

Variación espacial de la fertilidad del suelo en la EEA Canaán



PERÚ

Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego



Instituto Nacional de Innovación Agraria





MINISTERIO DE DESARROLLO AGRARIO Y RIEGO
INSTITUTO NACIONAL DE INNOVACIÓN AGRARIA
DIRECCIÓN DE SERVICIOS ESTRATÉGICOS AGRARIOS

Variación espacial de la fertilidad del suelo en la EEA Canaán



PERÚ Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego



VARIACIÓN ESPACIAL DE LA FERTILIDAD DEL SUELO EN LA EEA CANAÁN

MINISTERIO DE DESARROLLO AGRARIO Y RIEGO

Ministro de Desarrollo Agrario y Riego

Angel Manuel Manero Campos

Viceministra de Políticas y Supervisión del Desarrollo Agrario

Carmen Inés Vegas Guerrero

Viceministro de Desarrollo de Agricultura Familiar e Infraestructura Agraria y Riego

Orlando Hernán Chirinos Trujillo

Presidente Ejecutivo del Instituto Nacional de Innovación Agraria

Jorge Juan Ganoza Roncal, M. Sc.

© Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA)

Primera edición digital:

Agosto, 2025

Publicado:

Agosto, 2025

Disponible en:

<https://repositorio.inia.gob.pe/>

ISBN:

978-9972-44-197-4

Editado por:

Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA)

Av. La Molina 1981, Lima-Perú

Teléf. (511) 240-2400

www.gob.pe/inia

Equipo Técnico de Edición y Publicaciones:

Janet Flores / Teléfono: 964173509 / Correo electrónico: comite_publicaciones@inia.gob.pe

Todos los derechos reservados.

Prohibida la reproducción de este libro por cualquier medio, total o parcialmente, sin permiso expreso

Hecho el Depósito Legal en la Biblioteca Nacional del Perú N° 2025-08785

Autores: Kenyi R. Quispe-Matos, Carlos Carbajal-Llosa, Sharon Y. Mejia-Maita, Rigel A. Llerena-Arroyo, Richard A. Solórzano-Acosta, Juancarlos Cruz-Luis / **Editor general:** Cinthia S. Quispe-Apaza / **Revisión de contenido:** Héctor A. Ramírez-Maguiña / **Diseño y diagramación:** Miguel Alvarez-Escalante

Tabla de contenido

Presentación	7
1. Introducción	9
2. Principios fundamentales del análisis de suelos	11
2.1. Sistemas de interpretación del análisis de suelos	11
2.1.1. Índice de saturación de bases catiónicas	11
2.1.2. Sistema de suficiencia de nutrientes	14
2.1.3. El pH del suelo: modulador de la solubilidad de nutrientes	21
2.2. Análisis geoestadístico de las propiedades del suelo	22
3. Muestreo y análisis de suelos en la EEA Canaán	25
3.1. Ubicación de la EEA Canaán	25
3.2. Muestreo estratificado del suelo	26
3.2.1. Determinación de los puntos de muestreo	27
3.2.2. Muestreo de suelos en los puntos identificados	28
3.3. Análisis de suelos	29
3.4. Resultados de los análisis de suelos	30
3.5. Geoestadística: metodología para el mapeo de las propiedades del suelo	31
3.6. Análisis de autocorrelación espacial: cómputo del índice de Moran	32
3.7. Interpolación <i>kriging</i> y validación cruzada con indicadores geoestadísticos	32
3.7.1. Generación y ajuste del variograma	32
3.7.2. Interpolación <i>kriging</i>	33
3.7.3. Validación cruzada	33
3.8. Mapeo digital de las propiedades del suelo	35
4. Recomendaciones de manejo de la fertilidad del suelo en la EEA Canaán	47
4.1. Índice de saturación de bases catiónicas	47
4.1.1. Recomendación de yeso agrícola en zonas con bajos niveles de saturación de Ca^{2+} intercambiable	47
4.1.2. Niveles superiores de K^+ intercambiable	49
4.1.3. Fertilización de corrección para incrementar el Mg^{2+} intercambiable deficiente	50
4.2. Niveles de suficiencia de nutrientes disponibles	51
4.2.1. Diagnóstico de P-Olsen y requerimiento de fertilización de construcción	51
4.3. El pH del suelo	53
5. Referencias bibliográficas	55



Presentación

El Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA) es un organismo técnico especializado adscrito al Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego (MIDAGRI), que desarrolla actividades de investigación, transferencia tecnológica, aprovechamiento y conservación de los recursos genéticos y producción de semillas, plántones y reproductores de alto valor genético.

El INIA, a través de la Dirección de Servicios Estratégicos Agrarios (DSEA), viene ejecutando el proyecto de inversión “Mejoramiento de los servicios de investigación y transferencia tecnológica en el manejo y recuperación de suelos agrícolas degradados y aguas para riego en la pequeña y mediana agricultura en los departamentos de Lima, Áncash, San Martín, Cajamarca, Lambayeque, Junín, Ayacucho, Arequipa, Puno y Ucayali”, con CUI N° 2487112, el cual tiene entre sus objetivos evaluar alternativas tecnológicas para el manejo de suelos y agua en la producción agrícola.

La Estación Experimental Agraria (EEA) Canaán, ubicada en Ayacucho, ofrece un espacio representativo para analizar las propiedades del suelo en una zona con características ambientales complejas. Los resultados obtenidos de los análisis de suelos en esta estación permiten una mejor comprensión de la variabilidad espacial de la fertilidad del suelo en la región.

El presente documento, “Variación espacial de la fertilidad del suelo en la EEA Canaán”, integra el muestreo, análisis e interpretación de la distribución espacial de las propiedades del suelo. Asimismo, explica de forma clara la metodología de análisis geoespacial, la cual puede ser replicada en otros sistemas agrícolas. También, proporciona un diagnóstico riguroso del edafosistema en el área de estudio, para facilitar la toma de decisiones en la gestión agrícola sostenible. Esta publicación está dirigida a profesionales del sector agrario e investigadores interesados en mejorar la salud del suelo.

M. Sc. Jorge Juan Ganoza Roncal

Presidente Ejecutivo

Instituto Nacional de Innovación Agraria

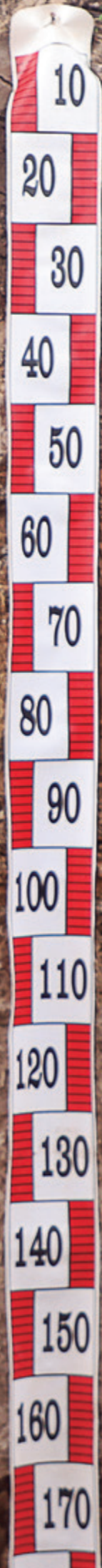


1. Introducción

La degradación del suelo en la región tropical es una de las mayores amenazas para la sostenibilidad de las actividades agrícolas y la producción de alimentos. En particular, en la región andina, este fenómeno se ve intensificado por actividades inadecuadas como el sobrepastoreo y otras prácticas agrícolas inadecuadas (de Valença, 2017) y la intensificación del cambio climático (Coaguila et al., 2025; Correa et al., 2016). Además, la alta variabilidad espacial de la fertilidad del suelo y el mal manejo del recurso edáfico afectan negativamente el uso eficiente de fertilizantes, generando impactos negativos por sobredosisificación (Quispe et al., 2024). Por ello, el monitoreo de la fertilidad del suelo es una actividad indispensable para la planificación y gestión sostenible de la producción de cultivos y la corrección oportuna de las deficiencias o excedentes en los parámetros edáficos.

En este contexto, la falta de herramientas técnicas, que permitan la interpretación espacial precisa de las propiedades fisicoquímicas del suelo, limita la toma de decisiones en el manejo de la fertilización de los cultivos. Ante esta situación, se tiene a disposición herramientas modernas como la interpolación *Kriging*, el índice de Moran y el análisis de variogramas. Estas técnicas son clave para diseñar estrategias de fertilización diferenciadas por zonas, lo cual permite mejorar la eficiencia del uso de insumos y conservar la salud del suelo a largo plazo (Culman et al., 2021; Chinea-Horta y Rodríguez-Izquierdo, 2021).

El presente documento tiene como objetivo integrar la interpretación y el análisis geoestadístico de las propiedades físico-químicas del suelo en la EEA Canaán, así como presentar mapas de variabilidad espacial que orienten la aplicación de enmiendas y fertilizantes para corregir desequilibrios nutricionales y promover la mejora de la fertilidad química del suelo.



2. Principios fundamentales del análisis de suelos

2.1. Sistemas de interpretación del análisis de suelos

El proceso de recomendación de fertilizantes mediante análisis químico de suelos implica varios pasos discretos, pero en cierta medida interrelacionados. Estos pasos incluyen: el muestreo de suelos, el análisis químico, la interpretación de los resultados analíticos y el desarrollo de recomendaciones. Si bien las metodologías y los procedimientos utilizados para realizar cada uno de estos pasos pueden afectar la naturaleza de la recomendación final, parece que las amplias discrepancias en las recomendaciones de fertilizantes desarrolladas por diferentes laboratorios que operan en una región se deben, en la mayoría de los casos, a diferentes técnicas de interpretación.

2.1.1. Índice de saturación de bases catiónicas

a. Concepto

El índice de saturación de bases catiónicas (BCSR, por sus siglas en inglés) es un enfoque ampliamente estudiado en la ciencia del suelo para evaluar la fertilidad edáfica en función del equilibrio relativo de cationes básicos intercambiables en la Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) del suelo (Culman et al., 2021). Esta teoría, inicialmente propuesta por William Albrecht y posteriormente desarrollada en sistemas agronómicos modernos, postula que existen proporciones óptimas entre calcio (Ca^{2+}), magnesio (Mg^{2+}), potasio (K^+) y, en algunos casos, sodio (Na^+), que maximizan el crecimiento y rendimiento de los cultivos (Yang et al., 2024). También se ha estudiado las variaciones entre las proporciones óptimas en función de la mineralogía del suelo y los requerimientos de los cultivos (Kopittke y Menzies, 2007). Sin embargo, estudios recientes han cuestionado la universalidad del BCSR, señalando que los sistemas basados en suficiencia de nutrientes (SLAN) pueden ser más relevantes en ciertos contextos edáficos (Brock et al., 2021). En este sentido, esta sección examina la aplicabilidad del BCSR en los suelos de la EEA Canaán del INIA.

b. Origen y aplicabilidad del concepto

El concepto de índice de saturación de bases catiónicas (BCSR) tuvo su origen en las investigaciones de William Albrecht en la década de 1930, quien estudió la relación entre la proporción de cationes básicos intercambiables en la capacidad de intercambio catiónico (CIC) del suelo y la productividad de los cultivos (Culman et al., 2021). Albrecht, basado en estudios realizados en suelos agrícolas de Misuri, propuso que un balance adecuado entre calcio (Ca^{2+}), magnesio (Mg^{2+}) y potasio (K^+) mejora la estructura del suelo, la disponibilidad de nutrientes y el desarrollo radicular de las plantas (Chaganti y Culman, 2017). Su hipótesis argumenta que una desviación de los valores óptimos de las proporciones catiónicas en la solución del suelo, limita la absorción de nutrientes y afecta la salud de los cultivos, debido a que un desequilibrio entre los iones en solución afecta los mecanismos que regulan la reactividad y disponibilidad de los nutrientes del suelo. Estos mecanismos reguladores del equilibrio iónico se ilustran en la Figura 1. Se considera que sólo una pequeña fracción de los nutrientes que requieren las plantas se encuentran en la solución suelo o en alguna forma reactiva. Además, este esquema sostiene que cada mecanismo es un reservorio iónico.

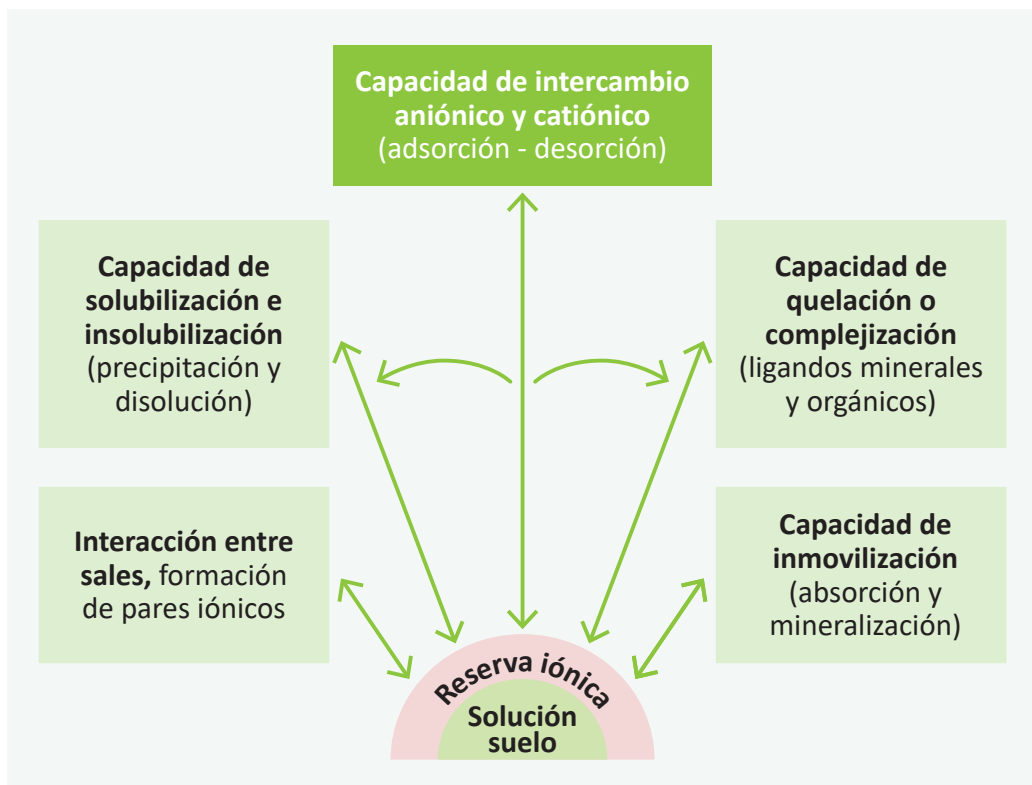


Figura 1. Mecanismos que mantienen en equilibrio los iones en la solución suelo (adaptado de McLean, 1977)

Bear et al. (1945), con base en estudios en suelos agrícolas de Nueva Jersey, proporcionaron evidencia empírica que respaldó parcialmente la hipótesis de Albrecht. Según las investigaciones clásicas de Bear et al. (1945) y posteriormente sustentadas por Halstead et al. (1958) y Graham (1959), la saturación óptima en suelos con alta CIC, debería distribuirse aproximadamente en 65-75 % de Ca^{2+} , 10-15 % de Mg^{2+} , 3-7 % de K^+ y menos del 5 % de Na^+ , mientras que el hidrógeno (H^+) y el aluminio (Al^{3+}) deberían mantener niveles suficientemente bajos, menores a 15 %, para evitar su toxicidad en suelos ácidos. A partir de estos hallazgos, se promovió el BCSR como un criterio para la formulación de programas de fertilización y enmiendas de suelos (Zhang, 1999).

En décadas recientes, diferentes investigaciones han comparado la efectividad del BCSR con el Sistema de Suficiencia de Nutrientes (SLAN), evidenciando que en muchos casos la disponibilidad absoluta de nutrientes es un mejor predictor del rendimiento de los cultivos que la proporción relativa de cationes (Brock et al., 2021). Sin embargo, en suelos con alta CIC ($> 8 \text{ cmol kg}^{-1}$), bajos contenidos de carbonatos, altos niveles de lixiviación o desbalances extremos de bases, el BCSR sigue siendo una herramienta útil para el diagnóstico de fertilidad y la corrección de desequilibrios iónicos.

El pH del suelo es una de las variables más importantes, que complementan la toma de decisiones en las prácticas agronómicas, para corregir desbalances iónicos. Este parámetro determina si es necesaria la aplicación de cal o yeso agrícola, para corregir desbalances iónicos por exceso de Al^{3+} y Na^+ , respectivamente. Ambos insumos presentan alto contenido de calcio (Ca), y son las principales para aumentar los porcentajes de saturación de Ca^{2+} y disminuir los de Mg^{2+} , Na^+ y Al^{3+} . La cal y el yeso tienen posibles impactos positivos y negativos en las propiedades del suelo y la producción vegetal, debido a tres mecanismos principales: aumento del pH, aumento de la saturación de Ca^{2+} o aumento de los niveles de azufre (S). El criterio de uso y las respuestas en el suelo se muestran en Figura 2.

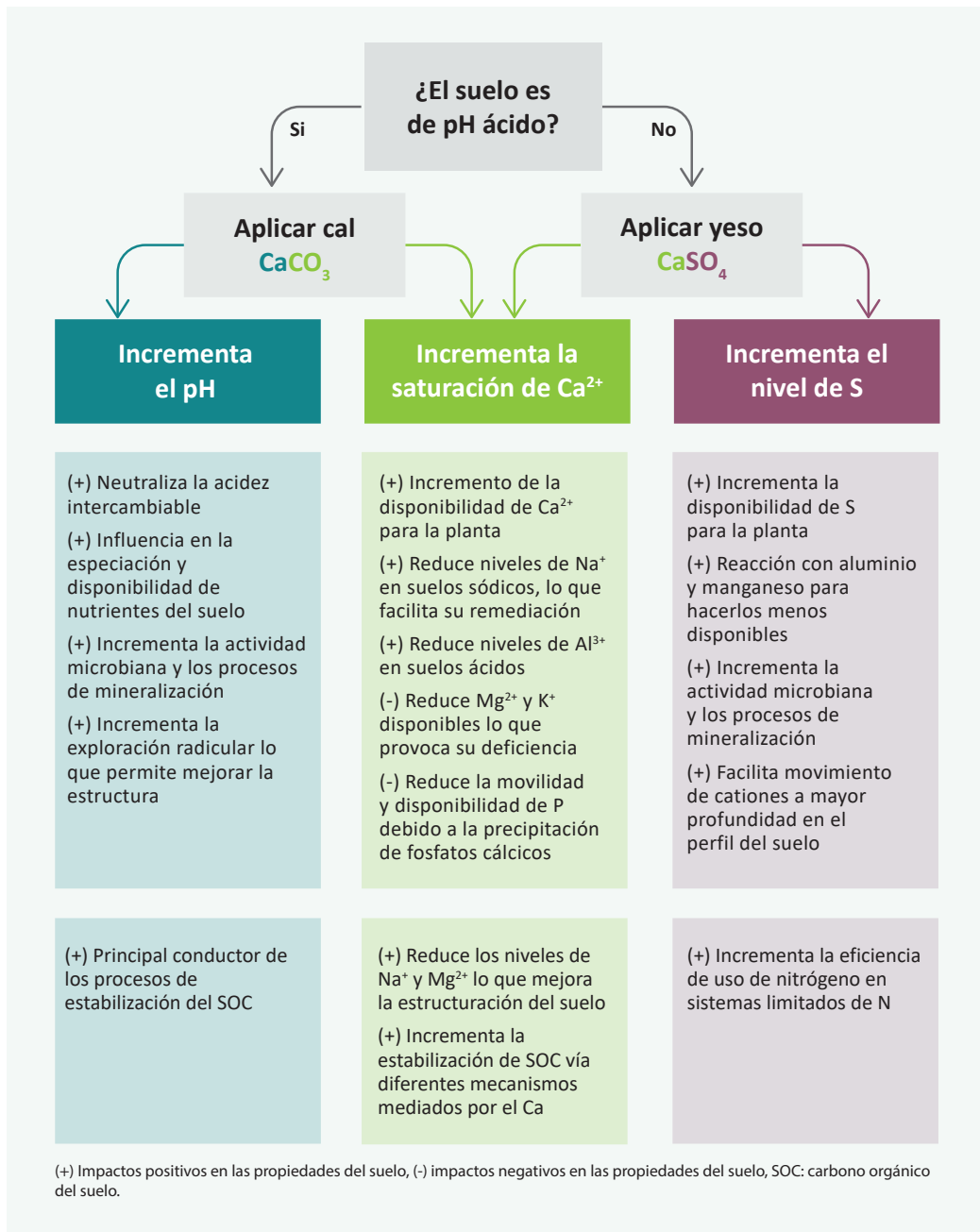


Figura 2. Criterios para el uso de la cal y el yeso, y su respuesta en la relación de saturación de cationes básicos (adaptado de Culman et al., 2021)

2.1.2. Sistema de suficiencia de nutrientes

a. Concepto

El concepto de sistema de suficiencia de nutrientes (SLAN, por sus siglas en inglés) se basa en una expresión matemática general de la ley de rendimientos decrecientes, según la cual el aumento del rendimiento de un cultivo por unidad de nutriente disponible disminuye a medida que el nivel de nutriente disponible se acerca al nivel de suficiencia o umbral crítico (McLean, 1977). Esta teoría, aunque presenta sustento científico, también ha sido criticada debido a que no contempla la interacción entre nutrientes y los problemas estructurales del suelo. Sin embargo, es una herramienta fundamental para la interpretación de análisis de suelos. Para su aplicación práctica, el diagnóstico de la fertilidad mediante el SLAN requiere de tres etapas: la correlación, calibración y la interpretación de los análisis de suelos, que se describen en la Figura 3.

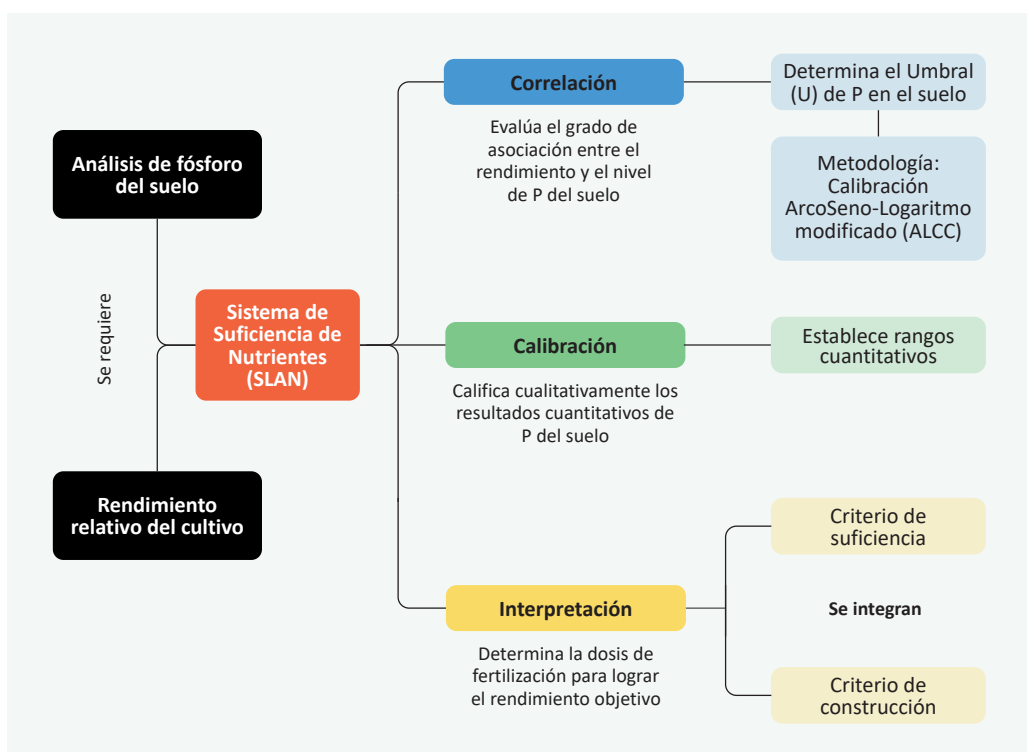


Figura 3. Esquema modelo para la implementación del sistema de suficiencia de nutrientes para el fósforo del suelo

Para los cálculos de la interpretación de resultados de los análisis de suelos, se puede hacer uso de 3 criterios: criterio de suficiencia, mantenimiento y construcción. La selección del criterio adecuado depende del nivel de contenido del nutriente disponible en el suelo (alto, medio-bajo, o muy bajo), ya que este define el objetivo agronómico y el enfoque de fertilización (Marino y Echeverría, 2018).

Además, este procedimiento requiere previamente de la determinación de la eficiencia de remoción de nutrientes, necesario para obtener una tonelada de producción. Así como, la estimación de la dosis requerida para incrementar 1 mg del nutriente por 1 kg de suelo, esto con el objetivo de establecer dosis de fertilización que integren los criterios de suficiencia y construcción.

b. Aplicación del criterio de suficiencia

El criterio de suficiencia se aplica cuando el análisis de suelos indica un contenido alto de nutrientes, cercano al umbral crítico; su uso considera únicamente la reposición del nutriente extraído por el cultivo, dado que se encuentra en forma fácilmente disponible (García y Ciampitti, 2010).

Este criterio usa la relación entre el rendimiento relativo (RR), el cual es calculado mediante la fórmula 1, y el nivel de macro y micronutrientes disponibles en el suelo, para fertilizar sólo las necesidades nutricionales del cultivo en condiciones de niveles altos del nutriente en el suelo. El sustento teórico se basa en la Ley del mínimo de Liebig, que indica que el crecimiento de un cultivo está limitado por el nutriente presente en menor cantidad relativa, por debajo del umbral crítico en el suelo (Bray, 1958). Este criterio, considera la eficiencia agronómica del nutriente, es decir, busca maximizar el rendimiento económico de la fertilización.

$$RR = \left(\frac{\text{Rendimiento alcanzado}}{\text{Rendimiento potencial}} \right) \times 100 \quad \dots(1)$$

A continuación, se presenta un ejemplo práctico para determinar el requerimiento de fósforo (P) necesario para alcanzar un rendimiento objetivo en el cultivo de palto, considerando un suelo con alto contenido de este nutriente.

Ejemplo práctico:

Se realizó un análisis de suelos en un cultivo de palto, y se obtuvo 15 mg de P por kg de suelo utilizando el método de Olsen (P-Olsen).

Para este cultivo, el umbral crítico o nivel de suficiencia es de 20 mg de P-Olsen por kg de suelo y el rendimiento potencial es de 30 t ha⁻¹. El análisis de correlación y calibración indica que el nivel obtenido de 15 mg de P-Bray por kg de suelo permite obtener un rendimiento relativo (RR) del 70 %.

Primer paso: calcular el rendimiento alcanzado con 15 mg de P-Olsen por kg de suelo utilizando la fórmula 2.

$$\text{Rendimiento alcanzado} = \frac{RR \times \text{Rendimiento potencial}}{100} \quad \dots(2)$$

$$\text{Rendimiento alcanzado} = \frac{70 \times 30 \text{ t ha}^{-1}}{100} = 21 \text{ t ha}^{-1}$$

Este resultado indica que el nivel actual de P (15 mg kg⁻¹) está por debajo del umbral crítico (20 mg kg⁻¹), lo que limita el rendimiento a solo el 70 % del potencial, 21 t ha⁻¹ en lugar de 30 t ha⁻¹.

Segundo paso: hallar el incremento de raíces y brotes utilizando la fórmula 3. Para este cálculo y con fines prácticos considera que este incremento es el 35 % del rendimiento alcanzado.

$$\text{Incremento de raíces y brotes} = 0.35 \times \text{Rendimiento alcanzado} \quad \dots(3)$$

$$\text{Incremento de raíces y brotes} = 0.35 \times 21 \text{ t ha}^{-1} = 7.35 \text{ t ha}^{-1}$$

Además de los 21 t ha⁻¹ de producción, el cultivo genera 7.35 t ha⁻¹ de biomasa en raíces y brotes, lo que debe considerarse en el balance nutricional.

Tercer paso: determinar el rendimiento objetivo, añadiendo el incremento de raíces y brotes al rendimiento alcanzado, como se señala en la fórmula 4:

$$\text{Rendimiento objetivo} = \text{Incremento de raíces y brotes} + \text{Rendimiento alcanzado} \quad \dots(4)$$

$$\text{Rendimiento objetivo} = 7.35 \text{ t ha}^{-1} + 21 = 28.35 \text{ t ha}^{-1}$$

Cuarto paso: calcular el requerimiento de P utilizando la fórmula 5. Para este cálculo y con fines prácticos se considera una extracción de 1.06 kg de fósforo por tonelada de producción.

$$\text{Requerimiento de P} = \text{Extracción de P} \times \text{Rendimiento objetivo} \quad \dots(5)$$

$$\text{Requerimiento de P} = 1.06 \text{ kg de P t}^{-1} \times 28.35 \text{ t ha}^{-1} = 30.05 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

A partir de estos resultados, se interpreta que el criterio de suficiencia estima un requerimiento de 30.05 kg de P para alcanzar un rendimiento objetivo de 28.35 t ha⁻¹, el cual está conformado por 7.35 t ha⁻¹ de raíces, y 21 t ha⁻¹ de producción.

c. Aplicación de los criterios de construcción y mantenimiento

El criterio de mantenimiento se aplica cuando el análisis de suelos indica un contenido medio-bajo de nutrientes. Además de tener el objetivo de reponer o mantener la cantidad de nutriente extraído por el cultivo, se realiza el ajuste por eficiencia de su uso, para compensar las pérdidas por fijación y adsorción (Buresh et al., 1997).

Con respecto al criterio de mantenimiento y construcción, se aplica cuando el nutriente se encuentra en niveles muy bajos en el suelo. El objetivo no es sólo cubrir la extracción de nutriente por el cultivo y ajustar según su eficiencia, sino también incrementar o construir progresivamente el nivel del nutriente en el suelo hasta alcanzar valores cercanos al nivel crítico, asegurando así una fertilidad sostenida en el tiempo. Alternativamente, el criterio de construcción se puede aplicar para complementar los requerimientos de nutrientes estimados para la fertilización de suficiencia y mantenimiento (García y Ciampitti, 2010).

Los criterios de mantenimiento y construcción integran conceptos modernos de mejora de la fertilidad del suelo a largo plazo. Este enfoque integrado busca incrementar progresivamente la concentración de nutrientes en el suelo mediante aplicaciones superiores a las necesidades del cultivo, hasta alcanzar un umbral óptimo determinado mediante estudios de calibración de respuesta agronómica (Marino y Echeverría, 2018). Esto es particularmente relevante en suelos con niveles medios y bajos de nutrientes disponibles o con alta capacidad de adsorción, donde la saturación gradual de los sitios de intercambio permite reducir la fijación de elementos esenciales como el fósforo (P) y el potasio (K), y así mejorar su disponibilidad en ciclos de producción posteriores (Barber, 1995; Havlin et al., 2016).

La selección del criterio adecuado depende de factores como la mineralogía del suelo, la capacidad de intercambio catiónico (CIC), la dinámica de adsorción-desorción, la eficiencia de uso de los fertilizantes, y la respuesta en el cultivo; siendo el criterio de construcción el más apropiado en sistemas de suelos empobrecidos (Havlin et al., 2016). En términos aplicativos, su uso se basa en la estimación de la demanda del suelo para incrementar el nivel del nutriente a largo plazo.

A continuación, se presentarán ejemplos prácticos con el cultivo de palto para la aplicación del criterio de mantenimiento, y criterio de mantenimiento y construcción.

Ejemplo práctico (criterio de mantenimiento)

Se realizó un análisis de suelos en un cultivo de palto, y se obtuvo 10 mg de P-Olsen por kg de suelo utilizando el método de Olsen (P-Olsen), el cual se considera un nivel medio.

Para este cultivo, el umbral crítico o nivel de suficiencia es de 20 mg de P-Olsen por kg de suelo y el rendimiento potencial es de 30 t ha⁻¹. El análisis de correlación y calibración indica que el nivel obtenido de 10 mg de P-Olsen por kg de suelo permite obtener un rendimiento relativo (RR) del 40%.

Primer paso: calcular el rendimiento alcanzado con 10 mg de P-Olsen por kg de suelo, utilizando la fórmula 2.

$$\text{Rendimiento alcanzado} = \frac{40 \times 30 \text{ t ha}^{-1}}{100} = 12 \text{ t ha}^{-1}$$

Segundo paso: hallar el incremento de raíces y brotes utilizando la fórmula 3. Para este cálculo y con fines prácticos se considera que este incremento es el 35 % del rendimiento alcanzado.

$$\text{Incremento de raíces y brotes} = 0.35 \times 12 \text{ t ha}^{-1} = 4.2 \text{ t ha}^{-1}$$

Tercero paso: determinar el rendimiento objetivo, añadiendo el incremento de raíces y brotes al rendimiento alcanzado, como se señala en la fórmula 4.

$$\text{Rendimiento objetivo} = 4.2 \text{ t ha}^{-1} + 12 \text{ t ha}^{-1} = 16.2 \text{ t ha}^{-1}$$

Cuarto paso: calcular el requerimiento de P utilizando la fórmula 5. Para este cálculo y con fines prácticos se considera una extracción de 1.06 kg de fósforo por tonelada de producción.

$$\text{Requerimiento de P} = 1.06 \text{ kg de P t}^{-1} \times 16.2 \text{ t ha}^{-1} = 17.17 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

Quinto paso: finalmente, determinar el requerimiento de mantenimiento (RM), haciendo uso de la fórmula 6. El RM integra el requerimiento de P, con el concepto de eficiencia de uso del nutriente en el sistema (la fracción del nutriente que realmente está disponible para el cultivo) y posibles pérdidas (por inmovilización, fijación, erosión o volatilización). Para este caso práctico, se considera una eficiencia de uso de P del 30 %.

$$\text{RM de P} = \frac{\text{Requerimiento de P}}{\text{Eficiencia de Uso del P}} \dots (6)$$

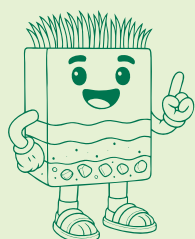
$$\text{RM de P} = \frac{17.17 \text{ kg de P ha}^{-1}}{0.3} = 57.2 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

De esta manera, el requerimiento de mantenimiento de fósforo en el cultivo de palto es 57.2 kg por hectárea.

Ejemplo práctico (criterio de mantenimiento y construcción)

Se realizó un análisis de suelos en un cultivo de palto, y se obtuvo 5 mg de P-Olsen por kg de suelo utilizando el método de Olsen (P-Olsen), el cual se considera un nivel muy bajo.

Para este cultivo, el umbral crítico o nivel de suficiencia es de 20 mg de P-Olsen por kg de suelo y el rendimiento potencial es de 30 t ha⁻¹. El análisis de correlación y calibración indica que el nivel obtenido de 5 mg de P-Olsen por kg de suelo permite obtener un rendimiento relativo (RR) del 20 %.



Nota:

El criterio de construcción es un enfoque que propone la fertilización para incrementar los niveles de reserva del suelo, por lo que es factible integrarlo como complemento para un plan de suficiencia o mantenimiento de la fertilidad de los suelos. Sin embargo, cuando los niveles de disponibilidad del nutriente en el suelo son muy bajos, es fundamental aplicarlo.

Primer paso: calcular el rendimiento con 5 mg de P-Olsen por kg de suelo, utilizando la fórmula 2.

$$\text{Rendimiento alcanzado} = \frac{20 \times 30 \text{ t ha}^{-1}}{100} = 6 \text{ t ha}^{-1}$$

Segundo paso: hallar el incremento de raíces y brotes utilizando la fórmula 3. Para este cálculo y con fines prácticos considera que este incremento es el 35 % del rendimiento alcanzado.

$$\text{Incremento de raíces y brotes} = 0.35 \times 6 \text{ t ha}^{-1} = 2.1 \text{ t ha}^{-1}$$

Tercer paso: determinar el rendimiento objetivo, añadiendo el incremento de raíces y brotes al rendimiento alcanzado, como se señala en la fórmula 4.

$$\text{Rendimiento objetivo} = 2.1 \text{ t ha}^{-1} + 6 \text{ t ha}^{-1} = 8.1 \text{ t ha}^{-1}$$

Cuarto paso: calcular el requerimiento de P utilizando la fórmula 5. Para este cálculo y con fines prácticos se considera una extracción de 1.06 kg de fósforo por tonelada de producción.

$$\text{Requerimiento de P} = 1.06 \text{ kg de P t}^{-1} \times 8.1 \text{ t ha}^{-1} = 8.58 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

Quinto paso: determinar el requerimiento de mantenimiento (RM), haciendo uso de la fórmula 6. El RM integra el requerimiento de P, con el concepto de eficiencia de uso del nutriente en el sistema (la fracción del nutriente que realmente está disponible para el cultivo) y posibles pérdidas (por inmovilización, fijación, erosión o volatilización). Para este caso práctico, se considera una eficiencia de uso de P del 20 %.

$$\text{RM de P} = \frac{8.58 \text{ kg de P ha}^{-1}}{0.2} = 42.9 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

Sexto paso: calcular el requerimiento de construcción anual (RC) usando la fórmula 7. Para este cálculo y con fines prácticos se considera que es necesario fertilizar con 9 kg de P por hectárea para incrementar 1 mg de P por kg del suelo, a lo cual se le denomina necesidad de construcción de fertilidad (NCF), y que el incremento anual requerido (IAR) en este ejemplo es de 1.5 mg de P por kg de suelo.

$$\text{RC} = \text{IAR} \times \text{NCF} \quad \dots(7)$$

$$\text{RC} = 1.5 \text{ mg de P kg}^{-1} \times \frac{9 \text{ kg de P ha}^{-1}}{1 \text{ mg de P kg}^{-1}} = 13.5 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

Entonces, el plan de fertilización para el primer año se estima mediante la fórmula 8.

$$\text{Dosis de fertilización} = \text{RM} + \text{RC} \quad \dots(8)$$

$$\text{Dosis de fertilización de P} = 42.9 \text{ kg de P ha}^{-1} + 13.5 \text{ kg de P ha}^{-1} = 56.4 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

De esta manera, el requerimiento de mantenimiento y construcción de fósforo en el cultivo de palto es 56.4 kg por hectárea.

2.1.3. El pH del suelo: modulador de la solubilidad de nutrientes

La medición del pH en suelos tiene su origen en la química ácido-base de Arrhenius y Bronsted-Lowry, y se define como el logaritmo negativo en base 10 de la actividad de los iones hidrógeno (H^+) en una solución acuosa (Atkins et al., 2023). Sus aplicaciones en estudios de fertilidad inician en las primeras décadas del siglo XX, con estudios pioneros que demostraron la relación entre el pH del suelo y la solubilidad de los nutrientes esenciales (Pierre y Banwart, 1973). Actualmente, se considera que el pH del suelo controla las comunidades microbianas y la actividad enzimática de la solución suelo, además de modular los mecanismos de estabilización de carbono del suelo (Wang y Kuzyakov, 2024). Por estos motivos, es considerada una variable maestra dentro del análisis debido a que afecta una amplia gama de propiedades y procesos del suelo. En la Figura 4 se presentan un modelo gráfico de diagnóstico de la fertilidad del suelo en condiciones de pH ácidos según Hartemink y Barrow (2023), Wang y Kuzyakov (2024), Alam et al. (1999).

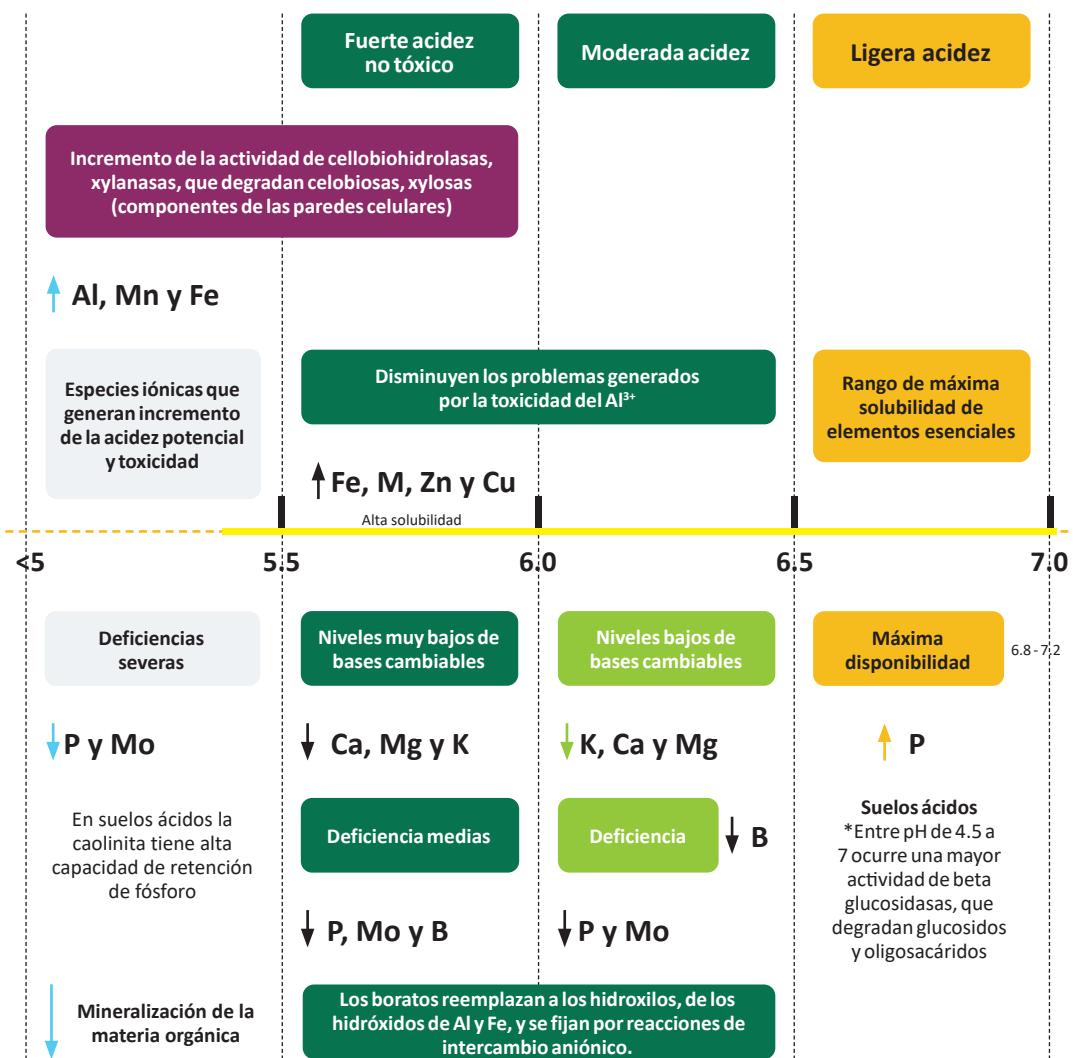


Figura 4. Diagnóstico de la fertilidad del suelo

2.2. Análisis geoestadístico de las propiedades del suelo

La geoestadística se introdujo en la ciencia del suelo en la década de los 80 como una alternativa a la clasificación taxonómica de suelos (Garbanzo-León et al., 2017). El análisis geoestadístico de las propiedades del suelo es una herramienta útil para evaluar y predecir la variabilidad espacial de las propiedades como pH, textura, densidad aparente y nutrientes (Niebla-Torres et al., 2021). Mediante técnicas de interpolación como el método *Kriging* con ajuste de modelos de semivariograma de tipo empíricos (lineal, esférico, circular y gaussiano), se pueden crear mapas que reflejan la distribución espacial de estas propiedades, lo que es crucial para la agricultura, el manejo sostenible del suelo y la aplicación de fertilizantes (Chinea-Horta y Rodríguez-Izquierdo, 2021).

La aplicación de modelos geoestadísticos, combinados con Sistemas de Información Geográfica (SIG), permite predecir las propiedades del suelo en áreas no muestreadas, lo que es especialmente útil en regiones con datos limitados (Moral-García, 2004). Además, la geoestadística ayuda a comprender las interrelaciones entre variables químicas y físicas del suelo, como la influencia del tamaño de partículas y la porosidad en la variabilidad espacial (Álvarez-Herrera et al., 2021). Esto contribuye significativamente a la optimización de prácticas agrícolas y al mantenimiento de la salud del suelo a largo plazo.





3. Muestreo y análisis de suelos en la EEA Canaán

3.1. Ubicación de la EEA Canaán

La EEA Canaán presenta suelos de tipo Leptosol Eútrico-Kastanozem háplico-afloramiento lítico. Estos se han desarrollado a partir de rocas sedimentarias (calizas y lutitas) y rocas volcánicas (Instituto Nacional de Recursos Naturales [INRENA], 1996). Cuenta con tres Centros experimentales, con una extensión total de 58.81 ha, siendo los cultivos priorizados la quinua, trigo, tuna, kiwicha y maíz. En la estación se realiza investigación, valoración, conservación, producción de material genético de plantas y animales, además de brindar asistencia técnica y otros servicios para los agricultores de la región Ayacucho. La EEA se encuentra en el distrito de Andrés Avelino Cáceres Dorregaray, provincia de Huamanga, departamento de Ayacucho (Figura 5), en la región quechua a 2 736 m s. n. m. con precipitaciones anuales de hasta 500 mm y temperaturas medias anuales que varían entre los 12 a 18 °C (Cruz-Luis et al., 2025).

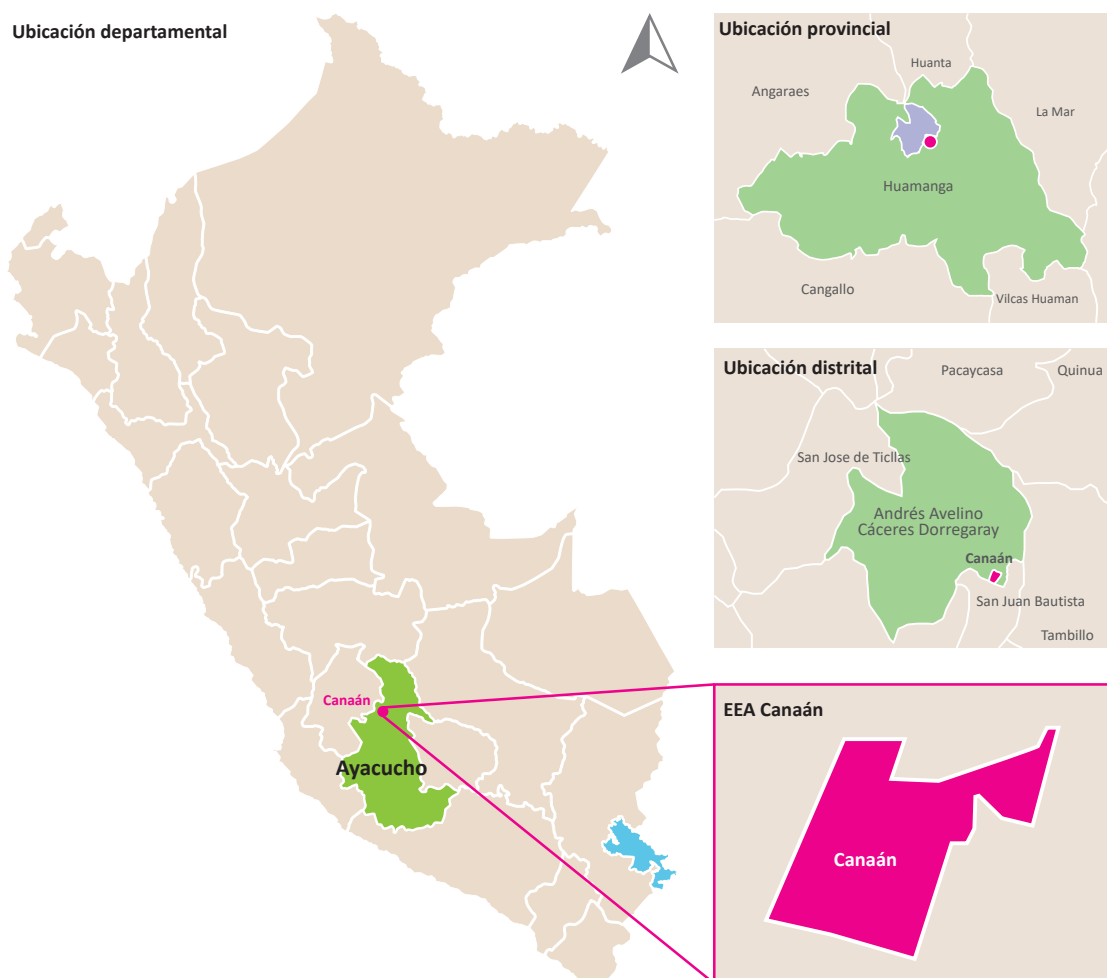


Figura 5. Ubicación de la EEA Canaán

3.2. Muestreo estratificado del suelo

Con el objetivo de obtener una representación espacial adecuada de las condiciones edáficas en la EEA Canaán, se aplicó un diseño de muestreo estratificado basado en unidades de cobertura identificadas mediante análisis de imágenes satelitales. Este enfoque metodológico permite reducir la varianza intraestrato y optimizar la representatividad de las muestras en relación con la heterogeneidad espacial del área evaluada. La estratificación previa al muestreo garantiza una caracterización más precisa de las propiedades edáficas relevantes para el manejo del suelo, como parte de una estrategia integral de monitoreo de fertilidad. El proceso combinó técnicas de clasificación no supervisada y muestreo probabilístico espacial, utilizando herramientas de análisis geoespacial y estadística computacional. A continuación, se detallan los procedimientos aplicados para la determinación y colecta de los puntos de muestreo (Figura 6).

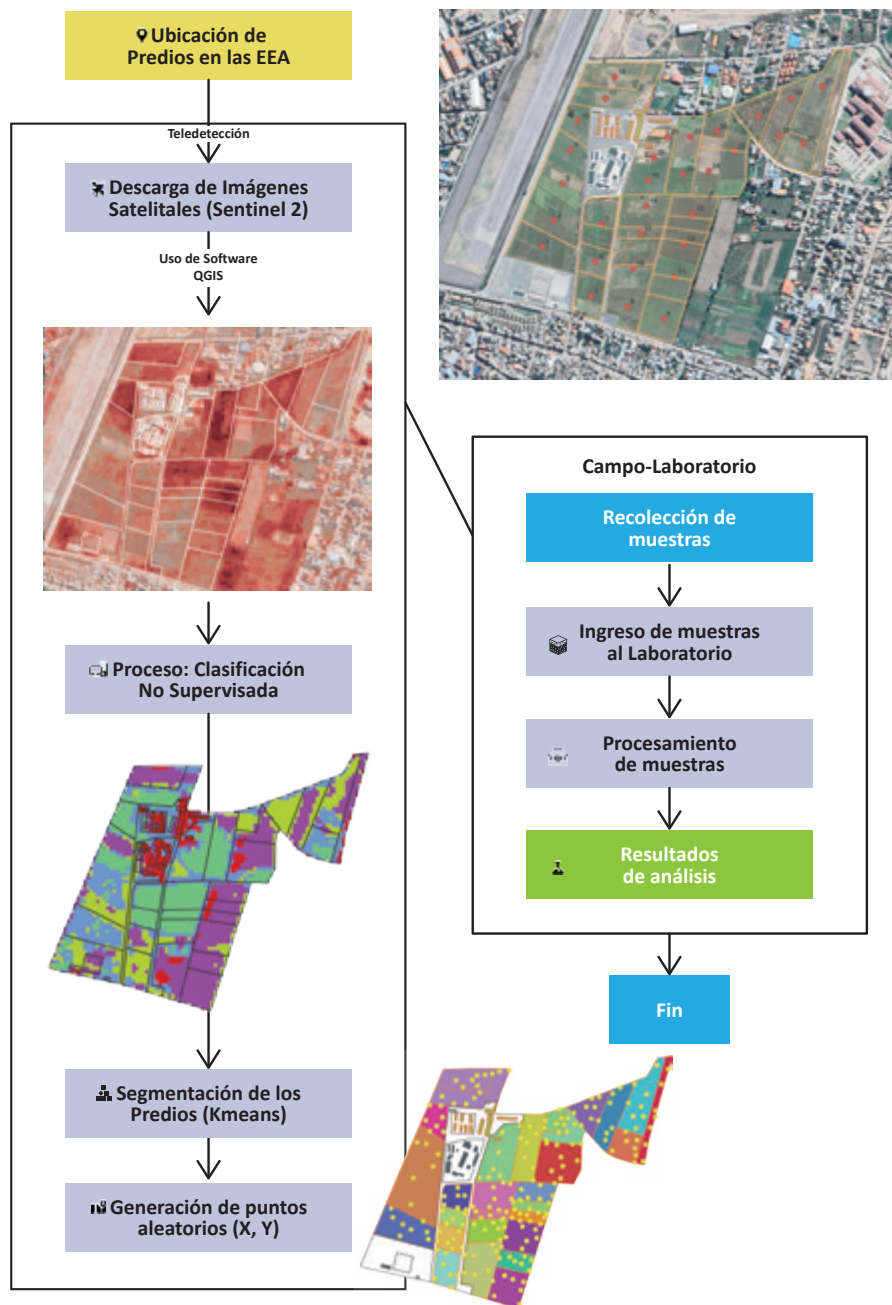


Figura 6. Flujo de trabajo seguido para la determinación de los puntos de muestreo

3.2.1. Determinación de los puntos de muestreo

El primer paso para la determinación de los puntos de muestreo fue la descarga de las imágenes satelitales del servidor de Sentinel 2 para identificar clases de cobertura, utilizando el algoritmo de clasificación no supervisada *K-means*. Luego, se usó el software R (R Core Team, 2018) para determinar los puntos de muestreo utilizando la función `spsample` del paquete `sp` (Pebesma y Bivand, 2005). El *script* R generó las coordenadas de los puntos de muestreo según cada clase determinada, mediante el método de muestreo estratificado (Figura 7). Se identificaron 31 puntos de muestreo de suelos.

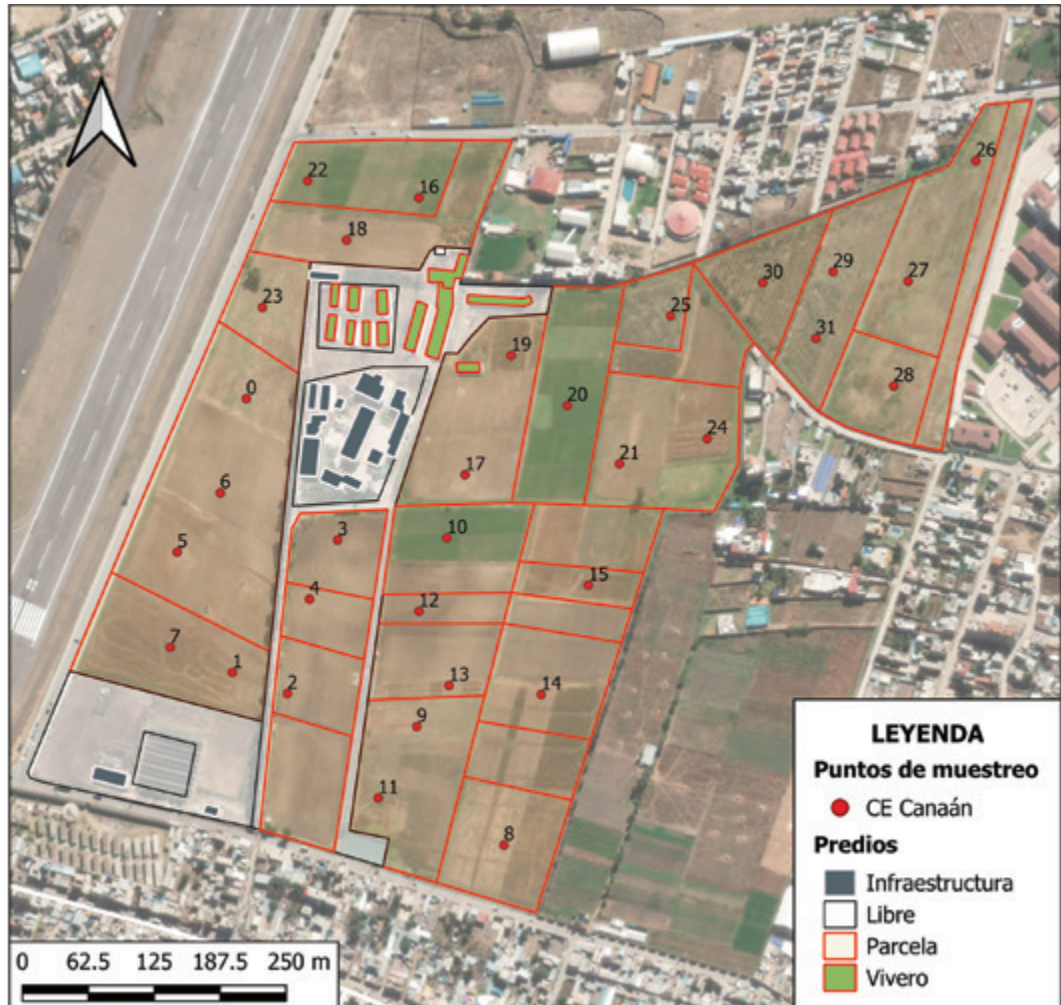


Figura 7. Puntos de muestreo de suelos en la EEA Canaán

3.2.2. Muestreo de suelos en los puntos identificados

Una vez identificadas las coordenadas de los 31 puntos de muestreo. Los pasos que se siguieron para la colecta de muestras fueron los siguientes (Figura 8):

- a. Retirar la hojarasca y vegetación de la superficie del suelo.
- b. Limpiar y desinfectar la superficie de la pala.
- c. Hacer un hoyo en forma de “V” de 30 cm de profundidad y área de 20 x 20 cm, aproximadamente.
- d. Tomar la muestra de la pared del hoyo. La “rebanada” debe tener de 2 a 3 cm de grosor y entre 20 a 40 cm de largo.
- e. Eliminar los residuos de los bordes de la pala para evitar contaminación.
- f. Depositar la muestra en un balde o contenedor.
- g. Desterronar la muestra y eliminar raíces, restos orgánicos u otros contaminantes.
- h. Tomar una porción aproximada de 1 kg en dos bolsas de plástico. Entre una y otra colocar la cartilla de identificación.



Figura 8. Proceso del muestreo de suelo. A) Limpieza y realización del hoyo, B) colecta del suelo, C) desterronamiento y eliminación de raicillas, y D) separación y etiquetado de la muestra

3.3. Análisis de suelos

Una vez obtenidas las muestras de suelos, estas deben ser enviadas a un laboratorio de análisis, preferentemente que utilice métodos acreditados. En el presente estudio, las muestras fueron remitidas al Laboratorio de Suelos, Aguas y Foliare de la EEA Canaán para su posterior procesamiento. El primer pretratamiento consistió en el secado de las muestras a una temperatura de 35 °C durante 48 horas. Finalizado este proceso, se procedió con los análisis correspondientes, según lo indicado en la Tabla 1.

Tabla 1. Parámetros determinados en las muestras colectadas y su metodología de análisis

Parámetro	Método de análisis	Referencia
Porcentaje de arena, limo y arcilla	Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000 Método de densímetro tipo Bouyoucos	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT, 2002)
pH (1:2.5)	Método 9045D de la Agencia de Protección Ambiental (EPA)	Environmental Protection Agency (EPA, 2004)
Conductividad eléctrica (CE) (1:5)	ISO 11265: determinación de la conductividad eléctrica específica del suelo.	International Organization of Standardization (ISO, 1994)
Carbonatos	Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000. Método del calcímetro.	SEMARNAT (2002)
Materia orgánica (MO)	Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000. Método de Walkley y Black.	SEMARNAT (2002)
N total	ISO 11261: Determinación de Nitrógeno Total por Kjeldahl Modificado.	ISO (1995)
P disponible	Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000. Método Olsen.	SEMARNAT (2002)
K disponible	Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000	SEMARNAT (2002)
Bases intercambiables	Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000. Extracción con acetato de amonio.	SEMARNAT (2002)

3.4. Resultados de los análisis de suelos

Los resultados se presentan en la Tabla 2, en donde se describen las estadísticas descriptivas de los resultados generales de las 31 muestras analizadas.

Tabla 2. Estadísticos descriptivos de los parámetros físicoquímicos del suelo analizados en la EEA Canaán

Variable	Unidad	Media	SD	Mediana	Mínimo	Máximo
Arena	%	47.27	5.53	48.56	32.56	56.56
Limo	%	22.78	3.52	22.36	14.36	30.00
Arcilla	%	29.95	6.25	29.08	19.44	45.44
Dap	g cm ⁻³	1.18	0.05	1.19	1.04	1.26
Hd _{cc}	%	31.11	2.65	31.96	25.53	34.71
Hd _{pmp}	%	19.02	1.96	19.65	14.89	21.68
pH	und	7.48	0.37	7.60	6.14	7.92
CE	dS m ⁻¹	1.14	0.37	1.00	0.50	2.30
MO	%	1.65	0.48	1.66	0.48	3.38
CaCO ₃	%	1.52	0.74	1.50	0.50	3.75
N total	%	0.08	0.02	0.08	0.02	0.17
P disponible	mg kg ⁻¹	22.93	10.63	22.28	4.98	45.22
K disponible	mg kg ⁻¹	575.70	110.45	612.04	290.89	822.02
Ca ²⁺	cmol kg ⁻¹	9.23	2.15	9.34	5.00	13.84
Mg ²⁺	cmol kg ⁻¹	2.42	3.57	1.07	0.48	15.71
K ⁺	cmol kg ⁻¹	0.68	0.24	0.76	0.22	0.99
Na ⁺	cmol kg ⁻¹	0.12	0.06	0.11	0.03	0.39
CIC	cmol kg ⁻¹	12.45	4.28	11.92	6.48	26.75

Dap: densidad aparente del suelo, Hd_{cc}: humedad volumétrica del suelo en capacidad de campo, Hd_{pmp}: humedad volumétrica del suelo en punto de marchitez permanente, CE: Conductividad eléctrica en extracto de saturación y MO: materia orgánica del suelo, CIC: capacidad de intercambio catiónico efectiva.

3.5. Geoestadística: metodología para el mapeo de las propiedades del suelo

Este protocolo está diseñado para ser aplicado en el análisis espacial de cualquier propiedad del suelo (materia orgánica, pH, textura, etc.), siempre que se cuente con datos georreferenciados confiables. Una muestra confiable se caracteriza por tener precisión geográfica, ser representativa del área de estudio, presentar calidad en las mediciones y la minimización de errores.

Requisitos previos para el mapeo:

- a. **Computador:** QGIS instalado (versión recomendada: 3.28 o superior).
- b. **Complemento:** *Smart-Map* instalado y configurado.
- c. **Base de datos:** *Shapefile* de los puntos de muestreo del suelo con información georreferenciada y valores de la variable a analizar.
- d. **Unidades y proyección:** las capas de entrada (puntos georreferenciados y contorno del área de estudio) deben estar en el sistema métrico *Universal Transversal Mercator* (UTM), cuyas unidades son los metros.

Procedimiento:

- a. **Preparación de los datos:** asegurar que los datos de entrada (formato CSV, Shapefile, u otro) contengan las coordenadas (X, Y) y los valores de la variable de interés (e. g. porcentaje de materia orgánica). Asimismo, verificar que no existan valores nulos o erróneos. Existe la opción de que el complemento detecte valores atípicos, los represente en una previsualización del ploteo de puntos y los elimine para el análisis. Esta herramienta es opcional.
- b. **Análisis exploratorio de datos:** realizar un análisis exploratorio de datos para obtener una visión general de las principales características del conjunto de datos. Así, se calcularon medidas de tendencia central, como la media y la mediana, y se evaluó la dispersión con la desviación estándar. Además, se usaron diagramas de caja para detectar patrones y detectar posibles valores atípicos.
- c. **Carga en QGIS:** importar los datos georreferenciados como una capa vectorial en QGIS y confirmar que la proyección de la capa sea coherente con la zona de estudio.

3.6. Análisis de autocorrelación espacial: cómputo del índice de Moran

Procedimiento:

- a. Abrir el complemento **Smart-Map**.
- b. Cargar la capa vectorial de los puntos georreferenciados.
- c. Seleccionar la variable a analizar.
- d. Delimitar los puntos de muestreo con el contorno del área de estudio.
- e. Definir el tamaño de celda del ráster de salida (por ejemplo, 5 m x 5 m, dependiendo de la resolución deseada).
- f. Generar el índice de Moran (fórmula 9) y el p-valor.

$$I = \sum_n \frac{1}{n} ij \quad \dots(9)$$

Donde:

$I > 0$: existe autocorrelación espacial positiva (valores similares tienden a estar juntos).

$I < 0$: existe autocorrelación espacial negativa (valores diferentes tienden a estar juntos).

$I = 0$: ausencia de autocorrelación (se da una distribución aleatoria).

Si el p-valor es menor a 0.05, se rechaza la hipótesis nula (H_0) y se concluye que hay evidencia de un patrón espacial significativo. Si el p-valor es mayor a 0.05, no se puede rechazar la H_0 , lo que sugiere que los datos no tienen autocorrelación espacial significativa.

Según el cálculo de estas medidas estadísticas, se procederá o no al cálculo del variograma experimental, ajuste de un modelo a dicho variograma, la interpolación *kriging* y su validación cruzada.

3.7. Interpolación *Kriging* y validación cruzada con indicadores geoestadísticos

3.7.1. Generación y ajuste del variograma

- a. Calcular el variograma experimental utilizando el complemento **Smart-Map**.
- b. Ajustar un modelo teórico (esférico, exponencial o gaussiano) al variograma.
- c. Ajustar los parámetros del modelo:
 - **Sill** (umbral): varianza de las diferencias máximas entre los puntos.
 - **Range** (alcance): distancia a partir de la cual no hay autocorrelación significativa.
 - **Nugget** (pepita): variabilidad no explicada (ruido o error de medición).
- d. Calcular la proporción **Still-Nugget** (PSV).

3.7.2. Interpolación *kriging*

- Configurar los parámetros de interpolación en **Smart-Map**.
- Seleccionar la variable y el modelo ajustado.
- Seleccionar el método de interpolación: **kriging ordinario**.
- Generar el mapa rasterizado.
- Exportar el mapa en formato **GeoTIFF** para su almacenamiento y análisis posterior.

3.7.3. Validación cruzada

Para realizar una validación cruzada de los resultados, se deberá hacer lo siguiente: en **Smart-Map** se debe activar la opción de validación cruzada o *cross validation*. El complemento evalúa el error mediante los siguientes métodos:

- Error cuadrático medio (RMSE)**. Mide la precisión del modelo, donde un valor alto puede significar que el modelo no representa adecuadamente la variabilidad espacial o que los datos contienen errores o son insuficientes (fórmula 10).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [z_1(x_i) - z_2(x_i)]^2} \quad \dots(10)$$

Donde:

n: el número de muestras.

$Z_1(X_i)$: valores predichos en el sitio i.

$Z_2(X_i)$: valores observados en el sitio i.

- Coefficiente de determinación (R^2)**. Mide qué tan bien las predicciones del modelo explican la variabilidad de los datos (fórmula 11). Si el R^2 es igual a 1, las predicciones son perfectas y el modelo explica toda la variabilidad de los datos; si el $R^2 > 0.7$, el modelo tiene una buena capacidad predictiva (esto es relativo según el campo de aplicación). Si el $R^2 < 0.5$, el modelo tiene una baja capacidad predictiva (no explica bien la variabilidad espacial). Finalmente, un $R^2 = 0$ significa que el modelo no se ajusta en absoluto a los datos.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n [Z_1(x_i) - Z_2(x_i)]^2}{\sum_{i=1}^n [Z_1(x_i) - \bar{Z}_1]^2} \quad \dots(11)$$

Donde:

n: el número de muestras.

$Z_1(X_i)$: valores predichos en el sitio i.

$Z_2(X_i)$: valores observados en el sitio i.

Los resultados de la validación cruzada de las variables fisicoquímicas del suelo se presentan en la Tabla 3. Las propiedades del suelo con mayor grado de ajuste entre los valores observados y predichos son la Densidad aparente (Dap) del suelo (RMSE = 0.00 y $R^2 = 0.81$), el pH (RMSE = 0.00 y $R^2 = 0.92$), el K^+ intercambiable (RMSE = 0.00 y $R^2 = 0.83$) y el Porcentaje de Sodio Intercambiable (PSI) (RMSE = 0.00 y $R^2 = 0.94$). Lo cual indica un alto grado de predictibilidad espacial de esas propiedades del suelo y que la interpretación y planes de fertilización derivados a partir de esas características pueden replicarse en zonas no muestreadas.

Tabla 3. Modelos de semivariograma para las propiedades del suelo de la EEA Canaán

Variable	Modelo	Nugget (C_0)	Sill (C_0+C)	Range (m)	Cross - validation	
					RMSE	R^2
Arena	Linear	17.30	21.00	198.27	60.21	0.32
Limo	Linear to Sill	7.00	14.30	313.33	28.32	0.32
Arcilla	Linear	22.40	39.50	304.54	258.96	0.52
Hd _{cc}	Linear to Sill	5.20	7.40	194.96	5.94	0.11
Hd _{pmp}	Linear to Sill	2.80	4.10	195.05	1.79	0.11
Dap	Linear to Sill	0.00	0.00	422.75	0.00	0.81
pH	Linear to Sill	0.00	0.10	427.81	0.00	0.92
CE	Linear to Sill	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.40
MO	Linear to Sill	0.00	0.10	213.90	0.00	0.51
N total	Spherical	0.00	0.00	215.54	0.00	0.28
P disponible	Gaussian	123.50	113.10	485.24	87.08	0.52
K disponible	Linear to Sill	6119.70	11857.60	145.14	30370.00	0.15
CaCO ₃	Linear to Sill	0.30	0.30	175.46	0.01	0.03
Ca ²⁺	Linear	0.40	7.60	474.82	1.30	0.94
Mg ²⁺	Linear	0.00	3.40	200.85	4.97	0.90
K ⁺	Linear	0.00	0.10	334.36	0.00	0.83
Na ⁺	Gaussian	0.00	0.00	344.54	0.00	0.53
CIC	Linear	0.00	19.20	485.07	7.44	0.96
PCI	Linear	0.00	170.00	485.07	1213.83	0.93
PMI	Linear	0.00	210.80	485.07	3335.78	0.85
PPI	Linear	0.26	8.70	484.63	0.72	0.97
PSI	Linear to Sill	0.00	0.20	409.96	0.00	0.94

Hd_{cc}: humedad volumétrica del suelo en capacidad de campo, Hd_{pmp}: humedad volumétrica del suelo en punto de marchitez permanente, Dap: densidad aparente del suelo, CE: conductividad eléctrica en extracto de saturación, MO: materia orgánica del suelo, CIC: capacidad de intercambio catiónico efectiva, PCI: porcentaje de calcio intercambiable, PMI: porcentaje de magnesio intercambiable, PPI: porcentaje de potasio intercambiable, PSI: porcentaje de sodio intercambiable.

3.8. Mapeo digital de las propiedades del suelo

Las propiedades del suelo se han representado en los respectivos mapas interpolados (Figuras 9-26). Mostrando la variación espacial de las características físicas y químicas de los suelos de la EEA Canaán. Asimismo, entre las propiedades del suelo evaluadas, las características relacionadas con la saturación de bases catiónicas como el Ca^{2+} y el K^+ intercambiables, alcanzaron un mayor grado de ajuste entre los valores observados y predichos, siendo estos los de mayor predictibilidad espacial en un rango de 474.82 y 334.36 m, respectivamente.

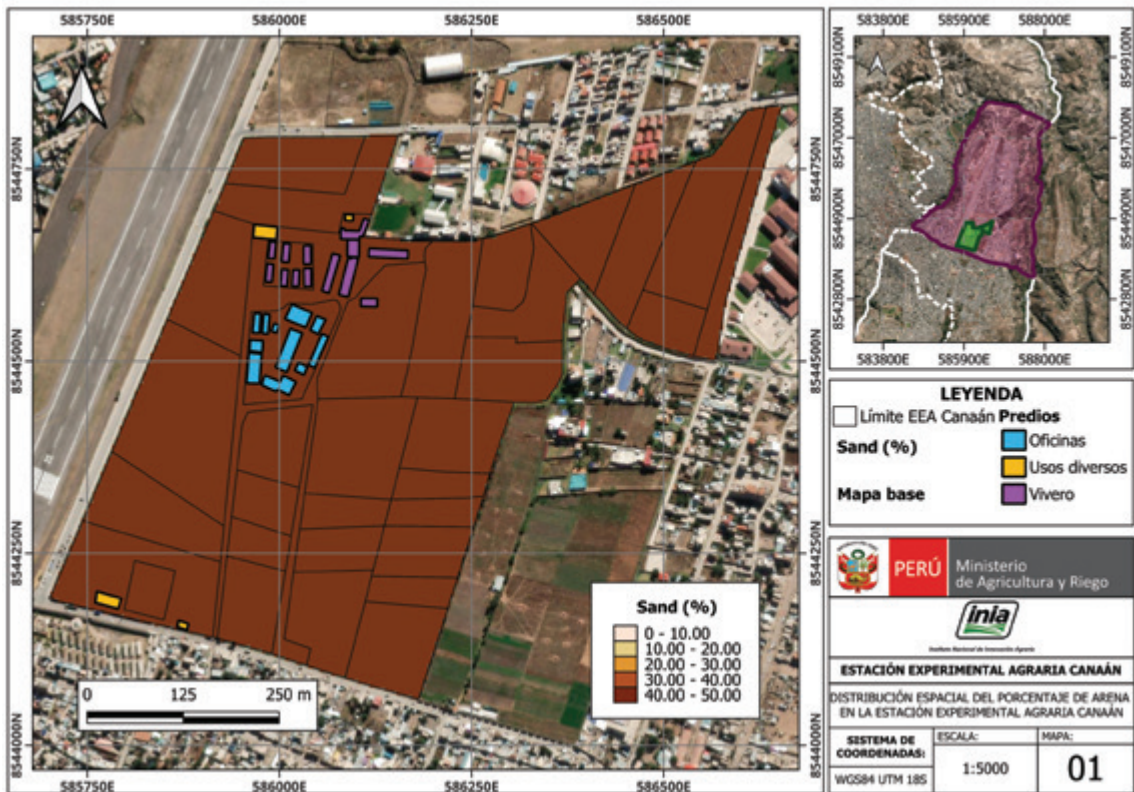


Figura 9. Mapa de variación espacial del porcentaje de arena

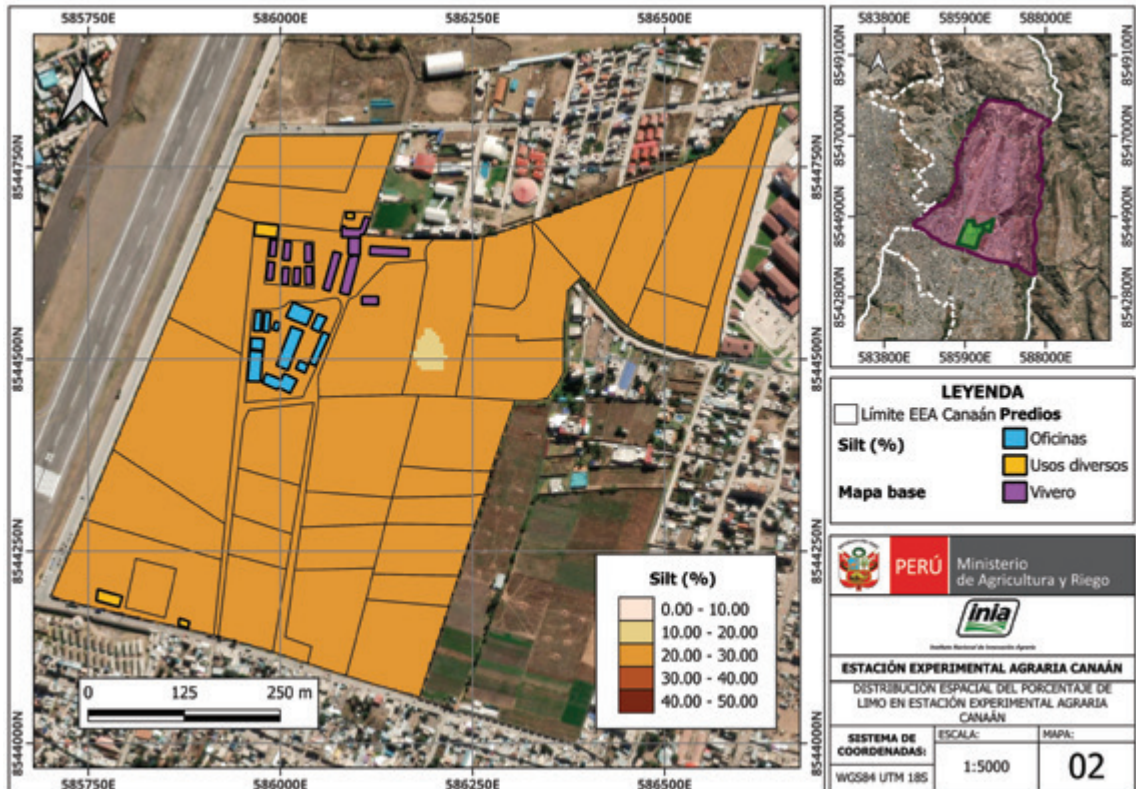


Figura 10. Mapa de variación espacial del porcentaje de limo

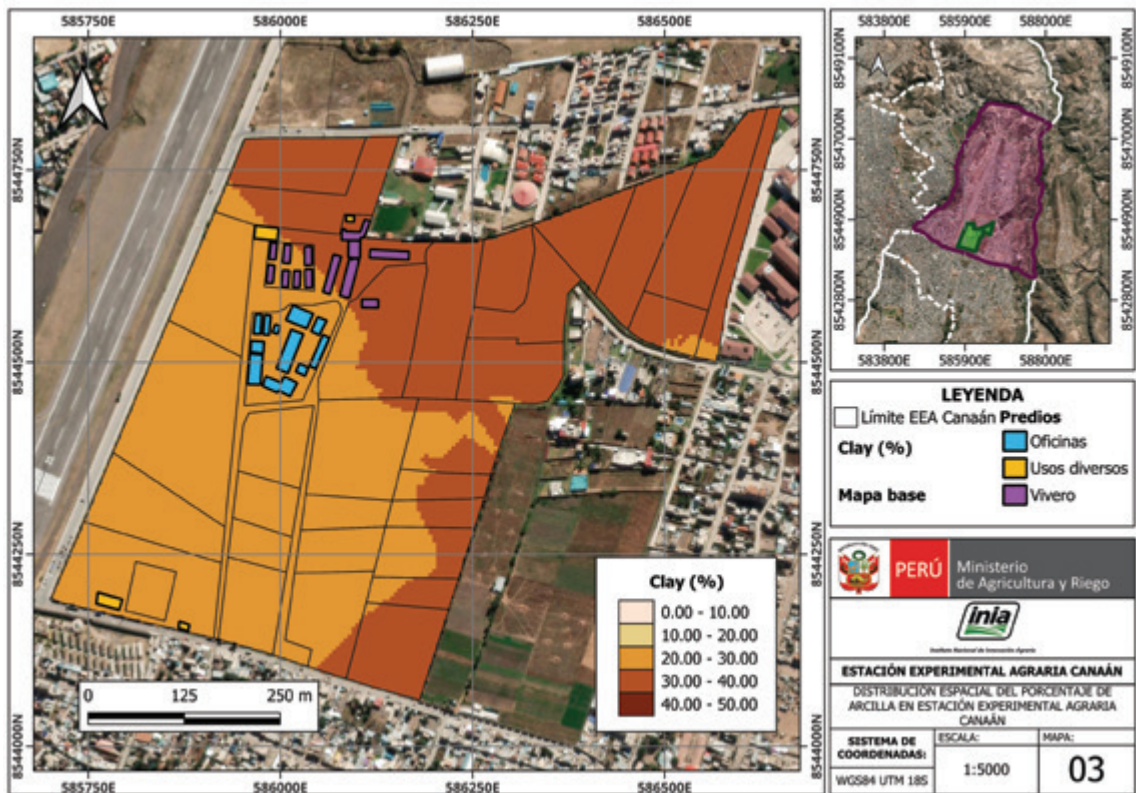


Figura 11. Mapa de variación espacial del porcentaje de arcilla

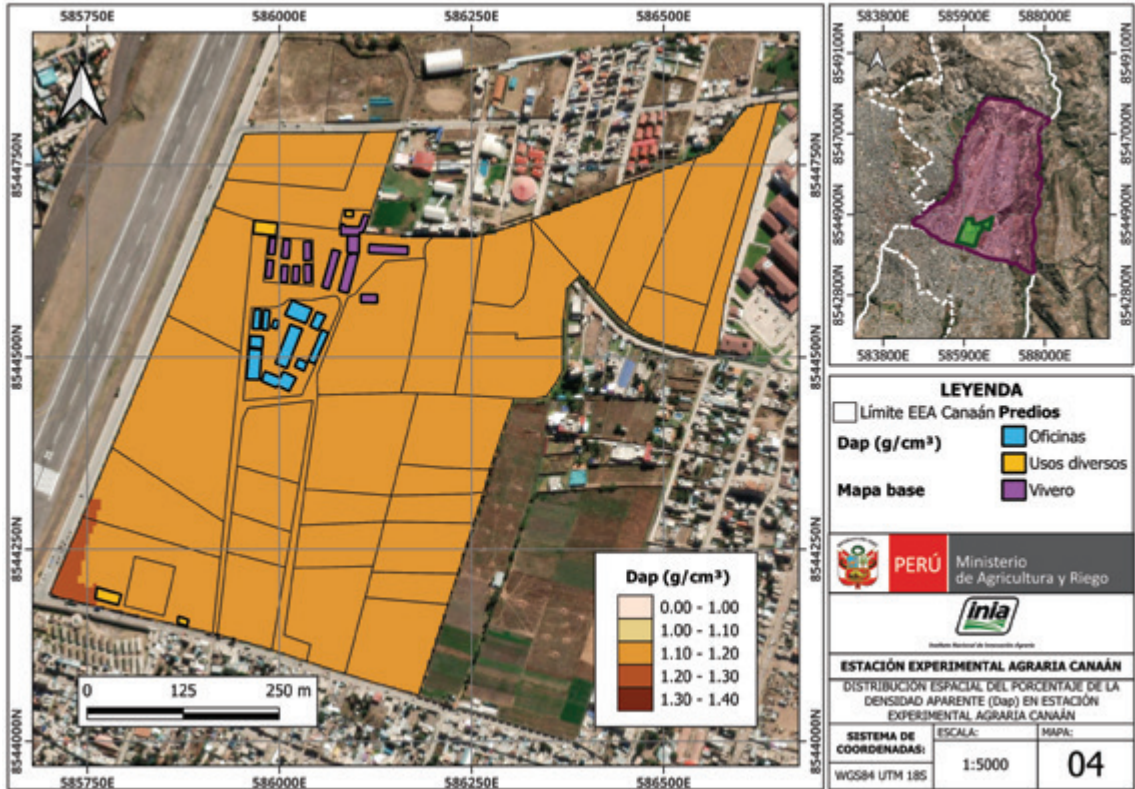


Figura 12. Mapa de variación espacial de la densidad aparente

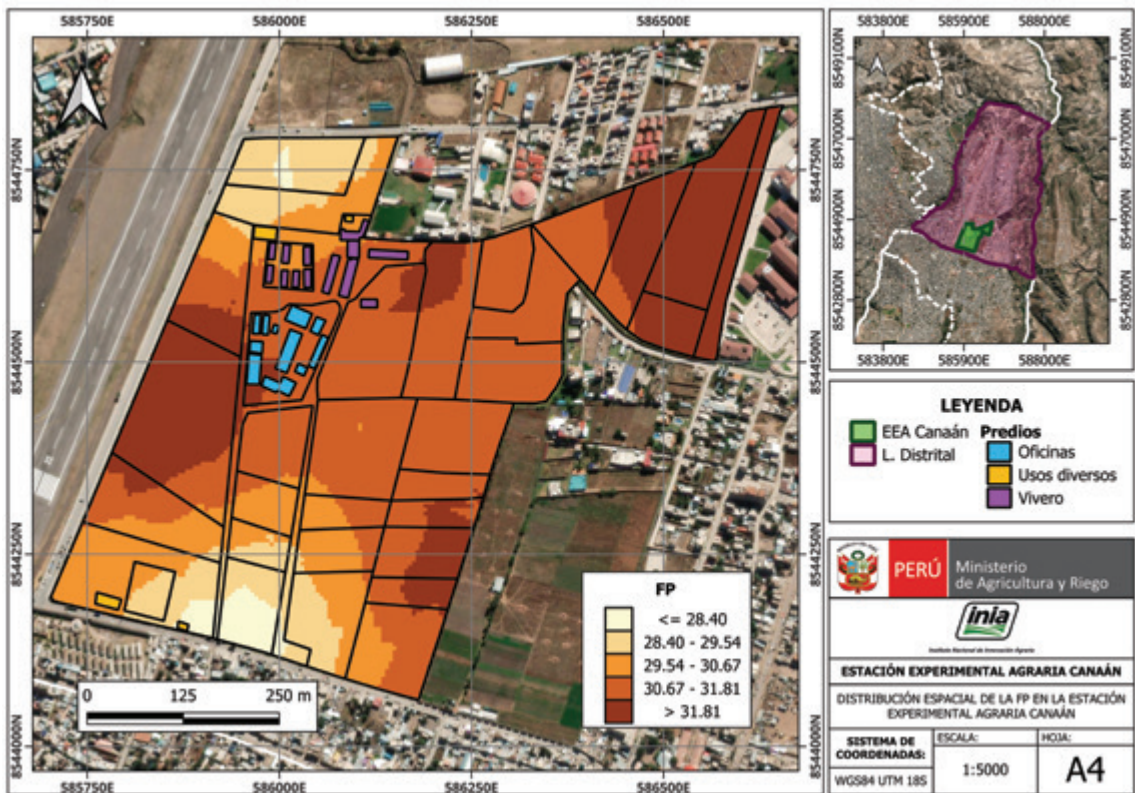


Figura 13. Mapa de variación espacial de la humedad volumétrica en capacidad de campo

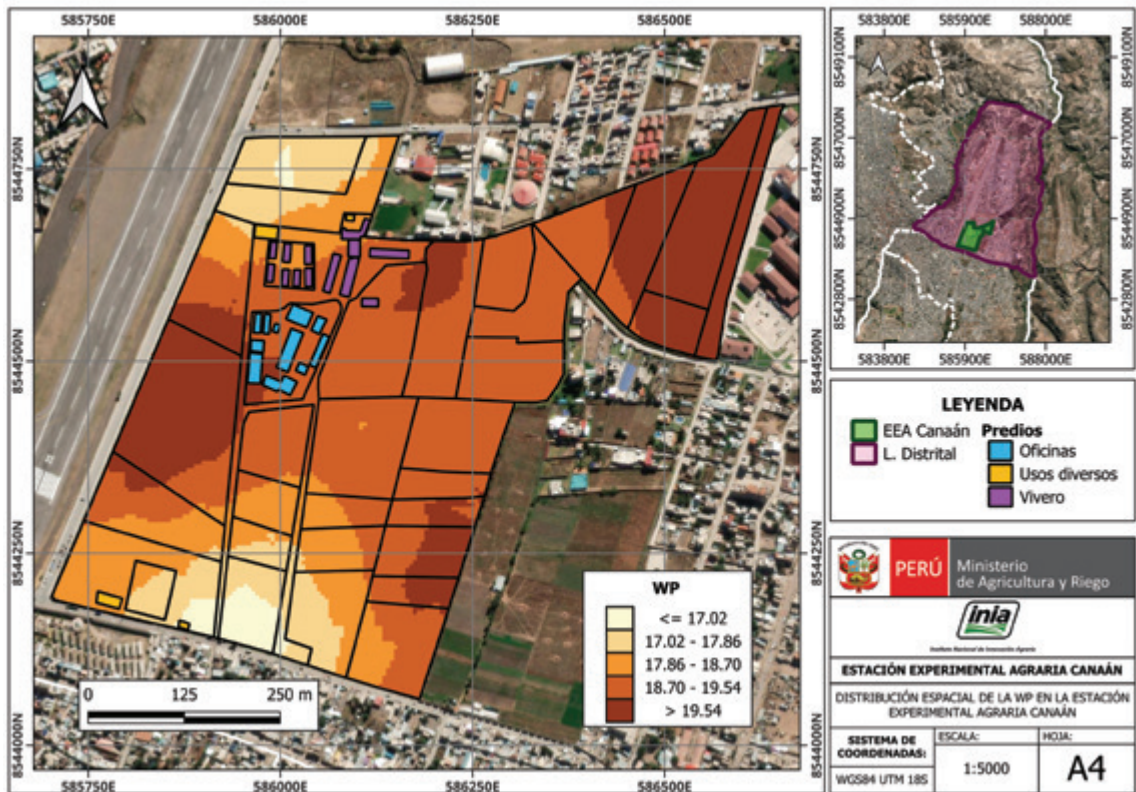


Figura 14. Mapa de variación espacial de la humedad volumétrica en punto de marchitez permanente

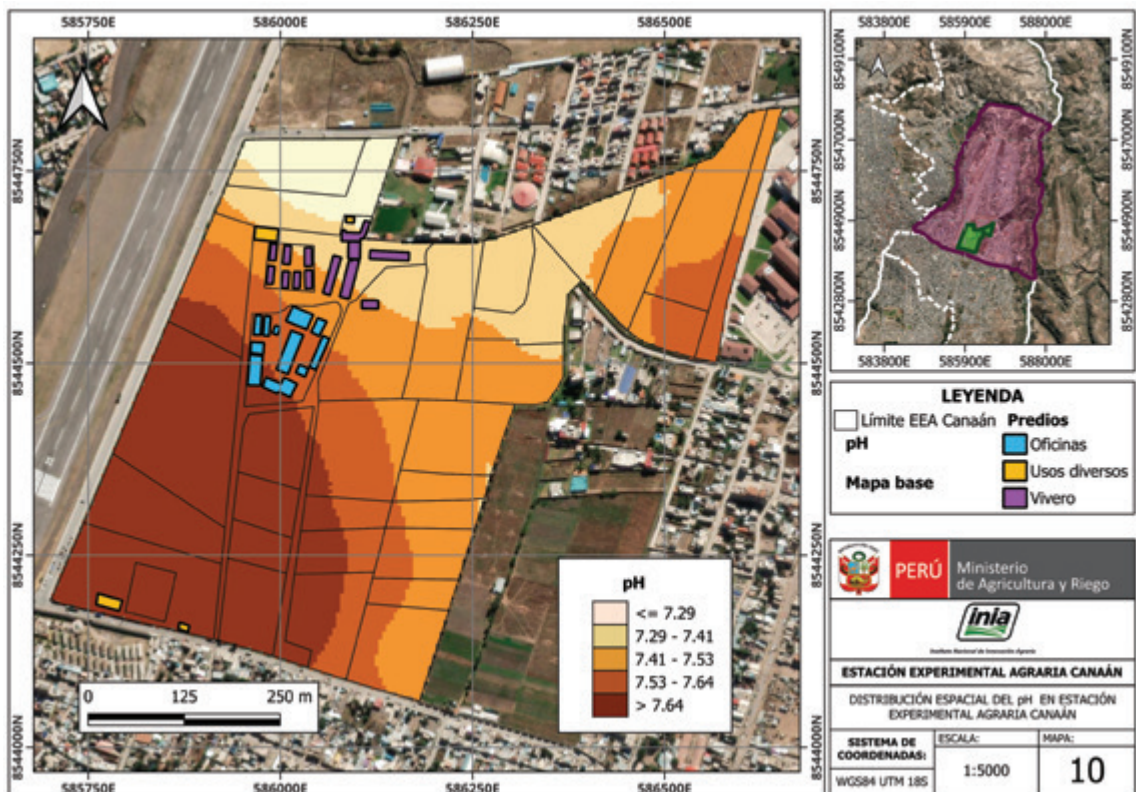


Figura 15. Mapa de variación espacial del pH

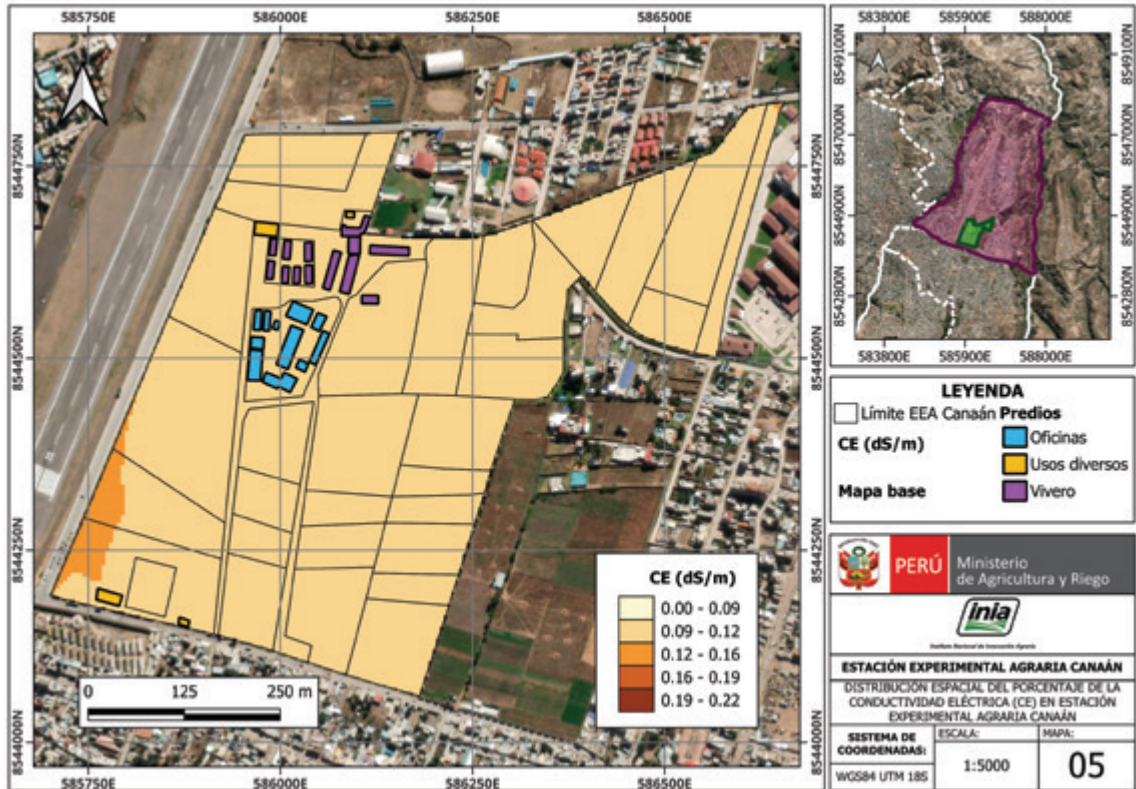


Figura 16. Mapa de variación espacial de la conductividad eléctrica en extracto de saturación

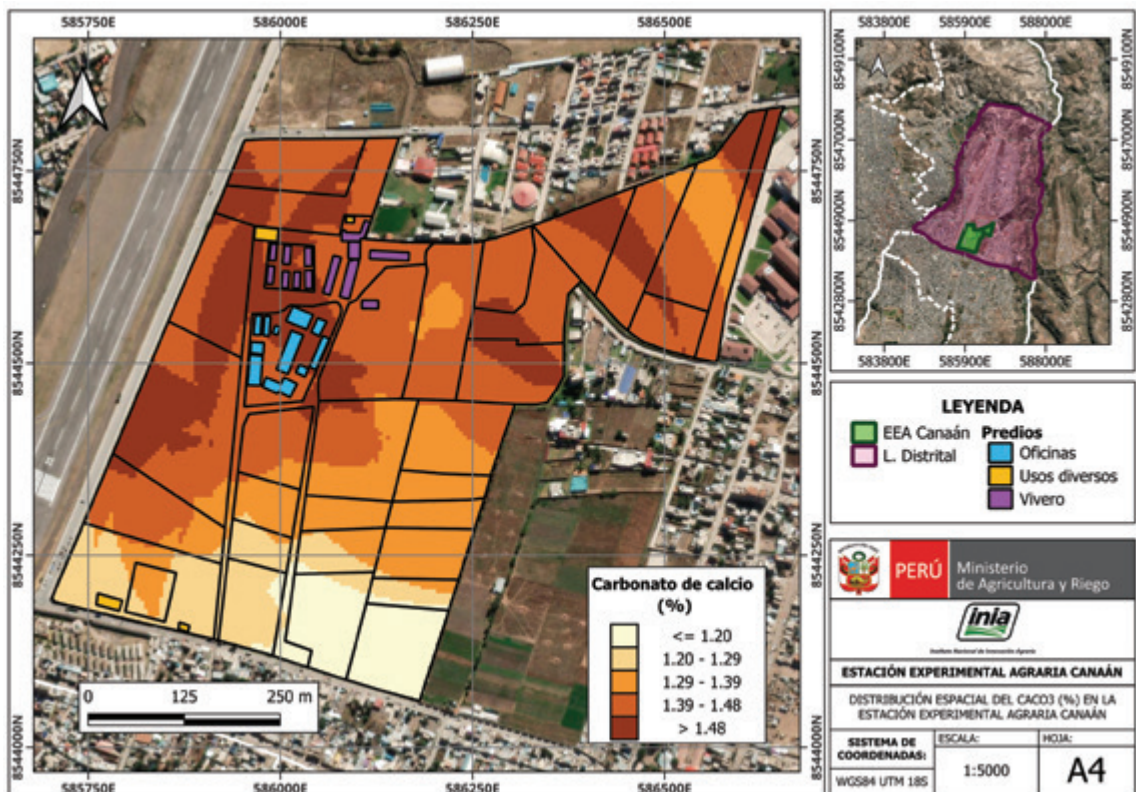


Figura 17. Mapa de variación espacial del carbonato de calcio equivalente

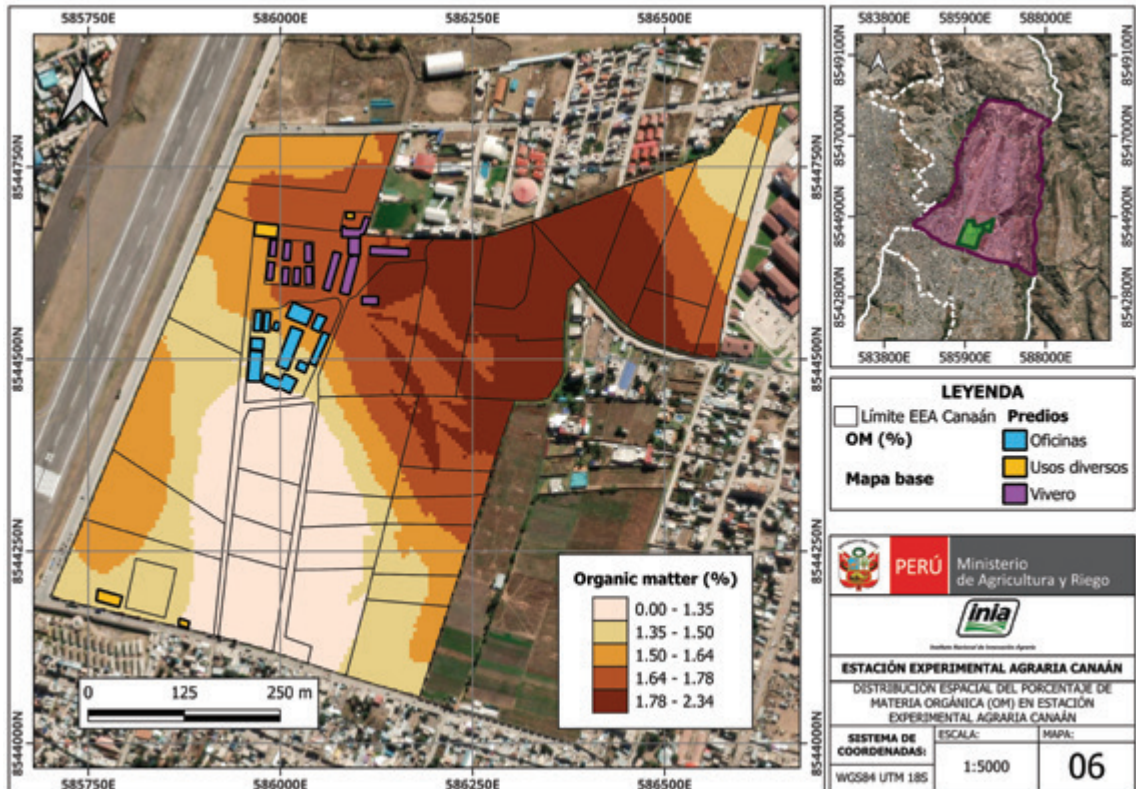


Figura 18. Mapa de variación espacial de la materia orgánica

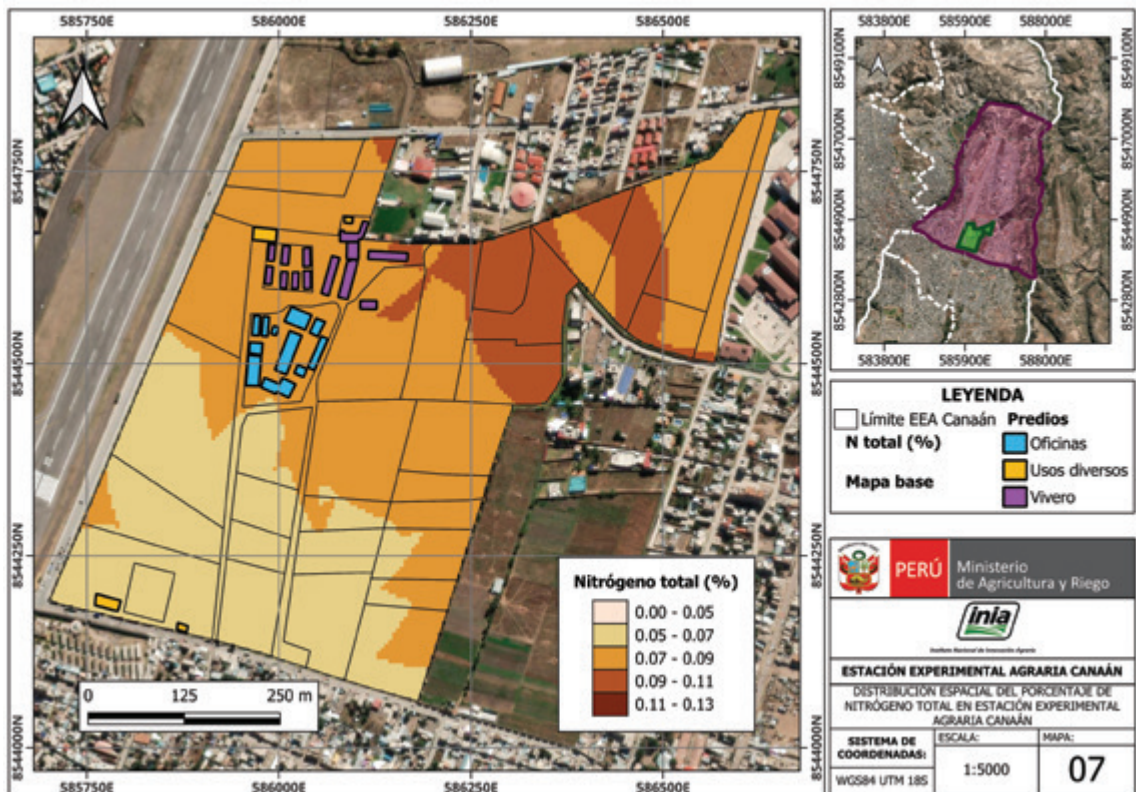


Figura 19. Mapa de variación espacial del nitrógeno total

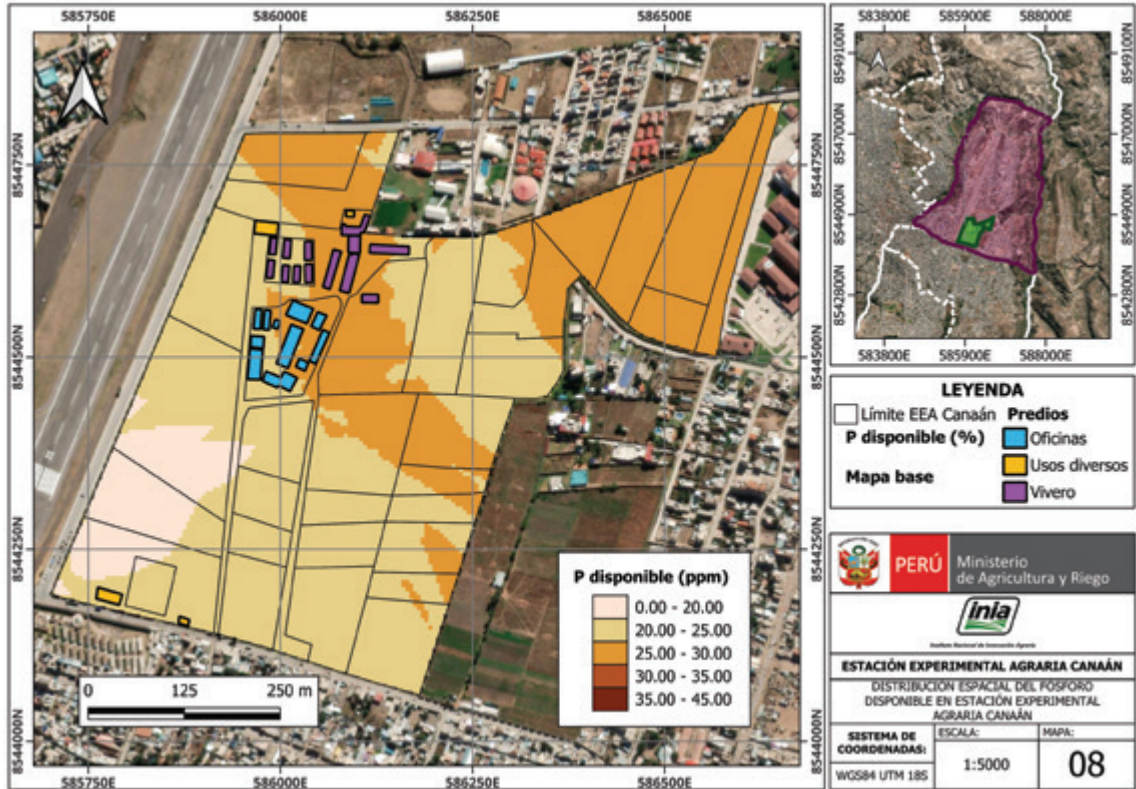


Figura 20. Mapa de variación espacial del fósforo disponible

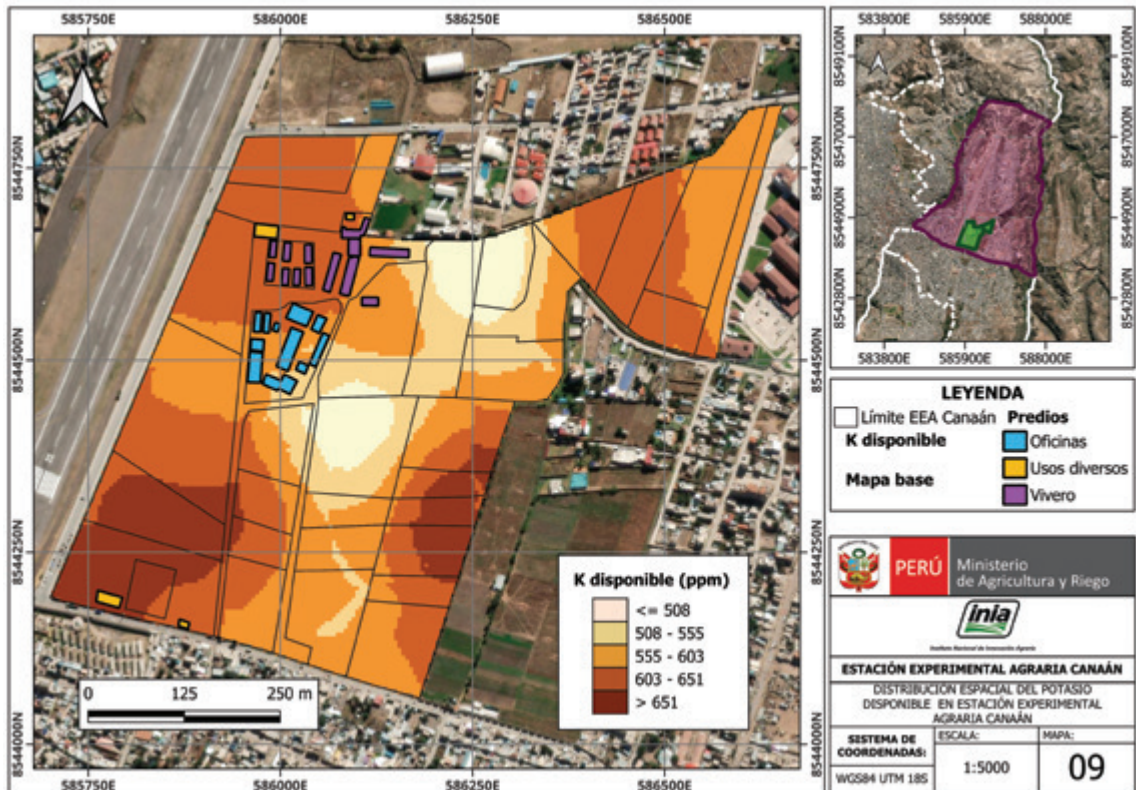


Figura 21. Mapa de variación espacial del potasio disponible

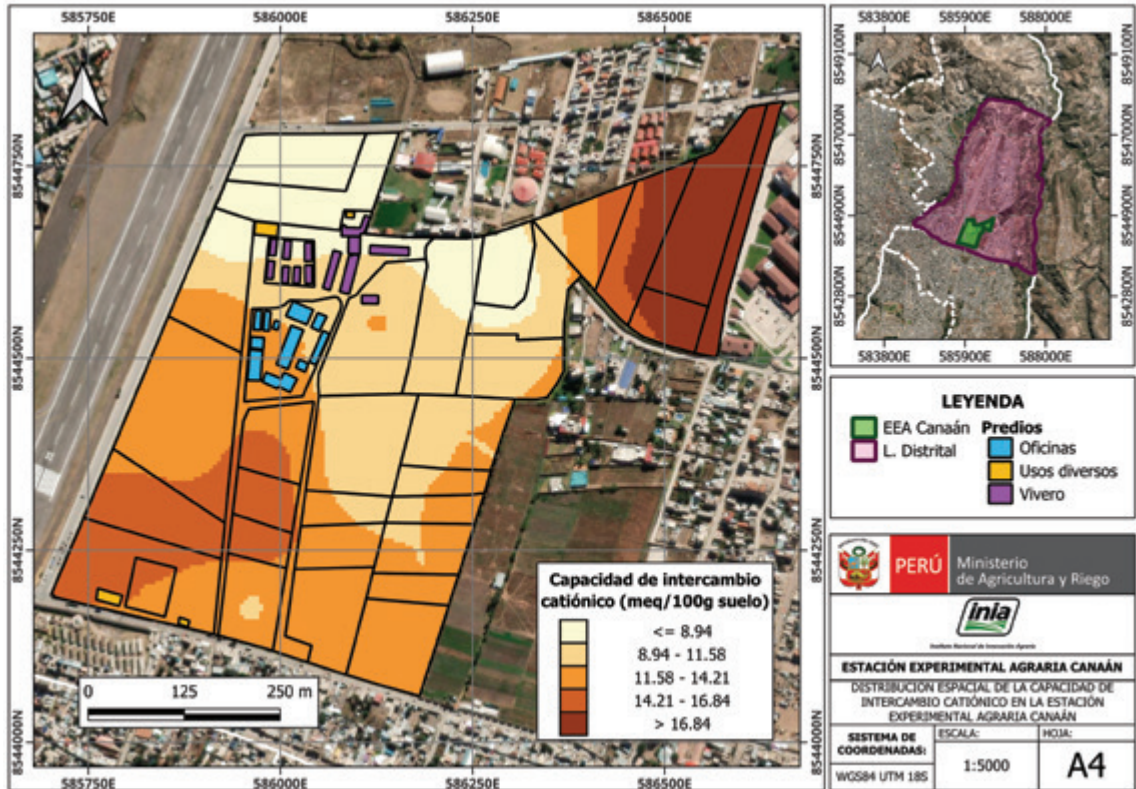


Figura 22. Mapa de variación espacial de la capacidad de intercambio catiónico (CIC) efectiva

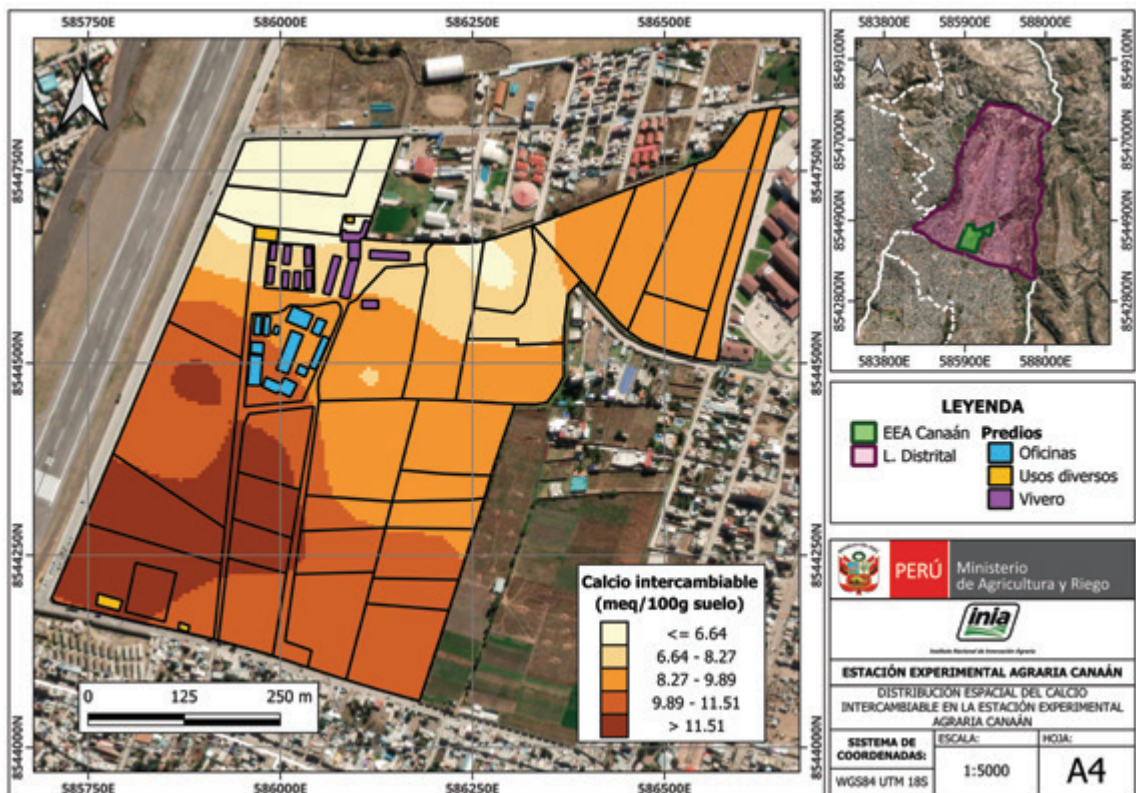


Figura 23. Mapa de variación espacial del calcio (Ca²⁺) intercambiable

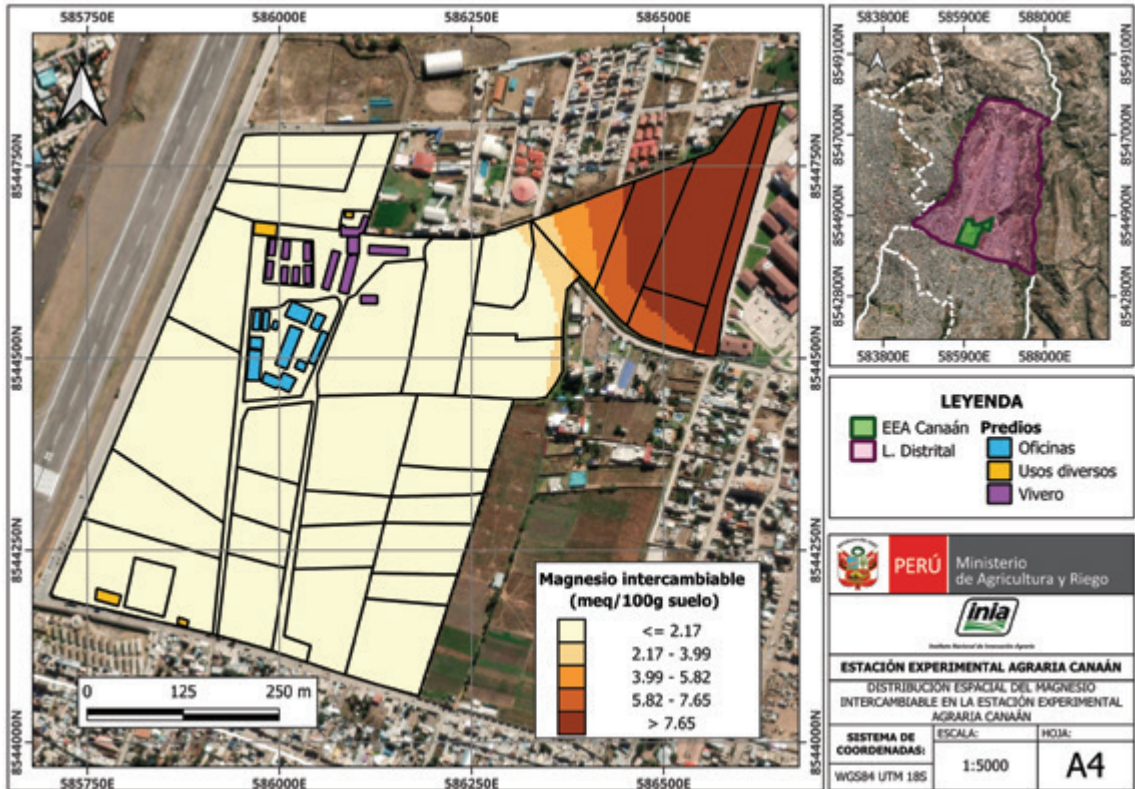


Figura 24. Mapa de variación espacial del magnesio (Mg^{2+}) intercambiable

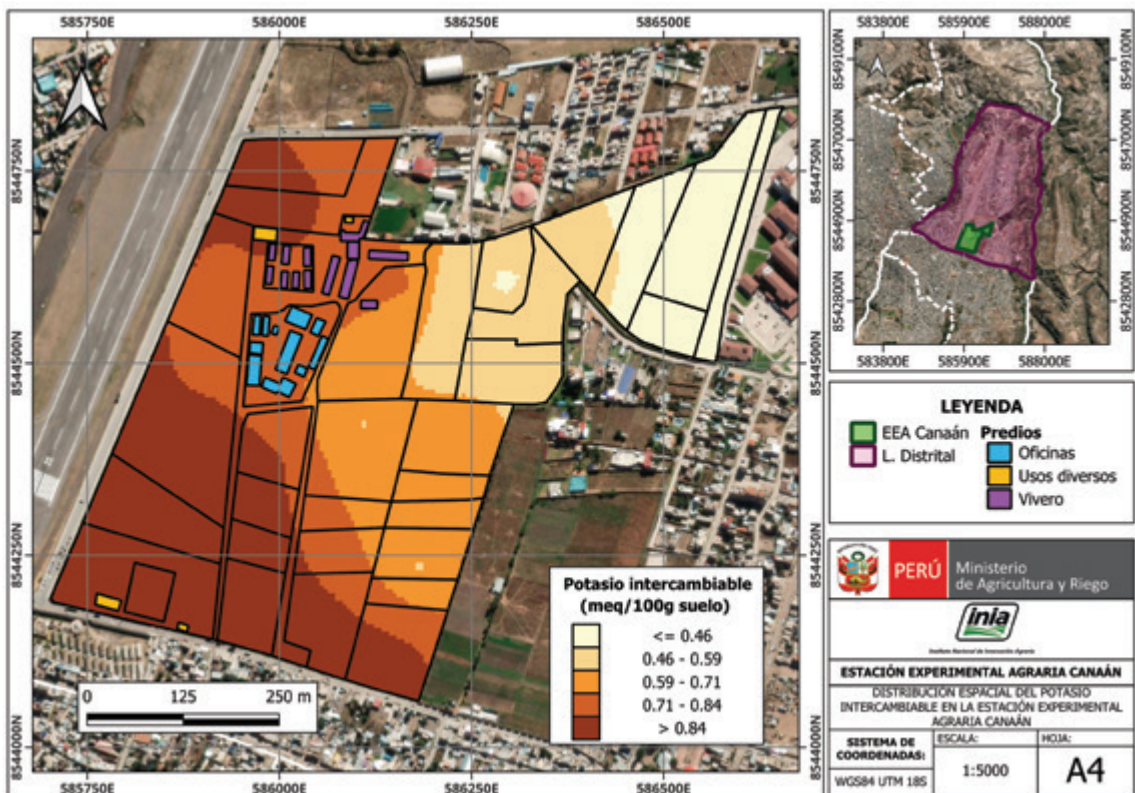


Figura 25. Mapa de variación espacial del potasio (K^+) intercambiable

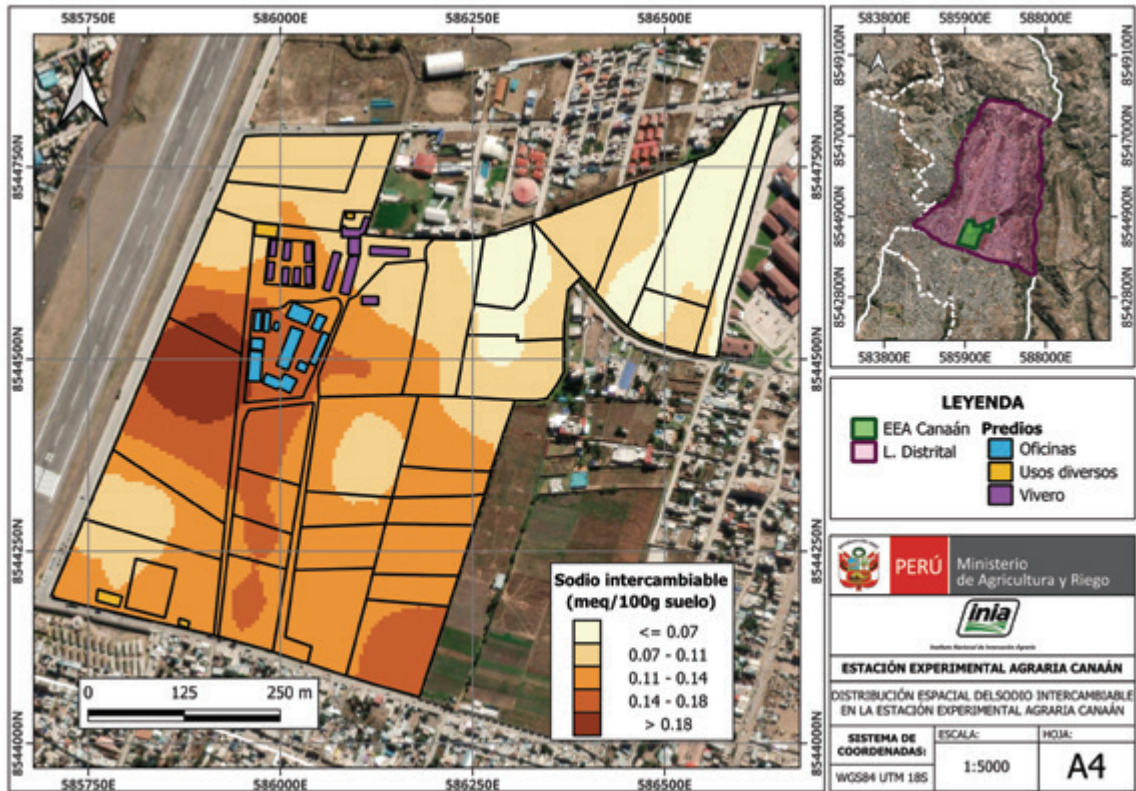


Figura 26. Mapa de variación espacial de sodio (Na⁺) intercambiable



Inia
Instituto Nacional de Innovación Agraria

PERÚ
Ministerio de Agricultura y Riego

LABSAF

TIPOS DE SUELOS

TIPOS DE SUELOS

SU-01



4. Recomendaciones de manejo de la fertilidad del suelo en la EEA Canaán

El diagnóstico espacial de la fertilidad del suelo en la EEA Canaán permitió identificar zonas con contrastes significativos en la disponibilidad y balance de nutrientes esenciales, así como en propiedades edáficas moduladoras como el pH, la capacidad de intercambio catiónico (CIC) y la saturación de bases. Con base en los resultados obtenidos, se ha estructurado una propuesta de manejo diferenciado que considera tanto los requerimientos nutricionales de los cultivos como los principios de la relación catiónica balanceada (BCSR), el nivel de suficiencia de nutrientes disponibles (SLAN) y las condiciones químicas que afectan la fertilidad potencial del suelo.

Las recomendaciones aquí descritas integran criterios agronómicos y geoestadísticos para optimizar el uso de insumos, corregir deficiencias o excesos, y mantener la estabilidad físico-química del suelo. Se busca con ello promover la sostenibilidad productiva de los sistemas agrícolas en la EEA Canaán mediante intervenciones específicas, tanto en el corto como en el mediano plazo. A continuación, se presentan los lineamientos técnicos para el manejo correctivo del calcio, magnesio y potasio intercambiables, así como del fósforo disponible, y se analiza el papel del pH como factor modulador de la disponibilidad de nutrientes.

4.1. Índice de saturación de bases catiónicas

Los mapas de suelos evidencian zonas específicas con baja, media y alta concentración de potasio, calcio, magnesio y sodio cambiables. Sin embargo, es indispensable analizar los porcentajes de saturación de cada elemento para recomendar acciones correctivas al suelo.

4.1.1. Recomendación de yeso agrícola en zonas con bajos niveles de saturación de Ca^{2+} intercambiable

Con respecto al calcio cambiable, se han encontrado cinco zonas con concentración de calcio cambiable diferentes (Figura 23).

La primera zona con concentraciones entre 5 a 6.64 cmol kg^{-1} , con una CIC efectiva entre 6.48 a 8.94 cmol kg^{-1} , y un porcentaje de saturación de calcio entre 71.84 y 80.26 %, superior al valor óptimo de 65 % (Figura 27).

La segunda zona presenta concentraciones de calcio entre 6.64 a 8.27 cmol kg^{-1} , con una CIC entre 8.94 a 11.58 cmol kg^{-1} , y un porcentaje de saturación de calcio entre 80.26 y 84.72 %, superior al óptimo.

La tercera zona, se divide en dos sectores. El primer sector con concentraciones de calcio entre 8.27 y 9.89 cmol kg^{-1} , CIC efectiva entre 8.94 a 11.58 cmol kg^{-1} , y porcentaje de saturación de calcio entre 80.26 a 87.88 %, superiores al óptimo; y el segundo sector con la misma variación de la concentración de Ca^{2+} a nivel espacial, pero con CIC efectiva entre 11.58 y 26.75 cmol kg^{-1} , lo que determina porcentajes de saturación de calcio más bajos, entre 39.36 a 71.84 %. Este último sector presenta a nivel espacial una alta probabilidad de encontrar áreas con bajos porcentajes de saturación de Ca^{2+} e inestabilidad estructural del suelo.

La fertilización correctiva para elevar el porcentaje de saturación de calcio cambiante de 40 a 65 % en este sector ($Dap = 1.20 \text{ g cm}^{-3}$, $CICe = 26.75 \text{ cmol kg}^{-1}$) es de $25\,529 \text{ kg ha}^{-1}$ de yeso agrícola (24 % de CaO), el cuál debe corregirse en dosis fraccionadas de $1\,700 \text{ kg ha}^{-1}$ anual, durante un período de 15 años.

La cuarta zona tiene concentraciones de calcio entre 9.89 y $11.51 \text{ cmol kg}^{-1}$, con CIC entre 11.58 a $14.21 \text{ cmol kg}^{-1}$, y porcentaje de saturación de calcio entre 80.26 y 88.49% , superiores al óptimo.

La quinta zona presenta concentraciones de calcio entre 11.51 y $13.84 \text{ cmol kg}^{-1}$, con CIC efectiva entre 14.21 y $16.84 \text{ cmol kg}^{-1}$, y porcentaje de saturación de calcio entre 80.26 y 84.12% , superiores al óptimo.

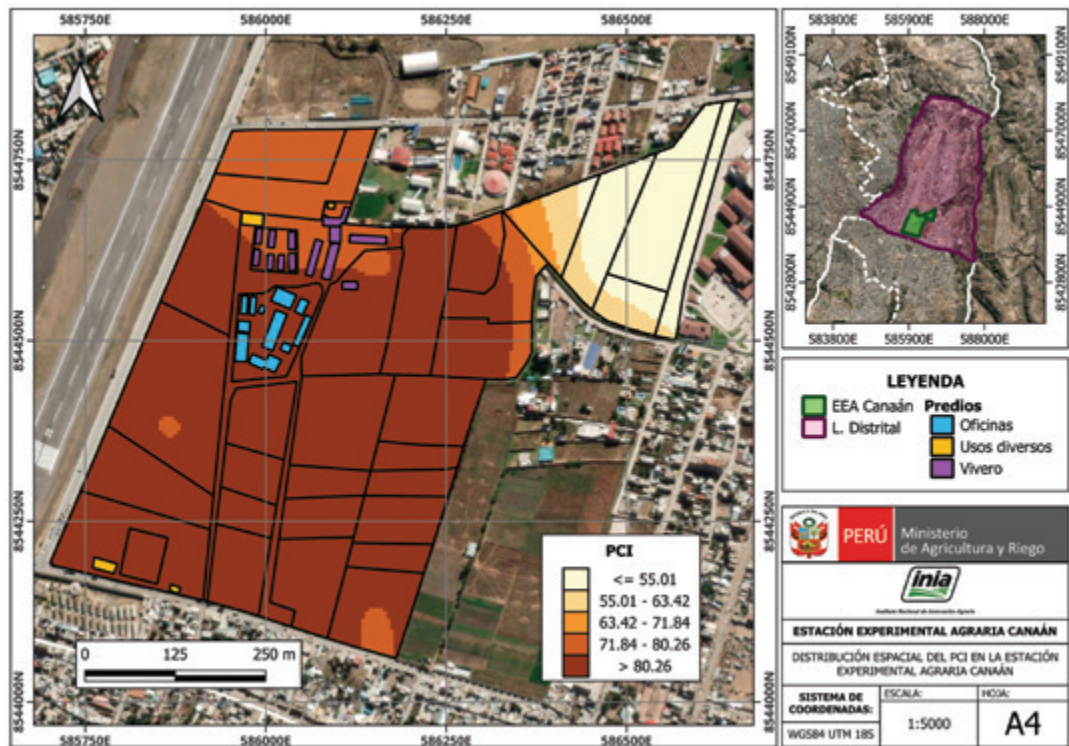


Figura 27. Mapa de variación espacial del porcentaje de saturación de calcio (Ca^{2+}) intercambiable

4.1.2. Niveles superiores de K⁺ intercambiable

Con respecto al potasio cambiante, se han identificado cinco zonas con concentraciones de K⁺ intercambiable y porcentajes de saturación de K⁺ diferentes (Figuras 25 y 28).

La primera zona presenta concentraciones entre 0.22 a 0.46 cmol kg⁻¹, con una CIC entre 14.21 y 18.59 cmol kg⁻¹ (Figura 22), y un porcentaje de saturación de potasio intercambiable entre 3.40 y 3.61 %, dentro del rango óptimo de entre 3 a 7 % recomendado.

La segunda y tercera zona con concentraciones de potasio entre 0.46 a 0.71 cmol kg⁻¹, con una CIC entre 9.15 y 11.58 cmol kg⁻¹, y porcentaje de saturación de potasio entre 3.61 a 5.84 %, dentro del rango óptimo.

La cuarta zona presenta concentraciones de potasio entre 0.71 a 0.84 cmol kg⁻¹, con una CIC entre 11.58 a 16.84 cmol kg⁻¹, y porcentaje de saturación de potasio entre 5.84 a 8.07 %. Estos valores superiores al óptimo recomendado, lo que podría generar desbalances catiónicos con otros iones como el magnesio.

La quinta zona presenta valores de entre 0.71 y 0.99 cmol kg⁻¹, CIC efectiva entre 6.48 y 8.94 cmol kg⁻¹, y porcentaje de saturación de potasio entre 8.07 y 14.73 %, es decir muy superior a los valores recomendados, lo que incrementa la probabilidad de desbalances iónicos en desmedro de otros nutrientes, pero con niveles suficientes de potasio para el crecimiento de cultivos. Es probable que la dosis de fertilización potásica sea menor a medida que se incrementa el nivel de potasio almacenado en el suelo.

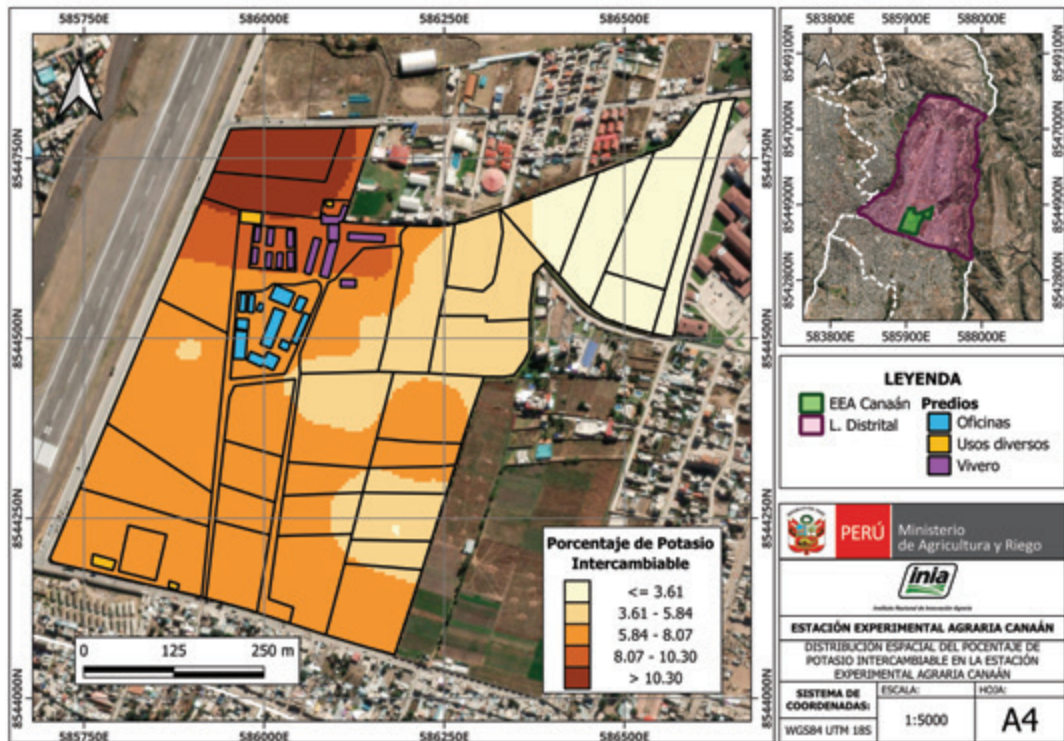


Figura 28. Mapa de variación espacial del porcentaje de saturación de potasio (K⁺) intercambiable

4.1.3. Fertilización de corrección para incrementar el Mg^{2+} intercambiable deficiente

Los altos niveles de calcio y potasio cambiante están provocando desequilibrios iónicos, perjudicando la disponibilidad del magnesio en los suelos de la EEA Canaán. Se pueden diferenciar dos zonas con alto y bajo contenido de Mg^{2+} intercambiable (Figura 29).

La primera zona tiene un nivel alto de concentración de magnesio entre 3.99 y 15.71 $cmol\ kg^{-1}$, con valores de CIC entre 11.58 y 26.75 $cmol\ kg^{-1}$, y porcentajes de saturación de Mg^{2+} entre 24.07 y 58.73 %. Esta zona presenta los valores más bajos de saturación de K^+ intercambiable, debido a un exceso de Mg^{2+} . Este desbalance iónico está relacionado con el incremento de procesos de dispersión de partículas de arcillas del suelo, lo que repercute negativamente en la estructura del suelo. Asimismo, es probable que las plantas presenten deficiencias fisiológicas y susceptibilidad a enfermedades por déficit de K^+ .

La segunda zona tiene un nivel bajo de concentración de magnesio con valores entre 0 a 2.17 $cmol\ kg^{-1}$, pero con valores de CIC diferentes, sin embargo, el bajo grado de ajuste entre los valores observados y predichos de la CIC efectiva limitan la utilidad de esta variable para las recomendaciones de fertilización correctiva de Mg^{2+} a nivel espacial. Es probable que otras variables como el Ca^{2+} intercambiable, con mayor predictibilidad espacial, esté limitando la saturación de Mg^{2+} . Asimismo, existe una alta correlación negativa entre el porcentaje de saturación de Ca^{2+} intercambiable (PCI) y la concentración de Mg^{2+} ($R = -0.96$); y una alta correlación positiva entre el PCI y el porcentaje de arena ($R = 0.51$). Estas características explican la necesidad de fertilización magnésica de corrección en los suelos de la EEA Canaán, con altos porcentajes de calcio y arena.

En estas condiciones el porcentaje de saturación de magnesio se encuentra entre 7.41 y 14.92 %, siendo el rango óptimo entre 10 y 20 %. La fertilización correctiva para elevar el porcentaje de saturación de magnesio cambiante de 7.41 a 10 % en los sectores con mayores deficiencias ($Dap = 1.2\ g\ cm^{-3}$) es de 873.47 $kg\ ha^{-1}$ de sulfato de magnesio (33.5 % de MgO), el cuál debe corregirse en cinco años en dosis fraccionadas de 170 $kg\ ha^{-1}$ anual.

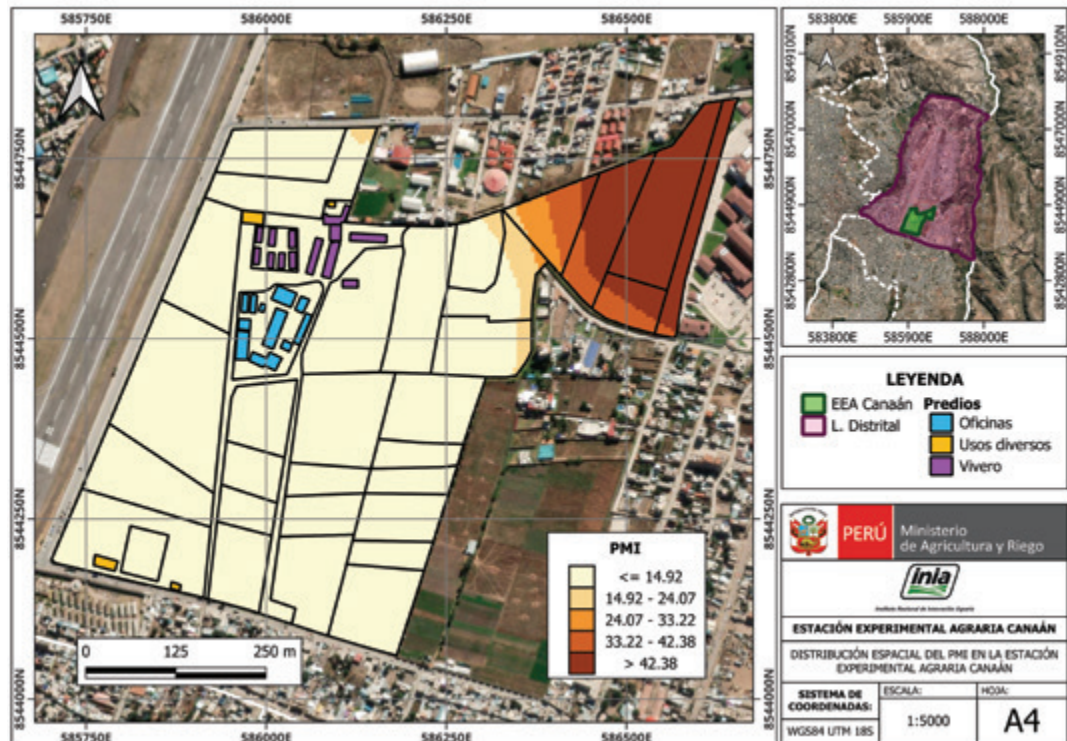


Figura 29. Mapa de variación espacial del porcentaje de saturación de magnesio (Mg^{2+}) intercambiable

4.2. Niveles de suficiencia de nutrientes disponibles

4.2.1. Diagnóstico de P-Olsen y requerimiento de fertilización de construcción

Con respecto al fósforo disponible determinado por el método Olsen (P-Olsen), se observa que la mayoría de los suelos de la EEA Canaán se encuentran en el valor de margen de reserva óptimo para el desarrollo de todos los cultivos entre 20 a 35 $mg\ kg^{-1}$. Posiblemente, esta condición se debe a valores bajos de $CaCO_3$ ($1.52 \pm 0.74\ %$). Sin embargo, es posible diferenciar tres zonas con diferente rango de potencial de fertilidad (Figura 30).

La primera zona, la de mayor disponibilidad de P, presenta entre 25 y 30 $mg\ kg^{-1}$ de P-Olsen, lo que coincide con zonas de pH entre 7.41 a 7.53 y concentraciones de Ca^{2+} entre 8.27 a 9.89 $cmol\ kg^{-1}$. Estas zonas también se caracterizan por presentar menor concentración de calcio cambiante, las únicas con requerimiento de yeso (sustentado en el apartado 4.1.1). Es probable que las características químicas del suelo estén impidiendo la precipitación de fósforo con el calcio e incrementando su solubilidad. En este caso, se recomienda programar la fertilización según el criterio de suficiencia.

La segunda zona presenta entre 20 a 25 mg kg⁻¹ de P-Olsen. Sin embargo, se pueden diferenciar dos sectores. El primer sector tiene valores de pH entre 7.53 y 7.64, concentración de Ca²⁺ entre 9.89 y 11.51 cmol kg⁻¹, y porcentaje de materia orgánica entre 0.48 y 1.5 %. El segundo sector presenta valores más bajos de pH entre 7.29 y 7.41, y bajas concentraciones de Ca²⁺ entre 5 y 8.27 cmol kg⁻¹, así como porcentaje de materia orgánica más altos, entre 1.78 y 2.34 %. Ambos sectores presentan limitaciones diferentes frente a la disponibilidad del P. En el primer caso, la alta concentración de Ca²⁺ y mayor pH son propicios para la formación de precipitados de fosfatos de calcio; y en el segundo caso, el incremento del contenido de materia orgánica inmoviliza el P en la biomasa microbiana. Sin embargo, aún se mantienen niveles óptimos suficientes. En estos casos se recomienda programar la fertilización según el criterio de mantenimiento.

La tercera zona presenta entre 4.98 y 20 mg kg⁻¹ de P-Olsen. Esta zona coincide con los niveles más altos de pH con entre 7.64 y 7.92, los niveles más altos de Ca²⁺ con valores entre 11.51 y 13.84 cmol Kg⁻¹, y los niveles más altos de K⁺ cambiante con entre 0.84 y 0.99 cmol Kg⁻¹. Estas características reducen la disponibilidad de fósforo, por lo que se requiere incrementar el margen de reserva de 4.98 a 20 mg kg⁻¹ incorporando una fertilización de construcción de fertilidad adicional al requerimiento de suficiencia del cultivo.

Considerando que la CIC del suelo se encuentra entre 14.21 y 16.84 cmol kg⁻¹, es decir alta en esta zona, hay una alta reactividad de los fosfatos con el calcio, por lo que se sugiere incrementar en un 100 % el factor de construcción de fertilidad propuesto por Zhang et al. (2004). Para ello, se requiere de 12 kg de P para incrementar 1 mg kg⁻¹ de P-Olsen del suelo, como criterio agronómico. Es decir, para construir o incrementar el nivel de P disponible del suelo de 4.98 a 20 mg kg⁻¹, con una tasa anual de incremento de 1.5 mg kg⁻¹ de P, se requerirán 18 kg ha⁻¹ de P adicionales al requerimiento del cultivo por año, durante un período de 10 años (aplicar la ecuación 7).

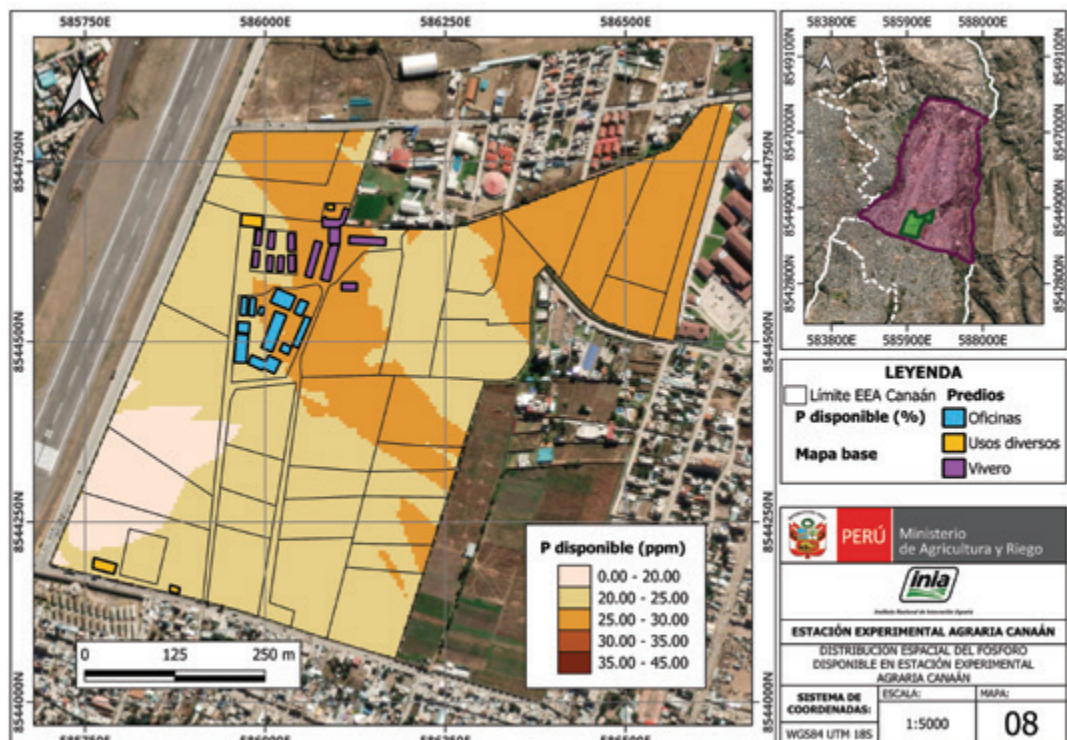


Figura 30. Mapa de variación espacial de P disponible determinado por el método de Olsen

4.3. El pH del suelo

El pH del suelo en la zona de estudio se encuentra entre 7.2 a 7.8, lo que indica una basicidad moderada. En este rango de pH, se presentan deficiencias de Fe, Mn, y Zn, los cuales deben aplicarse edáficamente con fuentes quelatadas estables hasta pH 8. Se debe complementar con aplicaciones foliares, en las fases de crecimiento radicular, vegetativo y floración.

Respecto al peligro de sodicidad, sólo una zona presenta un valor por encima del recomendado de Na^+ intercambiable ($2 \text{ mEq } 100 \text{ g}^{-1}$). Este se encuentra en la zona de interpolación de más de $1.23 \text{ mEq } 100 \text{ g}^{-1}$ (Figura 31). Se recomienda reducirlo hasta $1 \text{ mEq } 100 \text{ g}^{-1}$, con las aplicaciones de sulfato de magnesio y yeso agrícola, sumado a una lámina de riego de $200 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, más un 10 % de fracción de lavado, con el objetivo de revertir los posibles efectos osmóticos y tóxicos del sodio, debido a la alcalinización.

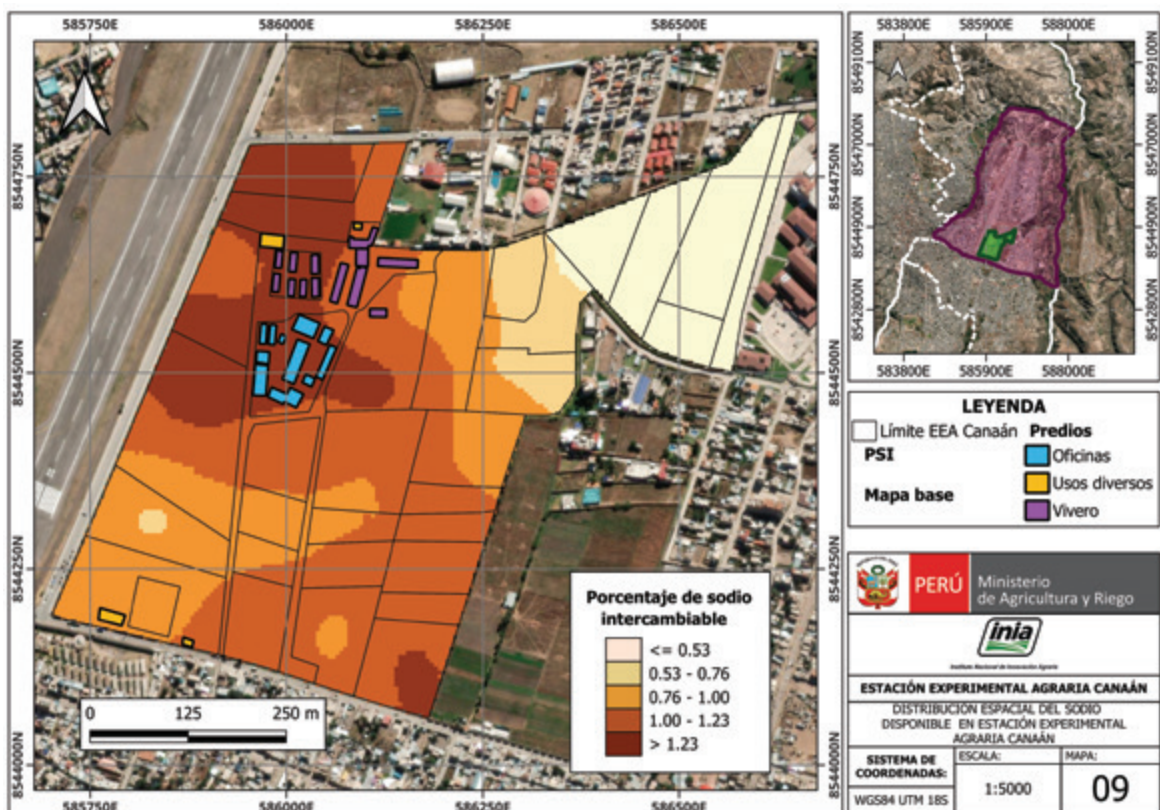
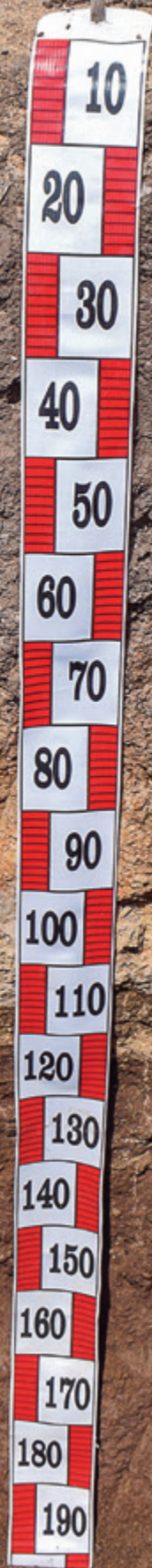


Figura 31. Mapa de variación espacial del porcentaje de sodio intercambiable

SU-02



5. Referencias bibliográficas

- Alam, S. M., Naqvi, S. S. M., y Ansari, R. (1999). Impact of soil pH on nutrient uptake by crop plants. En M. Pessarakli (Ed.), *Handbook of Plant Nutrition* (pp. 51-60). Marcel Dekker, Inc.
- Álvarez-Herrera, J. G., Ruiz-Berrío, H. D., y Acosta-Tova, D. F. (2021). Evaluación geoestadística de atributos hidrofísicos del suelo en la granja Tinguavita, Paipa, Colombia. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 31(1), 127-140. <https://doi.org/10.18359/rcin.5396>
- Atkins, P. W., De Paula, J., y Keeler, J. (2023). *Atkins' physical chemistry*. Oxford university press.
- Barber, S. A. (1995). *Soil nutrient bioavailability: a mechanistic approach*. John Wiley y Sons.
- Bear, F. E., Prince, A. L., y Malcolm, J. L. (1945). *Potassium needs of New Jersey soils*. New Jersey Agricultural Experiment Station
- Bray, R. H. (1958). The correlation of a phosphorus soil test with the response of wheat through a modified Mitscherlich equation. *Soil Science Society of America Journal*, 22(4), 314-317. <https://doi.org/10.2136/sssaj1958.03615995002200040013x>
- Brock, C., Jackson-Smith, D., Kumarappan, S., Culman, S., Doohan, D., y Herms, C. (2021). The prevalence and practice of soil balancing among organic corn farmers. *Renewable Agriculture and Food Systems*, 36(4), 1-10. <https://doi.org/10.1017/S1742170520000381>
- Buresh, R.J., Smithson, P.C., y Hellums, D.T. (1997). Building Soil Phosphorus Capital in Africa. En R. J. Buresh, P. A. Sanchez, y F. Calhoun (Eds.), *Replenishing Soil Fertility in Africa* (pp. 111-149). Soil Science Society of America, Inc; American Society of Agronomy, Inc. https://apps.worldagroforestry.org/Units/Library/Books/PDFs/91_Replenishing_soil_fertility_in_africa.pdf
- Chaganti, V., y Culman, S. (2017). Historical perspective of soil balancing theory and identifying knowledge gaps: A review. *Crop, Forage y Turfgrass Management*, 3(1), 1-7. <https://doi.org/10.2134/cftm2016.10.0072>
- Chinea-Horta, A., y Rodríguez-Izquierdo, L. (2021). Comportamiento geoespacial de algunas propiedades del suelo en el cultivo de la caña de azúcar. *Ingeniería Agrícola*, 11(1). <https://www.redalyc.org/journal/5862/586269368001/html/>
- Coaguila, L., Mataix-Solera, J., Nina, S., García-Carmona, M., y Salazar, E. T. (2025). Soil Degradation Evidence Following a Wildfire in Arequipa's Andean Region, Peru. *Spanish Journal of Soil Science*, 15, 1-13. <https://doi.org/10.3389/sjss.2025.13983>
- Correa, S. W., Mello, C. R., Chou, S. C., Curi, N., y Norton, L. D. (2016). Soil erosion risk associated with climate change at Mantaro River basin, Peruvian Andes. *Catena*, 147, 110-124. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.07.003>
- Cruz-Luis, J. A., Ortiz-Morera, N. C., Quispe-Torres, D. R., Atalaya-Lopez, J. S., Macavilca-Villar, P. M., Ramírez-Aparicio, J. A., Salinas-Rivera, J. L., Escobar-Cuadros, F., Carbajal-Llosa, C. M., Olivarez-Rivera, E. L., Casaretto-Castagnino, D., y Ganoza-Roncal, J. J. (2025). *Atlas de las Estaciones Experimentales Agrarias del INIA*. Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA). <http://hdl.handle.net/20.500.12955/2763>

- Culman, S. W., Brock, C., Doohan, D., Jackson-Smith, D., Herms, C., Chaganti, V. N., Kleinhenz, M., Sprunger, C. D. y Spargo, J. (2021). Base cation saturation ratios vs. sufficiency level of nutrients: A false dichotomy in practice. *Agronomy Journal*, 113(6), 5623-5634. <https://doi.org/10.1002/agj2.20787>
- de Valença, A. W., Vanek, S. J., Meza, K., Ccanto, R., Olivera, E., Scurrah, M., Lantinga, E. A., y Fonte, S. J. (2017). Land use as a driver of soil fertility and biodiversity across an agricultural landscape in the Central Peruvian Andes. *Ecological Applications*, 27(4), 1138–1154. <https://doi.org/10.1002/eap.1508>
- Environmental Protection Agency. (2004). Method 9045D: *Soil and Waste pH, part of Test Methods for Evaluating Solid Waste, Physical/Chemical Methods*. <https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-12/documents/9045d.pdf>
- Fassbender, H. Bornemisza, E. (1994). *Química de suelos con énfasis en suelos de América Latina* (2.ª ed.). Instituto Interamericano para la Cooperación para la Agricultura.
- García, F. O., y Ciampitti, I. A. (2010). Enfoques alternativos para el diagnóstico de fertilidad de suelos el enfoque “tradicional”. *Informaciones Agronómicas*, 3, 17-25. <https://fertilizar.org.ar/wp-content/uploads/2011/09/17.pdf>
- Garbano-León, G., Alemán-Montes, B., Alvarado-Hernández, A., y Henríquez-Henríquez, C. (2017). Validación de modelos geoestadísticos y convencionales en la determinación de la variación espacial de la fertilidad de suelos del Pacífico Sur de Costa Rica. *Investigaciones Geográficas*, (93), 20-41. [dx.doi.org/10.14350/rig.54706](https://doi.org/10.14350/rig.54706)
- Graham, E. R. (1959). *An explanation of theory and methods of soil testing*. Bulletin 734. University of Missouri, Agricultural Experiment Station.
- Halstead, R. L., MacLean, A. J., y Nielsen, K. F. (1958). Ca: Mg ratios in soil and the yield and composition of alfalfa. *Canadian Journal of Soil Science*, 38(2), 85-93. <https://cdnsiencepub.com/doi/10.4141/cjss58-014>
- Havlin, J. L., Tisdale, S. L., Nelson, W. L., y Beaton, J. D. (2016). *Soil fertility and fertilizers*. Pearson Education India.
- Instituto Nacional de Recursos Naturales. (1996). Mapa de suelos del Perú.
- International Organization of Standardization. (1994). *Soil quality - Determination of specific electrical conductivity*. <https://www.iso.org/es/contents/data/standard/01/92/19243.html>
- International Organization of Standardization. (1995). *Soil quality - Determination of total nitrogen - Modified Kjeldahl method*. <https://www.iso.org/standard/19239.html>
- Kopittke, P. M., y Menzies, N. W. (2007). A review of the use of the basic cation saturation ratio and the “ideal” soil. *Soil Science Society of America Journal*, 71(2), 259-265. <https://doi.org/10.2136/sssaj2006.0186>

- Marino, M. A., y Echeverría, H. E. (2018). Umbral de requerimiento de fósforo en suelos Argiudoles y guía para la fertilización de alfalfa (*Medicago sativa* L.). *Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica*, 31, 7-18. <https://fertilizar.org.ar/wp-content/uploads/2021/09/Art-2.pdf>
- McLean, E. O. (1977). Contrasting concepts in soil test interpretation: Sufficiency levels of available nutrients versus basic cation saturation ratios. En T. R. Peck, J. T. Cope Jr., D. A. Whitney, *Soil testing: correlating and interpreting the analytical results* (vol. 29, pp. 39-54). ASA Special Publications <https://doi.org/10.2134/asaspecpub29.c3>
- Moral-García, F. J. (2004). Aplicación de la geoestadística en las ciencias ambientales. *Ecosistemas*, 1(11), 78-86. <https://www.revistaecosistemas.net/index.php/ecosistemas/article/view/582>
- Niebla-Torres, R. E., Barrezueta-Unda, S., Luna-Romero, Á., y Chabla-Carrillo, J. (2021). Aplicación de modelos geoestadísticos para definir la variabilidad de un perfil del suelo. *Revista Metropolitana de Ciencias Aplicadas*, 4(1), 188-195. <https://doi.org/10.62452/zx01j782>
- Pebesma, E. J., y Bivand, R. S. (2005). Classes and methods for spatial data in R. *R News*, 5(2), 9-13. <http://cran.r-project.org/doc/Rnews/>
- Pierre, W. H., y Banwart, W. L. (1973). Excess-Base and Excess-Base/Nitrogen ratio of various crop species and parts of Plants. *Agronomy Journal*, 65(1), 91-96. <https://doi.org/10.2134/agronj1973.00021962006500010028x>
- Quispe, K., Mejía, S., Carbajal, C., Alejandro, L., Verástegui, P., y Solórzano, R. (2024). Spatial variability of soil acidity and lime requirements for potato cultivation in the Huánuco highlands. *Agriculture*, 14(12). <https://doi.org/10.3390/agriculture14122286>
- R Core Team. (2018). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing. <https://www.r-project.org>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2002). Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000, que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de los suelos. Estudio, muestreo y análisis. Diario Oficial de la Federación (31 de diciembre de 2002). <https://www.ordenjuridico.gob.mx/Documentos/Federal/wo69255.pdf>
- Wang, C., y Kuzyakov, Y. (2024). Soil organic matter priming: The pH effects. *Global Change Biology*, 30(6). <https://doi.org/10.1111/gcb.17349>
- Yang, M., Zhou, D., Hang, H., Chen, S., Liu, H., Su, J., Lv, H., Jia, H. y Zhao, G. (2024). Effects of balancing exchangeable cations Ca, Mg, and K on the growth of tomato seedlings (*Solanum lycopersicum* L.) based on increased soil cation exchange capacity. *Agronomy*, 14(3), 1-13. <https://doi.org/10.3390/agronomy14030629>
- Zhang, G. Q. (1999). *Effects of exchangeable soil calcium, magnesium and calcium/magnesium ratios on plant nutrition and growth of lettuce on an ultisol* [Thesis submitted to obtain the degree of Master of Science in Agronomy and Soil Science]. University of Hawai'i at Manoa.

Zhang, T. Q., MacKenzie, A. F., Liang, B. C., y Drury, C. F. (2004). Soil test phosphorus and phosphorus fractions with long-term phosphorus addition and depletion. *Soil Science Society of America Journal*, 68(2), 519-528. <https://doi.org/10.2136/sssaj2004.5190>



Instituto Nacional de Innovación Agraria





D. : Av. La Molina 1981, La Molina
T. : (511) 240-2400
www.gob.pe/inia



PERÚ

Ministerio
de Desarrollo Agrario
y Riego



Instituto Nacional de Innovación Agraria



@INIAPeru