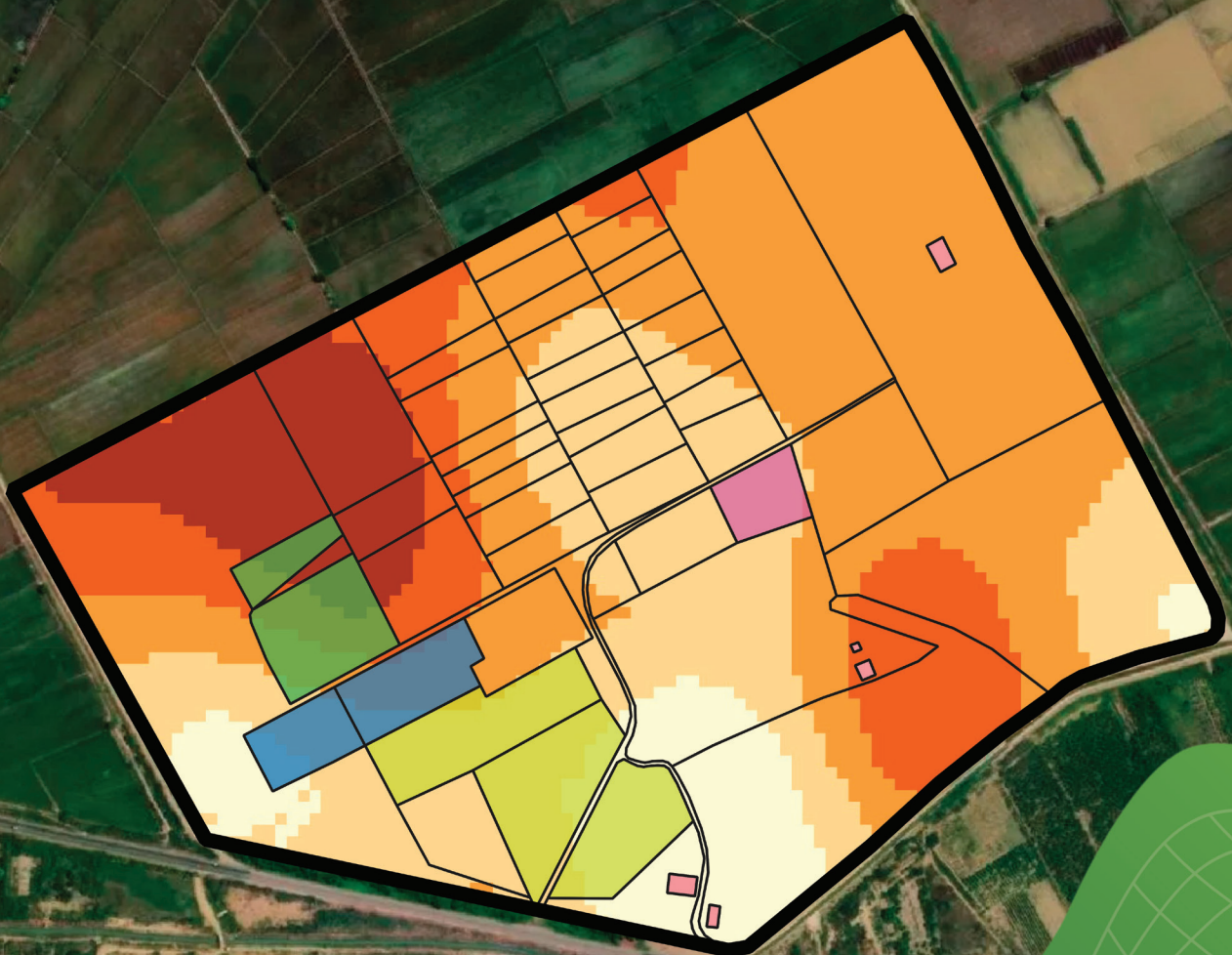
Variación espacial de la fertilidad del suelo en la EEA Los Cedros



PERÚ Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego

inia 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 Los Cedros

PERÚ | Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego

inia Instituto Nacional de Innovación Agraria

VARIACIÓN ESPACIAL DE LA FERTILIDAD DEL SUELO EN LA EEA LOS CEDROS

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:
Julio, 2026

Publicado:
Julio, 2026

Disponible en:
https://repositorio.inia.gob.pe/

ISBN:
978-9972-44-270-4

Editado por:
Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA)
Av. La Molina 1981, Lima-Perú
Teléf. (511) 240-2400
www.gob.pe/inia

Equipo Técnico de Edición y Publicaciones:
Janet Flores / Teléfono: 964173509 / Correo electrónico: comite_publicaciones@inia.gob.pe

Todos los derechos reservados.
Prohibida la reproducción de este manual por cualquier medio, total o parcialmente, sin permiso expreso

Hecho el Depósito Legal en la Biblioteca Nacional del Perú N° 2026-08258

Autores: Kenyi R. Quispe-Matos, Carlos M. Carbajal-Llosa, Sharon Y. Mejia-Maita, Ruddy A. Ore-Valeriano, Rosa K. Arroyo-Isuiza, Rodolfo J. Chuchon-Remon, Boris G. Martínez-Zapata, José S. Córdova-Campos, Anthony J. Vinces-La Rosa, Richard A. Solórzano-Acosta, Juancarlos A. 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 Los Cedros 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 32
3.6. Análisis de autocorrelación espacial: cómputo del índice de Moran 33
3.7. Interpolación *kriging* y validación cruzada con indicadores geoestadísticos 33
3.7.1. Generación y ajuste del variograma 33
3.7.2. Interpolación *kriging* 34
3.7.3. Validación cruzada 34
3.8. Resultados del análisis geoestadístico de las propiedades fisicoquímicas del suelo 35
3.9. Mapeo digital de las propiedades del suelo 37

4. Recomendaciones de manejo de la fertilidad del suelo en la EEA Los Cedros 57
4.1. Índice de saturación de bases catiónicas 57
4.1.1. Niveles deficientes de saturación de potasio intercambiable 57
4.1.2. Variación espacial de los desbalances iónicos con niveles elevados de Na^+ 58
4.2. Niveles de suficiencia de nutrientes disponibles 60
4.2.1. Cálculo del requerimiento de fósforo en arroz bajo criterio de suficiencia 60
4.2.2. Cálculo del requerimiento de potasio en arroz bajo criterios de mantenimiento y construcción 61
4.3. El pH del suelo 62

5. Referencias bibliográficas 65



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 CUI 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, el análisis de la variabilidad espacial de las propiedades edáficas mediante métodos geoestadísticos constituye una herramienta fundamental para identificar la distribución de la fertilidad del suelo y delimitar zonas homogéneas de manejo, generando información estratégica para la toma de decisiones en sistemas de agricultura de precisión. Esta caracterización permite optimizar la aplicación de fertilizantes de acuerdo con las necesidades específicas del terreno, favoreciendo un uso más eficiente de los fertilizantes, la reducción de costos de producción y la minimización de impactos ambientales. En consecuencia, el estudio de la variabilidad espacial de la fertilidad del suelo representa una base técnica clave para la implementación de estrategias de manejo sitio-específico orientadas a incrementar la productividad agrícola de manera sostenible.

El presente documento, "Variación espacial de la fertilidad del suelo en la EEA Los Cedros", 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 preciso del estado del suelo, para facilitar la toma de decisiones sobre la fertilización, el manejo del cultivo y el uso del terreno, favoreciendo una producción más eficiente y sostenible.

M. Sc. Jorge Juan Ganoza Roncal
Presidente Ejecutivo
Instituto Nacional de Innovación Agraria



1. Introducción

La degradación del suelo constituye uno de los principales desafíos para la agricultura sostenible y la seguridad alimentaria en el Perú, particularmente en el departamento de Tumbes. En esta región, la erosión hídrica y eólica, asociada a las lluvias, la escorrentía y la remoción del material superficial, ocasionan la pérdida de cobertura vegetal y la lixiviación de nutrientes disponibles para las plantas (Gómez-Velásquez, 2017). Asimismo, la variabilidad climática, caracterizada por periodos prolongados de precipitación y de sequía, contribuye a la degradación del suelo (DeLong et al., 2015). A ello se suman las actividades antrópicas, entre las que destacan la deforestación, las prácticas agrícolas inadecuadas, como la labranza excesiva, el uso de maquinaria pesada y la sobrefertilización, y la expansión urbana no planificada (Karlen y Rice, 2015).

Los suelos planos y cercanos al mar de la región Tumbes presentan problemas de salinidad debido al alto nivel freático y a la intrusión marina, que se intensifican en épocas de sequía, afectando a los cultivos, ganados y manglares (Autoridad Nacional del Agua, 2013). Con el fin de no agravar esta problemática por el uso inadecuado de enmiendas y fertilizantes, especialmente por sobredosificación, es necesario conocer la variabilidad espacial de las propiedades químicas y físicas del suelo, con el uso de herramientas que permitan su diagnóstico y monitoreo.

Los sistemas de posicionamiento satelital (GPS), sensores remotos y sistemas de información geográfica (SIG) permiten hacer una recolección eficiente y efectiva de datos edáficos en tiempo real, facilitando la construcción de mapas de alta resolución de la variabilidad de las propiedades del suelo. Estas tecnologías han revolucionado la manera en que se monitorean y gestionan áreas agronómicas, permitiendo la delimitación de zonas de manejo homogéneo. Asimismo, la interpolación *kriging*, junto con sistemas de información geográfica, han demostrado ser una estrategia eficaz para identificar "*hotspots*" de degradación, planificar la fertilización diferenciada y adoptar medidas de restauración ecológica en áreas críticas (Culman et al., 2021; Chinea-Horta y Rodríguez-Izquierdo, 2021).

En este contexto, el presente documento tiene como objetivo evaluar la variabilidad espacial de la fertilidad del suelo en la Estación Experimental Agraria Los Cedros (EEA Los Cedros), mediante el uso integrado de análisis fisicoquímicos y herramientas geoestadísticas. De manera específica, busca: (i) caracterizar las propiedades edáficas y su distribución espacial; (ii) modelar la estructura de dependencia espacial de los atributos del suelo mediante semivariogramas; (iii) generar mapas temáticos de fertilidad utilizando técnicas de interpolación espacial; y (iv) proponer recomendaciones técnicas para la fertilización diferenciada y el manejo sostenible del suelo. A partir de este enfoque, se establece un diagnóstico espacialmente explícito que contribuye a optimizar la toma de decisiones agronómicas, fortalecer la transferencia tecnológica y orientar estrategias de adaptación frente a escenarios de variabilidad climática, promoviendo así la sostenibilidad de los sistemas productivos en el contexto regional de Tumbes.



2. Principios fundamentales del análisis de suelos

2.1. Sistemas de interpretación del análisis de suelos

El proceso de recomendación de fertilizantes mediante el análisis químico de suelos implica varios pasos discretos, pero en cierta medida interrelacionados. Estos pasos incluyen: el muestreo de suelos, el análisis químico, la interpretación de los resultados analíticos y el desarrollo de recomendaciones. Si bien las metodologías y los procedimientos utilizados para realizar cada uno de estos pasos pueden afectar la naturaleza de la recomendación final, parece que las amplias discrepancias en las recomendaciones de fertilizantes desarrolladas por diferentes laboratorios que operan en una región se deben, en la mayoría de los casos, a diferentes técnicas de interpretación (Quispe-Matos et al., 2025).

2.1.1. Índice de saturación de bases catiónicas

a. Concepto

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

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 doble capa dieléctrica difusa del complejo de cambio del suelo y su relación con 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, 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).

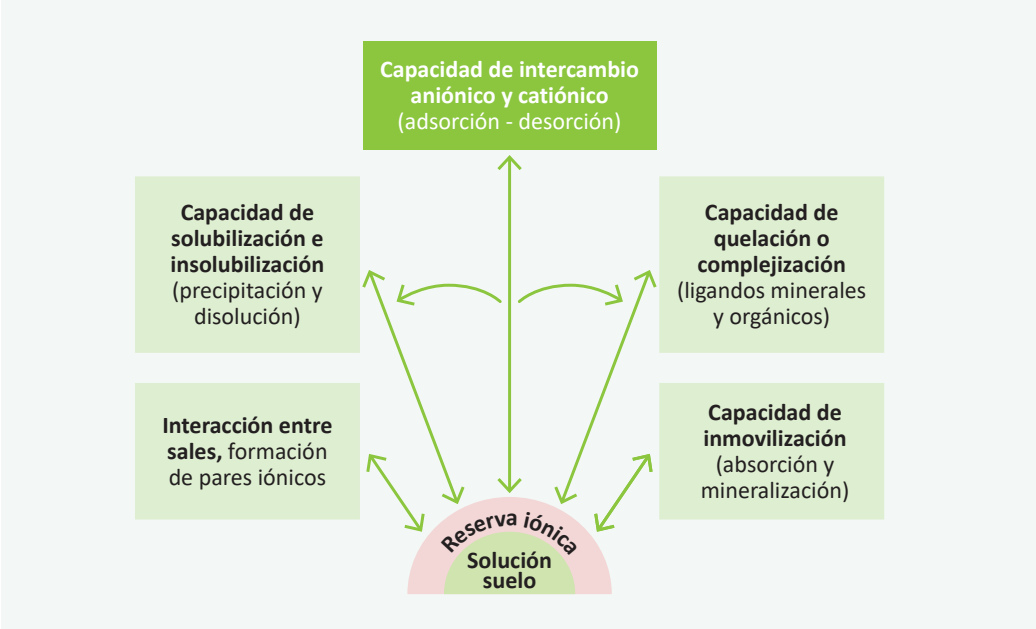


Figura 1. Mecanismos que mantienen en equilibrio los iones en la solución suelo (adaptado de McLean, 1977)

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 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). El criterio de uso y las respuestas en el suelo se ilustran en la Figura 2 (Espinosa y Molina, 1999).

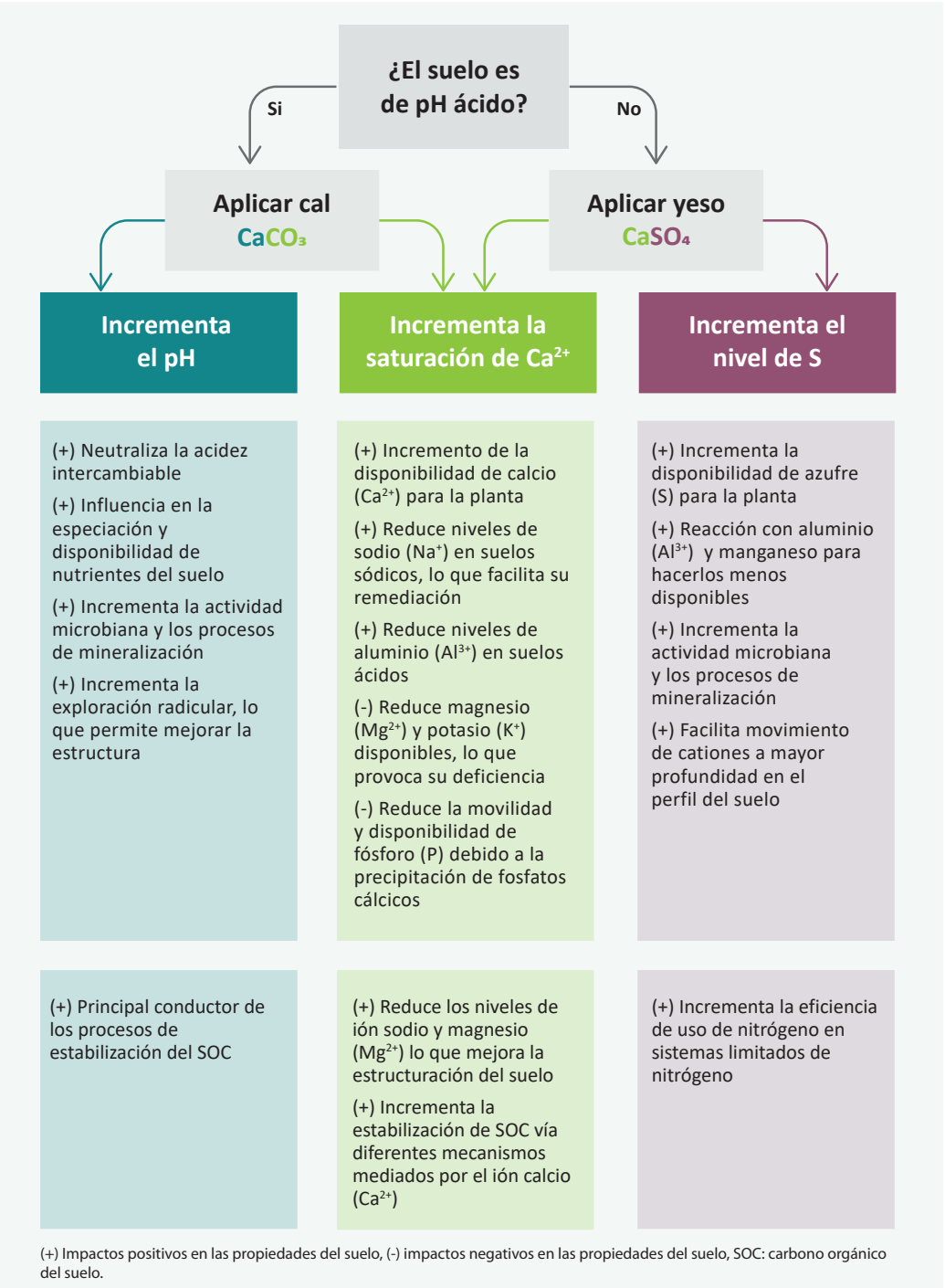


Figura 2. Criterios para el uso de la cal y el yeso, y su respuesta en la relación de saturación de cationes básicos (adaptado de Culman et al., 2021)

2.1.2. Sistema de suficiencia de nutrientes

a. Concepto

El 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 (Quispe-Matos et al., 2025), que se describen en la Figura 3.

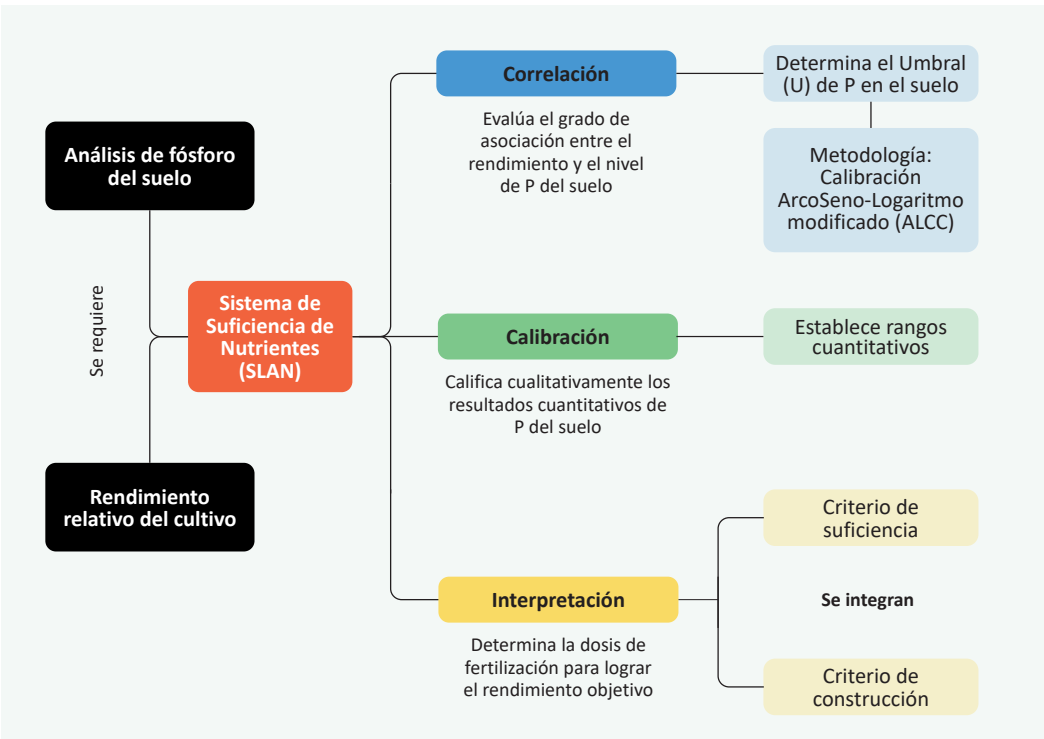


Figura 3. Esquema modelo para la implementación del sistema de suficiencia de nutrientes (SLAN) para el P del suelo

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, y 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.

$$RR = \left(\frac{\text{Rendimiento observado}}{\text{Rendimiento máximo}} \right) \times 100 \quad ...(1)$$

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 arroz, considerando un suelo con alto contenido de este nutriente.

Ejemplo práctico:

Se realizó un análisis de suelos en un cultivo de arroz, y se obtuvo 8 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 11 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 8 mg de P-Olsen por kg de suelo permite obtener un rendimiento relativo (RR) del 80 %.

Primer paso: calcular el rendimiento alcanzado con 8 mg de P-Olsen por kg de suelo utilizando la Fórmula 2:

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

$$\text{Rendimiento alcanzado} = \frac{80 \times 10 \text{ t ha}^{-1}}{100} = 8 \text{ t ha}^{-1}$$

Este resultado indica que el nivel actual de P (8 mg kg^{-1}) está por debajo del umbral crítico (11 mg kg^{-1}), lo que limita el rendimiento a solo el 80 % del potencial, 8 t ha^{-1} en lugar de 10 t ha^{-1}.

Segundo paso: hallar el incremento de raíces y brotes utilizando la Fórmula 3. Para este cálculo y con fines prácticos se considera que este incremento es el 50 % del rendimiento alcanzado.

Incremento de raíces y brotes = 0,50 x Rendimiento alcanzado ...(3)

Incremento de raíces y brotes = 0,50 x 8 t ha^{-1} = 4 t ha^{-1}

Además de los 8 t ha^{-1} de producción, el cultivo genera 4 t ha^{-1} de biomasa en raíces y brotes, lo que debe considerarse en el balance nutricional.

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

Rendimiento objetivo = Incremento de raíces y brotes + Rendimiento alcanzado ...(4)

Rendimiento objetivo = 8 t ha^{-1} + 4 t ha^{-1} = 12 t ha^{-1}

Cuarto paso: calcular el requerimiento de P utilizando la Fórmula 5. Para este cálculo y con fines prácticos se considera una extracción de 3 kg de fósforo por tonelada de producción.

Requerimiento de P = Extracción de P x Rendimiento objetivo ...(5)

Requerimiento de P = 3 kg de P t^{-1} x 12 t ha^{-1} = 36 kg ha^{-1}

A partir de estos resultados, se interpreta que el criterio de suficiencia estima un requerimiento de 36 kg de P ha^{-1} para alcanzar un rendimiento objetivo de 12 t ha^{-1}, el cual está conformado por 4 t ha^{-1} de biomasa radicular y vegetativa, y 8 t ha^{-1} de producción.

c. Aplicación de los criterios de mantenimiento y construcción

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

Con respecto a los criterios de mantenimiento y construcción, se aplican 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 (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 arroz para la aplicación del criterio de mantenimiento, y 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 arroz, y se obtuvo 6 mg de P-Olsen por kg de suelo utilizando el método de Olsen (P-Olsen), el cual se considera un nivel medio.

Para este cultivo, el umbral crítico o nivel de suficiencia es de 11 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 6 mg de P-Olsen por kg de suelo permite obtener un rendimiento relativo (RR) del 50 %.

Primer paso: calcular el rendimiento alcanzado con 6 mg de P-Olsen por kg de suelo, utilizando la Fórmula 2.

$$\text{Rendimiento alcanzado} = \frac{50 \times 10 \text{ t ha}^{-1}}{100} = 5 \text{ t ha}^{-1}$$

Segundo paso: hallar el incremento de raíces y brotes utilizando la Fórmula 3. Para este cálculo y con fines prácticos, se considera que este incremento es el 50 % del rendimiento alcanzado.

$$\text{Incremento de raíces y brotes} = 0{,}5 \times 5 \text{ t ha}^{-1} = 2{,}5 \text{ t ha}^{-1}$$

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

$$\text{Rendimiento objetivo} = 5 \text{ t ha}^{-1} + 2{,}5 \text{ t ha}^{-1} = 7{,}5 \text{ t ha}^{-1}$$

Cuarto paso: calcular el requerimiento de P utilizando la Fórmula 5. Para este cálculo y con fines prácticos, se considera una extracción de 3 kg de fósforo por tonelada de producción.

$$\text{Requerimiento de P} = 3 \text{ kg de P t}^{-1} \times 7{,}5 \text{ t ha}^{-1} = 22{,}5 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

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

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

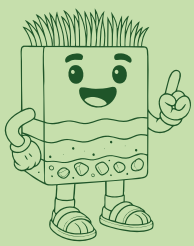
$$\text{RM de P} = \frac{22{,}5 \text{ kg de P ha}^{-1}}{0{,}30} = 75 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

De esta manera, el requerimiento de mantenimiento de fósforo en el cultivo de arroz es 75 kg por hectárea.

Ejemplo práctico (criterios de mantenimiento y construcción)

Se realizó un análisis de suelos en un cultivo de arroz, y se obtuvo 4 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 11 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 4 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 4 mg de P-Olsen por kg de suelo, utilizando la Fórmula 2.

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

Segundo paso: hallar el incremento de raíces y brotes utilizando la Fórmula 3. Para este cálculo y con fines prácticos se considera que este incremento es el 50 % del rendimiento alcanzado.

$$\text{Incremento de raíces y brotes} = 0{,}5 \times 3{,}0 \text{ t ha}^{-1} = 1{,}5 \text{ t ha}^{-1}$$

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

$$\text{Rendimiento objetivo} = 3{,}0 \text{ t ha}^{-1} + 1{,}5 \text{ t ha}^{-1} = 4{,}5 \text{ t ha}^{-1}$$

Cuarto paso: calcular el requerimiento de P utilizando la Fórmula 5. Para este cálculo y con fines prácticos, se considera una extracción de 3 kg de fósforo por tonelada de producción.

$$\text{Requerimiento de P} = 3 \text{ kg de P t}^{-1} \times 4{,}5 \text{ t ha}^{-1} = 13{,}5 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

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

$$\text{RM de P} = \frac{13{,}5 \text{ kg de P ha}^{-1}}{0{,}2} = 67{,}5 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

Sexto paso: calcular el requerimiento de construcción anual (RC) usando la Fórmula 7. Para este cálculo y con fines prácticos, se considera que es necesario fertilizar con 9 kg de P por hectárea para incrementar 1 mg de P por kg del suelo, a lo cual se 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.

$$RC = IAR \times NCF \quad ...(7)$$

$$RC = 1{,}5 \text{ mg de P kg}^{-1} \times \frac{9 \text{ kg de P ha}^{-1}}{1 \text{ mg de P kg}^{-1}} = 13{,}5 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

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

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

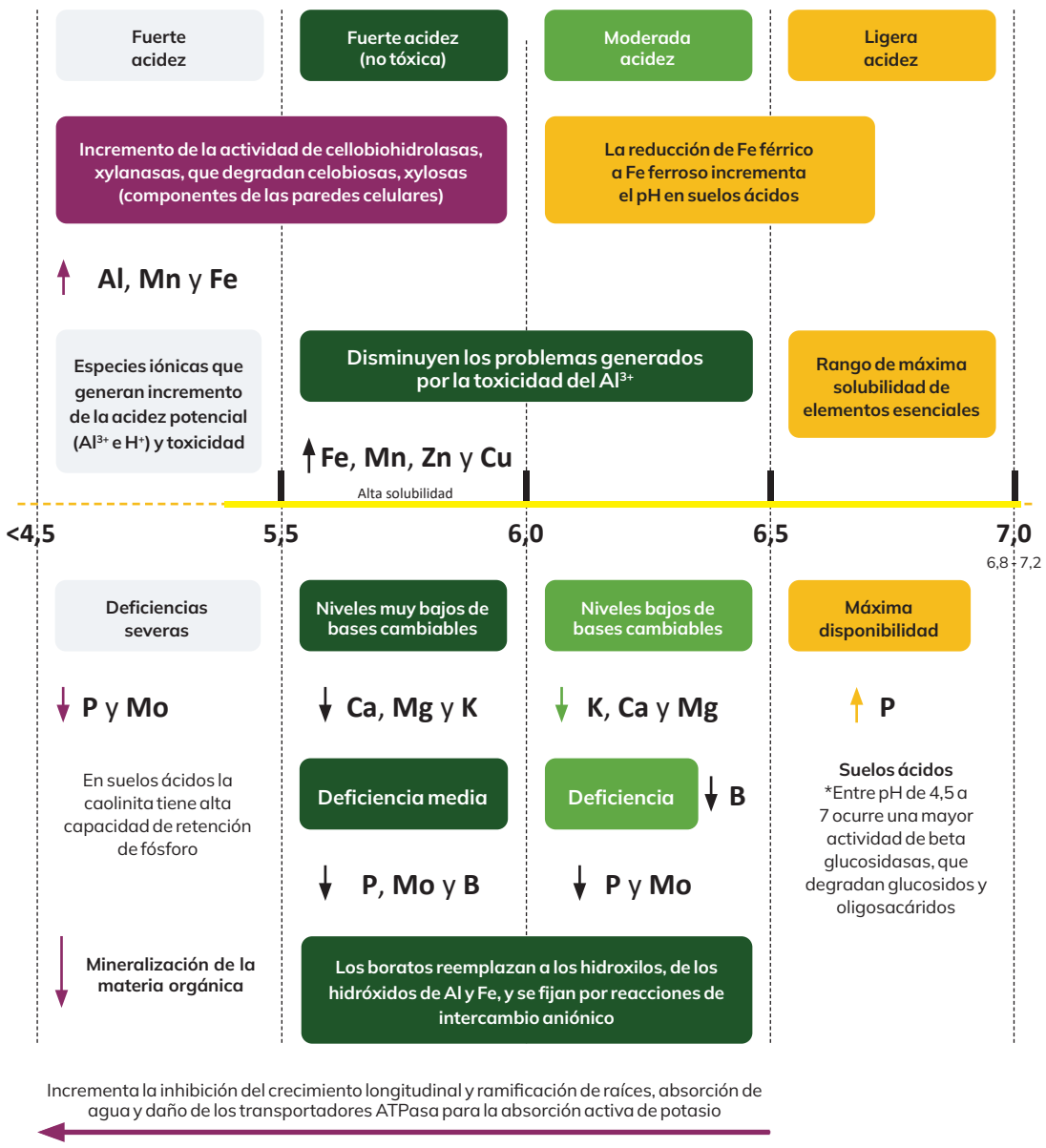
$$\text{Dosis de fertilización de P} = 67{,}5 \text{ kg de P ha}^{-1} + 13{,}5 \text{ kg de P ha}^{-1} = 81 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

De esta manera, el requerimiento de mantenimiento y construcción de fósforo en el cultivo de arroz es 81 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).



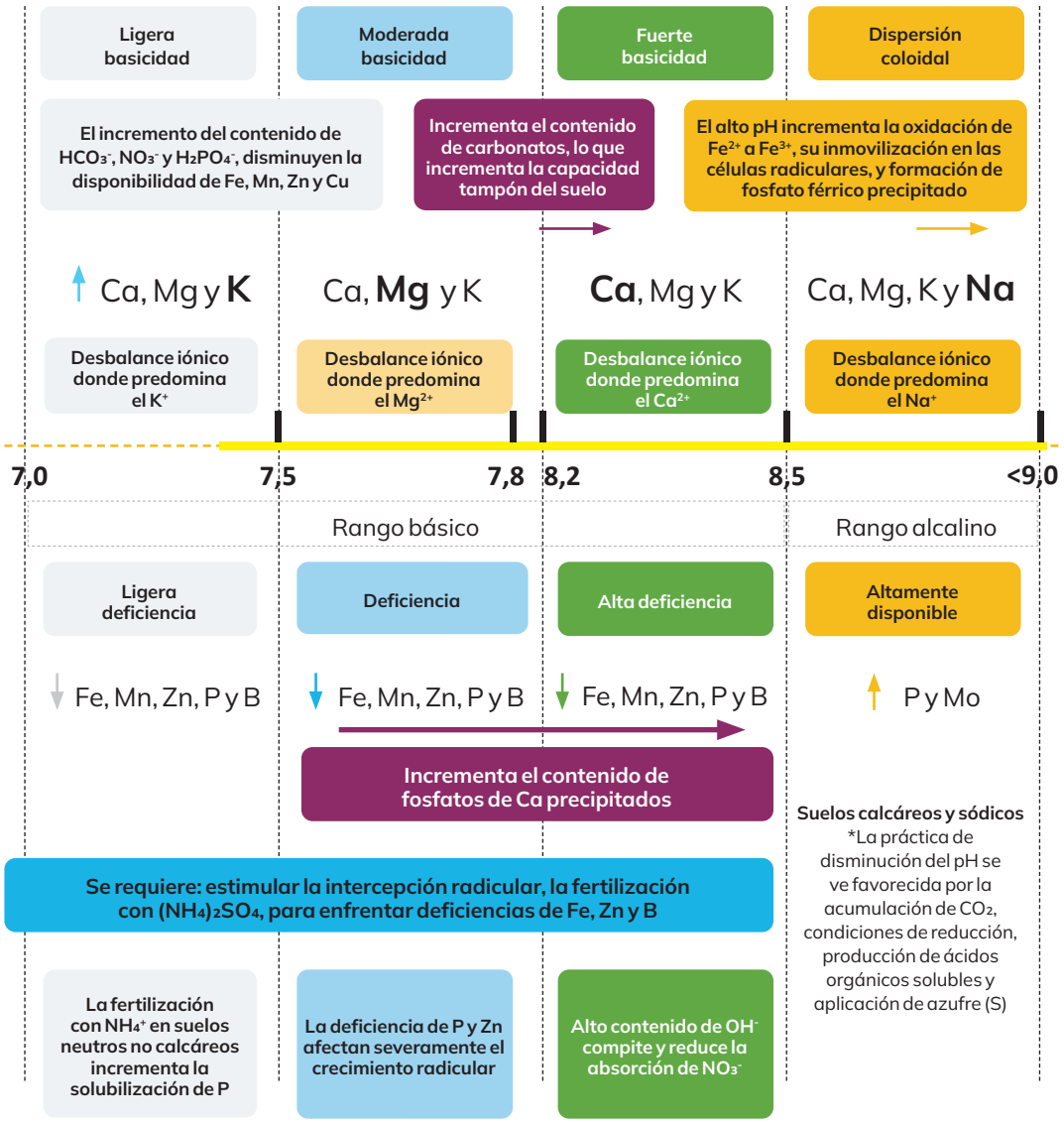


Figura 4. Diagnóstico de la fertilidad del suelo en función al pH

2.2. Análisis geoestadístico de las propiedades del suelo

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

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


Instituto Nacional de Innovación Agraria
PERÚ

3. Muestreo y análisis de suelos en la EEA Los Cedros

3.1. Ubicación

La EEA Los Cedros se encuentra en suelos de tipo Fluvisol éutrico y Regosol éutrico, originados a partir de sedimentos fluviales recientes (Instituto Nacional de Recursos Naturales [INRENA], 1996). Además, cuenta con una extensión de 48,65 ha, siendo los cultivos priorizados: plátano (*Musa paradisiaca* L.), banano (*Musa sp*.), algarrobo (*Ceratonia siliqua* L.), entre otros (Cruz-Luis et al., 2025).

En la estación se realiza investigación, valoración, conservación, producción de material genético de plantas y animales, además de brindar asistencia técnica y otros servicios para los agricultores de la región Tumbes. Asimismo, se ubica en el distrito de Corrales, provincia y departamento de Tumbes (Figura 5), en la región Costa o Chala a 12 m s. n. m. con precipitaciones anuales de hasta 250 mm y temperaturas medias anuales que varían entre los 18 a 24 °C (Cruz-Luis et al., 2025).

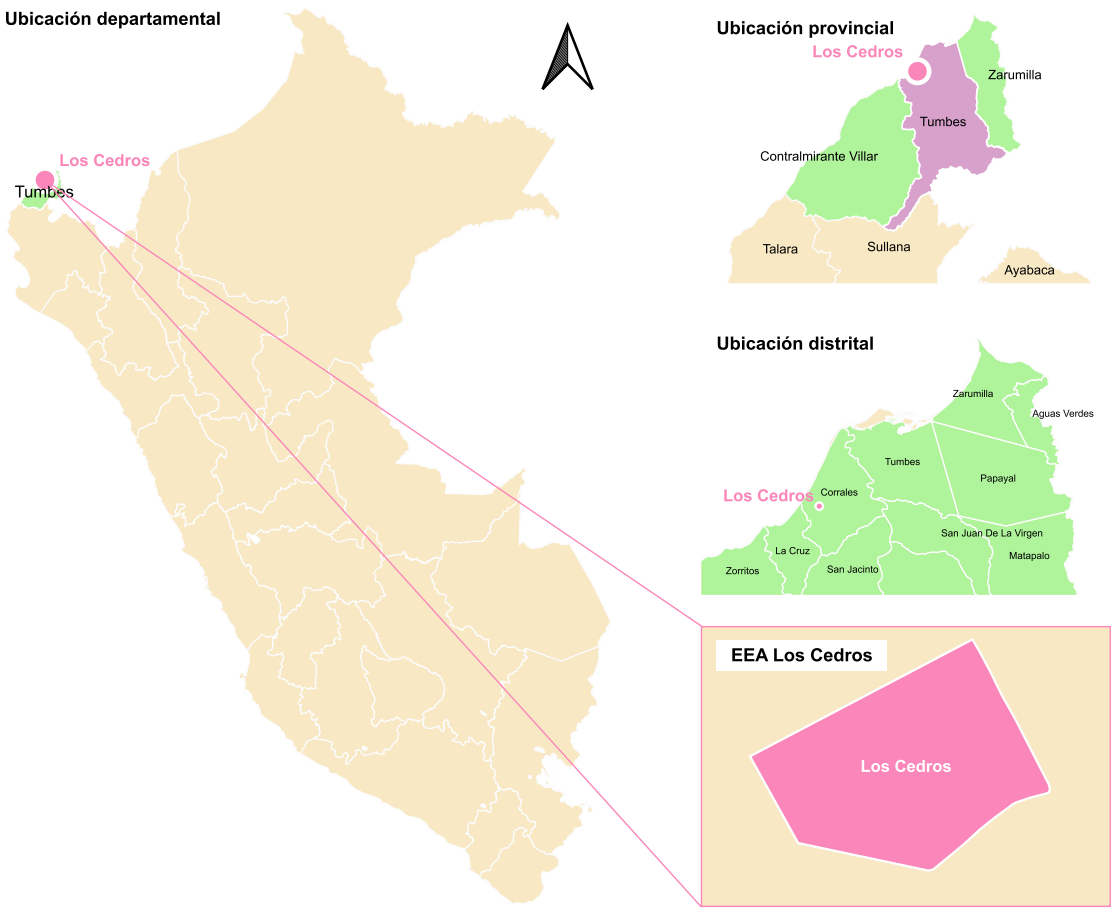


Figura 5. Ubicación de la EEA Los cedros

3.2. Muestreo estratificado del suelo

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

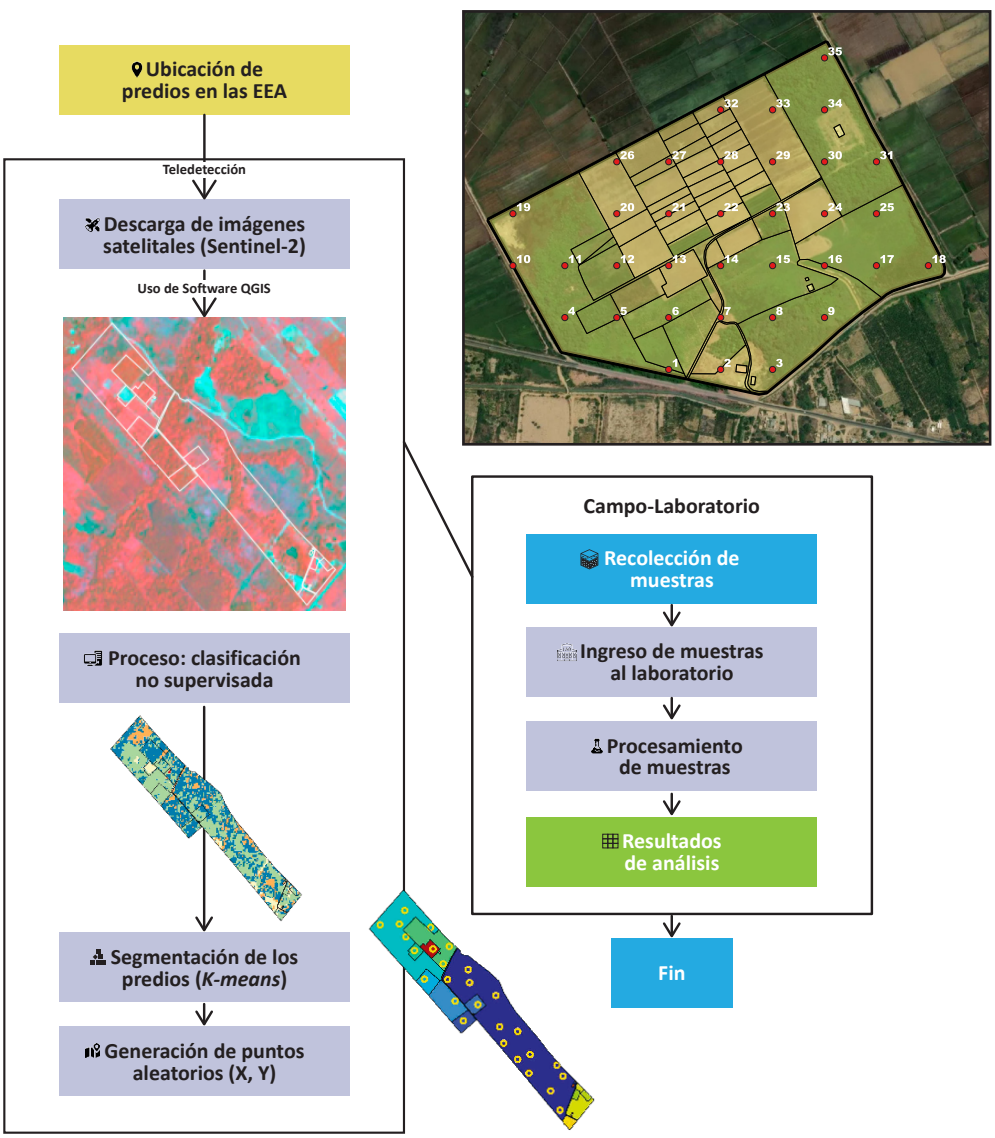


Figura 6. Flujo de trabajo para la determinación de los puntos de muestreo

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) (Figura 6). 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 35 puntos de muestreo de suelos, como se observa en la Figura 7.

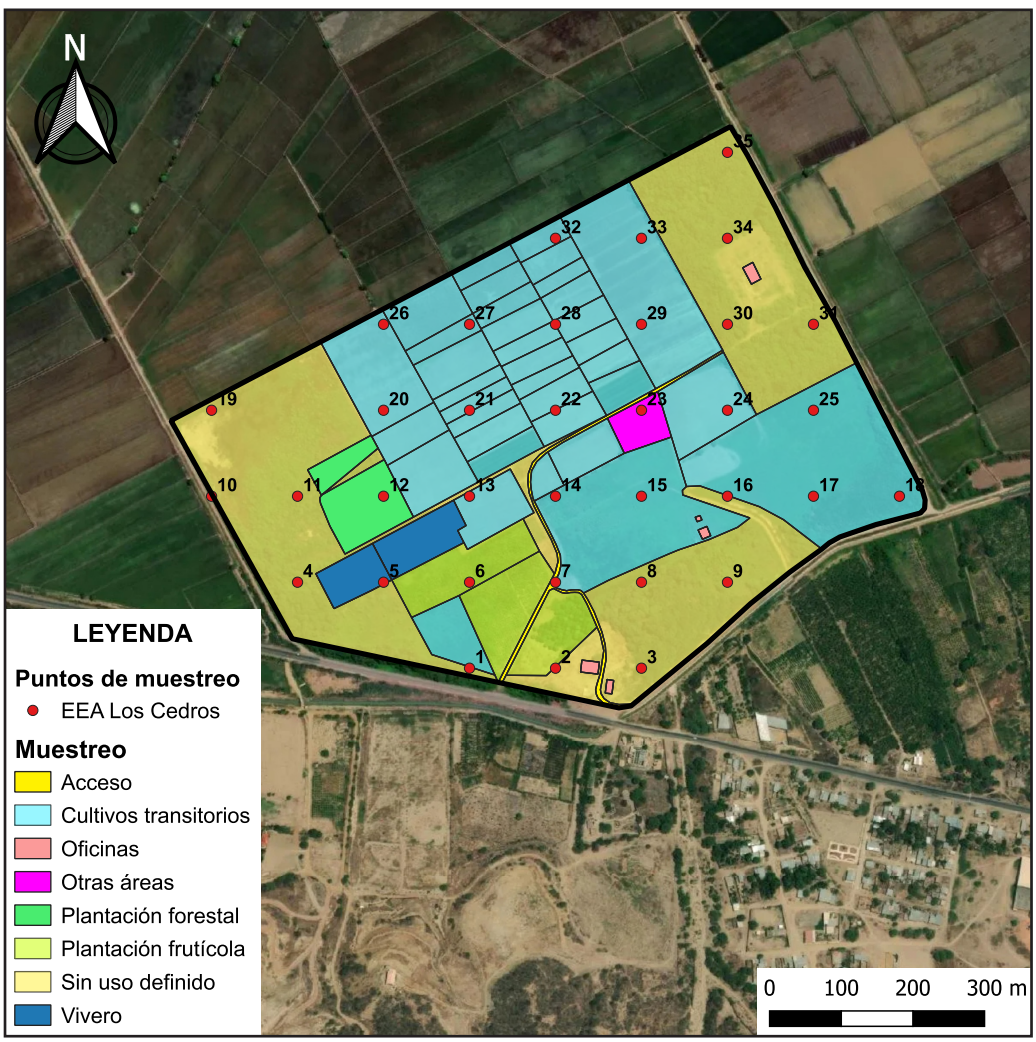


Figura 7. Puntos de muestreo del suelo en el EEA Los Cedros

3.2.2. Muestreo de suelos en los puntos identificados

Una vez identificadas las coordenadas de los 35 puntos de muestreo, los pasos que se siguieron para la colecta de muestras fueron los siguientes (Figura 8):

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



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

3.3. Análisis de suelos

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

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

Parámetro	Método de análisis	Referencias
Porcentaje de arena, limo y arcilla	Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000. Método de densímetro tipo Bouyoucos	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT, 2002)
pH (1:2,5)	Método 9045D de la Agencia de Protección Ambiental (EPA)	Environmental Protection Agency (EPA, 2004)
Conductividad eléctrica (CE) (1:5)	ISO 11265: determinación de la conductividad eléctrica específica del suelo	International Organization for Standardization (ISO, 1994)
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

En la Tabla 2 se puede observar que los suelos evaluados presentan, en promedio, una textura arenosa a franco-arenosa (62,93 % de arena, 21,91 % de arcilla y 15,16 % de limo) con una marcada heterogeneidad textural (CV entre 24,78 y 61,56 %). Esta condición sugiere una baja capacidad de retención de agua y nutrientes, por lo que resulta imprescindible gestionar cuidadosamente el riego y considerar la aplicación periódica de materia orgánica.

El pH de los suelos es en promedio neutro a ligeramente alcalino (media = 7,23; SD = 0,88; CV = 12,13 %), con una distribución cercana a la simétrica y un sesgo leve negativo. El rango estable (4,10-8,30) indica condiciones favorables para la mayoría de los cultivos. No obstante, las zonas ligeramente ácidas pueden requerir monitoreo para evitar afecciones en cultivos sensibles.

El contenido promedio de materia orgánica es bajo (media = 1,59 %), típico en suelos arenosos o costeros, lo que reduce tanto la capacidad de retención de agua como de nutrimentos, recomendando la continua incorporación de enmiendas orgánicas.

Por su parte, la conductividad eléctrica muestra alta variabilidad (CV = 251,59 %) con presencia de sectores con problemas severos de salinidad (máximo = 93,44 dS m^{-1}) y potenciales restricciones para cultivos sensibles.

En cuanto a la fertilidad química, la capacidad de intercambio catiónico es media-baja (media = 28,3 cmol kg^{-1}), con una fuerte asimetría en la cantidad de Na^+ (CV = 163,53 %) y K^+ (CV = 74,37 %), lo que indica presencia de valores extremos y posibles *hotspots* asociados a drenaje deficiente, uso de fertilizantes o condiciones naturales. El contenido de carbonatos ($CaCO_3$) es bajo (media = 2,45 %), lo que limita problemas de alcalinidad, aunque se destaca cierta dispersión. Por su parte, el fósforo disponible es moderado (media = 16,75 mg kg^{-1}) mientras que el potasio disponible revela alta variabilidad, sugiriendo diferencias locales en fertilización o lixiviación de nutrientes.

En síntesis, las principales limitantes agronómicas de estos suelos derivan de su baja retención de agua, escasa materia orgánica y la existencia de áreas con salinidad y sodicidad significativa. Esto exige intervenir con riego eficiente y aplicación continua de enmiendas orgánicas. Además, donde existan concentraciones elevadas de sodio, realizar aplicaciones de yeso agrícola para mejorar la estructura y permitir la lixiviación del sodio sin alterar el pH del suelo. Asimismo, la alta variabilidad detectada en la mayoría de los parámetros fisicoquímicos resalta la necesidad de emplear herramientas de agricultura de precisión y geoestadística. Estas permiten optimizar el manejo localizado de la fertilidad, el riego y las enmiendas, garantizando una producción sostenible y más resiliente frente a las limitaciones identificadas.

Tabla 2. Estadísticos descriptivos de los parámetros fisicoquímicos del suelo de la EEA Los Cedros

Variables	Unidad	Media	Mediana	SD	CV	Mínimo	Máximo	*Skewness*
pH	unidad	7,23	7,60	0,88	12,13	4,10	8,30	-1,57
CEe	dS m^{-1}	6,60	1,06	16,59	251,59	0,31	93,44	4,07
MO	%	1,59	1,60	0,45	28,51	0,80	2,30	-0,10
Arcilla	%	21,91	20,30	8,53	38,93	9,20	39,10	0,47
Limo	%	15,16	14,70	9,33	61,56	1,20	38,80	0,53
Arena	%	62,93	64,70	15,59	24,78	31,90	89,30	-0,16
Ca^{2+}	cmol kg^{-1}	17,98	16,30	10,07	56,00	6,80	52,50	1,83
Mg^{2+}	cmol kg^{-1}	5,65	4,70	4,42	78,22	1,50	26,10	2,77
Na^{+}	cmol kg^{-1}	3,76	2,10	6,14	163,53	1,00	38,00	4,70
K^{+}	cmol kg^{-1}	0,82	0,70	0,61	74,37	0,20	2,80	1,59
$CaCO_3$	%	2,45	2,50	0,48	19,39	1,10	3,60	-0,22
P disp.	mg kg^{-1}	16,75	16,60	4,87	29,04	10,90	33,90	1,33
K disp.	mg kg^{-1}	410,43	314,00	402,45	98,05	96,00	2102,00	2,60
CICe	cmol kg^{-1}	28,21	24,60	19,42	68,85	10,50	113,00	2,66
PCI	%	66,01	67,58	7,13	10,80	40,97	75,88	-2,06
PMI	%	19,47	19,68	3,88	19,94	8,82	30,56	-0,16
PPI	%	3,35	2,72	2,59	77,39	0,62	13,48	1,95
PSI	%	11,17	10,19	5,52	49,38	4,72	33,63	2,37

SD: desviación estándar, CV: coeficiente de variación, *Skewness*: coeficiente de asimetría, CEe: conductividad eléctrica en extracto de saturación, MO: materia orgánica, P disp.: fósforo disponible, K disp.: potasio disponible, CICe: capacidad de intercambio catiónico efectiva, PCI: porcentaje de calcio intercambiable, PMI: porcentaje de magnesio intercambiable, PPI: porcentaje de potasio intercambiable, PSI: porcentaje de sodio intercambiable.

3.5. 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, etc.), siempre que se cuente con datos georreferenciados confiables. Una muestra confiable se caracteriza por tener precisión geográfica, ser representativa del área de estudio, presentar calidad en las mediciones y la minimización de errores.

Requisitos previos para el mapeo:

a. **Computador:** QGIS instalado (versión recomendada: 3.28 o superior).

b. **Complemento:** ***Smart-Map*** instalado y configurado.

c. **Base de datos:** ***shapefile*** de los puntos de muestreo del suelo con información georreferenciada y valores de la variable a analizar.

d. **Unidades y proyección:** las capas de entrada (puntos georreferenciados y contorno del área de estudio) deben estar en el sistema métrico *Universal Transversal Mercator* (UTM), cuyas unidades son 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 9) y el p-valor.

$$I = \sum_{n}^{1} ij \quad ...(9)$$

Donde:
I > 0: existe autocorrelación espacial positiva (valores similares tienden a estar juntos).
I < 0: existe autocorrelación espacial negativa (valores diferentes tienden a estar juntos).
I = 0: ausencia de autocorrelación (se da una distribución aleatoria).

Si el p-valor es menor a 0,05, se rechaza la hipótesis nula (H_0) y se concluye que hay evidencia de un patrón espacial significativo. Si el p-valor es mayor a 0,05, no se puede rechazar la H_0, lo que sugiere que los datos no tienen autocorrelación espacial significativa.

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

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

3.7.1. Generación y ajuste del variograma

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

3.7.2. Interpolación *Kriging*

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

3.7.3. Validación cruzada

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

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

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{I=1}^{n}[Z_1(X_i) - Z_2(X_i)]^2} \quad ...(10)$$

Donde:
n: el número de muestras.
$Z_1(x_i)$: valores predichos en el sitio i.
$Z_2(x_i)$: valores observados en el sitio i.

b. **Coeficiente de determinación (R^2):** mide qué tan bien las predicciones del modelo explican la variabilidad de los datos (Fórmula 11). Si el R^2 es igual a 1, las predicciones son perfectas y el modelo explica toda la variabilidad de los datos; si el $R^2 > 0,7$, el modelo tiene una buena capacidad predictiva (esto es relativo según el campo de aplicación). Si el $R^2 < 0,5$, el modelo tiene una baja capacidad predictiva (no explica bien la variabilidad espacial). Finalmente, un $R^2 = 0$ significa que el modelo no se ajusta en absoluto a los datos.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{I=1}^{n}[Z_1(X_i) - Z_2(X_i)]^2}{\sum_{I=1}^{n}[Z_1(X_i) - Z_2]^2} \quad ...(11)$$

Donde:
n: el número de muestras.
$Z_1(x_i)$: valores predichos en el sitio i.
$Z_2(x_i)$: valores observados en el sitio i.

3.8. Resultados del análisis geoestadístico de las propiedades fisico-químicas del suelo

La Tabla 3 muestra que las propiedades fisicoquímicas del suelo de la EEA Los Cedros presentan distintos grados de estructura espacial y predictibilidad. En general, los coeficientes de determinación resultantes de la validación cruzada fueron notablemente bajos para la totalidad de las variables, donde el valor de ajuste más alto correspondió al porcentaje de sodio intercambiable (PSI) con un $R^2 = 0,280$, seguido de materia orgánica ($R^2 = 0,240$) y sodio intercambiable ($R^2 = 0,221$).

Las propiedades texturales mostraron comportamientos diferenciados, donde la arena y el limo se ajustaron a un modelo esférico con una correlación espacial que se mantiene hasta distancias cercanas a los 270 m. En contraste, la arcilla presentó un modelo lineal con mayor alcance (384,9 m), pero con un ajuste casi nulo ($R^2 = 0,027$), lo que sugiere que el modelo no logra explicar su variabilidad espacial. Esto indicaría que la distribución de la arcilla está influenciada por factores no considerados en el análisis.

Con respecto a las propiedades químicas, el pH mostró un modelo exponencial con un coeficiente de correlación bajo ($R^2 = 0,189$), lo que limita su predictibilidad. La conductibilidad eléctrica (CEe) y la materia orgánica (MO) también presentaron bajos ajustes (R^2 de 0,198 y 0,240, respectivamente), aunque evidencian una estructura espacial relativamente más definida en comparación con otras variables. Las bases intercambiables (Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^{+} y K^{+}) y la capacidad de intercambio catiónico efectiva (CICe) mostraron modelos diferentes con alcances que oscilaron entre 261,6 m y 498,5 m, y coeficientes de determinación consistentemente bajos (R^2 entre 0,046 y 0,221), destacando ligeramente el sodio (Na^{+}) con el mayor ajuste ($R^2 = 0,221$).

El potasio disponible (K disp.) presentó el mayor *nugget* ($C_0 = 20\,369,5$), lo que evidencia una elevada varianza no explicada y sugiere que su distribución espacial es altamente impredecible bajo el modelo empleado. Finalmente, el fósforo disponible (P disp.) y el porcentaje de magnesio intercambiable (PMI) mostraron un alcance extremadamente bajo (0,002 m), lo que indica la ausencia de estructura espacial a la escala evaluada.

Los modelos geoestadísticos ajustados explican menos del 30 % de la variabilidad espacial de las propiedades del suelo en la EEA Los Cedros, limitando la aplicación de técnicas de interpolación geoestadística directa. Al tener un alcance muy reducido, estas variables están controladas por procesos de alta variabilidad local como la topografía, fertilización o actividad microbiana, siendo necesario un muestreo mucho más denso para la viabilidad de la interpolación espacial o la incorporación de covariables ambientales auxiliares, como los datos climáticos y relieve. Asimismo, se hacen indispensables los modelos de regresión-kriging que integren predictores ambientales de alta resolución.

.

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

Variable	*Model*	*Nugget* (C_0)	*Sill* (C_0+C)	*Range* (m)	*Cross-validation*	
					RMSE	R^2
Arena	*Spherical*	74,345	224,348	264,543	13,839	0,157
Limo	*Spherical*	34,571	72,734	269,321	7,765	0,193
Arcilla	*Linear*	50,859	79,520	384,929	8,710	0,027
pH	*Exponential*	$3x10^{-4}$	0,569	382,237	0,635	0,189
CEe	*Linear to Sill*	8,138	36,925	442,164	5,369	0,198
MO	*Linear*	0,219	0,194	394,083	0,491	0,240
P disp.	*Linear to Sill*	$4x10^{-4}$	16,106	0,002	4,043	0,156
K disp.	*Linear*	20 369,535	46 452,612	388,949	198,182	0,130
$CaCO_3$	*Linear*	0,081	0,198	387,518	0,435	0,027
Ca^{2+}	*Gaussian*	25,012	43,384	261,589	6,564	0,046
Mg^{2+}	*Linear to Sill*	3,966	8,451	435,123	2,454	0,184
Na^+	*Gaussian*	1,573	3,458	498,514	1,503	0,221
K^+	*Linear to Sill*	0,167	0,183	274,459	0,455	0,188
CICe	*Gaussian*	68,490	112,931	414,177	9,768	0,112
PCI	*Linear*	14,593	16,371	313,695	4,218	0,091
PMI	*Linear to Sill*	$3x10^{-4}$	8,070	0,002	2,860	0,073
PPI	*Linear*	3,230	4,531	379,193	2,023	0,024
PSI	*Exponential*	1,333	10,500	0,002	3,199	0,280

RMSE: raíz del error cuadrático medio, R^2: coeficiente de determinación, CEe: conductividad eléctrica en extracto de saturación, MO: materia orgánica, N total: nitrógeno total, P disp.: fósforo disponible, K disp.: potasio disponible, CICe: capacidad de intercambio catiónico efectiva, PCI: porcentaje de calcio intercambiable, PMI: porcentaje de magnesio intercambiable, PPI: porcentaje de potasio intercambiable, PSI: porcentaje de sodio intercambiable

3.9. Mapeo digital de las propiedades del suelo

Los mapas de variación espacial de la EEA Los Cedros (Figuras 9-24) muestran una distribución heterogénea de las propiedades del suelo, caracterizada por una marcada variabilidad local que limita, en la mayoría de los casos, la continuidad espacial de los atributos edáficos. Este patrón responde a la interacción entre factores pedogenéticos naturales, como la textura heredada del material parental, y la influencia antrópica derivada del manejo agronómico histórico del predio. A pesar de esta complejidad, los mapas constituyen una herramienta valiosa para identificar zonas con comportamientos diferenciados, lo que permite avanzar hacia un manejo sitio-específico.

La distribución de las fracciones texturales muestra un patrón fragmentado, con predominio de texturas francas en amplias zonas, aunque se identifican sectores con acumulaciones puntuales de arcilla y limo. La baja continuidad espacial de estas fracciones sugiere que la heterogeneidad textural está fuertemente influenciada por procesos locales de erosión, sedimentación o prácticas de labranza diferenciadas. Las áreas con mayor contenido de arcilla presentan potencialmente una mayor capacidad de retención de agua y nutrientes, mientras que los sectores más arenosos requerirán estrategias de manejo orientadas a mejorar la eficiencia de riego y fertilización.

En cuanto a la conductividad eléctrica, esta presenta uno de los gradientes espaciales más definidos, con sectores claramente diferenciados por su contenido de sales. Este patrón es clave para la gestión del riego y la prevención de la salinización. Las zonas con mayor CE deben ser consideradas como áreas críticas donde se requiere implementar prácticas de lavado de sales, cultivar especies tolerantes y monitorear la calidad del agua de riego para evitar la degradación química del suelo.

El contenido de materia orgánica presenta una distribución espacial con tendencias graduales, aunque con alta variabilidad local. Se observan áreas con valores relativamente más altos, probablemente asociadas a historiales diferenciados de aplicación de enmiendas orgánicas o acumulación de residuos de cosecha, y representan sitios de mayor fertilidad natural donde se puede optimizar el uso de fertilizantes nitrogenados y mejorar la retención hídrica.

El pH muestra una distribución con sectores de tendencia neutra a ligeramente alcalina, mientras que el carbonato de calcio presenta una variabilidad más errática, reflejando diferencias en el material parental o procesos de acumulación secundaria. En las zonas con pH más elevado y alto contenido de carbonatos, es fundamental monitorear la disponibilidad de micronutrientes como el hierro y zinc, y evaluar la necesidad de aplicar enmiendas ácidas para optimizar la nutrición de los cultivos.

El calcio intercambiable presenta una variabilidad moderada a alta dentro del área de estudio, observándose zonas con concentraciones que alcanzan hasta 52,50 cmol/kg, mientras que otras registran valores considerablemente menores. Los valores elevados de calcio pueden generar desbalances iónicos en el complejo de cambio, favoreciendo el antagonismo con el potasio y reduciendo su disponibilidad, además de limitar la absorción de magnesio. Asimismo, esta variable muestra una baja predictibilidad espacial, atribuida a un componente aleatorio no capturado por el esquema de muestreo.

Con respecto a los elementos disponibles, el fósforo presenta una distribución espacial predominantemente aleatoria, lo cual es característico de un elemento con baja movilidad y fuertemente influenciado por la fertilización localizada. Esta variabilidad dificulta la generación de zonas homogéneas, pero permite identificar sectores con deficiencias críticas donde es prioritario ajustar las dosis y la ubicación de las aplicaciones de fósforo.

La CICe muestra una distribución que refleja la influencia combinada de la textura, la materia orgánica y el contenido de arcilla. Las zonas con mayor CICe coinciden parcialmente con las áreas de mayor contenido de arcilla y materia orgánica, lo que indica una mayor capacidad de retención de nutrientes, y pueden manejarse con estrategias de fertilización menos intensivas. Mientras que las zonas de baja CICe requerirán aplicaciones más frecuentes y fraccionadas.

Los porcentajes de calcio, magnesio, potasio y sodio intercambiables presentan patrones espaciales mayormente irregulares, con baja continuidad, lo cual es típico de sistemas agrícolas intervenidos donde el manejo diferencial de la fertilización y el riego modifican localmente el equilibrio catiónico. Los mapas resultan útiles para identificar sectores con riesgos de desbalance (por ejemplo, predominio de sodio o deficiencia relativa de magnesio) que podrían afectar la estabilidad estructural y la disponibilidad de nutrientes.

En conjunto, los mapas edáficos de la EEA Los Cedros evidencian una organización espacial compleja, donde la mayoría de las propiedades químicas y nutricionales muestran una alta variabilidad local. A pesar de estas limitaciones en la predictibilidad espacial, la información generada representa un avance significativo en la caracterización edáfica de la estación. Los mapas permiten delimitar áreas con comportamientos contrastantes, lo que constituye la base para implementar estrategias de manejo diferenciado, optimizar el uso de insumos y avanzar hacia prácticas de agricultura de precisión adaptadas a las condiciones particulares de la estación experimental.

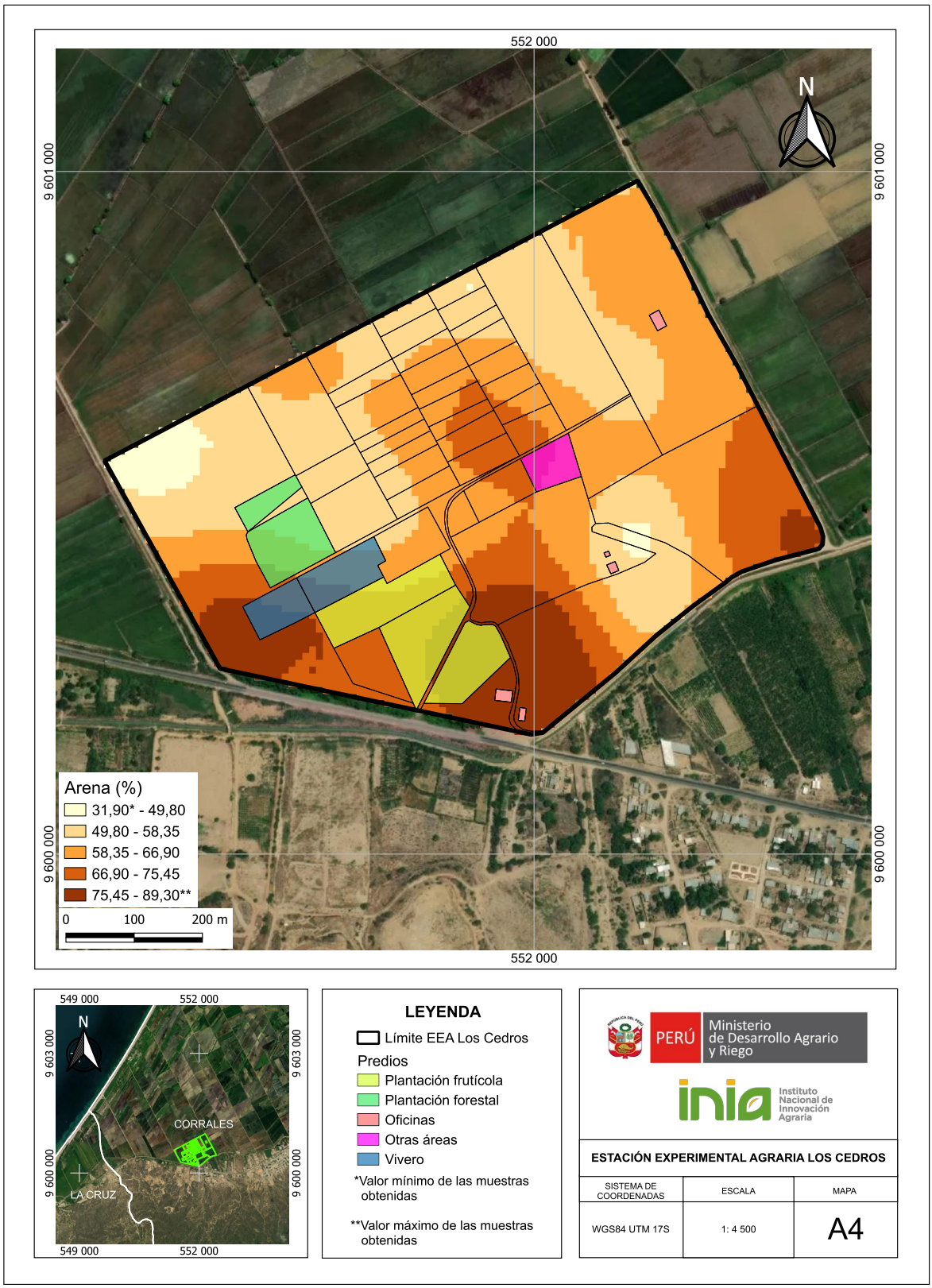


Figura 9. Mapa de variación espacial del porcentaje de arena

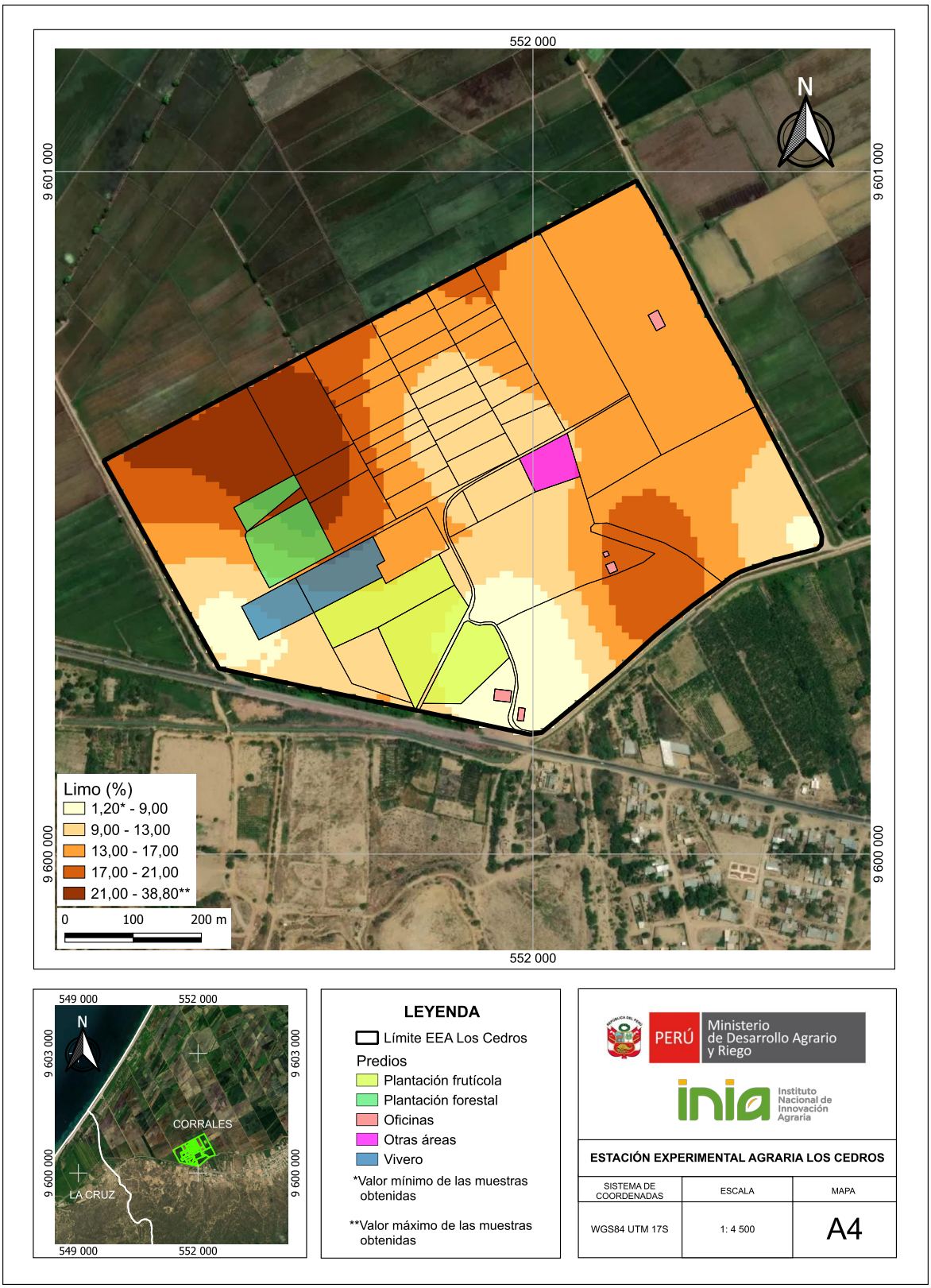


Figura 10. Mapa de variación espacial del porcentaje de limo

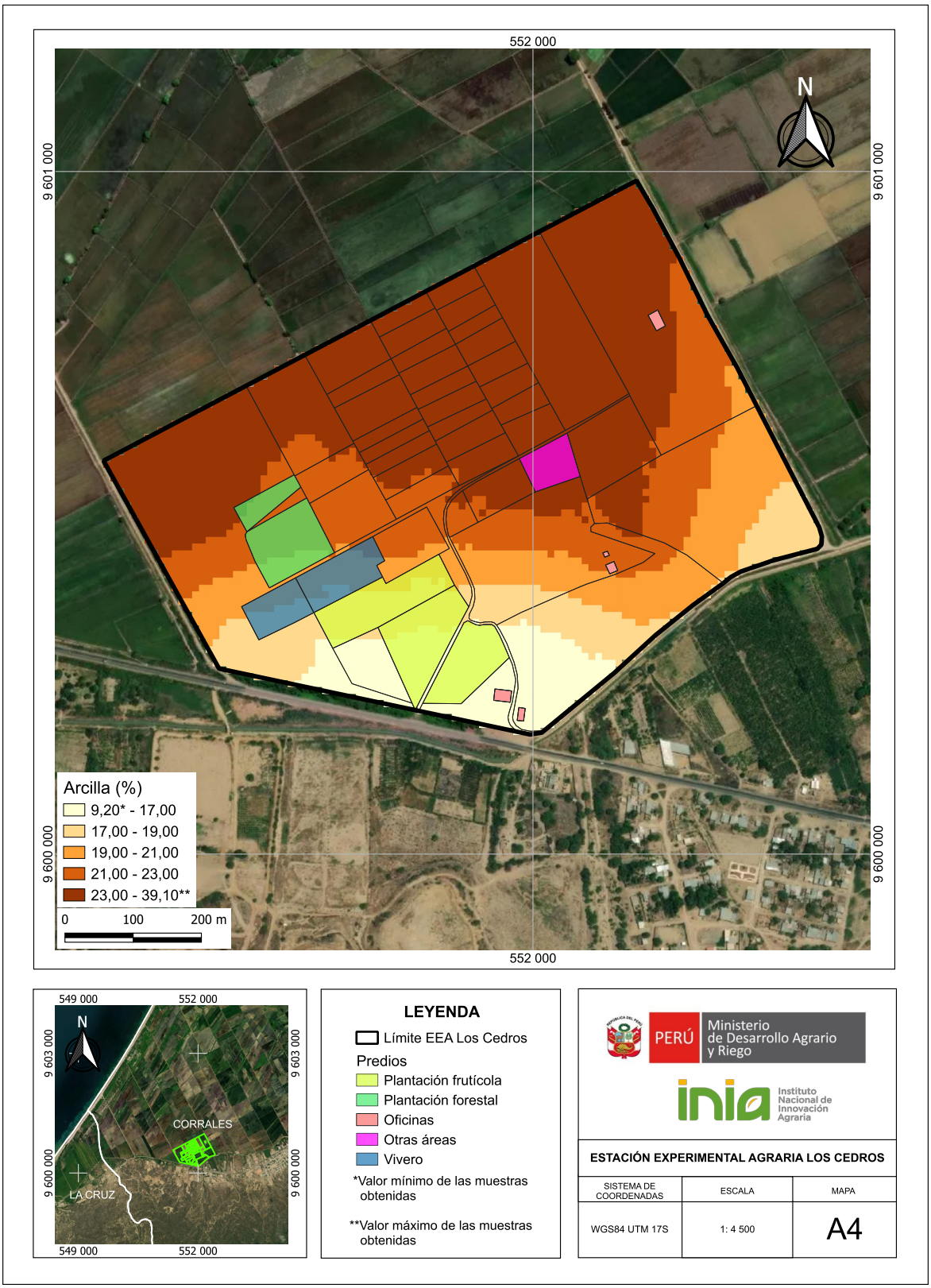


Figura 11. Mapa de variación espacial del porcentaje de arcilla

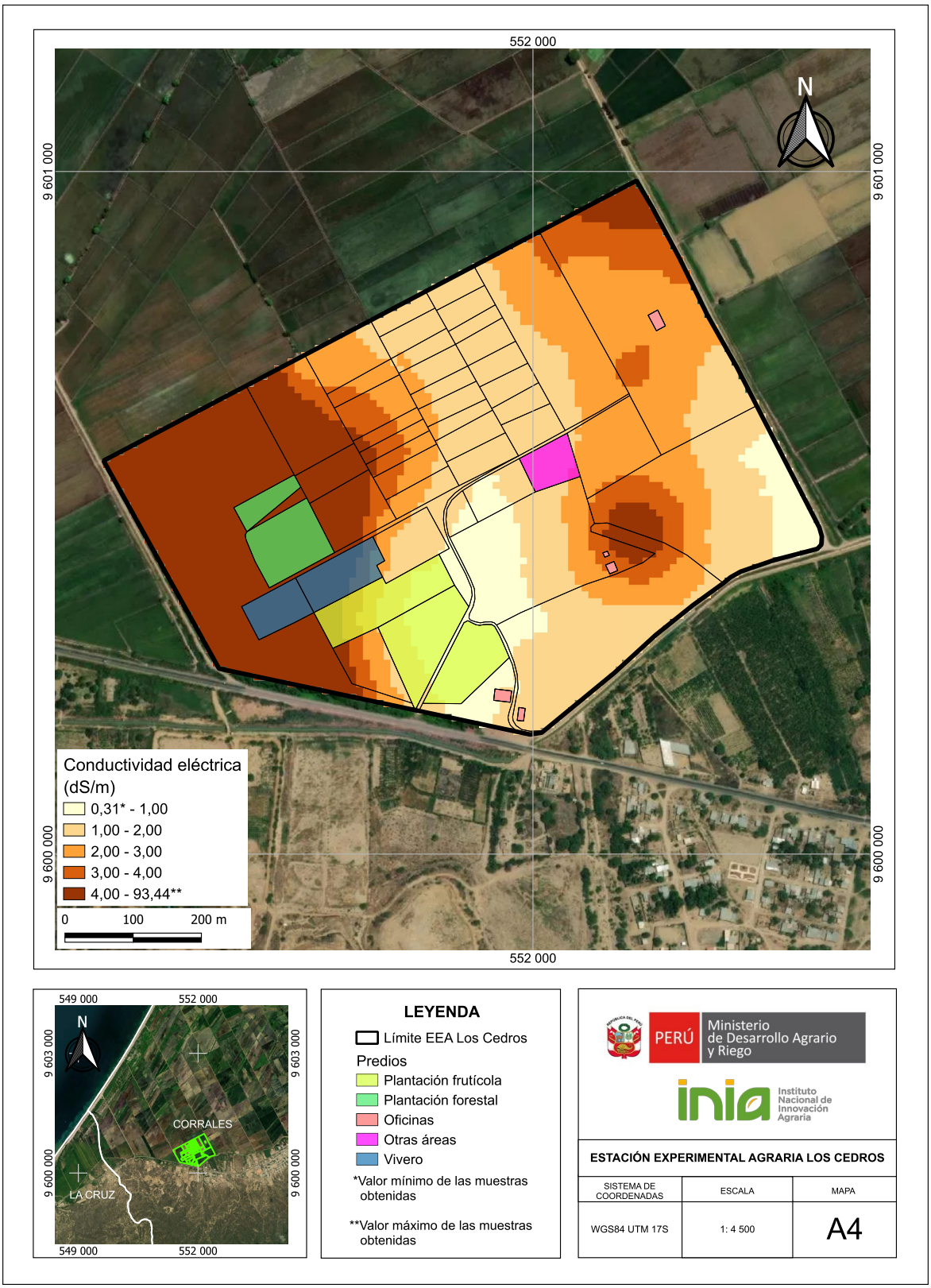


Figura 12. Mapa de variación espacial de la conductividad eléctrica

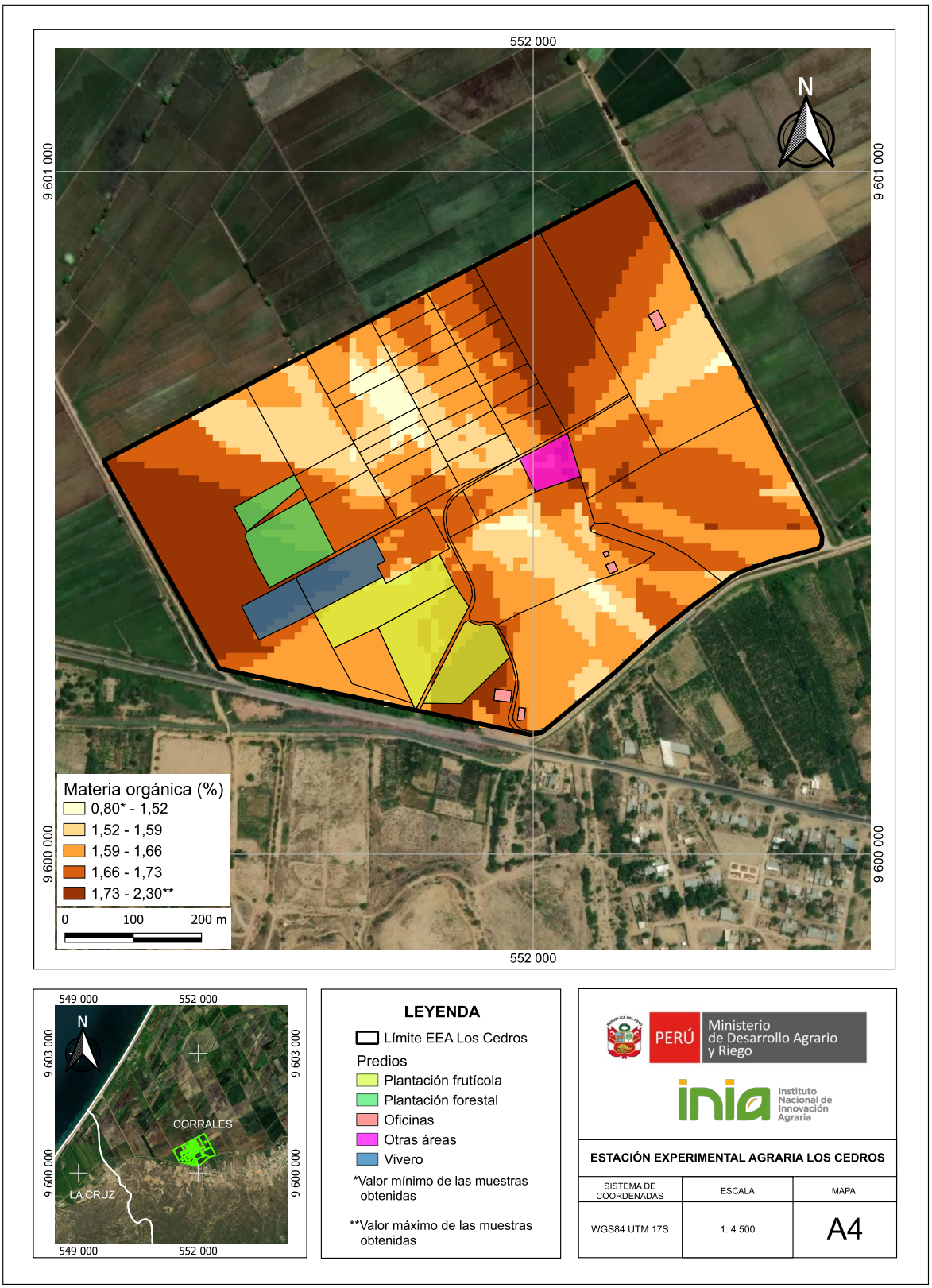


Figura 13. Mapa de variación espacial del porcentaje de materia orgánica

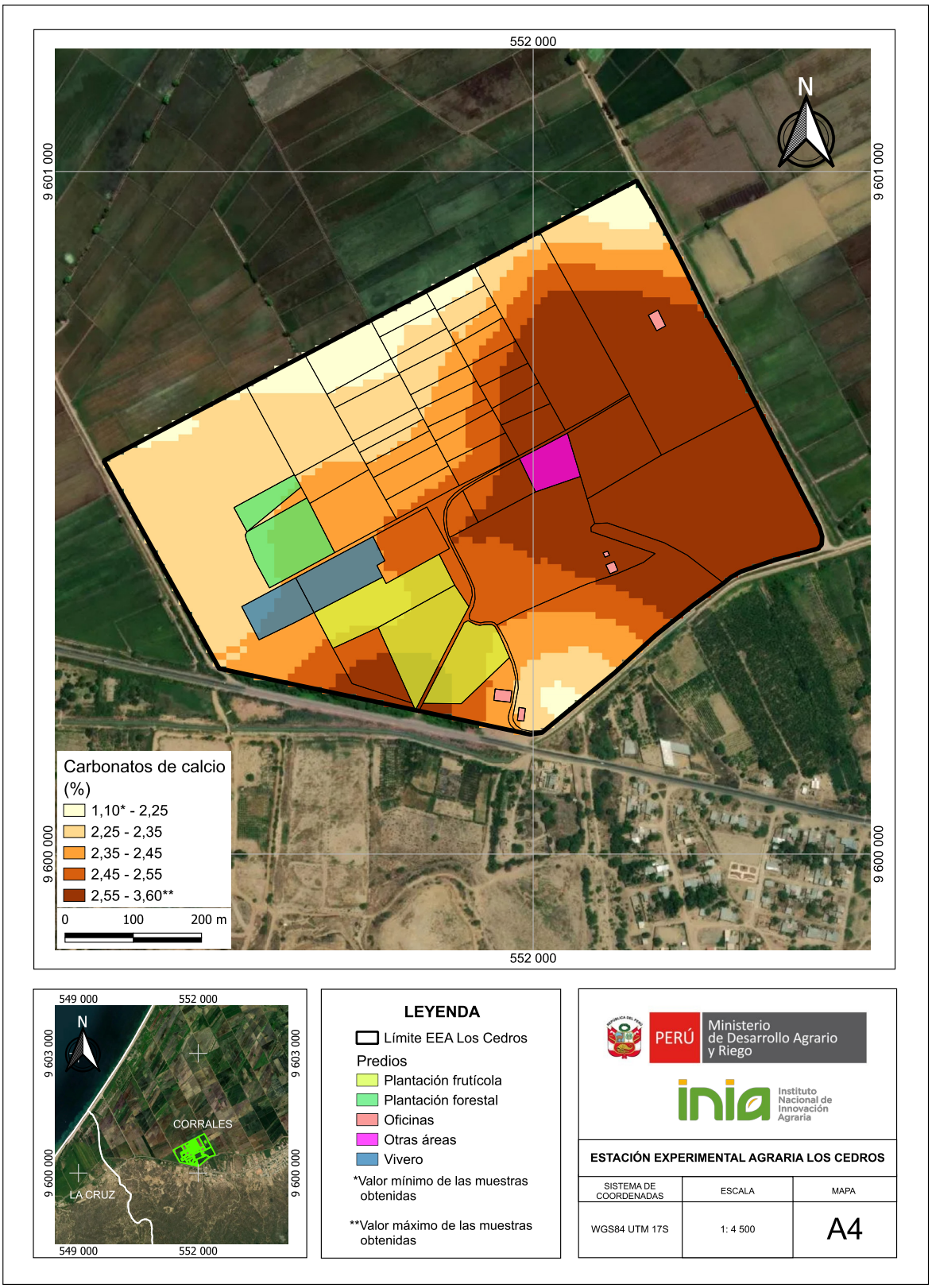


Figura 14. Mapa de variación espacial del porcentaje de carbonato de calcio

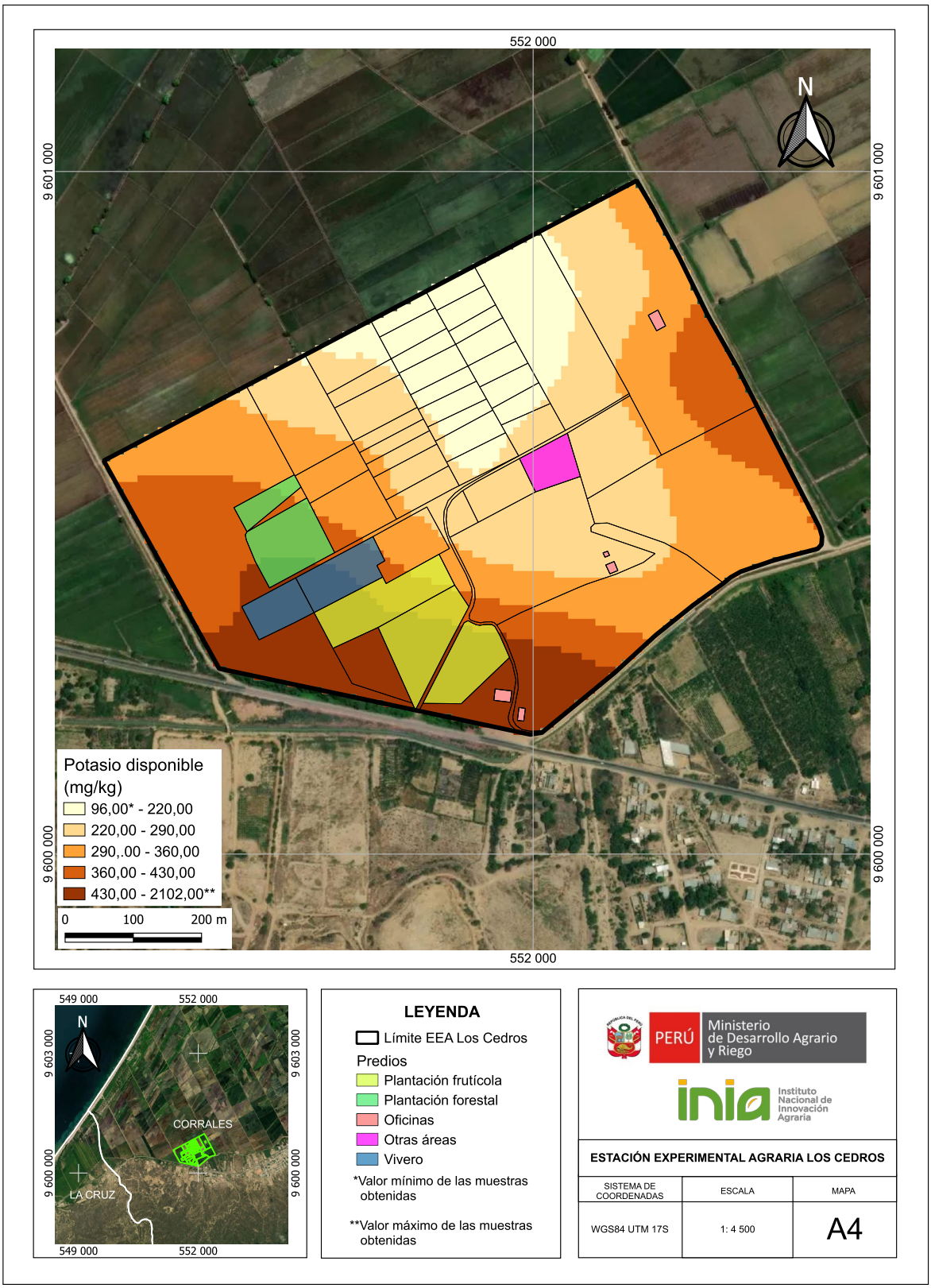


Figura 15. Mapa de variación espacial del potasio disponible

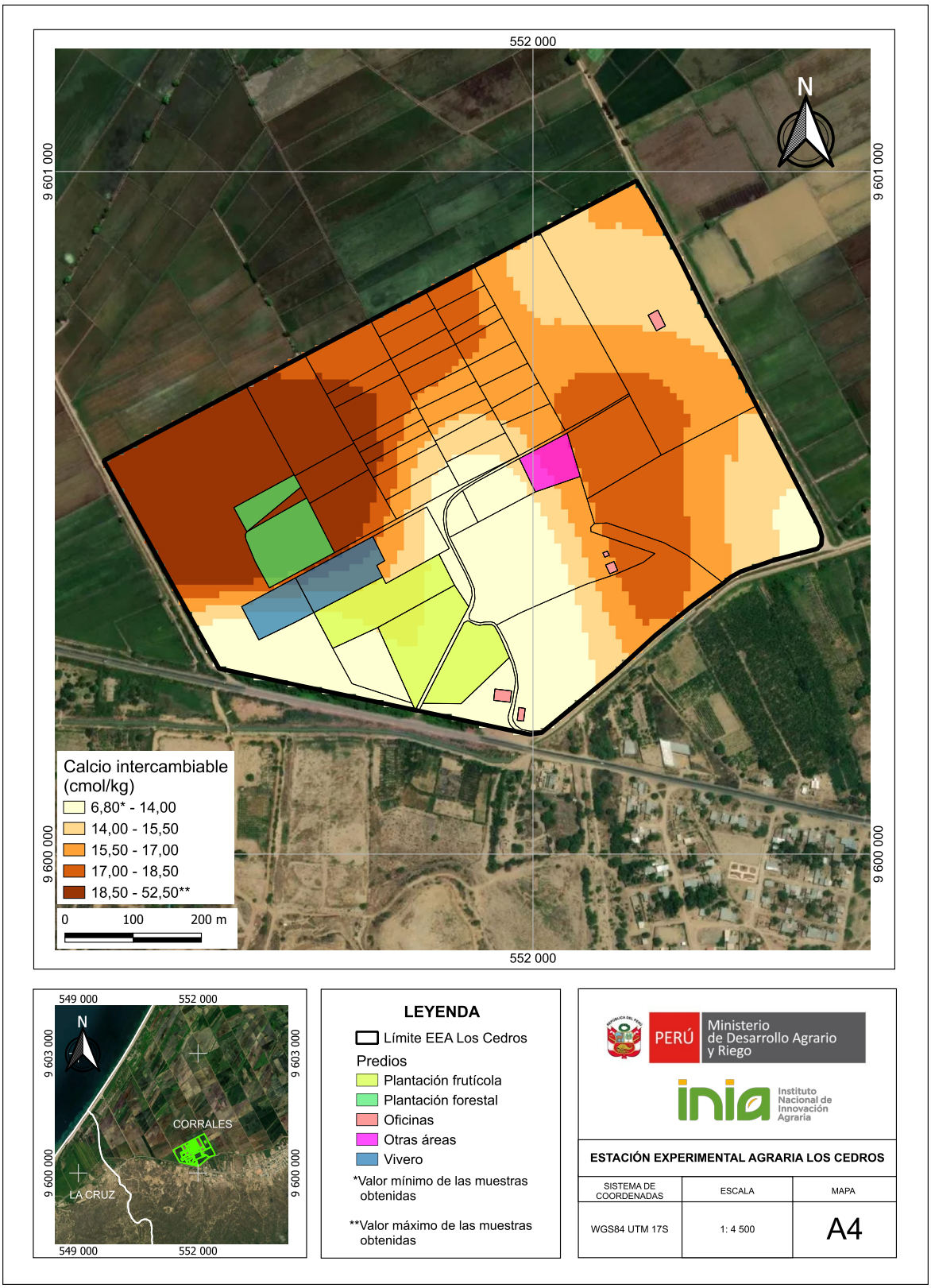


Figura 16. Mapa de variación espacial del calcio intercambiable

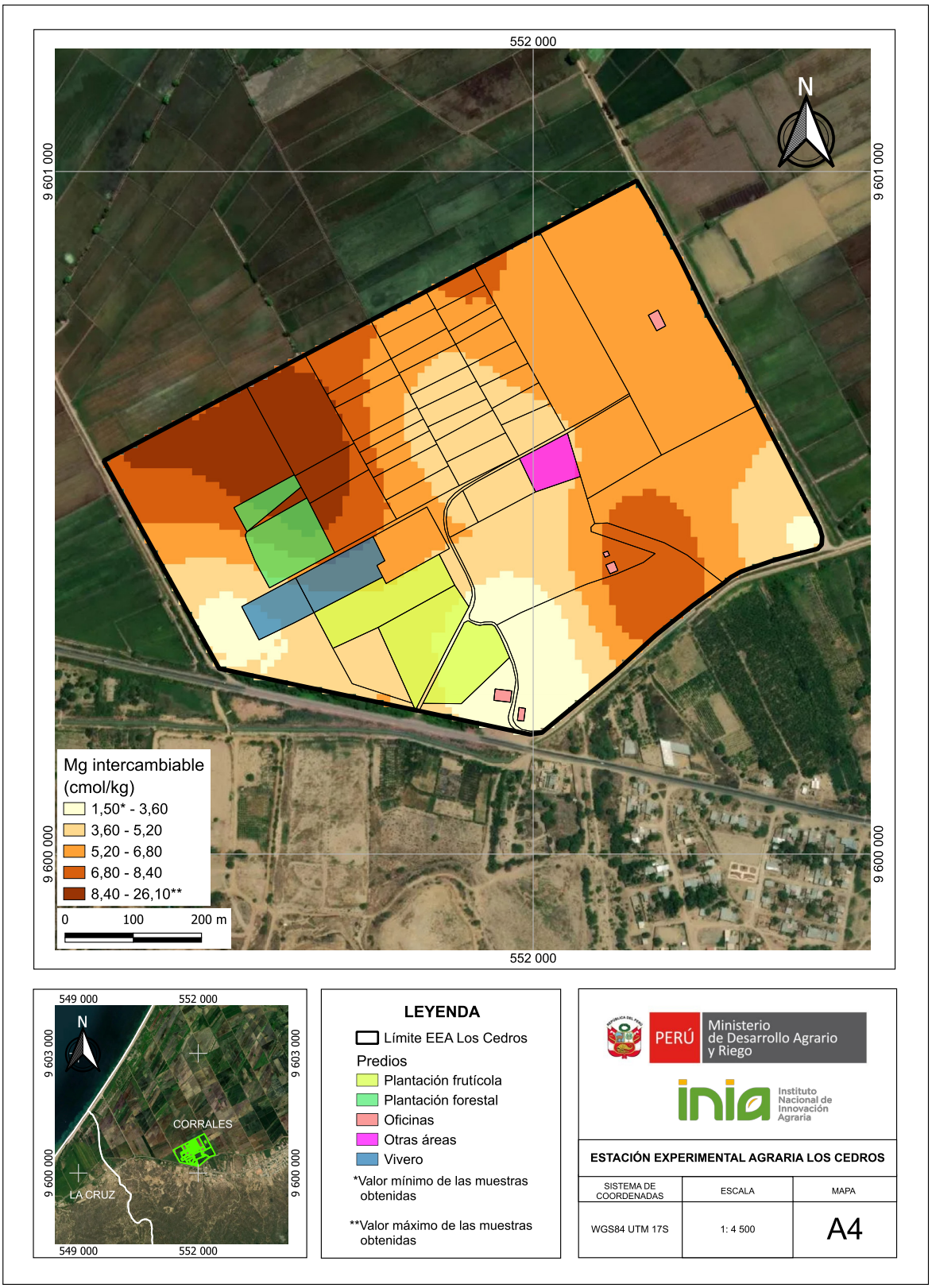


Figura 17. Mapa de variación espacial del magnesio intercambiable

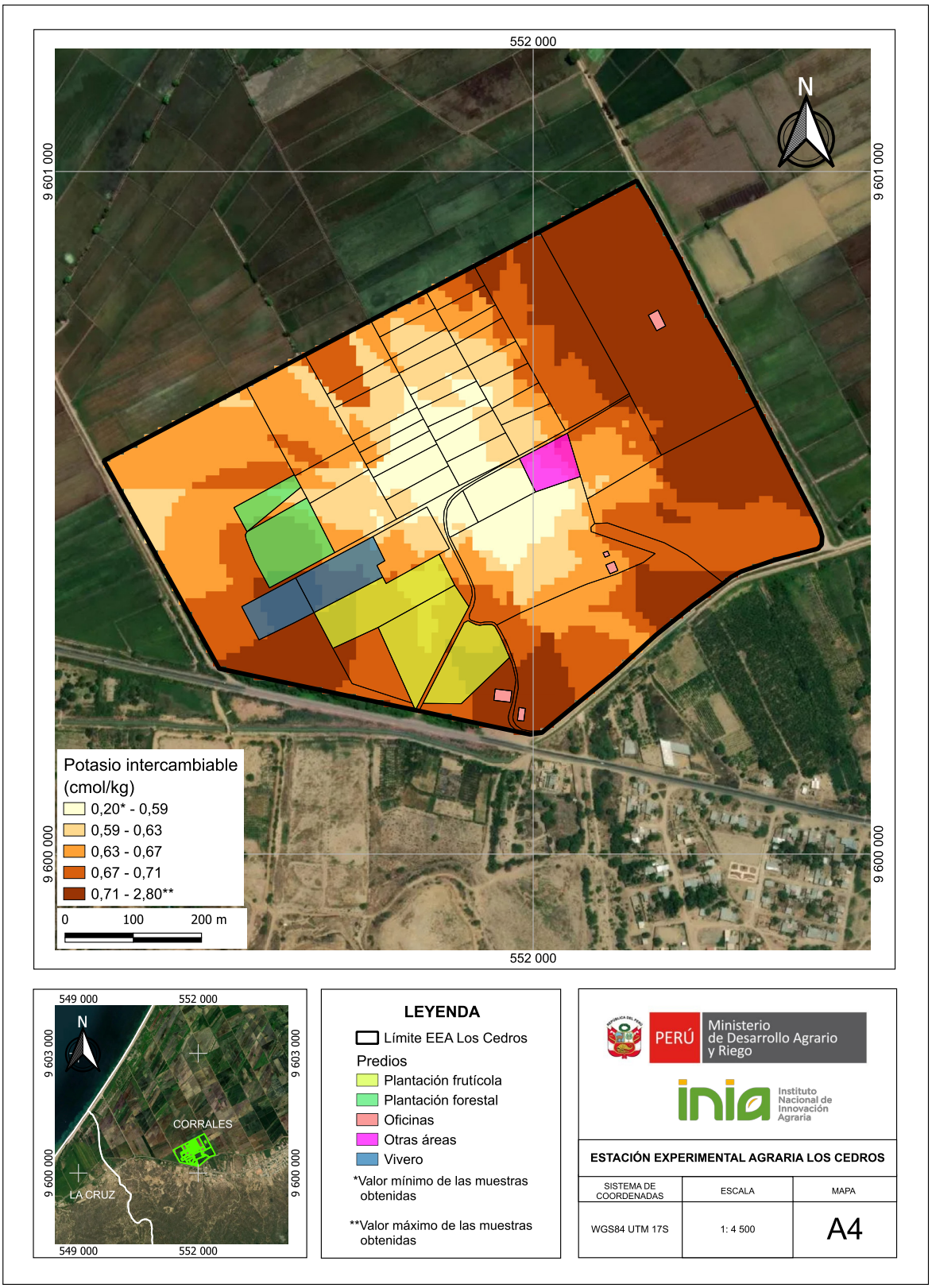


Figura 18. Mapa de variación espacial del potasio intercambiable

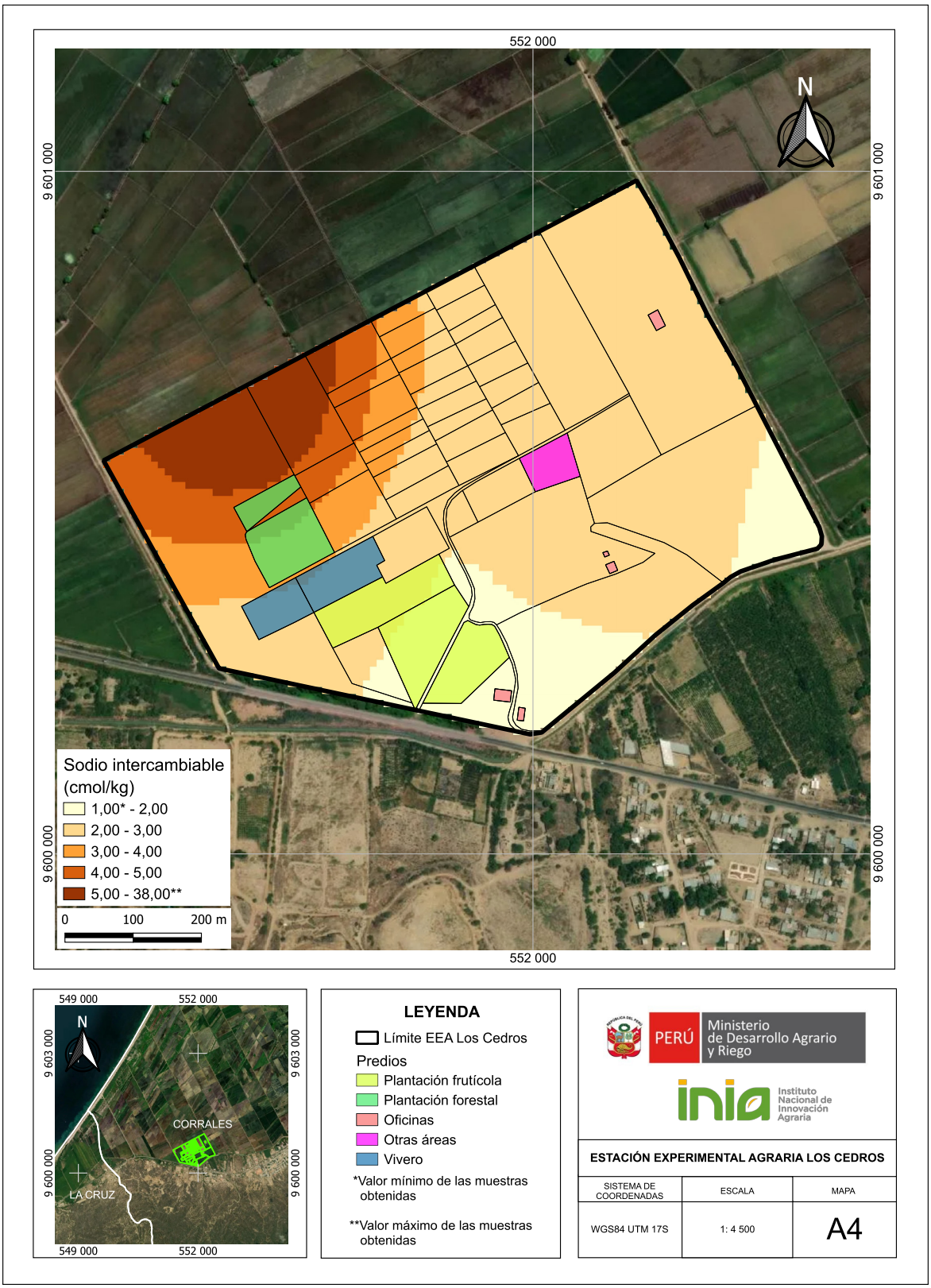


Figura 19. Mapa de variación espacial del sodio intercambiable

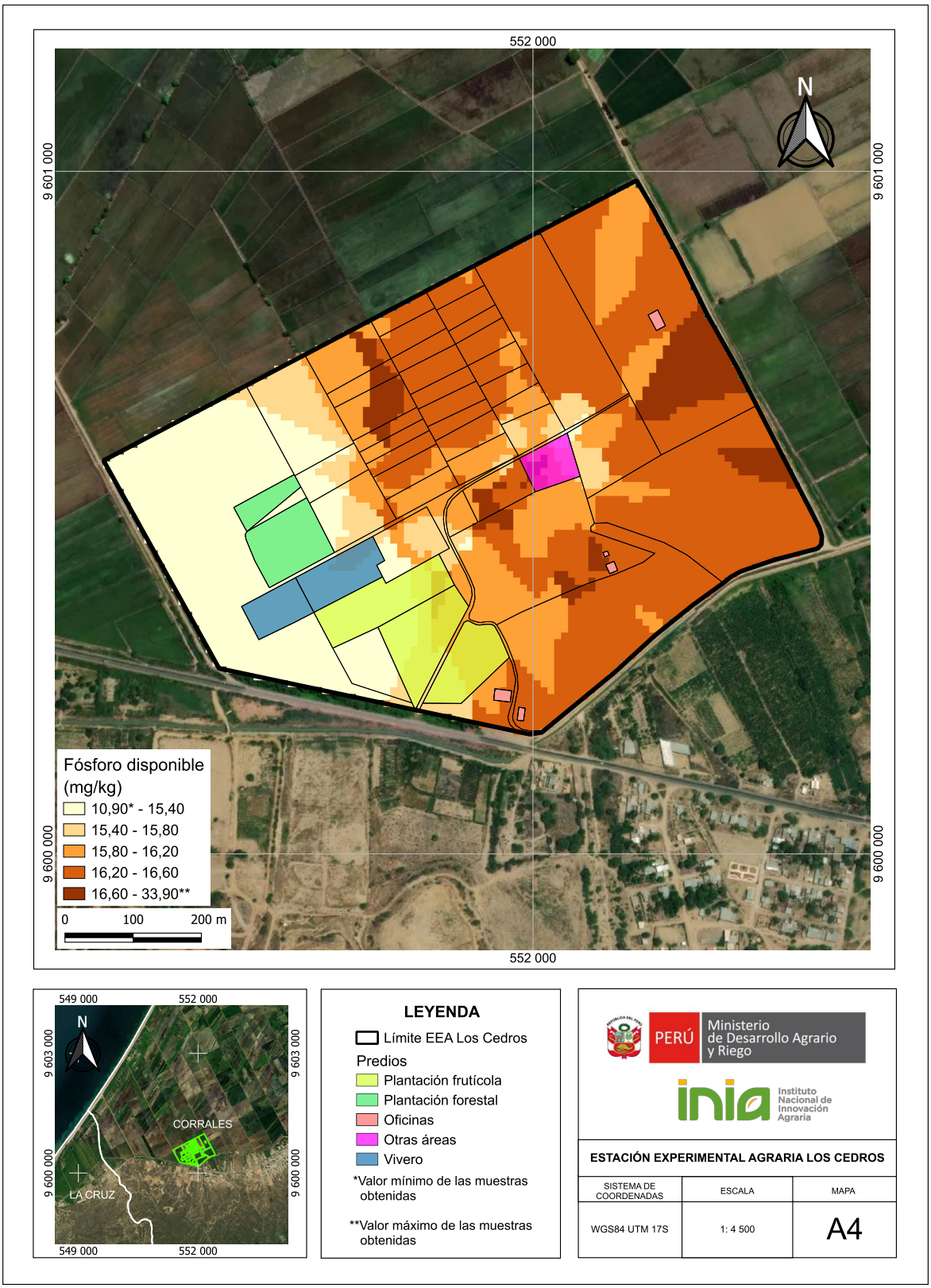


Figura 20. Mapa de variación espacial del fósforo disponible

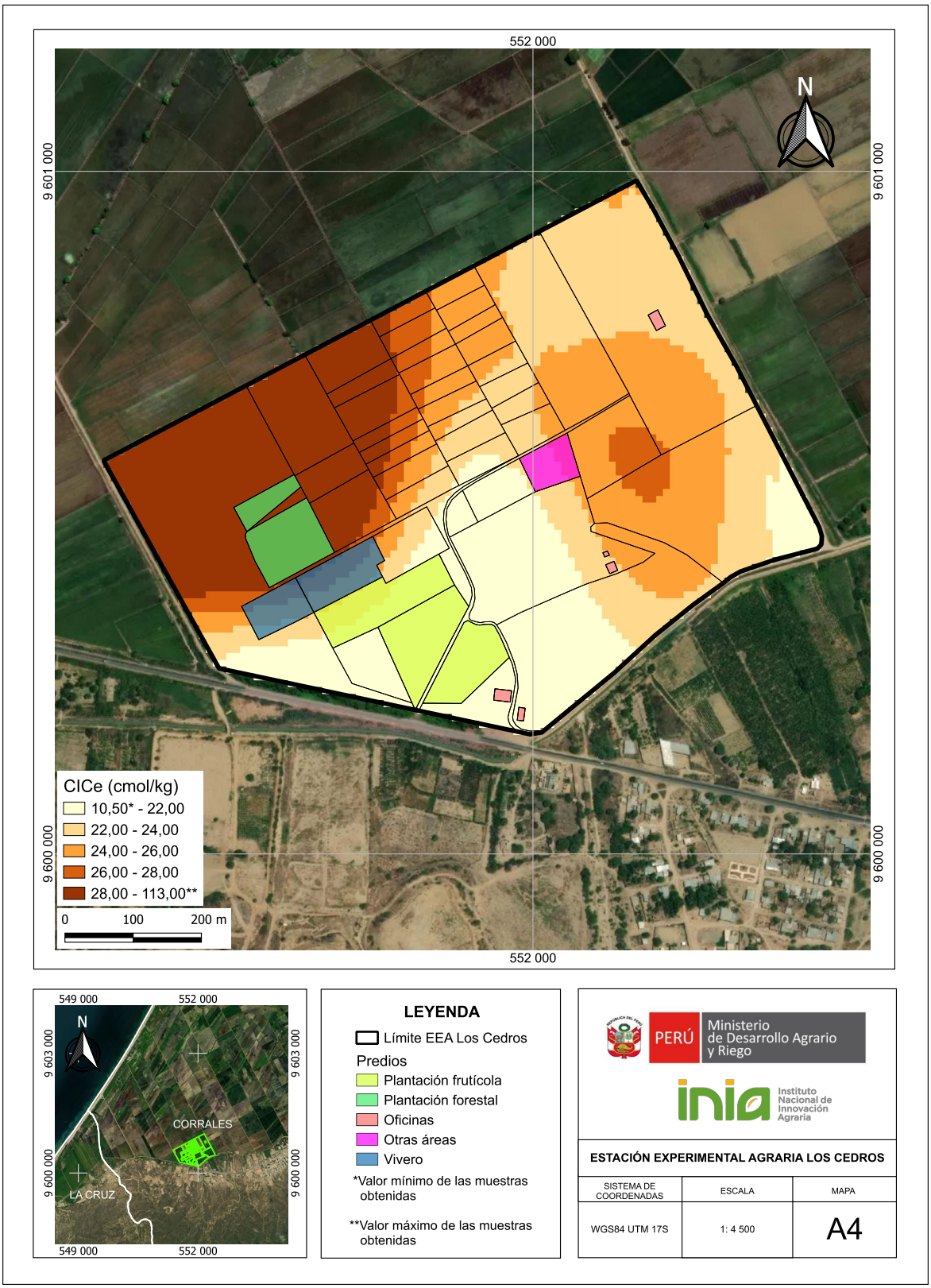


Figura 21. Mapa de variación espacial de la capacidad de intercambio catiónico efectiva

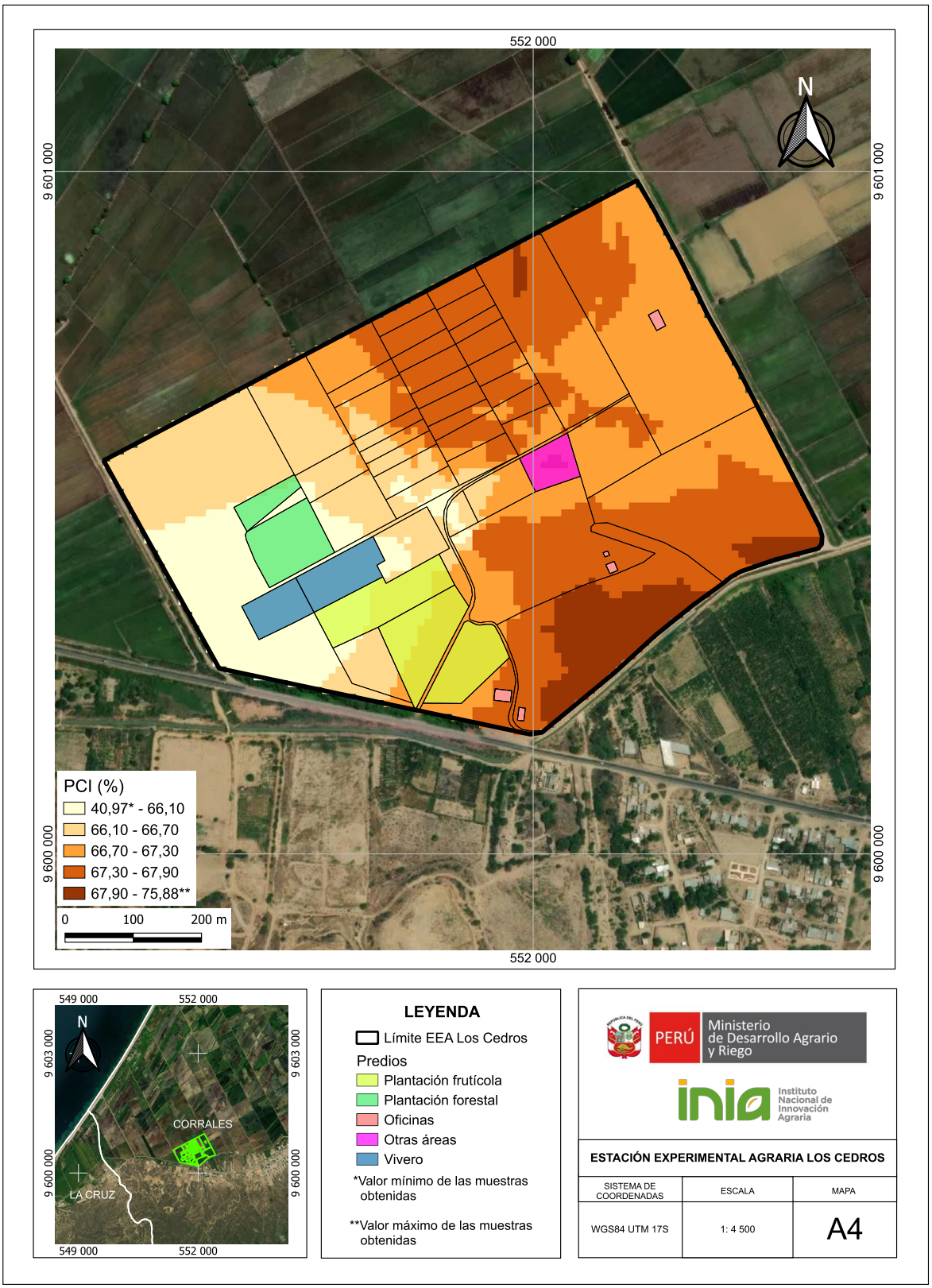


Figura 22. Mapa de variación espacial del porcentaje de calcio intercambiable

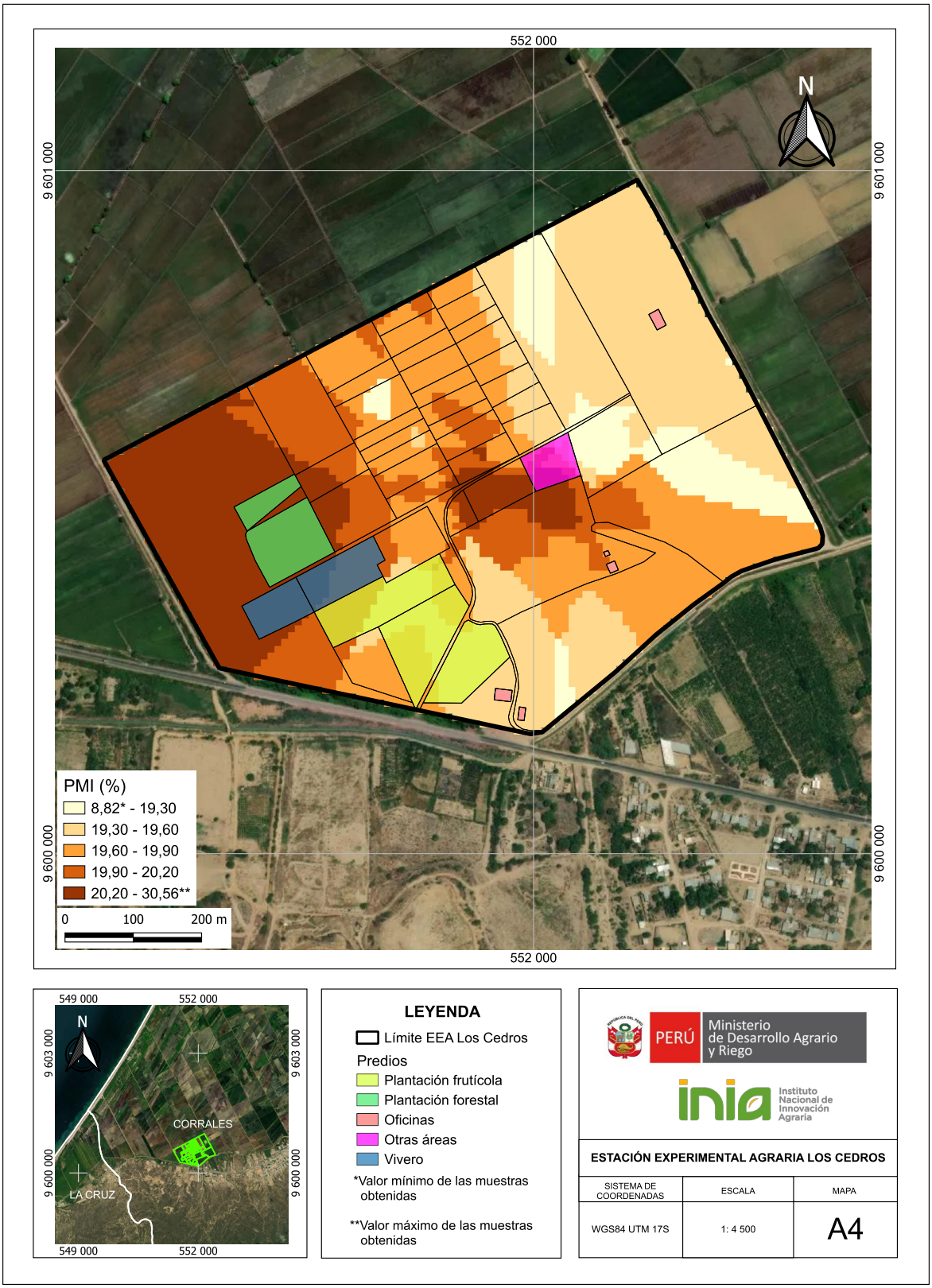


Figura 23. Mapa de variación espacial del porcentaje de magnesio intercambiable

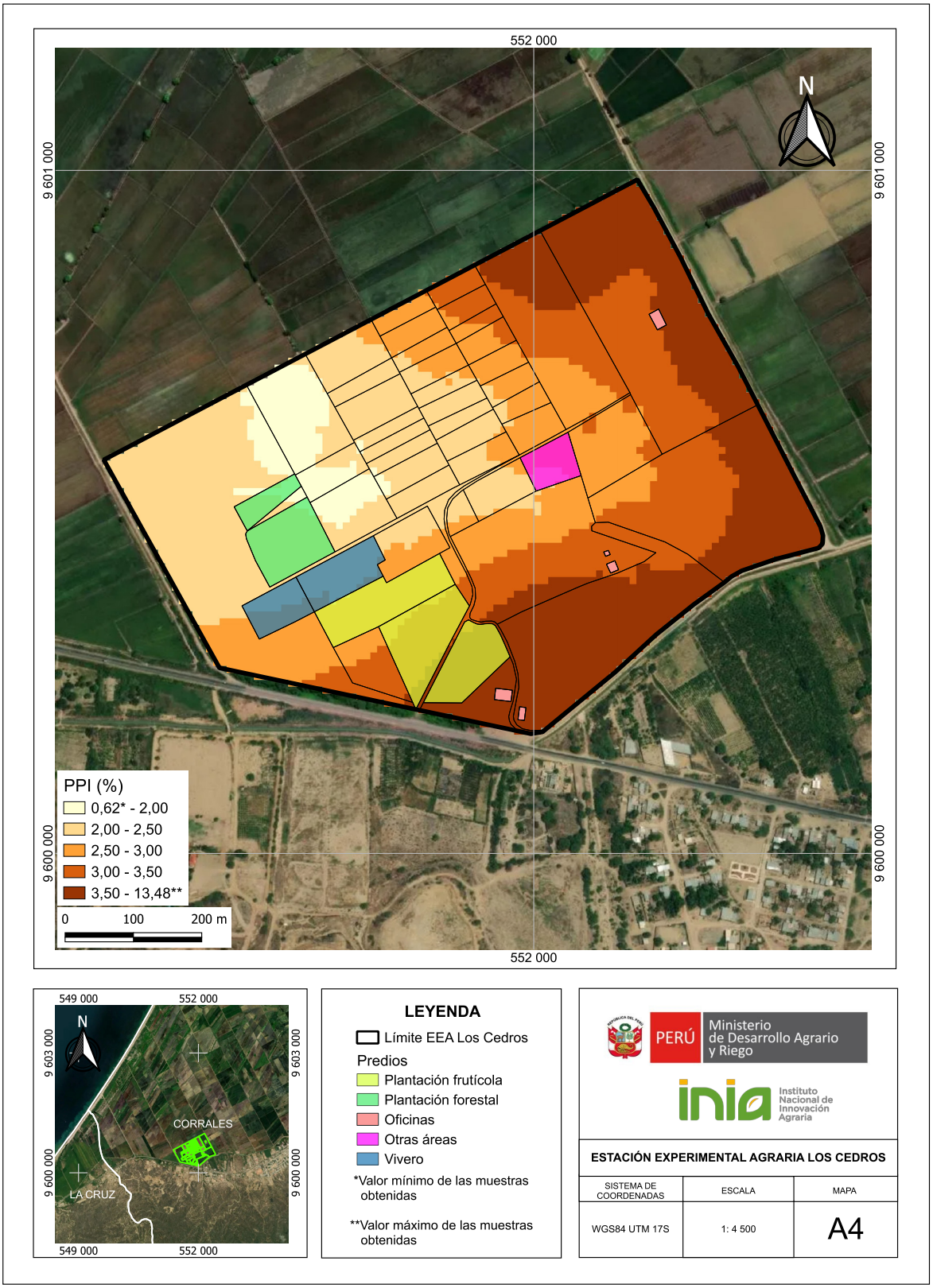


Figura 24. Mapa de variación espacial del porcentaje de potasio intercambiable





4. Recomendaciones de manejo de la fertilidad del suelo en la EEA Los Cedros

4.1. Índice de saturación de bases catiónicas

Desde la perspectiva edafológica del modelo BCSR, el equilibrio relativo entre cationes básicos en el complejo de cambio (Ca^{2+}, Mg^{2+}, K^{+}, Na^{+}) es un determinante clave para la nutrición vegetal y la fertilidad química del suelo. La presencia de Ca^{2+} y Mg^{2+} en el suelo es esencial para la agregación de partículas. En particular, el calcio cumple un papel fundamental al contrarrestar los efectos negativos del sodio, reemplazándolo en los sitios de intercambio catiónico.

El porcentaje promedio de calcio intercambiable (66,01 ± 7,13 %) y de magnesio intercambiable (19,47 ± 3,88 %) se encuentran en rangos óptimos, favoreciendo la estabilidad estructural y la actividad biológica del suelo. No obstante, la baja predictibilidad espacial de las variables Ca^{2+} y Mg^{2+} intercambiables (R^2 = 0,046 y 0,184, respectivamente) limita la identificación de zonas de manejo con potencial preocupación agronómica, donde el Mg^{2+} alcanza valores de hasta 26,10 cmol kg^{-1} y el Ca^{2+} hasta 52,50 cmol kg^{-1}, los cuales pueden provocar desbalance iónico y niveles deficientes de potasio intercambiable.

4.1.1. Niveles deficientes de saturación de potasio intercambiable

El potasio es un nutriente esencial para las plantas, dado que participa en la fotosíntesis, el crecimiento de las raíces, la resistencia al estrés y el transporte de agua. En los suelos de la EEA Los Cedros se obtuvo en promedio un porcentaje de potasio intercambiable (3,35 ± 2,59 %; CV = 77,39 %) dentro del rango óptimo; sin embargo, también se identificaron zonas con niveles deficientes. Esta variabilidad podría estar asociada a la competencia entre el sodio y el potasio en el complejo de intercambio catiónico del suelo. En este contexto, niveles bajos de K^{+} pueden limitar el crecimiento y desarrollo de las plantas, generando deficiencias visibles y una disminución en la productividad.

El potasio es un elemento esencial para las plantas, debido a sus múltiples funciones fisiológicas y bioquímicas, así como a su presencia en los tejidos vegetales (Mengel y Kirkby, 2000). Este nutriente influye en la arquitectura radicular del cultivo de arroz, especialmente bajo condiciones de estrés hídrico, donde una adecuada morfología de la raíz favorece la absorción de agua y nutrientes, mejorando la eficiencia del cultivo (Marschner, 1995). Asimismo, la disponibilidad y movilidad del potasio en la rizosfera están estrechamente relacionadas con la longitud radicular del arroz (Jia et al., 2008). De igual manera, se ha reportado que la aplicación de potasio al suelo incrementa el rendimiento del cultivo; sin embargo, su absorción depende de niveles adecuados y del equilibrio nutricional en el suelo (Singh et al., 2003).

El cultivo de banano presenta altos requerimientos de potasio; diversos estudios han demostrado que este elemento contribuye al incremento del tamaño de los racimos, al aumento del contenido de azúcares y a una mayor resistencia a enfermedades (Kumar et al., 2006). Por otro lado, en suelos salino-sódicos, caracterizados generalmente por un pH elevado y una estructura degradada, se ve afectada la penetración radicular, lo que limita el crecimiento del cultivo y reduce su capacidad para absorber agua y nutrientes.

Dada la alta variabilidad espacial del porcentaje de potasio intercambiable en la EEA Los Cedros, la estrategia de manejo debe enfocarse en ajustar dosis, fuente y forma de aplicación de fertilizantes potásicos según zonas de manejo identificadas.

4.1.2. Variación espacial de los desbalances iónicos con niveles elevados de Na^+

El sodio intercambiable tiene un promedio de 3,76 cmol kg^{-1}, relativamente bajo en comparación con otros cationes, aunque presenta una gran dispersión (SD = 6,14; CV = 163,53 %), con valores que van desde 1 hasta 38 cmol kg^{-1}. Además, la conductividad eléctrica (CE) varía entre 0,31 y 93,44 dS m^{-1}, lo cual indica que el área presenta zonas salinas y salino-sódicas, con una heterogeneidad considerable en la disponibilidad de sodio en el suelo. El porcentaje de sodio intercambiable (Figura 25) presentó un bajo grado de ajuste (R^2 = 0,280) entre los valores observados y los predichos, se dividió el área en cinco zonas: La zona 1 (4,72-9,90 %), la zona 2 (9,90-10,30 %), la zona 3 (10,30-10,70 %), la zona 4 (10,70-11,10 %) y la zona 5 (11,10-33,63 %).

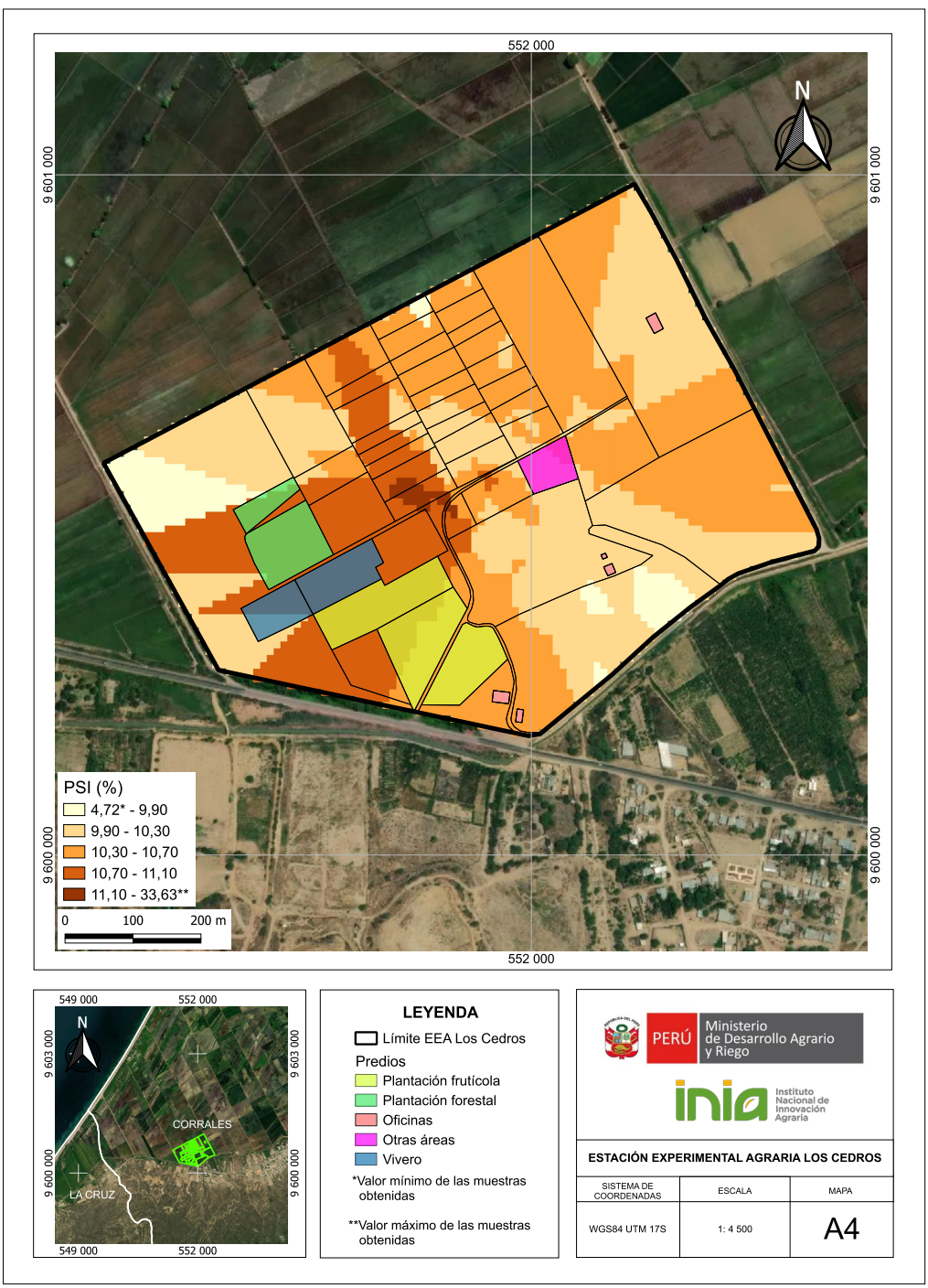


Figura 25. Mapa de variación espacial del porcentaje de sodio intercambiable

El PSI es alto (promedio: 11,17 %) y es heterogéneo en el área de estudio, con un mínimo de 4,72 % y un máximo de 33,63 %, lo cual afecta negativamente al suelo reduciendo la agregación de partículas, favoreciendo una estructura débil que disminuye la porosidad y la infiltración del agua. Un alto PSI sugiere que el sodio tiene un impacto negativo no solo en la estructura, sino también en el rendimiento de los cultivos, dado que la alta concentración de sodio interfiere con la absorción de nutrientes esenciales, como el potasio.

Con el fin de mitigar los efectos de salinidad y sodicidad identificados en los suelos de la EEA Los Cedros, se propone la aplicación de enmiendas químicas como el yeso agrícola ($CaSO_4 + 2H_2O$), el cual es una de las más utilizadas por ser efectivo para reducir la sodicidad por su capacidad de aportar calcio soluble y favorecer el desplazamiento de sodio de los complejos de intercambio. A continuación, se presenta un ejemplo de dosis de yeso agrícola para la zona 5 con muy alto peligro de sodicidad. Para el cálculo se utilizará la Fórmula 15, propuesta por Oster et al. (1999).

$$GR = 0.00086 \times BD \times D \times CECe \times (PSI_i - PSI_f) \quad ...(15)$$

Donde:

GR: requerimiento de yeso agrícola (t ha^{-1}).
BD: densidad aparente del suelo (g cm^{-3}).
D: profundidad del suelo (cm).
CECe: capacidad de intercambio catiónico efectiva (cmol kg^{-1}), obtenido de la suma de las bases cambiables.
PSI_i: porcentaje de sodio intercambiable actual del suelo (%).
PSI_f: valor que se desea alcanzar (5 %) con la aplicación de yeso agrícola.
De esta manera, para la zona más crítica el requerimiento de yeso sería 7,18 t ha^{-1}:

$GR = 0,00086 \times 1,6 \times 30 \times 28,21 \times (11,17 - 5) = 7,18$ t/ha

4.2. Niveles de suficiencia de nutrientes disponibles

4.2.1. Cálculo del requerimiento de fósforo en arroz bajo criterio de suficiencia

Los indicadores geoestadísticos del fósforo disponible muestran una distribución espacial aleatoria, con baja continuidad espacial. El *nugget* (C_0) fue de 0,0004 y el *sill* ($C_0 + C$) de 16,106 señalando que el 84,4 % de la varianza total no es explicada por la distancia entre muestras. Esto puede deberse a la baja movilidad característica del fosforo, a la fijación química en suelos de pH alto y a la respuesta local a la fertilización.

El rango de autocorrelación espacial es muy bajo (*range* = 0,002 m), esto significa que la correlación espacial del fosforo disponible desaparece después de 2 mm de distancia. Esta débil estructura espacial limita la confiabilidad de interpolaciones como *kriging* ordinario para generar mapas precisos de disponibilidad de fósforo. En consecuencia, la fertilización fosforada debe ser diseñada con base en análisis de suelo sitio-específicos, preferentemente a escala de lote o sublote, evitando extrapolaciones espaciales imprecisas.

Para los cálculos de fertilización fosforada en el cultivo de arroz, se adoptará como referencia un nivel crítico de 11 mg kg^{-1} y un rendimiento potencial de 10 t ha^{-1}.

El nivel mínimo de fósforo en los suelos analizados es 10,90 mg kg^{-1}, el cual usaremos para el cálculo de requerimiento. En este sentido, el plan de fertilización se formulará considerando el criterio de suficiencia, con el objetivo de reponer el fósforo extraído por el cultivo. El cálculo se realiza de la siguiente manera:

Primer paso: calcular el rendimiento alcanzado con 10,90 mg de P-Olsen por kg de suelo, considerando que con este nivel de fósforo se alcanza un rendimiento relativo de 100 %.

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

Segundo paso: hallar el incremento de raíces y brotes utilizando la Fórmula 3. Para este cálculo y con fines prácticos se considera que este incremento es el 50 % del rendimiento alcanzado.

$$\text{Incremento de raíces y brotes} = 0{,}5 \times 10 \text{ t ha}^{-1} = 5 \text{ t ha}^{-1}$$

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

$$\text{Rendimiento objetivo} = 5 \text{ t ha}^{-1} + 10 \text{ t ha}^{-1} = 15 \text{ t ha}^{-1}$$

Cuarto paso: calcular el requerimiento de P utilizando la Fórmula 5. Para este cálculo y con fines prácticos se considera una extracción de 3 kg de fósforo por tonelada de producción.

$$\text{Requerimiento de P} = 3 \text{ kg de P t}^{-1} \times 15 \text{ t ha}^{-1} = 45 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

A partir de estos resultados, se interpreta que el criterio de suficiencia estima un requerimiento de 45 kg de P ha^{-1} para alcanzar un rendimiento objetivo de 15 t ha^{-1}, el cual está conformado por 5 t ha^{-1} de raíces, tallos y hojas, y 10 t ha^{-1} de producción.

4.2.2. Cálculo de requerimiento de potasio en arroz bajo criterios de mantenimiento y construcción

Los indicadores geoestadísticos del K disponible del suelo muestran que no hay un buen grado de ajuste entre los valores observados y los valores predichos a nivel espacial (RMSE = 198,182 y R^2 = 0,130). La media fue de 410,43 mg kg^{-1}, lo que indica un nivel notablemente alto para la mayoría de los cultivos, con un rango que va de 96 a 2102 mg kg^{-1}.

En el potasio disponible, la varianza sigue aumentando linealmente con la distancia, sin alcanzar un *Sill* dentro del área muestreada, lo cual implica que presenta una tendencia regional más que local, cambiando a distancias muy largas. Esto se debe a que el potasio tiene una movilidad intermedia, se desplaza más que el fosforo, y puede acumularse en zonas bajas por sedimentación o escorrentía; además la fertilización potásica previa genera gradientes regionales. Estas características sugieren que algunas zonas con valores cercanos al mínimo podrían requerir suplementación potásica, especialmente si se destinan a cultivos con alta demanda de K. Para este caso, se tomará como ejemplo el valor mínimo de potasio disponible registrado (96 mg kg^{-1}) para hacer el cálculo de requerimiento de mantenimiento y construcción:

Para el arroz, el umbral crítico o nivel de suficiencia es de 156 mg de K 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 96 mg de K por kg de suelo permite obtener un rendimiento relativo (RR) del 40 %.

Primer paso: calcular el rendimiento con 96 mg de K por kg de suelo, utilizando la Fórmula 2:

$$\text{Rendimiento alcanzado} = \frac{40 \times 10 \text{ t ha}^{-1}}{100} = 4 \text{ t ha}^{-1}$$

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

$$\text{Incremento de raíces y brotes} = 0{,}35 \times 4 \text{ t ha}^{-1} = 1{,}4 \text{ t ha}^{-1}$$

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

$$\text{Rendimiento objetivo} = 1{,}4 \text{ t ha}^{-1} + 4 \text{ t ha}^{-1} = 5{,}4 \text{ t ha}^{-1}$$

Cuarto paso: calcular el requerimiento de K utilizando. Para este cálculo y con fines prácticos se considera una extracción de 8,5 kg de potasio por tonelada de producción.

$$\text{Requerimiento de K} = 8{,}5 \text{ kg de K t}^{-1} \times 4{,}59 \text{ t ha}^{-1} = 39{,}02 \text{ kg de K ha}^{-1}$$

Quinto paso: determinar el requerimiento de mantenimiento (RM). El RM integra el requerimiento de K, 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 K del 70 %.

$$\text{RM de K} = \frac{39{,}02 \text{ kg de K ha}^{-1}}{0{,}70} = 55{,}74 \text{ kg de K ha}^{-1}$$

Sexto paso: calcular el requerimiento de construcción anual (RC). Para este cálculo y con fines prácticos se considera que es necesario fertilizar con 4 kg de K por hectárea para incrementar 1 mg de K por kg del suelo, y que el incremento anual requerido (IAR) en este ejemplo es de 10 mg de K por kg de suelo.

$$\text{RC} = 10 \text{ mg de K kg}^{-1} \times \frac{4 \text{ kg de K ha}^{-1}}{1 \text{ mg de K kg}^{-1}} = 40 \text{ kg de K ha}^{-1}$$

Entonces, el plan de fertilización para el primer año se estima mediante el siguiente cálculo:

$$\text{Dosis de fertilización de K} = 55{,}74 \text{ kg de K ha}^{-1} + 40 \text{ kg de K ha}^{-1} = 95{,}74 \text{ kg de K ha}^{-1}$$

De esta manera, la dosis de fertilización anual sería de 191,48 kg ha^{-1} de cloruro de potasio, el cual tiene una riqueza de 60 % de K_2O. Con esta dosis de fertilización se abastece el requerimiento y construcción de potasio en el suelo para sostener el rendimiento a largo plazo del cultivo de arroz.

4.3. El pH del suelo

Según los resultados del estudio geoestadístico, el pH posee una disminución gradual de la correlación espacial con la distancia, de modo que las muestras ubicadas a corta distancia muestran valores muy similares (*Nugget* = 0,0003). El alcance (*Range* = 382,237 m) indica que esta variable mantiene coherencia espacial a escalas relativamente amplias, lo que permite plantear estrategias de manejo a nivel de lote o sublote.

El pH generalmente se encuentra en el rango neutro a ligeramente alcalino, común de suelos derivados de materiales calcáreos o con influencia de sedimentos marinos. Las zonas con pH mas elevado se asocian a la presencia de carbonatos e influencia de napas freáticas con sales.

En la Figura 26, se pueden observar las zonas con pH optimo (zona 2: 6,00-6,62 y zona 3: 6,62-7,25), donde se recomienda monitorear el pH anualmente, especialmente después de ciclos de fertilización nitrogenada o riegos. Asimismo, es importante mantener practicas de manejo de materia orgánica, que contribuyen a la estabilizar del pH del suelo.

En zonas con pH moderada a fuertemente alcalina (zona 4: 7,25-7,87 y zona 5: 7,87-8,30), se recomienda la aplicación de yeso agrícola, el cual no modifica directamente el pH, pero aporta calcio y azufre, mejorando la estructura del suelo sin incrementar su alcalinidad. Además, se sugiere el uso de fuentes de fósforo de liberación lenta, como el superfosfato simple o el fosfato monoamónico (MAP). En cultivos susceptibles, también es recomendable la aplicación de quelatos de micronutrientes como hierro, zinc y manganeso.

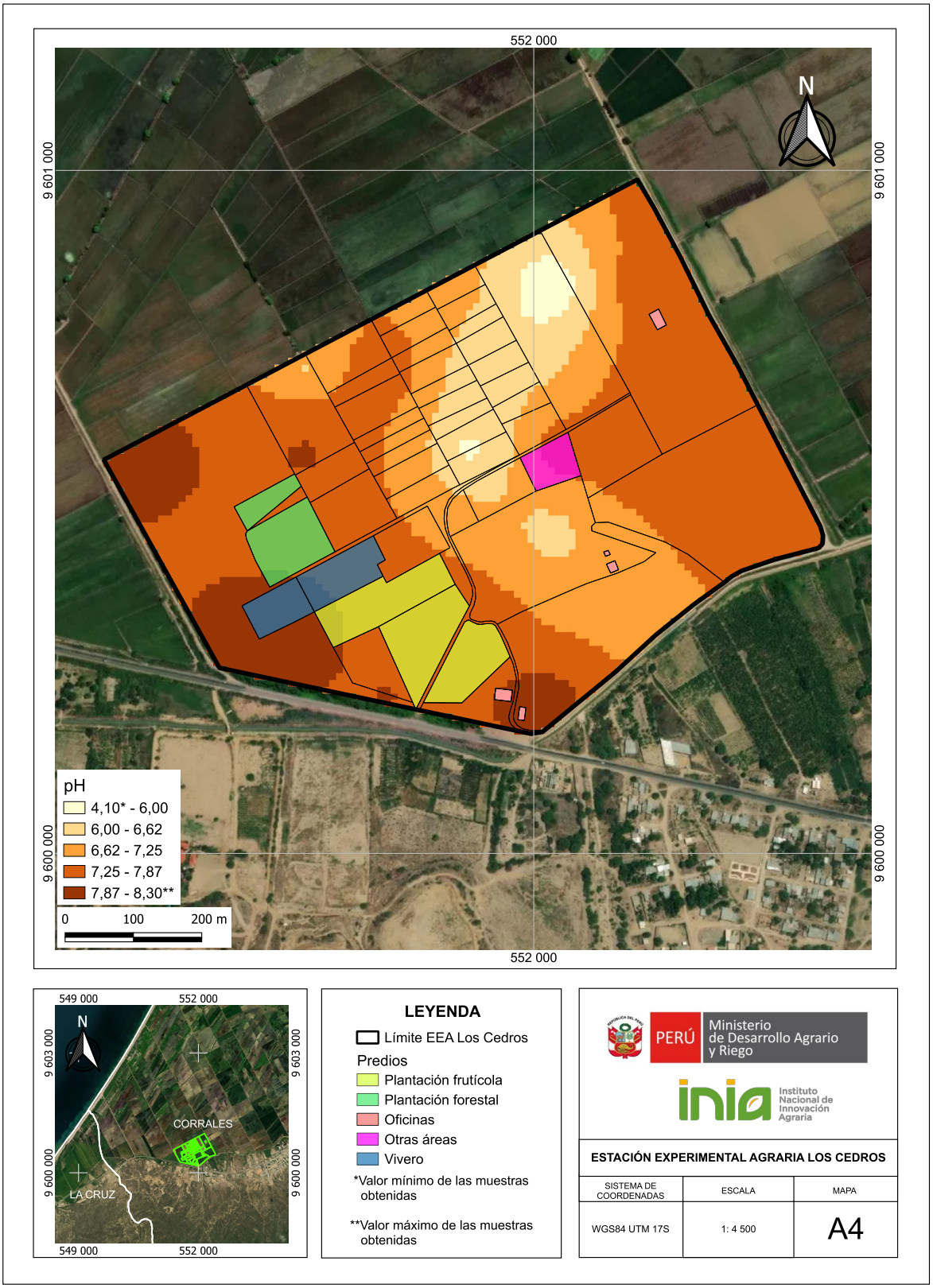


Figura 26. Mapa de variación espacial del pH



5. Referencias bibliográficas

Autoridad Nacional del Agua. (2013). *Anexo 10, Cambio Climático y Riesgos*. https://crhc.ana.gob.pe/tumbes/organizacion/riesgo-cambio-climatico

Alam, S. M., Naqvi, S. S. M., y Ansari, R. (1999). Impact of soil pH on nutrient uptake by crop plants. En M. Pessarakli (Ed.), *Handbook of Plant Nutrition* (pp. 51-60). Marcel Dekker, Inc.

Álvarez-Herrera, J. G., Ruiz-Berrío, H. D., y Acosta-Tova, D. F. (2021). Evaluación geoestadística de atributos hidrofísicos del suelo en la granja Tunguavita, Paipa, Colombia. *Ciencia e Ingeniería Neogranad*ina, *31*(1), 127-140. https://revistas.umng.edu.co/index.php/rcin/article/view/5396

Atkins, P. W., De Paula, J., y Keeler, J. (2023). *Atkins' physical chemistry*. Oxford University Press.

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*, 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 & Turfgrass Management, 3*(1), 1-7. https://doi.org/10.2134/cftm2016.10.0072

Chinea-Horta, A., y Rodríguez-Izquierdo, L. (2021). Comportamiento geoespacial de algunas propiedades del suelo en el cultivo de la caña de azúcar. *Ingeniería Agrícola*, *11*(1). https://www.redalyc.org/journal/5862/586269368001/html/

Cruz-Luis, J. A., Ortiz-Morera, N. C., Quispe-Torres, D. R., Atalaya-Lopez, J. S., Macavilca-Villar, P. M., Ramírez-Aparicio, J. A., Salinas-Rivera, J. L., Escobar- Cuadros, F., Carbajal-Llosa, C. M., Olivarez-Rivera, E. L., Casaretto-Castagnino, D., y Ganoza-Roncal, J. J. (2025). *Atlas de las Estaciones Experimentales Agrarias del INIA*. Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA). http://hdl.handle.net/20.500.12955/2763

Culman, S. W., Brock, C., Doohan, D., Jackson-Smith, D., Herms, C., Chaganti, V. N., 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/agj2.20995

DeLong, C., Cruse, R., y Wiener, J. (2015). The Soil Degradation Paradox: Compromising Our Resources When We Need Them the Most. *Sustainability, 7*(1), 866-879. https://doi.org/10.3390/su7010866

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* (1a 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. 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

Gómez-Velásquez, H. D. (2017). *Evaluación geológica de las zonas afectadas por El Niño Costero 2017 en la región Tumbes* (Informe Técnico N° A6764). INGEMMET. https://hdl.handle.net/20.500.12544/815

Graham, E. R. (1959). *An explanation of theory and methods of soil testing*. Bulletin 734. University of Missouri, Agricultural Experiment Station. https://mdh.contentdm.oclc.org/digital/collection/agexptstn/id/25261/

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://doi.org/10.4141/cjss58-014

Hartemink, A. E., y Barrow, N. J. (2023). Soil pH - nutrient relationships: the diagram. *Plant Soil 486*, 209-215. https://doi.org/10.1007/s11104-022-05861-z

Havlin, J. L., Tisdale, S. L., Nelson, W. L., y Beaton, J. D. (2016). *Soil fertility and fertilizers*. Pearson Education India

Instituto Nacional de Recursos Naturales. (1996). *Mapa de suelos del Perú*.

International Organization for Standardization. (1994). *Soil quality — Determination of specific electrical conductivity*.

International Organization for Standardization. (1995). *Soil quality — Determination of total nitrogen — Modified Kjeldahl method*. https://www.iso.org/standard/19239.html

Jia, Y., Yang, X., Ying, F. y Jilani, G. (2008). Differential response of root morphology to potassium deficient stress among rice genotypes varying in potassium efficiency. *Journal of Zhejiang University Science Botany, 9*(5), 427-434. https://doi.org/10.1631/jzus.B0710636

Karlen, D. L., y Rice, C. W. (2015). Soil Degradation: Will Humankind Ever Learn? *Sustainability, 7*(9), 12490-12501. https://doi.org/10.3390/su70912490

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

Kumar, A. R., Kumar, N., y Kavino, M. (2006). Role of Potassium in Fruit Crops - A Review. *Agricultural Reviews*, *27*, 284-291.

Loza, A. (2021). Multitemporal analysis of plant associations and land use changes in a high Andean locality, Puno-Peru. *Uniciencia, 35*, 1-19. https://doi.org/10.15359/ru.35-2.3

Marschner, H. (1995). *Mineral nutrition of higher plants* (2nd ed.). Academic Press.

Marino, M. A., y Echeverría, H. E. (2018). Umbral de requerimiento de fósforo en suelos Argiudoles y guía para la fertilización de alfalfa (*Medicago sativa* L.). *Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica, 31*, 7-18. https://fertilizar.org.ar/wp-content/uploads/2021/09/Art-2.pdf

McLean, E. O. (1977). Contrasting concepts in soil test interpretation: Sufficiency levels of available nutrients versus basic cation saturation ratios*. Soil testing: correlating and interpreting the analytical results, 29*, 39-54. https://doi.org/10.2134/asaspecpub29.c3

Mengel, K., y Kirkby, E. A. (2000). *Principios de Nutrición Vegetal* (4ta ed.). International Potash Institute.

Moral-García, F. J. (2004). Aplicación de la geoestadística en las ciencias ambientales. *Ecosistemas, 1*(11), 78-86. https://www.revistaecosistemas.net/index.php/ecosistemas/article/view/582}

Niebla-Torres, R. E., Barrezueta-Unda, S., Luna-Romero, Á., y Chabla-Carrillo, J. (2021). Aplicación de modelos geoestadísticos para definir la variabilidad de un perfil del suelo. *Revista Metropolitana de Ciencias Aplicadas, 4*(1), 188-195. https://doi.org/10.62452/zx01j782

Pebesma, E. J., y Bivand, R. S. (2005). Classes and methods for spatial data in R. *R News, 5*(2), 9-13. http://cran.r-project.org/doc/Rnews/

Pierre, W. H., y Banwart, W. L. (1973). Excess-Base and Excess-Base/Nitrogen Ratio of Various Crop Species and Parts of Plants. *Agronomy Journal, 65*(1), 91-96. https://doi.org/10.2134/agronj1973.00021962006500010028x

Quispe-Matos, K. R., Carbajal-Llosa, C. M., Mejia-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.

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

Singh, B.S., Singh, Y., Imas, P., y Jian-chang, X. (2003). Potassium Nutrition of the Rice– Wheat Cropping System. *Advances in Agronomy, 81*, 203-259. https://doi.org/10.1016/S0065-2113(03)81005-2

Wang, C., y Kuzyakov, Y. (2024). Soil organic matter priming: The pH effects. *Global Change Biology, 30*(6), 1-21. https://doi.org/10.1111/gcb.17349

Yang, M., Zhou, D., Hang, H., Chen, S., Liu, H., Su, J., y Zhao, G. (2024). Effects of balancing exchangeable cations Ca, Mg, and K on the growth of tomato seedlings (*Solanum lycopersicum* L.) based on increased soil cation exchange capacity. *Agronomy, 14*(3), 1-13. https://doi.org/10.3390/agronomy14030629

Zhang, G. Q. (1999). *Effects of exchangeable soil calcium, magnesium and calcium/magnesium ratios on plant nutrition and growth of lettuce on an ultisol* [Thesis submitted to obtain the degree of Master of Science in Agronomy and Soil Science]. University of Hawai'i at Manoa. https://scholarspace.manoa.hawaii.edu/items/8a99ab1e-dcd5-4822-9889-c99836d9526a

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



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

Pro Suelos y Aguas LABSAF

Ver nuestro alcance de acreditación

Ver nuestros servicios


Instituto
Nacional de
Innovación
Agraria





ISBN: 978-9972-44-270-4

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

PERÚ | Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego

inia Instituto Nacional de Innovación Agraria

@INIAPeru