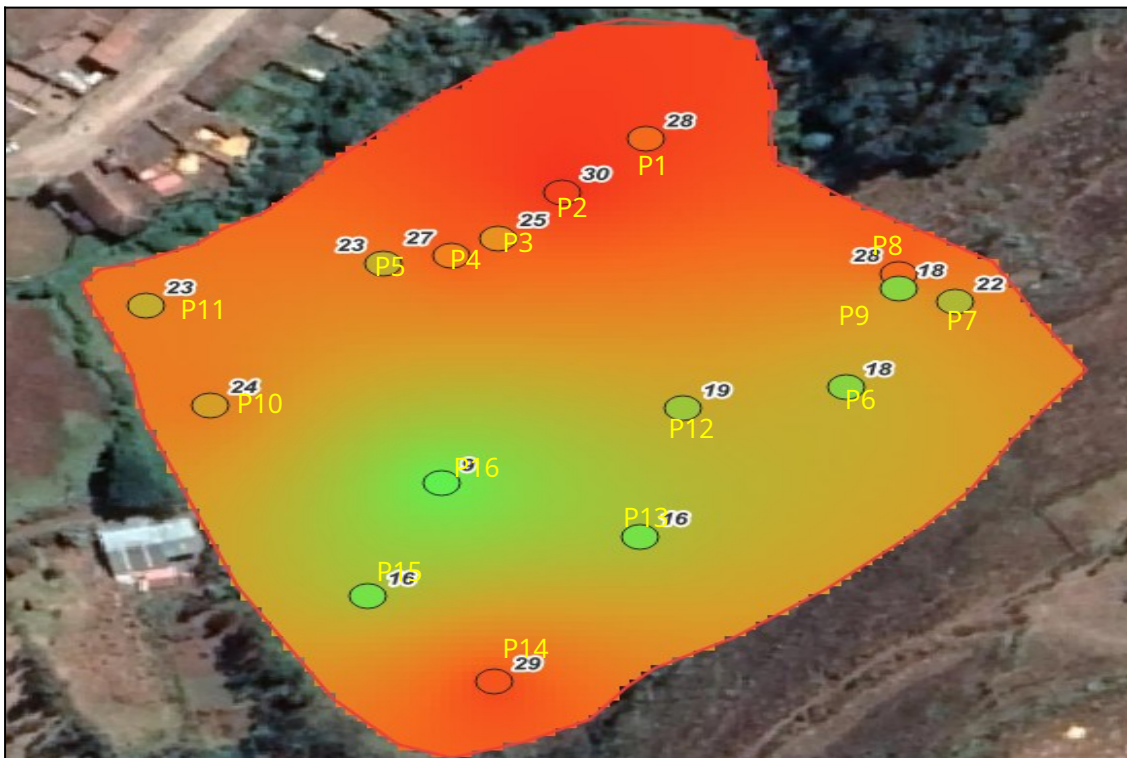


Nota. Elaboración propia.

También se observa que el parámetro a (nugget) tiene un valor de 2.10, el cual representa la variabilidad no explicada, en este caso no hay una variabilidad inicial significativa. El parámetro b con un valor de 1.42 muestra que la semivarianza crece relativamente rápido con la distancia y, por último, el parámetro k con un valor de 0.72, lo cual implica que, la semivarianza crece relativamente con la distancia, dicho de otro modo, los puntos más alejados entre sí tienen una menor similitud o correlación con los valores de la variable analizada. Por otro lado, el modelo tiene un ajuste del 90.18%, indicando que este modelo power explica un porcentaje moderado de la variabilidad espacial en los datos, tal como se corrobora en la figura 52 en la que se muestra la interpolación de Kriging aplicada al área de estudio, donde los valores representados en los puntos son los datos recolectados en campo sobre el contenido de Ca + Mg del suelo.

Figura 53

Interpolación Kriging para el contenido de Ca + Mg



Nota. Elaboración propia.

De esta figura los círculos con colores y etiquetas numéricas representan los valores obtenidos en las mediciones de campo. Los valores más altos están asociados a los tonos de color rojo, mientras que los más bajos están representados por el color verde.

La interpolación de Kriging utiliza los valores puntuales para predecir los valores en el resto de la superficie. En este caso, se observa un gradiente de colores que indica cómo varía el contenido de Ca + Mg. Por ejemplo, la zona roja intenso indica un contenido más alto, mientras que las áreas de color verde claro corresponden a valores más bajos. De los valores de interpolación obtenidos por Kriging, en la tabla 36 se presenta los estadísticos, donde se observa que el menor valor corresponde a 10.54 (Meq/100g), el promedio se ubica en 21.54 (Meq/100g) y el valor máximo es de 29.53 (Meq/100g). Asimismo, se observa que la desviación estándar es de 3.94 (Meq/100g) y el coeficiente de variación del 18.31%.

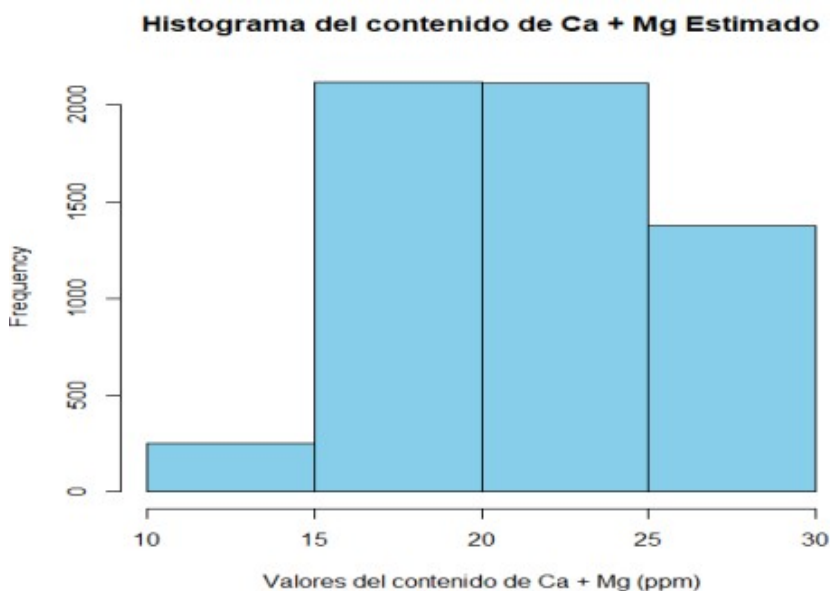
Tabla 36*Estadísticos para el contenido de Ca + Mg estimado*

Estadísticos	Valor
Valor mínimo	10.54
Valor máximo	29.53
Promedio	21.54
Desviación estándar	3.94
Coefficiente de variación (%)	18.31

Nota. Elaboración propia.

Respecto a su distribución, en la figura 55 se observa el histograma donde se muestra la distribución del contenido de Ca + Mg estimado por la interpolación. El resultado de la interpolación arroja un contenido de Ca + Mg entre 15.00 y 20.00 (Meq/100g), siendo los valores más frecuentes seguido de los valores de 20.00 y 25.00 (Meq/100g). A medida que aumentan los valores de potasio, la frecuencia disminuye.

Respecto a la simetría, se puede observar que hay una tendencia sesgada hacia la izquierda esto sugiere que los valores más bajos de Ca + Mg son menos comunes (entre 10.00 (Meq/100g) y 15.00 (Meq/100g)).

Figura 54*Histograma del contenido de Ca + Mg estimado*

Nota. Elaboración propia.

De manera complementaria, se evaluó el desempeño del análisis Kriging mediante la comparación directa entre los valores observados del contenido de Ca + Mg y los valores

estimados, utilizando como métrica el Error Cuadrático Medio (RMSE).

Tabla 37

Valor del Error Cuadrático Medio (RMSE) del contenido de Ca + Mg

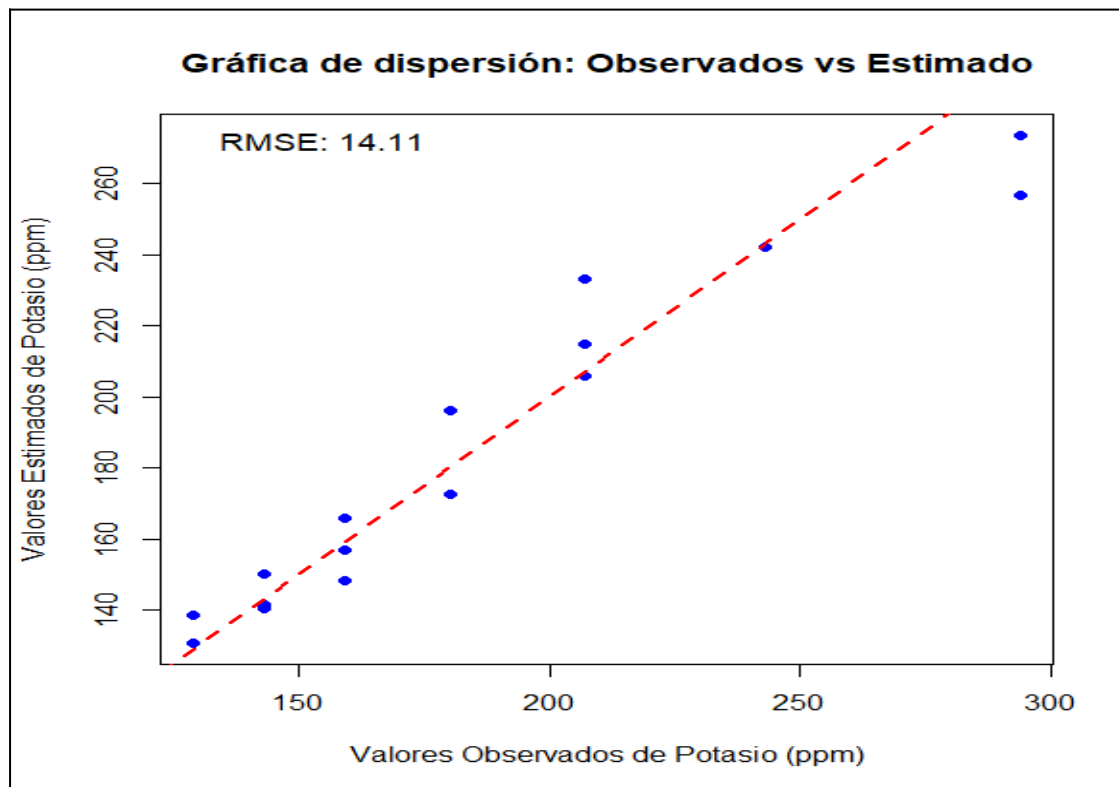
Muestras	Valor observado del Ca + Mg	Valor estimado del Ca + Mg
PM1	28.00	28.00
PM2	30.00	29.53
PM3	25.00	25.36
PM4	27.00	26.17
PM5	23.00	23.25
PM6	18.00	18.30
PM7	22.00	21.86
PM8	28.00	24.50
PM9	18.00	20.16
PM10	24.00	23.25
PM11	23.00	23.12
PM12	19.00	18.76
PM13	16.00	16.55
PM14	29.00	27.59
PM15	16.00	16.64
PM16	9.00	10.54
Error Cuadrático Medio (RMSE)		1.22

Nota. Elaboración propia.

De la tabla 37, el cálculo del RMSE arrojó un valor de 1.22, lo que indica que, en promedio, las predicciones presentan un error de aproximadamente 1.22 (Meq/100g) en comparación con los valores observados. Este resultado sugiere que las predicciones son cercanas a los valores observados, reflejando un buen desempeño del modelo en términos de precisión. Para complementar esta evaluación, se generó una gráfica de dispersión (figura 54) comparando los valores observados con los valores estimados. En la gráfica, los puntos cercanos a la línea de identidad (diagonal de color rojo) refuerzan la precisión del modelo, ya que indican que las predicciones se aproximan a los valores observados.

Figura 55

Gráfico de dispersión del contenido de Ca + Mg



Nota. Elaboración propia.

5.2 Discusión

Los resultados del presente estudio coinciden con Acevedo et al. (2008), quienes resaltaron que las propiedades químicas del suelo presentan alta variabilidad espacial, el pH obtenido es de 5.89 a 8.06, el Nitrógeno estará en un rango entre 0.034 % a 0.227 %, el Fosforo entre 4.59 mg/kg⁻¹ a 89.07 mg/kg⁻¹, el Potasio entre los rangos 49.37 mg/kg⁻¹ a 793.84 mg/kg⁻¹. No obstante, en este trabajo, el pH mostró un rango de valores entre 7.10 y 8.20, reflejando una ligera alcalinidad, el nitrógeno muestra de 4.00 ppm y 30.00 ppm, mientras que el Fosforo refleja un 9.90 ppm y 105.60 ppm, el Potasio está en un rango de 129.00 ppm y 294.00 ppm.

Aguirre (2023), realizó su investigación la caracterización de suelos por su capacidad de uso mayor en tres sectores de la comunidad de Huayllati — Grau — Apurímac: Accahuaray, Topopampa y Padroma, en el sector de Padroma obtuvo el resultado de conductividad eléctrica entre los 0.16 mmhos/cm² a 0.24mmhos/cm², en

cuanto al potencial hidrogeniones (pH) entre los rangos de 8.20 a 8.50, el Nitrógeno obtuvo 0.07% a 0.80 %, el Fosforo entre los rangos de 11.20 ppm a 17.00 ppm, el Potasio entre los rangos de 95.00 ppm a 98.00 ppm, en cuanto la Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) obtuvo un rango entre 18.06 ppm a 20.41 ppm en la clase textural arena 27.00% a 31.80 %, Limo 35.80 a 44.20 %, Arcilla 26.60 a 32.24 % en un suelo Franco arcilloso.

En el trabajo de investigación las propiedades físicas, el contenido de arena varió entre 40% y 58%, el limo varía entre 16.00 % y 36.00% la arcilla presentó un rango de 10% a 35%. Estas variaciones afectan directamente la textura del suelo y, por ende, su capacidad de retención de agua y nutriente.

La metodología utilizada en este trabajo, como el semivariograma y el Kriging, se alinea con los procedimientos descritos por Guachamín (2019), confirmando la robustez de estas herramientas para modelar propiedades como el nitrógeno y la conductividad eléctrica. Los patrones espaciales observados, especialmente en zonas con mayor contenido de nitrógeno, corroboran los hallazgos de Mosqueira (2017) respecto a la influencia de la topografía en la distribución de propiedades edáficas.

VI. Conclusiones

- Las propiedades físicas, como el contenido de arena, limo y arcilla, muestran variabilidad espacial significativa el contenido de arena varió entre 40% y 58%, el limo varía entre 16.00 % y 36.00% la arcilla presentó un rango de 10% a 35%. Estas variaciones afectan directamente la textura del suelo y, por ende, su capacidad de retención de agua y nutriente.
- Las propiedades químicas como pH, nitrógeno y conductividad eléctrica, también evidenciaron una variabilidad espacial significativa. El pH, por ejemplo, mostró un rango de valores entre 7.10 y 8.20, reflejando una ligera alcalinidad en algunas áreas, mientras que la conductividad eléctrica presentó valores entre 0.120 mS/cm y 0.360 mS/cm, lo que indica baja salinidad, el nitrógeno entre los rangos de 4.00 ppm y 30.00 ppm, mientras que el Fosforo refleja un 9.90 ppm y 105.60 ppm, el Potasio está en un rango de 129.00 ppm y 294.00 ppm, finalizando con el Ca + Mg en un rango de 9.00 (Meq/100g) y 30.00 (Meq/100g). Estos resultados confirman que la distribución de los nutrientes y otros elementos químicos no es uniforme, lo cual puede influir en el desarrollo del cultivo.
- Por tanto, La técnica Kriging demostró ser altamente efectiva para estimar valores en áreas no muestreadas y generar mapas detallados de distribución espacial. Los modelos ajustados, como el cúbico y el logarítmico, presentaron niveles aceptables de precisión, respaldados por valores bajos de error cuadrático medio (RMSE), especialmente para variables como el pH y la conductividad eléctrica. Esta evidencia la robustez de la metodología para identificar tendencias espaciales y planificar un manejo agrícola eficiente.
- En este sentido, los resultados confirmaron la hipótesis general de que existe una variabilidad espacial de las propiedades edáficas de un predio agrícola en el distrito de San Pedro de Cachora. Tanto las propiedades físicas y químicas muestran patrones de distribución heterogéneos que pueden ser evaluados y caracterizados mediante técnicas geoestadísticas.

VII. Recomendaciones

De acuerdo a los resultados obtenidos y las conclusiones, se plantean las siguientes recomendaciones:

- Realizar los análisis geoestadísticos cada 3 años para tener en cuenta la disponibilidad de nutrientes en diferentes suelos.
- Capacitar a técnicos agrícolas a utilizar el Sistema de Información Geográfica (SIG) que les permita analizar, producir, presentar y gestionar información geográfica.
- Validar la metodología en suelos con diferentes condiciones topográficas y climáticas.
- Elaborar mapas visuales de variabilidad en programas de agricultura sostenible para reducir el uso indiscriminado de agroquímicos.
- Con los resultados coadyuvar la necesidad de ajustar las prácticas agrícolas para reflejar la heterogeneidad del suelo y maximizar su productividad, mientras se promueve la sostenibilidad.

VIII. Referencias

- Acevedo, C., Álvarez, M., Hernández, E., Maldonado, R., Pérez, M., & Castro, R. (2008). Variabilidad espacial de propiedades químicas del suelo y su uso en el diseño de experimentos. *Terra Latinoamericana*, 26(4), 317–324.
- Aguirre Quispe, N. (2023). *Caracterización de los suelos por sus propiedades físicas, químicas, su capacidad de uso mayor, su clase de uso mayor y su uso actual en tres sectores de la Comunidad de Huayllati – Grau – Apurímac* [Tesis].
- Ames Rocha, M. A. (2019). *Diagnóstico fisicoquímico de los componentes del suelo de la comunidad de San Antonio de Sunec* [Tesis].
- Ayers, R. S., & Westcot, D. W. (1985). *Water quality for agriculture*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Barré, P., Velde, B., Fontaine, C., Catel, N., & Abbadie, L. (2008). Which 2:1 clay minerals are involved in the soil potassium reservoir? Insights from potassium addition or removal experiments on three temperate grassland soil clay assemblages. *Geoderma*, 146(1–2), 216–223.
- Bautista, A., Etchevers, J., Del Castillo, R., & Gutiérrez, C. (2004). La calidad del suelo y sus indicadores. *Ecosistemas*, 13(2), 90–97.
- Brady, N. C., & Weil, R. R. (2017). *The nature and properties of soils* (15th ed.). Pearson Education.
- Brouder, S., Hofmann, B., & Reetz, H. F. (2001). Evaluating spatial variability of soil parameters for management. *Better Crops*, 85(2), 8–11.
- Cakmak, I., & Yazici, A. M. (2010). Magnesium: A forgotten element in crop production. *Better Crops*, 94(2), 23–25.
- Cambardella, C. A., Moorman, T. B., Novak, J. M., Parkin, T. B., Karlen, D. L., Turco, R. F., & Konopka, A. E. (1994). Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. *Soil Science Society of America Journal*, 58(5), 1501–1511.
- Charman, P. E., & Murphy, B. W. (2016). *Soils: Their properties and management* (4th ed.). Oxford University Press.

- Corwin, D. L., & Lesch, S. M. (2003). Application of soil electrical conductivity to precision agriculture: Theory, principles, and guidelines. *Agronomy Journal*, 95(3), 455–471.
- Corwin, D. L., & Lesch, S. M. (2005). Apparent soil electrical conductivity measurements in agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, 46(1–3), 11–43.
- Fageria, N. K., Baligar, V. C., & Clark, R. B. (2011). *Physiology of crop production*. CRC Press.
- Fageria, V. D., & Stone, L. F. (2008). Produtividade de feijão no sistema plantio direto com aplicação de zinco. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 43(9), 1159–1163.
- FAO. (2022, junio 25). *Portal de suelos de la FAO*. <https://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/clasificacion-de-suelos/sistemas-numericos/propiedades-quimicas/es/>
- Fernández, O. (2007). Influencia de la variabilidad espacial del suelo sobre parámetros de la caña de azúcar (*Saccharum officinarum*). *Agricultura Andina*, 39–51.
- Flores Zamora, J. A., Pumacayo Vera, R. M., & Rojas Paniagua, E. (2021). *Evaluación de propiedades físicas de los suelos agrícolas del Centro de Investigación y Producción de Santo Tomás – UTEA – Abancay – Apurímac* [Tesis].
- Garzón, C., Cortés, C., & Camacho-Tamayo, J. (2010). Variabilidad espacial de algunas propiedades químicas en un entisol. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 13(1), 87–95.
- Giraldo, R. (2002). *Introducción a la geoestadística: su teoría y aplicación*. Universidad Nacional de Colombia.
- Goovaerts, P. (1998). Geostatistical tools for characterizing the spatial variability of microbiological and physico-chemical soil properties. *Biology and Fertility of Soils*, 27(4), 315–334.
- Gransee, A., & Fühns, H. (2013). Magnesium mobility in soils as a challenge for soil and plant analysis, magnesium fertilization and root uptake under adverse growth conditions. *Plant and Soil*, 368(1–2), 5–21.
- Guachamín, J. (2019). *Estudio de variabilidad espacial de propiedades químicas del suelo mediante procedimientos geoestadísticos en la comunidad Larcapamba*.

Universidad Central del Ecuador.

Havlin, J. L., Tisdale, S. L., Nelson, W. L., & Beaton, J. D. (2014). *Soil fertility and fertilizers: An introduction to nutrient management* (8th ed.). Pearson Education.

Hillel, D. (2013). *Fundamentals of soil physics*. Academic Press.

Holford, I. C. R. (1997). Soil phosphorus: Its measurement, and its uptake by plants. *Australian Journal of Soil Research*, 35(2), 227–239.

INTA. (2022, mayo 23). *Glosario de términos en agricultura de precisión*. Disponible en: <http://www.agriculturadeprecision.org/articulos/articulos.htm>

INTAGRI. (2017a). *Conductividad eléctrica del suelo en el desarrollo de los cultivos*. Serie Suelos (26), 5.

INTAGRI. (2017b). *Fijación del potasio en el suelo*. Serie Suelos (31), 3.

INTAGRI. (2017c, junio 13). *Propiedades físicas del suelo y crecimiento de las plantas*. Serie Suelos (29). Disponible en: <https://www.intagri.com/articulos/suelos/propiedades-fisicas-del-suelo-y-el-crecimiento-de-las-plantas>

INTAGRI. (2017d, junio 18). *Uso eficiente del fósforo en la agricultura*. Serie de Nutrición Vegetal (105). Disponible en: <https://www.intagri.com/articulos/nutricion-vegetal/uso-eficiente-del-fosforo-en-la-agricultura>

Isaaks, E. H., & Srivastava, R. M. (1989). *Applied geostatistics*. Oxford University Press.

Jury, W. A., & Horton, R. (2004). *Soil physics* (6th ed.).

Keller, T., & Hakansson, I. (2010). Estimation of reference bulk density from soil particle size distribution and soil organic matter content. *Geoderma*, 154, 398–406.

Mallarino, A. P., & Blackmer, A. M. (1992). Comparison of methods for determining critical concentrations of soil test phosphorus for corn. *Agronomy Journal*, 84(5), 850–856.

Mallarino, A. P., Bordoli, J. M., & Borges, R. (1999). Phosphorus and potassium distribution in soil following long-term deep-band fertilization in different tillage systems. *Soil*

- Science Society of America Journal*, 63(5), 1499–1506.
- Marschner, H. (2012). *Marschner's mineral nutrition of higher plants* (3rd ed.). Academic Press.
- McLean, E. O., & Brown, J. R. (1984). Crop response to lime in the Midwestern United States. In F. Adams (Ed.), *Soil acidity and liming* (pp. 267–303). American Society of Agronomy.
- McLaughlin, M. J., & Smolders, E. (2001). Background zinc concentrations in soil affect the zinc sensitivity of soil microbial processes. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 20(11), 2639–2643.
- Mendenhall, W., & Sincich, T. (1997). *Probabilidad y estadística para ingeniería*. Prentice Hall Hispanoamericana.
- Mengel, K., & Kirkby, E. A. (2001). *Principles of plant nutrition* (5th ed.). Kluwer Academic Publishers.
- Mengel, K., Kirkby, E. A., Kosegarten, H., & Appel, T. (2001). *Principles of plant nutrition*. Springer.
- Molin, J., Leiva, F., & Camacho-Tamayo, J. (2008). *Tecnología de la agricultura de precisión en el contexto de la sostenibilidad*. Universidad Nacional de Colombia.
- Mosqueira, F. (2017). *Variabilidad espacial de propiedades físicas y químicas en un suelo agrícola en el valle Mantaro*. Universidad Nacional Agraria La Molina.
- Mulla, D. J., & McBratney, A. B. (2000). Soil spatial variability. In M. E. Sumner (Ed.), *Handbook of soil science* (pp. A321–A352). CRC Press.
- Munns, R., & Tester, M. (2008). Mechanisms of salinity tolerance. *Annual Review of Plant Biology*, 59, 651–681.
- Porta, J., López-Acevedo, M., & Poch, R. M. (2014). *Edafología: Uso y protección de suelos* (3ª ed.). Mundi-Prensa.
- Reátegui Vásquez, M., Rengifo Trigozo, J. P., & Rengifo Rojas, A. (2018). *Calidad de suelos en diferentes sistemas de uso de la tierra, distrito El Eslabón, provincia de Huallaga – San Martín* [Tesis]. Universidad Nacional Agraria de la Selva.

- Rhoades, J. D., Chanduvi, F., & Lesch, S. (1999). *Soil salinity assessment: Methods and interpretation of electrical conductivity measurements*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Richards, L. A. (Ed.). (1954). *Diagnosis and improvement of saline and alkali soils*. United States Department of Agriculture.
- Robertson, G. P., & Groffman, P. M. (2015). Nitrogen transformations. In E. A. Paul (Ed.), *Soil microbiology, ecology and biochemistry* (4th ed., pp. 421–446). Academic Press.
- Rodríguez Garay, F. A. (2015). *Variabilidad espacial de las propiedades físicas y químicas en rendimiento y calidad de café*. Universidad Nacional de Colombia.
- Rubiano, Y. (2004). *Herramienta SIG para apoyo a la toma de decisiones en planificación, uso y manejo del suelo*. Universidad Nacional de Colombia.
- Saquicela Rojas, R. A., Useche Castro, L., & González Pedraza, A. F. (2022). *Muestreo de la variabilidad espacial de propiedades del suelo de pastizales*.
- Schimel, J. P., & Bennett, J. (2004). Nitrogen mineralization: Challenges of a changing paradigm. *Ecology*, 85(3), 591–602.
- Schlesinger, W. H. (2009). On the fate of anthropogenic nitrogen. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106(1), 203–208.
- Sims, J. T., & Sharpley, A. N. (Eds.). (2005). *Phosphorus: Agriculture and the environment*. American Society of Agronomy.
- Singer, M. J., & Munns, D. N. (2006). *Soils: An introduction* (6th ed.). Pearson Prentice Hall.
- Sparks, D. L., & Huang, P. M. (1985). Physical chemistry of soil potassium. In R. D. Munson (Ed.), *Potassium in agriculture* (pp. 201–276). American Society of Agronomy.
- Stevenson, F. J., & Cole, M. A. (1999). *Cycles of soil: Carbon, nitrogen, phosphorus, sulfur, micronutrients* (2nd ed.). John Wiley & Sons.
- Sumner, M. E. (Ed.). (1999). *Handbook of soil science*. CRC Press.
- Sumner, M. E., & Noble, A. D. (2003). Soil acidification: The world story. In Z. Rengel

- (Ed.), *Handbook of soil acidity* (pp. 1–28). Marcel Dekker.
- Tan, K. H. (2011). *Principles of soil chemistry* (4th ed.). CRC Press.
- Thompson, L. M., Troeh, F. R., & Larson, W. E. (2019). *Soils and soil fertility* (6th ed.). Wiley-Blackwell.
- White, P. J., & Broadley, M. R. (2003). Calcium in plants. *Annals of Botany*, 92(4), 487–511.
- Wiki. (2022, junio 20). *Procesos y propiedades químicas del suelo*. Disponible en: https://stormwater.pca.state.mn.us/index.php?title=Soil_chemical_properties_and_processes
- Zarazúa Villaseñor, P. (2005). *Variabilidad espacial en algunas propiedades del suelo en terrenos de uso agrícola*. Universidad de Guadalajara.
- Zavaleta, A. (1992). *Edafología: El suelo en relación con la producción*. A&B S.A.
- Zörb, C., Senbayram, M., & Peiter, E. (2014). Potassium in agriculture: Status and perspectives. *Journal of Plant Physiology*, 171(9), 656–669.

Los anexos, panel fotográfico y otros documentos están resguardados en la oficina de repositorio digital institucional en la Biblioteca Central de la Universidad Tecnológica de los Andes