

Variación espacial de la fertilidad del suelo en la EEA Arequipa



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 Arequipa



VARIACIÓN ESPACIAL DE LA FERTILIDAD DEL SUELO EN LA EEA AREQUIPA

MINISTERIO DE DESARROLLO AGRARIO Y RIEGO

Ministro de Desarrollo Agrario y Riego

Felipe César Meza Millán

Viceministro de Políticas y Supervisión del Desarrollo Agrario

Jorge Luis Sáenz Rabanal

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:

Mayo, 2026

Publicado:

Mayo, 2026

Disponible en:

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

ISBN:

978-9972-44-255-1

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° 2026-05588

Autores: Russell H. Poma-Chamana, Cesar F. Vilca-Gamarra, Antony A. Quello-Huamaní, Katherine Puma-Huacani, Percy A. Suyco-Panibra, Nancy V. Calla-Cornejo, Kenyi R. Quispe-Matos, Carlos M. Carbajal-Llosa, Sharon Y. Mejía-Maita, Ruddy A. Ore-Valeriano, Rodolfo J. Chuchon-Reimon, Richard Solórzano-Acosta, Juancarlos Cruz-Luis / **Editor general:** Cinthia S. Quispe-Apaza / **Revisión de contenido:** 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 Arequipa	25
3.1. Ubicación	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	34
3.7.1. Interpolación mediante <i>kriging</i> ordinario	34
3.7.2. Interpolación mediante distancia inversa ponderada	34
3.8. Validación cruzada de modelos de interpolación	35
3.9. Resultados del análisis geoestadístico de las propiedades del suelo	36
3.10. Mapeo digital de las propiedades del suelo	37
4. Recomendaciones de manejo de la fertilidad del suelo en la EEA Arequipa	57
4.1. Índice de saturación de bases catiónicas	57
4.1.1. Capacidad de intercambio catiónico efectiva: interpretación crítica y consideraciones analíticas	57
4.1.2. Porcentaje de calcio intercambiable	58
4.1.3. Porcentaje de magnesio intercambiable	61
4.1.4. Porcentaje de potasio intercambiable	62
4.1.5. Sodio intercambiable	64
4.2. Niveles de suficiencia de nutrientes disponibles	66
4.2.1. Niveles de suficiencia de fósforo disponible	66
4.2.2. Niveles de suficiencia de potasio disponible	66
4.3. El pH del suelo: modulador de la solubilidad de nutrientes	68
4.4. Salinidad	68
5. Referencias bibliográficas	71



Presentación

El Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA) es un organismo técnico especializado adscrito al Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego (MIDAGRI), que desarrolla investigación, transferencia de tecnología, asistencia técnica, conservación y puesta en valor de recursos genéticos, la extensión agropecuaria y producción de semillas, plantones 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.

En este contexto, la variabilidad espacial de la fertilidad del suelo constituye un aspecto clave a considerar, dado que la heterogeneidad espacial de la fertilidad del suelo influye directamente en el rendimiento de los cultivos, en la eficiencia del uso de productos químicos u orgánicos y en la sostenibilidad de los agroecosistemas, particularmente en entornos con alta variación ambiental. Los métodos tradicionales de evaluación, sustentados en valores promedio o mediciones aisladas, no logran representar adecuadamente esta variabilidad, lo que restringe la formulación de decisiones agronómicas más exactas. En este marco, el empleo de modelos geoestadísticos junto con los sistemas de información geográfica (SIG) facilita la identificación y análisis de los patrones espaciales de las propiedades del suelo, aportando información técnica fundamental para implementar estrategias de manejo sitio-específico, promover la conservación edáfica y optimizar la planificación de la fertilización.

El presente documento, “Variación espacial de la fertilidad del suelo en la EEA Arequipa”, 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 y aplicada 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.

M. Sc. Jorge Juan Ganoza Roncal

Presidente Ejecutivo

Instituto Nacional de Innovación Agraria



1. Introducción

La degradación del suelo constituye una de las principales amenazas para la sostenibilidad agrícola a nivel global, especialmente en regiones áridas y semiáridas donde la disponibilidad hídrica es limitada y las oportunidades de recuperación natural del suelo son reducidas. Factores como el uso inadecuado del recurso suelo, el sobrepastoreo, prácticas agrícolas poco sostenibles y los efectos intensificados del cambio climático contribuyen a acelerar este proceso (de Valença, 2017; Coaguila et al., 2025; Correa et al., 2016).

La región de Arequipa presenta un potencial de superficie agropecuaria aprovechable del 32,2 % de las cuales solo son usadas el 5,75 % (Gobierno Regional de Arequipa [GRA], 2021). En las principales zonas productoras se producen generalmente cultivos forrajeros (alfalfa y maíz forrajero), arroz, cebolla y papa (Gerencia Regional de Agricultura de Arequipa, 2025). Esta región enfrenta como principales desafíos una accidentada geografía en sus valles interandinos y escasez de agua en sus desiertos costeros (GRA, 2021). Estas limitaciones naturales se ven agravadas por la baja adopción de prácticas de manejo basado en diagnóstico. En 2022, únicamente el 2,4 % de los productores agropecuarios realizó análisis de suelos y recibió asistencia técnica para implementar los resultados (Instituto Nacional de Estadística e Informática [INEI], 2023), lo que evidencia una gestión incipiente de la fertilidad en el ámbito productivo.

La ausencia de mapas de fertilidad que integren los datos de análisis de suelos limita el diagnóstico integral de la variabilidad edáfica y dificulta la planificación eficiente de estrategias de fertilización. Frente a esta brecha, la aplicación de enfoques de agricultura de precisión, que integren análisis de suelos, geoestadística y sistemas de información geográfica (SIG), se presenta como una alternativa metodológica robusta para evaluar la variación espacial de la fertilidad del suelo. Herramientas como la interpolación *kriging*, el índice de Moran y el análisis de variogramas permiten modelar la heterogeneidad espacial de las propiedades fisicoquímicas del suelo y generar mapas temáticos que orienten decisiones de manejo sitio-específico, mejorando la eficiencia en el uso de fertilizantes y enmiendas, y contribuyendo a la conservación de la calidad del suelo en el largo plazo (Culman et al., 2021; Chinea-Horta y Rodríguez-Izquierdo, 2021).

En este marco, el objetivo del presente documento es analizar la fertilidad y la variabilidad espacial de los suelos en la EEA Arequipa, con la finalidad de generar información técnica que contribuya la planificación agrícola y el fortalecimiento de los sistemas productivos regionales. En específico, se busca evaluar el estado actual de la fertilidad del suelo, determinar sus principales limitaciones, desarrollar mapas de variación espacial de las propiedades edáficas y proponer estrategias de manejo que permitan optimizar el uso de fertilizantes, aumentar la productividad y promover la sostenibilidad de los sistemas productivos 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).

b. Origen y aplicabilidad del concepto

El concepto de 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).

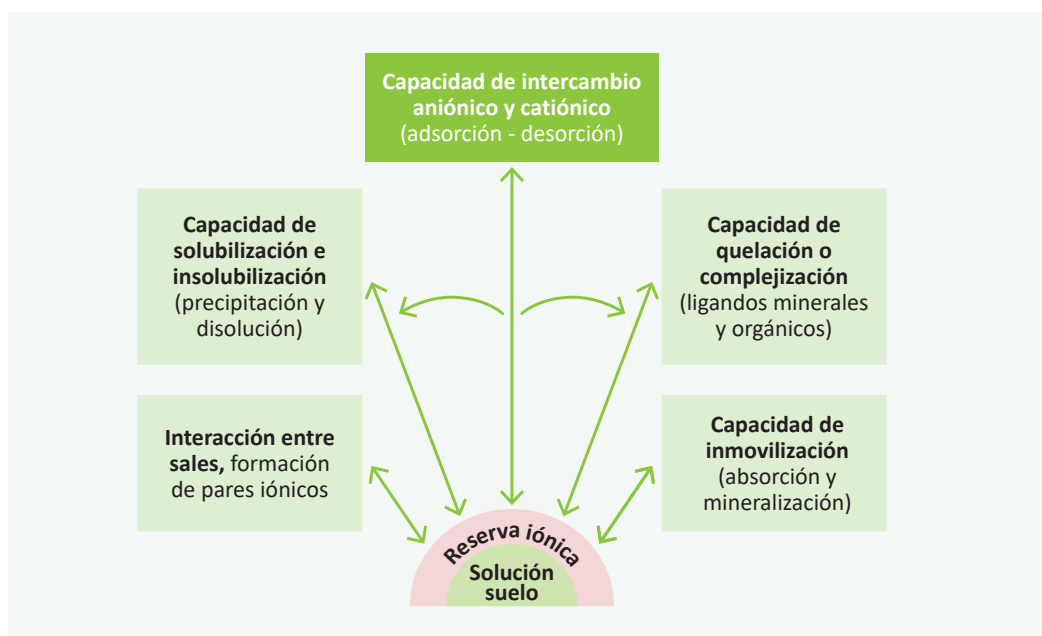


Figura 1. Mecanismos que mantienen en equilibrio los iones en la solución suelo (adaptado de McLean, 1977)

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, dado 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.

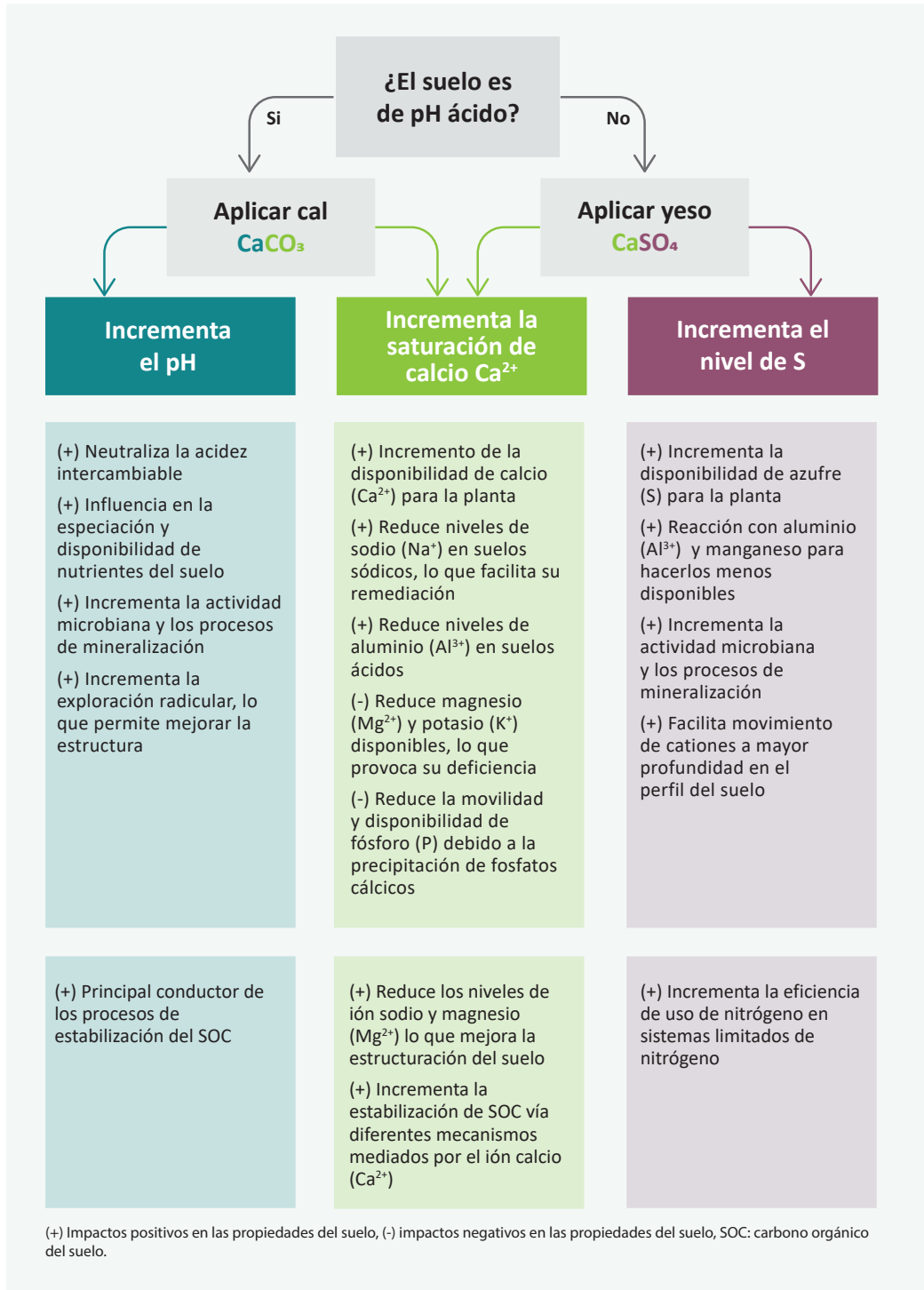


Figura 2. Criterios de uso de la cal y el yeso, y su respuesta en la relación de saturación de cationes básicos (adaptado de Culman et al., 2021)

2.1.2. Sistema de suficiencia de nutrientes

a. Concepto

El 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).

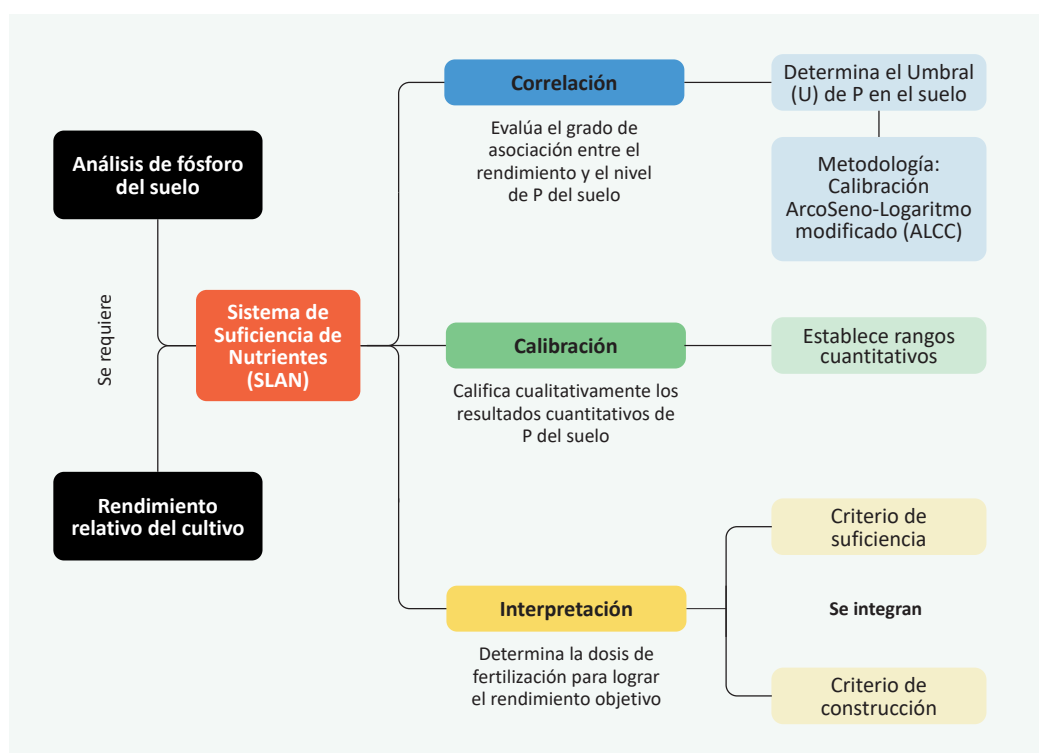


Figura 3. Esquema modelo para la implementación del sistema de suficiencia de nutrientes (SLAN) para el P del suelo

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), dado 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, adaptado de Quispe-Matos et al. (2025), para determinar el requerimiento de fósforo (P) necesario para alcanzar un rendimiento objetivo en el cultivo de maíz, considerando un suelo con alto contenido de este nutriente.

Ejemplo práctico:

Se realizó un análisis de suelos en un cultivo de maíz, y se obtuvo 19 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 (Bai et al., 2013) y el rendimiento potencial es de 10 t ha⁻¹. El análisis de correlación y calibración indica que el nivel obtenido de 19 mg de P-Olsen por kg de suelo permite obtener un rendimiento relativo (RR) del 90 %.

Primer paso: calcular el rendimiento de grano alcanzado con 19 mg kg⁻¹ de P-Olsen del suelo con la Fórmula 2:

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

$$\text{Rendimiento alcanzado} = \frac{90 \times 10 \text{ t ha}^{-1}}{100} = 9 \text{ t ha}^{-1}$$

Este resultado indica que el nivel actual de P (19 mg kg⁻¹) está por debajo del umbral crítico (20 mg kg⁻¹), lo que limita el rendimiento a solo el 90 % del potencial, 9 t ha⁻¹ en lugar de 10 t ha⁻¹.

Segundo paso: hallar el incremento de la biomasa a partir del índice de cosecha (HI) con la Fórmula 3:

$$HI = \frac{\text{Rendimiento alcanzado}}{\text{Biomasa total}} \quad \dots(3)$$

Para este cálculo se considera el HI = 0,48 (Ordóñez et al., 2020) y, conociendo el rendimiento alcanzado de 9 t ha⁻¹:

$$\text{Biomasa total} = \frac{\text{Rendimiento alcanzado}}{HI} \quad \dots(4)$$

$$\text{Biomasa total} = \frac{9 \text{ t ha}^{-1}}{0,48} = 18,75 \text{ t ha}^{-1}$$

Una vez estimada la biomasa total, la biomasa de brotes y raíces se calcula como la diferencia entre la biomasa total y el rendimiento de grano:

$$\text{Biomasa de brotes y raíces} = \text{Biomasa total} - \text{Rendimiento alcanzado} \quad \dots(5)$$

$$\text{Biomasa de raíces y brotes} = 18,75 - 9 = 9,75 \text{ t ha}^{-1}$$

Además de los 9 t ha⁻¹ de producción, el cultivo genera 9,75 t ha⁻¹ de biomasa en raíces y brotes, lo que debe considerarse en el balance nutricional.

Tercer paso: determinar el rendimiento objetivo, añadiendo la biomasa de raíces y brotes al rendimiento alcanzado, como se señala en la Fórmula 6:

$$\text{Rendimiento objetivo} = \text{Biomasa de raíces y brotes} + \text{Rendimiento alcanzado} \quad \dots(6)$$

$$\text{Rendimiento objetivo} = 9,75 + 9 = 18,75 \text{ t ha}^{-1}$$

El rendimiento objetivo corresponde a la biomasa total estimada del cultivo. Aunque este valor ya fue determinado a partir del índice de cosecha (HI = 0,48), se desagregó en sus componentes (grano, tallo, raíz y otras estructuras vegetativas) con fines explicativos y para diferenciar la biomasa económica de la no económica. Por lo tanto, el rendimiento objetivo no representa un nuevo cálculo, sino la expresión integral de la biomasa total producida por el cultivo.

Cuarto paso: calcular el requerimiento de P utilizando la Fórmula 7. Para este cálculo y con fines prácticos se considera una extracción de 2,5 kg de P t⁻¹ de producción. Este valor corresponde al contenido promedio de fósforo por tonelada de biomasa total producida, calculado como la relación entre el P total acumulado (30,62 kg ha⁻¹) y el rendimiento total (12,24 t ha⁻¹) (Zamudio-González et al., 2016).

$$\text{Requerimiento de P} = \text{Extracción P} \times \text{Rendimiento objetivo} \quad \dots(7)$$

$$\text{Requerimiento de P} = 2,5 \text{ kg t}^{-1} \times 18,75 \text{ t ha}^{-1} = 46,88 \text{ kg ha}^{-1}$$

A partir de estos resultados se interpreta que el criterio de suficiencia estima un requerimiento de 46,88 kg de P para alcanzar un rendimiento de 9 t ha⁻¹ de grano y 9,75 t ha⁻¹ de biomasa vegetativa (raíz, tallos, hojas, raquis de la mazorca y brácteas).

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 maíz para la aplicación del criterio de mantenimiento, así como de los criterios de mantenimiento y construcción (adaptado de Quispe-Matos et al., 2025).

Ejemplo práctico (criterio de mantenimiento)

Se realizó un análisis de suelos en un cultivo de maíz, y se obtuvo 15 mg de P 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 10 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 60 %.

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

$$\text{Rendimiento alcanzado} = \frac{60 \times 10 \text{ t ha}^{-1}}{100} = 6 \text{ t ha}^{-1}$$

Segundo paso: estimación de la biomasa de raíces y brotes a partir del índice de cosecha (HI). Despejando la Fórmula 3 se obtiene la Fórmula 4, el cual calcula la biomasa total.

$$\text{Biomasa total} = \frac{6 \text{ t ha}^{-1}}{0,48} = 12,50 \text{ t ha}^{-1}$$

Una vez estimada la biomasa total, la biomasa de raíces y brotes se calcula con la Fórmula 5.

$$\text{Biomasa de raíces y brotes} = 12,50 - 6 = 6,50 \text{ t ha}^{-1}$$

Tercer paso: determinar el rendimiento objetivo, añadiendo la biomasa de raíces y brotes al rendimiento alcanzado, como se señala en la Fórmula 6.

$$\text{Rendimiento objetivo} = 6,50 \text{ t ha}^{-1} + 6 \text{ t ha}^{-1} = 12,50 \text{ t ha}^{-1}$$

Cuarto paso: calcular el requerimiento de P utilizando la Fórmula 7. Para este cálculo y con fines prácticos se considera una extracción de 2,5 kg de fósforo por tonelada de producción.

$$\text{Requerimiento de P} = 2,5 \text{ kg de P t}^{-1} \times 12,50 \text{ t ha}^{-1} = 31,25 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

Quinto paso: finalmente, determinar el requerimiento de mantenimiento (RM), haciendo uso de la Fórmula 8. 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 40 %.

$$\text{RM de P (kg de P ha}^{-1}\text{)} = \frac{\text{Requerimiento de P}}{\text{Eficiencia de uso del P}} \quad \dots(8)$$

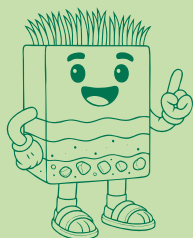
$$\text{RM de P (kg de P ha}^{-1}\text{)} = \frac{31,25}{0,40} = 78,13 \text{ kg ha}^{-1}$$

De esta manera, el requerimiento de mantenimiento de fósforo en el cultivo de maíz es 78,13 kg por hectárea.

Ejemplo práctico (criterio de mantenimiento y construcción)

Se realizó un análisis de suelos en un cultivo de maíz, y se obtuvo 7 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 10 t ha⁻¹. El análisis de correlación y calibración indica que el nivel obtenido de 7 mg de P-Olsen 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 7 mg de P-Olsen por kg de suelo, utilizando la Fórmula 2.

$$\text{Rendimiento alcanzado} = \frac{30 \times 10 \text{ t ha}^{-1}}{100} = 3 \text{ t ha}^{-1}$$

Segundo paso: estimación de la biomasa de raíces y brotes a partir del índice de cosecha (HI). Despejando la Fórmula 3 se obtiene la Fórmula 4, el cual calcula la biomasa total.

$$\text{Biomasa total} = \frac{3 \text{ t ha}^{-1}}{0,48} = 6,25 \text{ t ha}^{-1}$$

Una vez estimada la biomasa total, la biomasa de raíces y brotes se calcula con la Fórmula 5.

$$\text{Biomasa de raíces y brotes} = 6,25 - 3 = 3,25 \text{ t ha}^{-1}$$

Tercer paso: determinar el rendimiento objetivo, añadiendo la biomasa de raíces y brotes al rendimiento alcanzado, como se señala en la Fórmula 6.

$$\text{Rendimiento objetivo} = 3,25 \text{ t ha}^{-1} + 3 \text{ t ha}^{-1} = 6,25 \text{ t ha}^{-1}$$

Cuarto paso: calcular el requerimiento de P utilizando la Fórmula 7. Para este cálculo y con fines prácticos se considera una extracción de 2,5 kg de fósforo por tonelada de producción

$$\text{Requerimiento de P} = 2,5 \text{ kg de P t}^{-1} \times 6,25 \text{ t ha}^{-1} = 15,63 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

Quinto paso: determinar el requerimiento de mantenimiento (RM), haciendo uso de la Fórmula 8. 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 40 %.

$$RM = \frac{15,63 \text{ kg de P ha}^{-1}}{0,40} = 39,06 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

Sexto paso: calcular el requerimiento de construcción anual (RC) usando la Fórmula 9. Para este cálculo y con fines prácticos se considera que es necesario fertilizar con 6 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.

$$RC = IAR \times NCF \quad \dots(9)$$

$$RC = 1,5 \text{ mg de P kg}^{-1} \times \frac{6 \text{ kg de P ha}^{-1}}{1 \text{ mg de P kg}^{-1}} = 9 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

Entonces, el plan de fertilización para el primer año se estima mediante la Fórmula 10.

$$\text{Dosis de fertilización de P} = RM + RC \quad \dots(10)$$

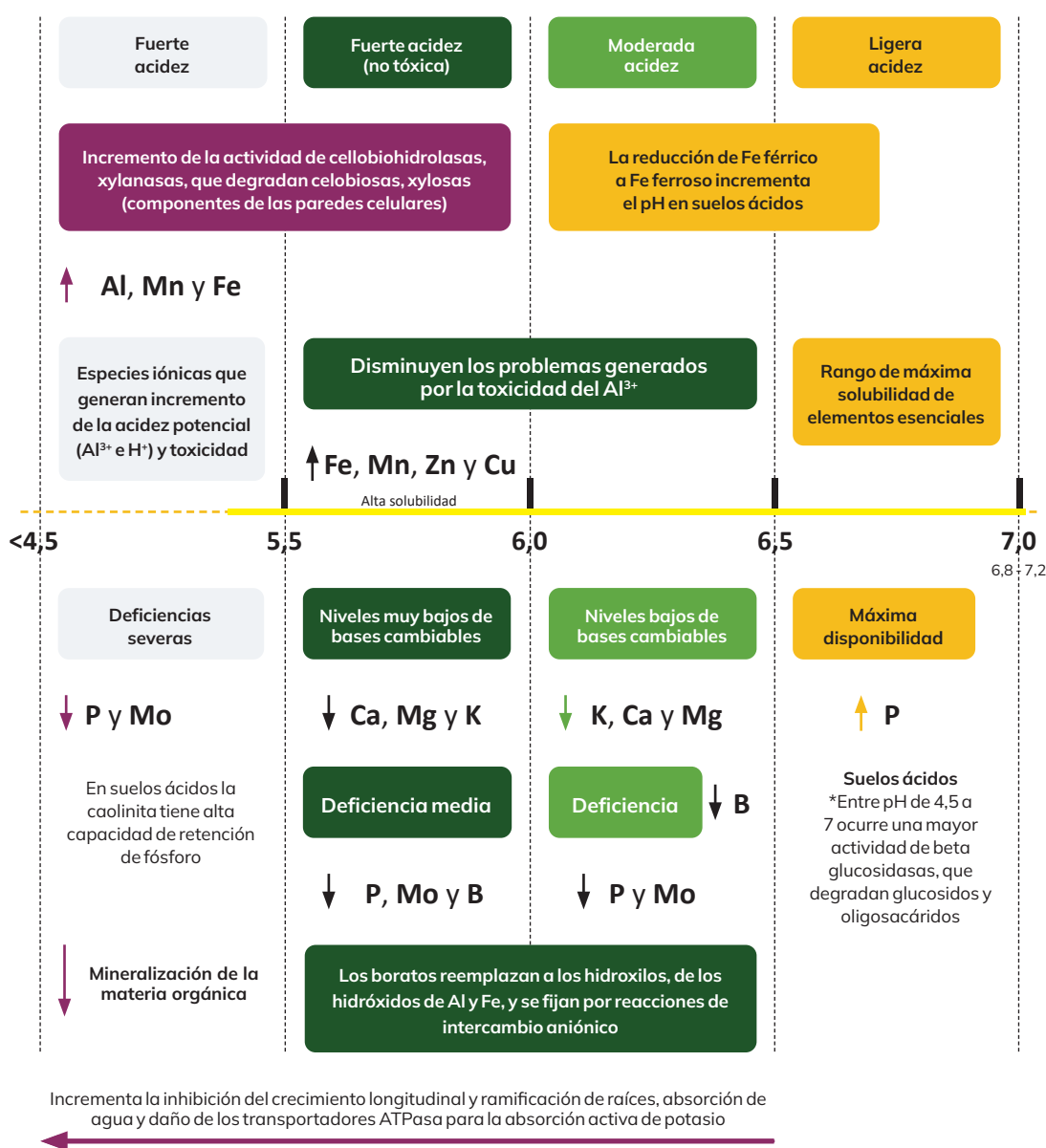
$$\text{Dosis de fertilización de P} = 39,06 \text{ kg de P ha}^{-1} + 9 \text{ kg de P ha}^{-1} = 48,06 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

De esta manera, el requerimiento de mantenimiento y construcción de fósforo en el cultivo de maíz es 48,06 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 Hartemink y Barrow (2023), Wang y Kuzyakov (2024) y Alam et al. (1999).



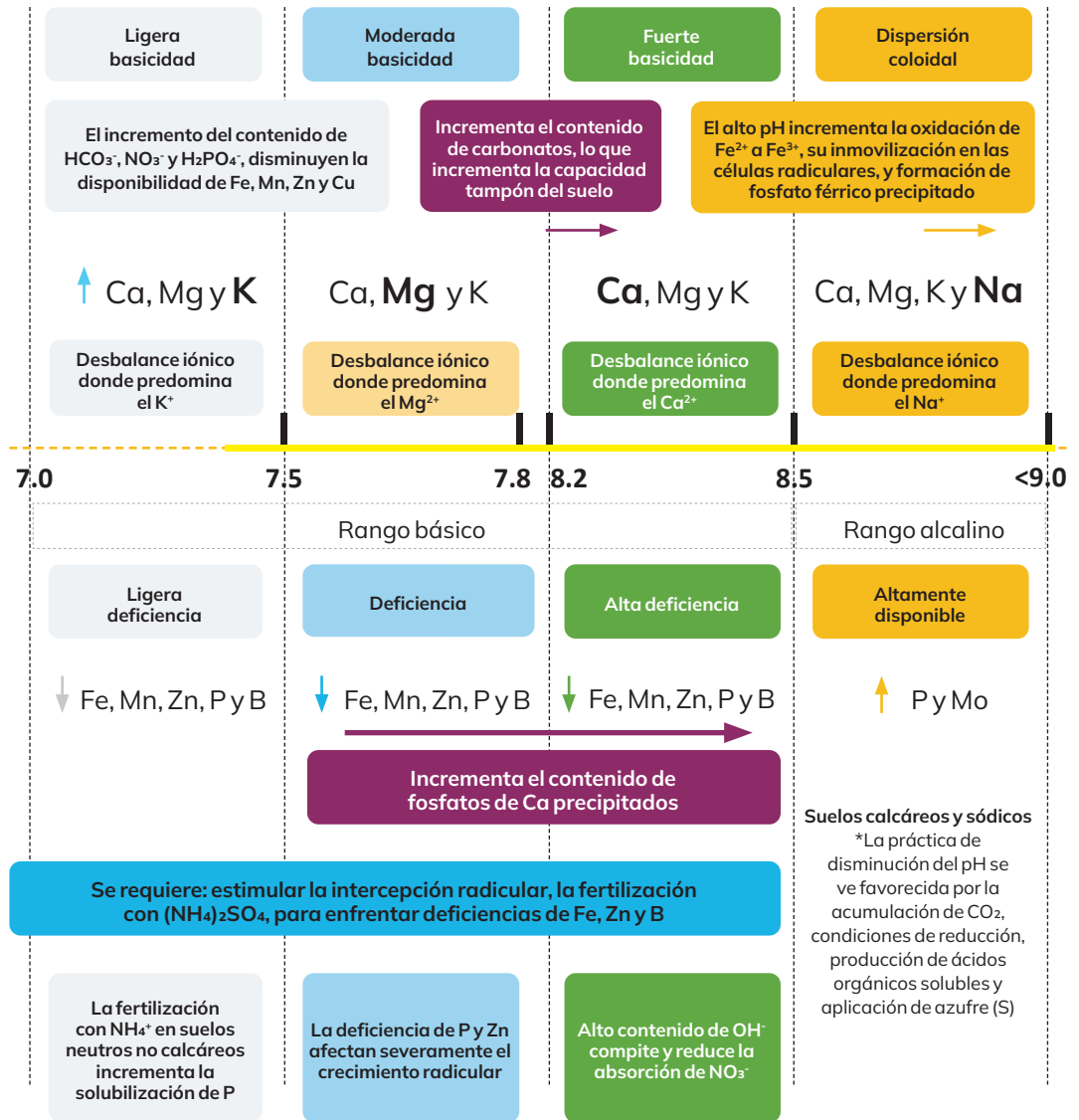


Figura 4. Diagnóstico de la fertilidad del suelo en función al pH

2.2. Análisis geoestadístico de las propiedades del suelo

La geoestadística se introdujo en la ciencia del suelo en la década de los 80's 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 Arequipa

3.1. Ubicación

La EEA Arequipa presenta suelos de tipo Arenosoles áridicos, según la Base Referencial Mundial del Recurso Suelo de la FAO (Internacional Union of Soil Sciences World Reference Base for Soil Resources, 2015). Estos corresponden a suelos minerales poco evolucionados, dominados por una textura arenosa a lo largo del perfil, con la presencia de un horizonte A ócrico débil y un horizonte C constituido principalmente por arenas sueltas de origen aluvial y eólico. Dichos suelos se desarrollan bajo condiciones climáticas áridas y se caracterizan por su alta permeabilidad, drenaje excesivo, baja capacidad de retención de agua y reducida fertilidad natural, rasgos típicos de los Arenosoles formados en ambientes desérticos de la costa sur del Perú. Además, la EEA Arequipa cuenta con 5 centros experimentales con una extensión total de 158,64 ha, siendo los cultivos priorizados; maíz morado (*Zea mays*), maíz forrajero (*Zea mays*), trigo (*Triticum sp.*), avena forrajera (*Avena sativa*), rocoto (*Capsicum pubescens*), papaya (*Carica papaya*), cebolla (*Allium cepa*), ajo (*Allium sativum*), palto (*Persea americana*), cítricos (*Citrus spp.*), ayrampo (*Opuntia apurimacensis*) y alfalfa (*Medicago sativa*), entre otros.

En la estación se realiza investigación, evaluación, conservación y producción de material genético vegetal y animal, así como la prestación de asistencia técnica y otros servicios especializados dirigidos a los agricultores de la región Arequipa. El Centro Experimental Santa Rita se encuentra en el distrito de Santa Rita de Sigwas, provincia de Arequipa, departamento de Arequipa (Figura 5) a una altitud aproximada de 1200-1300 m s. n. m.

El Centro Experimental presenta un clima árido a semiárido, caracterizado por baja precipitación anual (<100 mm), alta radiación solar y amplia oscilación térmica diaria. Las temperaturas medias anuales oscilan entre 18 y 28 °C, con máximas diurnas elevadas y mínimas nocturnas moderadas (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú [SENAMHI], 2025).

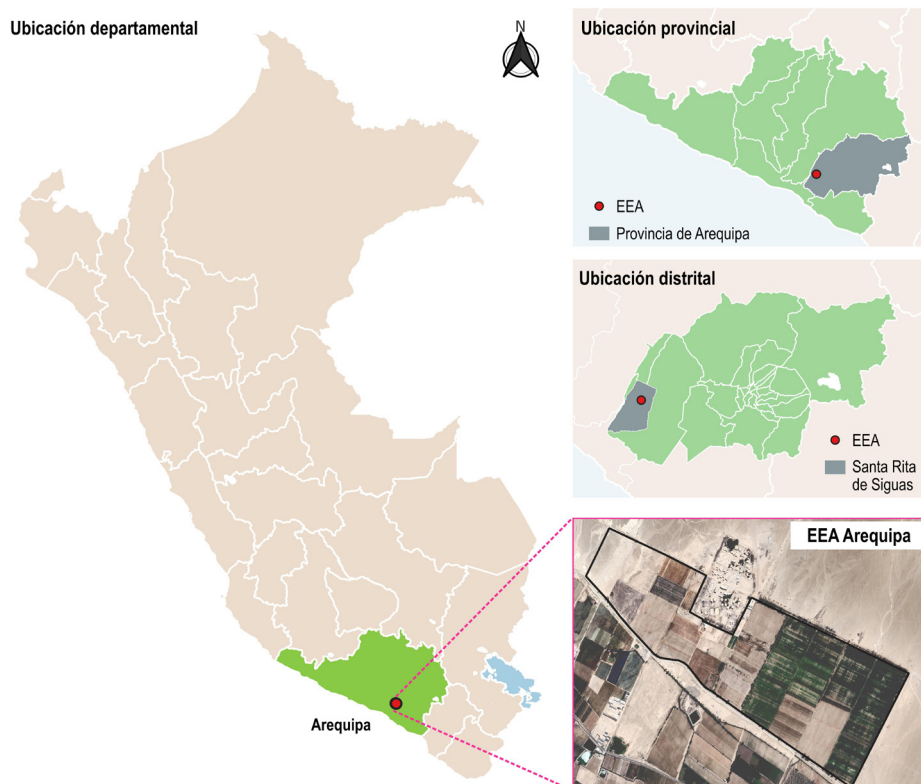


Figura 5. Ubicación de la EEA Arequipa

3.2. Muestreo estratificado del suelo

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

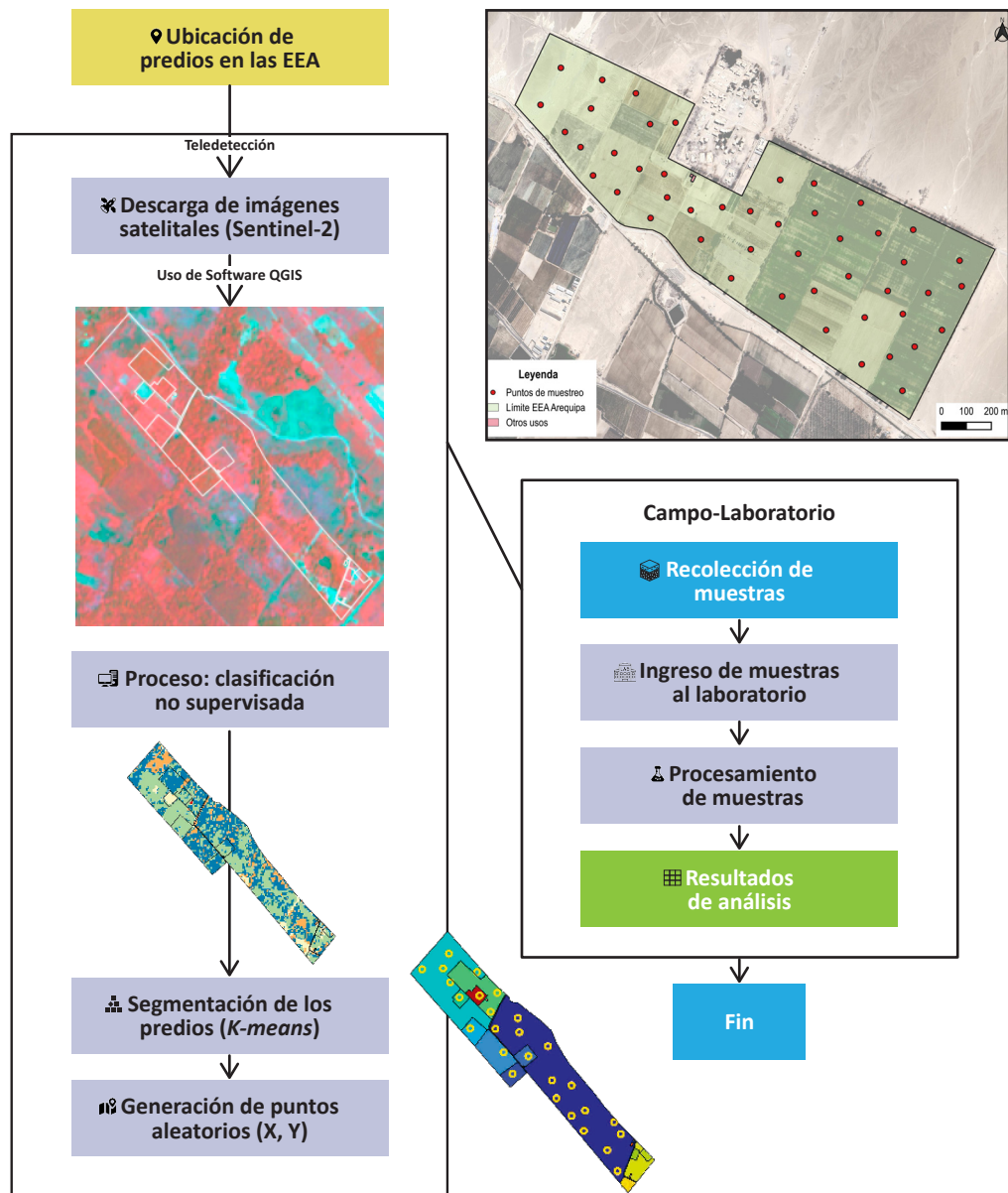


Figura 6. Flujo de trabajo para la determinación de los puntos de muestreo

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 47 puntos de muestreo de suelos, como se observa en la Figura 7.

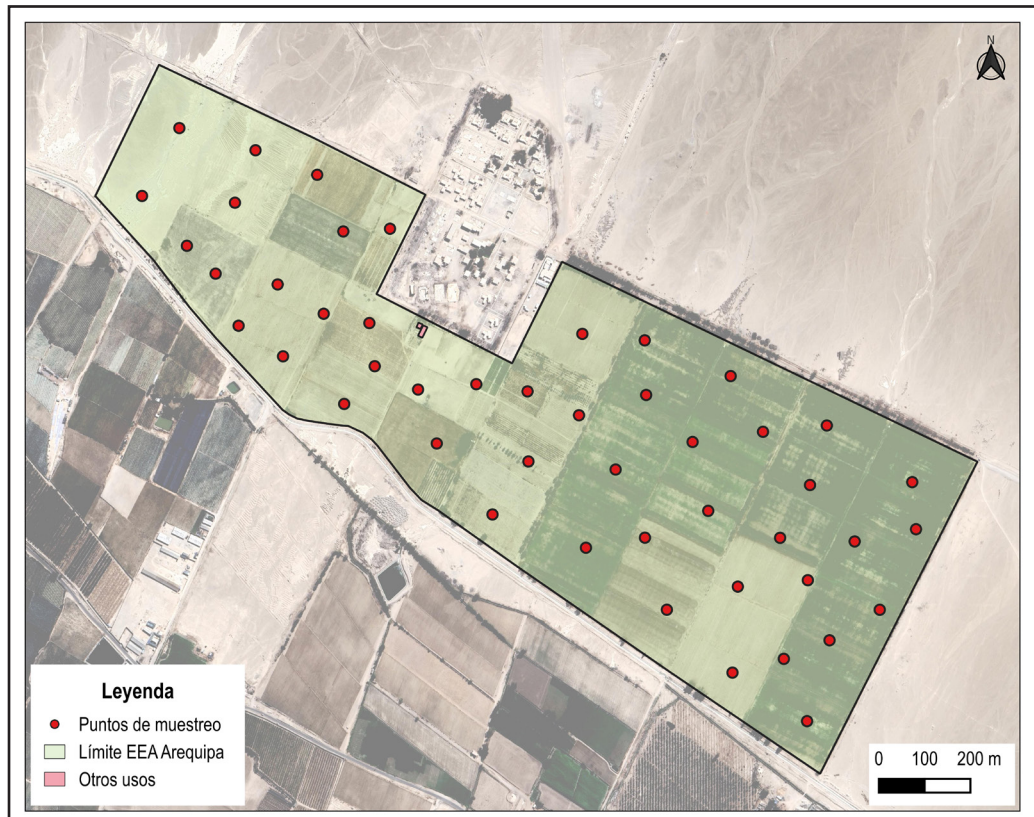


Figura 7. Puntos de muestreo del suelo en la EEA Arequipa

3.2.2. Muestreo de suelos en los puntos identificados

Una vez identificadas las coordenadas de los 47 puntos de muestreo, los pasos que se siguieron para la colecta de muestras de cada punto 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, y entre estas colocar la cartilla de identificación.



Figura 8. Proceso del muestreo de suelos. A) Limpieza y realización del hoyo, B) colecta de suelos, 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 Foliar de la EEA Arequipa 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 (1:1)	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)
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)
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 las 47 muestras analizadas.

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

Variable	Unidad	Media	SD	CV	Mediana	Mínimo	Máximo	Skewness
Arena	%	79,22	5,28	6,66	80,00	68,00	90,00	0,46
Limo	%	8,72	4,45	50,99	7,40	3,00	25,00	-0,81
Arcilla	%	12,06	5,19	43,03	10,60	7,00	26,10	1,36
pH	und	7,76	0,27	3,43	7,80	6,90	8,60	0,4
CE	dS m ⁻¹	2,42	4,79	198,02	1,00	0,11	23,80	2,73
MO	%	0,93	0,37	39,08	0,80	0,40	1,70	0,92
P disp,	mg kg ⁻¹	28,86	12,77	44,24	29,60	6,10	51,40	0,99
K disp,	mg kg ⁻¹	511,86	175,94	34,37	496,48	191,40	1067,96	4,66
CaCO ₃	%	2,60	2,11	81,15	1,60	0,60	9,90	1,79
Ca ²⁺	cmol kg ⁻¹	21,86	19,34	88,48	10,79	3,38	66,84	0,87
Mg ²⁺	cmol kg ⁻¹	1,32	0,32	24,36	1,28	0,44	2,09	0,46
Na ⁺	cmol kg ⁻¹	1,40	1,11	79,44	1,24	0,76	8,18	1,8
K ⁺	cmol kg ⁻¹	1,23	0,41	33,33	1,18	0,53	2,36	1,14
CICe	cmol kg ⁻¹	25,82	19,69	76,27	14,90	5,56	71,60	0,74
PCI	%	76,88	12,55	16,32	74,11	54,91	95,68	-0,4
PMI	%	8,13	4,71	57,95	9,18	0,99	15,28	0,46
PPI	%	7,42	4,44	59,80	6,53	1,10	14,38	1,8
PSI	%	7,57	4,61	60,95	6,72	1,45	21,76	1,14

CE: Conductividad eléctrica en extracto de saturación, MO: materia orgánica del suelo, CICe: capacidad de intercambio catiónico efectivo, CV: coeficiente de variación, K disp.: potasio disponible, PCI: porcentaje de calcio intercambiable, P disp.: fósforo disponible, PMI: porcentaje de magnesio intercambiable, PPI: porcentaje de potasio intercambiable, PSI: porcentaje de sodio intercambiable.

A partir del procesamiento estadístico se estableció que los suelos de la EEA presentaron una textura predominantemente franco-arenosa, con una variabilidad espacial baja para las fracciones gruesas (CV \approx 6,6 %) pero elevada para el limo y arcilla. Así mismo, se observa un contenido de materia orgánica restringido (0,93 \pm 0,36 %), que refleja una estructura de suelo con limitada retención de la humedad y baja cohesión de los agregados.

En cuanto a las propiedades químicas, se registra una reacción moderadamente alcalina ($\text{pH} = 7,76 \pm 0,27$) y una presencia media de carbonatos del 2,6 %. A diferencia de la acidez observada en otras regiones, este pH condiciona la solubilidad de nutrientes, mientras que la capacidad de intercambio catiónico (CICe) promedio de $25,8 \text{ cmol (+) kg}^{-1}$ muestra una desviación estándar alta (19,7), lo cual indica que la fertilidad potencial no es uniforme. El complejo de cambio se encuentra saturado mayoritariamente por calcio ($\text{PCI} \approx 77 \%$), definiendo un ambiente cálcico con niveles de magnesio y potasio dentro de rangos medios.

En cuanto a las sales solubles, su comportamiento espacial constituye el hallazgo más relevante. Mientras que la mediana de la conductividad eléctrica ($0,99 \text{ dS m}^{-1}$) sugiere condiciones no salinas para gran parte del área, el coeficiente de variación supera el 198%, identificándose valores extremos de $23,8 \text{ dS m}^{-1}$. Esta dispersión, significativamente mayor a la de otras variables químicas, evidencia la existencia de focos de salinidad aislados que no son representados por los promedios generales, patrón que se repite en la distribución del calcio intercambiable ($\text{CV} \approx 88 \%$).

Dado el grado de heterogeneidad observado en las variables químicas y físicas, es recomendable el uso de herramientas geoestadísticas para delimitar zonas homogéneas de manejo agronómico. En particular, la fertilidad química general es moderada, pero con riesgos localizados que deben ser monitoreados, como la salinidad en etapa inicial y la distribución desigual de nutrientes. En este contexto, el manejo sitio-específico se presenta como una estrategia esencial para mejorar la eficiencia agronómica y la sostenibilidad del sistema productivo de la EEA Arequipa.

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, texturas), 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 (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 los 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 11) y el p-valor.

$$I = \sum_{i,j}^1 i j \dots(11)$$

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 resultado de estas medidas, se determinará el método de interpolación a emplear. Si existe autocorrelación espacial significativa, se procederá con la interpolación *kriging* ordinario, previa generación y ajuste del variograma experimental. De lo contrario, se optará por el método de distancia inversa ponderada (IDW).

La interpolación por distancia inversa ponderada (IDW) es un método determinístico que estima valores en ubicaciones no muestreadas asignando mayor peso a los puntos más cercanos, siendo dicho peso inversamente proporcional a la distancia. A diferencia del *kriging*, el IDW no requiere el cumplimiento de supuestos geoestadísticos como la estacionariedad o la existencia de autocorrelación espacial significativa, lo que lo convierte en una alternativa adecuada cuando dichos supuestos no se satisfacen.

Los resultados del análisis de autocorrelación se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3. Análisis de autocorrelación espacial de variables del suelo mediante el Índice de Moran

Variable	Índice de Moran	p-valor	Método de interpolación
Arena	0,728	0,002	<i>Kriging</i> ordinario
Limo	0,488	0,235	IDW
Arcilla	0,579	0,253	IDW
pH	0,453	0,101	IDW
CE	0,734	0,003	<i>Kriging</i> ordinario
MO	0,512	0,319	IDW
P disp	0,735	0,001	<i>Kriging</i> ordinario
K disp	0,643	0,036	<i>Kriging</i> ordinario
CaCO ₃	0,719	0,006	<i>Kriging</i> ordinario
Ca ²⁺	0,780	0,001	<i>Kriging</i> ordinario
Mg ²⁺	0,703	0,004	<i>Kriging</i> ordinario
Na ⁺	0,626	0,220	IDW
K ⁺	0,624	0,064	IDW
CICe	0,776	0,001	<i>Kriging</i> ordinario
PCI	0,853	0,001	<i>Kriging</i> ordinario
PMI	0,887	0,001	<i>Kriging</i> ordinario
PPI	0,903	0,001	<i>Kriging</i> ordinario
PSI	0,656	0,029	<i>Kriging</i> ordinario

CE: Conductividad eléctrica en extracto de saturación, MO: materia orgánica del suelo, CICe: capacidad de intercambio catiónico efectivo, CV: coeficiente de variación, IDW: distancia inversa ponderada. K disp.: potasio disponible, PCI: porcentaje de calcio intercambiable, P disp.: fósforo disponible, PMI: porcentaje de magnesio intercambiable, PPI: porcentaje de potasio intercambiable, PSI: porcentaje de sodio intercambiable.

3.7. Interpolación

3.7.1. Interpolación mediante *kriging* ordinario

Previo a la interpolación, es necesario generar y ajustar un variograma experimental que describa la variabilidad espacial de los datos. Este variograma constituye la base del modelo geostatístico sobre el cual se sustenta el *kriging* ordinario.

Procedimiento:

- a. Calcular el variograma experimental utilizando el complemento **Smart-Map** de QGIS.
- 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).
- e. Configurar los parámetros de interpolación en **Smart-Map**.
- f. Seleccionar la variable y el modelo de variograma ajustado.
- g. Seleccionar el método de interpolación: *kriging* ordinario.
- h. Generar el mapa rasterizado.
- i. Exportar el mapa en formato **GeoTIFF** para su almacenamiento y análisis posterior.

3.7.2. Interpolación mediante distancia inversa ponderada

Si bien el complemento Smart-Map permite realizar la interpolación *kriging* de forma integrada en QGIS, este no dispone de opciones para ejecutar el método IDW. Por ello, para este método se utilizará la herramienta nativa de QGIS disponible en la Caja de herramientas de procesamiento, la cual ofrece una implementación directa, accesible y reproducible sin necesidad de instalar complementos adicionales.

Procedimiento:

- a. En la barra de menú, dirigirse a Procesamiento > Caja de herramientas.
- b. En el buscador de la caja de herramientas, escribir IDW.
- c. Hacer doble clic en la herramienta Interpolación IDW ubicada bajo el grupo Interpolación.
- d. En el campo Capa vectorial, seleccionar la capa de puntos con los datos de muestreo.
- e. En Atributo de interpolación, seleccionar la variable de interés y hacer clic en el botón "+" para agregarla.
- f. Definir el coeficiente de distancia (p), comúnmente $p = 2$.
- g. Establecer la extensión del raster de salida mediante la opción Calcular desde capa y seleccionar la capa de referencia.
- h. Definir el tamaño de píxel en X e Y según la resolución requerida.
- i. Especificar la ruta y nombre del archivo de salida en formato GeoTIFF.
- j. Hacer clic en Ejecutar para generar el mapa rasterizado.

3.8. Validación cruzada de modelos de interpolación

Para realizar una validación cruzada de los resultados de *kriging*, 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:

- 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 12).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [Z_1(X_i) - Z_2(X_i)]^2} \quad \dots(12)$$

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. **Coefficiente de determinación (R^2):** mide qué tan bien las predicciones del modelo explican la variabilidad de los datos (Fórmula 13). 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.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n [Z_1(X_i) - Z_2(X_i)]^2}{\sum_{i=1}^n [Z_1(X_i) - Z_2]^2} \quad \dots(13)$$

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 4.

3.9. Resultados del análisis geoestadístico de las propiedades del suelo

Las propiedades del suelo con mayor grado de ajuste entre los valores observados y predichos son el PPI (RMSE = 2,418 y $R^2 = 0,705$), el PMI (RMSE = 2,607 y $R^2 = 0,692$), y el PCI (RMSE = 8,813 y $R^2 = 0,523$) (Tabla 4)

Lo cual indica un alto grado de predictibilidad espacial de esas propiedades del suelo y que la interpretación derivada a partir de esas características puede replicarse en zonas no muestreadas.

Tabla 4. Ajuste y validación de modelos geoestadísticos para las propiedades del suelo en la EEA Arequipa

Variable	Modelo	Nugget (C_0)	Sill (C_0+C)	Range (m)	Cross-validation	
					RMSE	R^2
Arena	<i>Exponential</i>	0	35,033	1079,679	4,439	0,307
CE	<i>Exponential</i>	0	2,529	1081,131	1,302	0,295
P disp.	<i>Exponential</i>	28,087	207,857	1055,564	10,304	0,340
K disp.	<i>Exponential</i>	17 012,406	34 276,592	1079,679	167,609	0,083
CaCO ₃	<i>Exponential</i>	0	5,350	1079,679	1,790	0,312
Ca ²⁺	<i>Exponential</i>	0	462,239	1079,679	16,528	0,321
Mg ²⁺	<i>Exponential</i>	0,027	0,095	443,276	0,287	0,191
ClCe	<i>Exponential</i>	0	475,211	1079,679	16,971	0,311
PCI	<i>Exponential</i>	0	207,029	1079,679	8,813	0,523
PMI	<i>Exponential</i>	0	27,863	1079,679	2,607	0,692
PPI	<i>Exponential</i>	0	24,899	1079,679	2,418	0,705
PSI	<i>Exponential</i>	3,485	25,957	1079,679	4,728	0,076

CE: conductividad eléctrica en extracto de saturación, K disp.: potasio disponible, MO: materia orgánica del suelo, PCI: porcentaje de calcio intercambiable, P disp.: fósforo disponible, PMI: porcentaje de magnesio intercambiable, PPI: porcentaje de potasio intercambiable, PSI: porcentaje de sodio intercambiable, K disp: Potasio disponible, CV: coeficiente de variación.

3.10. Mapeo digital de las propiedades del suelo

Las propiedades del suelo se han representado en los respectivos mapas interpolados (Figura 9-26), mostrando la variación espacial de las características físicas y químicas de los suelos de la EEA Arequipa.

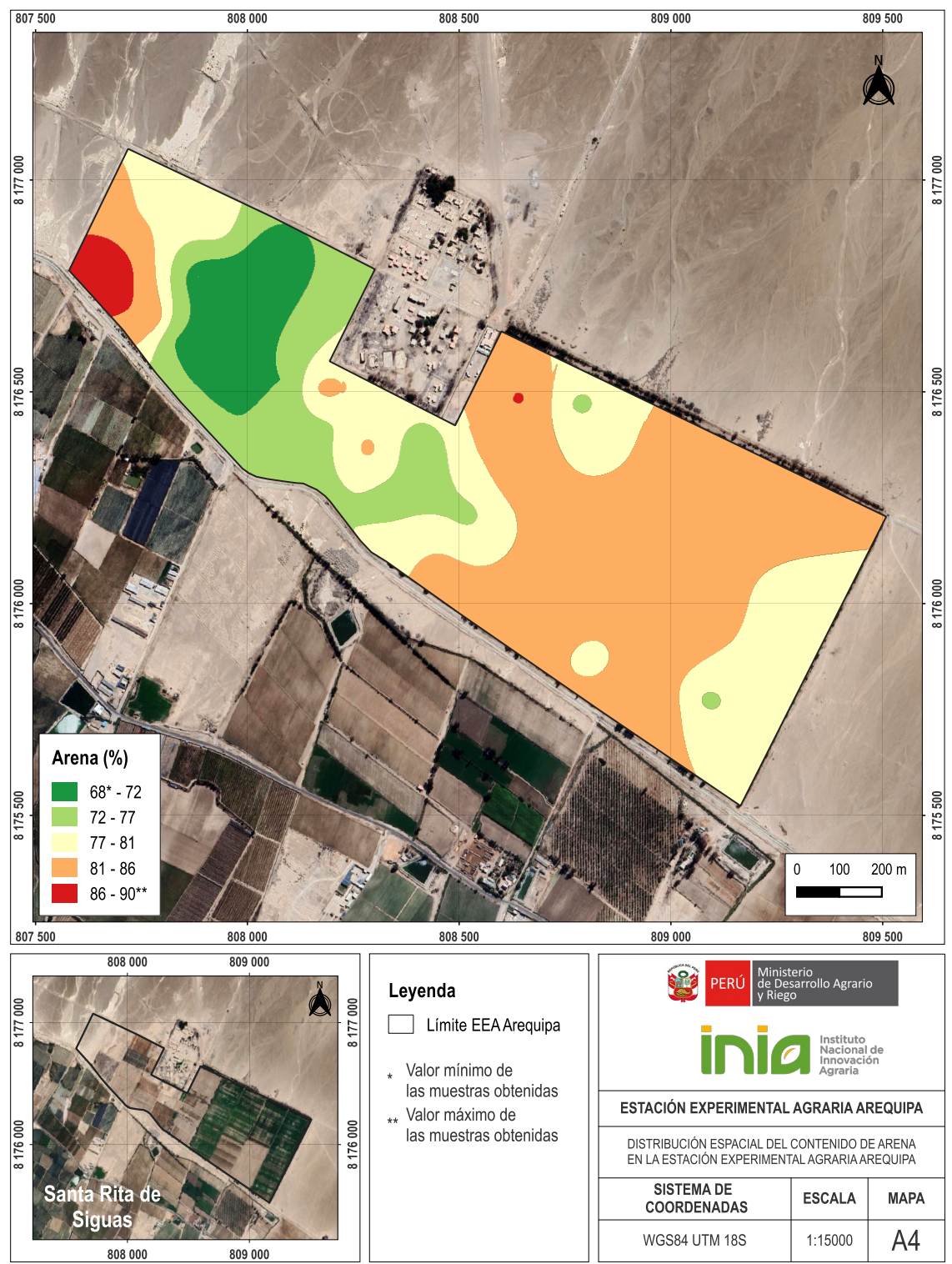


Figura 9. Mapa de variación espacial del porcentaje de arena

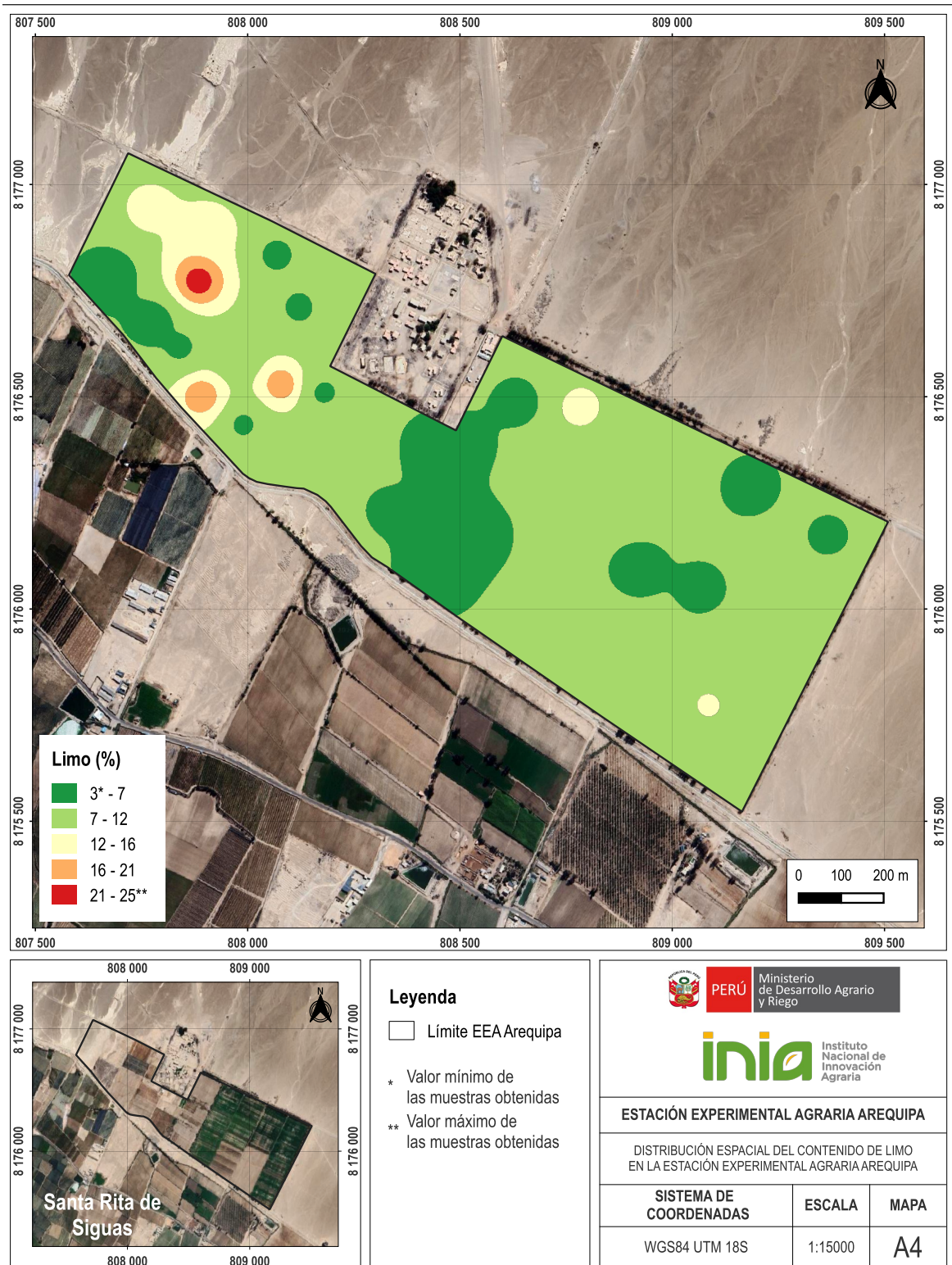


Figura 10. Mapa de variación espacial del porcentaje de limo

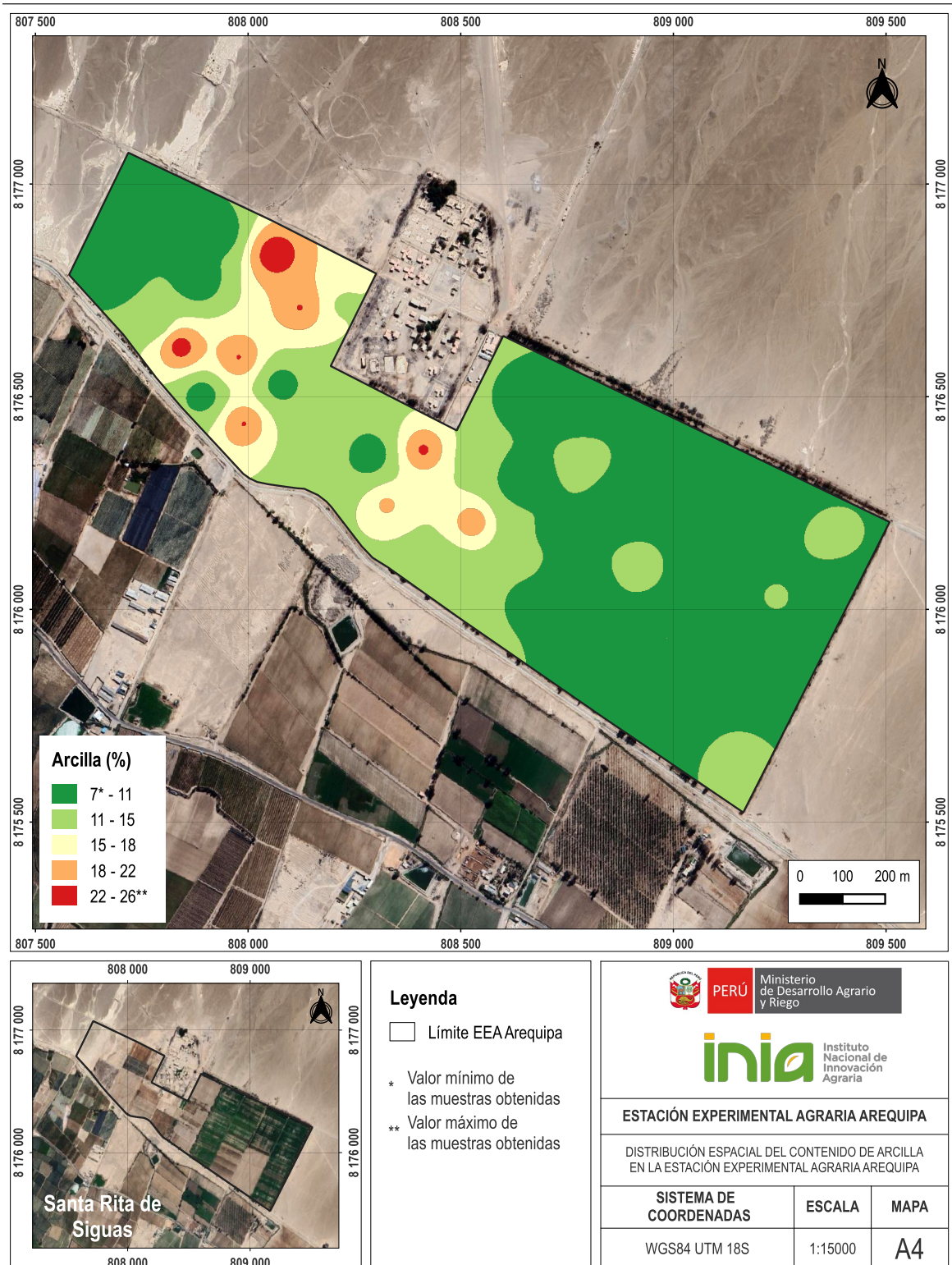


Figura 11. Mapa de variación espacial del porcentaje de arcilla

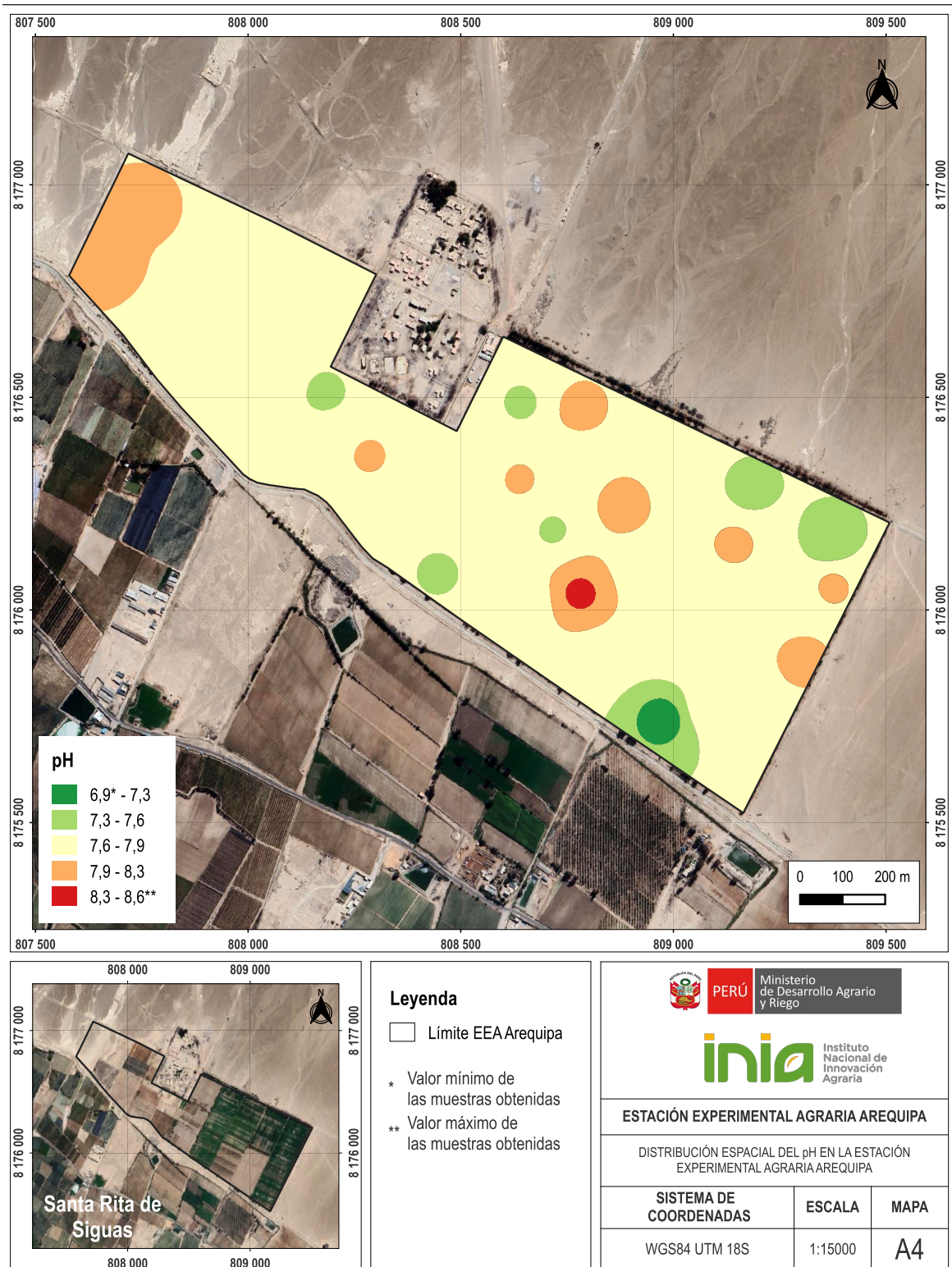


Figura 12. Mapa de variación espacial del pH

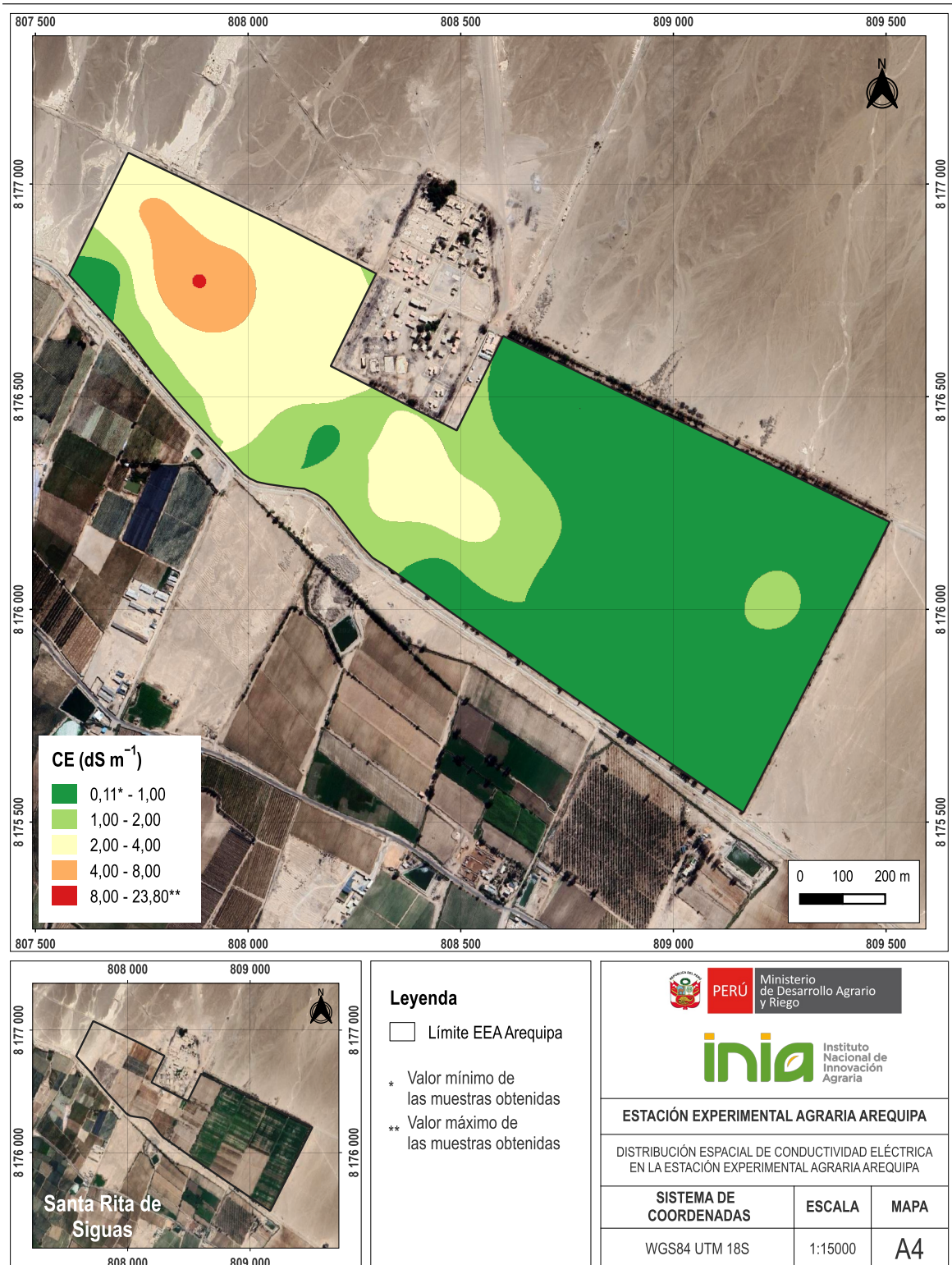


Figura 13. Mapa de variación espacial de la conductividad eléctrica

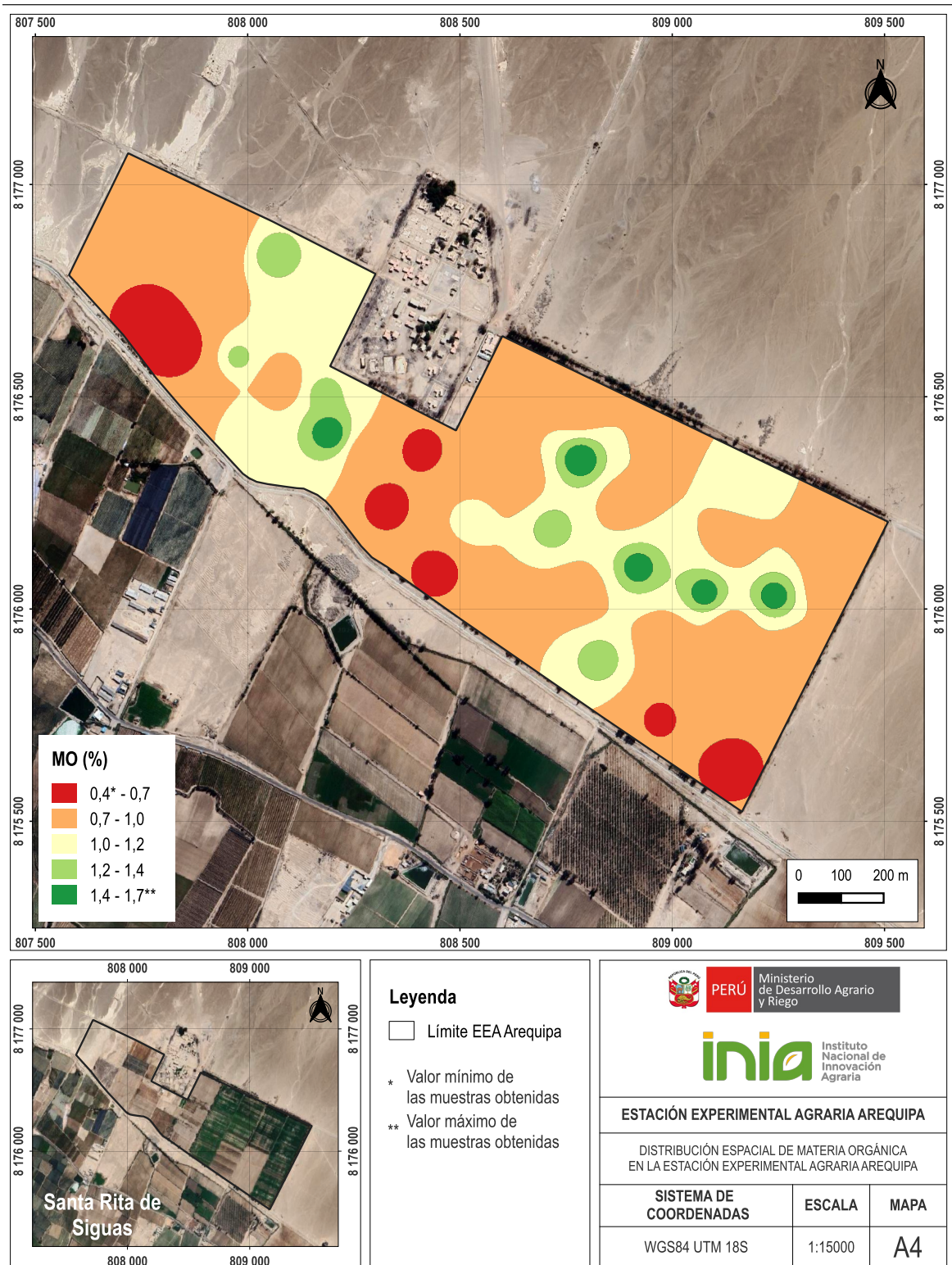


Figura 14. Mapa de variación espacial del porcentaje de materia orgánica

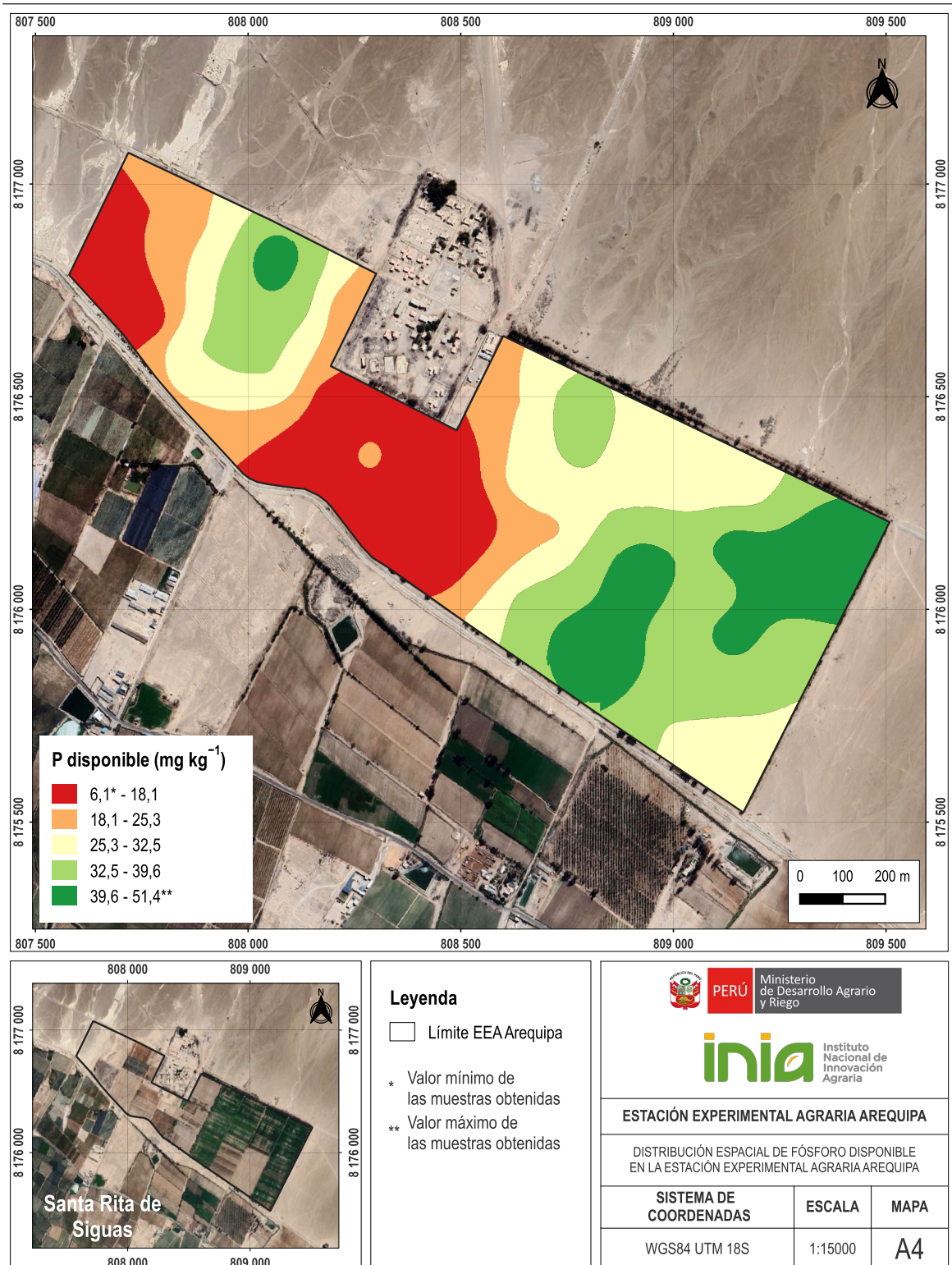


Figura 15. Mapa de variación espacial del fósforo disponible

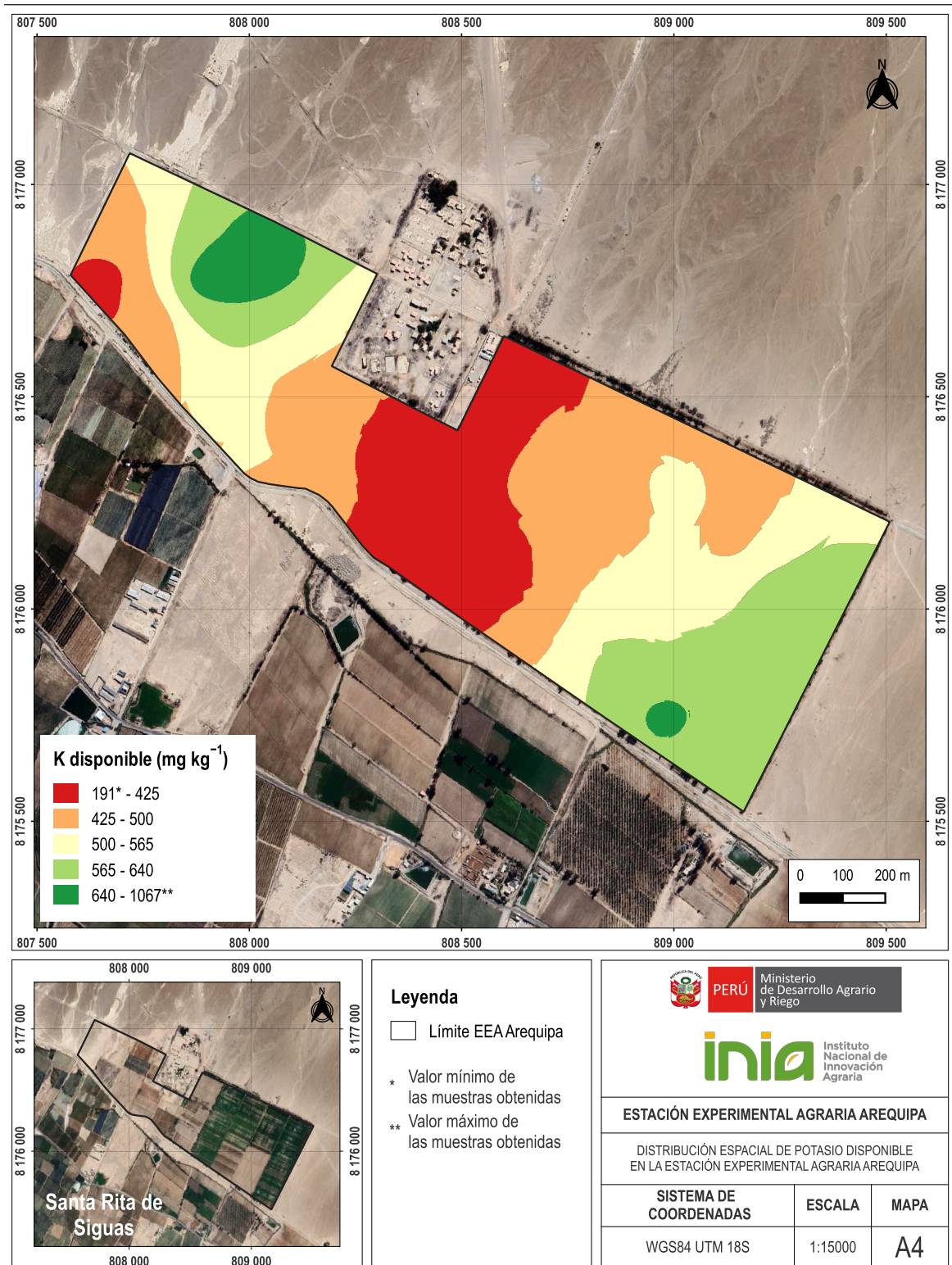


Figura 16. Mapa de variación espacial del potasio disponible

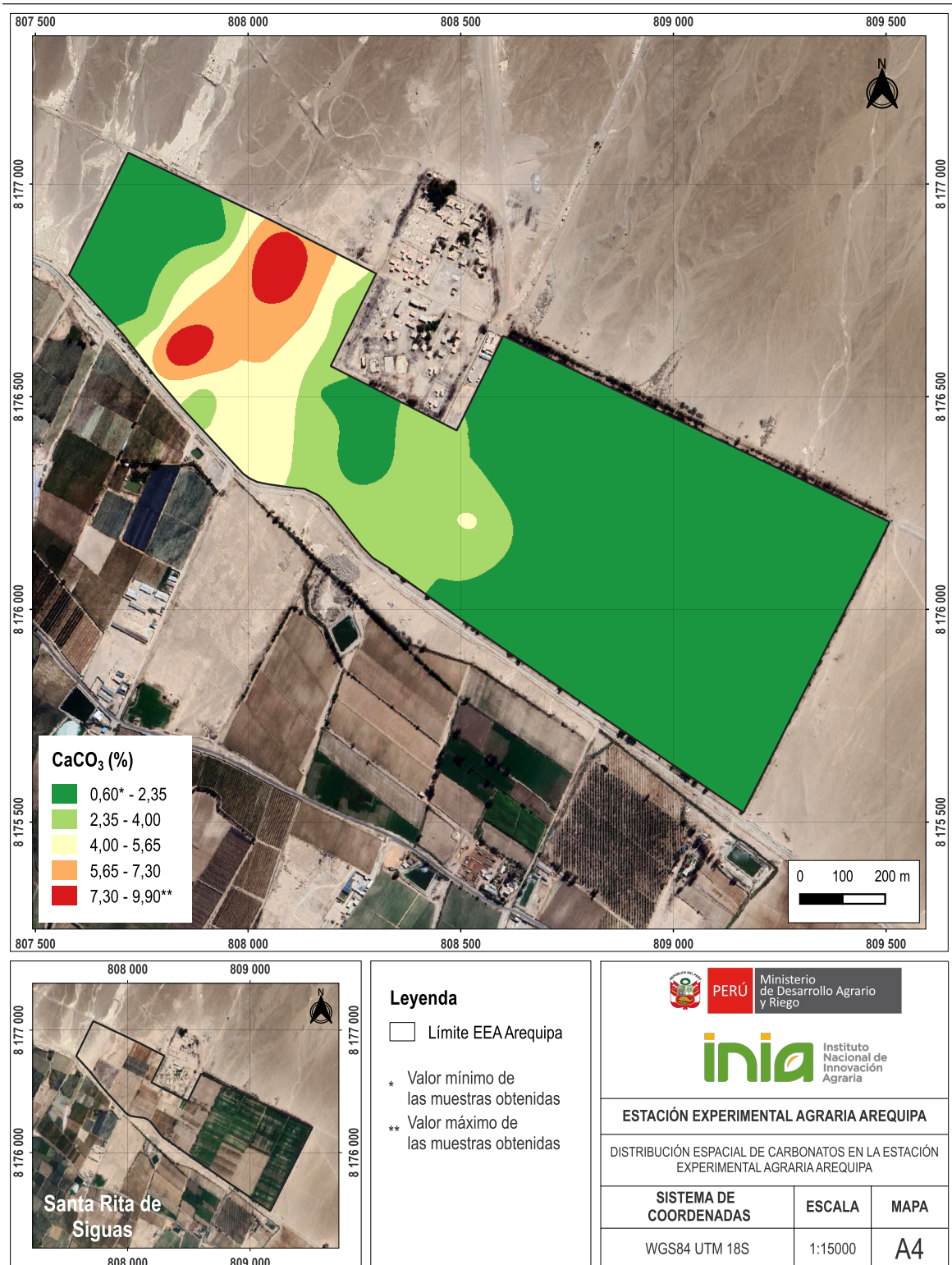


Figura 17. Mapa de variación espacial del porcentaje de carbonato de calcio

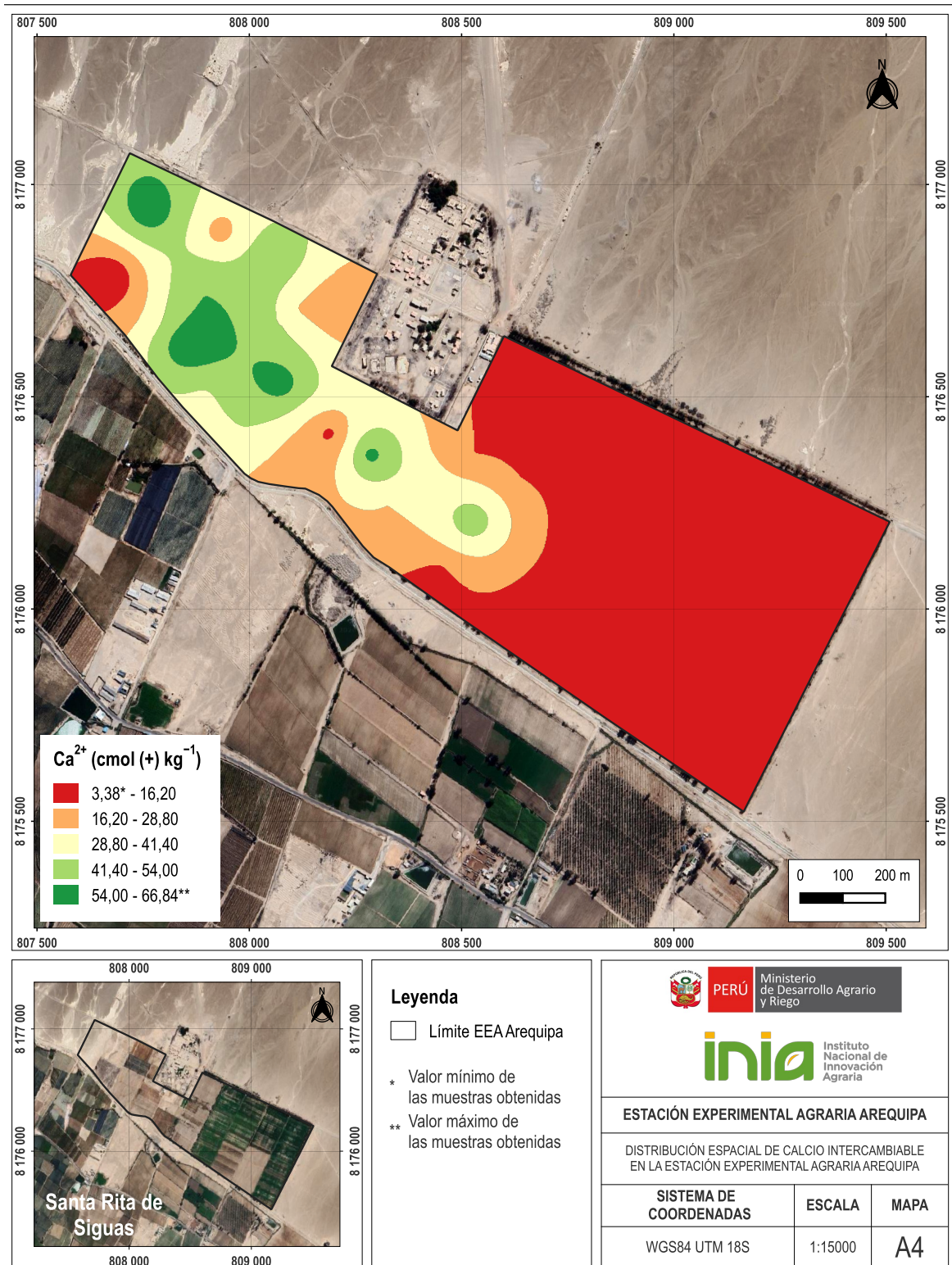


Figura 18. Mapa de variación espacial del calcio intercambiable

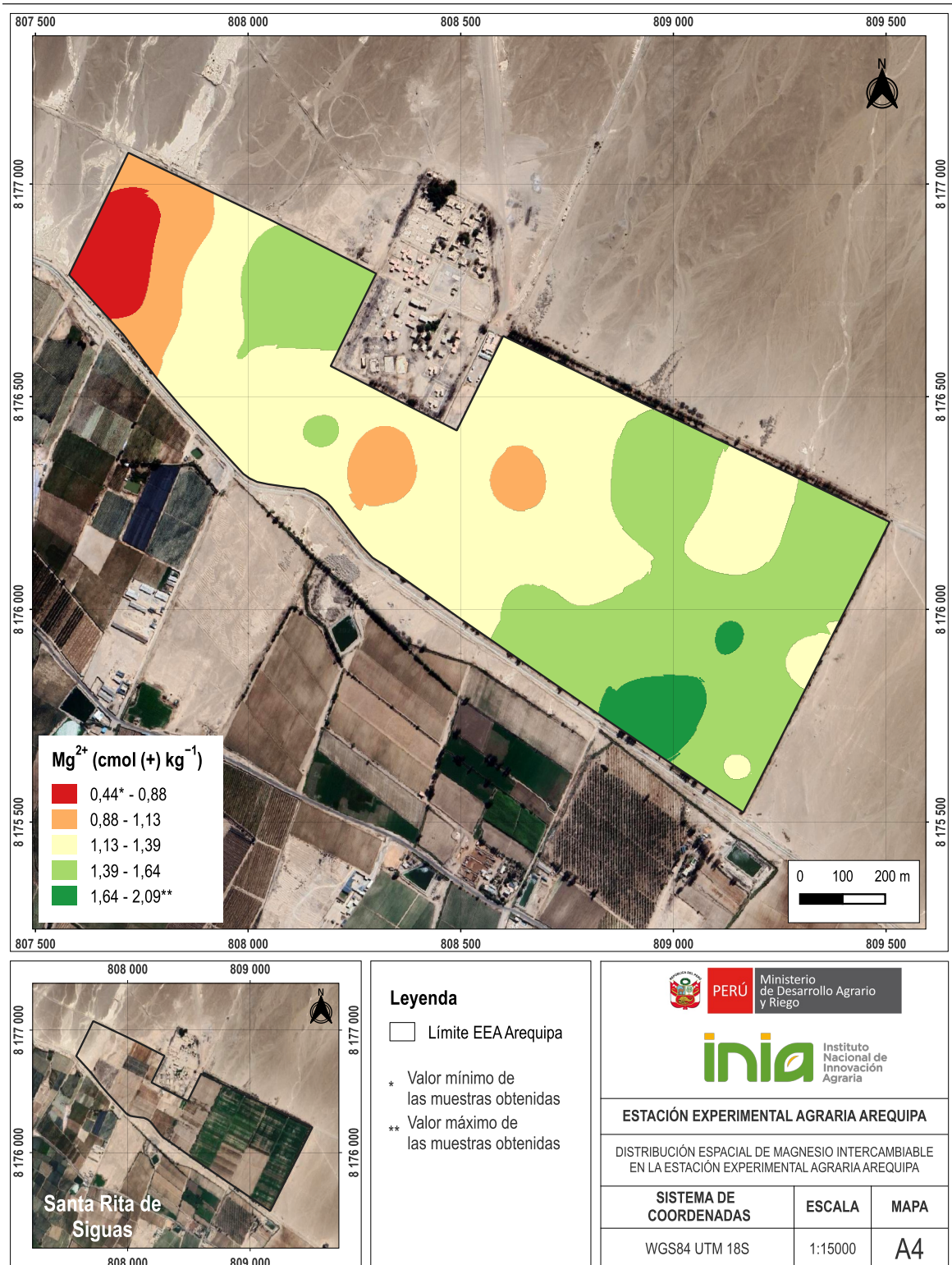


Figura 19. Mapa de variación espacial del magnesio intercambiable

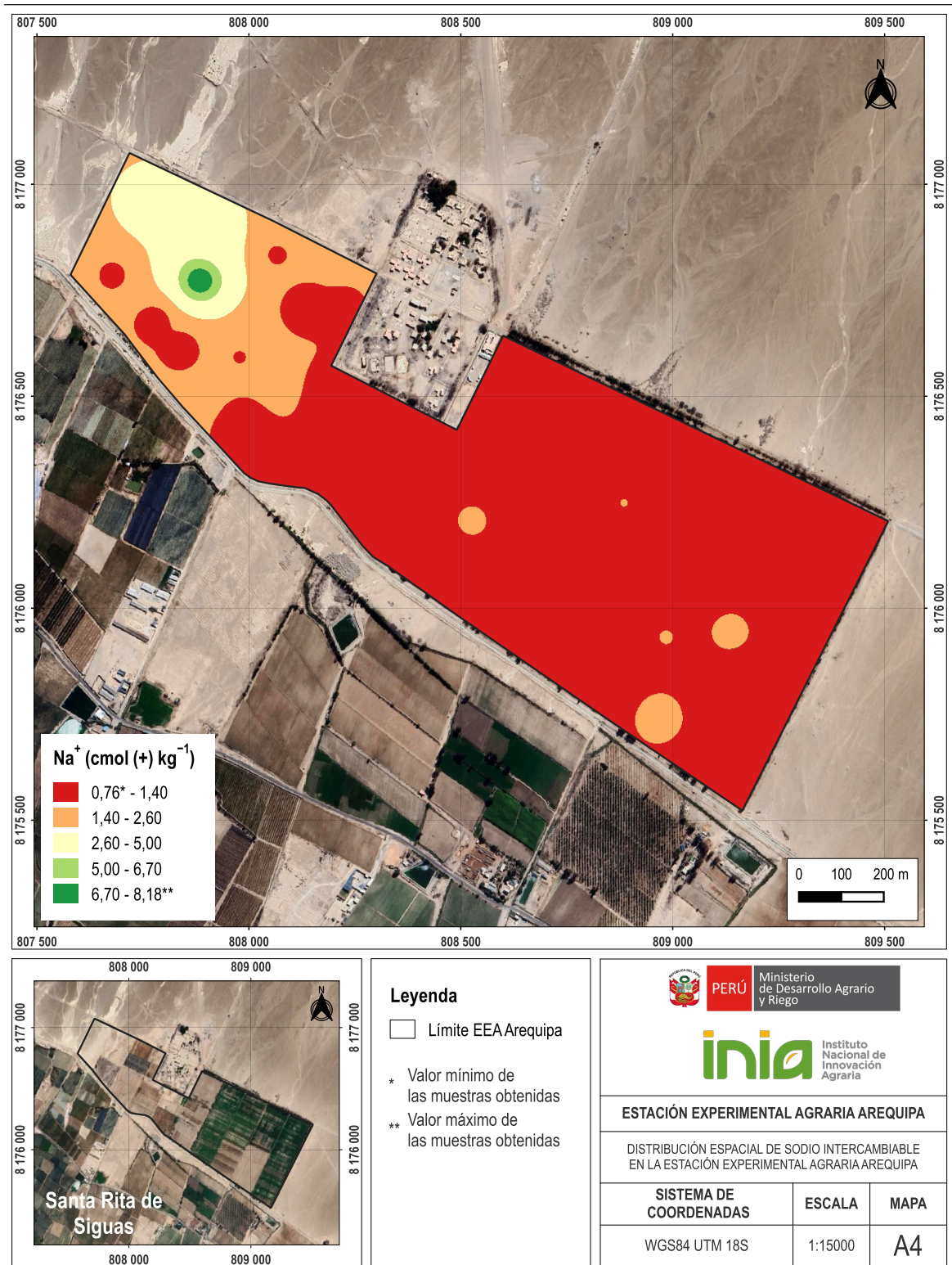


Figura 20. Mapa de variación espacial del sodio intercambiable

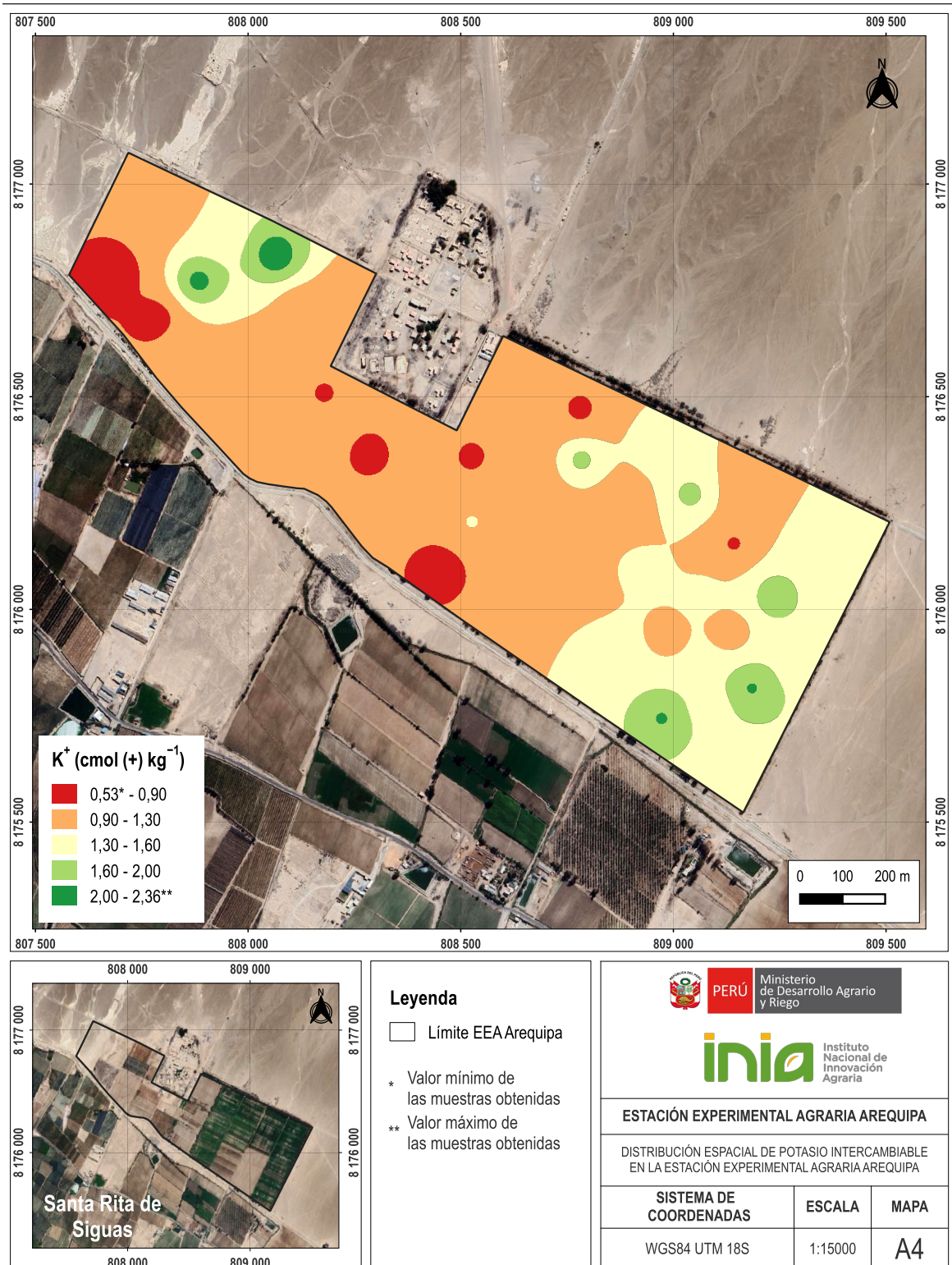


Figura 21. Mapa de variación espacial del potasio intercambiable

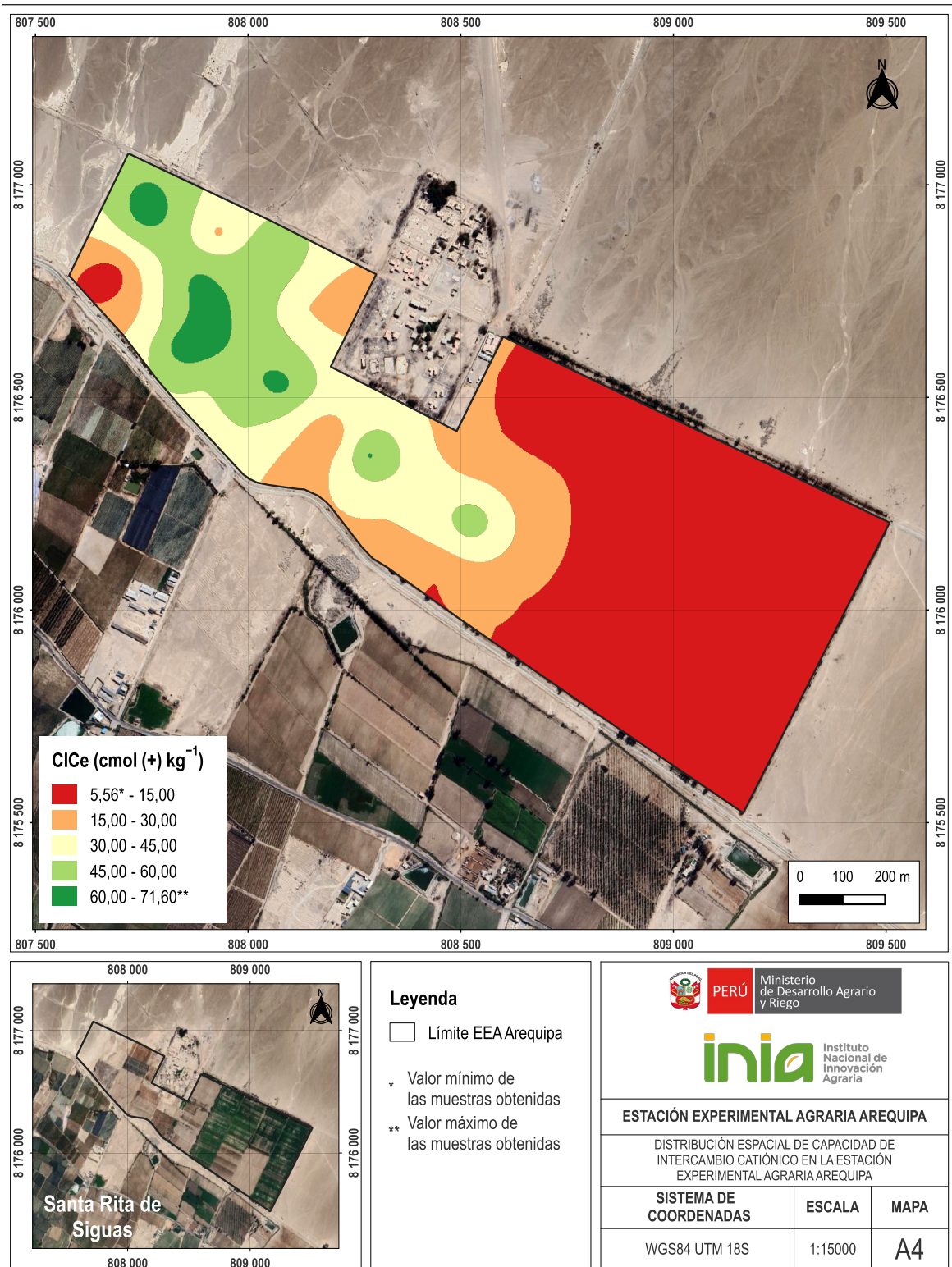


Figura 22. Mapa de variación espacial de la capacidad de intercambio catiónico efectiva

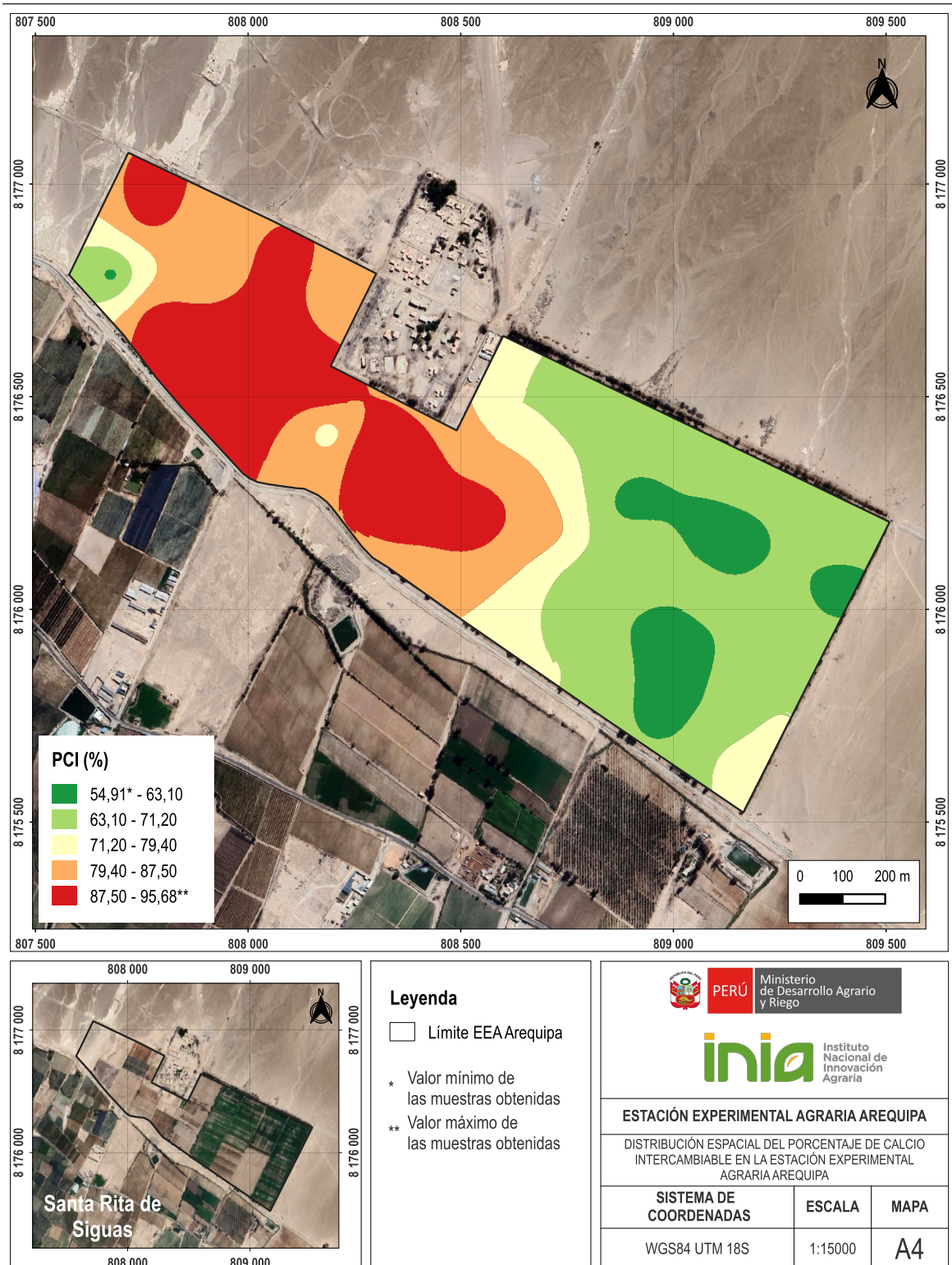


Figura 23. Mapa de variación espacial del porcentaje de calcio intercambiable

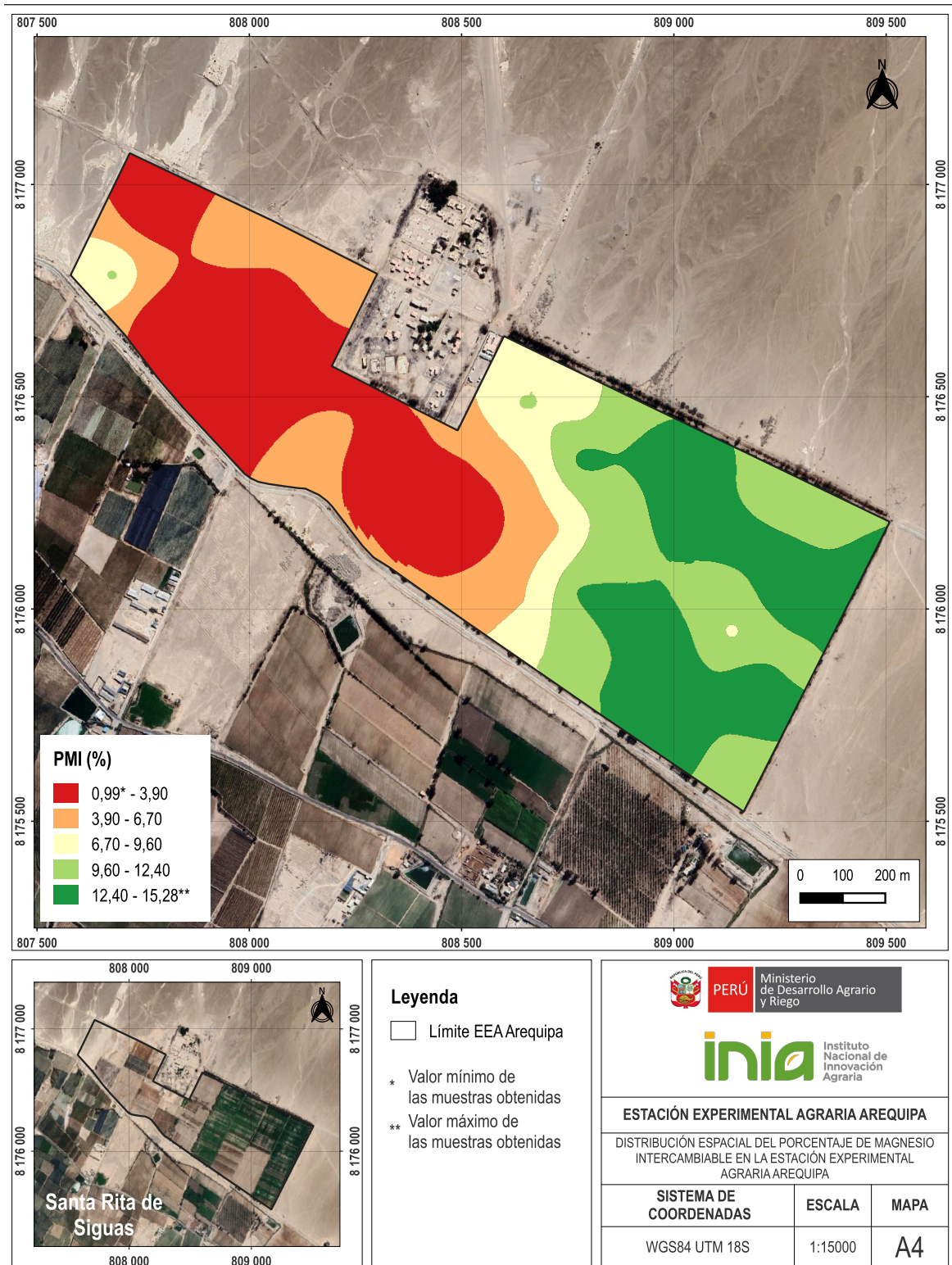


Figura 24. Mapa de variación espacial del porcentaje de magnesio intercambiable

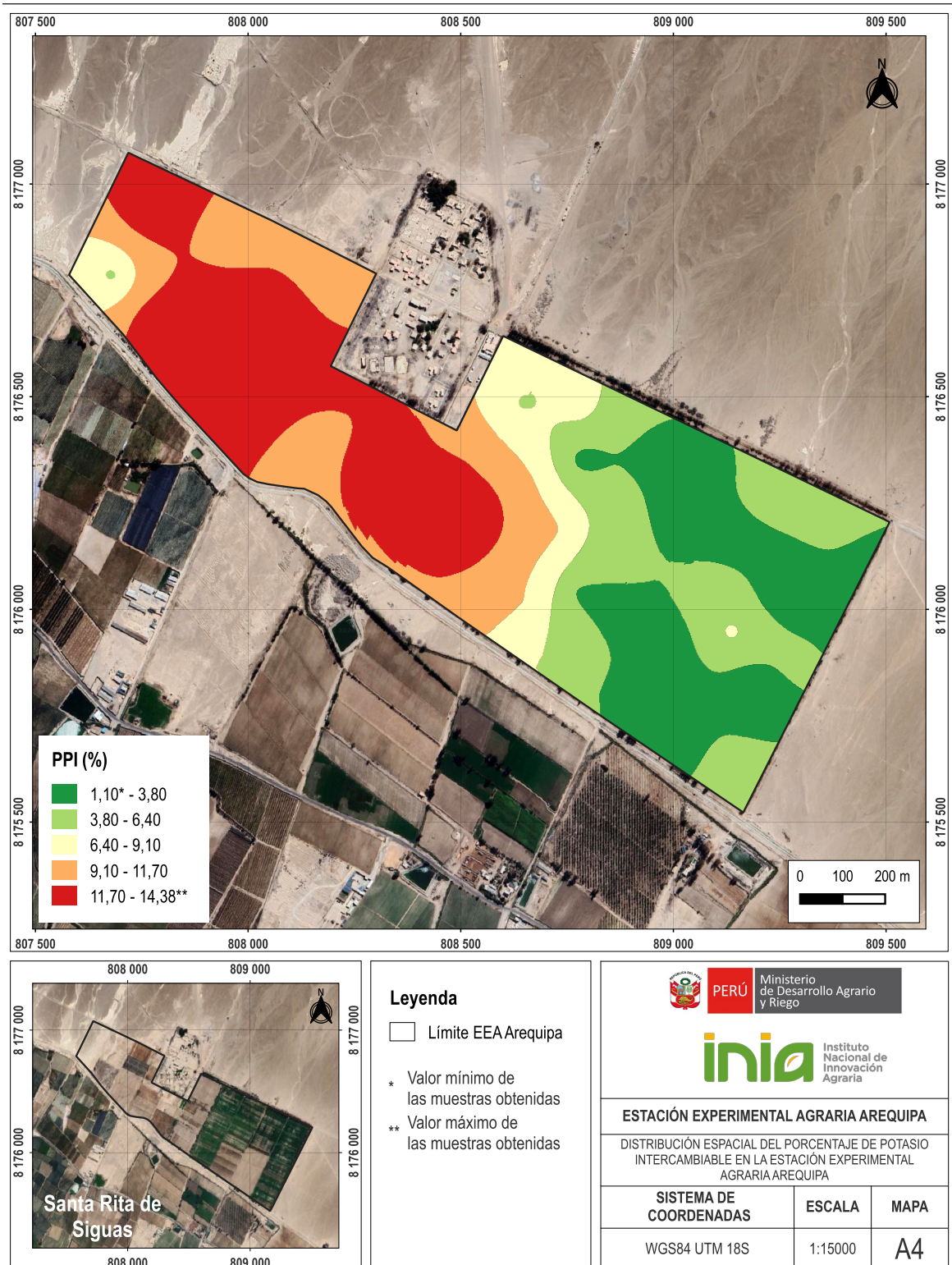


Figura 25. Mapa de variación espacial del porcentaje de potasio intercambiable

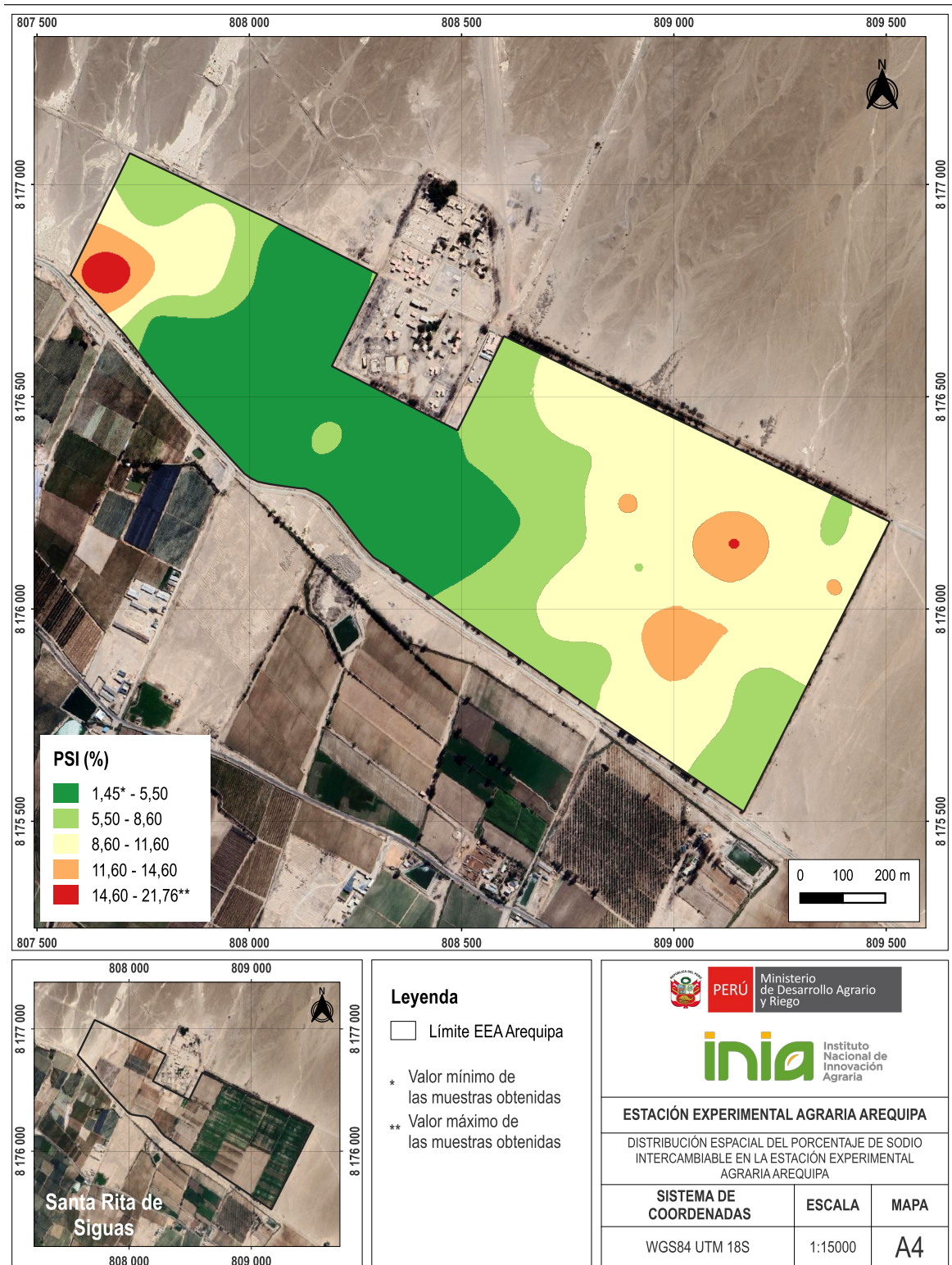


Figura 26. Mapa de variación espacial del porcentaje de sodio intercambiable





inia
Instituto Nacional de Innovación Agraria

EXAMINACIÓN DE LABORATORIO

COPIA
INSTRUMENTAL
en uso

12

1584

247

210

11

8

76

150
125
100
75
50
25

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

La Estación Experimental Agraria Arequipa, específicamente el Centro Experimental Santa Rita, presenta un sistema edáfico característico de regiones áridas irrigadas: texturas dominadas por arena, baja materia orgánica, pH alcalino y una salinidad altamente variable. Estos atributos, junto con la presencia dominante de calcio en el complejo de cambio y la distribución espacial heterogénea del Mg^{2+} , K^+ , Na^+ y P disponible, demandan un manejo ajustado sitio-específico y fundamentado en principios agronómicos aplicables a suelos arenosos bajo fertirriego. Las recomendaciones expuestas en este capítulo se sustentan en los resultados analíticos de la Tabla 2, la interpretación de los mapas espaciales (Figuras 9-26) y los criterios de suficiencia y equilibrio catiónico documentados por la literatura internacional.

4.1. Índice de saturación de bases catiónicas

4.1.1. Capacidad de intercambio catiónico efectiva: interpretación crítica y consideraciones analíticas

La Figura 22 muestra la distribución espacial de la CICe en la EEA Arequipa, clasificada en cinco rangos: 5,56-15,00; 15,00-30,00; 30,00-45,00; 45,00-60,00 y 60,00-71,60 $cmol(+) kg^{-1}$. Si bien esta clasificación permite identificar gradientes relativos, los valores absolutos requieren una interpretación cuidadosa. De acuerdo con la Tabla 2, la textura de los suelos del predio es predominantemente arenosa a franco arenosa, la materia orgánica es baja (0,3-1,2 % en la mayoría de los sectores), y no se reportan horizontes arcillosos profundos ni materiales volcánicos amorfos que pudieran justificar una CIC naturalmente elevada.

En suelos áridos, con clases texturales parecidas a las nuestras (arena franca y franco arenosa) la CIC suele situarse entre 6 y 14 $cmol(+) kg^{-1}$ (Adam et al., 2021). Incluso en suelos arcillosos no superan los 55 $cmol(+) kg^{-1}$ (Havlin et al., 2016; Adam et al., 2021). Por ello, los valores observados en las clases 30,00-45,00; 45,00-60,00 y 60,00-71,60 $cmol(+) kg^{-1}$ no son coherentes con el contexto edáfico.

En suelos cálcicos de zonas áridas, la determinación de la capacidad de intercambio catiónico mediante extractantes neutros o ácidos puede sobreestimar la contribución de Ca^{2+} y Mg^{2+} debido a la disolución parcial de carbonatos durante el análisis, lo que produce valores de CIC artificialmente altos cuando se suman los cationes intercambiables (Whitlark, 2011; Nel et al., 2023). Este fenómeno es especialmente marcado cuando se utiliza el método con extracción ácida o con soluciones no tamponadas, las cuales disuelven $CaCO_3$ y $MgCO_3$ presentes en forma fina o parcialmente cristalina.

En consecuencia, la CIC obtenida bajo estas condiciones refleja una combinación de cationes realmente adsorbidos en el complejo de cambio, y cationes liberados por disolución parcial de carbonatos, los cuales no representan capacidad de intercambio real.

En este contexto, la sobreestimación de la CICe afecta directamente los cálculos de saturación (PCI, PMI, PPI y PSI), pues todos dependen del valor de CIC en el denominador. Cuando la CIC está artificialmente elevada ocurre lo siguiente:

- El PCI puede aparecer más alto o bajo de lo real, según la proporción de Ca liberado por carbonatos en contraste con el Ca realmente adsorbido.

- El PMI, PPI y PSI aparecen artificialmente bajos, ya que sus valores absolutos no aumentan al mismo ritmo que la CIC inflada.
- Los cálculos de nutrientes requeridos basados en BCSR producen valores exagerados de Ca, Mg o K necesarios para corregir saturaciones, los cuales no son agrónomicamente aplicables.

Por esta razón, la CICE debe utilizarse principalmente como indicador espacial relativo, ayudando a distinguir zonas con mayor o menor complejidad iónica, pero no como referencia absoluta para establecer dosis directas de enmiendas o fertilizantes o al compararlo con valores de referencia en la literatura. Los cálculos basados estrictamente en BCSR (para Ca, Mg, K y Na) no deben tomarse como dosis aplicables, sino como aproximaciones diagnósticas.

La sección de cationes intercambiables (PCI, PMI, PPI, PSI) se desarrolla a continuación teniendo en cuenta estas limitaciones.

4.1.2. Porcentaje de calcio intercambiable

De acuerdo con la Tabla 2, el calcio intercambiable (Ca^{2+}) reportado en los suelos de la EEA Arequipa varía entre 3,38 y 66,84 $\text{cmol}(+) \text{kg}^{-1}$, con porcentajes de saturación (PCI) entre 54,91 y 95,68 %. No obstante, estos valores deben interpretarse con cautela porque, como se explicó previamente en la sección de CIC efectiva, parte del calcio medido como “intercambiable” pudo provenir de la disolución de carbonatos durante la extracción, lo que pudo haber aumentado simultáneamente las cifras de Ca intercambiable y la CIC. Por esta razón, los valores absolutos de PCI no representan la saturación real del complejo de cambio, sino una saturación aparente afectada por el método analítico.

El mapa del PCI (Figura 23) se clasificó en cinco categorías en rangos de: 54,91-63,10 %, 63,10-71,20 %, 71,20-79,40 %, 79,40-87,50 %, 87,50-95,68 %. Estas categorías permiten reconocer gradientes relativos entre zonas con mayor o menor predominancia cálcica, aunque los valores numéricos sean artificialmente elevados. El PCI debe entenderse, por tanto, como un indicador comparativo entre ambientes del predio, no como un valor absoluto equivalente al que se esperaría en suelos no cálcicos. Desde el enfoque BCSR, el rango funcional del Ca^{2+} se sitúa entre 65 y 75 %.

Entonces, teniendo presente estas consideraciones, se pueden interpretar las categorías de suelos como sigue:

- Las categorías 4 y 5 (> 79,4 %) representan las zonas con mayor dominancia relativa de Ca^{2+} , donde es más probable que aparezcan antagonismos Ca-Mg y Ca-K, especialmente donde el PMI es bajo.
- Las clases 2 y 3 (63,1-79,4 %) describen zonas intermedias donde la saturación cálcica aparente se mantiene en un rango funcional relativo.
- La clase 1 (< 63,1 %) identifica las áreas donde el calcio aparece más diluido dentro del complejo de cambio; en la práctica, pueden corresponder a zonas con menor carbonato o menor densidad del complejo de intercambio.

Para estas clases mencionadas las posibles recomendaciones de manejo serían lo siguiente:

- En las categorías altas (> 79,4 %), evitar aportar Ca soluble y priorizar el ajuste del PMI.
- En las categorías intermedias (63,1-79,4 %), mantener el estado actual sin incrementos innecesarios.

- En la categoría baja (< 63,1 %), pueden considerarse ajustes graduales con yeso agrícola, siempre basados en diagnóstico agronómico y no únicamente en el valor de PCI reportado.

Las zonas con PCI menor a 63,1 % (categoría 1) la saturación de Ca^{2+} puede ser insuficiente para garantizar un buen equilibrio nutricional y una buena estabilidad física. En estas, se recomienda el uso de yeso agrícola ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) como fuente de calcio que no modifica el pH.

Por ejemplo, cuando sea necesario subir el PCI, de 55 a 65 % en un suelo con CICe de 10 $\text{cmol}(+) \text{kg}^{-1}$, el cálculo se hace de la siguiente manera:

Primer paso: determinar la cantidad de calcio faltante, siguiendo el enfoque BCSR de McLean (1977). Para ello, se calcula la diferencia entre la saturación actual y la saturación objetivo, multiplicada por la CIC del suelo (en este caso se usará la CICe) mediante la Fórmula 14:

$$\text{Ca requerido} = \frac{(\text{PCI objetivo} - \text{PCI actual}) \times \text{CIC}}{100} \quad \dots(14)$$

$$\text{Ca requerido} = \frac{(65-55) \times 10}{100} = 1 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$$

Segundo paso: determinar el Ca requerido para el complejo de intercambio. Se convierte el requerimiento de Ca expresado en $\text{cmol}(+) \text{kg}^{-1}$ a masa de Ca mediante la equivalencia:

$$1 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1} \text{ de Ca} = 0,2 \text{ g Ca kg}^{-1}$$

Este valor que se obtuvo considerando que 1 $\text{cmol}(+) \text{kg}^{-1}$ equivale a 0,01 mol de carga y que, al ser el calcio un catión divalente (Ca^{2+}), esta cantidad de carga corresponde a 0,005 mol de Ca por kg de suelo. Luego, al multiplicar por su peso atómico ($40,08 \text{ g mol}^{-1}$) se obtiene 0,2 g Ca kg^{-1} . De este modo, reemplazando en el resultado del paso anterior, por regla de tres:

$$\text{Ca requerido} = 1 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1} \times \frac{0,200 \text{ g Ca kg}^{-1}}{1 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1} \text{ de Ca}} = 0,2 \text{ g de Ca kg}^{-1}$$

Tercer paso: calcular el peso de una hectárea de suelo. Para esta finalidad, se usa el dato de densidad aparente (obtenido a partir del muestreo y análisis de suelo o la estimación a partir de su clase textural) y la profundidad (estimada a partir de la profundidad de las raíces del cultivo). Para este ejemplo se considera la densidad aparente de $1,5 \text{ Mg m}^{-3}$ (propio de los suelos de textura gruesa) y la profundidad 0,30 m. Luego, se usa la Fórmula 15 para el cálculo del peso de una hectárea:

$$\text{Peso de 1 ha} = \text{Densidad aparente} \times \text{Profundidad} \times \frac{10\,000 \text{ m}^2}{\text{ha}} \quad \dots(15)$$

$$\text{Peso de 1 ha} = 1,5 \frac{\text{t}}{\text{m}^3} \times 0,30 \text{ m} \times \frac{10\,000 \text{ m}^2}{\text{ha}} = 4500 \text{ Mg ha}^{-1}$$

Cuarto paso: convertir del requerimiento de Ca a escala de una hectárea, usando los datos anteriores se aplica la Fórmula 16:

$$\text{Ca requerido (1 ha)} = \text{Ca requerido} \times \text{Peso de 1 ha} \quad \dots(16)$$

$$\begin{aligned} \text{Ca requerido (1 ha)} &= 0,2 \text{ g kg}^{-1} \times 4\,500\,000 \text{ kg ha}^{-1} \\ &= 900\,000 \text{ g de Ca ha}^{-1} \\ &= 900 \text{ kg Ca ha}^{-1} \end{aligned}$$

Quinto paso: convertir del Ca requerido a óxido de calcio equivalente (CaO). Dado que los productos comerciales declaran su contenido de calcio como CaO equivalente, el requerimiento de Ca se convierte utilizando la relación de pesos moleculares, mediante la Fórmula 17:

$$\text{CaO equivalente} = \text{Requerimiento de calcio} \times \frac{56 \text{ kg de CaO}}{40,08 \text{ kg de Ca}} \quad \dots(17)$$

$$\text{CaO equivalente} = 900 \text{ kg de Ca ha}^{-1} \times \frac{56,08 \text{ kg de CaO}}{40,08 \text{ kg de Ca}} = 1260 \text{ kg de CaO ha}^{-1}$$

Sexto paso: convertir del CaO equivalente a yeso agrícola. El yeso agrícola contiene 33 % de CaO, lo que significa que 100 kg de yeso aportan 33 kg de CaO. Por lo tanto, la dosis necesaria de yeso para cubrir el requerimiento se obtiene a partir de la Fórmula 18:

$$\text{Yeso requerido} = \text{CaO equivalente} \times \frac{100 \text{ kg de yeso}}{33 \text{ kg de CaO}} \quad \dots(18)$$

$$\text{Yeso requerido} = 1260 \text{ kg de CaO ha}^{-1} \times \frac{100 \text{ kg de yeso}}{33 \text{ kg de CaO}} = 3818 \text{ kg de yeso ha}^{-1}$$

Como se mencionó anteriormente, la CIC reportada está sobreestimada por la solubilización de carbonatos. Por ello, los cálculos presentados también pueden resultar sobreestimados y no se sugiere tomarlos como una recomendación prescriptiva. Esto solo se presenta como ejemplo metodológico del enfoque BCSR; por lo tanto, para el manejo real se debe ayudar de otras herramientas, como en análisis foliar, comportamiento del cultivo y aplicaciones fraccionadas de yeso.

4.1.3. Porcentaje de magnesio intercambiable

De acuerdo con la Tabla 2, el magnesio intercambiable (Mg^{2+}) reportado en los suelos de la EEA Arequipa varía entre 0,44 y 2,09 $\text{cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$, con porcentajes de saturación (PMI) entre 0,99 y 15,28 %. No obstante, como se mencionó en la sección de CIC efectiva, parte del Mg^{2+} y Ca^{2+} extraídos puede provenir de la solubilización de carbonatos, lo que pudo haber aumentado la CIC. Por ello, los valores absolutos de PMI deben interpretarse

como indicadores relativos, útiles para comparar zonas dentro del predio, pero no como saturaciones reales del complejo de intercambio.

El mapa del PMI (Figura 24) se clasificó en cinco categorías en rangos de: 0,99-3,90 %, 3,90-6,70 %, 6,70-9,60 %, 9,60-12,40 % y 12,40-15,28 %. Estas clases permiten identificar zonas con mayor o menor predominancia relativa de Mg^{2+} dentro del complejo de intercambio. Desde el enfoque BCSR, el rango funcional del Mg^{2+} se sitúa entre 10 y 15 %.

Entonces, teniendo presente estas consideraciones, se pueden interpretar las categorías de suelos como sigue:

- La categoría 5 (> 12,4 %) corresponderá a zonas con predominancia relativa de Mg^{2+} , donde puede haber antagonismo con Ca^{2+} y K^+ .
- La categoría 4 (9,6-12,4 %) presenta valores cercanos al rango funcional.
- Las categorías 2 y 3 (3,9-6,7 % y 6,7-9,6 %) corresponden a déficits moderados dentro del predio.
- La categoría 1 (< 3,9 %) pertenece a zonas más deficitarias, especialmente sensibles a antagonismos K^+-Mg^{2+} y $Ca^{2+}-Mg^{2+}$.

Las zonas más deficientes del mapa ($PMI < 3,9 \%$) muestran CIC efectiva entre 30 y 60 $cmol(+) kg^{-1}$ (Figura 22). Aunque no representan la CIC real del suelo, estos valores deben respetarse para ilustrar el procedimiento metodológico de cálculo en el enfoque BCSR.

Para ilustrar la magnitud del desbalance, se presenta un caso representativo con PMI actual de 4 %, PMI objetivo de 10 % y $CICe = 40 cmol(+) kg^{-1}$. El cálculo se hace de la siguiente manera:

Primer paso: determinar la cantidad de magnesio faltante. Para ello, se calcula la diferencia entre la saturación actual y la saturación objetivo, multiplicada por la CIC del suelo (en este caso se usará la $CICe$) mediante la Fórmula 19:

$$Mg \text{ requerido} = \frac{(PMI \text{ objetivo} - PMI \text{ actual}) \times CIC}{100} \quad \dots(19)$$

$$Mg \text{ requerido} = \frac{(10 - 4) \times 40}{100} = 2,4 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$$

Segundo paso: determinar el Mg requerido para el complejo de intercambio. Se convierte el requerimiento de Mg expresado en $cmol(+) kg^{-1}$ a masa de Mg mediante la equivalencia:

$$1 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1} \text{ de Mg} = 0,1215 \text{ g de Mg kg}^{-1}.$$

Este valor que se obtuvo considerando que $1 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$ equivale a 0,01 mol de carga y que, al ser el magnesio un catión divalente (Mg^{2+}), esta cantidad de carga corresponde a 0,005 mol de Mg por kg de suelo. Luego, al multiplicar por su peso atómico ($24,3 \text{ g mol}^{-1}$) se obtiene $0,1215 \text{ g Ca kg}^{-1}$. De este modo, reemplazando en el resultado del paso anterior, por regla de tres:

$$Mg \text{ requerido} = 2,4 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1} \times \frac{(0,1215 \text{ g de Mg kg}^{-1})}{1 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1} \text{ de Mg}} = 0,2916 \text{ g de Mg kg}^{-1}$$

Tercer paso: calcular el peso de una hectárea de suelo. Se tomará el peso de una hectárea calculado en el ejercicio anterior, de 4 500 000 kg ha⁻¹.

Cuarto paso: convertir del requerimiento de Mg a escala de una hectárea, usando los datos anteriores y se aplica la Fórmula 20:

$$\text{Mg requerido (1 ha)} = \text{Mg requerido} \times \text{Peso de 1 ha} \quad \dots(20)$$

$$\begin{aligned} \text{Mg requerido (1 ha)} &= 0,2916 \text{ g kg}^{-1} \times 4\,500\,000 \text{ kg ha}^{-1} \\ &= 1\,312\,200 \text{ g ha}^{-1} \\ &= 1312,2 \text{ kg de Mg ha}^{-1} \end{aligned}$$

Quinto paso: convertir del Mg requerido a sulfato de magnesio heptahidratado (MgSO₄·7H₂O), que contiene 9,86 % de Mg, mediante la Fórmula 21:

$$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O requerido} = \text{Mg requerido (1ha)} \div \frac{9,86}{100} \quad \dots(21)$$

$$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O requerido} = 1312,2 \div \frac{9,86}{100} = 13\,308,3 \text{ kg ha}^{-1}$$

Como se mencionó anteriormente, el PMI del mapa está afectado por la sobreestimación de la CIC por lo que, en este caso, las dosis de magnesio no deben derivarse del enfoque BCSR. En su lugar, el manejo debe basarse en la reposición gradual de cantidades menores, incorporando lo removido por la cosecha anterior y guiándose con análisis foliares.

4.1.4. Porcentaje de potasio intercambiable

Así como se muestra en la Tabla 2, el potasio intercambiable (K⁺) reportado en los suelos de la EEA Arequipa varía entre 0,53 y 2,36 cmol(+) kg⁻¹, con porcentajes de saturación (PPI) entre 1,10 y 14,38 %. Sin embargo, tal como se detalló previamente en la sección de CIC efectiva, la solubilización parcial de carbonatos durante la extracción puede incrementar artificialmente la CIC y modificar en consecuencia los porcentajes de saturación. Por esta razón, los valores absolutos de PPI no representan la saturación real del complejo de cambio, sino una saturación aparente afectada por el método analítico.

El mapa del PPI (Figura 25) se clasificó en cinco categorías en rangos de: 1,10-3,80 %, 3,80-6,40 %, 6,40-9,10 %, 9,10-11,70 % y 11,70-14,38 %. Estas clases permiten identificar gradientes relativos de potasio intercambiable dentro del predio. Desde el enfoque BCSR, el rango funcional del K⁺ se ubica entre 3 y 7 %.

Entonces, teniendo presente estas consideraciones, se pueden interpretar las categorías de suelos como sigue:

- 1,10 - <3,80 %: nivel bajo de K⁺, por debajo del rango funcional; puede limitar la nutrición, especialmente cuando coinciden altos contenidos de Ca²⁺ o Mg²⁺.
- 3,80-6,40 %: rango funcional adecuado, dentro del intervalo recomendado por el enfoque BCSR.

- 6,40-9,10 %: nivel moderadamente alto; valores que superan el rango funcional y podrían generar desequilibrios catiónicos.
- 9,10-11,70 % y 11,70-14,38 %: niveles altos a muy altos, asociados a posibles acumulaciones en el bulbo húmedo y mayor riesgo de antagonismo con Mg^{2+} .

Como se vino mencionando anteriormente, la CIC reportada podría estar sobreestimada debido a la solubilización parcial de carbonatos. En consecuencia, los valores de PPI derivados de esta CIC también podrían presentar una ligera sobreestimación. Por ello, los resultados no deben interpretarse como una recomendación prescriptiva directa, sino como un ejercicio metodológico dentro del enfoque BCSR. Para la toma de decisiones en campo, se recomienda complementar esta información con análisis foliar, evaluación del comportamiento del cultivo (ver los síntomas de deficiencia en la planta) y ajustes graduales mediante aplicaciones fraccionadas de potasio.

En las zonas PPI menor a 3,8 %, el mapa indica valores de CIC efectiva entre 30 y 60 $cmol(+) kg^{-1}$ (Figura 22). Para ilustrar cómo esta CIC influye en el cálculo del balance catiónico (BCSR), se plantea un caso representativo con PPI de 3 %, PPI objetivo de 6 % y $CICe = 40 cmol(+) kg^{-1}$:

Primer paso: determinar la cantidad de potasio faltante. Para ello, se calcula la diferencia entre la saturación actual y la saturación objetivo, multiplicada por la CIC del suelo (en este caso se usará la $CICe$) mediante la Fórmula 22:

$$K \text{ requerido} = \frac{(PPI \text{ objetivo} - PPI \text{ actual}) \times CIC}{100} \quad \dots(22)$$

$$K \text{ requerido} = \frac{(6 - 3) \times 40}{100} = 1,2 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$$

Segundo paso: determinar el K requerido para el complejo de intercambio. Se convierte el requerimiento de K expresado en $cmol(+) kg^{-1}$ a masa de K mediante la equivalencia:

$$1 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1} \text{ de K} = 0,391 \text{ g de K kg}^{-1}$$

Este valor que se obtuvo considerando que 1 $cmol(+) kg^{-1}$ equivale a 0,01 mol de carga y que, al ser el magnesio un catión divalente (K^+), esta cantidad de carga corresponde a 0,01 mol de K por kg de suelo. Luego, al multiplicar por su peso atómico (39,1 $g mol^{-1}$) se obtiene 0,391 g $Ca kg^{-1}$. De este modo, reemplazando en el resultado del paso anterior, por regla de tres:

$$K \text{ requerido} = 1,2 \text{ cmol}(+) \text{ de K kg}^{-1} \times \frac{0,391 \text{ g K kg}^{-1}}{1 \text{ cmol}(+) \text{ de K kg}^{-1}} = 0,4692 \text{ g de K kg}^{-1}$$

Tercer paso: calcular el peso de una hectárea de suelo. Se tomará el peso de una hectárea calculado en el ejercicio anterior, de 4 500 000 $kg ha^{-1}$.

Cuarto paso: convertir del requerimiento de K a escala de una hectárea, usando los datos anteriores y se aplica la Fórmula 23:

$$K \text{ requerido (1 ha)} = K \text{ requerido} \times \text{Peso de 1 ha} \quad \dots(23)$$

$$\begin{aligned} K \text{ requerido (1 ha)} &= 0,4692 \text{ g de K kg}^{-1} \times 4\,500\,000 \text{ kg ha}^{-1} \\ &= 2\,111\,400 \text{ g de K ha}^{-1} \\ &= 2\,111,4 \text{ kg de K ha}^{-1} \end{aligned}$$

Quinto paso: conversión a sulfato de potasio (K_2SO_4). El requerimiento de K se expresó en términos de K_2SO_4 mediante la Fórmula 24, considerando que este fertilizante contiene 50 % de K_2O . Este valor equivale a 41,5 % de K elemental, ya que el K_2O se transforma a K mediante el factor estequiométrico 0,83.

$$K_2SO_4 \text{ requerido} = K \text{ requerido (1 ha)} \div \frac{41,5}{100} \quad \dots(24)$$

$$K_2SO_4 \text{ requerido} = 2\,111,4 \div \frac{41,5}{100} = 5\,100 \text{ kg ha}^{-1}$$

Este valor (5100 kg ha^{-1} de K_2SO_4) es evidentemente inaplicable en campo. La magnitud resulta de emplear una CIC efectiva artificialmente alta, la cual aumenta el déficit calculado. En consecuencia, este cálculo también está sobreestimado y no debe emplearse como base para recomendaciones de fertilización. Su propósito es únicamente mostrar el procedimiento del enfoque BCSR con los valores del mapa.

Debido a la sensibilidad del PPI a errores en la CIC y a la dinámica del bulbo húmedo bajo riego localizado, el manejo del potasio debe basarse en criterios de suficiencia (SLAN), evaluando, el potasio disponible en solución, la demanda específica del cultivo, análisis foliar y de suelo y la curva de absorción según estado fenológico.

4.1.5. Sodio intercambiable

Así como se muestra en la Tabla 2, el sodio intercambiable (Na^+) reportado en los suelos de la EEA Arequipa varía entre 0,53 y 2,36 $cmol(+) \text{ kg}^{-1}$, con porcentajes de saturación de sodio intercambiable (PSI) entre 1,45 y 21,76 %. Estos valores indican ausencia de sodicidad severa en la mayoría del área evaluada, aunque existen sectores donde la proporción relativa de Na^+ es mayor dentro del complejo de intercambio aparente. Tal como se detalló previamente en la sección de CIC efectiva, la solubilización de carbonatos durante la extracción puede inflar artificialmente la CIC, afectando todos los porcentajes de saturación, incluido el PSI. Por ello, los valores deben interpretarse como indicadores relativos dentro del predio.

El mapa del PSI (Figura 26) se clasificó en cinco categorías: 1,45-5,5 %, 5,50-8,60 %, 8,60-11,60 %, 11,60-14,60 %, 14,6-21,76 %. Todas las categorías excepto la primera supera ampliamente el umbral de 5 %. Por lo cual, se necesitaría intervenir en las zonas de las demás.

Entonces, se tomará como ejemplo los valores mayores a 11,6 % que coinciden con sectores donde el mapa muestra CIC aparente entre 30 y 60 $cmol(+) \text{ kg}^{-1}$ (Figura 22). Estas combinaciones producen, en teoría, requerimientos muy altos de calcio para bajar el PSI si se aplica estrictamente el enfoque BCSR. Para ilustrar el cálculo, se tomará un caso representativo con PSI actual de 12 %, PSI objetivo de 5 % y CICE de 40 $cmol(+) \text{ kg}^{-1}$.

Primer paso: determinar la cantidad de sodio a desplazar. Para ello, se calcula la diferencia entre la saturación actual y la saturación objetivo, multiplicada por la CIC del suelo (en este caso se usará la CICe) mediante la Fórmula 25:

$$\text{Na a desplazar} = \frac{(\text{PSI actual} - \text{PSI objetivo}) \times \text{CIC}}{100} \quad \dots(25)$$

$$\text{Na a desplazar} = \frac{(12 - 5) \times 40}{100} = 2,8 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$$

Segundo paso: determinar el Ca^{2+} requerido para desplazar el Na^+ . Para las correcciones de sodicidad del suelo, se usa yeso agrícola ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), y la conversión estándar es:

$$1 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1} \text{ Ca}^{2+} = 0,28 \text{ g CaO kg}^{-1}$$

$$\text{CaO requerido} = 2,8 \text{ cmol}(+) \text{ de K kg}^{-1} \times \frac{0,28 \text{ g CaO kg}^{-1}}{1 \text{ cmol}(+) \text{ de K kg}^{-1} \text{ de Ca}} = 0,784 \text{ g de CaO kg}^{-1}$$

Tercer paso: calcular el peso de una hectárea de suelo. Se tomará el peso de una hectárea calculado en el ejercicio anterior, de $4\,500\,000 \text{ kg ha}^{-1}$.

Cuarto paso: convertir del requerimiento de CaO a escala de una hectárea, usando los datos anteriores y se aplica la Fórmula 26:

$$\text{CaO requerido (1 ha)} = \text{CaO requerido} \times \text{Peso de 1 ha} \quad \dots(26)$$

$$\begin{aligned} \text{CaO requerido (1 ha)} &= 0,784 \text{ g de CaO kg}^{-1} \times 4\,500\,000 \text{ kg ha}^{-1} \\ &= 3\,528\,000 \text{ g de CaO ha}^{-1} \\ &= 3528 \text{ kg CaO ha}^{-1} \end{aligned}$$

Quinto paso: convertir a yeso agrícola. El yeso contiene aproximadamente 33 % de CaO:

$$\text{Yeso (kg ha}^{-1}) = \frac{3528}{0,33} = 10\,690,9 \text{ kg ha}^{-1}$$

En síntesis, los cálculos indican que se requiere de 10,69 t de yeso ha^{-1} como aplicación única. Aplicar la cantidad de yeso obtenida en los cálculos es inviable en suelos áridos de textura gruesa, y por tanto no debe aplicarse la corrección BCSR literalmente. Por otra parte, valores elevados de PSI no solo afectan el equilibrio iónico, sino que también pueden generar problemas estructurales en el suelo. Cuando el PSI supera el 15 %, los suelos se clasifican como sódicos o sódico-salinos, según el nivel de salinidad. Considerando este umbral, la categoría 5 podría ser clasificado como sódico o salino sódico. Además, si la CICe está sobreestimada, el PCI también lo está, mientras que el PSI se subestima, lo que implica que una mayor superficie podría encontrarse realmente por encima del 15 % de PSI. Para confirmar esta condición, el análisis de la Relación de Adsorción de Sodio (RAS) permitiría una evaluación más precisa y respaldaría una mejor toma de decisiones respecto a la sodicidad del suelo.

4.2. Niveles de suficiencia de nutrientes disponibles

4.2.1. Niveles de suficiencia de fósforo disponible

El fósforo disponible en los suelos de la EEA Arequipa se distribuye en cinco rangos de P-Olsen (6,1-18,1; 18,1-25,3; 25,3-32,5; 32,5-39,6 y 39,6-51,4 mg kg⁻¹). En los suelos con presencia de carbonatos, el P aplicado suele inmovilizarse rápidamente por precipitación con calcio, por lo que los valores del análisis deben interpretarse considerando este comportamiento.

El umbral crítico para la mayoría de los cultivos anuales se sitúa alrededor de 20 mg kg⁻¹ (McDowell et al., 2024). Por debajo de este valor el fósforo limita el rendimiento, mientras que por encima de él la respuesta a la fertilización fosfórica es mínima o nula. En función de este criterio, el manejo del fósforo se organiza en dos situaciones:

a. Zonas con P-Olsen menor a 18,1 mg kg⁻¹ (situación de deficiencia)

En esta condición, el manejo de la fertilización fosfatada debe combinar estrategias de mantenimiento y construcción. Para implementar adecuadamente cada estrategia, se propone subdividir el área en dos zonas: áreas con valores de P-Olsen entre 12 y 18,1 mg kg⁻¹, donde se aplicará un enfoque de solo mantenimiento, y áreas con valores menores a 12 mg kg⁻¹, donde se implementará un enfoque de mantenimiento y construcción. Estas estrategias se desarrollan ejemplos prácticos detalladamente en la sección 2.1.2 (Sistema de Suficiencia de Nutrientes, SLAN).

b. Zonas con P-Olsen entre 18,1-25,3 y mayor a 25,3 mg kg⁻¹ (suficiencia)

Este intervalo de P-Olsen cubre el valor del umbral crítico. No se recomienda aplicar fertilizantes fosfatados para el mantenimiento ni construcción de la fertilidad, ya que incrementos bruscos solo aumentan la fijación de P en suelos con presencia de carbonatos. El manejo se debe basar únicamente en la reposición de la extracción del cultivo, ósea el enfoque de suficiencia, siguiendo la metodología también mencionada en la sección 2.1.2 (SLAN).

Sin embargo, la categorización espacial del P disponible presentada en el mapa no se basó exclusivamente en este punto de corte, sino en la distribución de los valores observados en el predio, con el propósito de representar la variabilidad intra-lote y delimitar zonas de manejo relativo. De este modo, el análisis espacial complementa el criterio del umbral crítico, sin sustituirlo como referencia agronómica.

4.2.2. Niveles de suficiencia de potasio disponible

A partir del mapa de K disponible (Figura 16) se definieron cinco categorías basadas en la distribución de los datos dentro del predio: 191-425; 425-500; 500-565; 565-640 y 640-1067 mg kg⁻¹. Esta clasificación permitió representar la variabilidad espacial relativa del potasio intercambiable y delimitar zonas de manejo interno.

Para interpretar agronómicamente estos valores, se utilizó como referencia la calibración clásica del potasio extraíble con acetato de amonio (NH₄OAc-K) propuesta por Havlin et al. (2016), la cual establece los siguientes niveles críticos: muy bajo (< 40 mg kg⁻¹), bajo (41-80 mg kg⁻¹), medio (81-120 mg kg⁻¹), alto (121-160 mg kg⁻¹) y muy alto (> 160 mg kg⁻¹), cada uno asociado a diferentes probabilidades de respuesta a la fertilización.

Sin embargo, todas las concentraciones observadas en el predio (191-1067 mg kg⁻¹) superan ampliamente el umbral de “muy alto”. En consecuencia, esta escala no permite discriminar zonas con distinta probabilidad de respuesta dentro del lote, sino únicamente confirmar una condición general de alta suficiencia. Por esta razón, los rangos críticos de Havlin et al. (2016) no se utilizaron como criterio para la categorización espacial de las zonas de manejo, ya que no permiten diferenciar gradientes internos en un sistema donde todos los valores se encuentran en el rango superior.

En este contexto, el potasio disponible se encuentra en condición de suficiencia elevada en toda el área evaluada, por lo que no se justifican estrategias de construcción del nutriente en el suelo. El manejo debe orientarse exclusivamente a la reposición de la extracción del cultivo, siguiendo el criterio del sistema de suficiencia de nutrientes (SLAN). A continuación, se plantea un ejemplo:

Para este ejemplo se utilizará al maíz como cultivo de referencia, y se asumirá un umbral crítico o nivel de suficiencia del K determinado por el método de acetato de amonio de aproximadamente 121 mg kg⁻¹ (Havlin et al., 2016).

Primer paso: se considera que el rendimiento potencial del maíz es 10 t ha⁻¹ y el nivel de K disponible del suelo asumido como ejemplo es 120 mg kg⁻¹. El análisis de calibración estima que con este nivel de K se alcanza el 90 % de rendimiento relativo, es decir 9 t ha⁻¹ aplicando la Fórmula 2 de la sección 2.1.2 (sistema de suficiencia de nutrientes, SLAN).

Segundo paso: estimación de la biomasa de raíces y brotes a partir del índice de cosecha (HI). Despejando la Fórmula 3 se obtiene la Fórmula 4, el cual calcula la biomasa total.

$$\text{Biomasa total} = \frac{9 \text{ t ha}^{-1}}{0,48} = 18,75 \text{ t ha}^{-1}$$

Una vez estimada la biomasa total, la biomasa de raíces y brotes se calcula con la Fórmula 5.

$$\text{Biomasa de raíces y brotes} = 18,75 - 9 = 9,75 \text{ t ha}^{-1}$$

Tercer paso: determinar el rendimiento objetivo, añadiendo la biomasa de raíces y brotes al rendimiento alcanzado, como se señala en la Fórmula 6.

$$\text{Rendimiento objetivo} = 9,75 \text{ t ha}^{-1} + 9 \text{ t ha}^{-1} = 18,75 \text{ t ha}^{-1}$$

Cuarto paso: calcular el requerimiento de K utilizando la Fórmula 27. Para este cálculo y con fines prácticos se considera una extracción de 5,7 kg de potasio por tonelada de producción (Zamudio-González et al., 2016).

$$\text{Requerimiento de K} = \text{Extracción K} \times \text{Rendimiento objetivo} \quad \dots(27)$$

$$\text{Requerimiento de K} = 5,7 \text{ kg de K t}^{-1} \times 18,75 \text{ t ha}^{-1} = 106,88 \text{ kg de K ha}^{-1}$$

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

El pH del suelo en la EEA Arequipa se distribuye en cinco rangos (6,9-7,3; 7,3-7,6; 7,6-7,9; 7,9-8,3 y 8,3-8,6), predominando el intervalo 7,6-7,9, característico de suelos de zonas áridas donde la acumulación de carbonatos y la baja lixiviación elevan naturalmente el pH por encima de 7 (Havlin et al., 2016). Los valores de pH entre 6,0 y 7,5 son generalmente óptimos para la mayoría de los cultivos (USDA-NRCS, 2001), aunque Weil y Brady (2017) proponen rangos más bajos (5,5-7) y advierten que por encima de esos valores el Fe, Cu, Zn, Mn y P pueden presentar baja disponibilidad para los cultivos. En estos ambientes áridos, los suelos contienen carbonatos de manera natural y su tipo condiciona el nivel de alcalinidad: cuando predomina el carbonato de calcio (CaCO_3), el pH se mantiene típicamente dentro de rangos moderadamente alcalinos (7,0-8,4) debido al efecto amortiguador del equilibrio $\text{CaCO}_3\text{-CO}_2$; mientras que la presencia de carbonatos de sodio (Na_2CO_3), mucho más solubles, puede elevar el pH a valores extremos (8,5-10,5) propios de suelos sódicos y potencialmente tóxicos para los cultivos (Weil y Brady, 2017).

En este contexto, el manejo debe orientarse a acercar el pH a valores cercanos a 7 mediante el uso de fertilizantes acidificantes como sulfato de amonio, fosfato monoamónico o urea, así como mediante la aplicación de micronutrientes quelatados o foliares cuando existan deficiencias específicas. También es necesario evitar enmiendas alcalinas como cal o dolomita para no intensificar los procesos de alcalinización. En las áreas donde el pH se sitúa entre 8,3 y 8,6, se recomienda considerar la aplicación de yeso agrícola, especialmente cuando la alcalinidad elevada esté asociada a sodio intercambiable, con el fin de desplazarlo y mejorar la calidad química del suelo.

Se sugiere establecer un monitoreo anual del pH en los mismos puntos georreferenciados del muestreo original, a fin de evaluar la evolución de las zonas alcalinas y ajustar el manejo según las necesidades de los cultivos que se desarrollan en la estación.

4.4. Salinidad

La Figura 13 muestra la distribución espacial de la conductividad eléctrica medida en extracto 1:5, organizada en los rangos 0,11-1; 1-2; 2-4; 4-8 y 8-23,80 dS m^{-1} . El intervalo 0,11-1 dS m^{-1} es claramente dominante, lo que indica suelos con baja presencia de sales solubles en la mayor parte del predio. Los rangos 1-2 y 2-4 dS m^{-1} representan zonas donde la concentración de sales es mayor en relación con el resto del terreno, sugiriendo áreas con acumulación progresiva de solutos, típica de ambientes áridos irrigados con limitada lixiviación. Las zonas localizadas con valores mayores a 4 y, particularmente aquellas mayores a 8 dS m^{-1} reflejan focos de alta concentración de sales que pueden afectar el desarrollo de ciertos cultivos. Estos valores pueden estar asociados a drenaje insuficiente o zonas de acumulación natural de sales dentro del perfil del suelo.

Dado que la CE 1:5 no cuenta con una clasificación estandarizada para diagnosticar salinidad, se recomienda complementar esta información mediante análisis de conductividad eléctrica en pasta saturada (ECe) en las áreas donde la CE 1:5 supera 2 dS m^{-1} , con el fin de evaluar el nivel real de salinidad y definir medidas específicas de manejo como riegos de lavado o mejoras en el drenaje.





5. Referencias bibliográficas

- Adam, M., Ibrahim, I., Sulieman, M., Zeraatpisheh, M., Mishra, G., y Brevik, E. C. (2021). Predicting soil cation exchange capacity in entisols with divergent textural classes: The Case of northern Sudan soils. *Air, Soil and Water Research*, 14. <https://doi.org/10.1177/117862212111042381>
- 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 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.
- Bai, Z., Li, H., Yang, X., Zhou, B., Shi, X., Wang, B., y Zhang, F. (2013). The critical soil P levels for crop yield, soil fertility and environmental safety in different soil types. *Plant and Soil*, 372(1), 27-37. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11104-013-1696-y>
- 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(6), 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>
- 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>
- Díaz-Chuquizuta, H., Arévalo-Aranda, Y., Samaniego-Puente, J. C., Siquiera-Bahia, R. de C., y Solórzano-Acosta, R. A. (2025). *Manual para la fertilización del cultivo de maíz amarillo duro en condiciones de la selva peruana*. Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA). <http://hdl.handle.net/20.500.12955/2687>
- 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>
- Gerencia Regional de Agricultura de Arequipa. (2025). *Campaña Agrícola 2023-2024*. Recuperado de <https://www.agroarequipa.gob.pe/index.php/campana-agricola>
- Gobierno Regional de Arequipa. (2021). *Actualización estrategia regional de cambio climático Región Arequipa 2019-2030*. Recuperado de <https://sinia.minam.gob.pe/documentos/estrategia-regional-cambio-climatico>
- 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>
- Hartemink, A. E., y Barrow, N. J. (2023). Soil pH-nutrient relationships: the diagram. *Plant and Soil*, 486(1), 209-215.

- Havlin, J. L., Tisdale, S. L., Nelson, W. L., y Beaton, J. D. (2016). *Soil fertility and fertilizers: An introduction to nutrient management* (8th ed.). Pearson India Education Services Pvt. Ltd.
- Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI). (2023). *Encuesta Nacional Agropecuaria (ENA) 2022*. Recuperado el 12 de febrero de 2026 de: <https://www.datosabiertos.gob.pe/dataset/encuesta-nacional-agropecuaria-ena-2022-instituto-nacional-de-estad%C3%ADstica-e-inform%C3%A1tica-9#>
- International Organization of Standardization. (1994). *Soil quality - Determination of specific electrical conductivity* (ISO 11265).
- Internacional Union of Soil Sciences World Reference Base for Soil Resources. (2015). *Base referencial mundial del recurso suelo. 2014. Sistema internacional de clasificación de suelos para la nomenclatura de suelos y la creación de leyendas de mapas de suelos*. Informes sobre recursos mundiales de suelos 106. <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/dea292cb-370d-46c7-a44d-59a617953c3b/content>
- 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>
- McDowell, R. W., Pletnyakov, P., y Haygarth, P. M. (2024). Phosphorus applications adjusted to optimal crop yields can help sustain global phosphorus reserves. *Nature Food*, 5(4), 332-339. <https://www.nature.com/articles/s43016-024-00952-9>
- 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/asaspepub29.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>
- Nel, T., Bruneel, Y., y Smolders, E. (2023). Comparison of five methods to determine the cation exchange capacity of soil. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 186(3), 311-320. <https://doi.org/10.1002/jpln.202200378>
- 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>
- Ordóñez, R. A., Archontoulis, S. V., Martínez-Feria, R., Hatfield, J. L., Wright, E. E., & Castellano, M. J. (2020). Root to shoot and carbon to nitrogen ratios of maize and soybean crops in the US Midwest. *European Journal of Agronomy*, 120. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2020.126130>

- 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-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>
- Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (2025). *Estaciones meteorológicas – datos climáticos y descripción*. Recuperado de <https://www.senamhi.gob.pe/?p=estaciones>
- United States Department of Agriculture. (2001). *Soil quality test kit guide*. Soil Quality Institute, Natural Resources Conservation Service. <https://www.nrcs.usda.gov/sites/default/files/2022-10/Soil%20Quality%20Test%20Kit%20Guide.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>
- Weil, R. R., y Brady, N. C. (2017). *The nature and properties of soils* (15th ed.). Pearson.
- Whitlark, B. (2011). Soil testing procedures for calcareous soils. *USGA Green Section Record*, 49(9), 1-4. <https://gsr.lib.msu.edu/article/whitlark-soil-3-4-11.pdf>
- 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>
- Zamudio-González, B., Tadeo-Robledo, M., Espinosa-Calderón, A., Martínez-Rodríguez, N., y Turrent-Fernández, A. (2016). Índice de cosecha con macro-nutrientes en grano de maíz. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 7(5), 1077-1089. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-09342016000501077
- 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 Hawaii at 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**



Ver nuestro alcance
de acreditación



Ver nuestros servicios



- 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











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

ISBN: 978-9972-44-255-1



PERÚ

Ministerio
de Desarrollo Agrario
y Riego

inia

Instituto
Nacional de
Innovación
Agraria

      @INIAPeru