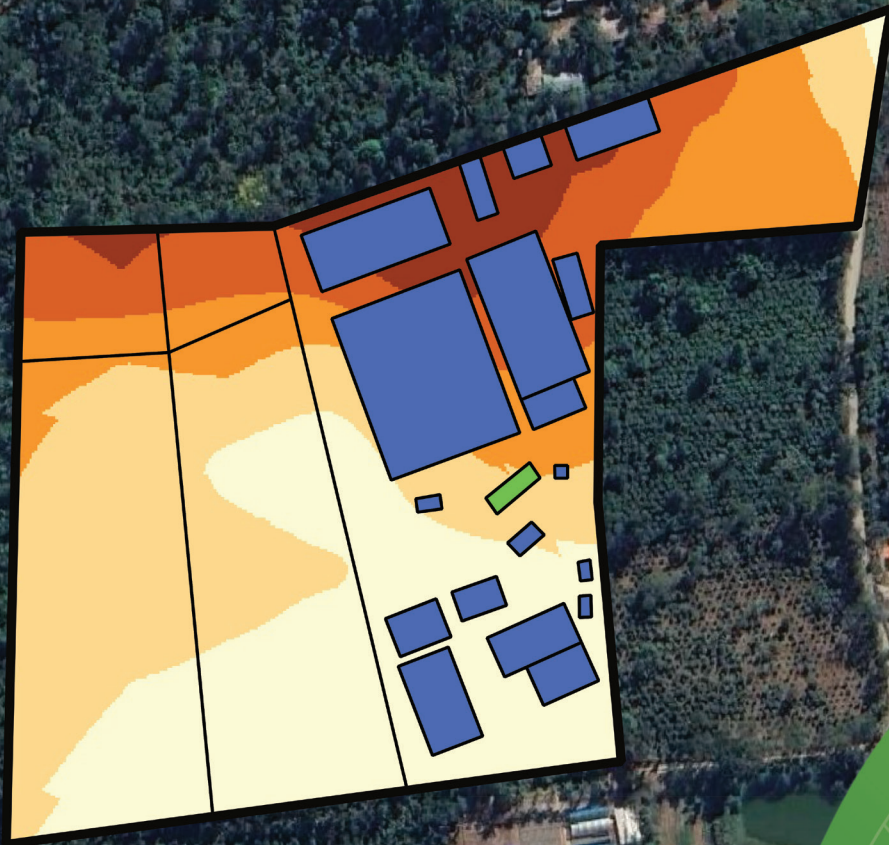


Variación espacial de la fertilidad del suelo en la EEA Perla del VRAEM



PERÚ

Ministerio
de Desarrollo Agrario
y Riego



Instituto
Nacional de
Innovación
Agraria

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

Variación espacial de la fertilidad del suelo en la EEA Perla del VRAEM



PERÚ

Ministerio
de Desarrollo Agrario
y Riego



Instituto
Nacional de
Innovación
Agraria

VARIACIÓN ESPACIAL DE LA FERTILIDAD DEL SUELO EN LA EEA PERLA DEL VRAEM

MINISTERIO DE DESARROLLO AGRARIO Y RIEGO

Ministro de Desarrollo Agrario y Riego

Marco Antonio Vinelli Ruiz

Viceministro de Políticas y Supervisión del Desarrollo Agrario

Manuel Felipe Layseca Ortigas

Viceministro de Desarrollo de Agricultura Familiar e Infraestructura Agraria y Riego

José Angello Tangherlini Casal

Presidente Ejecutivo del Instituto Nacional de Innovación Agraria

Christian Alfredo Barrantes Bravo, Dr.

© Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA)

Primera edición digital:

Septiembre, 2026

Publicado:

Septiembre, 2026

Disponible en:

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

ISBN:

978-9972-44-276-6

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° 2026-10847

Autores: Kenyi R. Quispe-Matos, Carlos M. Carbajal-Llosa, Sharon Y. Mejia-Maita, Ruth L. Mercado-Chinchay, Rodolfo J. Chuchon-Remon, Ruddy A. Ore-Valeriano, Ricky R. Reginaldo-Quispe, Rosa K. Arroyo-Isuiza, Joseph Campos-Ruiz, Jesús E. Vera-Vilchez, Vivian N. Carrasco-Mori, Yanet Mendez-Rojas, 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

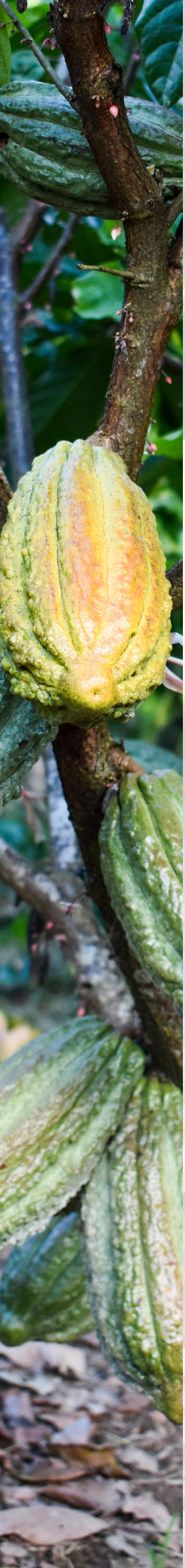


Tabla de contenido

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 de la EEA Perla del VRAEM	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 <i>kriging</i> y validación cruzada con indicadores geoestadísticos	33
3.7.1. Generación y ajuste del variograma	33
3.7.2. Interpolación <i>kriging</i>	33
3.7.3. Validación cruzada	34
3.8. Resultados del análisis geoestadístico de las propiedades 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 Perla del VRAEM	53
4.1. Niveles bajos de capacidad de intercambio catiónico efectiva y de materia orgánica	53
4.2. Niveles deficientes de bases catiónicas (Ca^{2+}, Mg^{2+} y K^{+})	53
4.3. Niveles de suficiencia de nutrientes disponibles	54
4.3.1. Cálculos del requerimiento de fertilización fosforada según el criterio de suficiencia para el cultivo de cacao	54
4.3.2. Cálculos del requerimiento de fertilización potásica según los criterios de mantenimiento y construcción para el cultivo de cacao	55
5. Referencias bibliográficas	59



Presentación

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

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

Mediante la aplicación de tecnologías geoespaciales de vanguardia, el proyecto ha abordado el estudio de la variabilidad espacial de la fertilidad edáfica en las diversas Estaciones Experimentales Agrarias que el INIA posee a nivel nacional. Entre estas, la Estación Experimental Agraria Perla del VRAEM, ubicada en la región Cusco, sobresale como un punto de referencia para la réplica de estas metodologías a escala regional, lo que permite generar insumos de información fundamentales para futuras investigaciones en el territorio.

En este contexto, el manual “Variación espacial de la fertilidad del suelo en la EEA Perla de VRAEM” presenta los resultados del muestreo, análisis e interpretación de la distribución espacial de las propiedades del suelo. Asimismo, describe de manera práctica la metodología de análisis geoespacial utilizada, la cual puede ser replicada en otros sistemas agrícolas. La información obtenida permite optimizar la toma de decisiones relacionadas con la fertilización y el manejo agronómico, promoviendo un uso más eficiente de los insumos agrícolas, la reducción de pérdidas de nutrientes y la sostenibilidad de la productividad dentro de la estación.

Dr. Christian Alfredo Barrantes Bravo
Presidente Ejecutivo
Instituto Nacional de Innovación Agraria



1. Introducción

La región del Cusco, ubicada entre las regiones andina y amazónica, presenta una gran diversidad de características fisiográficas, climáticas y de suelos que favorecen el desarrollo de distintos ecosistemas y una amplia variedad de cultivos. La agricultura es una de las principales actividades económicas de la región y aporta el 25,4 % al Producto Bruto Interno (PBI) regional. En la zona de ceja de selva o selva alta, que comprende principalmente las provincias de La Convención, Paucartambo, Calca y Urubamba, se cultivan productos como yuca, café destinado a la exportación y diversos frutales, entre ellos cítricos y plátano, los cuales abastecen tanto a los mercados regionales como a los extrarregionales (Gobierno Regional del Cusco, 2005).

Las zonas con aptitud agropecuaria de la región Cusco presentan diversas limitaciones edáficas, entre ellas la baja fertilidad natural ocasionada por procesos de erosión y por condiciones climáticas adversas, como las altas precipitaciones, las heladas y las sequías. Asimismo, el desarrollo de actividades productivas y extractivas que exceden la capacidad natural de uso de los suelos provoca la pérdida de cobertura vegetal, el incremento de la escorrentía y la erosión, lo que reduce la capacidad productiva de los suelos y ocasiona una disminución de la biodiversidad (Gobierno Regional del Cusco, 2005).

Con el propósito de prevenir el incremento de la degradación de los suelos en la región de Cusco, resulta indispensable conocer la variabilidad de sus propiedades físicas y químicas mediante herramientas que faciliten su evaluación y seguimiento. Tecnologías como el Sistema de Posicionamiento Global (GPS), la teledetección y los Sistemas de Información Geográfica (SIG) permiten recopilar información edáfica de forma eficiente, generando mapas de alta resolución que representan la variabilidad espacial de las propiedades del suelo. Asimismo, la integración de métodos de interpolación, como el *kriging*, con los SIG ha mejorado el monitoreo y la gestión de áreas agrícolas, al permitir identificar zonas con mayor grado de degradación, delimitar áreas de manejo homogéneo, optimizar la aplicación de fertilizantes y apoyar la planificación de estrategias de restauración ecológica en sectores prioritarios (Culman et al., 2021; Chinea-Horta y Rodríguez-Izquierdo, 2021).

El presente manual tiene como finalidad analizar la variabilidad espacial de la fertilidad del suelo en la EEA Perla del VRAEM mediante la evaluación de sus propiedades fisicoquímicas y la aplicación de herramientas de análisis espacial. A partir de la elaboración de mapas temáticos de fertilidad, se busca identificar áreas con características homogéneas que sirvan de base para una gestión más eficiente de la fertilización y del recurso suelo. Además, se describe una metodología sustentada en la modelación de semivariogramas y la interpolación mediante *kriging*, la cual puede adaptarse a otros sistemas agrícolas para optimizar el uso de insumos agrícolas, incrementar la productividad y fomentar el manejo sostenible del suelo.



2. Principios fundamentales del análisis de suelos

2.1. Sistemas de interpretación del análisis de suelos

La formulación de recomendaciones de fertilización a partir del análisis químico del suelo comprende una serie de etapas relacionadas entre sí. Entre ellas se encuentran la toma de muestras de suelo, los análisis de laboratorio, la evaluación e interpretación de los resultados obtenidos y, finalmente, la definición de las recomendaciones para el manejo nutricional del cultivo. Aunque los métodos empleados en cada etapa pueden influir en la recomendación final, las diferencias observadas entre laboratorios de una misma región suelen estar asociadas principalmente a los criterios y enfoques utilizados para interpretar los resultados analíticos (Quispe-Matos et al., 2025).

2.1.1. Índice de saturación de bases catiónicas

a. Concepto

El índice de saturación de bases catiónicas (BCSR) es una forma de evaluar la fertilidad del suelo considerando el equilibrio de nutrientes importantes como calcio, magnesio, potasio y sodio. Estos nutrientes se encuentran retenidos en el suelo y están disponibles para las plantas. Cuando existe un buen balance entre ellos, el cultivo puede desarrollarse mejor y aprovechar de manera más eficiente los nutrientes presentes en el terreno (Culman et al., 2021). Esta teoría, inicialmente propuesta por William Albrecht y utilizada actualmente en la agricultura, señala que debe existir un equilibrio adecuado entre nutrientes, como calcio (Ca^{2+}), magnesio (Mg^{2+}), potasio (K^+) y, en algunos casos, sodio (Na^+), para favorecer un mejor crecimiento y mayor producción de los cultivos (Yang et al., 2024). Asimismo, diferentes estudios indican que estas proporciones pueden variar según el tipo de suelo y las necesidades nutricionales de cada cultivo (Kopittke y Menzies, 2007). Sin embargo, investigaciones recientes mencionan que no todos los suelos responden de la misma manera a este enfoque. En algunos casos, resulta más importante asegurar que el cultivo tenga suficiente disponibilidad de nutrientes, más que mantener una proporción exacta entre ellos (Brock et al., 2021).

b. Origen y aplicabilidad del concepto

El enfoque BCSR se desarrolló a partir de los estudios realizados por William Albrecht durante la década de 1930, en los que analizó cómo el equilibrio de los cationes básicos presentes en la capacidad de intercambio catiónico (CIC) del suelo influía en el rendimiento de los cultivos (Culman et al., 2021). A partir de investigaciones efectuadas en suelos agrícolas de Misuri, Albrecht planteó que una adecuada relación entre calcio (Ca^{2+}), magnesio (Mg^{2+}) y potasio (K^+) favorece mejores condiciones físicas del suelo, incrementa la disponibilidad de nutrientes y promueve un adecuado crecimiento de las raíces (Chaganti y Culman, 2017). De acuerdo con esta teoría, cuando las proporciones entre los cationes se alejan de determinados rangos considerados adecuados, puede verse afectada la absorción de nutrientes por las plantas. Esto ocurre porque el desequilibrio iónico modifica los procesos que controlan la disponibilidad y reactividad de los nutrientes en el suelo. En este contexto, la solución del suelo representa solo una pequeña parte de los nutrientes totales requeridos por los cultivos, mientras que los distintos componentes del suelo funcionan como reservorios capaces de liberar o retener iones según las condiciones del sistema (Quispe-Matos et al., 2025). Los mecanismos que regulan el equilibrio iónico en la solución suelo se pueden observar en la Figura 1.

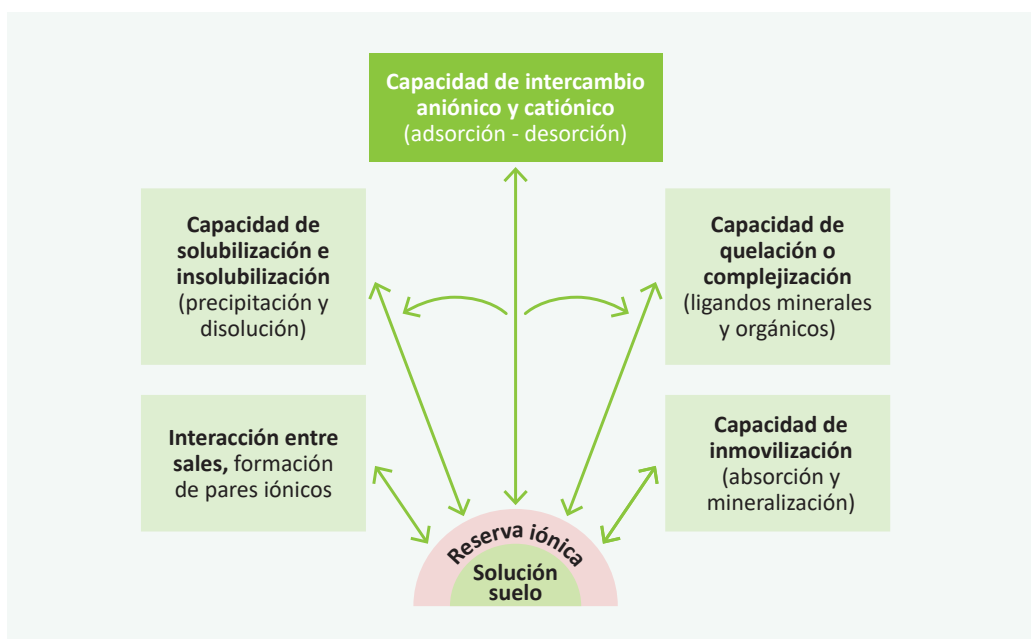


Figura 1. Mecanismos que mantienen en equilibrio los iones en la solución suelo (adaptado de McLean, 1977)

Las investigaciones desarrolladas por Bear et al. (1945) en suelos agrícolas de Nueva Jersey aportaron resultados que respaldaron parcialmente los planteamientos propuestos por Albrecht sobre el equilibrio catiónico del suelo. Estos estudios, posteriormente complementados por Halstead et al. (1958) y Graham (1959), sugirieron que, en suelos con alta capacidad de intercambio catiónico (CIC), la distribución ideal de bases intercambiables debería encontrarse en rangos aproximados de 65–75 % de calcio (Ca^{2+}), 10–15 % de magnesio (Mg^{2+}), 3–7 % de potasio (K^+) y menos de 5 % de sodio (Na^+). Asimismo, se indicó que los niveles de hidrógeno (H^+) y aluminio (Al^{3+}) debían mantenerse por debajo de 15 % para reducir problemas de toxicidad asociados a suelos ácidos. Con base en estos criterios, el modelo BCSR comenzó a utilizarse como referencia para el manejo de fertilización y corrección de suelos (Zhang, 1999).

En años recientes, diversos estudios han evaluado el desempeño del enfoque BCSR frente al sistema de suficiencia de nutrientes (SLAN), encontrando que, en muchos casos, la cantidad disponible de nutrientes en el suelo explica mejor el rendimiento de los cultivos que las relaciones entre cationes (Brock et al., 2021). No obstante, el enfoque BCSR continúa siendo útil en suelos con alta CIC ($> 8 \text{ cmol kg}^{-1}$), bajos contenidos de carbonatos, elevada lixiviación o marcados desequilibrios de bases, donde puede contribuir al diagnóstico y corrección de problemas de fertilidad (Quispe-Matos et al., 2025).

Por otro lado, el pH del suelo constituye un indicador fundamental para la toma de decisiones agronómicas, dado que permite identificar posibles desequilibrios químicos y definir la necesidad de aplicar enmiendas como cal o yeso agrícola. La cal se emplea principalmente para disminuir problemas asociados a la acidez y toxicidad por aluminio (Al^{3+}), mientras que el yeso agrícola ayuda a reducir los efectos del exceso de sodio (Na^+). Ambos materiales aportan calcio (Ca^{2+}), favoreciendo el incremento de su saturación en el suelo y contribuyendo a disminuir la presencia relativa de Mg^{2+} , Na^+ y Al^{3+} (Figura 2). Además, la aplicación de cal y yeso puede modificar las propiedades químicas del suelo y la respuesta de los cultivos mediante procesos relacionados con el aumento del pH, el aporte de calcio y la incorporación de azufre (S) (Espinosa y Molina, 1999).

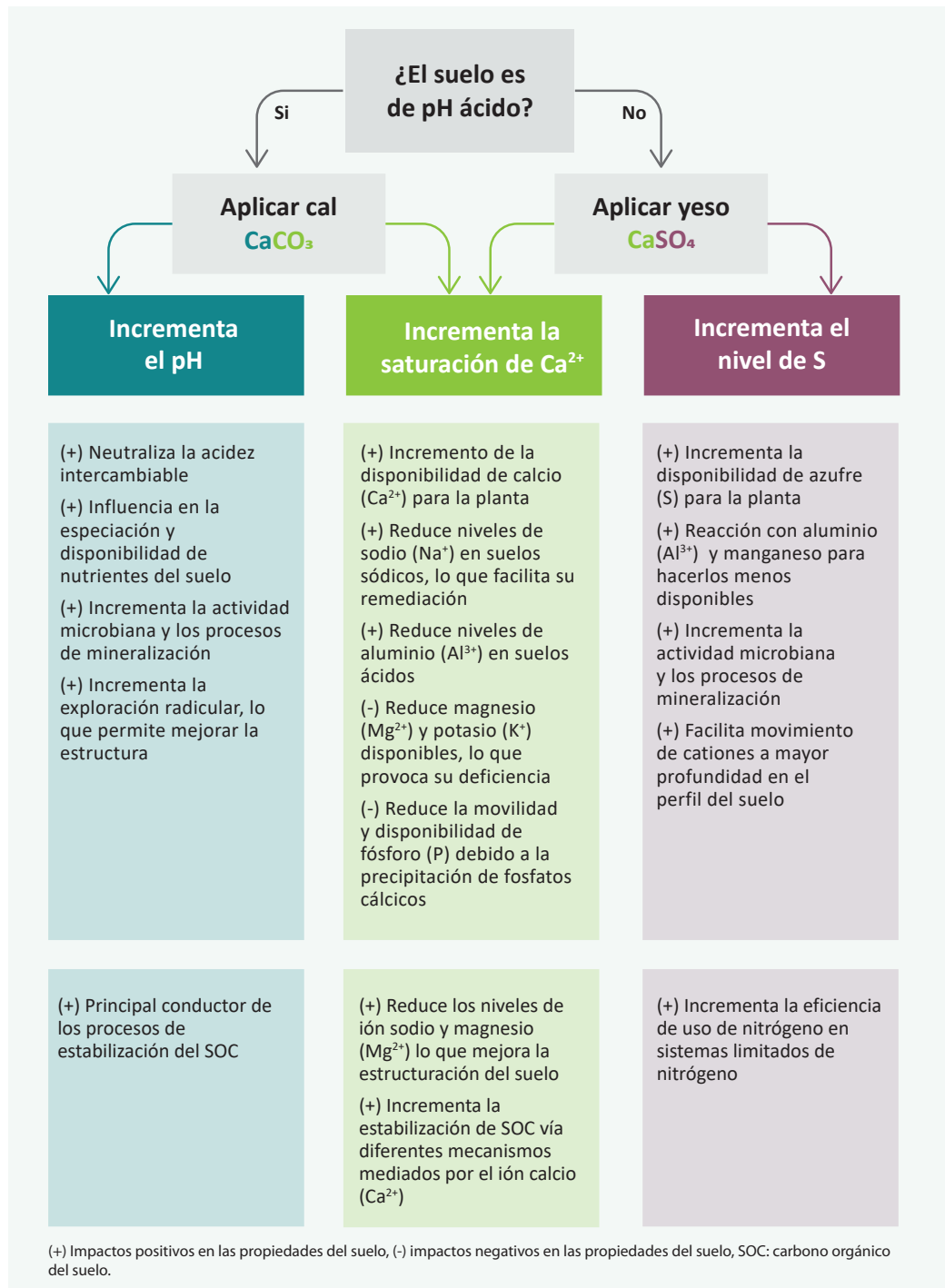


Figura 2. Criterios para el uso de la cal y el yeso, y su respuesta en la relación de saturación de cationes básicos (adaptado de Culman et al., 2021)

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). Aunque este modelo posee una base científica ampliamente aceptada, también ha sido objeto de críticas debido a que no incorpora de manera directa las interacciones entre nutrientes ni las limitaciones físicas y estructurales del suelo. A pesar de las limitaciones, el SLAN continúa siendo una herramienta esencial para la evaluación e interpretación de análisis de suelos. Su aplicación en el diagnóstico de la fertilidad comprende tres etapas principales: correlación, calibración e interpretación de los resultados de los análisis de suelos (Quispe-Matos et al., 2025), las cuales se presentan en la Figura 3.

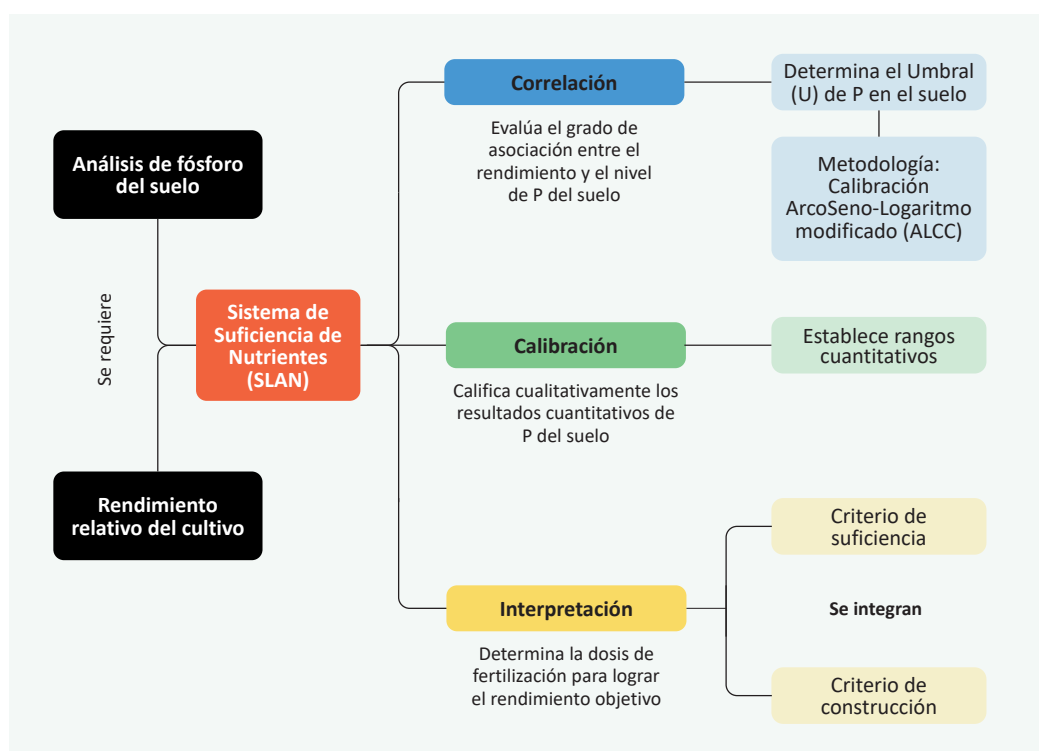


Figura 3. Esquema modelo para la implementación del sistema de suficiencia de nutrientes para el fósforo del suelo

Para los cálculos de la interpretación de resultados de los análisis de suelos, se puede hacer uso de tres 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 solo 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.

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

A continuación, se presenta un ejemplo práctico, adaptado de Quispe-Matos et al. (2025), para determinar el requerimiento de fósforo (P) necesario para alcanzar un rendimiento objetivo en el cultivo de cacao, considerando un suelo con alto contenido de este nutriente.

Ejemplo práctico:

Se realizó un análisis de suelo en un cultivo de cacao, y se obtuvo 10 mg de P por kg de suelo utilizando el método de Bray y Kurtz (P-Bray).

Para este cultivo, el umbral crítico o nivel de suficiencia es de 12 mg de P-Bray por kg de suelo y el rendimiento potencial es de 3 t ha⁻¹ de grano seco. El análisis de correlación y calibración indica que el nivel obtenido de 10 mg de P-Bray por kg de suelo permite obtener un rendimiento relativo (RR) del 70 %.

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

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

$$\text{Rendimiento alcanzado} = 0,7 \times 3 \text{ t ha}^{-1} = 2,1 \text{ t ha}^{-1}$$

Este resultado indica que el nivel actual de P (10 mg kg⁻¹) está por debajo del umbral crítico (12 mg kg⁻¹), lo que limita el rendimiento a solo el 70 % del potencial, 2,1 t ha⁻¹ en lugar de 3 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.

$$\text{Incremento de raíces y brotes} = 0,35 \times \text{Rendimiento alcanzado} \quad \dots(3)$$

$$\text{Incremento de raíces y brotes} = 0,35 \times 2,1 \text{ t ha}^{-1} = 0,74 \text{ t ha}^{-1}$$

Además de los $2,1 \text{ t ha}^{-1}$ de producción, el cultivo genera $0,74 \text{ t ha}^{-1}$ de biomasa en raíces y brotes, lo que debe considerarse en el balance nutricional.

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

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

$$\text{Rendimiento objetivo} = 2,1 \text{ t ha}^{-1} + 0,74 \text{ t ha}^{-1} = 2,84 \text{ t ha}^{-1}$$

Cuarto paso: calcular el requerimiento de P utilizando la Fórmula 5. Para este cálculo y con fines prácticos, se considera una extracción de 7,33 kg de fósforo por tonelada de producción.

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

$$\text{Requerimiento de P} = 7,33 \text{ kg de P t}^{-1} \times 2,84 \text{ t ha}^{-1} = 20,82 \text{ kg ha}^{-1}$$

A partir de estos resultados, se interpreta que el criterio de suficiencia estima un requerimiento de $20,82 \text{ kg de P ha}^{-1}$ para alcanzar un rendimiento objetivo de $2,84 \text{ t ha}^{-1}$.

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 al criterio de construcción, este se aplica cuando el nutriente se encuentra en niveles muy bajos en el suelo, con el objetivo de incrementar progresivamente su concentración 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 cacao para la aplicación del criterio de mantenimiento, así como de los criterios de mantenimiento y construcción (adaptado de Quispe-Matos et al., 2025).

Ejemplo práctico (criterio de mantenimiento)

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

Para este cultivo, el umbral crítico o nivel de suficiencia es de 12 mg de P-Bray por kg de suelo y el rendimiento potencial es de 3 t ha⁻¹. El análisis de correlación y calibración indica que el nivel obtenido de 5 mg de P-Bray por kg de suelo permite obtener un rendimiento relativo (RR) del 40 %.

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

$$\text{Rendimiento alcanzado} = 0,4 \times 3 \text{ t ha}^{-1} = 1,2 \text{ t ha}^{-1}$$

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.

$$\text{Incremento de raíces y brotes} = 0,35 \times 1,2 \text{ t ha}^{-1} = 0,42 \text{ t ha}^{-1}$$

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

$$\text{Rendimiento objetivo} = 0,42 \text{ t ha}^{-1} + 1,2 \text{ t ha}^{-1} = 1,62 \text{ t ha}^{-1}$$

Cuarto paso: calcular el requerimiento de P utilizando la Fórmula 5. Para este cálculo y con fines prácticos, se considera una extracción de 7,33 kg de fósforo por tonelada de producción.

$$\text{Requerimiento de P} = 7,33 \text{ kg de P t}^{-1} \times 1,62 \text{ t ha}^{-1} = 11,87 \text{ kg ha}^{-1}$$

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 %.

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

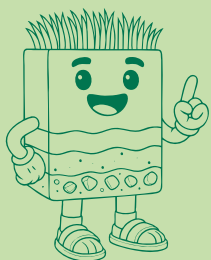
$$\text{RM de P} = \frac{11,87 \text{ kg ha}^{-1}}{0,3} = 39,57 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

De esta manera, el requerimiento de mantenimiento de fósforo en el cultivo de cacao es 39,57 kg por hectárea.

Ejemplo práctico (criterio de mantenimiento y construcción)

Se realizó un análisis de suelos en un cultivo de cacao, y se obtuvo 3 mg de P-Bray por kg de suelo utilizando el método de Bray (P-Bray), el cual se considera un nivel muy bajo.

Para este cultivo, el umbral crítico o nivel de suficiencia es de 12 mg de P-Bray por kg de suelo y el rendimiento potencial es de 3 t ha⁻¹. El análisis de correlación y calibración indica que el nivel obtenido de 3 mg de P-Bray por kg de suelo permite obtener un rendimiento relativo (RR) del 20 %.



Nota:

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

Primer paso: calcular el rendimiento con 3 mg de P-Bray por kg de suelo, utilizando la Fórmula 2.

$$\text{Rendimiento alcanzado} = 0,2 \times 3 \text{ t ha}^{-1} = 0,6 \text{ t ha}^{-1}$$

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

$$\text{Incremento de raíces y brotes} = 0,35 \times 0,6 \text{ t ha}^{-1} = 0,21 \text{ t ha}^{-1}$$

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

$$\text{Rendimiento objetivo} = 0,6 \text{ t ha}^{-1} + 0,21 \text{ t ha}^{-1} = 0,81 \text{ t ha}^{-1}$$

Cuarto paso: calcular el requerimiento de P utilizando la Fórmula 5. Para este cálculo y con fines prácticos, se considera una extracción de 7,33 kg de fósforo por tonelada de producción.

$$\text{Requerimiento de P} = 7,33 \text{ kg de P t}^{-1} \times 0,81 \text{ t ha}^{-1} = 5,94 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

Quinto paso: determinar el requerimiento de mantenimiento (RM), haciendo uso de la Fórmula 6. Para este caso práctico se considera una eficiencia de uso de P del 20 %.

$$\text{RM de P} = \frac{5,94 \text{ kg de P ha}^{-1}}{0,2} = 29,7 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

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.

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

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

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

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

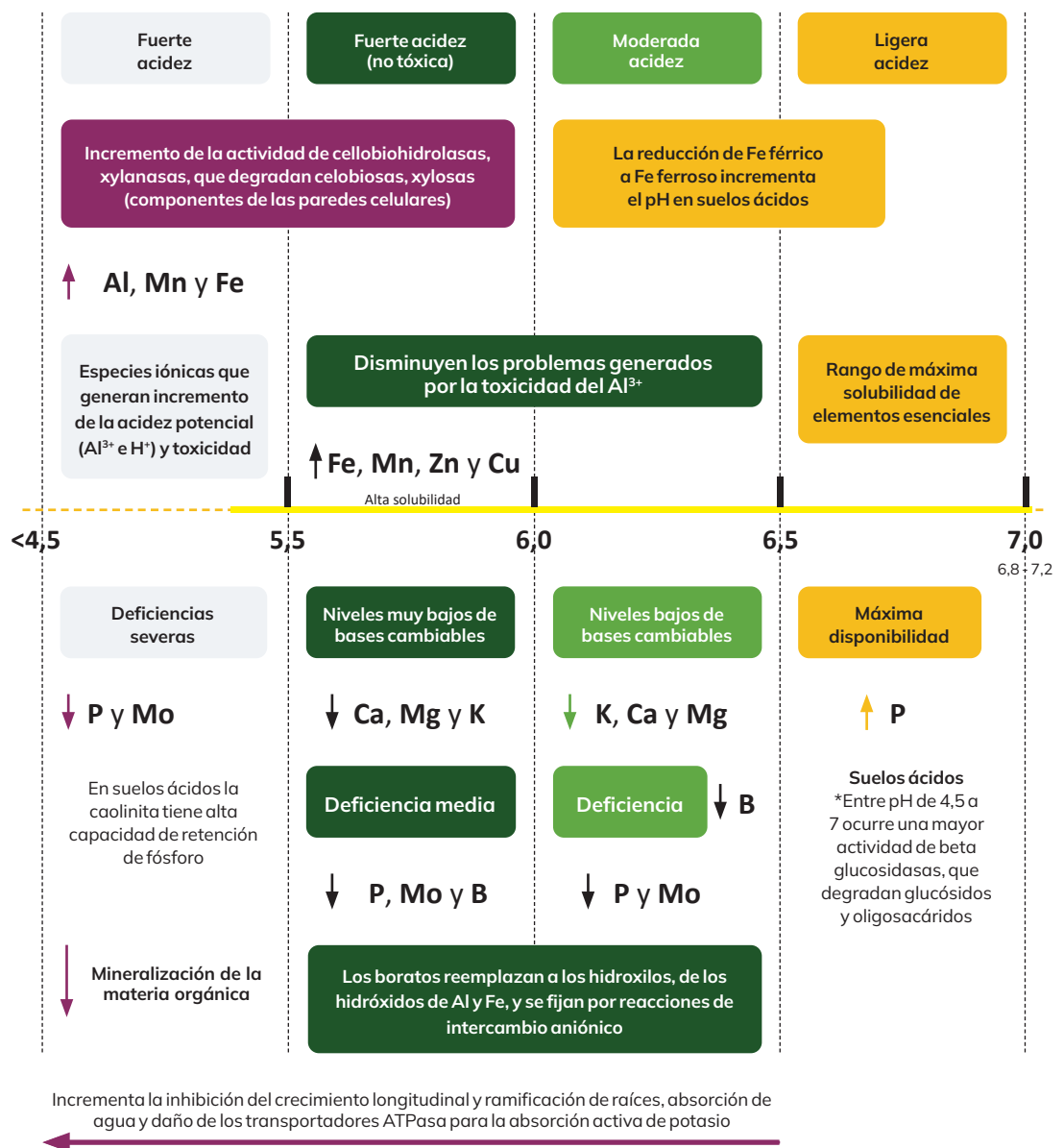
$$\text{Dosis de fertilización P} = 29,7 \text{ kg de P ha}^{-1} + 13,5 \text{ kg de P ha}^{-1} = 43,2 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

De esta manera, el requerimiento de mantenimiento y construcción de fósforo en el cultivo de cacao es 43,2 kg de P 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 a una amplia gama de propiedades y procesos del suelo. En la Figura 4 se presentan un modelo gráfico de diagnóstico de la fertilidad del suelo en condiciones de pH ácidos según Hartemink y Barrow (2023), Wang y Kuzyakov (2024) y Alam et al. (1999).



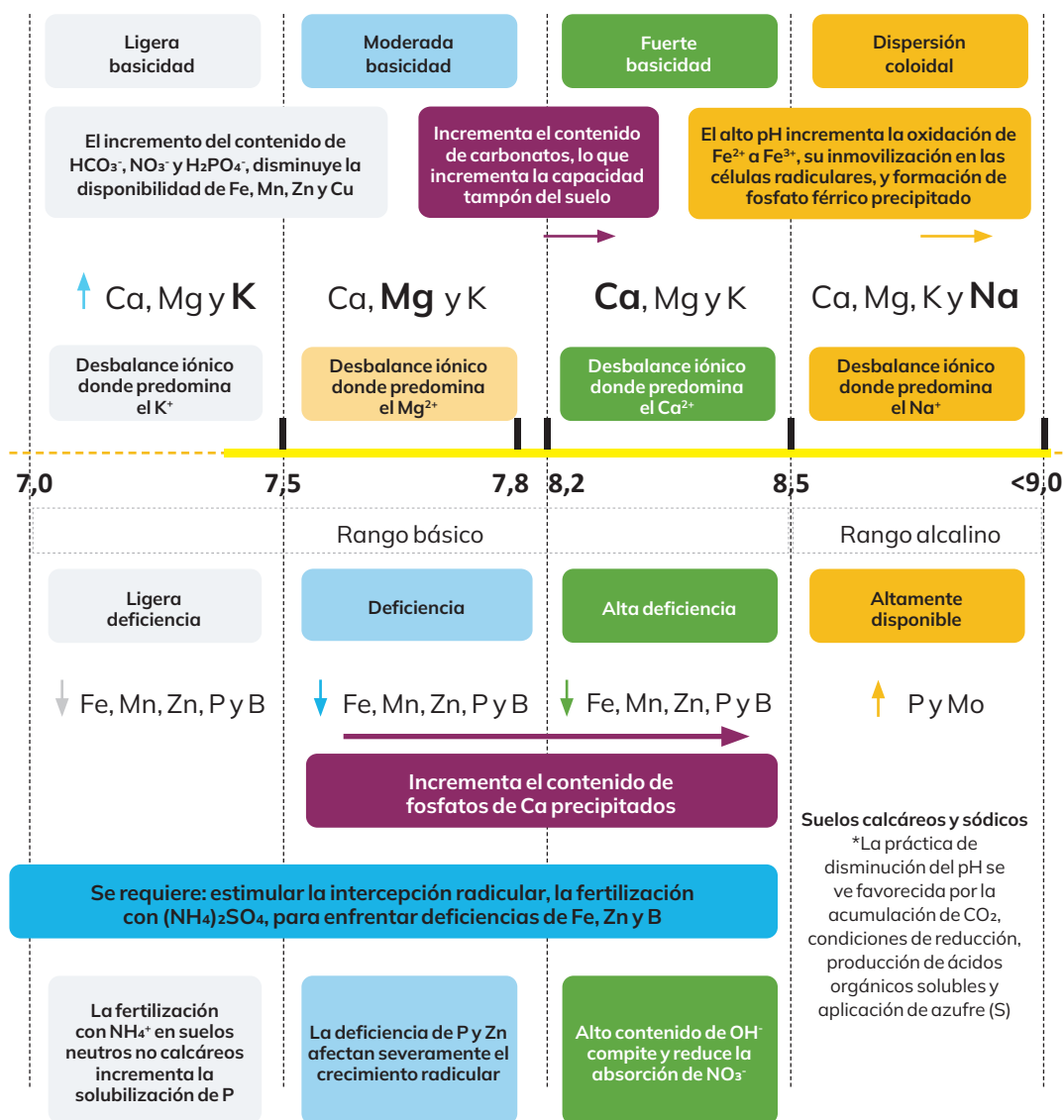


Figura 4. Diagnóstico de la fertilidad del suelo en función al pH

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 teóricos de semivariograma (lineal, esférico, circular y gaussiano), se pueden crear mapas que reflejan la distribución espacial de estas propiedades, lo que es crucial para la agricultura, el manejo sostenible del suelo y la aplicación de fertilizantes (Chinea-Horta y Rodríguez-Izquierdo, 2021).

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



3. Muestreo y análisis de suelos de la EEA Perla del VRAEM

3.1. Ubicación

La EEA Perla del VRAEM se localiza en el distrito Kimbiri, provincia La Convención, departamento de Cusco (Figura 5), con una superficie de 5,77 ha. Además, se ubica a 1600 m s. n. m. en la región natural Selva Alta, con precipitaciones promedio máximo de 4000 mm al año y temperaturas medias anuales de 18 °C a 24 °C (Cruz-Luis et al., 2025). La estación se localiza sobre suelos clasificados como Regosoles éutricos y Cambisoles éutricos, formados a partir de materiales no consolidados de origen litológico diverso (INRENA, 1996).

En esta estación se desarrollan actividades orientadas a la investigación, conservación, producción y valorización de recursos genéticos de plantas y animales, además de brindar asistencia técnica y diversos servicios a productores de la región Cusco. Los cultivos priorizados para estas actividades son: café (*Coffea arabica* L.), cacao (*Theobroma cacao* L.), yuca (*Manihot esculenta* Crantz), plátano (*Musa x paradisiaca* L.), camu camu (*Myrciaria dubia*), etc.

Ubicación departamental

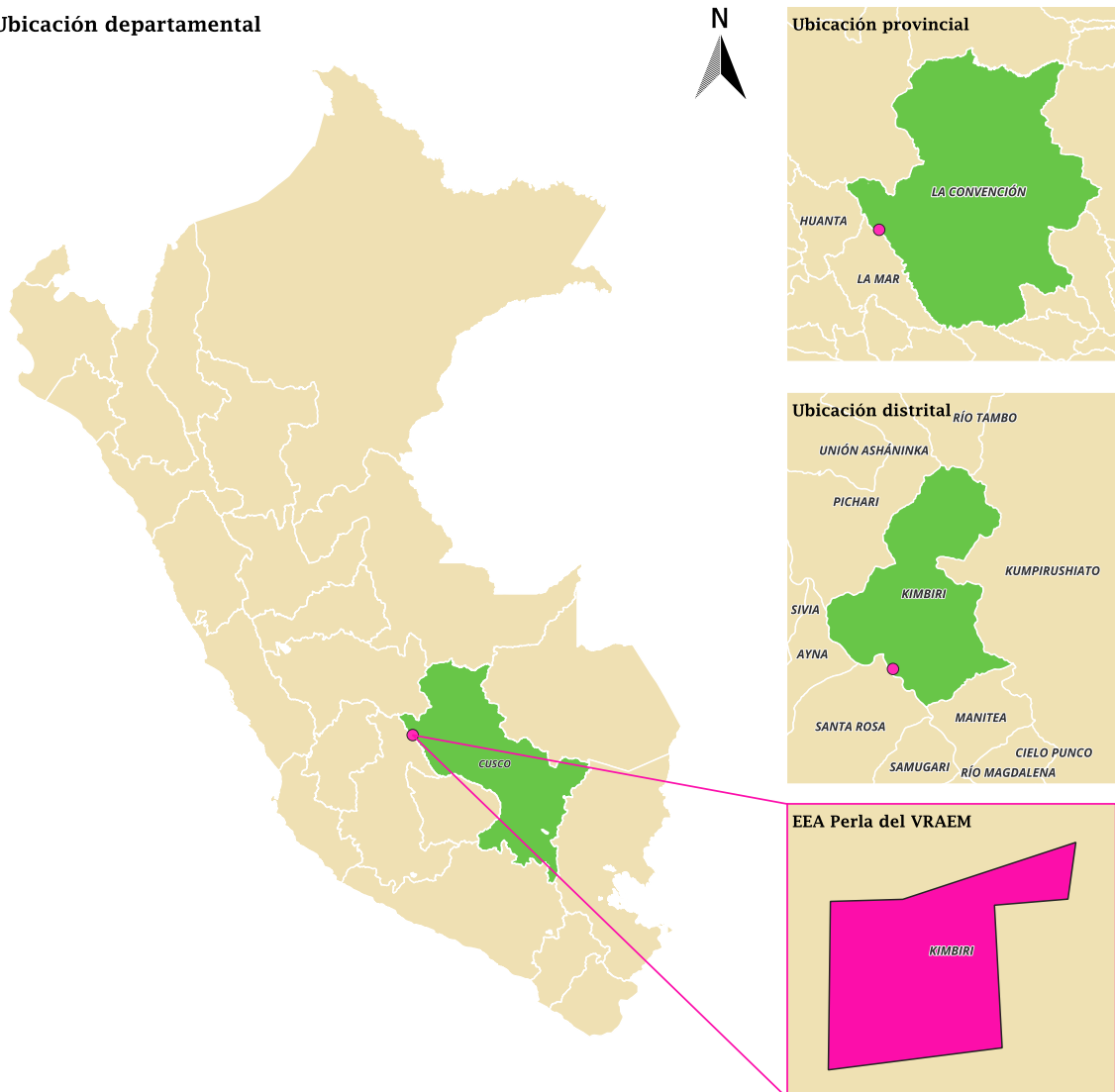


Figura 5. Ubicación de la EEA Perla del VRAEM

3.2. Muestreo estratificado del suelo

Para lograr una adecuada representación espacial de las condiciones del suelo en la EEA Perla del VRAEM, se implementó un esquema de muestreo estratificado sustentado en unidades de cobertura previamente delimitadas mediante el análisis de imágenes satelitales. Este planteamiento metodológico contribuye a disminuir la variabilidad dentro de cada estrato y a mejorar la representatividad de las muestras frente a la heterogeneidad espacial del área de estudio. La estratificación previa permite una caracterización más precisa de las propiedades edáficas clave para el manejo del suelo, como parte de un sistema integral de evaluación de la fertilidad.

El procedimiento integró técnicas de clasificación no supervisada con métodos de muestreo probabilístico de carácter espacial, apoyándose en herramientas de análisis geoespacial y estadística aplicada. A continuación, se describen los procedimientos empleados para la definición y recolección de los puntos de muestreo (Figura 6).

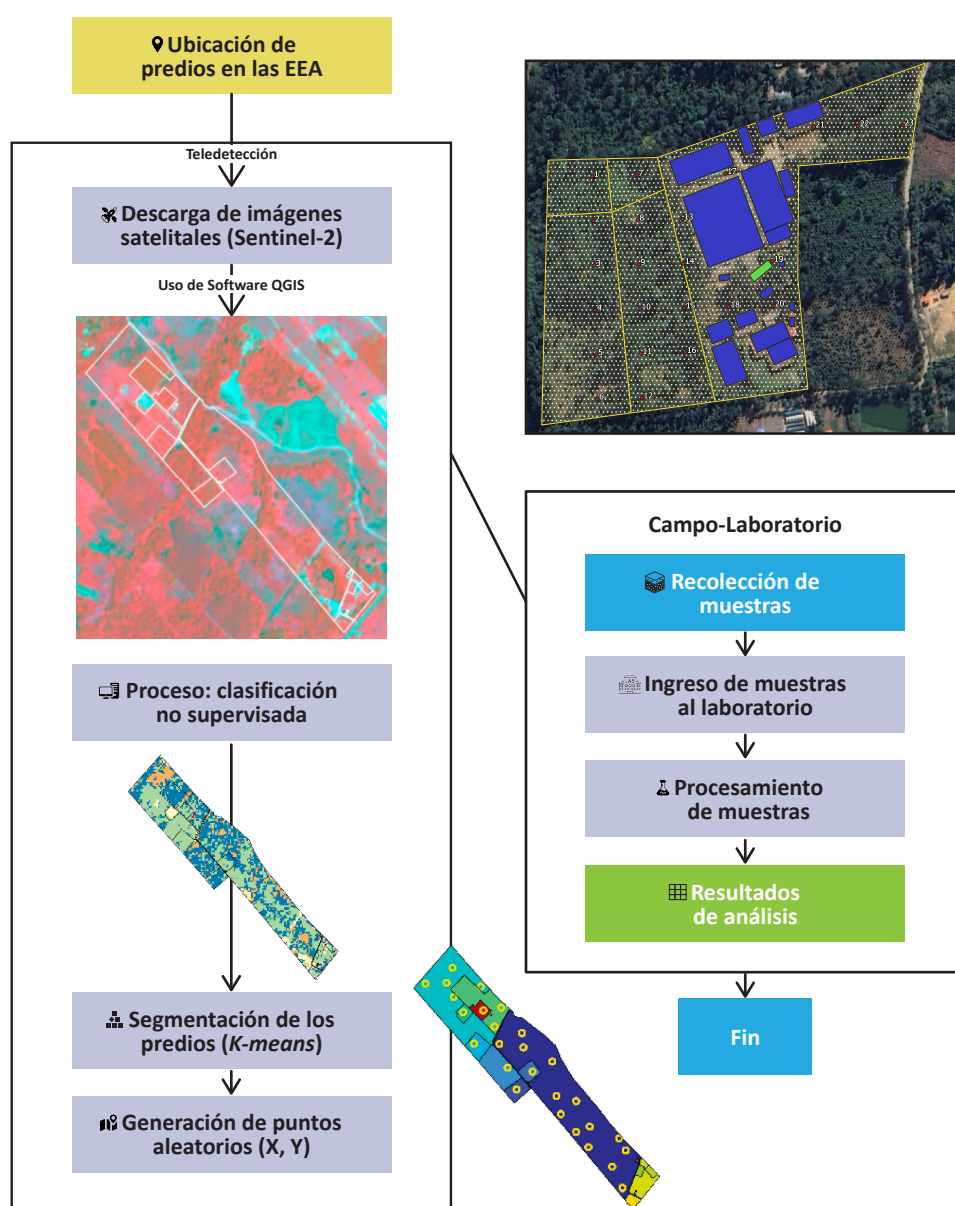


Figura 6. Flujo de trabajo para la determinación de los puntos de muestreo

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

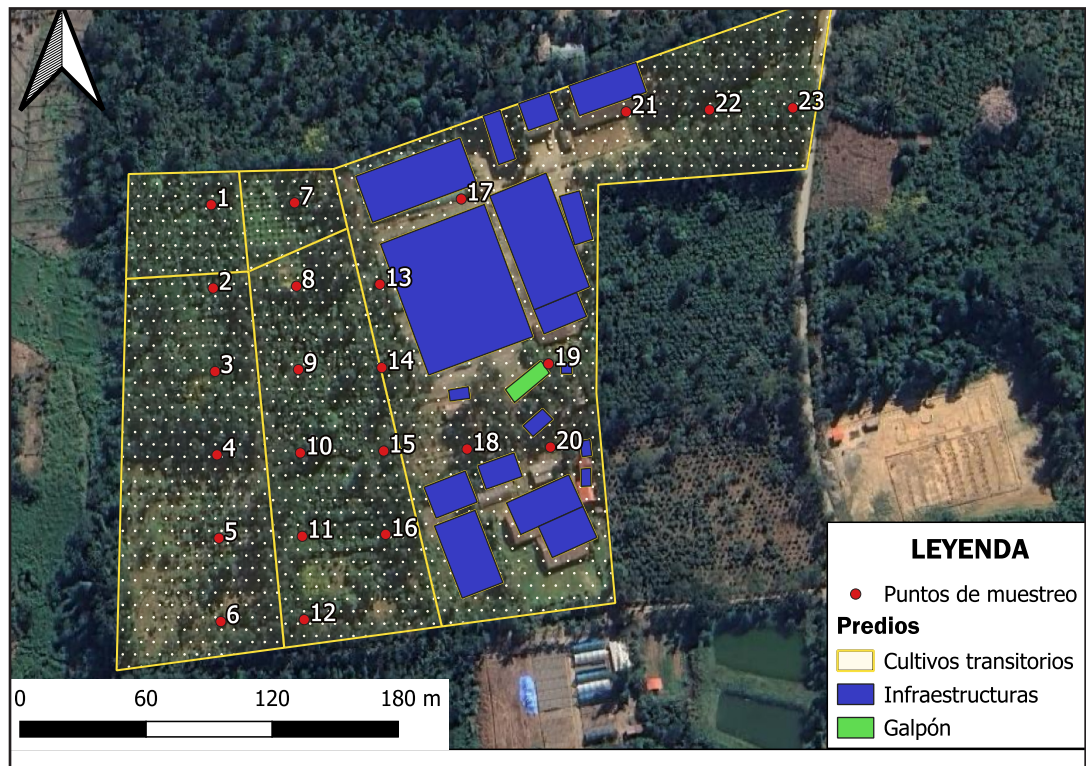


Figura 7. Puntos de muestreo de suelos en la EEA Perla del VRAEM

3.2.2. Muestreo de suelos en los puntos identificados

Luego de identificar las coordenadas de los 23 puntos de muestreo, se siguieron los siguientes pasos para la colecta de las muestras (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 aproximadamente 30 cm de profundidad y 20 × 20 cm de área.
- 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 del suelo, C) desterronamiento y eliminación de raicillas, y D) separación y etiquetado de la muestra (adaptado de Díaz-Chuquizuta et al., 2025)

3.3. Análisis de suelos

Posterior a la recolección, las muestras de suelo deben ser trasladadas a un laboratorio especializado en análisis de suelos, de preferencia que opere bajo metodologías acreditadas. En el desarrollo de este trabajo, las muestras se llevaron al Laboratorio de Suelos, Aguas y Foliare de la EEA Perla del VRAEM, donde se ejecutaron los procedimientos analíticos correspondientes. Como etapa inicial, las muestras fueron sometidas a un pretratamiento de secado a 35 °C durante un periodo de 48 horas. Posteriormente, se llevaron a cabo los análisis fisicoquímicos de acuerdo con los métodos mencionados en la Tabla 1.

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

Parámetro	Método de análisis	Referencias
Porcentaje de arena, limo y arcilla	Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000. Método de densímetro tipo Bouyoucos	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT, 2002)
pH (1:2,5)	Método 9045D de la Agencia de Protección Ambiental (EPA)	Environmental Protection Agency (EPA, 2004)
Conductividad eléctrica (CE) (1:5)	ISO 11265: determinación de la conductividad eléctrica específica del suelo	International Organization for Standardization (ISO, 1994)
Materia orgánica (MO)	Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000. Método de Walkley y Black	SEMARNAT (2002)
P disponible	Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000. Método Bray y Kurtz	SEMARNAT (2002)
K disponible	Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000	SEMARNAT (2002)
Bases intercambiables	Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000. Extracción con acetato de amonio.	SEMARNAT (2002)

3.4. Resultados de los análisis de suelos

Los resultados del análisis de suelos en la EEA Perla del VRAEM (Tabla 2) revelan que el área presenta, en promedio, una textura franco-arenosa (65,65 % arena, 21,15 % limo y 13,19 % arcilla), con una variabilidad baja a moderada en todas las fracciones texturales (CV entre 7,35 y 21,87 %). La arena muestra una cierta asimetría positiva (*skewness* = 0,58), mientras que limo y arcilla presentan distribuciones ligeramente sesgadas hacia valores bajos. Esta condición textural resulta favorable para la aireación y el drenaje, aunque limita la capacidad de retención de agua y nutrientes frente a suelos más finos.

El pH del suelo es fuertemente ácido en promedio ($4,99 \pm 0,66$; CV = 13,25 %), con valores que fluctúan entre 4,40 y 7,60, y una asimetría positiva pronunciada (*skewness* = 2,40). Este rango indica la existencia de condiciones fuertemente ácidas y la presencia de focos puntuales de mayor alcalinidad, probablemente asociados a variaciones en el manejo, procesos de lavado o acumulación localizada de materiales.

La conductividad eléctrica ($2,52 \text{ dS m}^{-1} \pm 1,57$) apunta a una ligera salinidad (CV = 62,22 %); sin embargo, se identifican sectores con valores elevados (máx. $8,23 \text{ dS m}^{-1}$), lo que puede incidir negativamente en cultivos sensibles si no se toman medidas correctivas. En el caso de la materia orgánica, el contenido promedio es bajo ($1,35 \% \pm 0,28$; CV = 20,77 %), lo que refleja condiciones de fertilidad orgánica limitada y posiblemente asociadas a descomposición acelerada bajo clima húmedo o a la intensidad del uso agrícola local.

El fósforo disponible presentó una media de $26,17 \text{ mg kg}^{-1}$, correspondiente a un nivel alto. No obstante, la elevada variabilidad observada (CV = 55,48 %) y la asimetría positiva de la distribución (*skewness* = 2,13) indican una marcada heterogeneidad en su contenido, con valores que oscilaron entre 11,71 y $81,78 \text{ mg kg}^{-1}$. Por su parte, el potasio disponible presentó una media de $22,07 \text{ mg kg}^{-1}$, correspondiente a un nivel bajo. Asimismo, mostró una variabilidad muy alta (CV = 127,51 %) y una distribución con asimetría positiva (*skewness* = 2,04), lo que evidencia una fuerte heterogeneidad espacial en su contenido, con valores comprendidos entre 4,68 y $107,82 \text{ mg kg}^{-1}$. La elevada variabilidad sugiere la existencia de una fertilización desigual.

Respecto al complejo de intercambio catiónico, el calcio ($2,02 \text{ cmol kg}^{-1}$) es el catión principal, aunque con alta dispersión (CV = 100,29 %) y valores extremos ($0,44\text{--}10,73 \text{ cmol kg}^{-1}$). El magnesio ($0,37 \text{ cmol kg}^{-1}$), el sodio ($0,25 \text{ cmol kg}^{-1}$) y el potasio intercambiable ($0,07 \text{ cmol kg}^{-1}$) muestran promedios bajos y también una marcada variabilidad (CV = 41,53–75,04 %), reflejando la naturaleza ácida del suelo y la rápida movilidad de estos elementos bajo clima tropical. La capacidad de intercambio catiónico efectivo promedio ($3,76 \text{ cmol kg}^{-1}$) denota una limitada capacidad de retención de nutrientes, atribuible a la textura arenosa predominante y a los bajos niveles de materia orgánica.

En conjunto, los suelos de la EEA Perla del VRAEM se caracterizan por la predominancia de fracciones arenosas, reacción fuertemente ácida, baja materia orgánica y moderada a elevada variabilidad en los niveles de nutrientes disponibles. Estas condiciones imponen desafíos para el manejo de la fertilidad y la sostenibilidad agrícola, exigiendo estrategias de manejo específicas: incremento sistemático de materia orgánica, monitoreo regular de salinidad y acidez, y fertilización balanceada y sectorizada para optimizar la nutrición vegetal y reducir el riesgo de deficiencias locales o pérdidas por lavado.

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

Variable	Unidad	Media	SD	CV (%)	Mediana	Mínimo	Máximo	Skewness
Arena	%	65,65	4,82	7,35	64,50	58,00	78,00	0,58
Limo	%	21,15	2,57	12,16	21,50	15,00	26,00	-0,35
Arcilla	%	13,19	2,88	21,87	14,00	7,00	17,00	-0,42
pH	und	4,99	0,66	13,25	4,85	4,40	7,60	2,40
CEe	dS m ⁻¹	2,52	1,57	62,22	1,98	1,20	8,23	2,18
MO	%	1,35	0,28	20,77	1,20	1,00	2,00	0,79
P disp.	mg kg ⁻¹	26,17	14,52	55,48	21,92	11,71	81,78	2,13
K disp.	mg kg ⁻¹	22,07	28,14	127,51	11,56	4,68	107,82	2,04
Ca ²⁺	cmol kg ⁻¹	2,02	2,02	100,29	1,41	0,44	10,73	3,11
Mg ²⁺	cmol kg ⁻¹	0,37	0,15	41,53	0,34	0,14	0,79	1,01
Na ⁺	cmol kg ⁻¹	0,25	0,19	75,04	0,19	0,00	0,59	0,31
K ⁺	cmol kg ⁻¹	0,07	0,04	56,41	0,06	0,03	0,21	2,15
CICe	cmol kg ⁻¹	3,76	1,73	46,08	3,21	2,35	11,24	3,09

SD: desviación estándar, *Skewness*: asimetría, CEe: conductividad eléctrica en extracto de saturación, MO: materia orgánica del suelo, P disp.: fósforo disponible, K disp.: potasio disponible, CICe: capacidad de intercambio catiónico efectiva

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

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

Requisitos previos para el mapeo:

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

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

$$I = \frac{1}{n} \sum_{i,j} i j \dots (9)$$

Donde:

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

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

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

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

3.7.1. Generación y ajuste del variograma

- Calcular el variograma experimental utilizando el complemento **Smart-Map**.
- Ajustar un modelo teórico (esférico, exponencial o gaussiano) al variograma.
- 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).
- Calcular la proporción **Sill-nugget** (PSV).

3.7.2. Interpolación *kriging*

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

3.7.3. Validación cruzada

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

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

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

Donde:

n: el número de muestras.

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

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

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

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

Donde:

n: el número de muestras.

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

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

3.8. Resultados del análisis geoestadístico de las propiedades del suelo

La caracterización geoestadística de las propiedades fisicoquímicas del suelo en la EEA Perla del VRAEM (Tabla 3) permitió identificar una baja a moderada dependencia espacial en la mayoría de las variables evaluadas, lo que refleja una organización heterogénea del suelo controlada principalmente por factores locales, manejo agrícola y condiciones microambientales. Los modelos de ajuste empleados incluyen funciones gaussianas, esféricas, lineales y lineales con umbral, con rangos de influencia comprendidos entre 42 y 366 m, evidenciando patrones principalmente de corta a mediana distancia.

El pH, el limo y la capacidad de intercambio catiónico efectiva (CICe) constituyeron el grupo de variables con mayor predictibilidad geoestadística, alcanzando coeficientes de determinación entre 0,24 y 0,36. El pH presentó la más alta consistencia espacial ($R^2 = 0,36$; modelo lineal; rango = 147 m), mostrando una distribución relativamente homogénea que resulta favorable para la planificación de estrategias de fertilización diferenciada según la reacción del suelo. El limo ($R^2 = 0,27$; modelo esférico; rango = 48,8 m) exhibe cambios graduales en cortas distancias, sugiriendo que variaciones texturales responden a procesos deposicionales o topográficos locales. La CICe ($R^2 = 0,24$; modelo *Linear to sill*; rango = 202,63 m) ofrece información valiosa sobre la capacidad del suelo para retener y liberar nutrientes. La delimitación espacial obtenida debe interpretarse con cautela y complementarse con indicadores de validación adicionales.

Un segundo grupo de variables mostró predictibilidad baja, con R^2 oscilando entre 0,13 y 0,17. Aquí se ubican el potasio intercambiable ($R^2 = 0,17$), las bases totales ($R^2 = 0,16$), el fósforo disponible ($R^2 = 0,15$), la conductividad eléctrica ($R^2 = 0,14$) y el potasio disponible ($R^2 = 0,14$). Aunque la continuidad espacial es limitada, estos parámetros permiten identificar patrones generales de distribución. El fósforo disponible tiene una baja estructuración (rango = 42,38 m) y una dependencia espacial incipiente que sugiere ser controlado por aplicaciones locales de fertilizantes.

La arcilla ($R^2 = 0,06$), la materia orgánica ($R^2 = 0,03$), el calcio intercambiable ($R^2 = 0,03$), el magnesio intercambiable ($R^2 = 0,09$) y el sodio intercambiable ($R^2 = 0,02$) presentaron estructuras espaciales débiles o prácticamente aleatorias. Este patrón refleja que la distribución de estos atributos está fuertemente influenciada por prácticas de manejo puntuales, heterogeneidad del material parental o bien por la baja movilidad inherente de algunos elementos en el suelo tropical. La arcilla, con un rango muy corto de 45,71 m, sugiere cambios abruptos en la textura del suelo a escala local. La materia orgánica, igualmente errática, indica variabilidad importante en el contenido de residuos vegetales o enmiendas aplicadas en diferentes sectores del campo.

En conjunto, los resultados evidencian que los suelos de la EEA Perla del VRAEM presentan una organización espacial fragmentada, donde únicamente el pH, el limo y la CICe ostentan una estructuración mayor al resto de parámetros. Aun así, su capacidad predictiva resulta limitada para sustentar interpolaciones confiables y la elaboración de mapas temáticos operativos. La predominancia de baja predictibilidad en la mayoría de los nutrientes disponibles e intercambiables refleja la complejidad y heterogeneidad de los suelos tropicales en la región, así como la influencia del manejo agronómico variable. Para mejorar la precisión de los análisis espaciales en futuras evaluaciones, se recomienda aumentar la densidad de muestreo, integrar información de covariables como elevación y vegetación, y complementar los análisis geoestadísticos con técnicas multivariadas que capturen las relaciones complejas entre variables del suelo en este contexto agroecológico particular.

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

Variable	Modelo	Nugget (C ₀)	Sill (C ₀ +C)	Range (m)	Cross-validation	
					RMSE	R ²
Arena	<i>Gaussian</i>	19,02	10,75	366,01	37,66	0,14
Limo	<i>spherical</i>	8,52	7,59	48,80	2,95	0,27
Arcilla	<i>spherical</i>	2,05	4,57	45,71	2,19	0,06
pH	<i>Linear</i>	0,19	0,13	146,54	0,43	0,36
CEe	<i>spherical</i>	0,00	1,67	242,72	1,07	0,14
MO	<i>spherical</i>	0,01	0,10	202,78	0,28	0,03
P disp.	<i>Linear to sill</i>	0,00	205,68	42,38	15,84	0,16
K disp.	<i>Linear to sill</i>	115,38	80,33	308,22	11,63	0,14
Ca ²⁺	<i>Gaussian</i>	0,38	0,67	202,63	0,85	0,03
Mg ²⁺	<i>spherical</i>	0,00	0,01	88,73	0,11	0,09
K ⁺	<i>Linear</i>	0,00	0,00	136,8	0,03	0,17
Na ⁺	<i>Gaussian</i>	0,00	0,03	49,83	0,19	0,02
ClCe	<i>Linear to sill</i>	0,24	0,61	202,63	0,64	0,24

RMSE: raíz del error cuadrático medio, R²: 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, ClCe: capacidad de intercambio catiónico efectiva

3.9. Mapeo digital de las propiedades del suelo

Los mapas generados para la EEA Perla del VRAEM (Figura 9-21) reflejan patrones espaciales heterogéneos en las propiedades edáficas evaluadas, con predictibilidad geoestadística variable que oscila entre baja y moderada. A diferencia de los centros experimentales de la costa, donde predominan distribuciones más estructuradas, los suelos de la zona estudiada evidencian una organización espacial fragmentada, controlada principalmente por factores locales de manejo, condiciones topográficas complejas y la heterogeneidad propia de los suelos tropicales. No obstante, los mapas permiten identificar zonas diferenciadas que orientan el manejo agronómico sitio específico.

El pH del suelo muestra el gradiente espacial más consistente de todas las variables analizadas, con valores que oscilan entre ligeramente ácidos a neutros en la mayor parte del predio. Este comportamiento indica condiciones químicas relativamente estables a escala local, aunque con variaciones importantes en sectores puntuales donde pueden requerirse enmiendas correctivas. Las áreas con pH más bajo sugieren zonas donde se debe optimizar la disponibilidad de fósforo y prevenir toxicidades por aluminio, mientras que en los sectores neutros se favorece la absorción de la mayoría de los nutrientes esenciales.

La textura del suelo presenta una distribución espacial irregular, con predominio de fracciones limosas en ciertas zonas y transiciones abruptas hacia materiales más arenosos o arcillosos. El limo, en particular, exhibe un patrón espacial relativamente estructurado en rangos cortos, sugiriendo cambios texturales asociados a procesos deposicionales o variaciones en el material parental. Estas diferencias texturales condicionan la capacidad de retención hídrica y la movilidad de nutrientes: en los sectores más arenosos será necesario realizar aplicaciones más frecuentes de fertilizantes debido a la menor retención, mientras que en áreas con mayor contenido de arcilla y limo se puede mejorar la eficiencia de las dosis aplicadas y reducir pérdidas por lixiviación.

La CICe muestra una distribución espacial con baja estructura, con zonas de mayor capacidad de retención de nutrientes que corresponden a sectores con mayor contenido de materia orgánica o arcilla. Este patrón permite tener una noción de áreas donde el suelo tiene mayor fertilidad natural y puede responder mejor a las aplicaciones de fertilizantes, pero no debe utilizarse para un manejo diferenciado.

Los nutrientes disponibles, como el fósforo y el potasio, presentan distribuciones espaciales poco estructuradas, con alta variabilidad local que refleja la influencia del historial de fertilización y el manejo agronómico variable en diferentes sectores. El fósforo muestra concentraciones irregulares, probablemente asociadas a aplicaciones localizadas de fertilizantes fosfatados o enmiendas orgánicas. El potasio, igualmente errático, sugiere zonas con deficiencias donde priorizar las aplicaciones para evitar limitaciones nutricionales en los cultivos.

La conductividad eléctrica (CE), la materia orgánica (MO) y los cationes intercambiables (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^{+} y Na^{+}) exhiben patrones espaciales fragmentado sin continuidad clara a escala regional. Esta variabilidad dificulta la zonificación precisa, aunque los mapas permiten identificar áreas con posibles acumulaciones de sales solubles, de residuos vegetales, desbalances catiónicos o riesgo de sodificación, aspectos relevantes para el manejo de la fertilidad a largo plazo.

En conjunto, los mapas edáficos de la EEA Perla del VRAEM ofrecen información valiosa para la zonificación inicial del campo, pese a las limitaciones en la continuidad espacial de la mayoría de las variables. Las propiedades con mayor estructuración como el pH, limo y CICe permiten definir unidades preliminares de manejo, mientras que la alta variabilidad observada en nutrientes disponibles y cationes intercambiables resalta la necesidad de complementar el análisis geoestadístico con muestreos más densos y evaluaciones de campo. La integración de esta información constituye un primer paso hacia la implementación gradual de agricultura de precisión en condiciones tropicales de la zona.

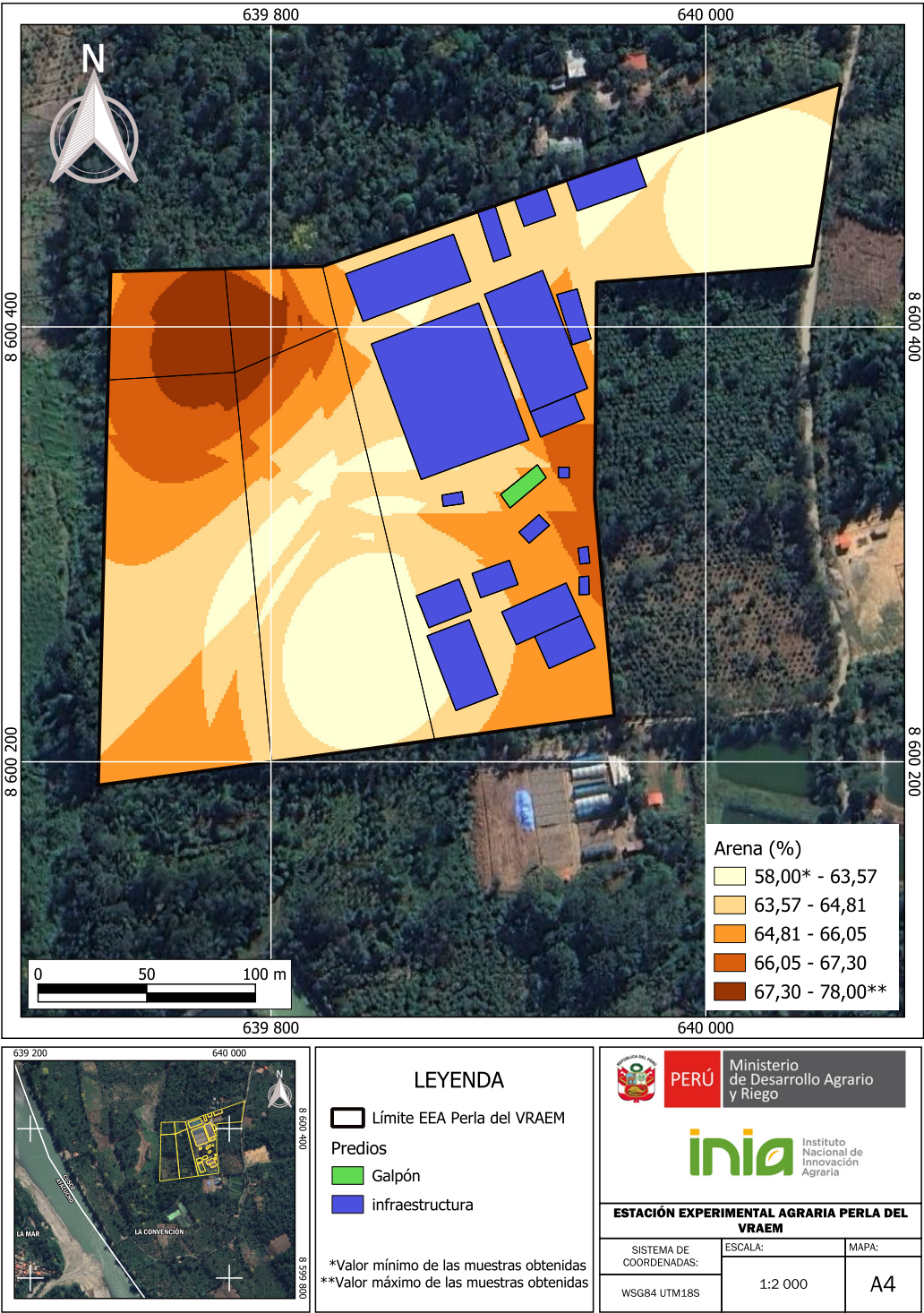


Figura 9. Mapa de variación espacial del porcentaje de arena

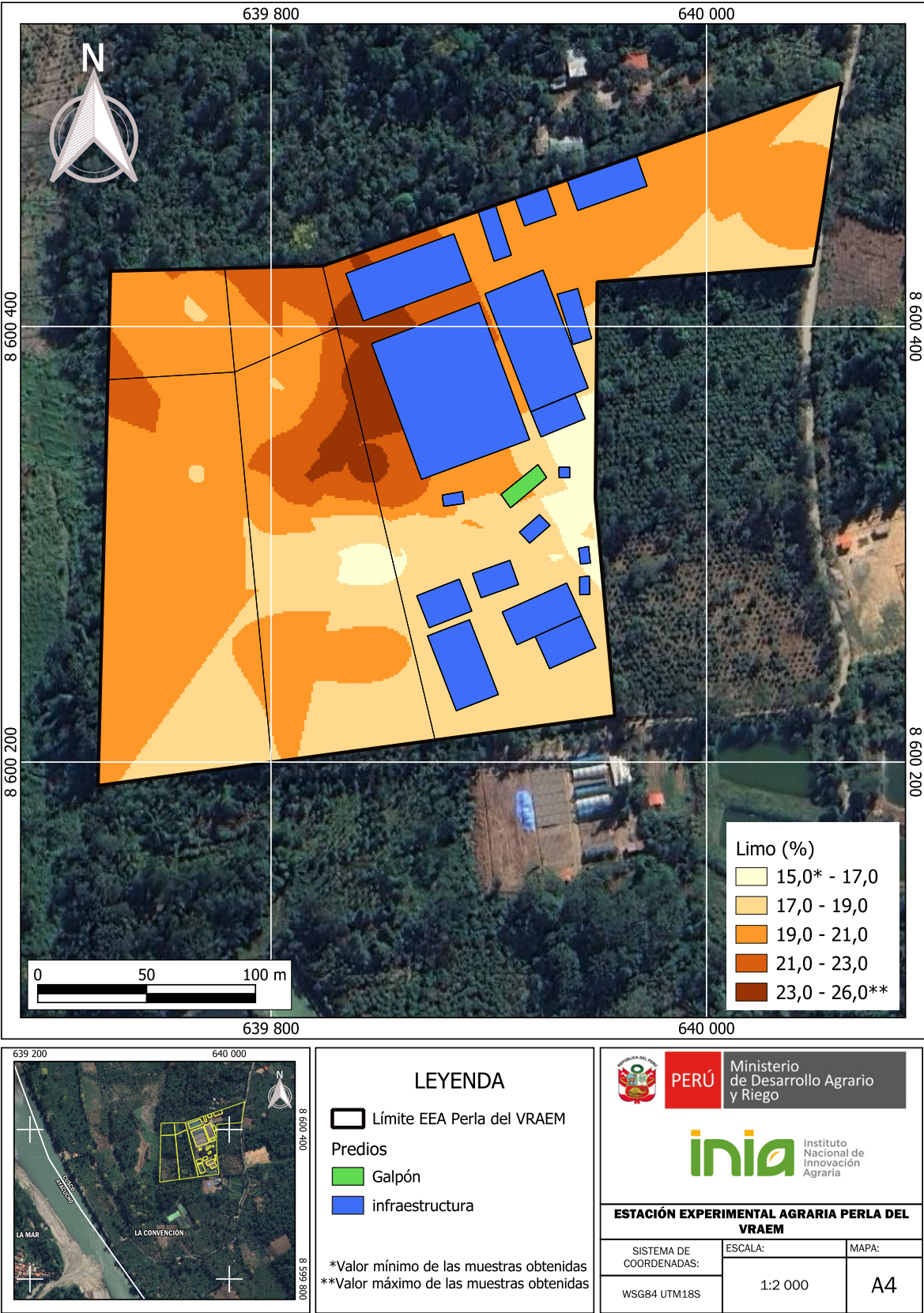


Figura 10. Mapa de variación espacial del porcentaje de limo

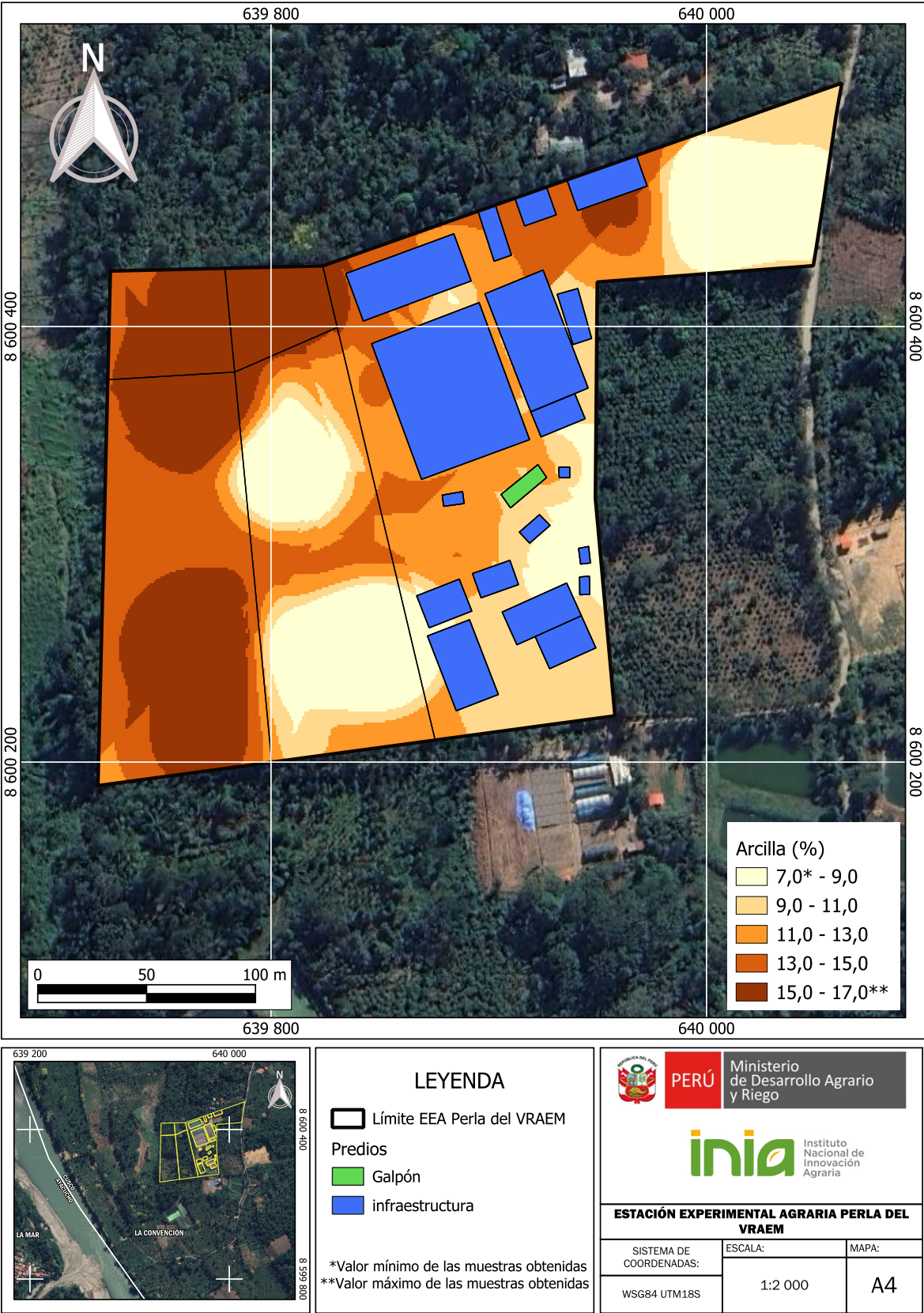


Figura 11. Mapa de variación espacial del porcentaje de arcilla

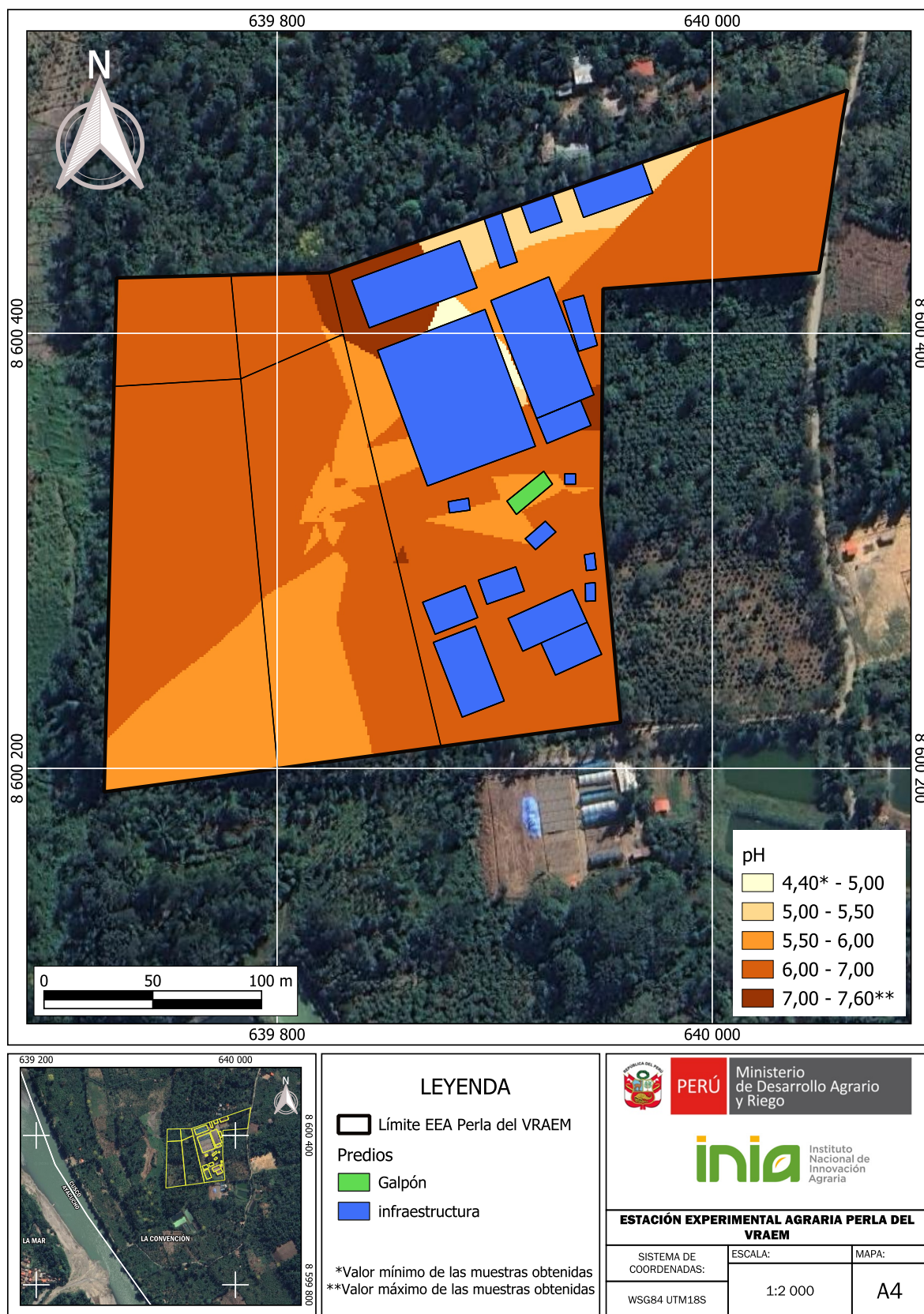


Figura 12. Mapa de variación espacial del pH

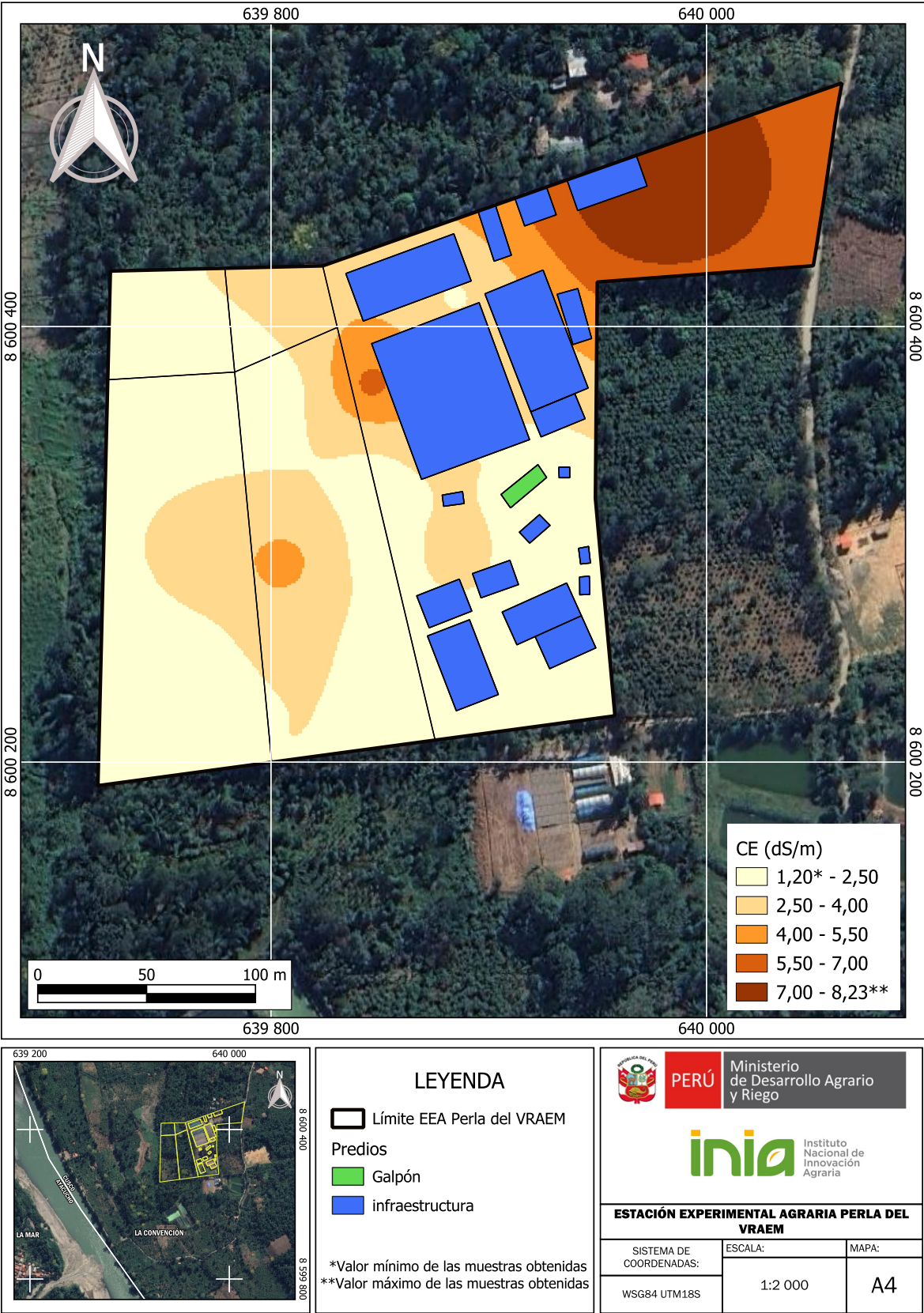


Figura 13. Mapa de variación espacial de la conductividad eléctrica

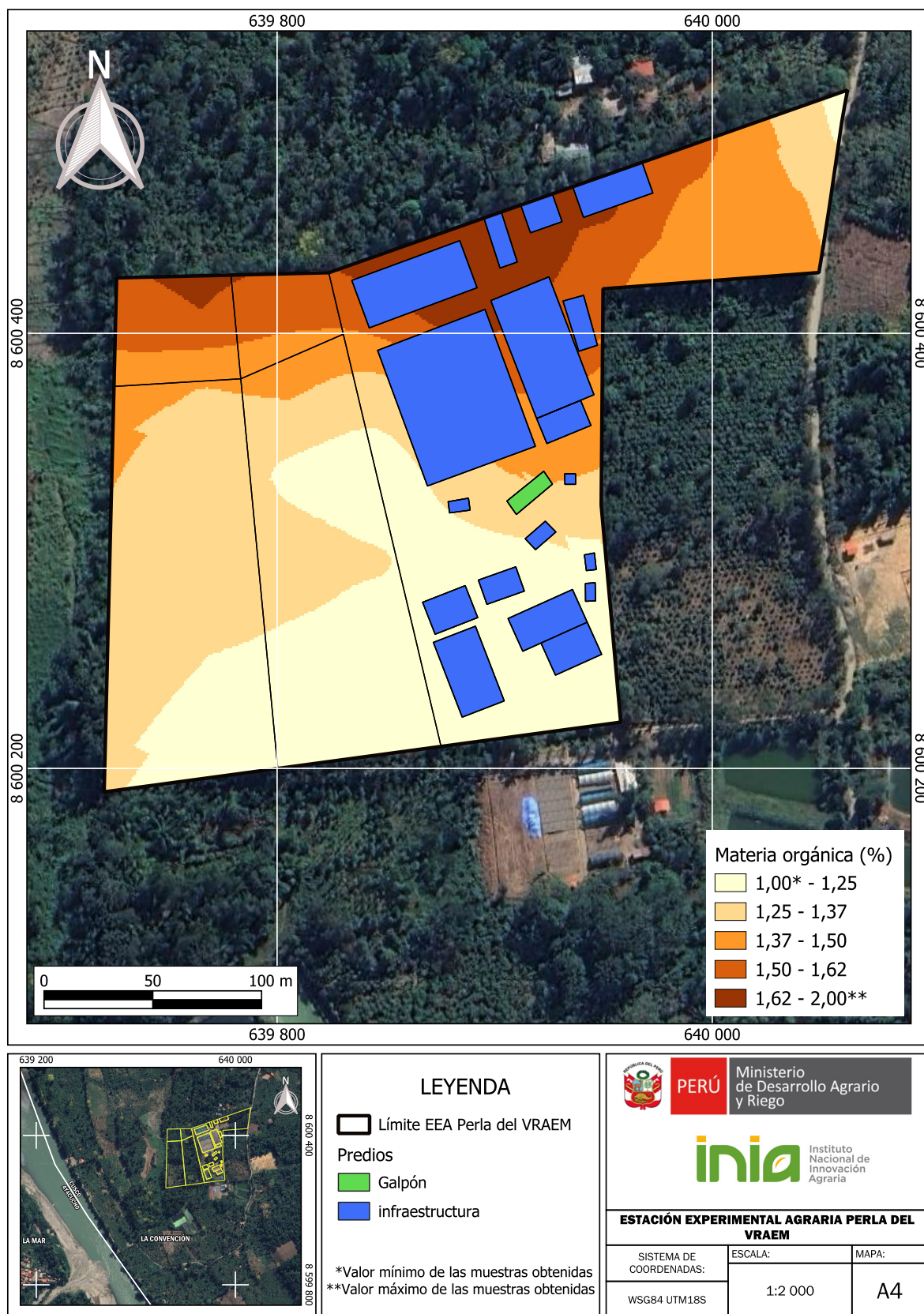


Figura 14. Mapa de variación espacial del porcentaje de materia orgánica

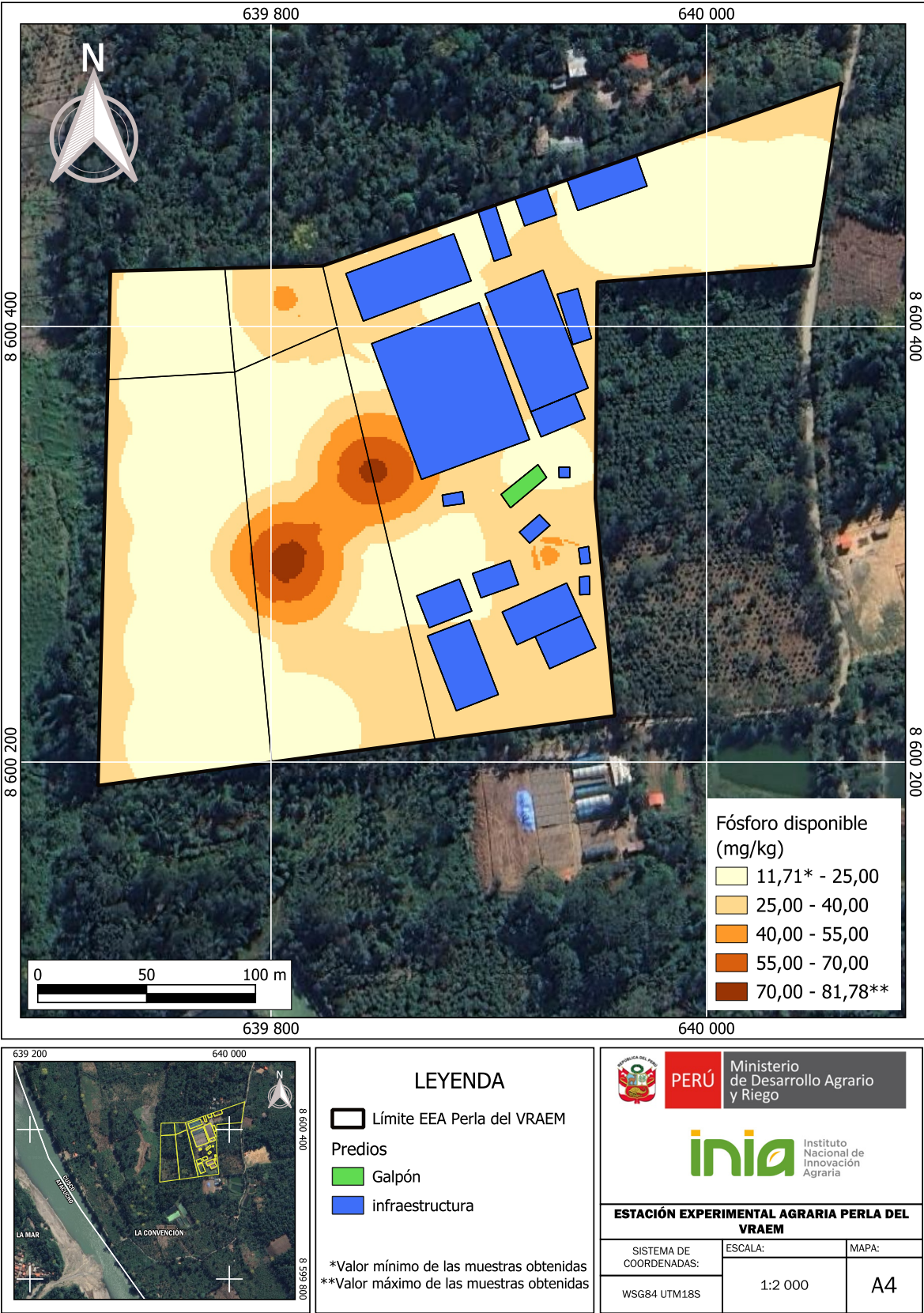


Figura 15. Mapa de variación espacial del fósforo disponible

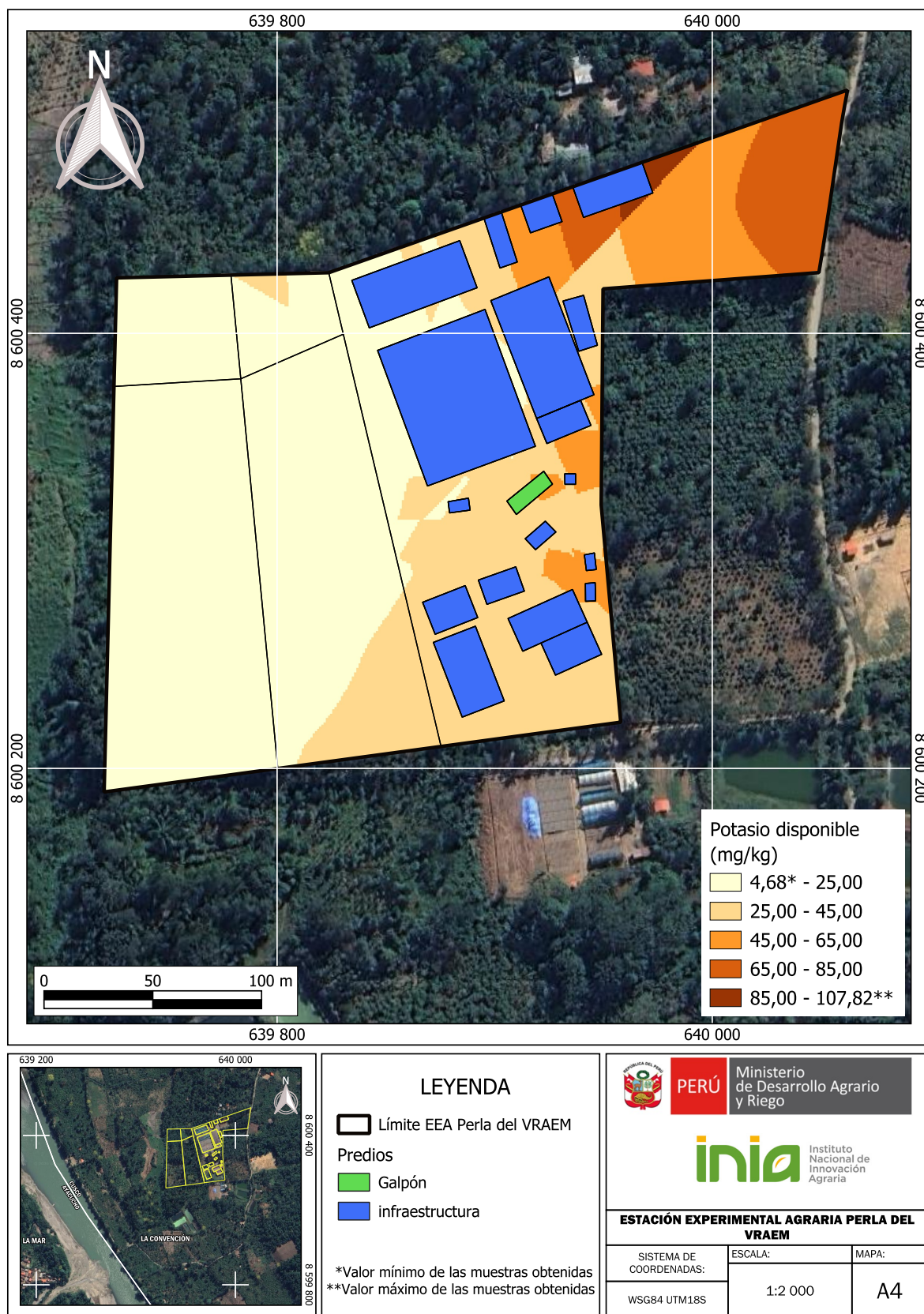


Figura 16. Mapa de variación espacial del potasio disponible

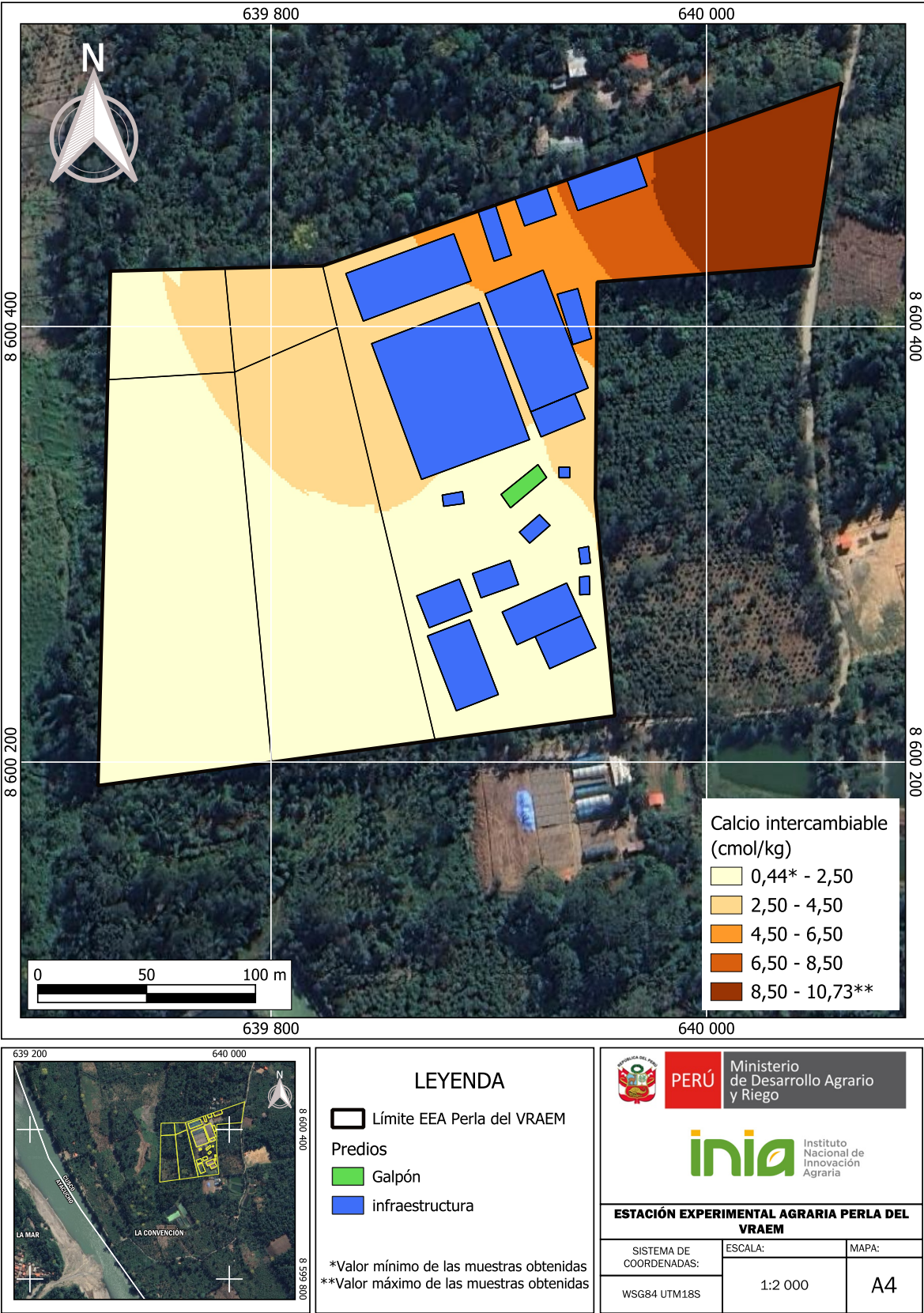


Figura 17. Mapa de variación espacial del calcio intercambiable

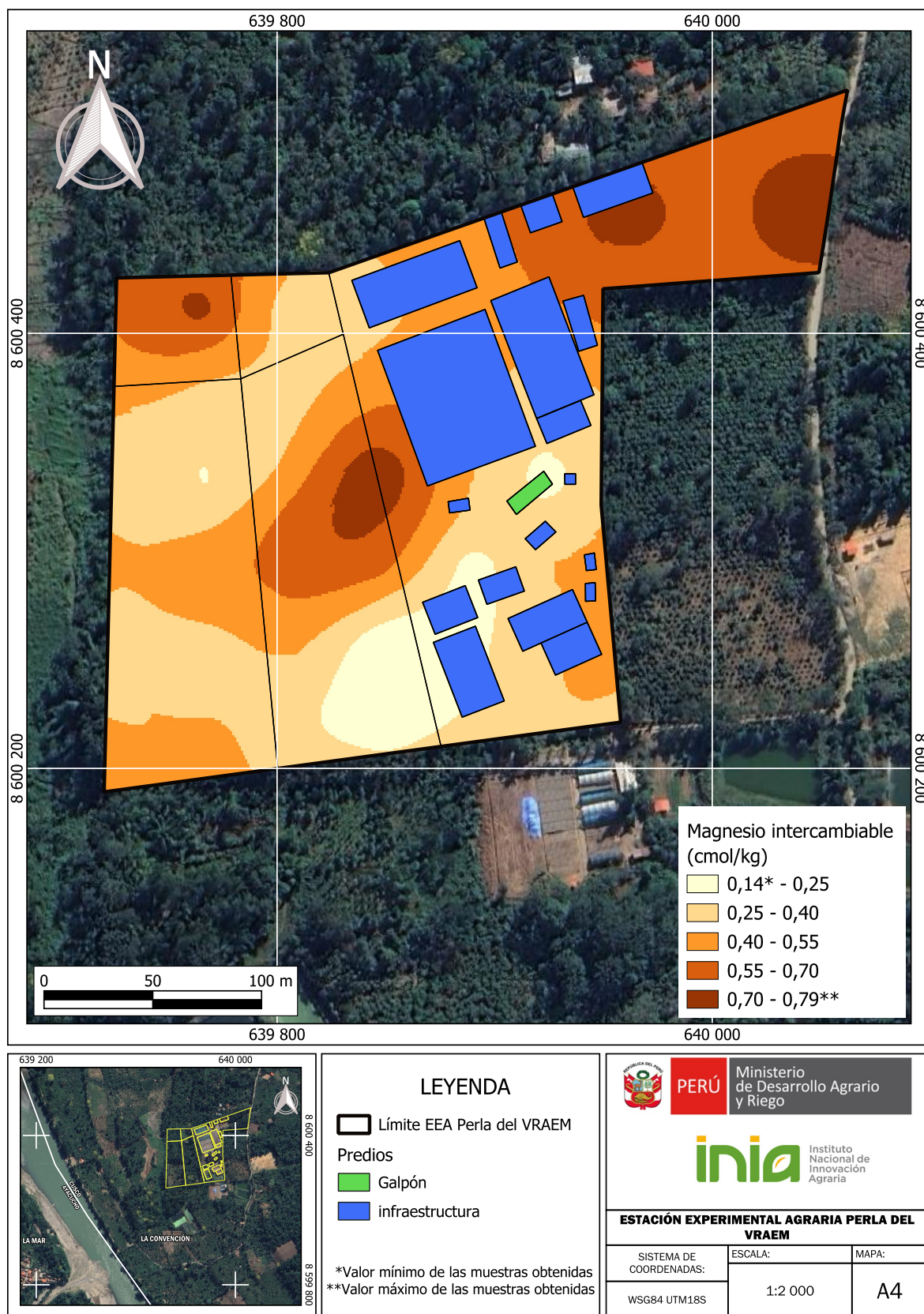


Figura 18. Mapa de variación espacial del magnesio intercambiable

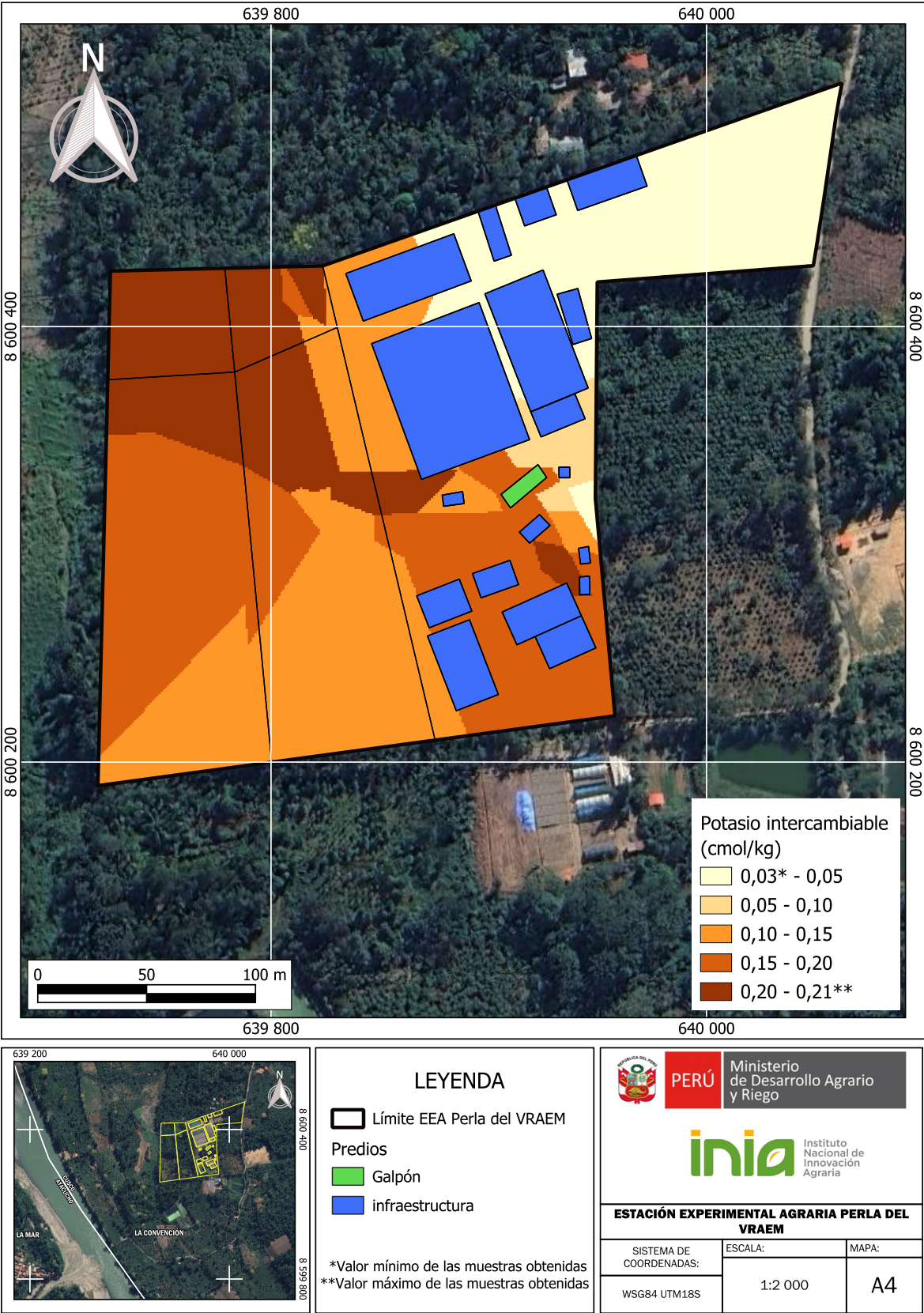


Figura 19. Mapa de variación espacial del potasio intercambiable

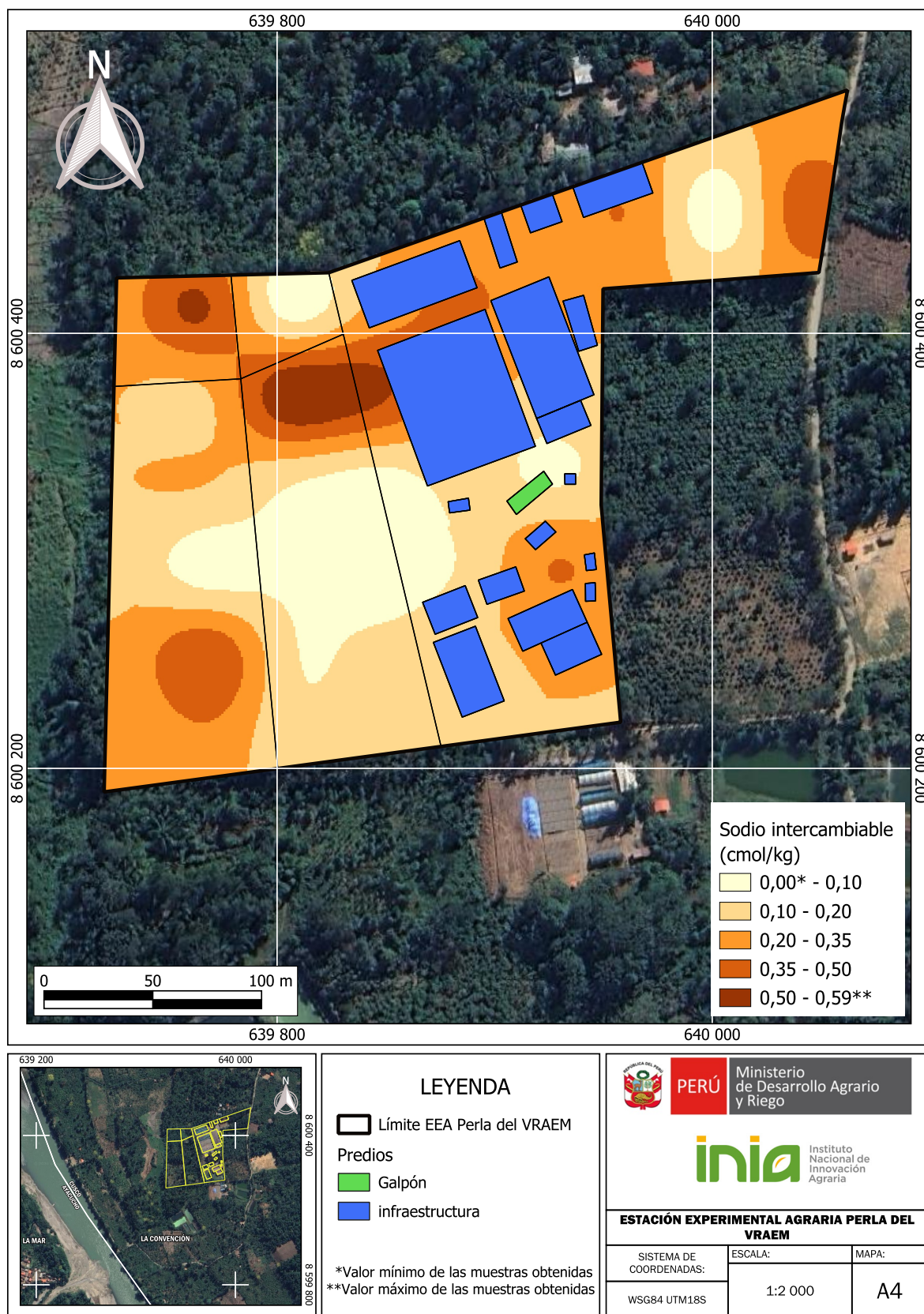


Figura 20. Mapa de variación espacial del sodio intercambiable

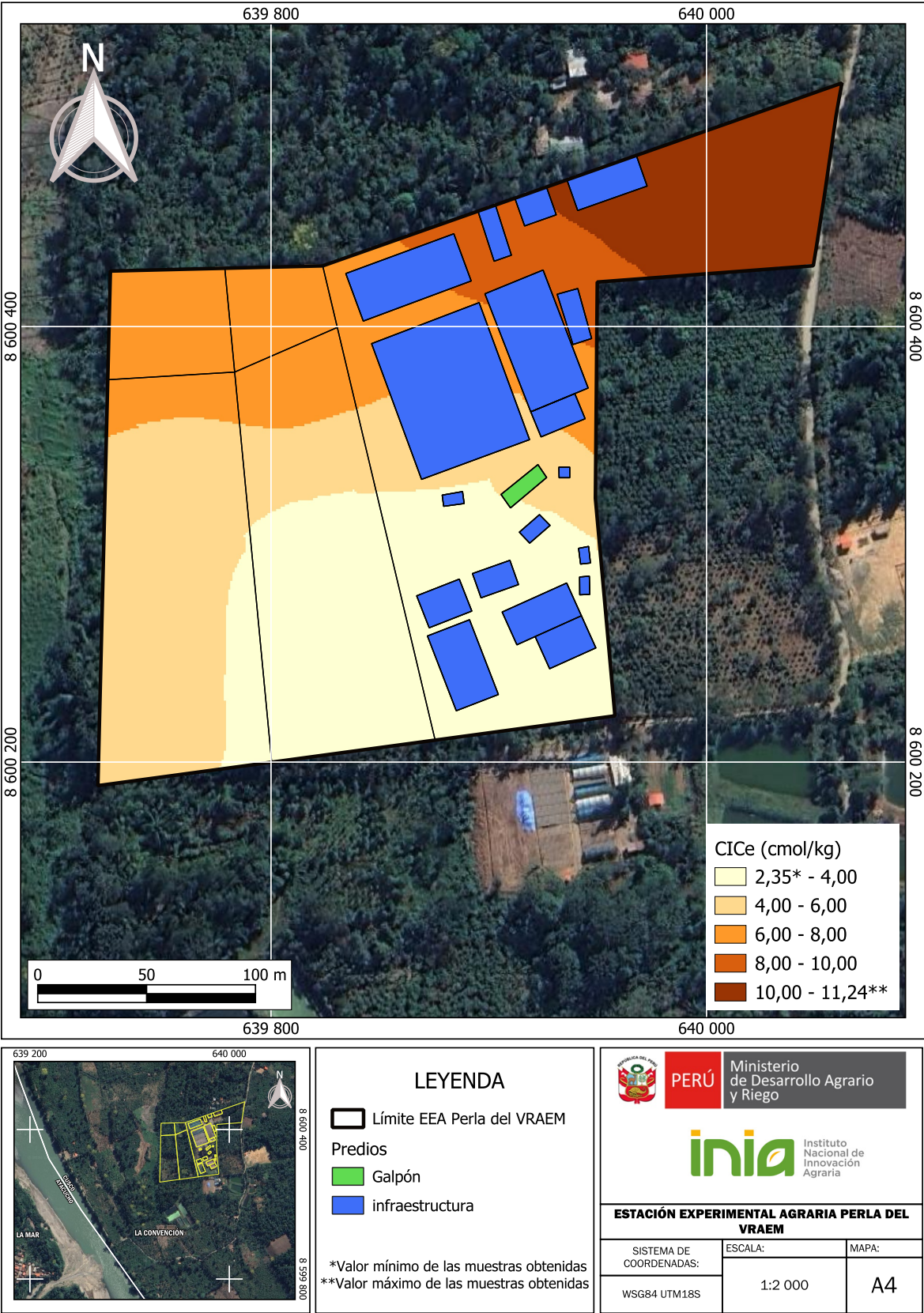


Figura 21. Mapa de variación espacial de la capacidad de intercambio catiónico efectiva





4. Recomendaciones de manejo de la fertilidad del suelo en la EEA Perla del VRAEM

4.1. Niveles bajos de capacidad de intercambio catiónico efectiva y de materia orgánica

Se identificaron condiciones críticas que requieren un manejo diferenciado y prioritario. En promedio, el suelo presenta una acidez fuerte ($\text{pH} = 4,99$) y una baja capacidad de intercambio catiónico ($\text{CICe} = 3,76 \text{ cmol kg}^{-1}$), lo que limita la disponibilidad de nutrientes esenciales para las plantas. Asimismo, el contenido de materia orgánica es bajo ($1,35 \%$) y presenta una predictibilidad espacial prácticamente nula ($R^2 = 0,03$), lo que reduce la capacidad tampón del suelo y agrava la limitada retención de nutrientes. Por otro lado, la conductividad eléctrica ($\text{CE} = 2,52 \text{ dS m}^{-1}$) evidencia un problema incipiente de salinidad.

Las recomendaciones de manejo prioritarias se centran en la corrección de la acidez del suelo mediante la aplicación de enmiendas calcáreas. Se recomienda utilizar calcita o dolomita en dosis determinadas a partir del requerimiento de encalado, con el objetivo de elevar el pH a un rango de 5,5–6,0, priorizando las áreas identificadas por el modelo geoestadístico del pH. Entre ambas alternativas, la dolomita resulta más conveniente debido a su aporte simultáneo de magnesio, cuyo contenido en el suelo es marginal ($0,37 \text{ cmol kg}^{-1}$). Considerando la baja capacidad de intercambio catiónico (CIC), las aplicaciones deben realizarse de forma fraccionada y complementarse con la incorporación de materia orgánica, a fin de mejorar la capacidad tampón del suelo y favorecer una mayor retención de nutrientes. El éxito de estas intervenciones debe monitorearse con análisis periódicos de suelo y tejido foliar, adaptando las recomendaciones a la marcada heterogeneidad espacial que caracteriza a este sistema productivo.

4.2. Niveles deficientes de bases catiónicas (Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^{+})

El diagnóstico de las relaciones catiónicas evidencia que los contenidos de calcio ($2,02 \text{ cmol kg}^{-1}$), magnesio ($0,37 \text{ cmol kg}^{-1}$) y potasio ($0,07 \text{ cmol kg}^{-1}$) son muy bajos, condición que compromete las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, con efectos negativos sobre el crecimiento y desarrollo de las plantas. La escasa presencia de estos cationes favorece la ocupación de los sitios de intercambio por cationes como el sodio (Na^{+}) y, especialmente, el aluminio (Al^{3+}), reduciendo aún más la disponibilidad de nutrientes esenciales y aumentando el riesgo de deficiencias nutricionales.

El calcio desempeña un papel fundamental en la mejora de la estructura del suelo, dado que favorece la floculación de las partículas de arcilla, incrementando la aireación y la infiltración del agua. En consecuencia, una baja saturación de calcio propicia la compactación del suelo y el deterioro de su estructura, lo que restringe el desarrollo radicular y dificulta la circulación de aire y agua (Zhang y Norton, 2002). Por su parte, el magnesio es un componente esencial de la clorofila y, además de contribuir a la estabilidad estructural del suelo, resulta indispensable para la fotosíntesis. Su deficiencia reduce la asimilación fotosintética de carbono, altera la partición de carbohidratos y limita el transporte por el floema, disminuyendo la producción de biomasa y la productividad agrícola (Meng et al., 2023). En cuanto al potasio, este nutriente desempeña un papel clave en la regulación del equilibrio hídrico, el transporte de nutrientes y los mecanismos de defensa de las plantas. Niveles insuficientes de potasio afectan la calidad nutricional de los cultivos, reducen su estabilidad mecánica y aumentan su susceptibilidad al ataque de patógenos (Jaiswal et al., 2016).

Uno de los cultivos estratégicos de la EEA Perla del VRAEM es el cacao, cuya productividad y desarrollo dependen en gran medida de un adecuado suministro de calcio, magnesio y potasio. La deficiencia de estos nutrientes puede limitar su crecimiento, reducir el rendimiento y afectar la calidad de la producción. En este contexto, resulta fundamental realizar un monitoreo continuo de la fertilidad del suelo e implementar un programa de fertilización que permita corregir dichas deficiencias, garantizando una nutrición balanceada y favoreciendo la sostenibilidad y productividad del cultivo.

4.3. Niveles de suficiencia de nutrientes disponibles

4.3.1. Cálculos del requerimiento de fertilización fosforada según el criterio de suficiencia para el cultivo de cacao

Los indicadores geoestadísticos del fósforo disponible muestran una estructura espacial débil, con un modelo ajustado de tipo *Linear to Sill*, pero con escasa continuidad espacial efectiva. El *nugget* (C_0) fue nulo y el *sill* ($C_0 + C$) de 205,68, atribuyendo el error a fuentes de variabilidad no explicadas por la distancia. Esto sugiere que el fósforo disponible varía fuertemente a pequeña escala, posiblemente asociado a factores locales como compactación o fertilización excesiva.

Aunque el contenido promedio de fósforo disponible es adecuado ($26,17 \text{ mg kg}^{-1}$), su rango de autocorrelación espacial es muy bajo ($\text{range} = 42,38 \text{ m}$), y su relevancia práctica es limitada debido a la baja capacidad predictiva del modelo ($R^2 = 0,16$) y un RMSE relativamente bajo ($15,84 \text{ mg kg}^{-1}$). Esta débil estructura espacial limita la confiabilidad de interpolaciones como *kriging* ordinario para generar mapas precisos de disponibilidad de fósforo. En consecuencia, la fertilización fosfatada 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 cacao, se adoptará como referencia un nivel crítico de 12 mg kg^{-1} y un rendimiento potencial de 3 t ha^{-1} convencional con alta tecnología. El nivel más bajo de fósforo de los suelos analizados es $11,71 \text{ mg kg}^{-1}$, por lo que se espera respuesta positiva a la aplicación de fertilizantes fosfatados. Para este caso, se tomará como ejemplo este valor de fósforo disponible. En este sentido, el plan de fertilización se formulará considerando el criterio de suficiencia de fertilidad, con el objetivo de reponer el fósforo extraído por la cosecha. El cálculo se realizará siguiendo la metodología propuesta por Quispe-Matos et al. (2025).

Primer paso: calcular el rendimiento alcanzado con $11,71 \text{ mg}$ de P-Bray por kg de suelo, considerando que con este nivel de fósforo se alcanza un rendimiento relativo de 70 %.

$$\text{Rendimiento alcanzado} = \frac{70 \times 3 \text{ t ha}^{-1}}{100} = 2,1 \text{ t ha}^{-1}$$

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.

$$\text{Incremento de raíces y brotes} = 0,35 \times 2,1 \text{ t ha}^{-1} = 0,74 \text{ t ha}^{-1}$$

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

$$\text{Rendimiento objetivo} = 2,1 \text{ t ha}^{-1} + 0,74 \text{ t ha}^{-1} = 2,84 \text{ t ha}^{-1}$$

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

$$\text{Requerimiento de P} = 2 \text{ kg de P t}^{-1} \times 2,84 \text{ t ha}^{-1} = 5,68 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

Con base en estos resultados, según el criterio de suficiencia, se requiere la aplicación de 5,68 kg de P ha⁻¹ para alcanzar un rendimiento objetivo de 2,84 t ha⁻¹.

4.3.2. Cálculos del requerimiento de fertilización potásica según los criterios de mantenimiento y construcción para el cultivo de cacao

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 = 11,63 mg kg⁻¹ y R² = 0,14). La media fue de 22,07 mg kg⁻¹, lo que indica un nivel bajo para la mayoría de los cultivos, con un rango que va de 4,68 a 107,82 mg kg⁻¹. Se requiere 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 (4,68 mg kg⁻¹) para hacer el cálculo de requerimiento de mantenimiento y construcción:

Para el cacao, el umbral crítico o nivel de suficiencia es de 150 mg de K por kg de suelo y el rendimiento potencial es de 3 t ha⁻¹. El análisis de correlación y calibración indica que el nivel obtenido de 4,68 mg de K por kg de suelo permite obtener un rendimiento relativo (RR) del 40 %. El cálculo se realiza adaptando la metodología descrita por Quispe-Matos et al., (2025).

Primer paso: calcular el rendimiento con 4,68 mg de K por kg de suelo, utilizando la Fórmula 2:

$$\text{Rendimiento alcanzado} = \frac{40 \times 3 \text{ t ha}^{-1}}{100} = 1,2 \text{ t ha}^{-1}$$

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.

$$\text{Incremento de raíces y brotes} = 0,35 \times 1,2 \text{ t ha}^{-1} = 0,42 \text{ t ha}^{-1}$$

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

$$\text{Rendimiento objetivo} = 1,2 \text{ t ha}^{-1} + 0,42 \text{ t ha}^{-1} = 1,62 \text{ t ha}^{-1}$$

Cuarto paso: calcular el requerimiento de K. Para este cálculo y con fines prácticos se considera una extracción de 20 kg de potasio por tonelada de producción.

$$\text{Requerimiento de K} = 20 \text{ kg de K t}^{-1} \times 1,62 \text{ t ha}^{-1} = 32,4 \text{ kg de K ha}^{-1}$$

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 %.

$$\text{RM de K} = \frac{32,4 \text{ kg de K ha}^{-1}}{0,70} = 46,28 \text{ kg de K ha}^{-1}$$

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 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:

$$\text{Dosis de fertilización de K} = 46,28 \text{ kg de K ha}^{-1} + 40 \text{ kg de K ha}^{-1} = 86,28 \text{ kg de K ha}^{-1}$$

De esta manera, la dosis de fertilización anual sería de 172,56 kg ha⁻¹ de cloruro de potasio, el cual tiene una riqueza de 60 % de K₂O. 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 cacao.





5. Referencias bibliográficas

- Alam, S. M., Naqvi, S. S. M., y Ansari, R. (1999). Impact of soil pH on nutrient uptake by crop plants. En M. Pessarakli (Ed.), *Handbook of Plant Nutrition* (pp. 51-60). Marcel Dekker, Inc.
- Álvarez-Herrera, J. G., Ruiz-Berrío, H. D., y Acosta-Tova, D. F. (2021). Evaluación geoestadística de atributos hidrofísicos del suelo en la granja Tunguavita, Paipa, Colombia. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 31(1), 127-140. <https://www.redalyc.org/journal/911/91168742009/html/>
- 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*, 36(4), 1-10. <https://doi.org/10.1017/S1742170520000381>
- Buresh, R.J., Smithson, P.C., y Hellums, D.T. (1997). Building Soil Phosphorus Capital in Africa. En R. J. Buresh, P. A. Sanchez, y F. Calhoun (Eds.), *Replenishing Soil Fertility in Africa* (pp. 111-149). Soil Science Society of America, Inc; American Society of Agronomy, Inc. https://apps.worldagroforestry.org/Units/Library/Books/PDFs/91_Replenishing_soil_fertility_in_africa.pdf
- Chaganti, V., y Culman, S. (2017). Historical perspective of soil balancing theory and identifying knowledge gaps: A review. *Crop, Forage y Turfgrass Management*, 3(1), 1-7 . <https://doi.org/10.2134/cftm2016.10.0072>
- Chinea-Horta, A., y Rodríguez-Izquierdo, L. (2021). Comportamiento geoespacial de algunas propiedades del suelo en el cultivo de la caña de azúcar. *Ingeniería Agrícola*, 11(1). <https://www.redalyc.org/journal/5862/586269368001/html/>
- Cruz-Luis, J. A., Ortiz-Morera, N. C., Quispe-Torres, D. R., Atalaya-Lopez, J. S., Macavilca-Villar, P. M., Ramírez-Aparicio, J. A., Salinas-Rivera, J. L., Escobar-Cuadros, F., Carbajal-Llosa, C. M., Olivarez-Rivera, E. L., Casaretto-Castagnino, D., y Ganoza-Roncal, J. J. (2025). *Atlas de las Estaciones Experimentales Agrarias del INIA*. Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA). <http://hdl.handle.net/20.500.12955/2763>
- Culman, S. W., Brock, C., Doohan, D., Jackson-Smith, D., Herms, C., Chaganti, V. N., Kleinhenz, M., Sprunger, C. D. y Spargo, J. (2021). Base cation saturation ratios vs. sufficiency level of nutrients: A false dichotomy in practice. *Agronomy Journal*, 113(6), 5623-5634. <https://doi.org/10.1002/ajg2.20787>
- 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>
- Gobierno Regional del Cusco. 2005. Zonificación Ecológica Económica Departamento del Cusco. <https://sinia.minam.gob.pe/documentos/zonificacion-ecologica-economica-zee-departamento-cusco>
- 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/>
- Hartemink, A.E., y Barrow, N.J. (2023). Soil pH - nutrient relationships: the diagram. *Plant and Soil*, 486, 209–215. <https://doi.org/10.1007/s11104-022-05861-z>
- 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>
- 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>
- Jaiswal, D. K., Verma, J. P., Prakash, S., Meena, V. S., y Meena, R. S. (2016). Potassium as an Important Plant Nutrient in Sustainable Agriculture: A State of the Art. In M. Vijay, V., M. Bihari, V. Jay y M. Ram. (eds), *Potassium Solubilizing Microorganisms for Sustainable Agriculture* (pp. 21-29). Springer. https://doi.org/10.1007/978-81-322-2776-2_2
- Kopittke, P. M., y Menzies, N. W. (2007). A review of the use of the basic cation saturation ratio and the “ideal” soil. *Soil Science Society of America Journal*, 71(2), 259–265. <https://doi.org/10.2136/sssaj2006.0186>

- Marino, M. A., y Echeverría, H. E. (2018). Umbral de requerimiento de fósforo en suelos Argiudoles y guía para la fertilización de alfalfa (*Medicago sativa* L.). *Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica*, 31, 7-18. <https://fertilizar.org.ar/wp-content/uploads/2021/09/Art-2.pdf>
- McLean, E. O. (1977). Contrasting concepts in soil test interpretation: Sufficiency levels of available nutrients versus basic cation saturation ratios. En T. R. Peck, J. T. Cope Jr., y D. A. Whitney (Eds.), *Soil testing: correlating and interpreting the analytical results* (pp. 39-54). ASA Special Publications. <https://doi.org/10.2134/asaspecpub29.c3>
- Meng, X., Bai, S., Wang, S., Pan, Y., Chen, K., Xie, K., Wang, M., y Guo, S. (2023). The sensitivity of photosynthesis to magnesium deficiency differs between rice (*Oryza sativa* L.) and cucumber (*Cucumis sativus* L.). *Frontiers In Plant Science*, 14, 1164866. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1164866>
- Moral-García, F. J. (2004). Aplicación de la geoestadística en las ciencias ambientales. *Ecosistemas*, 1(11). <https://revistaecosistemas.net/index.php/ecosistemas/article/view/582>
- Niebla-Torres, R. E., Barrezueta-Unda, S., Luna-Romero, Á., y Chabla-Carrillo, J. (2021). Aplicación de modelos geoestadísticos para definir la variabilidad de un perfil del suelo. *Revista Metropolitana de Ciencias Aplicadas*, 4(1), 188-195. <https://doi.org/10.62452/zx01j782>
- Pebesma, E. J., y Bivand, R. S. (2005). Classes and methods for spatial data in R. *R News*, 5(2), 9–13. <https://cran.r-project.org/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).
- Wang, C., y Kuzyakov, Y. (2024). Soil organic matter priming: The pH effects. *Global Change Biology*, 30(6). <https://doi.org/10.1111/gcb.17349>
- Yang, M., Zhou, D., Hang, H., Chen, S., Liu, H., Su, J., Lv, H., Jia, H. y Zhao, G. (2024). Effects of balancing exchangeable cations Ca, Mg, and K on the growth of tomato seedlings (*Solanum lycopersicum* L.) based on increased soil cation exchange capacity. *Agronomy*, 14(3), 1-13. <https://doi.org/10.3390/agronomy14030629>
- Zhang, G. Q. (1999). *Effects of exchangeable soil calcium, magnesium and calcium/magnesium ratios*

on plant nutrition and growth of lettuce on an ultisol [Thesis submitted to obtain the degree of Master of Science in Agronomy and Soil Science]. University of Hawai'i at Manoa. <http://hdl.handle.net/10125/56495>

Zhang X.C. y Norton L.D. (2002). *Effect of exchangeable Mg on saturated hydraulic conductivity, disaggregation and clay dispersion of disturbed soils*. <https://repository.geologyscience.ru/handle/123456789/27819>

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



Ver nuestro alcance
de acreditación



Ver nuestros servicios



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



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

ISBN: 978-9972-44-276-6



PERÚ

Ministerio
de Desarrollo Agrario
y Riego

inia

Instituto
Nacional de
Innovación
Agraria



@INIAPeru