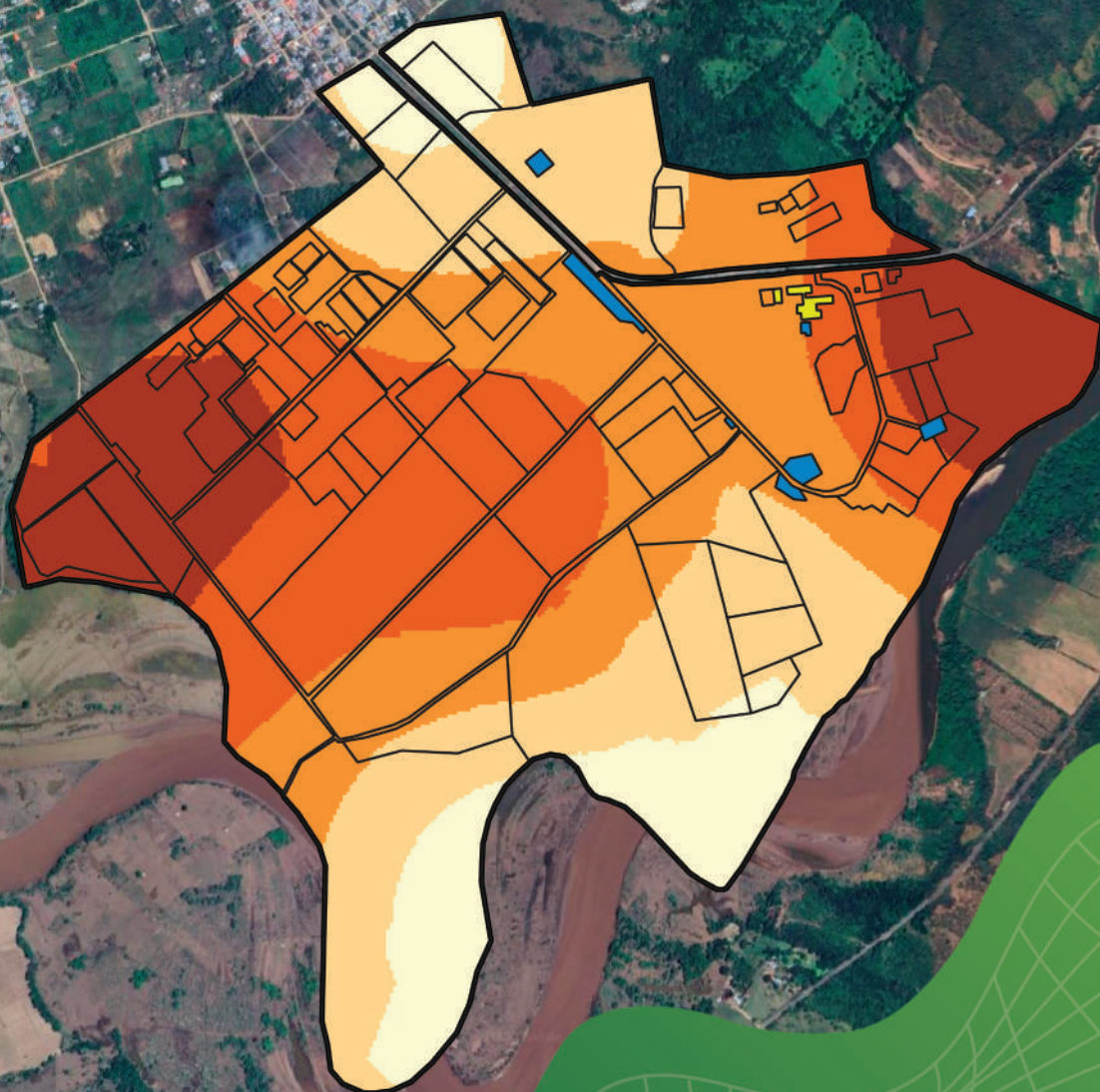


# Variación espacial de la fertilidad del suelo en la EEA El Porvenir



PERÚ

Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego



Instituto Nacional de Innovación Agraria



**T31**  
220N - 118K - 181P  
85Ca - 30Mg

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 El Porvenir



## VARIACIÓN ESPACIAL DE LA FERTILIDAD DEL SUELO EN LA EEA EL PORVENIR

### MINISTERIO DE DESARROLLO AGRARIO Y RIEGO

#### Ministro de Desarrollo Agrario y Riego

Vladimir Germán Cuno Salcedo

#### Viceministra de Políticas y Supervisión del Desarrollo Agrario

Carmen Inés Vegas Guerrero

#### Viceministro de Desarrollo de Agricultura Familiar e Infraestructura Agraria y Riego

Orlando Hernán Chirinos Trujillo

#### Presidente Ejecutivo del Instituto Nacional de Innovación Agraria

Jorge Juan Ganoza Roncal, M. Sc.

© Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA)

#### Primera edición digital:

Febrero, 2026

#### Publicado:

Febrero, 2026

#### Disponible en:

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

#### ISBN:

978-9972-44-245-2

#### Editado por:

Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA)

Av. La Molina 1981, Lima-Perú

Teléf. (511) 240-2400

[www.gob.pe/inia](http://www.gob.pe/inia)

#### Equipo Técnico de Edición y Publicaciones:

Janet Flores / Teléfono: 964173509 / Correo electrónico: [comite\\_publicaciones@inia.gob.pe](mailto:comite_publicaciones@inia.gob.pe)

Todos los derechos reservados.

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

Hecho el Depósito Legal en la Biblioteca Nacional del Perú N° 2026-01777

**Autores:** Kenyi R. Quispe-Matos, Carlos M. Carbajal-Llosa, Sharon Y. Mejia-Maita, Rodolfo J. Chuchon-Reimon, Ricky R. Reginaldo-Quispe, Albert E. Fernandez-Puquio, Henry Diaz-Chuquizuta, Geomar Vallejos-Torres, Moises L. Ascencio-Sanchez, 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

<b>Presentación</b>	<b>7</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>9</b>
<b>2. Principios fundamentales del análisis de suelos</b>	<b>11</b>
<b>2.1. Sistemas de interpretación del análisis de suelos</b>	<b>11</b>
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
<b>2.2. Análisis geoestadístico de las propiedades del suelo</b>	<b>23</b>
<b>3. Muestreo y análisis de suelos en la EEA El Porvenir</b>	<b>25</b>
<b>3.1. Ubicación de la EEA El Porvenir</b>	<b>25</b>
<b>3.2. Muestreo estratificado del suelo</b>	<b>26</b>
3.2.1. Determinación de los puntos de muestreo	27
3.2.2. Muestreo de suelos en los puntos identificados	28
<b>3.3. Análisis de suelos</b>	<b>29</b>
<b>3.4. Resultados de los análisis de suelos</b>	<b>30</b>
<b>3.5. Geoestadística: metodología para el mapeo de las propiedades del suelo</b>	<b>32</b>
<b>3.6. Análisis de autocorrelación espacial: cómputo del índice de Moran</b>	<b>33</b>
<b>3.7. Interpolación <i>kriging</i> y validación cruzada con indicadores geoestadísticos</b>	<b>33</b>
3.7.1. Generación y ajuste del variograma	33
3.7.2. Interpolación <i>kriging</i>	34
3.7.3. Validación cruzada	34
<b>3.8. Mapeo digital de las propiedades del suelo</b>	<b>36</b>
<b>4. Recomendaciones de manejo de la fertilidad del suelo en la EEA El Porvenir</b>	<b>49</b>
<b>4.1. Índice de saturación de bases catiónicas</b>	<b>49</b>
<b>4.2. Niveles de suficiencia de nutrientes disponibles</b>	<b>52</b>
<b>4.3. El pH del suelo</b>	<b>54</b>
<b>5. Referencias bibliográficas</b>	<b>57</b>



## 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.

La fertilidad del suelo presenta una distribución espacial heterogénea que influye en la productividad de los cultivos, el uso eficiente de insumos y la sostenibilidad de los sistemas agrícolas. Los análisis tradicionales basados en valores promedio o muestreos puntuales no describen adecuadamente esta variabilidad, lo que limita decisiones agronómicas precisas. El uso de herramientas geoestadísticas y de sistemas de información geográfica (SIG) permite analizar los patrones espaciales del suelo y orientar prácticas de manejo localizado y fertilización eficiente.

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

**M. Sc. Jorge Juan Ganoza Roncal**

Presidente Ejecutivo

Instituto Nacional de Innovación Agraria



# 1. Introducción

La degradación del suelo en la región tropical es una de las mayores amenazas para la sostenibilidad de las actividades agrícolas y la producción de alimentos. Este fenómeno se ve intensificado por actividades como el sobrepastoreo y otras prácticas agrícolas inadecuadas (de Valença, 2017), y la aceleración del cambio climático (Coaguila et al., 2025; Correa et al., 2016). En la región amazónica se observa una pérdida acelerada de cobertura vegetal, asociada a la tala ilegal, la agricultura migratoria y diversos factores socioeconómicos (Puertas et al., 2008, citando a Iturregui, 2007; Palm et al., 2005). Estudios recientes indican que los departamentos más afectados por esta pérdida son San Martín (19.42 %), seguido de Loreto (14.68 %) y Amazonas (12.30 %), pese a su elevada biodiversidad (Rojas-Briceño et al., 2019, citando a Ministerio del Ambiente, 2009, 2015; Llactayo, 2016).

La reducción de la cobertura vegetal ha desencadenado procesos de degradación edáfica, evidenciados por el deterioro de las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo (Puertas et al., 2008). En este contexto, el monitoreo de la fertilidad se vuelve indispensable para la planificación y gestión sostenible de la producción agrícola, así como para la corrección oportuna de deficiencias o excesos en los parámetros edáficos.

En este contexto, la falta de herramientas técnicas que permitan una interpretación espacial precisa de las propiedades fisicoquímicas del suelo limita la toma de decisiones en el manejo de la fertilización de los cultivos. Frente a esta problemática, se dispone de herramientas modernas como la interpolación *kriging*, el índice de Moran y el análisis de variogramas. Estas técnicas permiten diseñar estrategias de fertilización diferenciadas por zonas, lo que contribuye a mejorar la eficiencia en el uso de fertilizantes y a conservar la salud del suelo a largo plazo (Culman et al., 2021; Chinea-Horta y Rodríguez-Izquierdo, 2021).

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



## 2. Principios fundamentales del análisis de suelos

### 2.1. Sistemas de interpretación del análisis de suelos

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

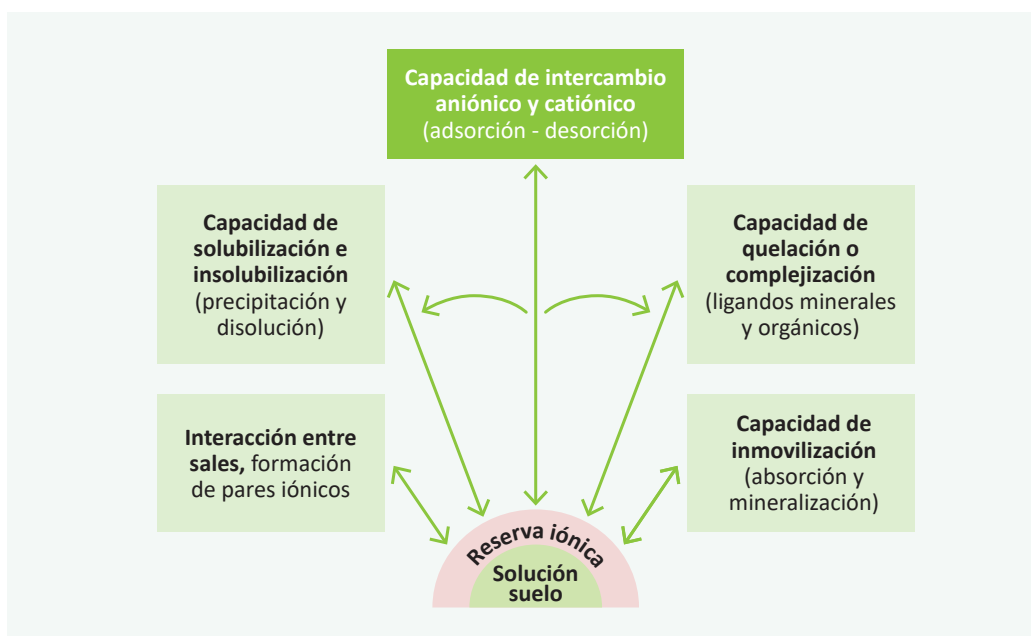
#### 2.1.1. Índice de saturación de bases catiónicas

##### 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 ( $\text{Ca}^{2+}$ ), magnesio ( $\text{Mg}^{2+}$ ), potasio ( $\text{K}^+$ ) y, en algunos casos, sodio ( $\text{Na}^+$ ), 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 El Porvenir 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 capacidad de intercambio catiónico (CIC) del suelo y la productividad de los cultivos (Culman et al., 2021). Albrecht, basado en estudios realizados en suelos agrícolas de Misuri, propuso que un balance adecuado entre calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ), magnesio ( $\text{Mg}^{2+}$ ) y potasio ( $\text{K}^+$ ) mejora la estructura del suelo, la disponibilidad de nutrientes y el desarrollo radicular de las plantas (Chaganti y Culman, 2017). Su hipótesis argumenta que una desviación de los valores óptimos de las proporciones catiónicas en la solución suelo, limita la absorción de nutrientes de los cultivos, debido a que un desequilibrio entre los iones en solución afecta los mecanismos que regulan la reactividad y disponibilidad de los nutrientes del suelo. Estos mecanismos reguladores del equilibrio iónico se ilustran en la Figura 1. Se considera que sólo una pequeña fracción de los nutrientes que requieren las plantas se encuentran en la solución suelo o en alguna forma reactiva. Además, este esquema sostiene que cada mecanismo es un reservorio iónico (Quispe-Matos et al., 2025).

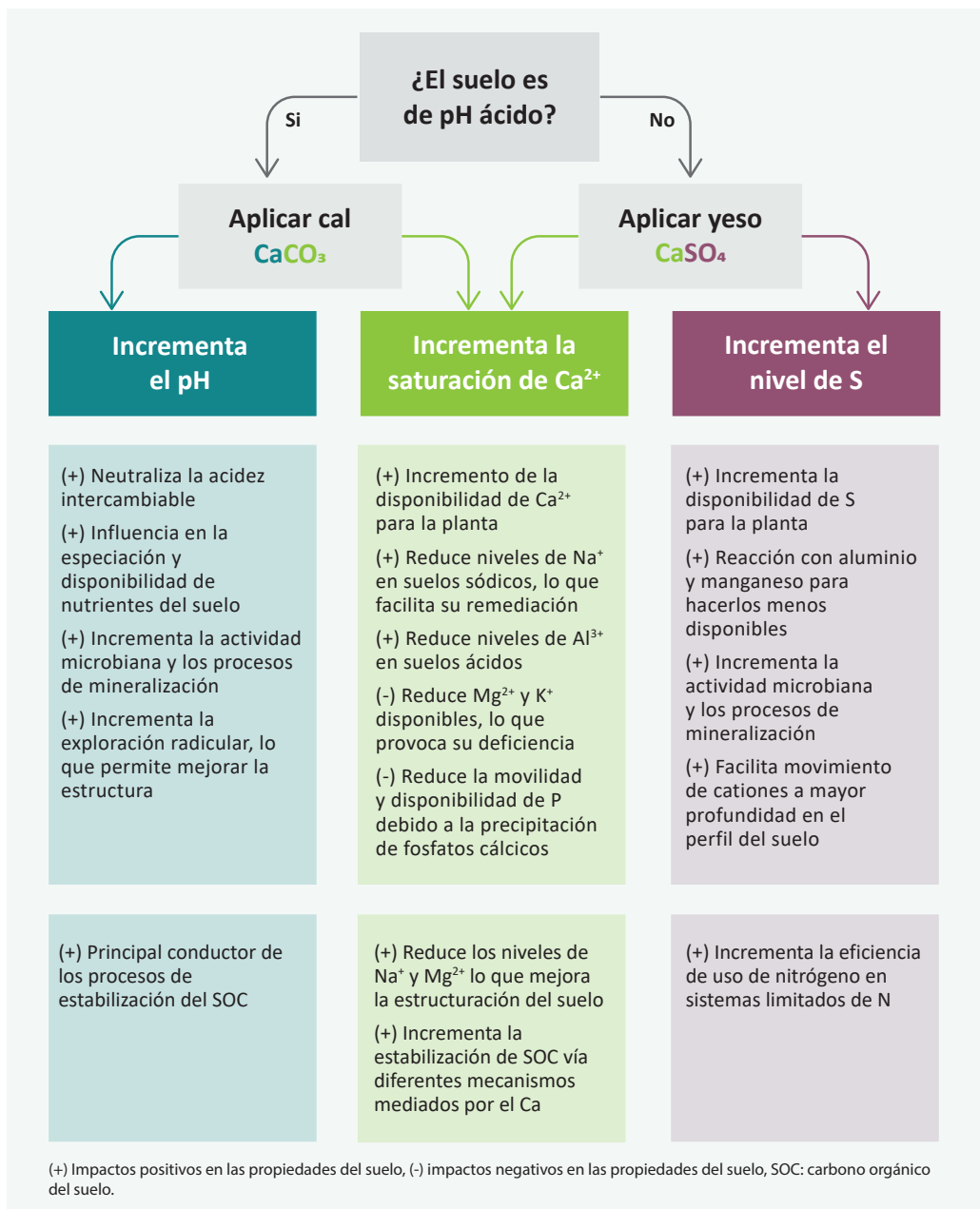


**Figura 1.** Mecanismos que mantienen en equilibrio los iones en la solución suelo (adaptado de McLean, 1977)

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

En décadas recientes, diferentes investigaciones han comparado la efectividad del BCSR con el sistema de suficiencia de nutrientes (SLAN), evidenciando que en muchos casos la disponibilidad absoluta de nutrientes es un mejor predictor del rendimiento de los cultivos que la proporción relativa de cationes (Brock et al., 2021). Sin embargo, en suelos con alta CIC ( $> 8 \text{ cmol kg}^{-1}$ ), bajos contenidos de carbonatos, altos niveles de lixiviación o desbalances extremos de bases, el BCSR sigue siendo una herramienta útil para el diagnóstico de fertilidad y la corrección de desequilibrios iónicos (Quispe-Matos et al., 2025).

El pH del suelo es una de las variables más importantes en la toma de decisiones agronómicas, ya que permite identificar la necesidad de corregir desbalances iónicos. Este parámetro determina si se requiere la aplicación de cal o yeso agrícola para contrarrestar el exceso de  $\text{Al}^{3+}$  o  $\text{Na}^+$ , respectivamente. Ambos insumos contienen alto contenido de calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ) y son las principales herramientas para aumentar la saturación de  $\text{Ca}^{2+}$  y reducir la de  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$  y  $\text{Al}^{3+}$ . 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  $\text{Ca}^{2+}$  o aumento de los niveles de azufre (S) (Espinosa y Molina, 1999). El criterio de uso y las respuestas en el suelo se ilustran en la Figura 2.

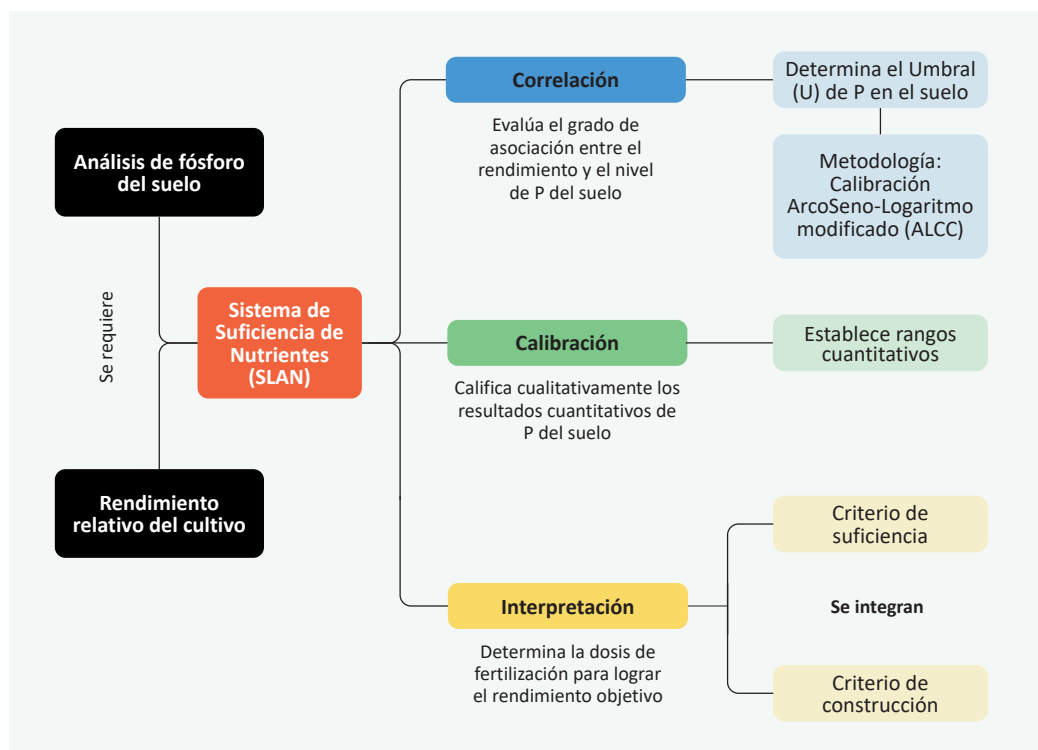


**Figura 2.** Criterios de uso de la cal y el yeso y su respuesta en la relación de saturación de cationes básicos (adaptado de Culman et al., 2021)

## 2.1.2. Sistema de suficiencia de nutrientes

### a. Concepto

El concepto de sistema de suficiencia de nutrientes (SLAN, por sus siglas en inglés) se basa en una expresión matemática general de la Ley de rendimientos decrecientes, según la cual el aumento del rendimiento de un cultivo por unidad de nutriente disponible disminuye a medida que el nivel de nutriente disponible se acerca al nivel de suficiencia o umbral crítico (McLean, 1977). Esta teoría, aunque presenta sustento científico, también ha sido criticada debido a que no contempla la interacción entre nutrientes y los problemas estructurales del suelo. Sin embargo, es una herramienta fundamental para la interpretación de análisis de suelo. Para su aplicación práctica, el diagnóstico de la fertilidad mediante el SLAN requiere de tres etapas: la correlación, calibración y la interpretación de los análisis de suelos, que se describen en la Figura 3 (Quispe-Matos et al., 2025).



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

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

Además, para calcular el requerimiento 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 del suelo indica un contenido alto de nutrientes, cercano al umbral crítico; su uso considera únicamente la reposición del nutriente extraído por el cultivo, dado que se encuentra en forma fácilmente disponible (García y Ciampitti, 2010).

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

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

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

### Ejemplo práctico:

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

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

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

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

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

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

**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.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

A partir de estos resultados, se interpreta que el criterio de suficiencia estima un requerimiento de 30.05 kg de P para alcanzar un rendimiento objetivo de 28.35 t ha<sup>-1</sup>, el cual está conformado por 7.35 t ha<sup>-1</sup> de raíces, y 21 t ha<sup>-1</sup> 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 al criterio de mantenimiento y construcción, se aplica cuando el nutriente se encuentra en niveles muy bajos en el suelo. El objetivo no es sólo cubrir la extracción de nutriente por el cultivo y ajustar según su eficiencia, sino también incrementar o construir progresivamente el nivel del nutriente en el suelo hasta alcanzar valores cercanos al nivel crítico, asegurando así una fertilidad sostenida en el tiempo. Alternativamente, el criterio de construcción se puede aplicar para complementar los requerimientos de nutrientes estimados para la fertilización de suficiencia y mantenimiento (García y Ciampitti, 2010).

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

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

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

## Ejemplo práctico (Criterio de mantenimiento)

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

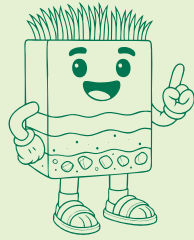
$$\text{Requerimiento de P} = \frac{17.17 \text{ kg de P ha}^{-1}}{0.30} = 57.2 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

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

## Ejemplo práctico (criterio de mantenimiento y construcción)

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

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



### Nota:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$\text{RM de P} = \frac{8.58 \text{ kg de P ha}^{-1}}{0.20} = 42.9 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

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

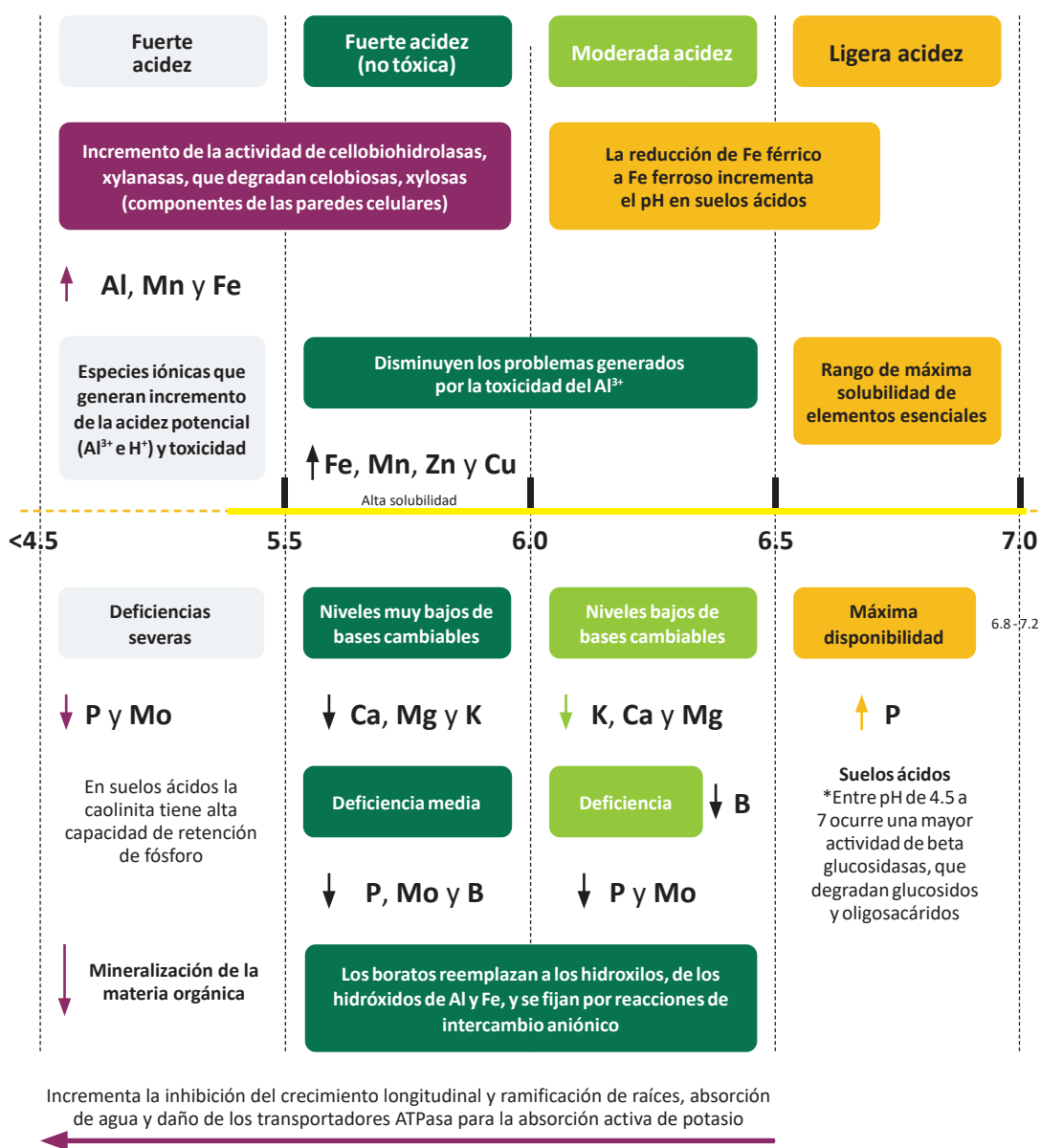
$$\text{Dosis de fertilización de P} = RM + RC \quad \dots(8)$$

$$\text{Dosis de fertilización de P} = 42.93 \text{ kg de P ha}^{-1} + 13.5 \text{ kg de P ha}^{-1} = 56.4 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

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



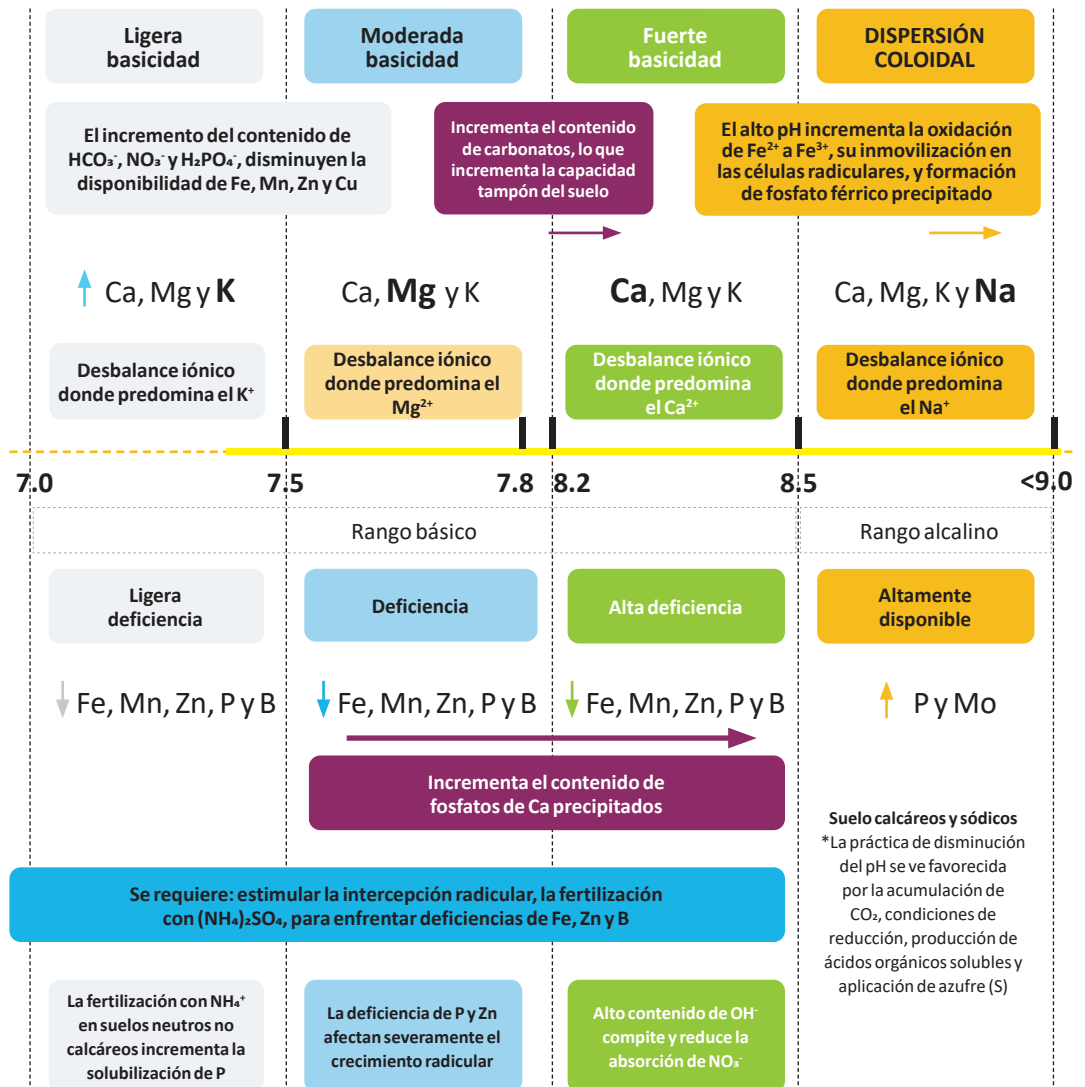


Figura 4. Diagnóstico de la fertilidad del suelo en función al pH

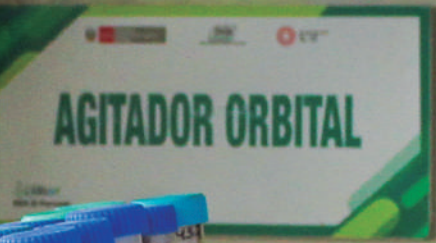
## 2.2. Análisis geoestadístico de las propiedades del suelo

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.



AGITADOR ORBITAL



## 3. Muestreo y análisis de suelos en la EEA El Porvenir

### 3.1. Ubicación de la EEA El Porvenir

La EEA El Porvenir se caracteriza por presentar suelos de tipo Cambisol eútrico y Vertisol eútrico, formados a partir de sedimentos aluviales antiguos, residuos de arcillas, areniscas y lutitas. (Instituto Nacional de Recursos Naturales [INRENA], 1996). Cuenta con un centro experimental y dos predios urbanos, con una extensión total de 308.43 ha, siendo los cultivos priorizados: el arroz (*Oryza sativa* L.), el achiote (*Bixa orellana* L.), el piñón (*Jatropha curcas* L.), el sacha inchi (*Plukenetia volubilis* L.), el maíz (*Zea mays* L.) y el cacao (*Theobroma cacao* L.), entre otros cultivos.

En la estación se realizan trabajos de 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 San Martín. La EEA El Porvenir se encuentra en el departamento de San Martín, provincia San Martín, distrito Juan Guerra (Figura 5) dentro de la región natural Selva Baja u Omagua a 330 m s. n. m. con precipitaciones anuales de hasta 2000 mm y temperaturas medias anuales que varían entre los 24 a 32 °C (Cruz-Luis et al., 2025).

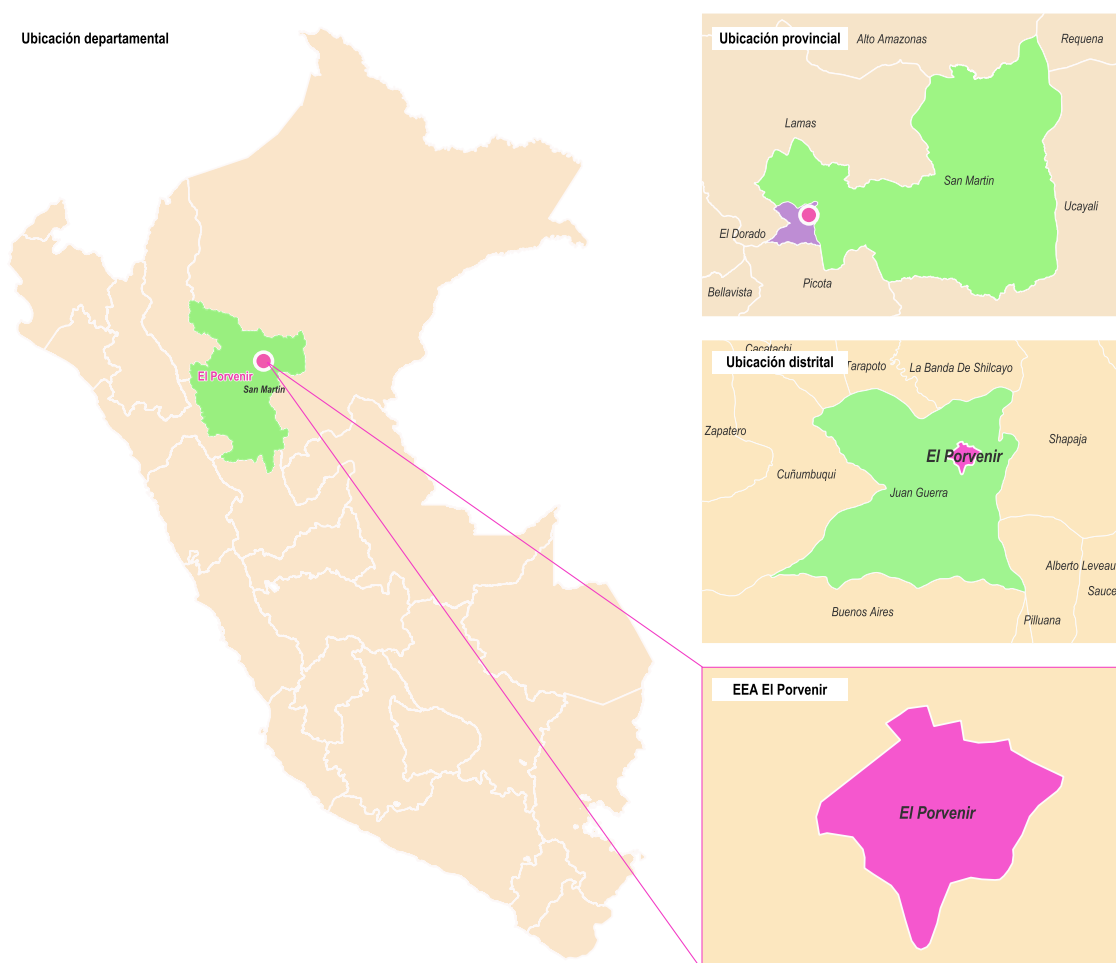


Figura 5. Ubicación de la EEA El Porvenir

### 3.2. Muestreo estratificado del suelo

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

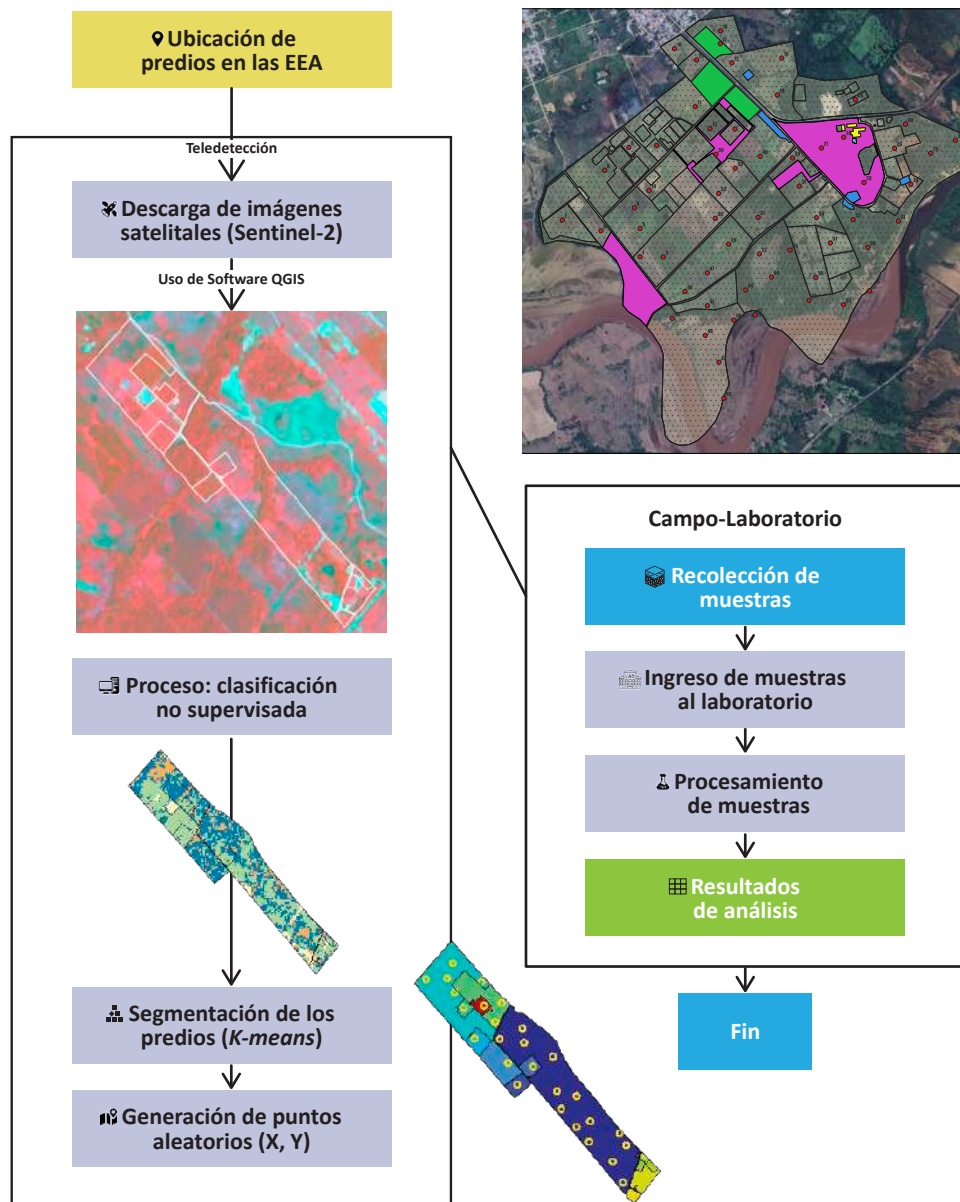


Figura 6. Flujo de trabajo para la determinación de los puntos de muestreo

### 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. De esta manera, se estableció un total de 60 puntos de muestreo de suelos (Figura 7).

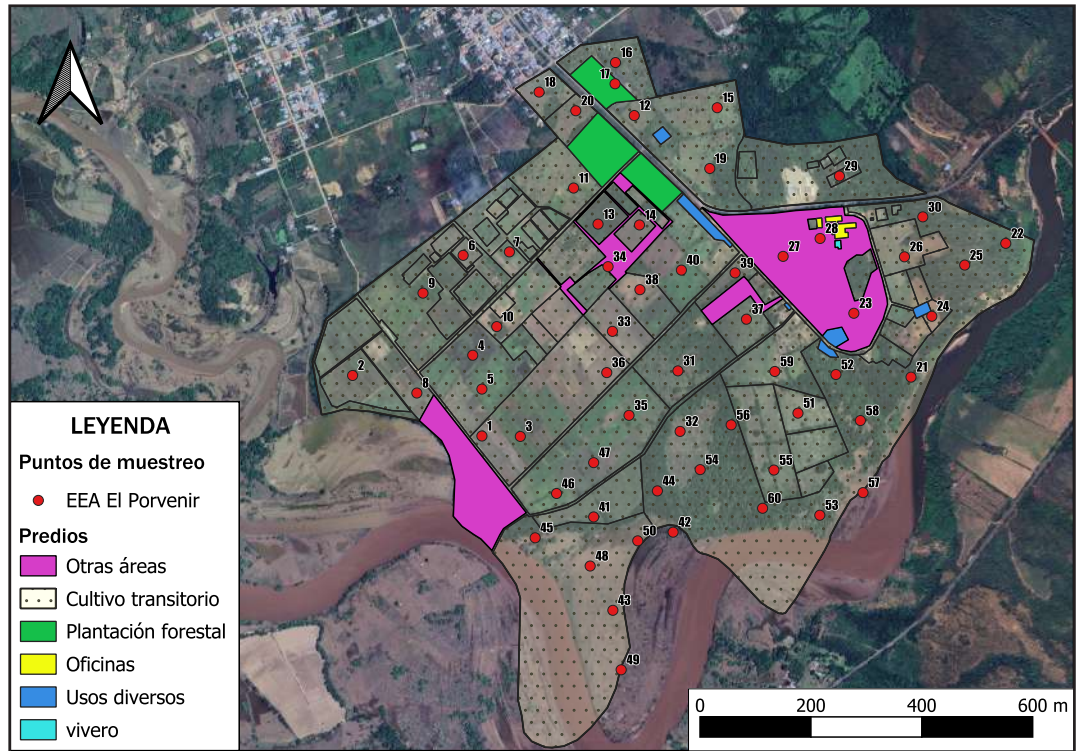


Figura 7. Puntos de muestreo de suelos en la EEA El Porvenir

### 3.2.2. Muestreo de suelos en los puntos identificados

Una vez identificadas las coordenadas de los 60 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. Entre una y la otra colocar la cartilla de identificación.



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

### 3.3. Análisis de suelos

Una vez obtenidas las muestras de suelos, estas deben ser llevadas a un laboratorio de análisis preferentemente con métodos acreditados. En este trabajo, las muestras fueron llevadas al Laboratorio de Suelos, Aguas y Foliare de la EEA El Porvenir para su procesamiento. El secado de las muestras a 35 °C por 48 horas fue el primer pretratamiento realizado. 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)
N total	ISO 11261: determinación de Nitrógeno Total por Kjeldahl Modificado	ISO (1995)
P disponible	Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000. Método Olsen	SEMARNAT (2002)
K disponible	Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000	SEMARNAT (2002)
Bases intercambiables	Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000. Extracción con acetato de amonio	SEMARNAT (2002)

### 3.4. Resultados de los análisis de suelos

Los resultados de la Tabla 2 revelan que el suelo de la EEA El Porvenir se caracteriza, en promedio, por una textura arcillosa (33.33 % arena, 24.03 % limo y 42.64 % arcilla), con una variabilidad alta en sus componentes texturales (CV arena = 41 %, limo = 42 %, arcilla = 40 %), lo que evidencia una notable heterogeneidad en la fracción granulométrica. Esta variabilidad podría estar influenciada por diferencias topográficas y de material parental.

Con respecto a las propiedades químicas, el pH del suelo es ligeramente ácido a neutro (media =  $7.26 \pm 0.59$ ), con una distribución moderadamente variable (CV = 8 %), indicando condiciones químicas estables en general, aunque con presencia de zonas más ácidas (mínimo = 5.91) que podrían afectar la disponibilidad de fósforo, nitrógeno y molibdeno. La conductividad eléctrica (CE =  $1.55 \text{ dS m}^{-1} \pm 1.41$ ) es baja en promedio, pero presenta un coeficiente de variación alto (CV = 90.98 %), lo cual sugiere la existencia de sectores puntuales con acumulaciones salinas (máximo =  $8.87 \text{ dS m}^{-1}$ ), posiblemente vinculadas a drenaje deficiente o aportes localizados de sales. El contenido de materia orgánica ( $2.67 \% \pm 0.91$ ; CV = 34 %) es moderado, aunque con alta dispersión, lo cual podría reflejar diferencias en el manejo de la fertilización orgánica o el tipo de cobertura vegetal. El nitrógeno total presenta un comportamiento similar ( $0.13 \% \pm 0.05$ ; CV = 38 %), mostrando una alta correlación esperada con la materia orgánica. Los niveles de fósforo disponible ( $16.02 \text{ mg kg}^{-1} \pm 8.73$ ; CV = 54 %) y potasio disponible ( $339.63 \text{ mg kg}^{-1} \pm 189.61$ ; CV = 56 %) presentan una alta variabilidad, evidenciando la existencia de *hotspots* posiblemente derivados de aplicaciones localizadas de fertilizantes o diferencias en el contenido de arcilla y materia orgánica, que afectan la retención de estos nutrientes.

En cuanto a los cationes intercambiables, al comparar con umbrales críticos de cultivos extensivos en la región de influencia de la EEA El Porvenir, como el café y el cacao, se observa lo siguiente: el calcio intercambiable ( $\text{Ca}^{2+} = 9.68 \text{ cmol kg}^{-1}$ ) supera ampliamente el umbral mínimo de  $6 \text{ cmol kg}^{-1}$  requerido para un óptimo desarrollo tanto en café como en cacao, situándose en rango óptimo para la mayoría de los suelos agrícolas. El magnesio intercambiable ( $\text{Mg}^{2+} = 0.78 \text{ cmol kg}^{-1}$ ) queda por debajo del umbral crítico de  $1.2 \text{ cmol kg}^{-1}$  para cafeto (y de  $1.0 \text{ cmol kg}^{-1}$  para cacaotero), lo que indica una potencial deficiencia, especialmente relevante en plantaciones de café donde puede limitar el crecimiento y la calidad del grano. El potasio intercambiable ( $\text{K}^+ = 0.48 \text{ cmol kg}^{-1}$ ) supera los valores críticos de  $0.35 \text{ cmol kg}^{-1}$  para café y  $0.25 \text{ cmol kg}^{-1}$  para cacao, garantizando una adecuada provisión de este nutriente esencial. Por su parte, el sodio intercambiable ( $\text{Na}^+ = 0.11 \text{ cmol kg}^{-1}$ ) debería mantenerse por debajo de  $0.10 \text{ cmol kg}^{-1}$  para evitar riesgo de sodicidad; el valor promedio ligeramente superior y un máximo de  $0.50 \text{ cmol kg}^{-1}$  sugieren la necesidad de monitoreo y, de ser necesario, la aplicación localizada de enmiendas a base de yeso para proteger la estructura del suelo y la permeabilidad.

La capacidad de intercambio catiónico efectiva (CICE =  $11.05 \text{ cmol kg}^{-1} \pm 4.20$ ) es moderada, y su distribución también muestra alta variabilidad (CV  $\approx 38$  %), lo que puede estar asociado a la variación en el contenido de arcilla y materia orgánica, componentes clave en esta propiedad.

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

**Tabla 2.** Estadísticos descriptivos de los parámetros fisicoquímicos del suelo analizados en la EEA El Porvenir

Variable	Unidad	Media	SD	Var	CV	Skewness	Mínimo	Máximo
Arena	%	33.33	13.68	187.06	41.04	0.55	12.56	68.56
Limo	%	24.03	10.12	102.32	42.09	1.23	10.00	52.00
Arcilla	%	42.64	16.96	287.76	39.78	-0.11	13.44	71.44
pH	und	7.26	0.59	0.34	8.06	-0.62	5.91	8.10
CE	dS m <sup>-1</sup>	1.55	1.41	2.00	90.98	2.93	0.35	8.87
MO	%	2.67	0.91	0.84	34.25	0.08	0.76	4.55
N total	%	0.13	0.05	0.00	34.40	0.13	0.04	0.23
P disp.	mg kg <sup>-1</sup>	16.02	8.73	76.18	54.47	1.18	3.95	39.77
K disp.	mg kg <sup>-1</sup>	339.63	189.61	35 952.81	55.83	0.14	0.70	684.62
Ca <sup>2+</sup>	cmol kg <sup>-1</sup>	9.68	3.77	14.20	38.94	0.93	3.56	19.49
Mg <sup>2+</sup>	cmol kg <sup>-1</sup>	0.78	0.76	0.58	97.33	2.13	0.09	4.06
K <sup>+</sup>	cmol kg <sup>-1</sup>	0.48	0.25	0.06	52.33	0.16	0.07	0.93
Na <sup>+</sup>	cmol kg <sup>-1</sup>	0.11	0.12	0.01	109.46	1.27	0.00	0.50
ClCe	cmol kg <sup>-1</sup>	11.05	4.20	17.62	37.98	0.83	3.97	22.05
PCI	%	87.75	7.19	51.70	8.19	-1.03	64.99	96.86
PMI	%	6.68	5.39	29.08	80.67	2.03	1.62	27.95
PPI	%	4.56	2.42	5.84	53.00	0.58	0.66	12.49
PSI	%	1.00	1.12	1.26	111.78	1.59	0.03	4.84

CE: conductividad eléctrica en extracto de saturación, MO: materia orgánica del suelo, P disp.: fósforo disponible, K disp. potasio disponible, ClCe: 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, Var: varianza.

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

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

#### Requisitos previos para el mapeo:

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

#### Procedimiento:

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

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

#### Procedimiento:

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

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

Donde:

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

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

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

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

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

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

#### 3.7.1. Generación y ajuste del variograma

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

### 3.7.2. Interpolación *kriging*

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

### 3.7.3. Validación cruzada

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

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

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

Donde:

n: el número de muestras.

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

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

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

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

Donde:

n: el número de muestras.

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

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

Los resultados de la validación cruzada de las variables fisicoquímicas del suelo se presentan en la Tabla 3. Las propiedades del suelo con mayor grado de ajuste entre los valores observados y predichos son la materia orgánica (RMSE = 0.02 y  $R^2 = 0.76$ ), el nitrógeno total (RMSE = 0 y  $R^2 = 0.75$ ), el  $K^+$  intercambiable (RMSE = 0 y  $R^2 = 0.78$ ), el  $Mg^{2+}$  intercambiable (RMSE = 0.01 y  $R^2 = 0.83$ ), CICE (RMSE = 4.96 y  $R^2 = 0.9$ ) y bases totales (RMSE = 4.96 y  $R^2 = 0.75$ ), los cuales indican un alto grado de predictibilidad espacial de esas propiedades del suelo y que la interpretación y planes de fertilización derivados a partir de esas características pueden replicarse en zonas no muestreadas.

**Tabla 3.** Modelos de semivariograma para las propiedades del suelo de la EEA El Porvenir

Variable	Modelo	Nugget ( $C_0$ )	Sill ( $C_0+C$ )	Range (m)	Cross-validation	
					RMSE	$R^2$
Arena	<i>Spherical</i>	50.89	202.75	1 427.97	2297.09	0.84
Limo	<i>Exponential</i>	4.26	208.28	1427.97	3081.6	0.79
Arcilla	<i>Gaussian</i>	172.28	279.81	950.72	13 730.84	0.37
pH	<i>Exponential</i>	0	0.31	306.59	0.03	0.04
CE	<i>Linear to Sill</i>	0.01	0	1181.04	0	0.35
MO	<i>Linear to Sill</i>	0.53	0.89	784.73	0.02	0.76
N total	<i>Exponential</i>	0	0	902.48	0	0.75
P disponible	<i>Gaussian</i>	41.22	43.45	1437.31	38.93	0.09
$K^+$	<i>Linear to sill</i>	0.04	0.07	1067.24	0	0.78
$Ca^{2+}$	<i>Gaussian</i>	10.39	13.94	1052.28	26.37	0.26
$Na^+$	<i>Exponential</i>	0.01	0.01	864.09	0.00	0.31
$Mg^{2+}$	<i>Spherical</i>	0.05	0.33	1262.2	0.01	0.83
CICE	<i>Gaussian</i>	10.16	17.89	1426.69	4.96	0.9
Bases totales	<i>Gaussian</i>	10.16	17.89	1426.69	4.96	0.75
Sat. Al	<i>Spherical</i>	0.23	1.58	991.71	1.23	0.49

CE: conductividad eléctrica en extracto de saturación, MO: materia orgánica del suelo, CICE: capacidad de intercambio catiónico efectiva, Sat. Al : saturación de aluminio, RMSE: raíz del error cuadrático medio,  $R^2$ : coeficiente de determinación.

### 3.8. Mapeo digital de las propiedades del suelo

Las propiedades del suelo se han representado en los respectivos mapas interpolados (Figuras 9-20), las cuales muestran la variación espacial de las características físicas y químicas de los suelos de la EEA El Porvenir. Asimismo, entre las propiedades del suelo evaluadas, las características relacionadas con la saturación de bases catiónicas como el  $Mg^{2+}$  y el  $K^+$  intercambiable, alcanzaron un mayor grado de ajuste entre los valores observados y predichos, siendo estos los de mayor predictibilidad espacial en un rango de 1262.20 y 1067.24 m, respectivamente.

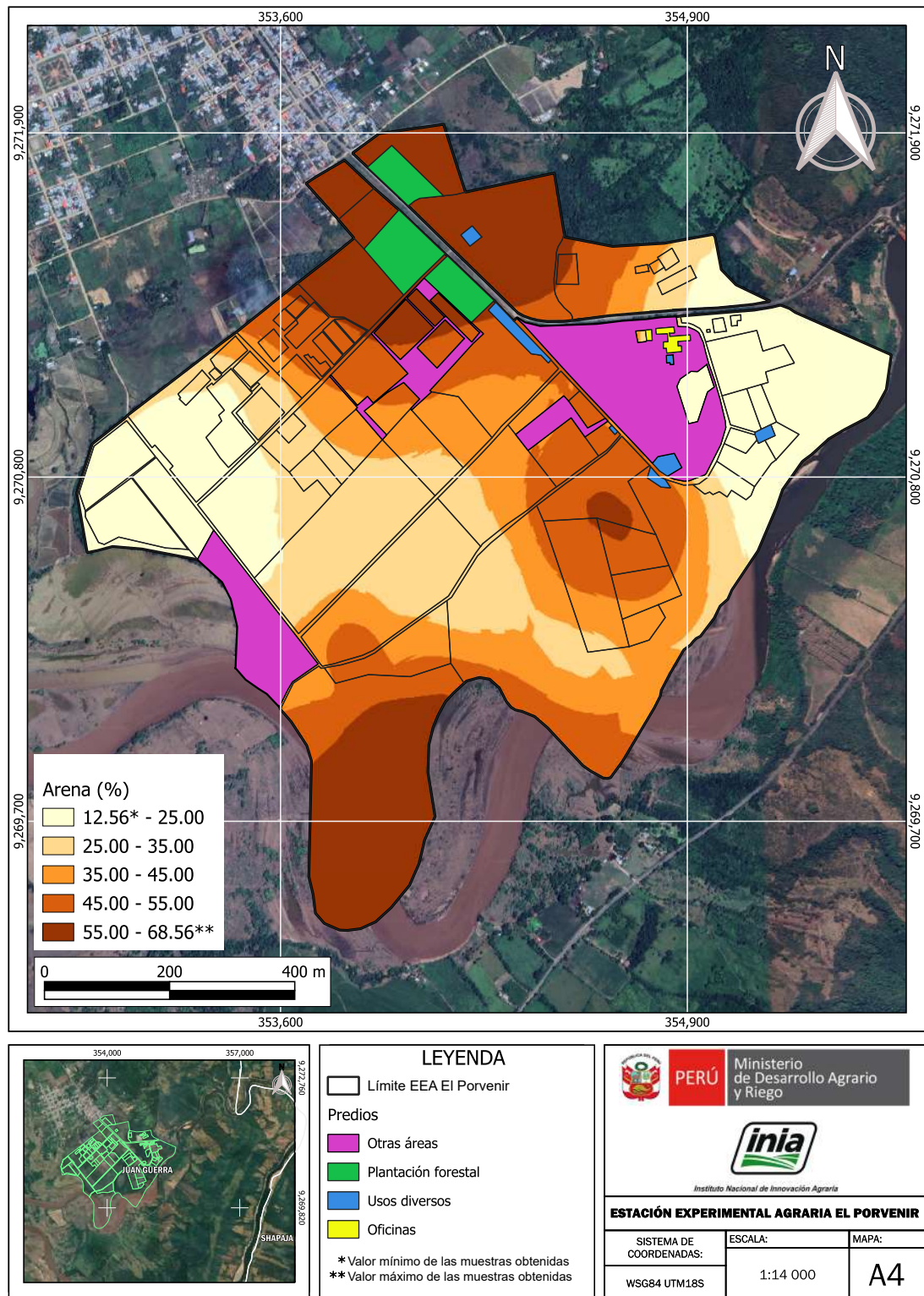


Figura 9. Mapa de variación espacial del porcentaje de arena

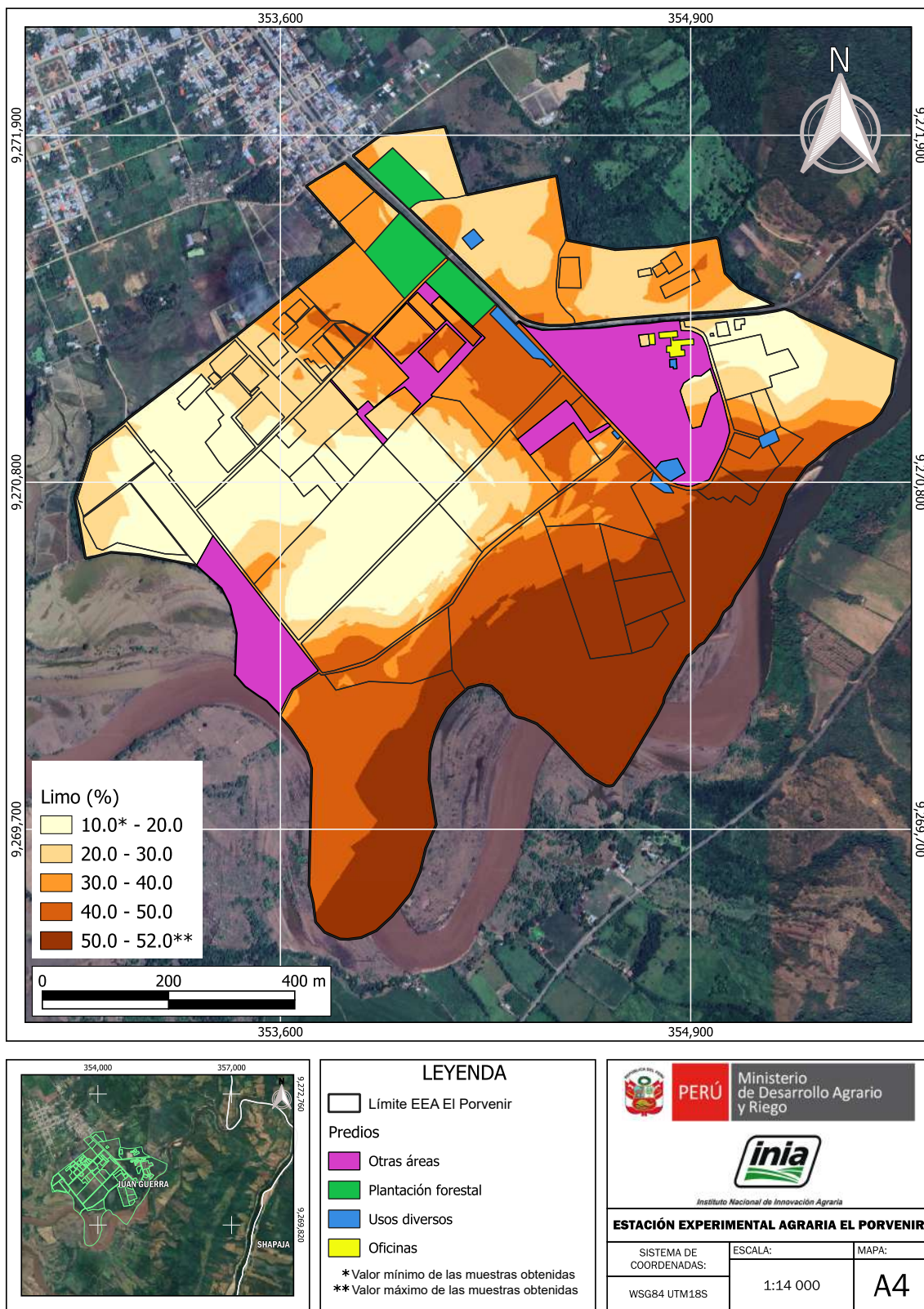


Figura 10. Mapa de variación espacial del porcentaje de limo

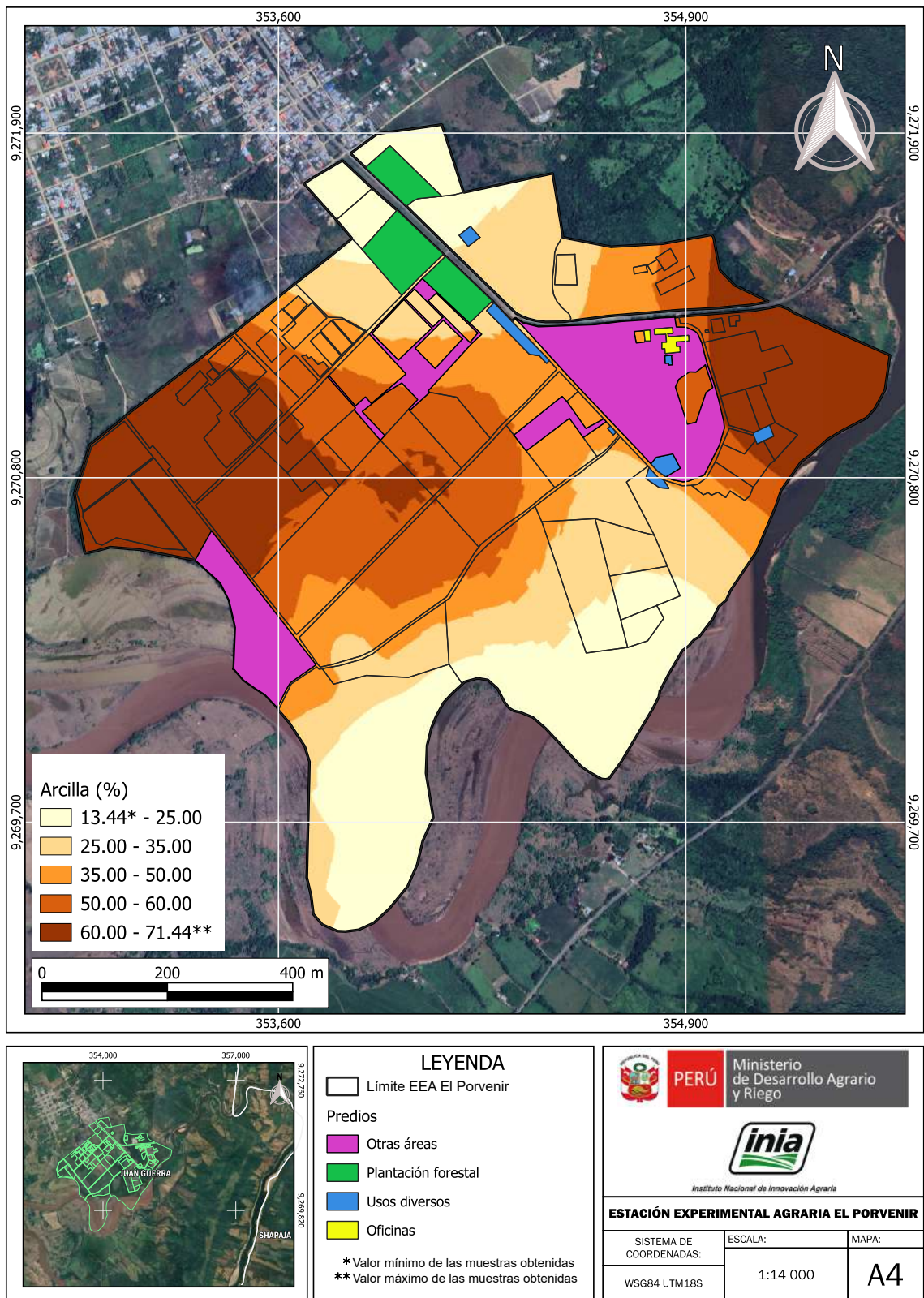


Figura 11. Mapa de variación espacial del porcentaje de arcilla

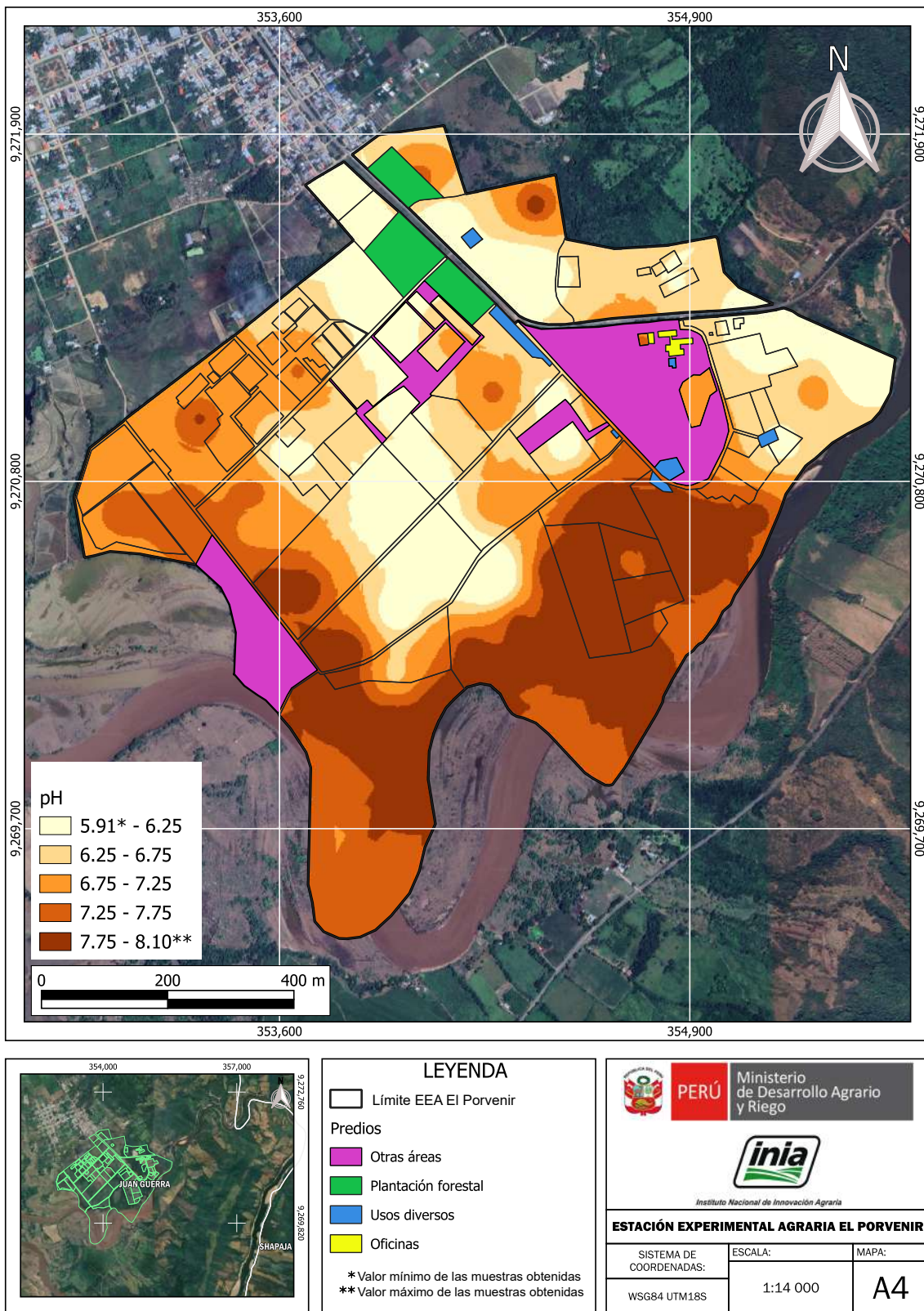


Figura 12. Mapa de variación espacial del pH

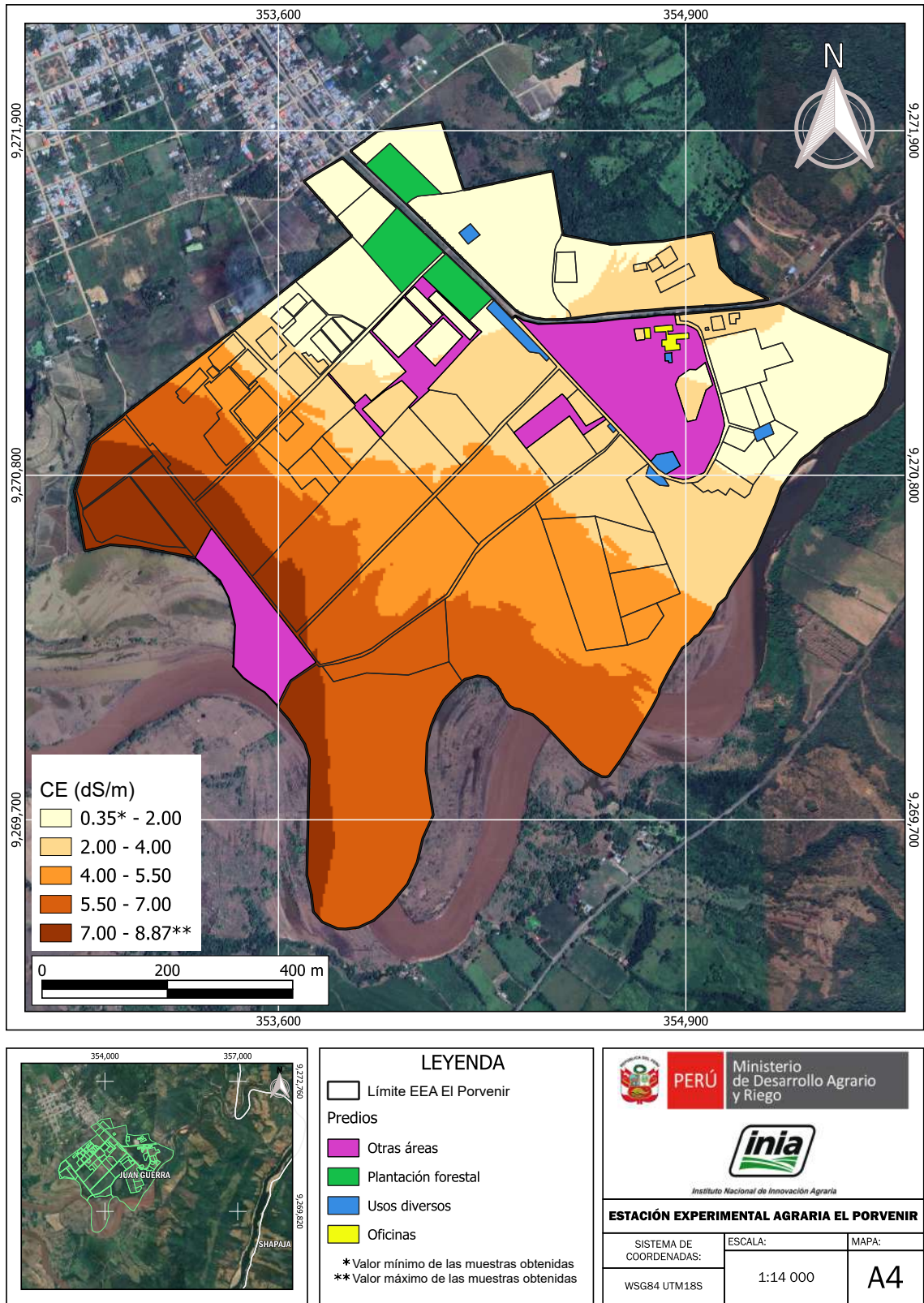


Figura 13. Mapa de variación espacial de la conductividad eléctrica

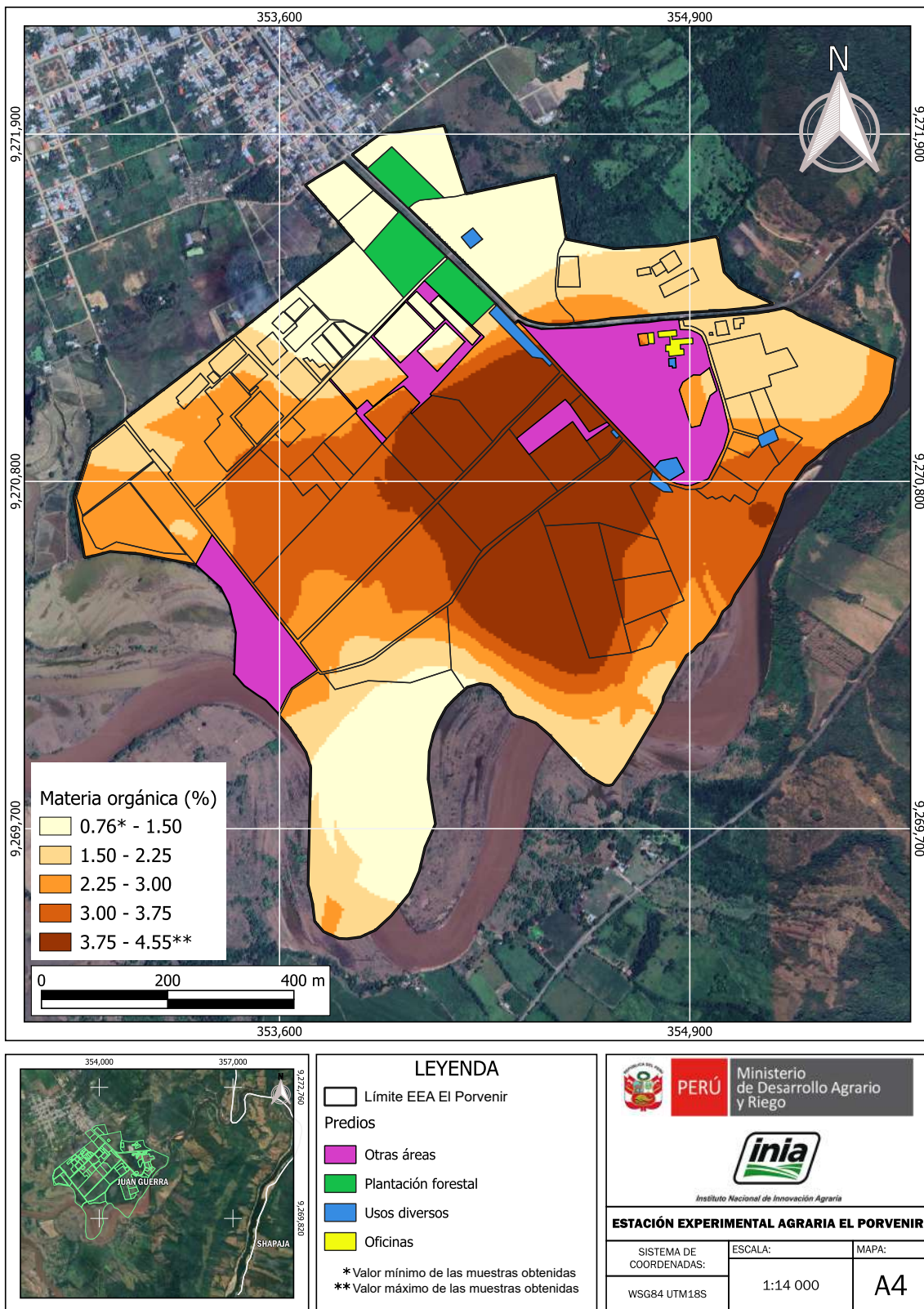


Figura 14. Mapa de variación espacial del porcentaje de materia orgánica

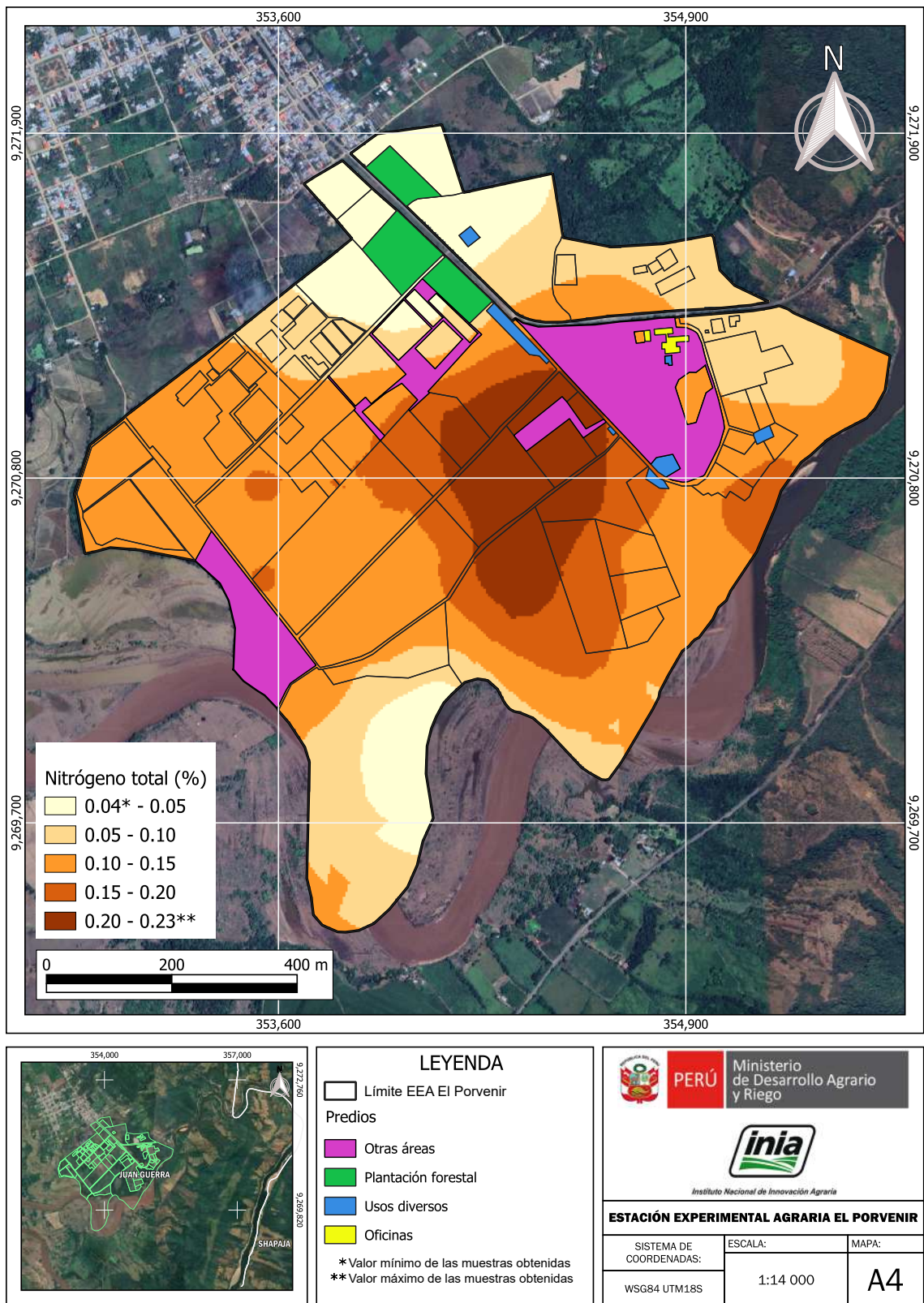


Figura 15. Mapa de variación espacial del porcentaje de nitrógeno total

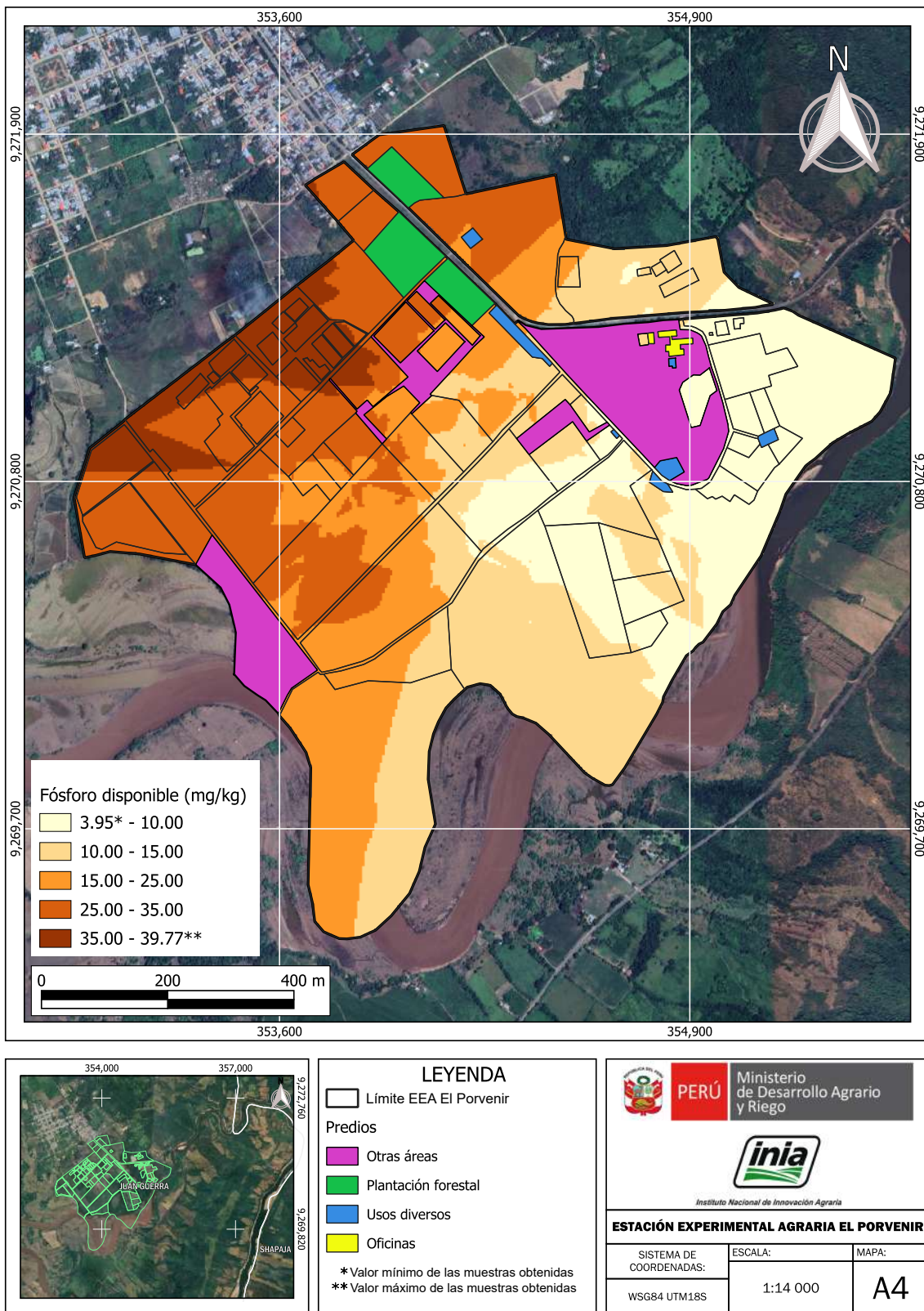


Figura 16. Mapa de variación espacial del fósforo disponible

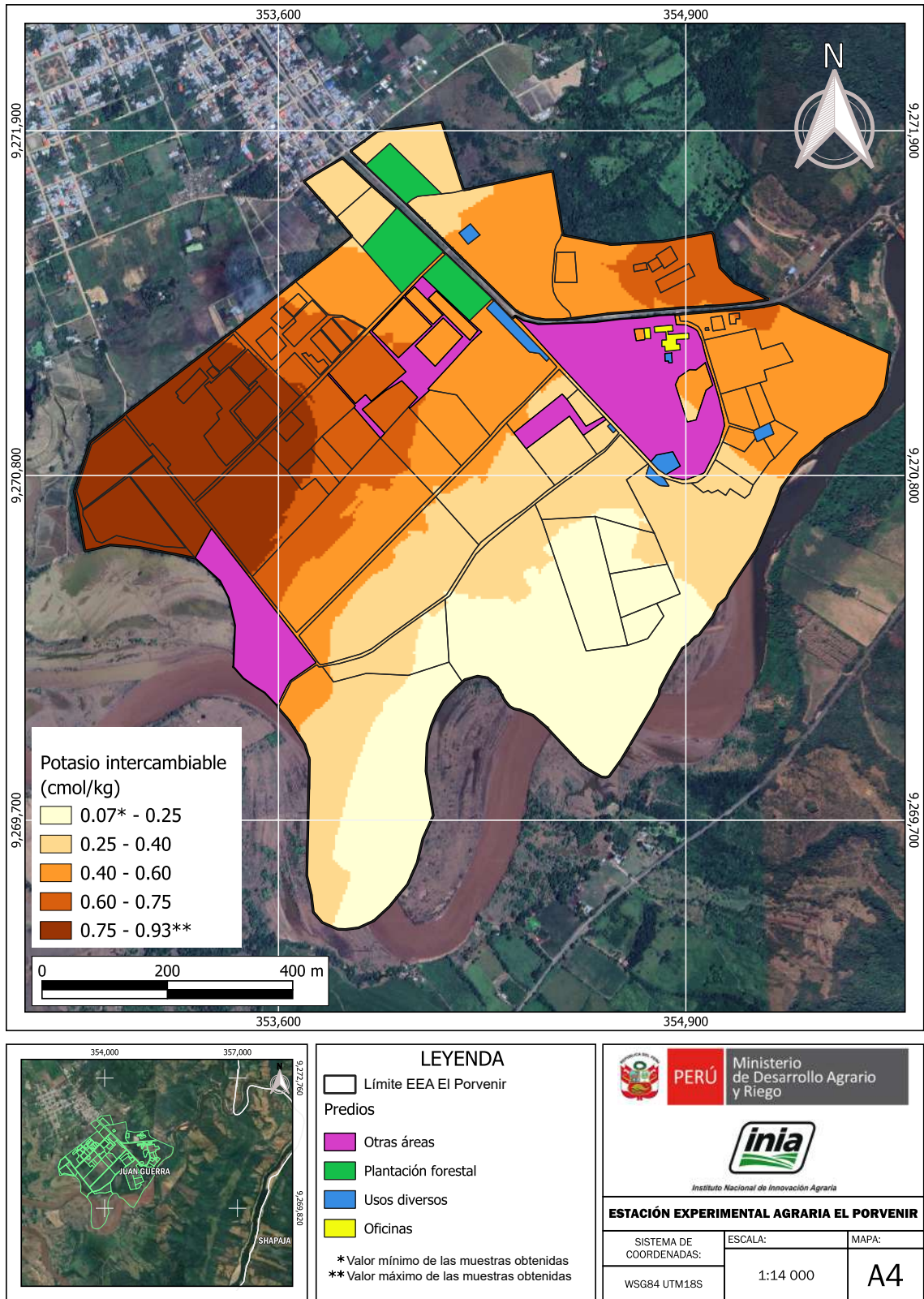


Figura 17. Mapa de variación espacial del potasio (K<sup>+</sup>) intercambiable

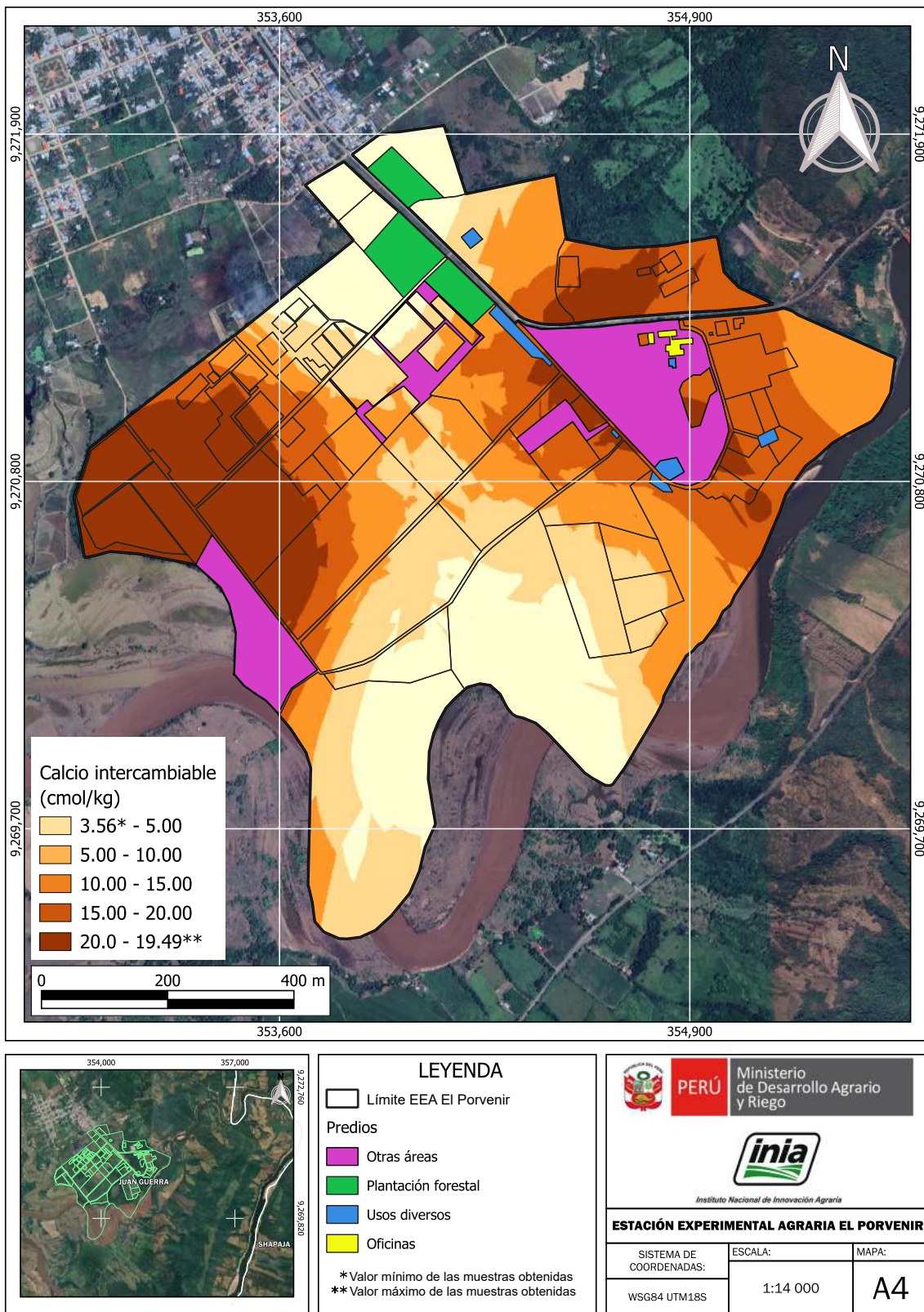


Figura 18. Mapa de variación espacial del calcio ( $Ca^{2+}$ ) intercambiable

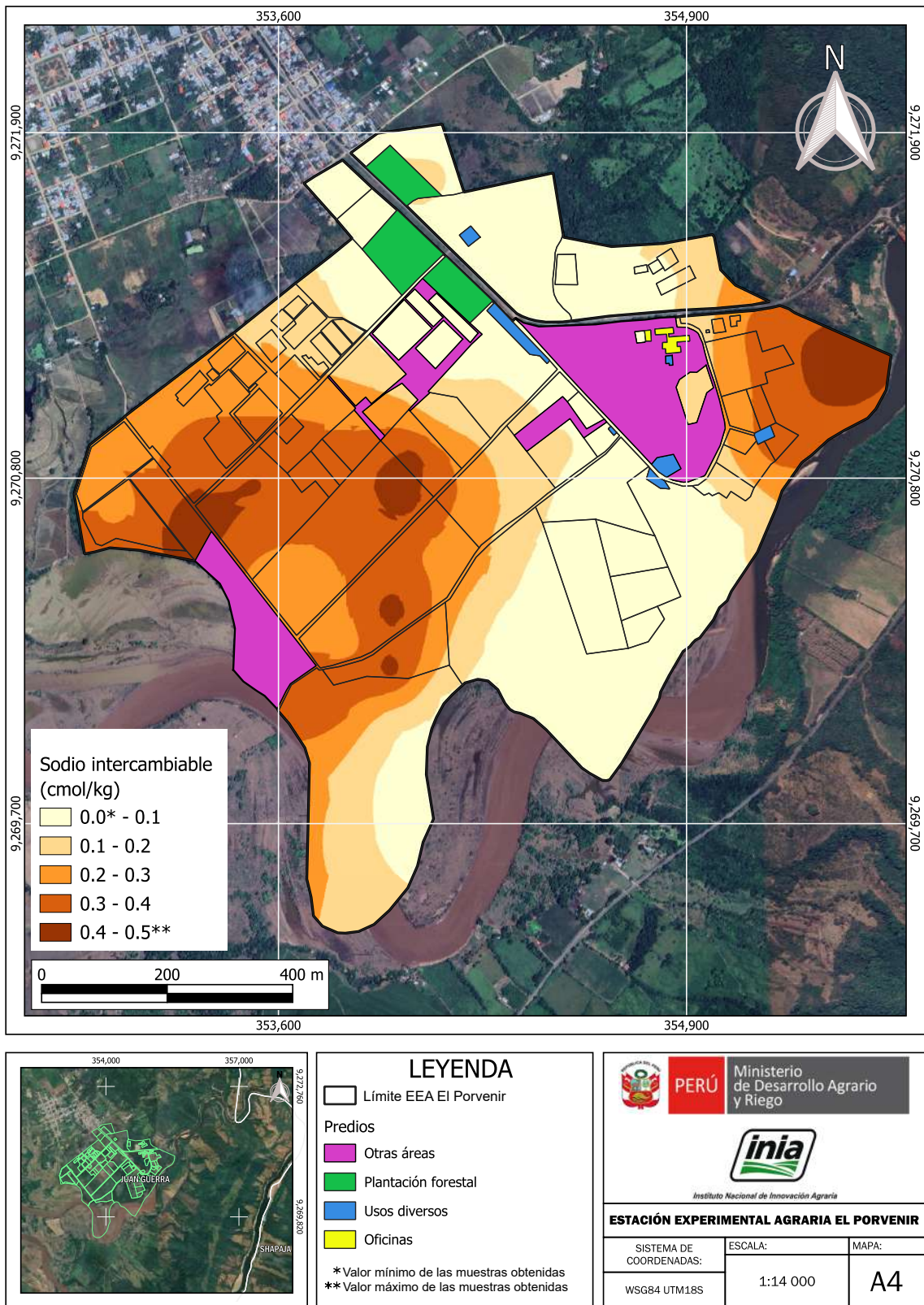


Figura 19. Mapa de variación espacial de sodio (Na<sup>+</sup>) intercambiable

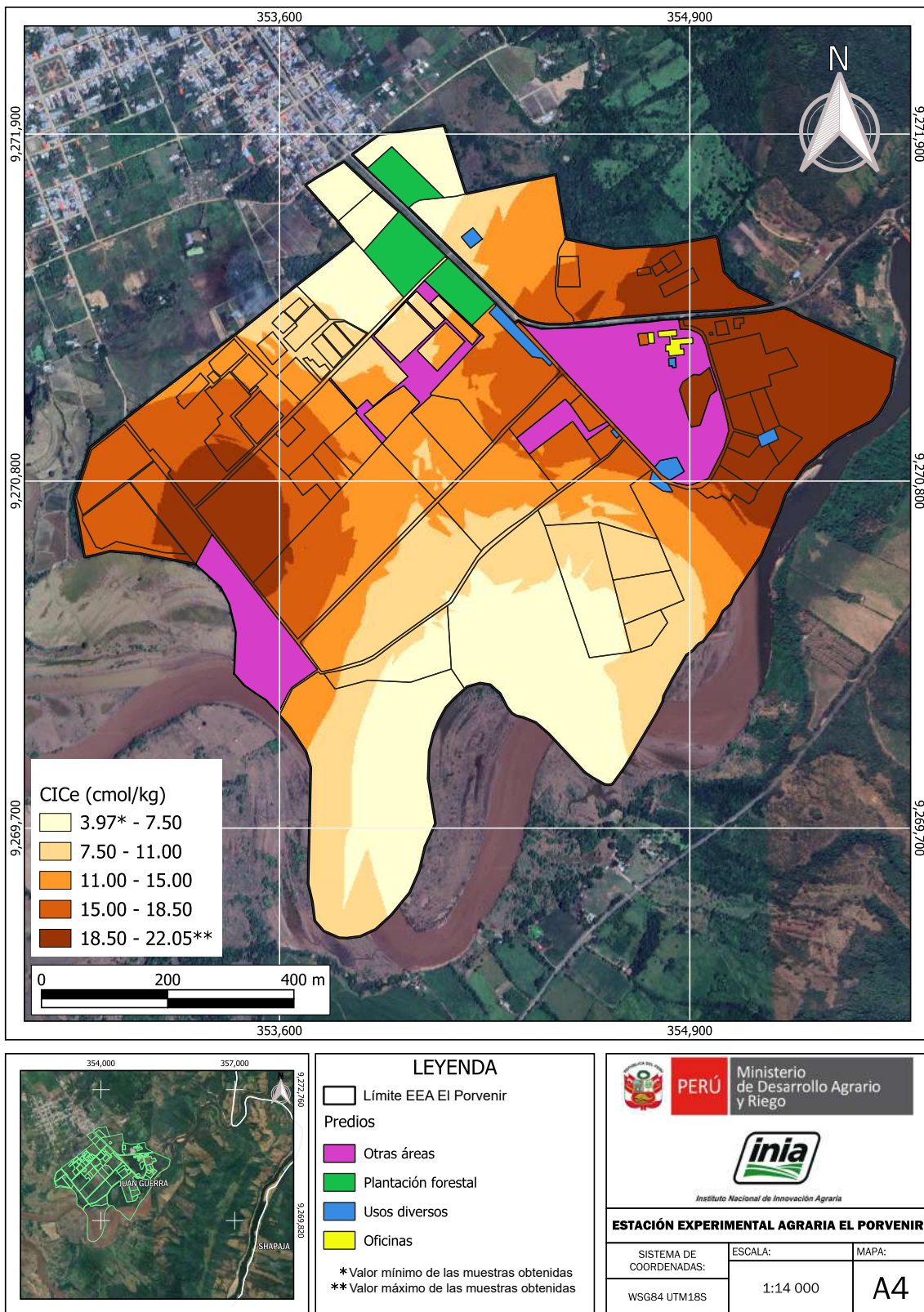
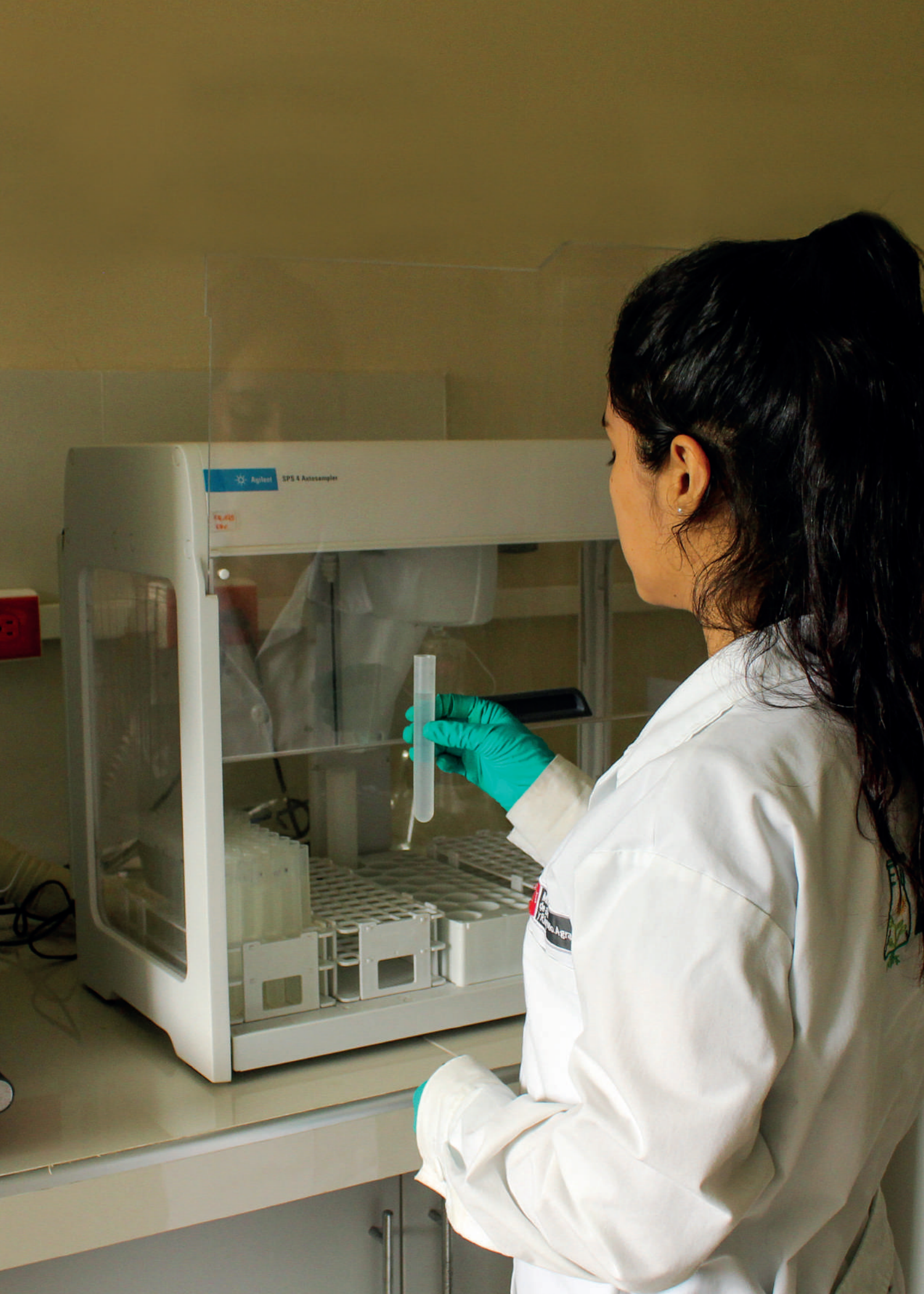


Figura 20. Mapa de variación espacial de la capacidad de intercambio catiónico efectiva (CICe)



## 4. Recomendaciones de manejo de la fertilidad del suelo en la EEA El Porvenir

### 4.1. Índice de saturación de bases catiónicas

Desde la perspectiva edafológica del modelo BCSR, el equilibrio relativo entre los cationes básicos en el complejo de intercambio ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ) es un determinante clave para la nutrición vegetal y la fertilidad química del suelo. En la EEA El Porvenir, el patrón dominante corresponde a una saturación catiónica fuertemente desplazada hacia el  $\text{Ca}^{2+}$ , con un porcentaje de saturación promedio de 87.75 %. Esta cifra sobrepasa ampliamente el rango considerado óptimo para el  $\text{Ca}^{2+}$  dentro del modelo BCSR (60 a 70 %), lo que genera un ambiente de competencia catiónica desfavorable, particularmente para el magnesio ( $\text{Mg}^{2+}$ ).

La fracción de  $\text{Mg}^{2+}$  intercambiable (PMI) presenta una media de apenas 6.68 %, lo que la sitúa por debajo del umbral mínimo de referencia (10-20 %) para un balance funcional en el complejo de cambio. Este bajo porcentaje, sumado al elevado coeficiente de variación ( $\text{CV} = 80.67 \%$ ) y a una fuerte asimetría positiva ( $\text{skewness} = 2.03$ ), refleja una distribución desigual del  $\text{Mg}^{2+}$  en el perfil edáfico con sectores donde su deficiencia relativa es crítica (Figura 21). Las relaciones catiónicas derivadas reafirman esta condición de desbalance. La relación  $\text{Ca/Mg}$  (CM) tiene un valor medio de 23.05, muy por encima del rango funcional recomendado (3-10). Esto implica un desequilibrio de dominancia cálcica, donde el  $\text{Mg}^{2+}$  es desplazado activamente de los sitios de intercambio y sufre exclusión competitiva en la rizosfera.

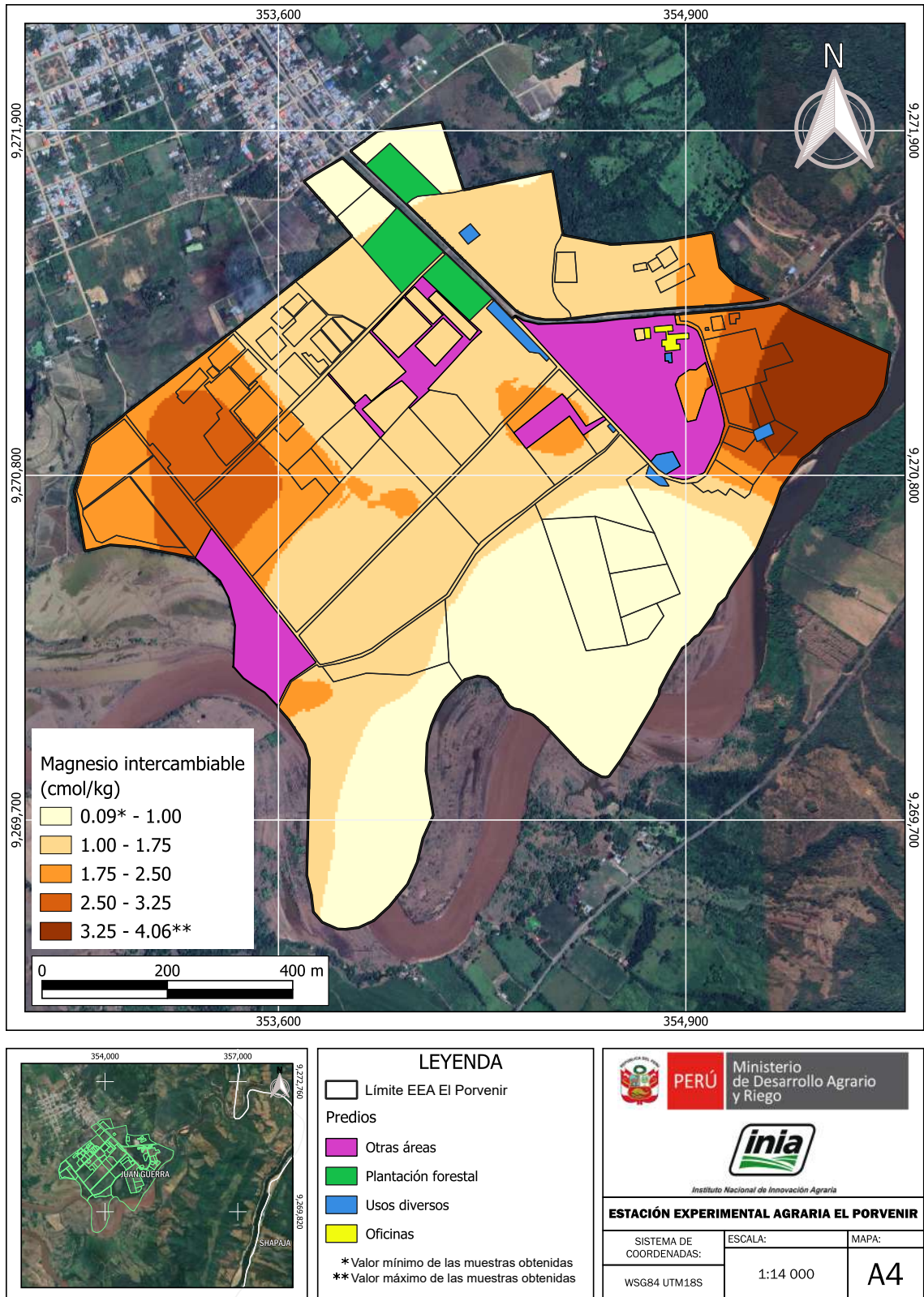


Figura 21. Mapa de variación espacial del magnesio ( $Mg^{2+}$ ) intercambiable

Tal como se señala en la Tabla 3, el análisis geoestadístico del  $Mg^{2+}$  intercambiable evidencia una estructura espacial definida y con alto potencial predictivo. El modelo ajustado fue de tipo esférico, con un *nugget* ( $C_0$ ) de 0.05 y un *sill* ( $C_0 + C$ ) de 0.33, lo que indica que sólo el 15.15 % de la variabilidad total es atribuida al error no estructurado o micro variabilidad, mientras que el 84.85 % corresponde a dependencia espacial significativa. Este comportamiento sugiere que el contenido de  $Mg^{2+}$  no varía al azar, sino que está condicionado por factores edáficos regionales como la textura, la CIC efectiva, y la distribución del calcio.

El rango de autocorrelación espacial (1262.2 m) revela que las zonas con contenidos similares de  $Mg^{2+}$  pueden extenderse a lo largo de más de un kilómetro, lo que justifica el uso de interpolación espacial (*kriging* ordinario) para la elaboración de mapas de prescripción de fertilización o ajuste de enmiendas. Además, la calidad del modelo fue alta, con un  $R^2 = 0.83$  y un RMSE = 0.01 muy bajo, lo que confirma su confiabilidad para fines predictivos en la EEA El Porvenir.

Este patrón contrasta con otros elementos catiónicos como el  $Na^+$  o el  $K^+$ , que mostraron una estructura espacial más débil o difusa. En el caso del  $Mg^{2+}$ , su variabilidad espacial está fuertemente relacionada con los gradientes de textura (especialmente con los contenidos de arcilla) y con la distribución de los niveles de  $Ca^{2+}$  intercambiable, que condicionan su retención y movilidad. Es importante destacar que, a pesar de la presencia de una estructura espacial definida, la deficiencia relativa de  $Mg^{2+}$  sigue siendo dominante en la mayoría de las unidades de muestreo, lo que refuerza la necesidad de su monitoreo y corrección agronómica.

En conclusión, la geoestadística confirma que, en los suelos de la EEA El Porvenir, el  $Mg^{2+}$  no sólo se encuentra en desventaja catiónica frente al  $Ca^{2+}$  en términos de saturación, sino que además su distribución espacial es suficientemente estructurada como para ser modelada con precisión. Esto habilita el desarrollo de mapas de variabilidad espacial del PMI que pueden integrarse en esquemas de manejo sitio específico, facilitando la aplicación diferenciada de fertilizantes magnésicos y mejorando la eficiencia del sistema nutricional general.

## 4.2. Niveles de suficiencia de nutrientes disponibles

En ambientes edáficos alcalinos como los de la EEA El Porvenir, la disponibilidad del fósforo (P) se ve fuertemente condicionada por procesos de precipitación química con  $\text{Ca}^{2+}$ , catión dominante en el complejo de intercambio. Esta interacción favorece la formación de compuestos insolubles como fosfato tricálcico e incluso apatitas, que limitan drásticamente la presencia de formas disponibles de P para las plantas, especialmente el  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ , que es la principal especie iónica absorbida a pH cercano a la neutralidad. Dada la alta saturación cálcica (PCI = 87.75 %) observada en estos suelos, el fósforo enfrenta una constante inmovilización edáfica, incluso cuando los niveles totales pudieran ser adecuados.

Desde la perspectiva del modelo SLAN, lo relevante es cuantificar la fracción del P en forma disponible, más allá del contenido total. En este estudio, tal como se muestra en la Tabla 2, el fósforo disponible (extraído por Olsen) presentó una media de  $16.02 \text{ mg kg}^{-1}$ , con un coeficiente de variación (CV) del 54.47 %, lo que revela una alta heterogeneidad espacial y sugiere diferencias importantes en la capacidad de abastecimiento nutricional en distintas zonas del terreno. El valor de la mediana ( $14.43 \text{ mg kg}^{-1}$ ) indica que al menos la mitad de las unidades muestreadas se encuentran en niveles cercanos o por debajo del umbral crítico de suficiencia para la mayoría de los cultivos ( $20 \text{ mg kg}^{-1}$ ). Esta situación es preocupante en el contexto de cultivos frutales como el café y el cacao, cuyo desarrollo radicular y expresión reproductiva dependen fuertemente de un suministro continuo de fósforo asimilable.

Como se muestra en la Tabla 3, el comportamiento geoestadístico del fósforo disponible muestra una estructura espacial débil, con un modelo ajustado de tipo gaussiano, pero con escasa continuidad espacial efectiva. El *nugget* ( $C_0$ ) fue de 41.22 y el *sill* ( $C_0 + C$ ) de 43.45, lo que implica que el 94.9 % de la variación total es atribuible al error no estructurado o 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 la acumulación de residuos orgánicos, microambientes de humedad o diferencias en manejo previo de fertilización.

El rango de autocorrelación espacial (1437.31 m) es extenso, pero su relevancia práctica es limitada debido a la baja capacidad predictiva del modelo ( $R^2 = 0.09$ ) y un RMSE relativamente alto (38.93). 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 del suelo sitio-específicos, preferentemente a escala de lote o sublote, evitando extrapolaciones espaciales imprecisas.

En este caso, se tomará como ejemplo el valor P-Olsen de  $14.43 \text{ mg kg}^{-1}$  (mediana) para la estimación de la fertilización de mantenimiento y construcción en el cultivo de cacao, el cuál presenta un umbral crítico de P-Olsen de  $25 \text{ mg kg}^{-1}$  y un rendimiento potencial de  $2 \text{ t ha}^{-1}$ . El análisis de correlación y calibración indica que el nivel obtenido de  $14.43 \text{ mg}$  de P-Olsen por  $\text{kg}$  de suelo permite obtener un rendimiento relativo (RR) del 60 %.

**Primer paso:** calcular el rendimiento con  $14.43 \text{ mg}$  de P-Olsen por  $\text{kg}$  de suelo, utilizando la fórmula 2.

$$\text{Rendimiento alcanzado} = \frac{60 \times 2 \text{ t ha}^{-1}}{100} = 1.2 \text{ t ha}^{-1}$$

**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.

$$\text{Rendimiento objetivo} = 0.42 \text{ t ha}^{-1} + 1.2 \text{ t ha}^{-1} = 1.62 \text{ t ha}^{-1}$$

**Cuarto paso:** calcular el requerimiento de P utilizando la fórmula 5. Para este cálculo y con fines prácticos se considera una extracción de 4 kg de fósforo por tonelada de producción.

$$\text{Requerimiento de P} = 4 \text{ kg de P t}^{-1} \times 1.62 \text{ t ha}^{-1} = 6.48 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

**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 25 %.

$$\text{RM de P} = \frac{6.48 \text{ kg de P ha}^{-1}}{0.25} = 25.92 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

**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 6 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.

$$\text{RC} = \frac{1.5 \text{ mg de P kg}^{-1} \times 6 \text{ kg de P ha}^{-1}}{1 \text{ mg de P kg}^{-1}} = 9 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

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

$$\text{Dosis de fertilización de P} = 25.92 \text{ kg de P ha}^{-1} + 9 \text{ kg de P ha}^{-1} = 34.92 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

Con esta dosis de P, se estimó una dosis de aplicación anual de 153.79 kg ha<sup>-1</sup> de fosfato monoamónico (MAP), considerando una riqueza del 52 % de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> en este fertilizante. Esta dosis contempla tanto el requerimiento fisiológico del cultivo como una fracción adicional para incrementar los niveles de fósforo disponible en el suelo. Además, dada la naturaleza inmóvil del fósforo en el perfil edáfico, se recomienda fraccionar esta dosis durante toda la campaña agrícola, mejorando así la eficiencia de absorción en las fases fenológicas críticas del cultivo.

### 4.3. El pH del suelo

En la EEA El Porvenir, el pH de los suelos presenta una media de  $7.26 \pm 0.59$ , con un rango observado entre 5.91 y 8.10. El coeficiente de variación ( $CV = 8.06 \%$ ) indica que, aunque existe cierta heterogeneidad, la dispersión de los valores de pH es relativamente baja. La asimetría negativa ( $-0.62$ ) sugiere una ligera concentración de lecturas por encima de la media, y la *kurtosis* de  $-0.78$  describe una distribución algo más extendida en sus colas de lo habitual, sin *outliers*. El percentil 25 (6.81), mediana (7.49) y el percentil 75 (7.73) confirman que la mayoría de las muestras se agrupan entre 7.4 y 7.8, y la prueba de *Shapiro-Wilk* ( $p < 0.01$ ) descarta la normalidad estricta, recomendando complementar la media con la mediana para definir umbrales de manejo.

Desde el punto de vista geoestadístico, el pH se ajusta a un modelo exponencial con *nugget* ( $C_0 = 0$ ) y *sill* ( $C_0 + C$ ) = 0.31, lo que implica que casi toda la variabilidad detectada está estructurada espacialmente y no se atribuye a ruido de muestreo. El rango espacial de 306.6 m señala que la autocorrelación del pH decae rápidamente más allá de esa distancia, mientras que un  $R^2$  de validación cruzada de solo 0.04 refleja que, pese a existir estructura, el modelo explica muy poca de la variación real. En conjunto, estos indicadores confirman que el pH es una variable altamente estable a escalas prediales y que su media aritmética ( $7.26 \pm 0.59$ ) puede usarse con confianza para todas las recomendaciones de fertilidad y enmiendas.

Agronómicamente, un pH promedio cercano a 7.3 sitúa al suelo entre neutro a ligeramente alcalino, donde la solubilidad de  $Ca^{2+}$  es elevada (reflejada en un PCI de 87.8 %), pero la de micronutrientes como Fe, Zn y Mn se ve reducida por precipitaciones como hidróxidos y carbonatos. Dado que menos de un 10 % de los valores caen fuera del rango intercuartílico y la variabilidad espacial es baja, la estrategia de manejo debe centrarse en la corrección localizada de micronutrientes (quelatos y bandas de azufre para crear microzonas ligeramente ácidas), en lugar de cambios generalizados de pH, garantizando así un aporte eficiente de los nutrientes críticos sin alterar la estabilidad química del perfil.

Además, la dinámica de la mineralización de la materia orgánica y la actividad microbiológica del suelo están estrechamente moduladas por el pH estable y ligeramente alcalino de la EEA El Porvenir. Con un contenido medio de materia orgánica del 2.67 % ( $CV = 34.25 \%$ ), los procesos de descomposición dependen de comunidades bacterianas y fúngicas adaptadas a  $pH = 7.3$ , donde la actividad bacteriana suele predominar. En este rango, la mineralización de N y P a partir de compuestos orgánicos ocurre a velocidades moderadas: las enzimas extracelulares, como fosfatasa ácida y ureasa, mantienen una actividad suficiente para liberar gradualmente nutrientes, pero podrían verse ligeramente inhibidas en microzonas donde el pH supera 7.5.

La población microbiana colabora en la estabilización de agregados y en la formación de sustancias húmicas que mejoran la CIC y la retención de agua, compensando parcialmente la baja CIC de  $11.05 \text{ cmol kg}^{-1}$ . No obstante, la alta saturación de  $Ca^{2+}$  favorece la floculación, e incrementa la porosidad del suelo, donde habitan muchos microorganismos benéficos. Por ello, prácticas como la incorporación de enmiendas orgánicas de lenta liberación (compost y abonos verdes) y el manejo con labranza mínima pueden potenciar la diversidad funcional del microbioma edáfico, optimizar la mineralización de la materia orgánica y asegurar un suministro constante de nutrientes en equilibrio con las restricciones químicas impuestas por el pH.





## 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://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.
- 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://doi.org/10.2136/sssaspecpub51.c6>
- Chaganti, V., y Culman, S. (2017). Historical perspective of soil balancing theory and identifying knowledge gaps: A review. *Crop, Forage & Turfgrass Management*, 3(1), 1-7. <https://doi.org/10.2134/cftm2016.10.0072>.
- Chinea-Horta, A., y Rodríguez-Izquierdo, L. (2021). Comportamiento geoespacial de algunas propiedades del suelo en el cultivo de la caña de azúcar. *Ingeniería Agrícola*, 11(1). <https://www.redalyc.org/journal/5862/586269368001/html/>
- Coaguila, L., Mataix-Solera, J., Nina, S., García-Carmona, M., y Salazar, E. T. (2025). Soil Degradation Evidence Following a Wildfire in Arequipa's Andean Region, Peru. *Spanish Journal of Soil Science*, 15, 1-13. <https://doi.org/10.3389/sjss.2025.13983>
- Correa, S. W., Mello, C. R., Chou, S. C., Curi, N., y Norton, L. D. (2016). Soil erosion risk associated with climate change at Mantaro River basin, Peruvian Andes. *Catena*, 147, 110-124. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.07.003>
- Cruz-Luis, J. A., Ortiz-Morera, N. C., Quispe-Torres, D. R., Atalaya-Lopez, J. S., Macavilca-Villar, P. M., Ramírez-Aparicio, J. A., Salinas-Rivera, J. L., Escobar-Cuadros, F., Carbajal-Llosa, C. M., Olivarez-Rivera, E. L., Casaretto-Castagnino, D., y Ganoza-Roncal, J. J. (2025). *Atlas de las Estaciones Experimentales Agrarias del INIA*. Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA). <https://repositorio.inia.gob.pe/>
- Culman, S. W., Brock, C., Doohan, D., Jackson-Smith, D., Herms, C., Chaganti, V. N., Kleinhenz, M., Sprunger, C. D., y Spargo, J. (2021). Base cation saturation ratios vs. sufficiency level of nutrients: A false dichotomy in practice. *Agronomy Journal*, 113(6), 5623-5634. <https://doi.org/10.1002/agj2.20995>

- de Valença, A. W., Vanek, S. J., Meza, K., Ccanto, R., Olivera, E., Scurrah, M., Lantinga, E. A., y Fonte, S. J. (2017). Land use as a driver of soil fertility and biodiversity across an agricultural landscape in the Central Peruvian Andes. *Ecological Applications*, 27(4), 1138-1154. <https://doi.org/10.1002/eap.1508>
- Díaz-Chuquizuta, H., Arévalo-Aranda, Y., Samaniego-Puente, J. C., Siquiera-Bahia, R. de C., y Solórzano-Acosta, R. A. (2025). *Manual para la fertilización del cultivo de maíz amarillo duro en condiciones de la selva peruana*. Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA). <http://hdl.handle.net/20.500.12955/2687>
- Environmental Protection Agency. (2004). *Method 9045D: Soil and Waste pH, part of Test Methods for Evaluating Solid Waste, Physical/Chemical Methods*. <https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-12/documents/9045d.pdf>
- Espinosa, J., y Molina, E. (1999). *Acidez y encalado de los suelos* (1.ª ed.). International Plant Nutrition Institute. <https://doi.org/10.13140/2.1.3888.9281>
- 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>
- 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>
- Graham, E. R. (1959). *An explanation of theory and methods of soil testing*. Bulletin 734. University of Missouri, Agricultural Experiment Station.
- Halstead, R. L., MacLean, A. J., y Nielsen, K. F. (1958). Ca: Mg ratios in soil and the yield and composition of alfalfa. *Canadian Journal of Soil Science*, 38(2), 85-93. <https://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*.
- 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. *Soil testing: correlating and interpreting the analytical results*, 29, 39-54. <https://doi.org/10.2134/asaspecpub29.c3>
- Moral, F. J. (2004). Aplicación de la geoestadística en las ciencias ambientales. *Ecosistemas*, 1(11). <https://www.revistaecosistemas.net/index.php/ecosistemas/article/view/582>
- Niebla-Torres, R. E., Barrezueta-Unda, S., Luna-Romero, Á., y Chabla-Carrillo, J. (2021). Aplicación de modelos geoestadísticos para definir la variabilidad de un perfil del suelo. *Revista Metropolitana de Ciencias Aplicadas*, 4(1), 188-195. <https://doi.org/10.62452/zx01j782>
- Pebesma, E. J., y Bivand, R. S. (2005). Classes and methods for spatial data in R. *R News*, 5(2), 9-13. <http://cran.r-project.org/doc/Rnews/>
- Puertas, F., Arévalo, E., Zúñiga, L., Alegre, J., Loli, O., Soplin, H., y Baligar, V. (2008). Establecimiento de cultivos de cobertura y extracción total de nutrientes en un suelo de trópico húmedo en la Amazonía. *Ecología Aplicada*, 7(1-2), 23-28. <https://doi.org/10.21704/REA.V7I1-2.356>
- Pierre, W. H., y Banwart, W. L. (1973). Excess-Base and Excess-Base/Nitrogen Ratio of Various Crop Species and Parts of Plants 1. *Agronomy Journal*, 65(1), 91-96. <https://doi.org/10.2134/agronj1973.00021962006500010028x>
- Quispe-Matos, K. R., Carbajal-Llosa, C. M., Mejía-Maita, S. Y., Llerena-Arroyo, R. A., Solórzano-Acosta, R. A., y Cruz-Luis, J. A. (2025). *Variación espacial de la fertilidad del suelo en la EEA Canaán*. Instituto Nacional de Innovación Agraria. <http://hdl.handle.net/20.500.12955/2852>
- R Core Team. (2018). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing. <https://www.r-project.org/>
- Rojas-Briceño, N. B., Barboza-Castillo, E., Maicelo-Quintana, J. L., Oliva-Cruz, S. M., y Salas López, R. (2019). Deforestación en la Amazonía peruana: Índices de cambios de cobertura y uso del suelo basado en SIG. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 81, 1-34. <https://doi.org/10.21138/bage.2538a>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2002). NORMA Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000, que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de los suelos. Estudio, muestreo y análisis. Diario Oficial de la Federación (31 de diciembre de 2002). <https://www.ordenjuridico.gob.mx/Documentos/Federal/wo69255.pdf>
- Wang, C., y Kuzyakov, Y. (2024). Soil organic matter priming: The pH effects. *Global Change Biology*, 30(6), e17349. <https://doi.org/10.1111/gcb.17349>
- Yang, M., Zhou, D., Hang, H., Chen, S., Liu, H., Su, J., Lv, H., y Zhao, G. (2024). Effects of balancing exchangeable cations Ca, Mg, and K on the growth of tomato seedlings (*Solanum lycopersicum* L.) based on increased soil cation exchange capacity. *Agronomy*, 14(3), 629. <https://doi.org/10.3390/agronomy14030629>
- Zhang, G. Q. (1999). *Effects of exchangeable soil calcium, magnesium and calcium/magnesium ratios on plant nutrition and growth of lettuce on an ultisol* [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 Foliareos al servicio de la agricultura peruana



Ver nuestro alcance de acreditación



Ver nuestros servicios



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



*Instituto Nacional de Innovación Agraria*



**T31**  
220N - 118K - 18P  
85Ca - 30Mg





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

ISBN: 978-9972-44-245-2



PERÚ

Ministerio  
de Desarrollo Agrario  
y Riego



Instituto Nacional de Innovación Agraria

 @INIAPeru