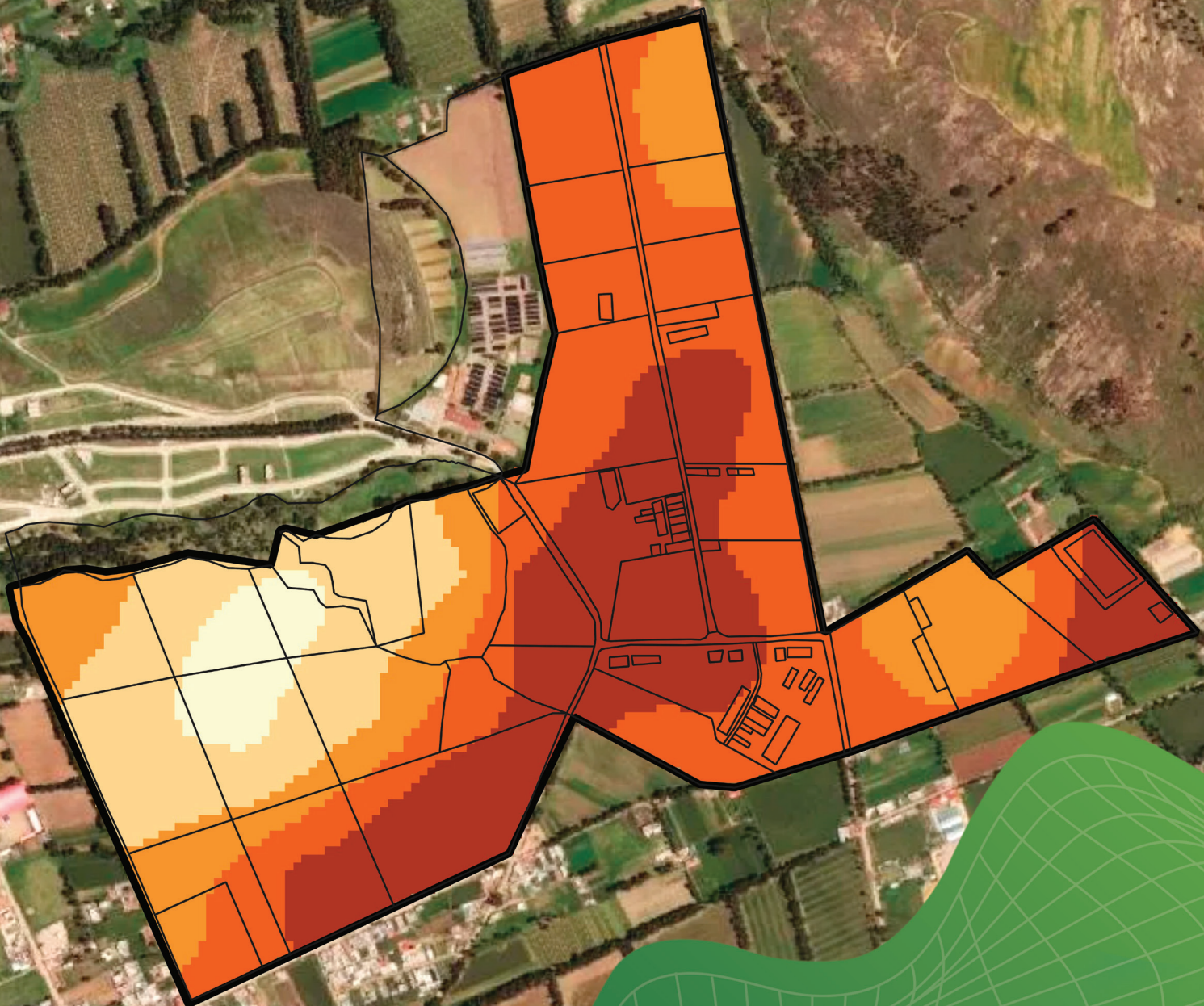


Variación espacial de la fertilidad del suelo en la EEA Santa Ana



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 Santa Ana



VARIACIÓN ESPACIAL DE LA FERTILIDAD DEL SUELO EN LA EEA SANTA ANA

MINISTERIO DE DESARROLLO AGRARIO Y RIEGO

Ministro de Desarrollo Agrario y Riego

Vladimir Germán Cuno Salcedo

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:

Febrero, 2026

Publicado:

Febrero, 2026

Disponible en:

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

ISBN:

978-9972-44-239-1

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 manual por cualquier medio, total o parcialmente, sin permiso expreso

Hecho el Depósito Legal en la Biblioteca Nacional del Perú N° 2026-01106

Autores: Kenyi R. Quispe-Matos, Carlos M. Carbajal-Llosa, Sharon Y. Mejia-Maita, Albert E. Fernandez-Puquio, Ruth L. Mercado-Chinchay, Ruddy A. Ore-Valeriano, Samuel E. Pizarro-Carcausto, Lidiana R. Alejandro-Mendez, Richard A. Solórzano-Acosta, Juancarlos Cruz-Luis / **Editora general:** Cinthia S. Quispe-Apaza / **Revisión de contenido:** Héctor A. Ramírez-Maguiña, Anthony L. Peralta-Guzmán / **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	23
3. Muestreo y análisis de suelos en la EEA Santa Ana	25
3.1. Ubicación de la EEA Santa Ana	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	32
3.6. Análisis de autocorrelación espacial: cómputo del índice de Moran	33
3.7. Interpolación <i>kriging</i> y validación cruzada con indicadores geoestadísticos	34
3.7.1. Generación y ajuste del variograma	34
3.7.2. Interpolación <i>kriging</i>	34
3.7.3. Validación cruzada	34
3.8. Mapeo digital de las propiedades del suelo	37
4. Recomendaciones de manejo en la fertilidad del suelo en la EEA Santa Ana	47
4.1. Índice de saturación de bases catiónicas	47
4.2. Niveles de suficiencia de nutrientes disponibles	49
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 de tecnología, asistencia técnica, conservación y puesta en valor de recursos genéticos, la extensión agropecuaria 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 Código Único de Inversiones N° 2487112, el cual tiene entre sus objetivos evaluar alternativas tecnológicas para el manejo de suelos y agua en la producción agrícola.

La variabilidad espacial de la fertilidad del suelo condiciona la productividad agrícola, la eficiencia en el uso de insumos y la sostenibilidad de los sistemas productivos, especialmente en ambientes heterogéneos. Los enfoques convencionales de análisis, basados en promedios o evaluaciones puntuales, resultan insuficientes para capturar esta heterogeneidad, lo que limita la toma de decisiones agronómicas precisas. En este contexto, la aplicación de modelos geoestadísticos y sistemas de información geográfica (SIG) permite caracterizar e interpretar los patrones espaciales de las propiedades edáficas, proporcionando información técnica clave para el manejo diferenciado, la conservación del suelo y la planificación eficiente de la fertilización.

El presente documento titulado, “Variación espacial de la fertilidad del suelo en la EEA Santa Ana”, 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 detallado del edafosistema en el área de estudio, para facilitar la toma de decisiones en la gestión agrícola sostenible.

M. Sc. Jorge Juan Ganoza Roncal

Presidente Ejecutivo

Instituto Nacional de Innovación Agraria



1. Introducción

La degradación de los suelos en las regiones altoandinas del Perú constituye un problema relevante debido a su impacto directo en la productividad agrícola y la sostenibilidad de los sistemas productivos. La pérdida progresiva de cobertura vegetal contribuye significativamente a este proceso, dado que incrementa la erosión, disminuye la capacidad de retención de agua y compromete la estructura física del suelo (Vanacker et al., 2022). Esta situación se ve intensificada por la alta variabilidad de la fertilidad del suelo y por las prácticas de manejo inadecuadas que reducen la eficiencia de los fertilizantes (Quispe et al., 2024). Asimismo, las bajas temperaturas, propias de estos ecosistemas, reducen la velocidad de descomposición de la materia orgánica, lo que favorece la acumulación de carbono orgánico en el suelo y retrasa la mineralización de nutrientes, limitando su disponibilidad inmediata para los cultivos (Liu et al., 2025). Esta dinámica es propia de los ecosistemas fríos y debe considerarse en el manejo de la fertilidad, dado que influye directamente en la respuesta de los sistemas agrícolas y en la eficiencia de las prácticas de fertilización.

En la provincia de Huancayo, departamento de Junín, la degradación de suelos se ha intensificado como consecuencia de un acelerado proceso de urbanización registrado en las últimas décadas, impulsado por factores económicos, demográficos y sociales. A ello, se suma la deposición atmosférica de elementos tóxicos provenientes de zonas mineras, la cual ha promovido la conversión de tierras agrícolas en áreas urbanas. Como consecuencia, la cobertura vegetal y la capacidad natural de almacenamiento de agua se ha reducido, deteriorando la calidad ambiental y acelerando la degradación del suelo (Haller, 2017).

Frente a este escenario, el monitoreo continuo de la fertilidad del suelo se vuelve esencial para planificar la producción agrícola de manera sostenible y corregir oportunamente deficiencias o excesos en los parámetros edáficos. Sin embargo, la carencia de herramientas técnicas que permitan una interpretación espacial precisa de las propiedades fisicoquímicas del suelo, limita la toma de decisiones en la fertilización de los cultivos.

La integración de enfoques de agricultura de precisión, geoestadística, análisis de suelos y sistemas de información geográfica (SIG) permiten abordar esta limitación. El uso de métodos como la interpolación *kriging*, índice de Moran y análisis de variogramas facilitan la identificación de patrones espaciales, mejoran la interpretación de la variabilidad edáfica y aportan información clave para la gestión diferenciada de los suelos. Esta información constituye una base sólida para diseñar estrategias de fertilización por zonas, optimizando el uso de insumos y contribuyendo a la conservación de la salud del suelo a largo plazo (Culman et al., 2021; Chinea-Horta y Rodríguez-Izquierdo, 2021).

En este contexto, el presente manual tiene como objetivo evaluar la fertilidad del suelo y su variación espacial en la Estación Experimental Agraria Santa Ana, con la finalidad de generar información técnica que contribuya a la planificación agrícola y al fortalecimiento de los sistemas productivos de la región. Para ello, se propone diagnosticar el estado actual de la fertilidad del suelo e identificar sus principales limitantes; elaborar mapas de variabilidad espacial de las propiedades edáficas que permitan reconocer diferencias en la calidad del suelo; así como formular estrategias de manejo de la fertilidad orientadas a optimizar el uso de fertilizantes y enmiendas, incrementar la productividad, y promover la sostenibilidad de los sistemas agrícolas y pecuarios de la estación.



2. Principios fundamentales del análisis de suelos

2.1. Sistemas de interpretación del análisis de suelos

El proceso de recomendación de fertilizantes mediante el 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 (Quispe-Matos et al., 2025).

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 han 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 Santa Ana 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 suelo, limita la absorción de nutrientes 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 (Quispe-Matos et al., 2025).

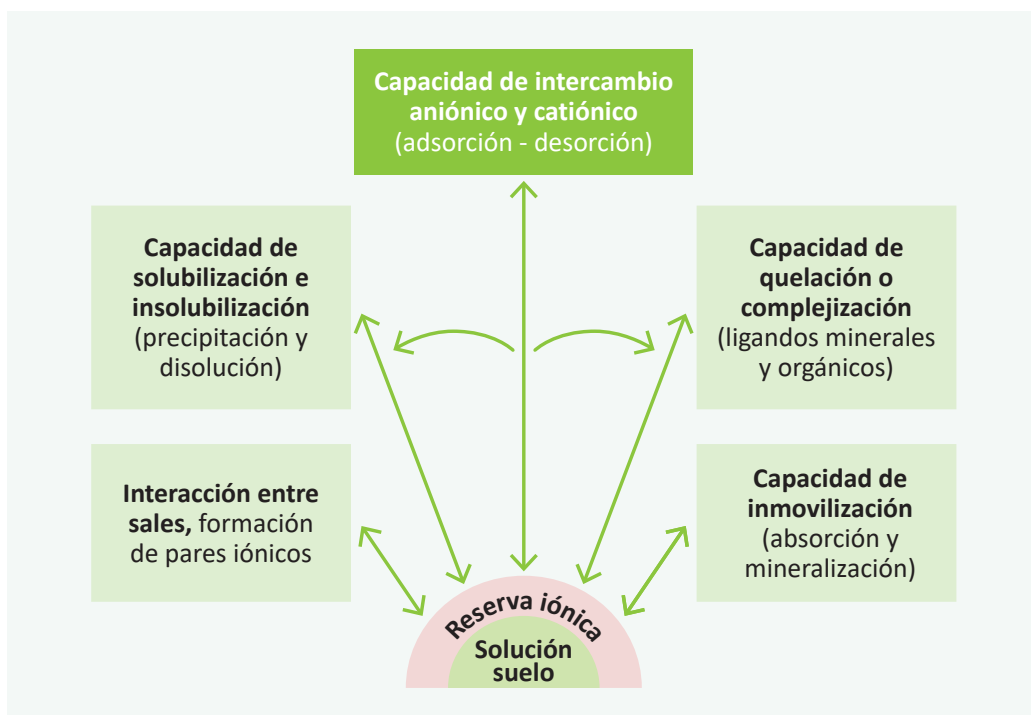


Figura 1. Mecanismos que mantienen en equilibrio los iones en la solución suelo (adaptado de McLean, 1977)

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 capacidad de intercambio catiónico (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 (Quispe-Matos et al., 2025).

El pH del suelo es una de las variables más importantes en la toma de decisiones agronómicas, ya que permite identificar la necesidad de corregir desbalances iónicos. Este parámetro determina si se requiere la aplicación de cal o yeso agrícola para contrarrestar el exceso de Al^{3+} o Na^+ , respectivamente. Ambos insumos contienen alto contenido de calcio (Ca^{2+}) y son las principales herramientas para aumentar la saturación de Ca^{2+} y reducir la de Mg^{2+} , Na^+ y Al^{3+} . La cal y el yeso pueden generar efectos positivos y negativos sobre las propiedades del suelo y la producción vegetal, principalmente a través de tres mecanismos: elevación del pH, incremento de la saturación de Ca^{2+} o aumento de los niveles de azufre (S) (Espinosa y Molina, 1999). El criterio de uso y las respuestas en el suelo se ilustran en la Figura 2.

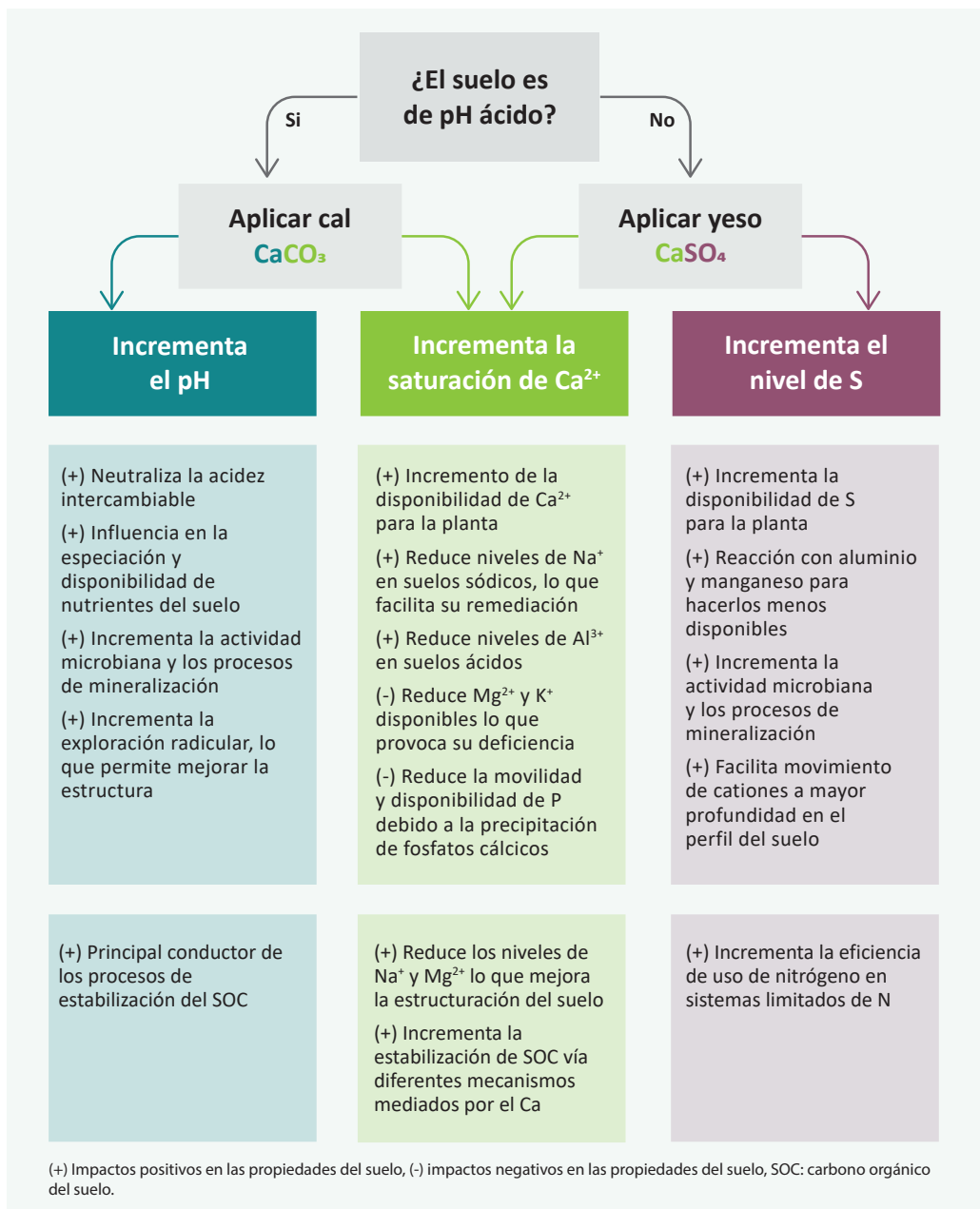


Figura 2. Criterios para el uso de la cal y el yeso, y su respuesta en la relación de saturación de cationes básicos (adaptado de Culman et al., 2021)

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 (Quispe-Matos et al., 2025).

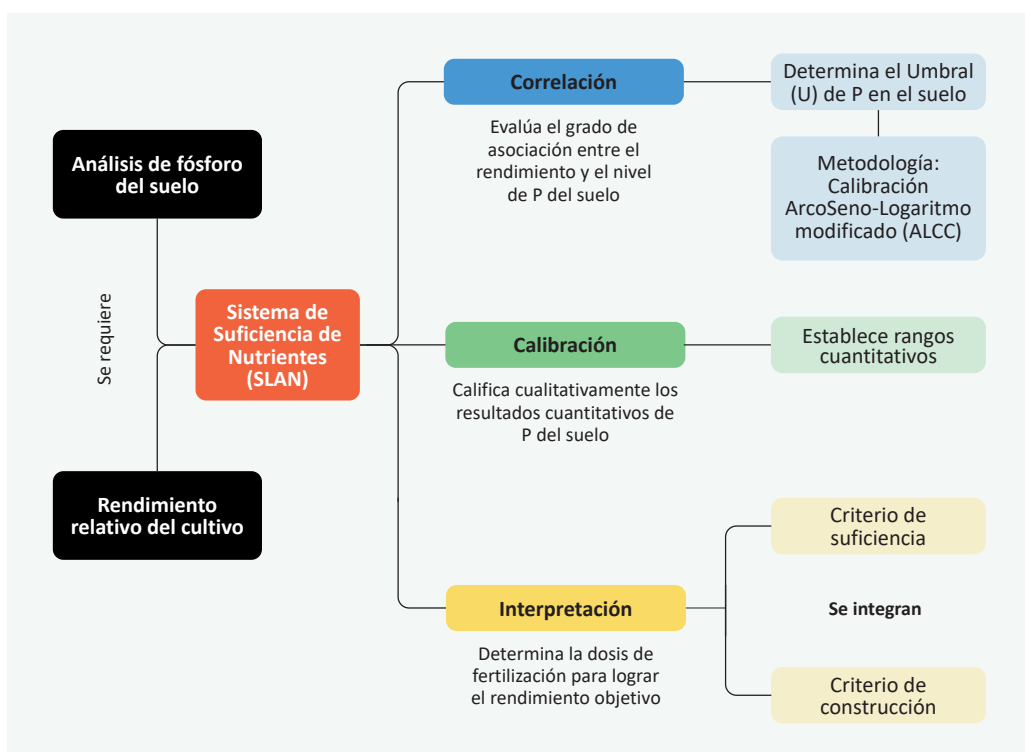


Figura 3. Esquema modelo para la implementación del sistema de suficiencia de nutrientes para el fósforo del suelo

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, para calcular los requerimientos de mantenimiento y de construcción de fertilidad, es necesario conocer previamente la eficiencia de uso de nutrientes y la necesidad de construcción de fertilidad (NCF), las cuales dependen de las características propias del suelo donde se realiza el estudio.

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 los niveles 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 papa, considerando un suelo con alto contenido de este nutriente.

Ejemplo práctico:

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

Para este cultivo, el umbral crítico o nivel de suficiencia es de 18 mg de P-Bray 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 80 %.

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

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

$$\text{Rendimiento alcanzado} = \frac{80 \times 30 \text{ t ha}^{-1}}{100} = 24 \text{ t ha}^{-1}$$

Este resultado indica que el nivel actual de P (15 mg kg⁻¹) está por debajo del umbral crítico (18 mg kg⁻¹), lo que limita el rendimiento a solo el 80 % del potencial, 24 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, considerar que este incremento es el 35 % del rendimiento alcanzado.

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

$$\text{Incremento de raíces y brotes} = 0.35 \times 24 \text{ t ha}^{-1} = 8.4 \text{ t ha}^{-1}$$

Además de las 24 t ha⁻¹ de producción, el cultivo genera 8.4 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:

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

$$\text{Rendimiento objetivo} = 24 \text{ t ha}^{-1} + 8.4 \text{ t ha}^{-1} = 32.4 \text{ t ha}^{-1}$$

Cuarto paso: calcular el requerimiento de P utilizando la fórmula 5. Para este cálculo y con fines prácticos se considera una extracción de 0.7 kg de fósforo por tonelada de producción.

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

$$\text{Requerimiento de P} = 0.7 \text{ kg de P t}^{-1} \times 32.4 \text{ t ha}^{-1} = 22.68 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

A partir de estos resultados, se interpreta que el criterio de suficiencia estima un requerimiento de 22.68 kg de P ha⁻¹ para alcanzar un rendimiento objetivo de 32.4 t ha⁻¹, el cual está conformado por 8.4 t ha⁻¹ de biomasa radicular y vegetativa, y 24 t ha⁻¹ de producción.

c. Aplicación de los criterios de mantenimiento y construcción

El criterio de mantenimiento se aplica cuando el análisis del suelo 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 a los criterios 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, el uso de este criterio 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 en el cultivo de papa para la aplicación del criterio de mantenimiento, y criterios de mantenimiento y construcción.

Ejemplo práctico (criterio de mantenimiento)

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

Para este cultivo, el umbral crítico o nivel de suficiencia es de 18 mg de P-Bray 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-Bray por kg de suelo permite obtener un rendimiento relativo (RR) del 50 %.

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

$$\text{Rendimiento alcanzado} = \frac{50 \times 30 \text{ t ha}^{-1}}{100} = 15 \text{ t ha}^{-1}$$

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.

$$\text{Incremento de raíces y brotes} = 0.35 \times 15 \text{ t ha}^{-1} = 5.25 \text{ t ha}^{-1}$$

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

$$\text{Rendimiento objetivo} = 15 \text{ t ha}^{-1} + 5.25 \text{ t ha}^{-1} = 20.25 \text{ t ha}^{-1}$$

Cuarto paso: calcular el requerimiento de P utilizando la fórmula 5. Para este cálculo y con fines prácticos se considera una extracción de 0.7 kg de fósforo por tonelada de producción.

$$\text{Requerimiento de P} = 0.7 \text{ kg de P t}^{-1} \times 20.25 \text{ t ha}^{-1} = 14.18 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

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 %.

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

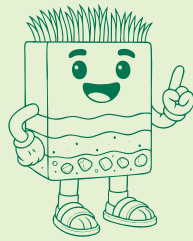
$$\text{RM de P} = \frac{14.18 \text{ kg de P ha}^{-1}}{0.30} = 47.27 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

De esta manera, el requerimiento de mantenimiento de fósforo en el cultivo de papa es de 47.27 kg por hectárea.

Ejemplo práctico (criterios de mantenimiento y construcción)

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

Para este cultivo, el umbral crítico o nivel de suficiencia es de 18 mg de P-Bray 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-Bray por kg de suelo permite obtener un rendimiento relativo (RR) del 30 %.



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-Bray por kg de suelo, utilizando la fórmula 2:

$$\text{Rendimiento alcanzado} = \frac{30 \times 30 \text{ t ha}^{-1}}{100} = 9 \text{ t ha}^{-1}$$

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.

$$\text{Incremento de raíces y brotes} = 0.35 \times 9.0 \text{ t ha}^{-1} = 3.15 \text{ t ha}^{-1}$$

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

$$\text{Rendimiento objetivo} = 9.0 \text{ t ha}^{-1} + 3.15 \text{ t ha}^{-1} = 12.15 \text{ t ha}^{-1}$$

Cuarto paso: calcular el requerimiento de P utilizando la fórmula 5. Para este cálculo y con fines prácticos se considera una extracción de 0.7 kg de fósforo por tonelada de producción.

$$\text{Requerimiento de P} = 0.7 \text{ kg de P t}^{-1} \times 12.15 \text{ t ha}^{-1} = 8.51 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

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 %.

$$\text{RM de P} = \frac{8.51 \text{ kg de P ha}^{-1}}{0.20} = 42.55 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

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 12 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.

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

$$\text{RC} = 1.5 \text{ mg de P kg}^{-1} \times \frac{12 \text{ kg de P ha}^{-1}}{1 \text{ mg de P kg}^{-1}} = 18 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

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

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

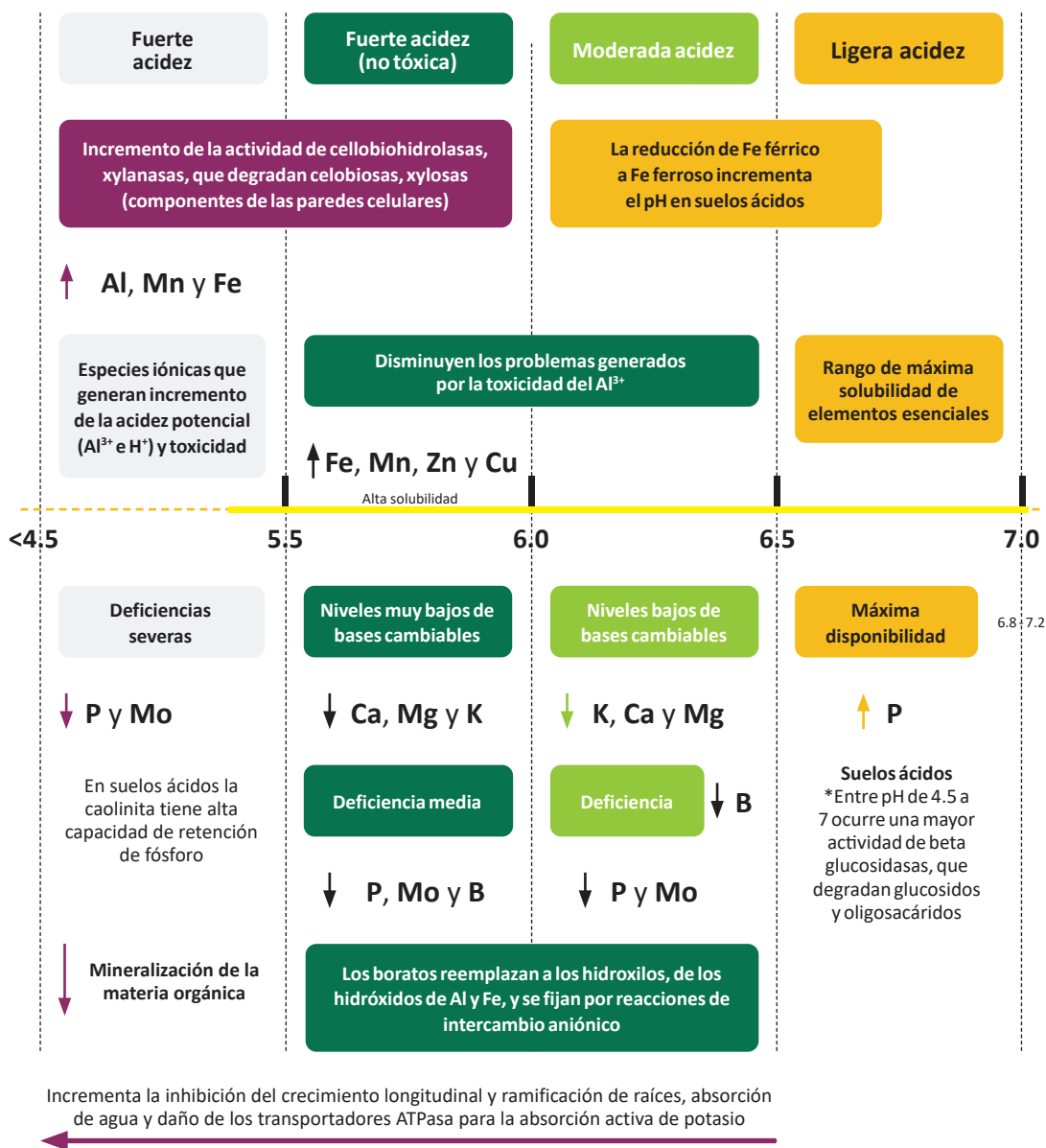
$$\text{Dosis de fertilización de P} = 42.55 \text{ kg de P ha}^{-1} + 18 \text{ kg de P ha}^{-1} = 60.55 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

De esta manera, el requerimiento de mantenimiento y construcción de fósforo en el cultivo de papa es 60.55 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 presenta un modelo gráfico de diagnóstico de la fertilidad del suelo en condiciones de pH ácidos según Wang y Kuzyakov (2024) y Alam et al. (1999).



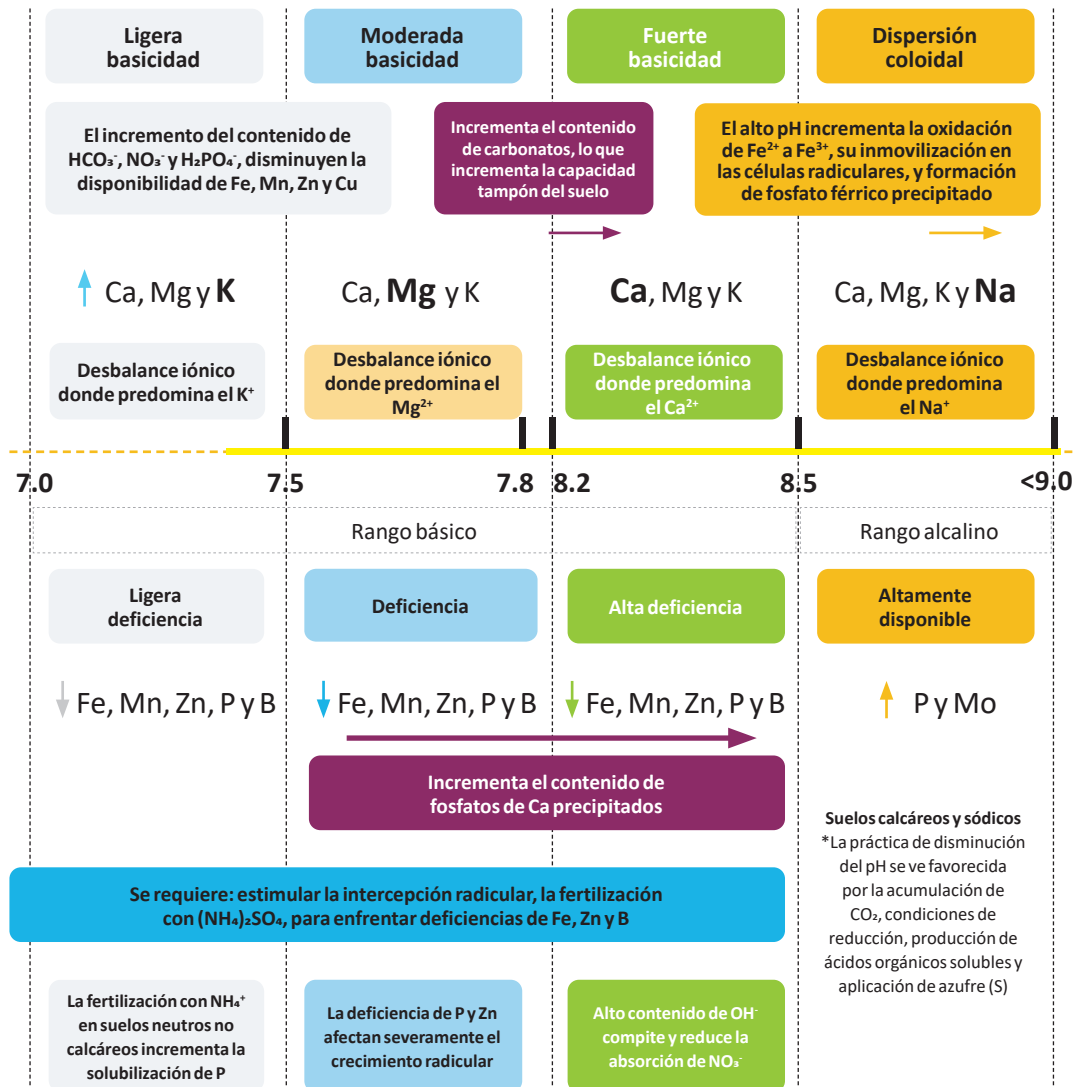


Figura 4. Diagnóstico de la fertilidad del suelo en función al pH

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 empírico (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 Santa Ana

3.1. Ubicación de la EEA Santa Ana

La EEA Santa Ana presenta suelos de tipo Leptosol éútrico-Cambisol éútrico, los cuales se han desarrollado a partir de rocas sedimentarias (calizas y lutitas) y rocas volcánicas (Instituto Nacional de Recursos Naturales [INRENA], 1996). Además, cuenta con un centro experimental, con una extensión total de 70.58 ha, siendo los cultivos priorizados: el tarwi (*Lupinus mutabilis* Sweet), la alcachofa (*Cynara scolymus* L.), la papa (*Solanum tuberosum* L.), entre otros.

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 Junín. La EEA Santa Ana se encuentra en el distrito de El Tambo, en la provincia de Huancayo, en el departamento de Junín (Figura 5), en la región Quechua a 3 300 m s. n. m. con precipitaciones anuales de hasta 1000 mm y temperaturas medias anuales que varían entre los 12 a 17 °C (Cruz-Luis et al., 2025).

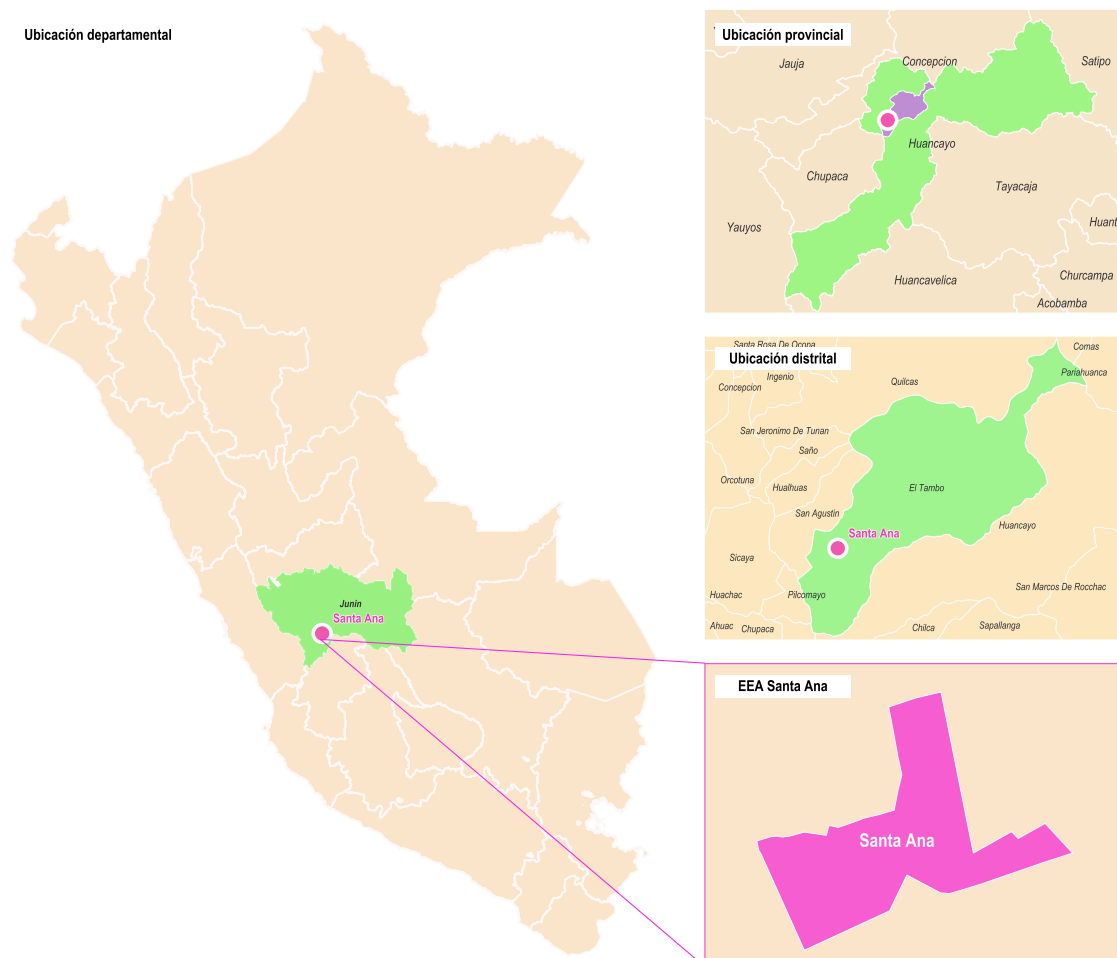


Figura 5. Ubicación de la EEA Santa Ana

3.2. Muestreo estratificado del suelo

Con el objetivo de obtener una representación espacial adecuada de las condiciones edáficas en la EEA Santa Ana, 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).

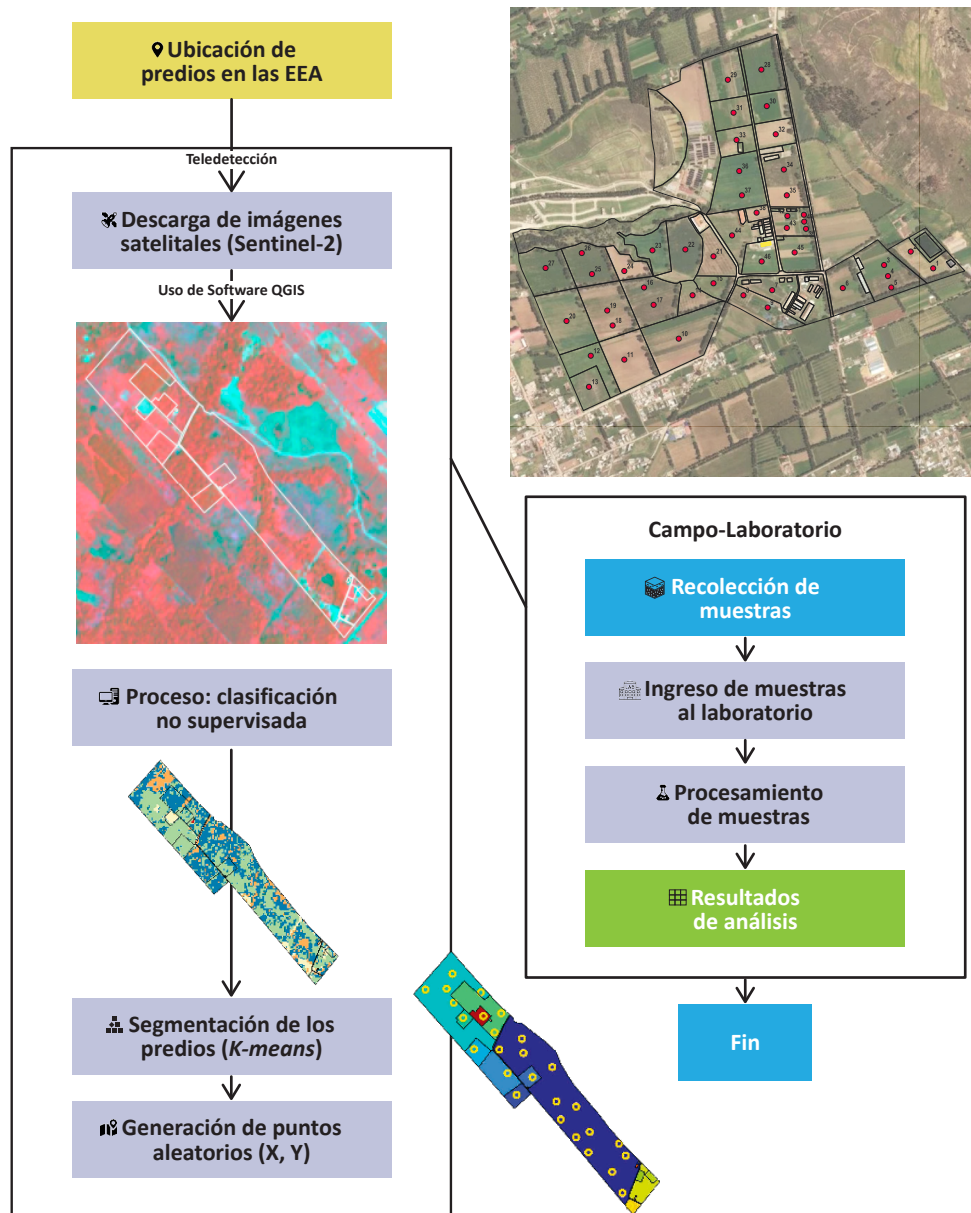


Figura 6. Flujo de trabajo seguido para la determinación de los puntos de muestreo

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 las 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. Se identificaron en total 46 puntos de muestreo de suelos, como se observa en la Figura 7.

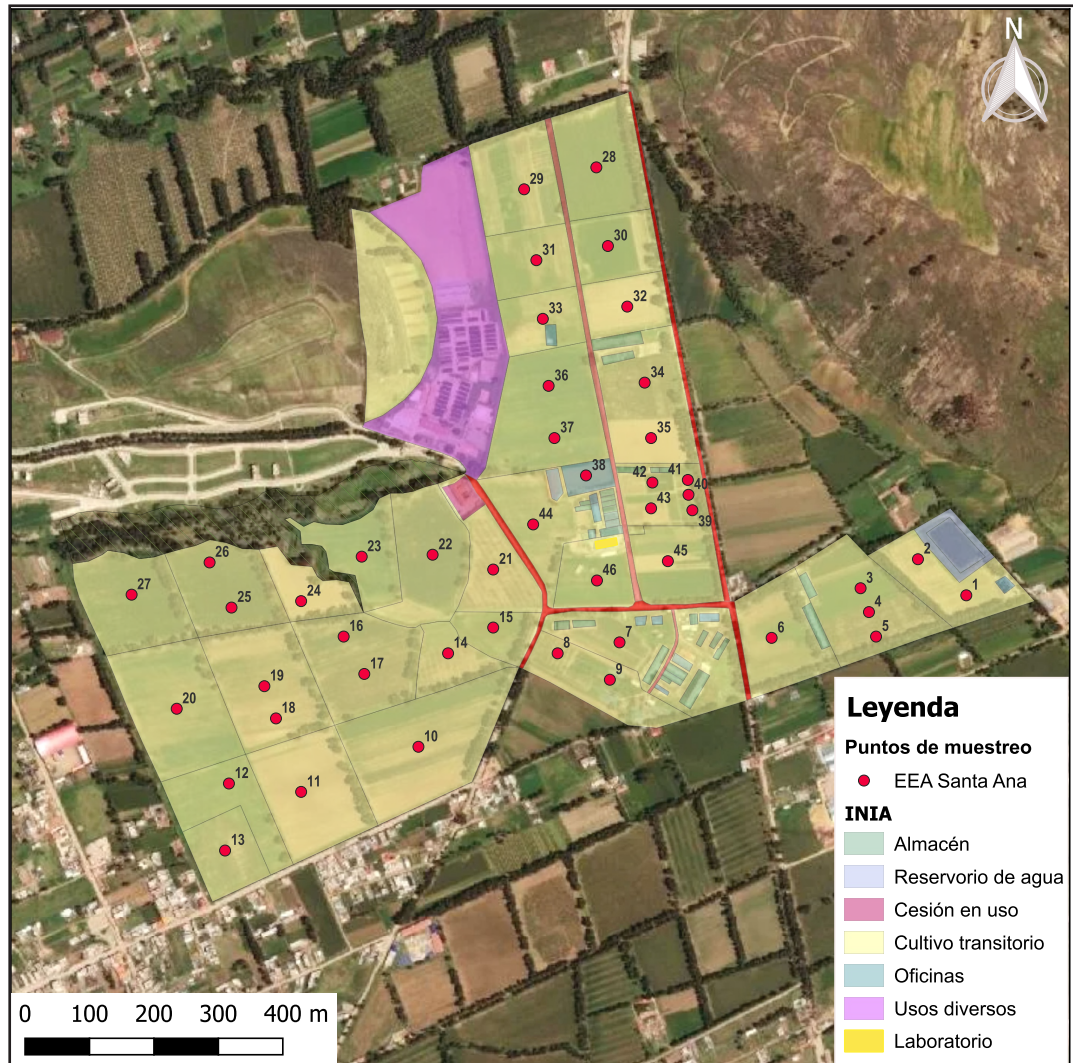


Figura 7. Puntos de muestreo de suelos en la EEA Santa Ana

3.2.2. Muestreo de suelos en los puntos identificados

Una vez identificadas las coordenadas de los 46 puntos de muestreo, los pasos que se siguieron para la colecta de muestras fueron los siguientes (Figura 8):

- Retirar la hojarasca y vegetación de la superficie del suelo.
- Limpiar y desinfectar la superficie de la pala.
- Hacer un hoyo en forma de “V” de 30 cm de profundidad y área de 20 x 20 cm aproximadamente.
- 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.
- Eliminar los residuos de los bordes de la pala para evitar contaminación.
- Depositar la muestra en un balde o contenedor.
- Desterronar la muestra y eliminar raíces, restos orgánicos u otros contaminantes.
- Tomar una porción aproximada de 1 kg en dos bolsas de plástico, colocando entre estas la cartilla de identificación.



Figura 8. Proceso del muestreo de suelos. A) Limpieza y realización del hoyo, B) colecta del suelo, C) desterronamiento y eliminación de raicillas, y D) separación y etiquetado de la muestra (adaptado de Díaz-Chuquizuta et al., 2025)

3.3. Análisis de suelos

Una vez obtenidas las muestras, estas deben ser llevadas a un laboratorio de análisis de suelos, preferentemente que cuente con métodos acreditados. En este trabajo, las muestras fueron llevadas al Laboratorio de Suelos, Aguas y Foliare de la EEA Santa Ana para su procesamiento. El primer pretratamiento realizado fue el secado de las muestras a temperatura de 35 °C, durante 48 horas. Posteriormente, se procedió con los análisis correspondientes (Tabla 1)

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

Parámetro	Método de análisis	Referencias
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 for Standardization (ISO, 1994)
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 Bray y Kurtz	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 de la caracterización edáfica de la EEA Santa Ana (Tabla 2) muestran que los suelos de la EEA presentan, en general, una textura franca con un 41.53 % de arena, 38.05 % de limo y 20.43 % de arcilla promedio. La variabilidad de la fracción arenosa es moderada (CV = 20.82 %), mientras que la del limo y la arcilla son media a moderada (CV = 16.41 % y 22.80 %, respectivamente), lo que indica una textura relativamente homogénea, sin grandes contrastes litológicos dentro de la estación. Esta condición favorece una distribución más uniforme de la humedad y los nutrientes en el perfil del suelo, en comparación con zonas con texturas más contrastantes.

El pH del suelo presenta un valor promedio de 6.09 ± 0.35 (CV = 5.79 %), con valores entre 5.25 y 6.88, lo que corresponde a un medio ligeramente ácido. Este rango favorece la disponibilidad de la mayoría de los nutrientes esenciales, aunque en los sectores con valores más bajos podría requerirse un monitoreo continuo para evitar la solubilización excesiva de aluminio (Al^{3+}) y otros elementos potencialmente tóxicos.

La conductividad eléctrica (CE) presenta valores bajos a moderados, con un promedio de $0.30 \text{ dS m}^{-1} \pm 0.12$ (CV = 40.44 %) y un rango entre 0.13 y 0.75 dS m^{-1} , lo cual indica que, en general, no existen problemas de salinidad en la estación. Sin embargo, la asimetría positiva (*skewness* = 1.65) sugiere la presencia de algunos sectores con niveles algo superiores a la media.

El contenido de materia orgánica (MO) es bajo a medio, con un promedio de $2.31 \% \pm 0.50$ (CV = 21.59 %) y valores mínimos de 1.48 %. Esta condición refleja una fertilidad orgánica limitada a moderada, lo cual puede deberse tanto a la dinámica natural de los suelos de la sierra como a una limitada incorporación de residuos orgánicos. De manera consistente, el nitrógeno total (N) presenta un valor promedio de $0.11 \% \pm 0.02$ (CV = 21.75 %), lo que indica niveles moderadamente bajos pero uniformes, dada su baja variabilidad relativa.

En cuanto a la fertilidad química, los niveles de fósforo disponible (P) son moderados, con un promedio de $30.11 \text{ mg kg}^{-1} \pm 11.29$ (CV = 37.48 %) y valores entre 7.47 y 57.88 mg kg^{-1} , mostrando una heterogeneidad espacial media. El potasio disponible (K) presenta una mayor variabilidad (CV = 43.61 %), con un promedio de $108.38 \text{ mg kg}^{-1} \pm 47.26$, y valores que van desde 57.88 hasta $335.42 \text{ mg kg}^{-1}$, evidenciando diferencias marcadas entre sectores de la estación.

El aluminio intercambiable (Al^{3+}) muestra un promedio de $4.30 \text{ cmol kg}^{-1} \pm 2.54$ (CV = 59.16 %), con valores entre 0.27 y $9.46 \text{ cmol kg}^{-1}$. Aunque el promedio no indica problemas generalizados de toxicidad por Al^{3+} , los valores máximos sugieren que existen sectores puntuales con alta saturación de aluminio, los cuales podrían generar restricciones al crecimiento radicular y afectar la disponibilidad de nutrientes en suelos más ácidos.

En síntesis, los suelos de la EEA Santa Ana se caracterizan por una textura franca relativamente homogénea, pH ligeramente ácido, bajo contenido de materia orgánica y nitrógeno, niveles moderados de fósforo y potasio, presencia puntual de aluminio intercambiable elevado y sin problemas significativos de salinidad. Estas condiciones sugieren la necesidad de mejorar el contenido de materia orgánica mediante la incorporación de residuos o enmiendas, y de monitorear el pH y el aluminio intercambiable en las zonas más susceptibles, con el fin de optimizar la fertilidad del suelo y el desarrollo de los cultivos en la estación.

Tabla 2. Estadísticos descriptivos de los parámetros fisicoquímicos del suelo analizados en la EEA Santa Ana

Variable	Unidad	Media	SD	CV	Mínimo	Mediana	Máximo	Skewness
pH	-	6.09	0.35	5.79	5.25	6.08	6.88	-0.12
CE	dS m ⁻¹	0.30	0.12	40.44	0.13	0.29	0.75	1.65
MO	%	2.31	0.50	21.59	1.48	2.29	4.57	2.02
P disponible	mg kg ⁻¹	30.11	11.29	37.48	7.47	30.80	57.88	0.02
K disponible	mg kg ⁻¹	108.38	47.26	43.61	57.88	98.14	335.42	2.67
Al ³⁺	cmol kg ⁻¹	4.30	2.54	59.16	0.27	4.34	9.46	0.16
N total	%	0.11	0.02	21.75	0.07	0.11	0.23	2.10
Arena	%	41.53	8.65	20.82	22.58	41.41	56.46	-0.22
Arcilla	%	20.43	4.66	22.80	10.83	20.16	34.78	0.63
Limo	%	38.05	6.25	16.41	27.42	37.50	58.71	0.80

CE: conductividad eléctrica en extracto de saturación, CV: coeficiente de variación, Máx.: valor máximo, Mín.: valor mínimo, MO: materia orgánica del suelo, SD: desviación estándar, *skewness*: asimetría.

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.

Requerimientos 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 (ej. 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 los datos:** realizar un análisis exploratorio de datos para obtener una visión general de las principales características del conjunto de datos. Para ello, calcular medidas de tendencia central, como la media y la mediana, y evaluar la dispersión mediante la desviación estándar. Asimismo, emplear diagramas de caja para identificar 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 (ej. 5 m x 5 m, dependiendo de la resolución deseada).
- f. Generar el índice de Moran (Fórmula 9) y el p-valor.

$$I = \sum_n^1 ij \dots(9)$$

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 **Sill-nugget** (PSV).

3.7.2. Interpolación *kriging*

- a. Configurar los parámetros de interpolación en **Smart-Map**.
- b. Seleccionar la variable y el modelo ajustado.
- c. Seleccionar el método de interpolación: *kriging* ordinario.
- d. Generar el mapa rasterizado.
- e. 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:

- a. **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.

b. Coeficiente 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.

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

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.

La caracterización geoestadística de las propiedades fisicoquímicas del suelo en la EEA Santa Ana permitió identificar estructuras espaciales bien definidas en la mayoría de las variables analizadas, lo que evidencia una organización espacial significativa y una base sólida para la elaboración de mapas temáticos de fertilidad (Tabla 3). En general, las variables presentaron ajustes satisfactorios a modelos gaussianos, esféricos o exponenciales, con rangos de influencia entre 469 y 828 m, lo que sugiere una continuidad espacial amplia dentro del área experimental.

Las propiedades texturales evidenciaron un comportamiento espacial diferenciado. La fracción arena se ajustó a un modelo esférico, presentando un coeficiente de determinación moderado ($R^2 = 0.67$) y un rango cercano a 735 m, lo que indica una dependencia espacial media y una variabilidad moderada. El limo se ajustó mejor al modelo exponencial, con un bajo coeficiente de determinación ($R^2 = 0.16$), lo que sugiere una limitada capacidad predictiva y una alta variabilidad espacial. Por su parte, la arcilla se ajustó a un modelo gaussiano con un coeficiente intermedio ($R^2 = 0.42$), evidenciando una dependencia espacial moderada y una distribución relativamente homogénea, aunque con variaciones locales más marcadas.

En cuanto a las propiedades químicas, el pH mostró una dependencia espacial muy fuerte ($R^2 = 0.85$) modelizada mediante una función gaussiana, con un rango de 735 m. Este resultado indica una variación suave y continua del pH a lo largo de la estación, lo que favorece la elaboración de mapas de reacción del suelo altamente confiables.

Las variables asociadas a la fertilidad del suelo mostraron contrastes notables. La materia orgánica (MO) se ajustó a un modelo lineal, con un rango de 469 m y un R^2 de 0.77, indicando una dependencia espacial moderada y una transición gradual entre zonas con diferentes niveles de materia orgánica. El nitrógeno total (N), en cambio, presentó un ajuste muy bajo ($R^2 = 0.15$) y un modelo gaussiano con parámetros nulos, lo que refleja una estructura espacial débil y una alta variabilidad aleatoria, posiblemente asociada al manejo diferenciado de residuos orgánicos o variaciones microambientales.

Entre los nutrientes, el fósforo disponible (P) mostró un comportamiento espacial moderado ($R^2 = 0.51$) bajo un modelo exponencial, con un rango de 828 m. Aunque la variabilidad aleatoria es significativa ($C_0/C_0+C = 0.35$), la estructura espacial detectada permite generar mapas útiles para orientar estrategias de fertilización fosfatada sitio-específicas. El potasio disponible (K^+), con un modelo gaussiano y un R^2 de 0.41, evidenció una dependencia espacial baja, lo que sugiere una distribución heterogénea influida por factores de manejo y movilidad limitada del K^+ en el suelo.

El aluminio intercambiable (Al^{3+}) destacó por su alta dependencia espacial ($R^2 = 0.98$) ajustada a un modelo esférico, con un rango de 490 m. Este patrón indica que la variabilidad del Al^{3+} está controlada por procesos edáficos consistentes a nivel local. Esta distribución permite identificar con precisión los sectores donde podrían presentarse riesgos de toxicidad por aluminio. Por consiguiente, la delimitación espacial es útil para definir zonas de aplicación de enmiendas calcáreas y mejorar la disponibilidad de nutrientes en suelos ácidos.

En conjunto, los resultados muestran que los suelos de la EEA Santa Ana presentan una organización espacial variable, con una estructura moderada a fuerte en algunas propiedades texturales y químicas, particularmente en arena, arcilla, pH y Al^{3+} , lo que respalda el uso de herramientas geoestadísticas para la zonificación edáfica y la gestión sitio-específica de la fertilidad del suelo. No obstante, la baja estructura espacial del limo, nitrógeno total y el potasio disponible sugiere la necesidad de reforzar el muestreo o combinar las interpolaciones con análisis complementarios, a fin de mejorar la precisión en la toma de decisiones agronómicas.

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

Variable	Modelo	Nugget (C_0)	Sill (C_0+C)	Range (m)	Cross-validation	
					RMSE	R^2
Arena	<i>Spherical</i>	0.63	1.08	735.47	4.90	0.67
Limo	<i>Exponential</i>	0.07	1.56	735.17	0.43	0.16
Arcilla	<i>Gaussian</i>	0.01	1.32	735.52	4.73	0.42
pH	<i>Gaussian</i>	0.07	0.15	735.47	0.00	0.85
CE	<i>Spherical</i>	0	0.15	828.39	0.12	0.20
MO	<i>Linear</i>	0.07	0.14	469.14	0.00	0.77
N total	<i>Gaussian</i>	0	0	828.39	0.02	0.15
P disponible	<i>Exponential</i>	0.52	1.49	828.39	4.77	0.51
K disponible	<i>Gaussian</i>	0.71	0.81	734.83	0.88	0.41
Al^{3+}	<i>Spherical</i>	1.93	7.44	490.47	0.23	0.98

CE: conductividad eléctrica en extracto de saturación, MO: materia orgánica del suelo, RMSE: raíz del error cuadrático medio, R^2 : coeficiente de determinación.

3.8. Mapeo digital de las propiedades del suelo

Los mapas generados para la EEA Santa Ana (Figuras 9-16) muestran una clara diferenciación espacial de las propiedades edáficas que condicionan la fertilidad del suelo y su manejo agronómico. Los resultados indican que los suelos de la estación presentan un patrón de acidez moderada, con valores de pH que varían entre ligeramente ácidos y neutros, lo que sugiere un entorno químico generalmente favorable para la disponibilidad de nutrientes esenciales. Sin embargo, en los sectores de mayor acidez, se evidencia la presencia de aluminio intercambiable, elemento que podría restringir el desarrollo radicular, y la absorción de fósforo y calcio en condiciones de humedad alta.

La distribución de la conductividad eléctrica muestra valores bajos en la mayoría del área (Figura 10), reflejando una escasa presencia de sales solubles y, por tanto, una limitada disponibilidad de nutrientes en la solución del suelo. Este patrón sugiere la presencia de suelos de baja fertilidad química, donde la reposición de nutrientes mediante fertilización es clave para sostener la productividad.

En cuanto a la fertilidad química, los mapas de fósforo (Figura 18) y potasio disponible (Figura 12) reflejan una notable heterogeneidad espacial. El P presenta gradientes bien definidos, con zonas de mayor concentración asociadas a áreas históricamente manejadas con aplicaciones localizadas de fertilizantes, lo que ha generado una distribución desigual de la fertilidad fosfatada. Este patrón, junto con la dispersión del potasio disponible, evidencia la necesidad de ajustar las dosis de fertilización mediante esquemas sitio-específicos que optimicen el uso de insumos y eviten tanto deficiencias como excesos. En contraste, la materia orgánica y el nitrógeno total muestran una distribución irregular y poco estructurada, con concentraciones altas que reflejan la influencia directa del manejo y de los procesos biológicos.

Las fracciones texturales (Figuras 14, 15 y 16) presentan una organización espacial diferenciada, que permite identificar patrones de distribución contrastantes. La arcilla se concentra en sectores específicos, asociados a texturas más finas y potencial drenaje lento. En contraste, los mayores contenidos de arena se localizan principalmente en áreas más elevadas o mejor aireadas, mientras que el limo presenta una distribución más heterogénea. Esta transición textural condiciona la dinámica hídrica del suelo y la respuesta a las enmiendas, permitiendo delimitar unidades con distinto comportamiento físico y potencial productivo.

En conjunto, los gradientes edáficos observados en la EEA Santa Ana reflejan un paisaje agrícola de alta variabilidad espacial, donde la integración de los mapas de pH, fósforo, potasio, materia orgánica y textura constituye una herramienta clave para la zonificación de la fertilidad y el diseño de estrategias de manejo diferenciado.

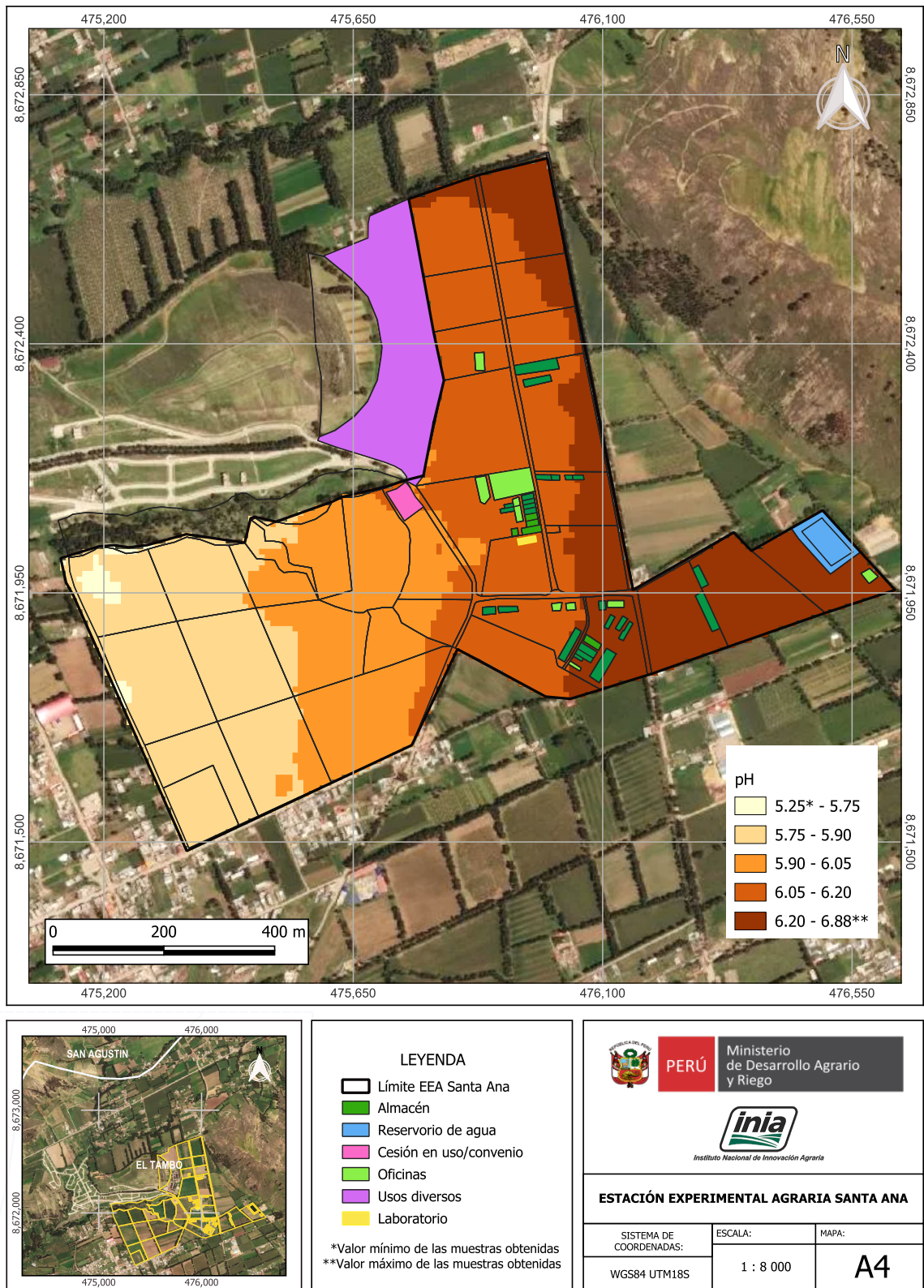


Figura 9. Mapa de variación espacial del pH

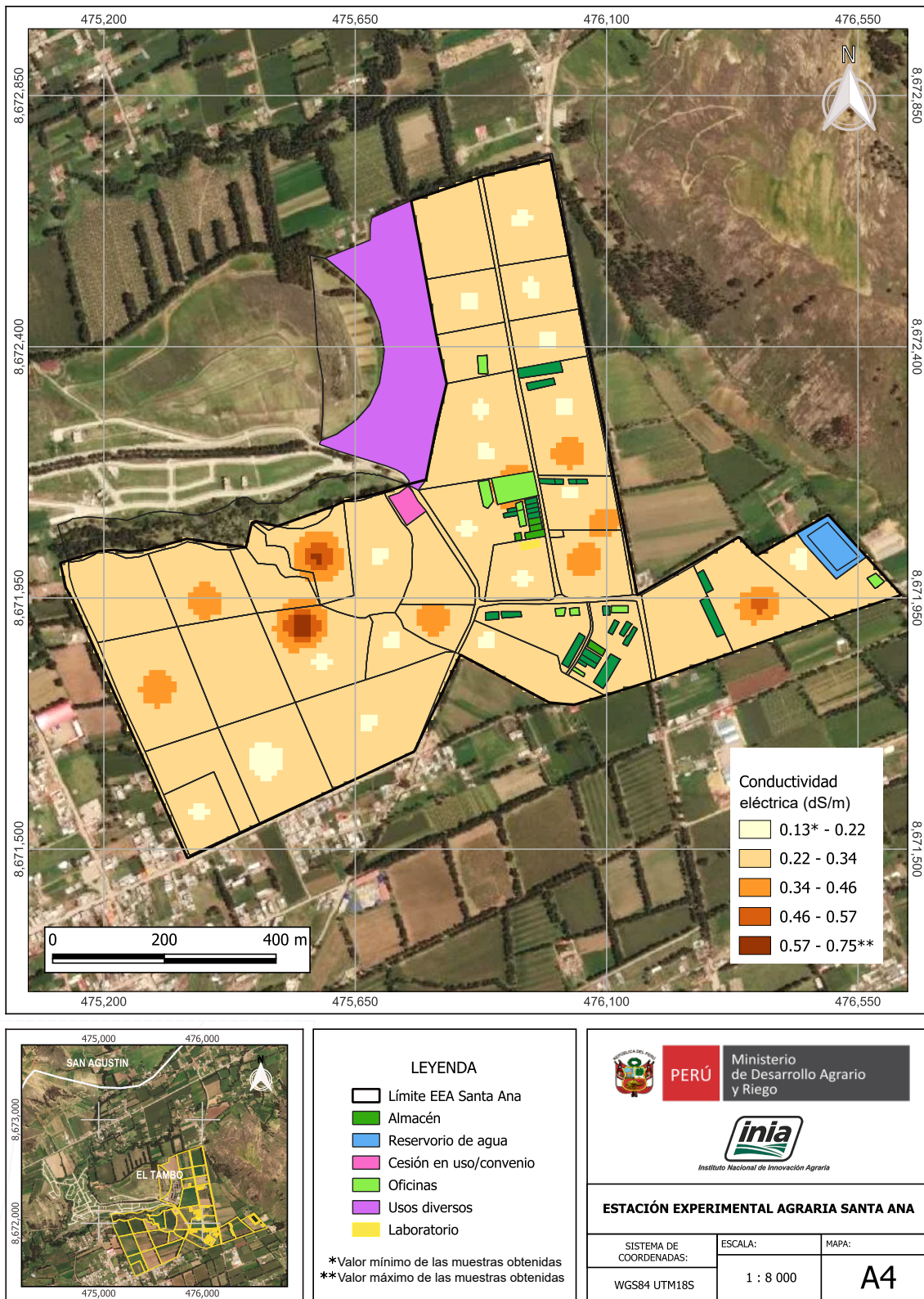


Figura 10. Mapa de variación espacial de la conductividad eléctrica

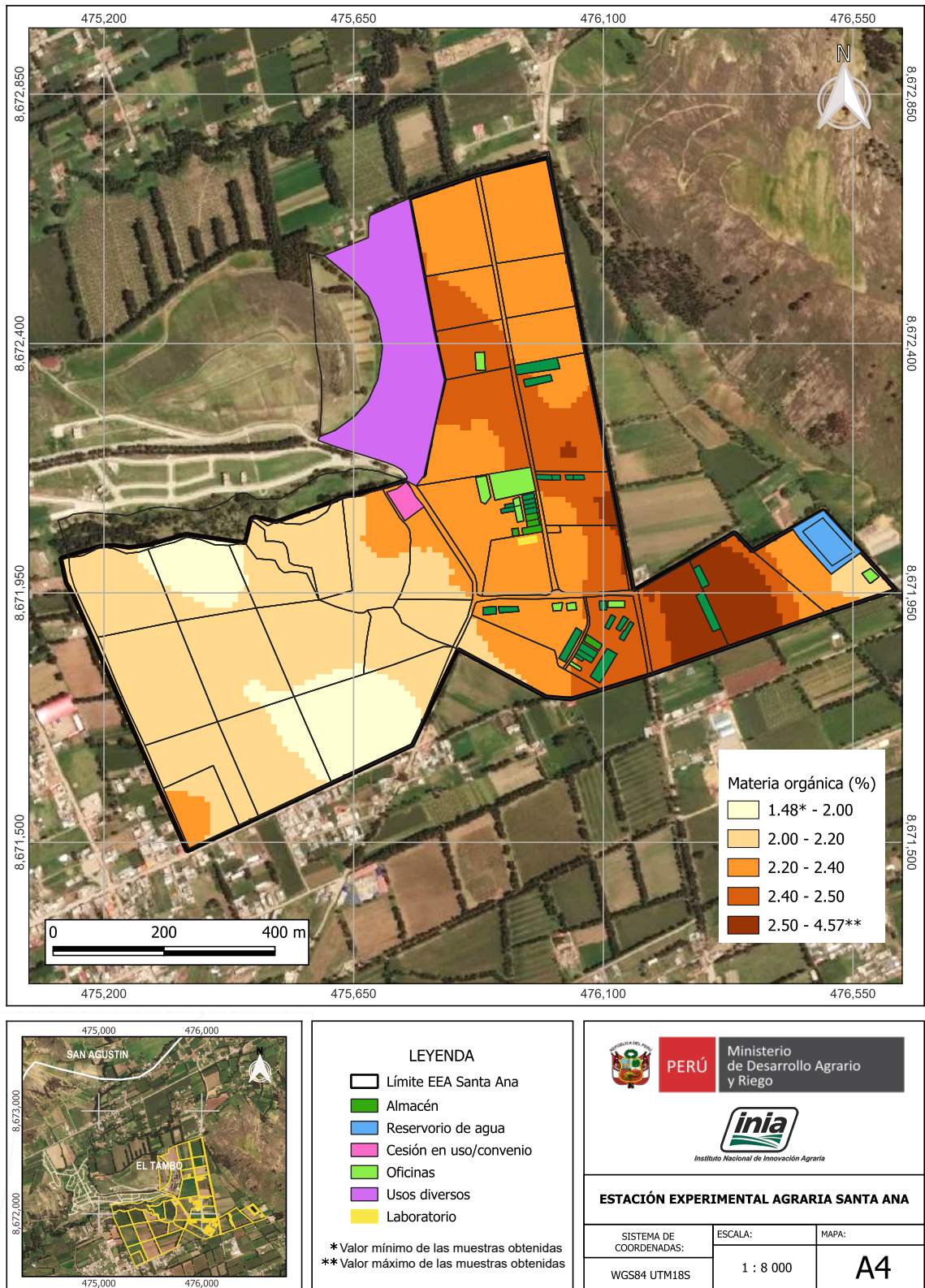


Figura 11. Mapa de variación espacial del porcentaje de la materia orgánica

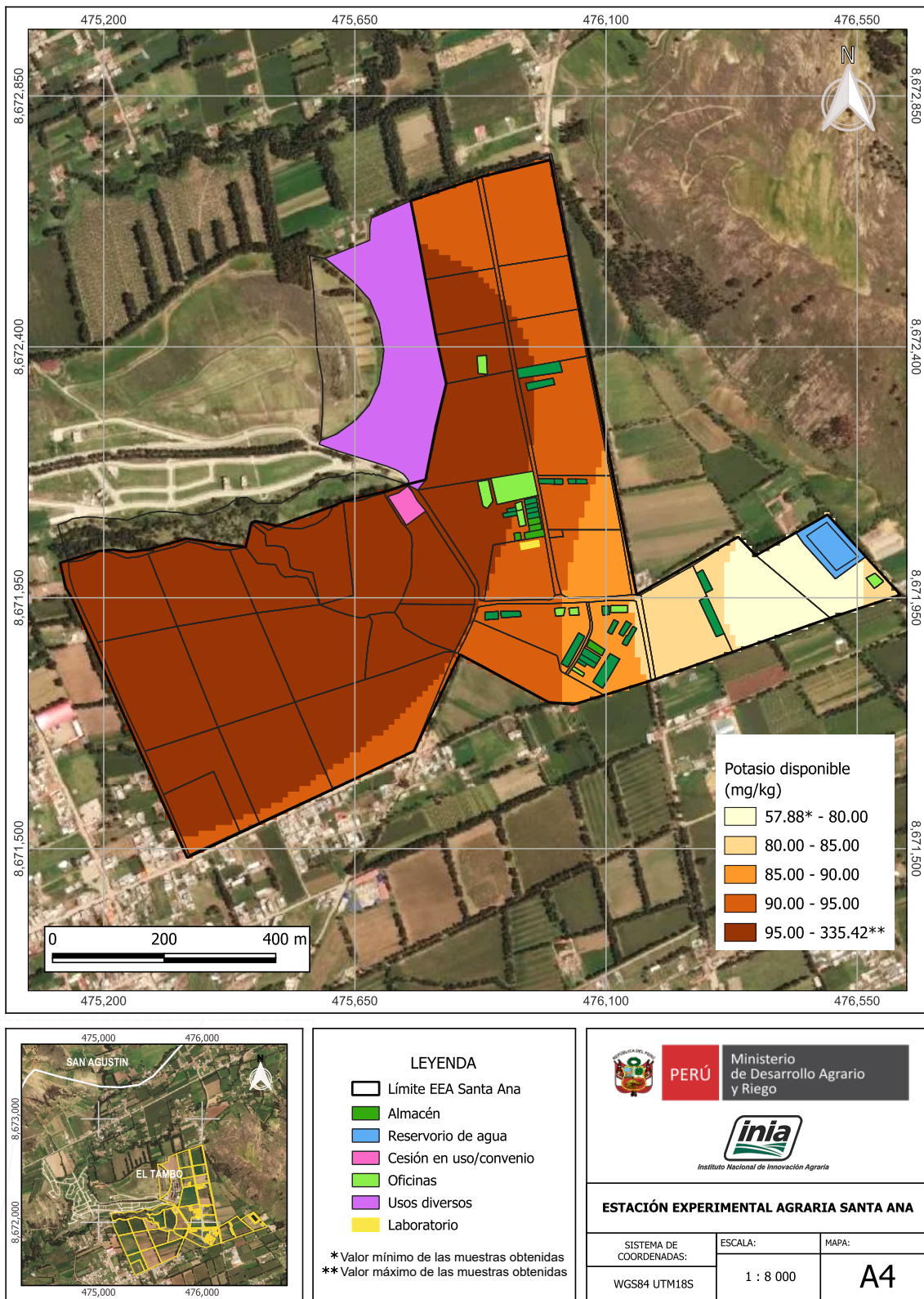


Figura 12. Mapa de variación espacial del potasio (K⁺) disponible

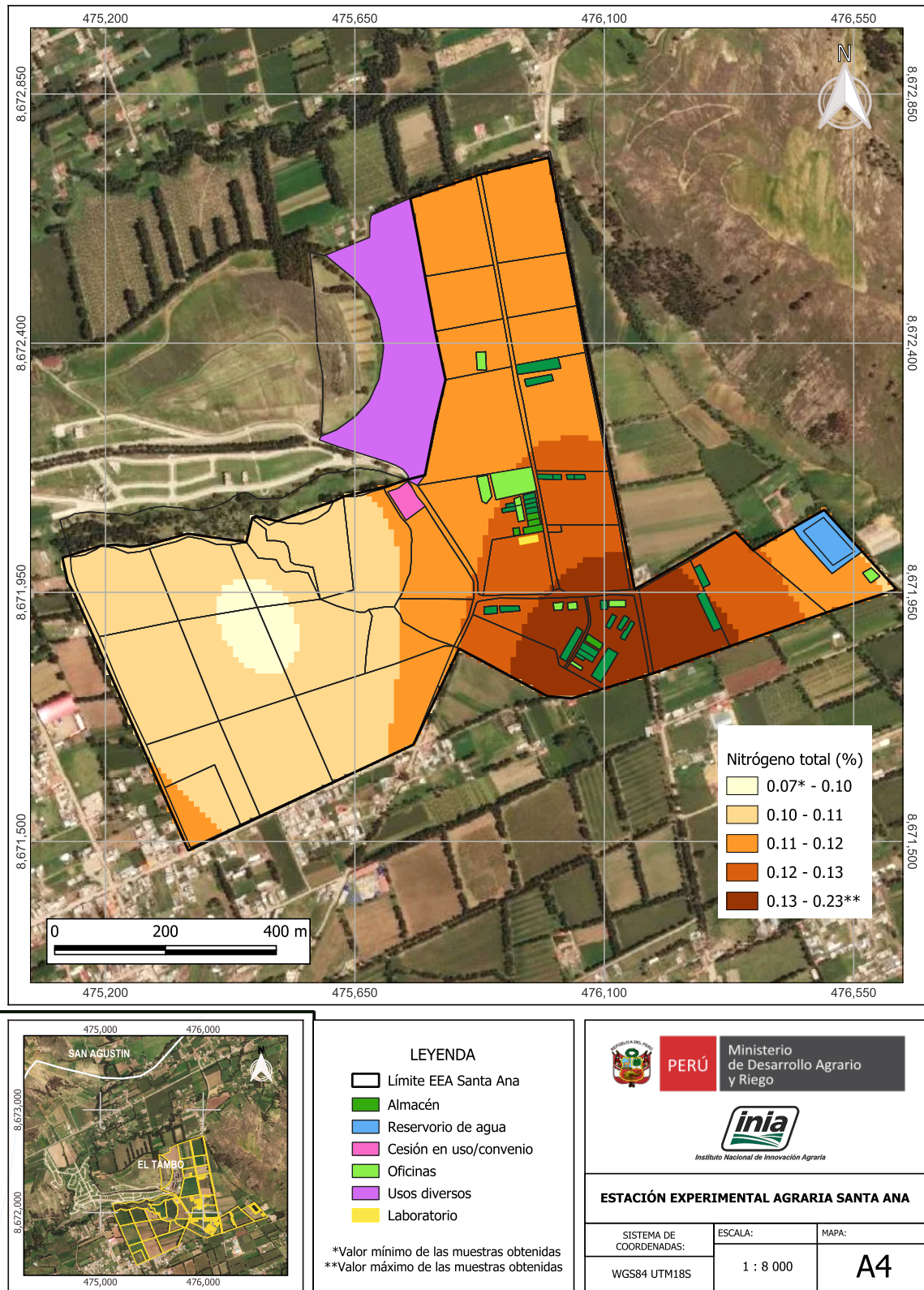


Figura 13. Mapa de variación espacial del porcentaje del nitrógeno (N) total

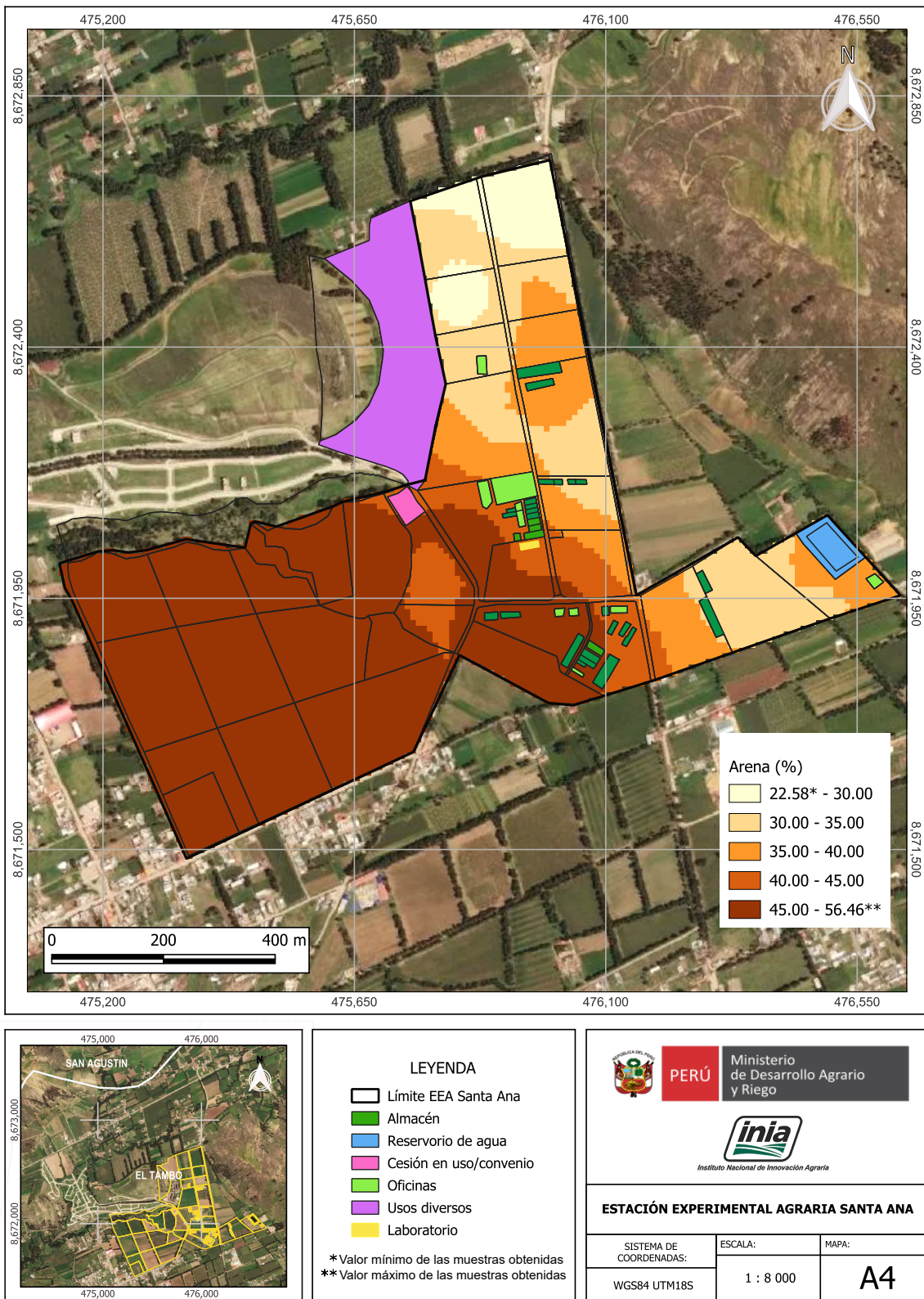


Figura 14. Mapa de variación espacial del porcentaje de arena

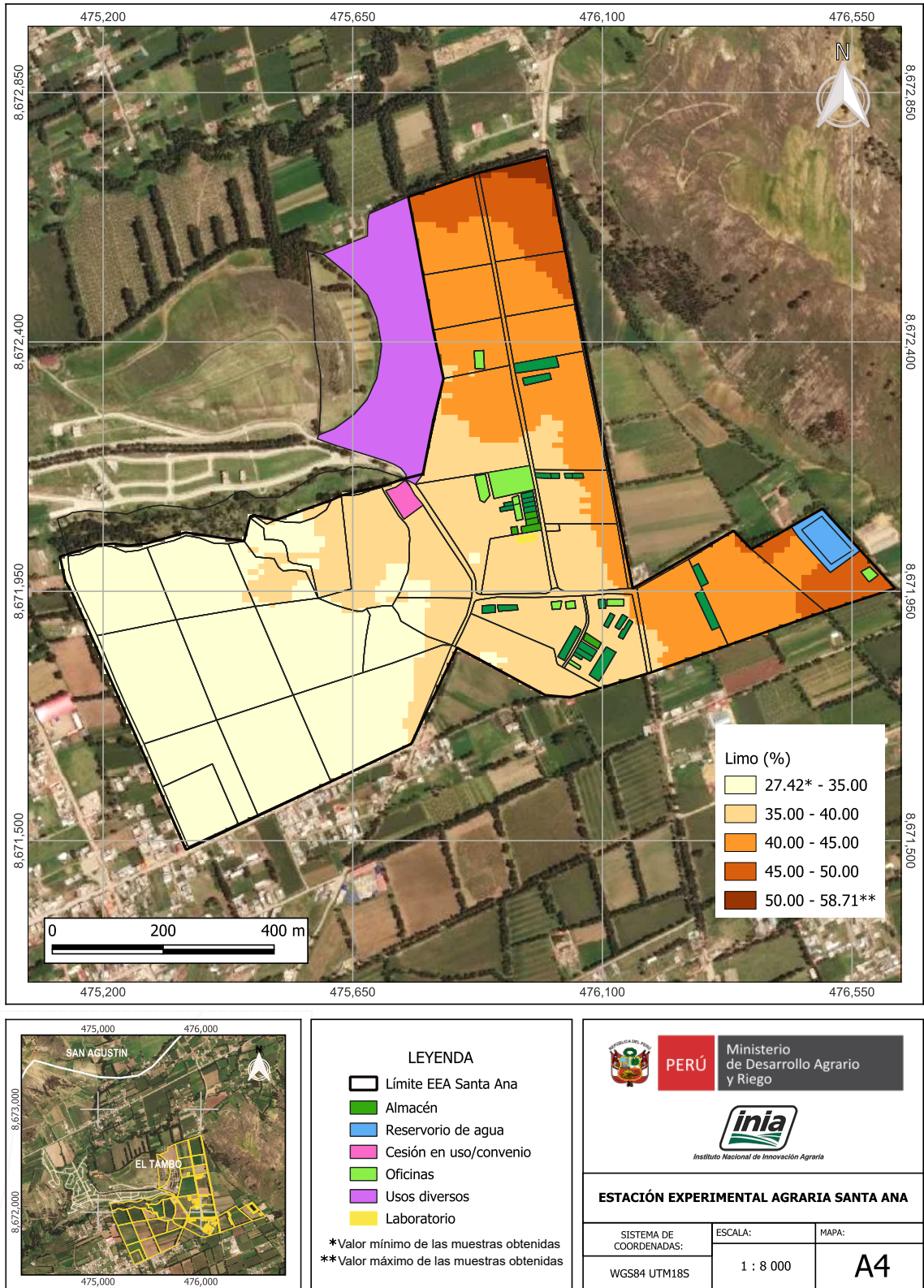


Figura 15. Mapa de variación espacial del porcentaje de limo

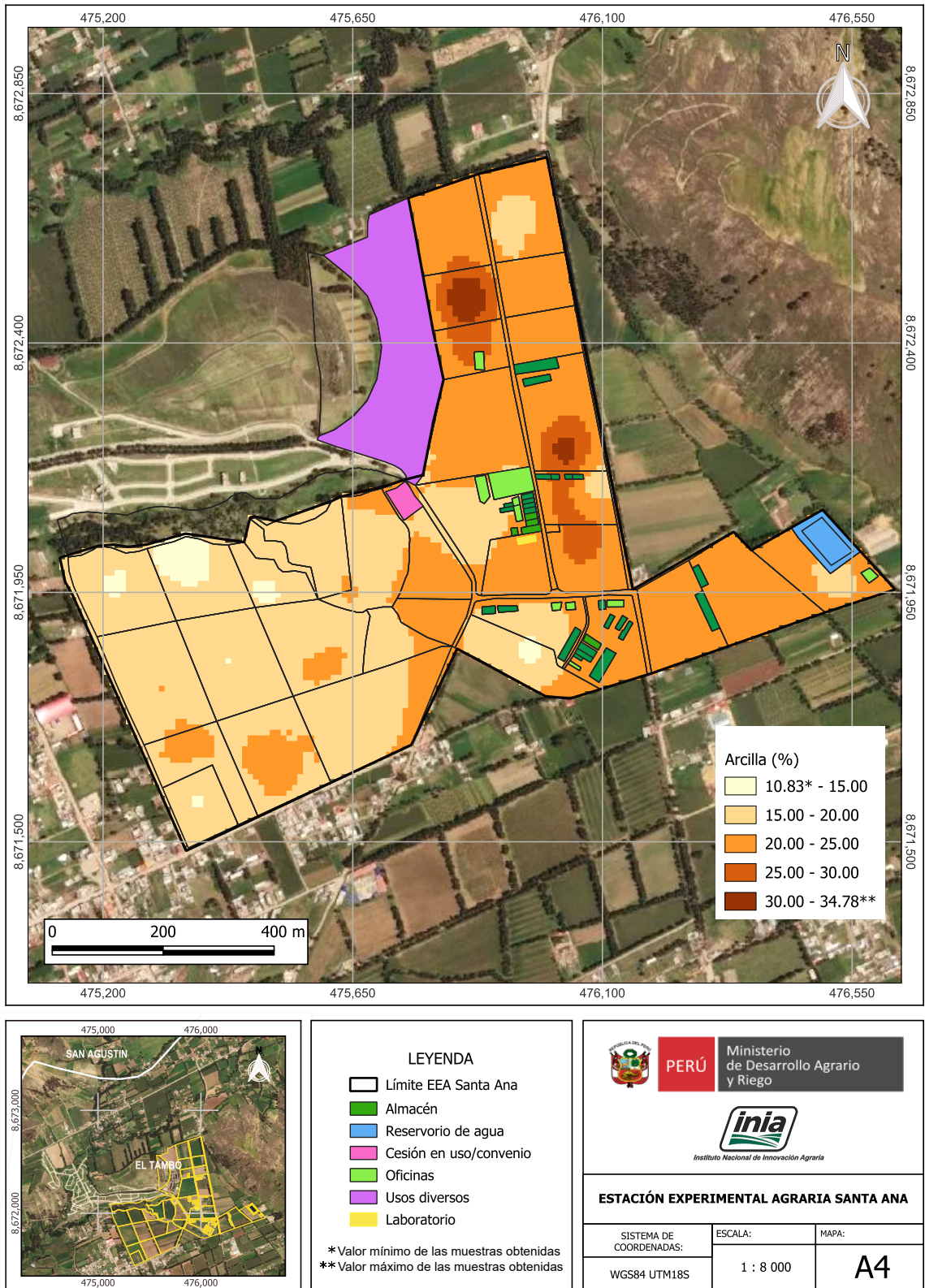


Figura 16. Mapa de variación espacial del porcentaje de arcilla



4. Recomendaciones de manejo de la fertilidad del suelo en la EEA Santa Ana

4.1. Índice de saturación de bases catiónicas

Los valores de aluminio intercambiable observados en la EEA Santa Ana (media = 4.30 cmol kg⁻¹, mínimo = 0.27, valor máximo = 9.46 cmol kg⁻¹) indican la presencia de focos de acidez activa con potencial de generar toxicidad para cultivos sensibles como la papa. La solubilización de Al³⁺ en suelos ácidos es la principal causa de toxicidad para las raíces, debido a que este elemento actúa sobre la zona de elongación y el ápice radical. El Al³⁺ inhibe la división y la expansión celular, altera la morfología radical (acortamiento del eje, hinchazón y muerte del meristemo) y reduce la exploración del suelo por las raíces, con la consiguiente limitación en la absorción de agua y nutrientes (Kochian et al., 2015).

No obstante, para un diagnóstico preciso, es determinante establecer umbrales de riesgo, los que dependen del parámetro usado (Al³⁺ intercambiable en cmol kg⁻¹, o porcentaje de saturación de aluminio respecto a la CIC). La literatura muestra umbrales variables entre diferentes cultivos y suelos. Además, algunos estudios encuentran efectos sobre rendimiento a valores relativamente bajos de Al activo, por lo que no existe un único valor universal. Por ejemplo, trabajos de evaluación de umbrales críticos muestran rangos de Al intercambiable críticos para diferentes cultivos que van desde fracciones de 1 cmol kg⁻¹ a valores superiores, según el tipo de suelo y la sensibilidad del cultivo (Baquy et al., 2017). Esto implica que valores medios como 4.3 cmol kg⁻¹ y valores máximos cercanos a 9.5 cmol kg⁻¹ constituyen una señal clara de riesgo en el contexto andino y para genotipos de papa no tolerantes.

Los indicadores geoestadísticos para el aluminio intercambiable (Al³⁺) en la EEA Santa Ana muestran una estructura espacial sólida y predictiva, aunque con un componente no despreciable de variabilidad a microescala. El valor de *nugget* ($C_0 = 1.93$) representa aproximadamente el 26 % del *sill* total, lo que indica la presencia de variabilidad aleatoria a corta distancia, probablemente asociada a heterogeneidades localizadas por manejo, o incorporación de enmiendas. Por otro lado, el *sill* ($C_0 + C = 7.44$) refleja una notable varianza global que se mantiene hasta el rango observado de 490 m. Este valor de rango confirma una continuidad espacial amplia, lo cual permite delimitar unidades de manejo de tamaño operativamente útil. El RMSE es bajo (± 0.23 cmol kg⁻¹) y el coeficiente de ajuste del modelo es elevado ($R^2 = 0.98$). Ambos parámetros evidencian que las predicciones espaciales son precisas y que el mapa resultante representa fielmente los gradientes reales de Al³⁺ en el área muestreada.

El mapa de variación espacial del Al³⁺ (Figura 17) muestra 5 zonas bien definidas: zona de muy alto riesgo (5.5-9.46 cmol kg⁻¹), donde la toxicidad radicular es altamente probable; zona de alto riesgo (4-5.5 cmol kg⁻¹), con daño radicular, y limitación marcada de P y bases; zona de riesgo moderado (2.5-4 cmol kg⁻¹), donde se esperan efectos subletales que reducen eficiencia de toma de nutrientes y crecimiento radicular; zonas de bajo riesgo (1-2.5 cmol kg⁻¹); zonas de muy bajo riesgo (0.27-1 cmol kg⁻¹). Estas zonas, además de facilitar la interpretación agronómica, permiten priorizar intervenciones operativas y calcular tasas de encalado localizadas. Como ejemplo, se definirá el requerimiento de encalado para las zonas de muy alto riesgo según la metodología de Teixeira et al. (2014), citando a Cate y Nelson (1965).

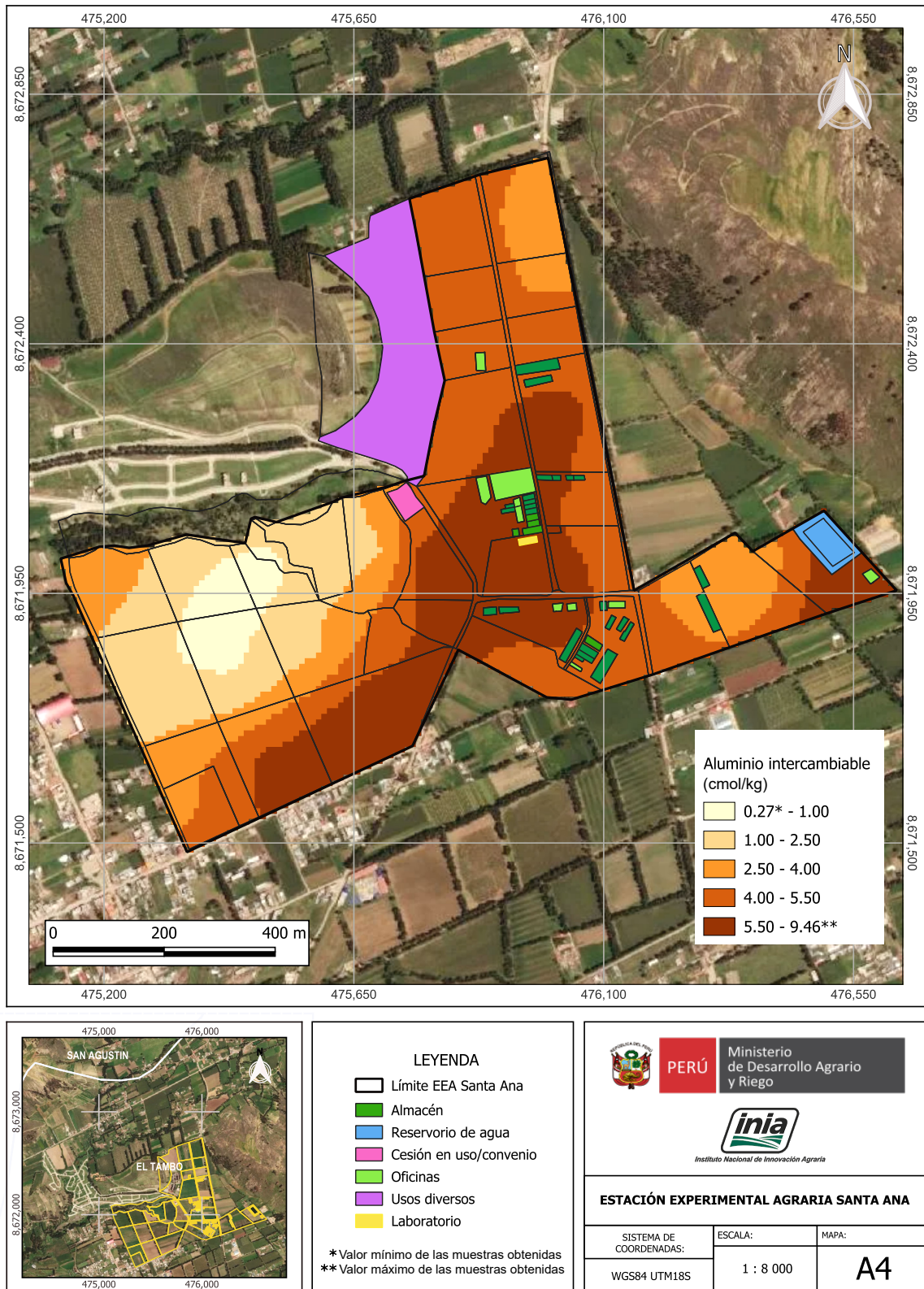


Figura 17. Mapa de variación espacial del aluminio (Al³⁺) intercambiable

La fórmula 13 indica el requerimiento de cal (RC) en $t\ ha^{-1}$:

$$RC = Al \times 1.5 \dots (13)$$

Donde:

Al: aluminio intercambiable

Mediante este procedimiento se ha estimado que el requerimiento de encalado para la zona de muy alto riesgo, considerando el valor de Al de $5.5\ cmol\ kg^{-1}$, supera las $8.25\ t\ ha^{-1}$ de cal agrícola. Desde la perspectiva productiva, las áreas clasificadas como de alto y muy alto riesgo deben ser tratadas como prioridad para corrección: la neutralización del Al^{3+} mediante encalado localizado y la reposición de Ca^{2+} y Mg^{2+} son indispensables a la aplicación de fertilizantes fosfatados o potásicos. Esto, debido a que la persistencia de Al^{3+} activo reduce la eficacia de las enmiendas y provoca pérdidas de rendimiento por la reducción del crecimiento radicular y el bloqueo del P. Por otro lado, en las zonas de riesgo moderado conviene combinar encalado de mantenimiento con aplicación de materia orgánica, siembra en camas o bandas para proteger el ápice radical, y aplicaciones de P en bandas próximas a la raíz para mejorar la disponibilidad inmediata. En las zonas de bajo y muy bajo riesgo de Al, el manejo puede centrarse en reposición y mantenimiento de bases y carbono edáfico.

4.2. Niveles de suficiencia de nutrientes disponibles

Los indicadores geoestadísticos del fósforo disponible en la EEA Santa Ana son el *nugget* = $0.52\ mg\ kg^{-1}$, *sill* = $1.49\ mg\ kg^{-1}$, rango = 828 m, RMSE = $4.77\ mg\ kg^{-1}$, $R^2 = 0.51$ (Tabla 3). El rango entre el valor mínimo y máximo ($0.46-45.32\ mg\ kg^{-1}$) muestra un comportamiento espacial moderadamente estructurado: aproximadamente un tercio de la varianza (34 %) responde a heterogeneidad a microescala. Sin embargo, la mayor parte de la variación es espacialmente continua y predecible a escalas operativas. Esto implica que los mapas temáticos de P son útiles y robustos para la zonificación de manejo, siempre que se consideren las áreas de alta variabilidad local detectadas por el *nugget*. En la práctica, la cartografía permite identificar unidades donde el P es evidentemente limitante y otras con acumulaciones residuales o locales, lo que obliga a planificar intervenciones diferenciadas en lugar de un aporte homogéneo en todo el predio.

La implicancia de estos gradientes es crítica para un cultivo importante en la zona como es la papa, debido a que el fósforo regula procesos centrales para el establecimiento y el desarrollo de los tubérculos, como la síntesis y transporte de ATP, la formación y diferenciación de primordios tuberosos, y el desarrollo radicular temprano. Así mismo, su déficit reduce la tasa de partición de fotoasimilados al tubérculo, disminuye el número y tamaño de tubérculos y retrasa la maduración. En ambientes altoandinos la baja disponibilidad de fósforo en el suelo puede ser crítica pues la difusión de este nutriente en el suelo se ralentiza por las bajas temperaturas. También la presencia de Al intercambiable favorece la fijación de fosfatos; incluso, en suelos con P próximos a $0.5\ mg\ kg^{-1}$, la limitación puede ser absoluta, impidiendo respuestas agronómicas aún ante aplicaciones generales de fertilizante, si no se optimiza la forma de aplicación de este.

A partir de lo expuesto en el párrafo precedente, la interpretación de la variación de la fertilidad en la EEA Santa Ana debe priorizar un enfoque de zonificación sitio-específica. El mapa de variación espacial del P (Figura 18) permitió diferenciar 5 zonas: la primera zona con valores bajos ($7.47-15 \text{ mg kg}^{-1}$), donde se debe priorizar la fertilización de construcción; la segunda zona con valores medios ($15-20 \text{ mg kg}^{-1}$) donde se deben establecer planes de fertilización de mantenimiento; la tercera zona con valores altos ($20-25 \text{ mg kg}^{-1}$); la cuarta zona con valores muy altos ($25-30 \text{ mg kg}^{-1}$); y la quinta zona con valores excesivos ($30-57.88 \text{ mg kg}^{-1}$), en donde se deben priorizar fertilización de suficiencia dependiendo de la productividad del cultivo. En las áreas deficitarias, una estrategia de manejo agronómico para la papa altoandina es la aplicación de fertilizante en banda o en la línea de siembra y el fraccionamiento de dosis en etapas críticas, para favorecer el contacto del P con las raíces y compensar la limitada difusión. También, se debe preferir fuentes solubles y combinarlas siempre con enmiendas orgánicas para reducir la fijación por Al y mejorar la actividad microbiana mineralizadora de fosfatos. Donde coexistan bajos niveles P y presencia de Al activo, la corrección de la acidez (encalado localizado) debe anteceder o acompañar la fertilización fosfatada para evitar que el nutriente aplicado quede rápidamente inmovilizado.

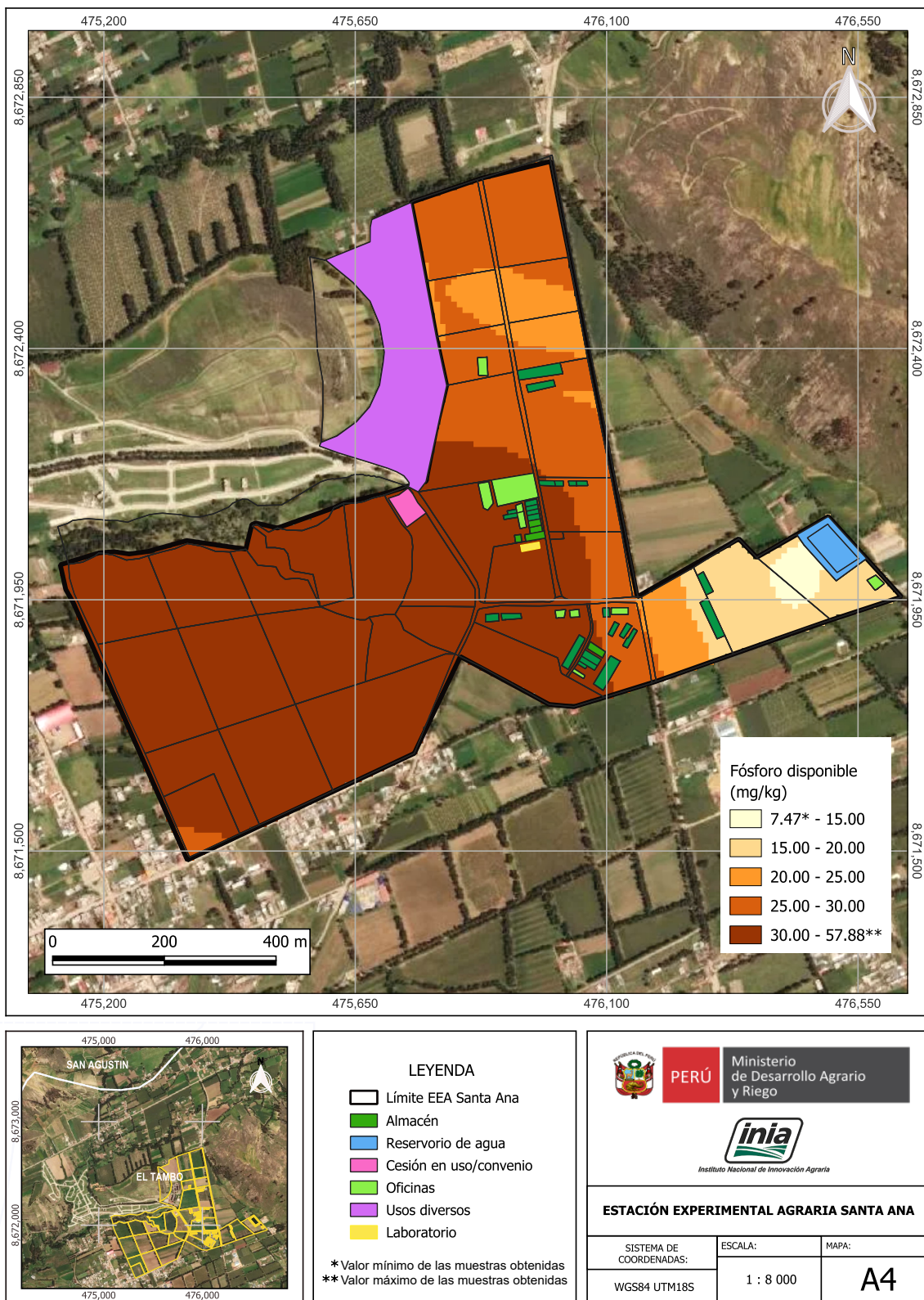


Figura 18. Mapa de variación espacial del fósforo (P) disponible

Para los cálculos del requerimiento de fertilización fosfatada, se tomará como ejemplo el valor de P disponible de la zona predominante de excesivo nivel de P disponible (30-57.88 mg kg⁻¹) para la estimación de la fertilización de suficiencia en el cultivo de papa.

Para este cultivo, el umbral crítico o nivel de suficiencia es de 18 mg de P-Bray 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 30 mg de P-Bray por kg de suelo permite obtener un rendimiento relativo (RR) del 100 %.

Primer paso: calcular el rendimiento alcanzado con 30 mg de P-Bray por kg de suelo utilizando la fórmula 2. Para este caso, dado que el RR es 100 %, el rendimiento alcanzado es igual al rendimiento potencial, es decir, 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.

$$\text{Incremento de raíces y brotes} = 0.35 \times 30 \text{ t ha}^{-1} = 10.5 \text{ t ha}^{-1}$$

Además de las 30 t ha⁻¹ de producción, el cultivo genera 10.5 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:

$$\text{Rendimiento objetivo} = 10.5 \text{ t ha}^{-1} + 30 \text{ t ha}^{-1} = 40.5 \text{ t ha}^{-1}$$

Cuarto paso: calcular el requerimiento de P utilizando la fórmula 5. Para este cálculo y con fines prácticos se considera una extracción de 0.7 kg de fósforo por tonelada de producción.

$$\text{Requerimiento de P} = 0.7 \text{ kg de P t}^{-1} \times 40.5 \text{ t ha}^{-1} = 28.35 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

A partir de estos resultados, se interpreta que el criterio de suficiencia estima un requerimiento de 28.35 kg P ha⁻¹, suficiente para sustentar el desarrollo de 10.5 t ha⁻¹ de biomasa radicular y vegetativa, así como una producción de 30 t ha⁻¹. El equivalente de esta dosis de fertilización en fosfato monoamónico (MAP) se calcula considerando que su contenido de P₂O₅ es del 51 %, por lo que se obtiene una dosis de 127.3 kg MAP ha⁻¹.





inia
Instituto Nacional de Innovación Agraria

PERÚ
Ministerio de Agricultura y Riego

LBSAF
TIPOS DE SUELOS

TIPOS DE SUELOS

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. Pessaraki (Ed.), *Handbook of plant and crop stress* (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://revistas.umng.edu.co/index.php/rcin/article/view/5396>
- Atkins, P. W., De Paula, J., y Keeler, J. (2023). *Atkins' physical chemistry*. Oxford University Press.
- Baquy, M., Li, J. Y., Xu, C. Y., Mehmood, K., y Xu, R. K. (2017). Determination of critical pH and Al concentration of acidic Ultisols for wheat and canola crops. *Solid Earth*, 8(1), 149-159. <https://doi.org/10.5194/se-8-149-2017>
- 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://doi.org/10.2136/sssaspecpub51.c6>
- Chaganti, V., y Culman, S. (2017). Historical perspective of soil balancing theory and identifying knowledge gaps: A review. *Crop, Forage & 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/>
- 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>
- 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>
- Espinosa, J., y Molina, E. (1999). *Acidez y encalado de los suelos* (1.ª ed.). International Plant Nutrition Institute. <https://doi.org/10.13140/2.1.3888.9281>
- Garbanzo-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)
- 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>
- Graham, E. R. (1959). *An explanation of theory and methods of soil testing*. University of Missouri, Agricultural Experiment Station.
- Haller, A. (2017). Los impactos del crecimiento urbano en los campesinos andinos. Un estudio de percepción en la zona rural-urbana de Huancayo, Perú. *Espacio y Desarrollo*, 29, 37-56. <https://doi.org/10.18800/espacioydesarrollo.201701.002>
- 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 for Standardization. (1994). *Soil quality - Determination of specific electrical conductivity*.
- International Organization for Standardization. (1995). *Soil quality - Determination of total nitrogen - Modified Kjeldahl method*.
- Kochian, L. V., Piñeros, M. A., Liu, J., y Magalhaes, J. V. (2015). Plant adaptation to acid soils: the molecular basis for crop aluminum resistance. *Annual review of plant biology*, 66, 571-598. <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-043014-114822>

- 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>
- Liu, Q., Zhang, A., Li, X., Yin, J., Zhang, Y., Sun, O. J. y Jiang, Y. (2025). Changes in soil organic and inorganic carbon with elevation in a dry alpine rangeland of the northern Qinghai–Tibet Plateau. *Biogeosciences*, 22(16), 4123-4133. <https://doi.org/10.5194/bg-22-4123-2025>
- 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. y D. A. Whitney (Eds.), *Soil testing: correlating and interpreting the analytical results* (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). <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. https://cran.r-project.org/web/packages/sp/vignettes/intro_sp.pdf
- 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>
- Quispe-Matos, K. R., Carbajal-Llosa, C. M., Mejía-Maita, S. Y., Llerena-Arroyo, R. A., Solórzano-Acosta, R. A., y Cruz-Luis, J. A. (2025). *Variación espacial de la fertilidad del suelo en la EEA Canaán*. Instituto Nacional de Innovación Agraria. <http://hdl.handle.net/20.500.12955/2852>
- 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>

- Teixeira, W. G., Reis, J., Freitas, J., Alvarez, V. (2014). Determinação Da Necessidade de Calagem Para o Cafeeiro Considerando a Acidez Potencial. En *Libro de resúmenes del XX Congreso Latinoamericano y XVI Congreso Peruano de la Ciencia del Suelo* (pp. 9–15) Sociedad Peruana de la Ciencia del Suelo. <https://doi.org/10.36783/18069657rbc20200078>
- Vanacker, V., Molina, A., Rosas, M. A., Bonnesoeur, V., Román-Dañobeytia, F., Ochoa-Tocachi, B. F., y Buytaert, W. (2022). The effect of natural infrastructure on water erosion mitigation in the Andes. *Soil*, 8, 133–147. <https://doi.org/10.5194/soil-8-133-2022>
- 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., 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), 629. <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* [Tesis de de Magister Scientiae, University of Hawai'i at Manoa]. Repositorio Institucional de la Universidad de Hawai'i en Manoa <https://scholarspace.manoa.hawaii.edu/items/8a99ab1e-dcd5-4822-9889-c99836d9526a>

Red de 16 Laboratorios de Suelos, Aguas y Foliare al servicio de la agricultura peruana



- 1 EEA Vista Florida - Lambayeque
- 2 EEA Baños del Inca - Cajamarca
- 3 EEA Donoso - Lima Provincia
- 4 CE La Molina - Lima
- 5 EEA Santa Ana - Junín
- 6 EEA Canaán - Ayacucho
- 7 EEA Arequipa - Arequipa
- 8 EEA Illpa - Puno
- 9 EEA El Porvenir - San Martín
- 10 EEA Pucallpa - Ucayali
- 11 EEA Pichanaki - Junín
- 12 EEA Perla del VRAEM - Cusco
- 13 EEA Moquegua - Moquegua
- 14 CE Yanayacu - Cajamarca
- 15 EEA El Chira - Piura
- 16 EEA Chíncha - Ica

Ver nuestro alcance de acreditación



Ver nuestros servicios





Instituto Nacional de Innovación Agraria







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

ISBN: 978-9972-44-239-1



9 789972 442391



PERÚ

Ministerio
de Desarrollo Agrario
y Riego



Instituto Nacional de Innovación Agraria

 @INIAPeru