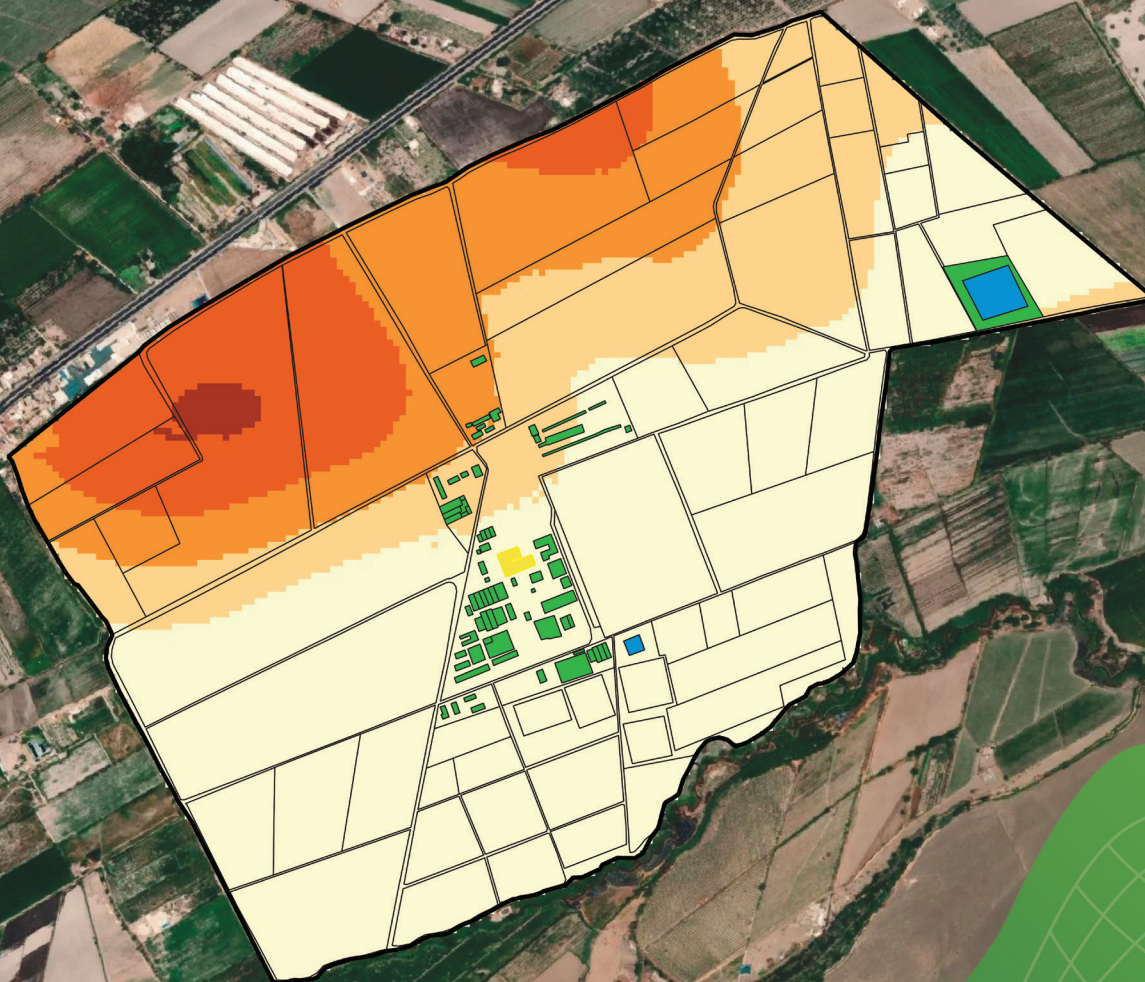


# Variación espacial de la fertilidad del suelo en la EEA Donoso



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 Donoso



## VARIACIÓN ESPACIAL DE LA FERTILIDAD DEL SUELO EN LA EEA DONOSO

### 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:

978-9972-44-243-8

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

Hecho el Depósito Legal en la Biblioteca Nacional del Perú N° 2026-01772

**Autores:** Kenyi R. Quispe-Matos, Carlos M. Carbajal-Llosa, Sharon Y. Mejia-Maita, Rodolfo J. Chuchon-Remon, Robert A. Quiñones-Trejo, Tomás D. Samaniego-Vivanco, Richard A. Solórzano-Acosta, Juancarlos A. Cruz-Luis / **Editor general:** Cinthia S. Quispe-Apaza / **Revisión de contenido:** Héctor A. Ramírez-Maguiña / **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                             | 20        |
| <b>2.2. Análisis geoestadístico de las propiedades del suelo</b>                              | <b>23</b> |
| <b>3. Muestreo y análisis de suelos en la EEA Donoso</b>                                      | <b>25</b> |
| <b>3.1. Ubicación de la EEA Donoso</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 Donoso</b>               | <b>51</b> |
| 4.1. Índice de saturación de bases catiónicas   | 51        |
| 4.2. Niveles de suficiencia de nutrientes disponibles   | 52        |
| 4.3. El pH del suelo  | 55        |
| <b>5. Referencias bibliográficas</b>  | <b>61</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, plántones y reproductores de alto valor genético.

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

La distribución irregular de la fertilidad del suelo incide en la producción agrícola, el aprovechamiento de nutrientes y la sostenibilidad de los sistemas productivos. Los análisis basados únicamente en promedios o en mediciones aisladas no reflejan esta complejidad espacial, reduciendo su utilidad para el manejo agronómico. En este contexto, la geoestadística y los sistemas de información geográfica (SIG) permiten interpretar la variación espacial y diseñar estrategias de manejo específico por sitio.

El presente documento, “Variación espacial de la fertilidad del suelo en la EEA Donoso”, integra el muestreo, análisis e interpretación de la distribución espacial de las propiedades del suelo. Asimismo, explica de forma clara la metodología de análisis geoespacial, la cual puede ser replicada y aplicada en otros sistemas agrícolas. También, proporciona un diagnóstico riguroso del edafosistema en el área de estudio, para facilitar la toma de decisiones en la gestión agrícola sostenible.

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

Presidente Ejecutivo

Instituto Nacional de Innovación Agraria



# 1. Introducción

Diversos estudios han demostrado que la cartografía y la zonificación de suelos son herramientas clave para la gestión agrícola de precisión, ya que permiten orientar intervenciones más eficientes y sostenibles (Reza et al., 2017). Estas técnicas facilitan la identificación de gradientes espaciales y de focos de limitaciones edáficas, como salinidad, sodicidad, deficiencias nutricionales y restricciones asociadas al pH y la alcalinidad, y permiten traducir esta información en estrategias específicas de manejo del suelo. En concreto, esta información permite priorizar la aplicación de enmiendas orgánicas en zonas críticas, realizar correcciones químicas localizadas, implementar esquemas de fertilización de dosis variable y diseñar prácticas de manejo de la humedad adaptadas a las condiciones específicas de cada sector (Heuvelink et al., 2022; Quispe et al., 2024). De esta forma, es posible reducir aplicaciones de fertilizante innecesarias, mitigar los riesgos de degradación y mejorar la productividad agrícola. Asimismo, la zonificación facilita el establecimiento de redes de monitoreo que evalúen la efectividad de las prácticas agronómicas y anticipen cambios en la calidad del suelo, brindando una base técnica para la toma de decisiones de manejo a mediano y largo plazo.

La cartografía y las técnicas modernas de mapeo del suelo son aplicables a un sinnúmero de contextos agrícolas. En particular, la Estación Experimental Agraria Donoso presenta condiciones edáficas y climáticas complejas que condicionan la productividad de los cultivos. Los suelos predominantes en la estación son Fluvisoles y Regosoles éutricos, formados a partir de materiales fluviales recientes (Instituto Nacional de Recursos Naturales [INRENA], 1996), en un contexto de clima árido, baja precipitación y temperaturas moderadas a cálidas (Cruz-Luis et al., 2025). Estas características predisponen a los cultivos a limitantes recurrentes de fertilidad. Por ejemplo, la escasa materia orgánica reduce la capacidad de retención de humedad y nutrientes; el pH alcalino y la presencia de carbonatos restringen la disponibilidad de fósforo y micronutrientes; la textura predominantemente arenosa incrementa las pérdidas por lixiviación; y la presencia de focos de salinidad y sodicidad comprometen la estabilidad física y química del suelo. En conjunto, estos factores sumados a esquemas de fertilización generalizados disminuyen la eficiencia de los insumos agrícolas y elevan el riesgo de degradación de los suelos.

El presente documento tiene como objetivo proporcionar lineamientos técnicos para la evaluación y el manejo de la fertilidad del suelo en la Estación Experimental Agraria Donoso, a partir del análisis de su variación espacial. Para ello, se establece como propósito diagnosticar el estado actual de la fertilidad del suelo e identificar sus principales limitantes, elaborar mapas de variabilidad espacial de las propiedades edáficas, y orientar la toma de decisiones para el manejo diferenciado del suelo, mediante recomendaciones prácticas que permitan optimizar el uso de insumos agrícolas, mejorar la eficiencia productiva y promover la sostenibilidad de los sistemas agrícolas de la estación.



## 2. Principios fundamentales del análisis de suelos

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

El proceso de recomendación de fertilizantes mediante 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).

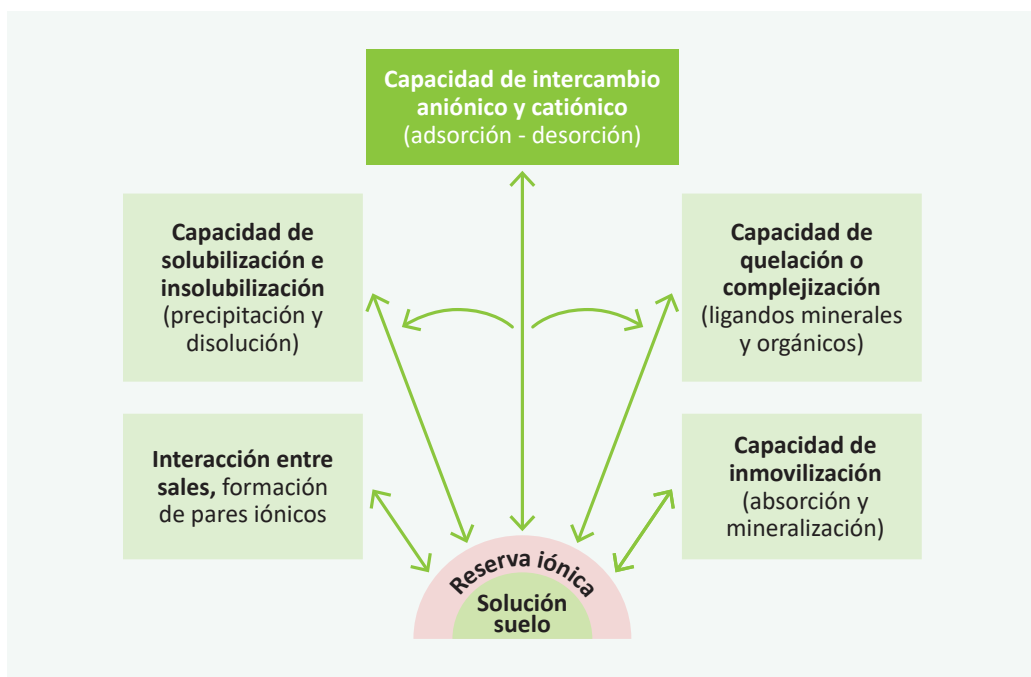
#### 2.1.1. Índice de saturación de bases catiónicas

##### 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 Donoso 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 del suelo (CIC) y su relación con la productividad de los cultivos (Culman et al., 2021). Albrecht, basado en estudios realizados en suelos agrícolas de Misuri, propuso que un balance adecuado entre calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ), 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).

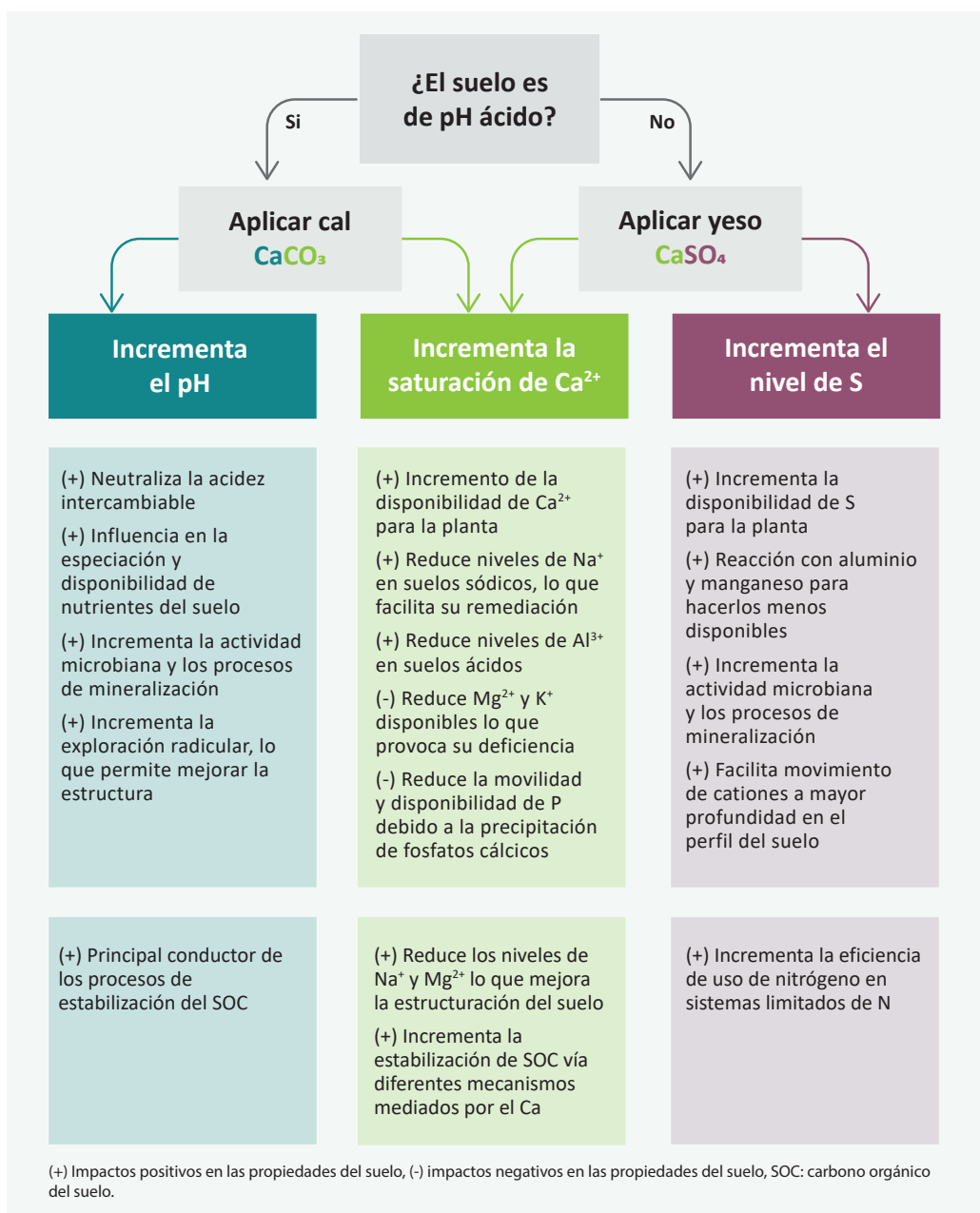


**Figura 1.** Mecanismos que mantienen en equilibrio los iones en la solución suelo (adaptado de McLean, 1977)

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.

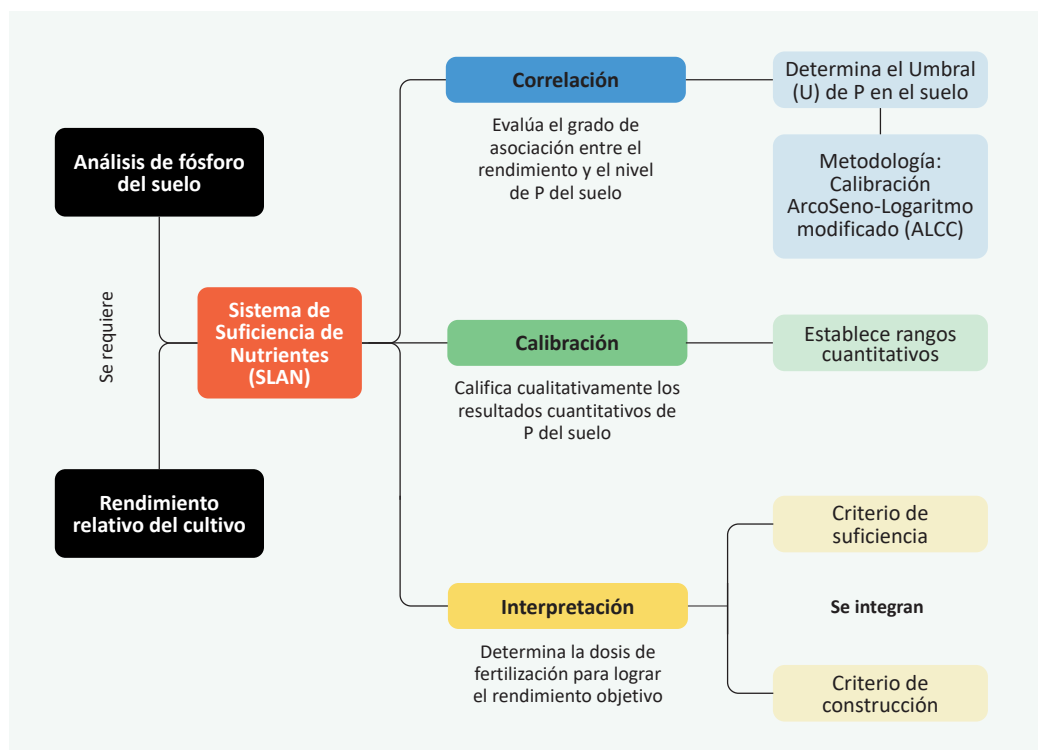


**Figura 2.** Criterios de uso de la cal y el yeso, y su respuesta en la relación de saturación de cationes básicos (adaptado de Culman et al., 2021)

## 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 suelos. Para su aplicación práctica, el diagnóstico de la fertilidad mediante el SLAN requiere de tres etapas: la correlación, calibración y la interpretación de los análisis de suelos, que se describen en la Figura 3 (Quispe-Matos et al., 2025).



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

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

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

## b. Aplicación del criterio de suficiencia

El criterio de suficiencia se aplica cuando el análisis de suelos indica un contenido alto de nutrientes, cercano al umbral crítico; su uso considera únicamente la reposición del nutriente extraído por el cultivo, dado que se encuentra en forma fácilmente disponible (García y Ciampitti, 2010).

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

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

A continuación, se presenta un ejemplo práctico 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 suelos 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:

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

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

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 ha<sup>-1</sup> 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 biomasa radicular y vegetativa, 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 de suelos indica un contenido medio-bajo de nutrientes. Además de tener el objetivo de reponer o mantener la cantidad de nutriente extraído por el cultivo, se realiza el ajuste por eficiencia de su uso, para compensar las pérdidas por fijación y adsorción (Buresh et al., 1997).

Con respecto a los criterios de mantenimiento y construcción, se aplica cuando el nutriente se encuentra en niveles muy bajos en el suelo. El objetivo no es sólo cubrir la extracción de nutriente por el cultivo y ajustar según su eficiencia, sino también incrementar o construir progresivamente el nivel del nutriente en el suelo hasta alcanzar valores cercanos al nivel crítico, asegurando así una fertilidad sostenida en el tiempo. Alternativamente, el criterio de construcción se puede aplicar para complementar los requerimientos de nutrientes estimados para la fertilización de suficiencia y mantenimiento (García y Ciampitti, 2010).

Los criterios de mantenimiento y construcción integran conceptos modernos de mejora de la fertilidad del suelo a largo plazo. Este enfoque integrado busca incrementar progresivamente la concentración de nutrientes en el suelo mediante aplicaciones superiores a las necesidades del cultivo, hasta alcanzar un umbral óptimo determinado mediante estudios de calibración de respuesta agronómica (Marino y Echeverría, 2018). Esto es particularmente relevante en suelos con niveles medios y bajos de nutrientes disponibles o con alta capacidad de adsorción, donde la saturación gradual de los sitios de intercambio permite reducir la fijación de elementos esenciales como el fósforo (P) y el potasio (K), y así mejorar su disponibilidad en ciclos de producción posteriores (Barber, 1995; Havlin et al., 2016).

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

A continuación, se presentarán ejemplos prácticos 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 suelos 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 %.

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

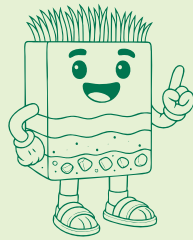
$$\text{RM de P} = \frac{17.17 \text{ kg de P ha}^{-1}}{0.30} = 57.2 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

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 suelos en un cultivo de palto, y se obtuvo 5 mg de P 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 %.

$$\text{RM de P} = \frac{8.58 \text{ kg de P ha}^{-1}}{0.2} = 42.9 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

**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.

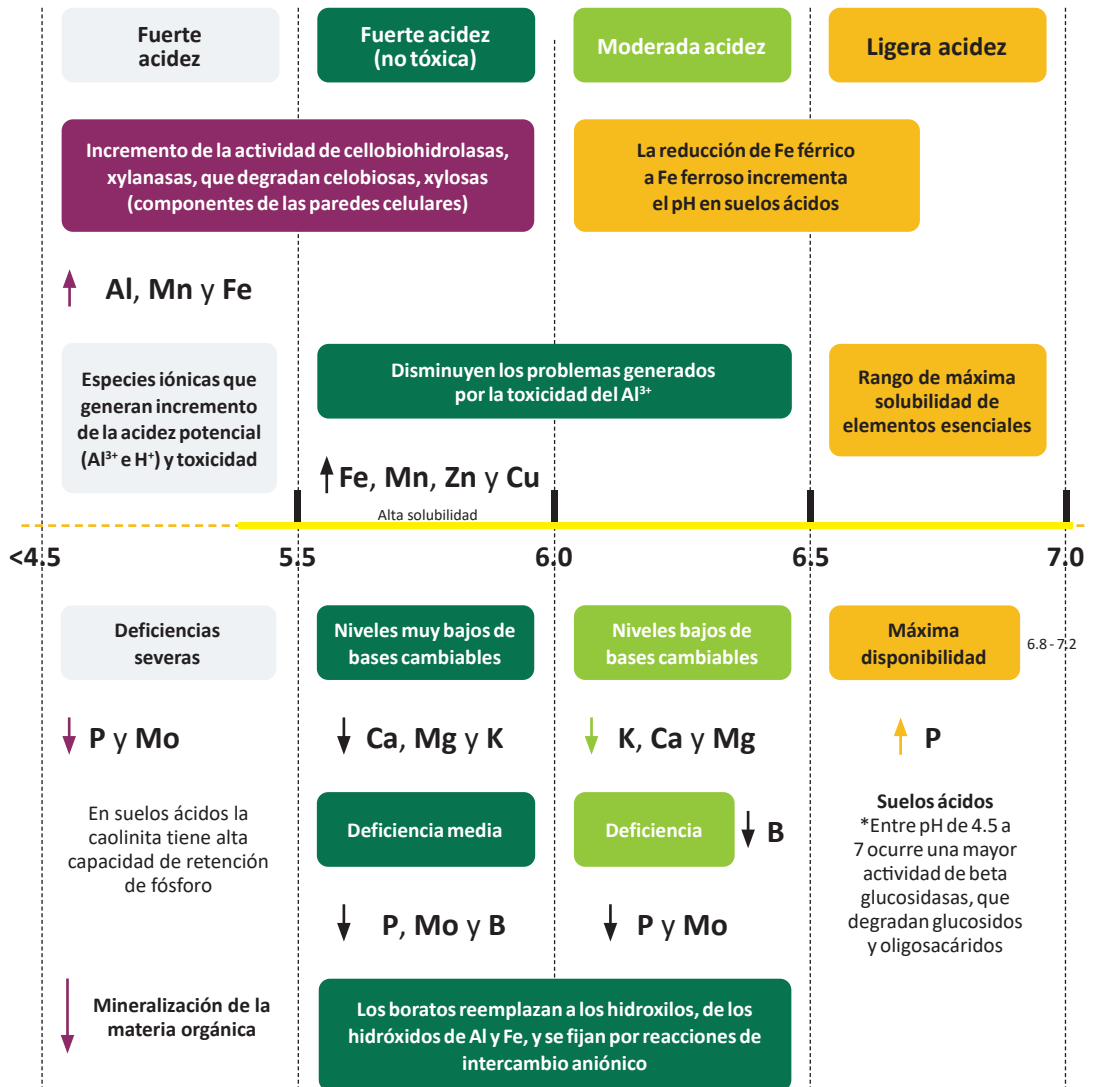
$$\text{Dosis de fertilización de P} = RM + RC \quad \dots(8)$$

$$\text{Dosis de fertilización de P} = 42.9 \text{ kg de P ha}^{-1} + 13.5 \text{ kg de P ha}^{-1} = 56.4 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

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 presentan un modelo gráfico de diagnóstico de la fertilidad del suelo en condiciones de pH ácidos según Wang y Kuzyakov (2024) y Alam et al. (1999).



Incrementa la inhibición del crecimiento longitudinal y ramificación de raíces, absorción de agua y daño de los transportadores ATPasa para la absorción activa de potasio

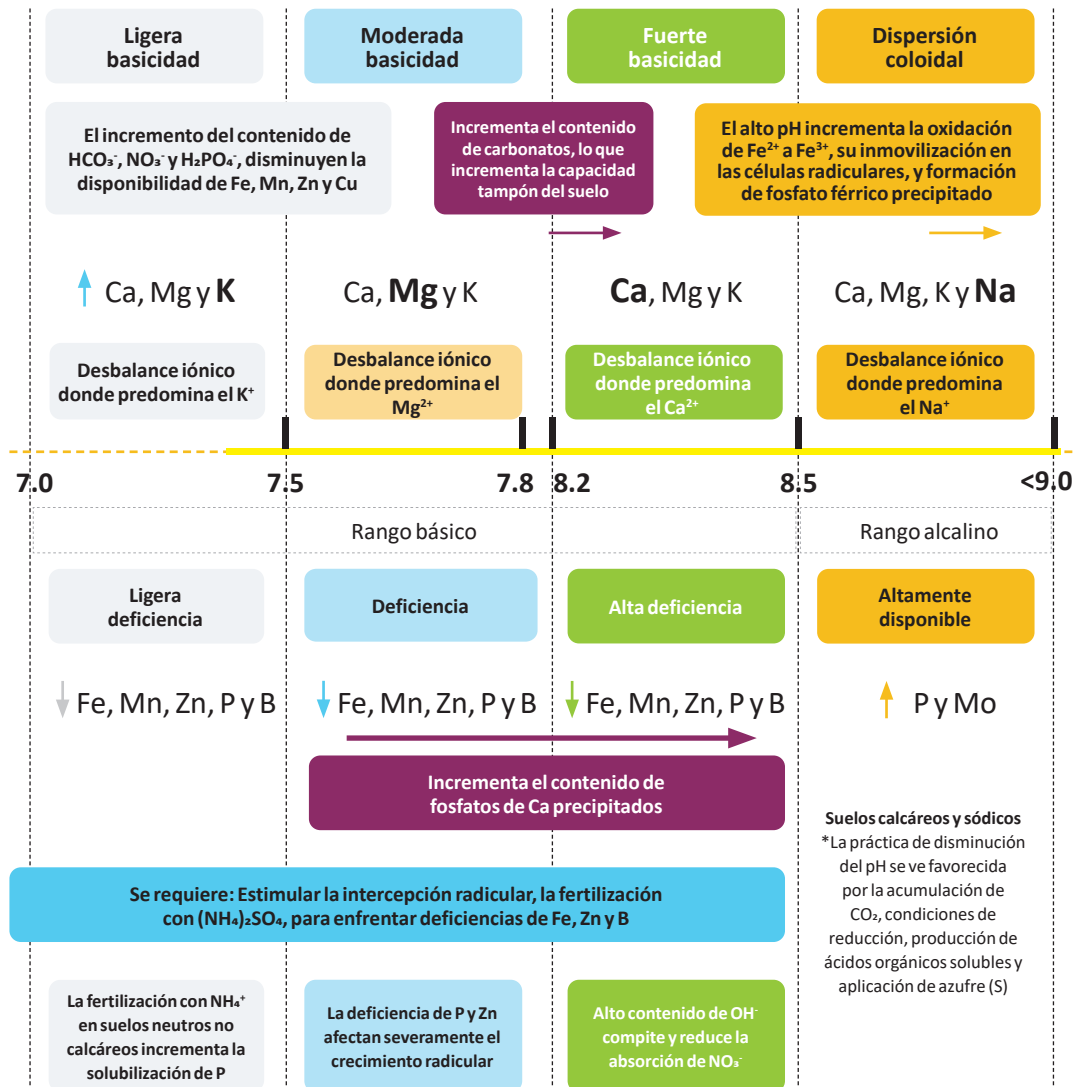


Figura 4. Diagnóstico de la fertilidad del suelo en función al pH

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

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



## 3. Muestreo y análisis de suelos en la EEA Donoso

### 3.1. Ubicación de la EEA Donoso

La EEA Donoso se encuentra en suelos de tipo Fluvisol éutrico y Regosol éutrico, originados a partir de sedimentos fluviales recientes (INRENA, 1996). Cuenta con un centro experimental, con una extensión de 148 ha, siendo los cultivos priorizados: maíz (*Zea mays* L.), camote (*Ipomoea batatas*), frutales y entre otros.

En la estación se realiza investigación, valoración, conservación, producción de material genético de plantas y animales, además de brindar asistencia técnica y otros servicios para los agricultores de las provincias del norte de Lima. La sede de la EEA Donoso se encuentra en el distrito de Donoso, en la provincia de Huaral, en el departamento de Lima (Figura 5), en la región de costa o chala, a 177 m s. n. m. y presenta precipitaciones anuales de hasta 30 mm y temperaturas medias anuales que varían entre los 17 a 24 °C (Cruz-Luis et al., 2025).

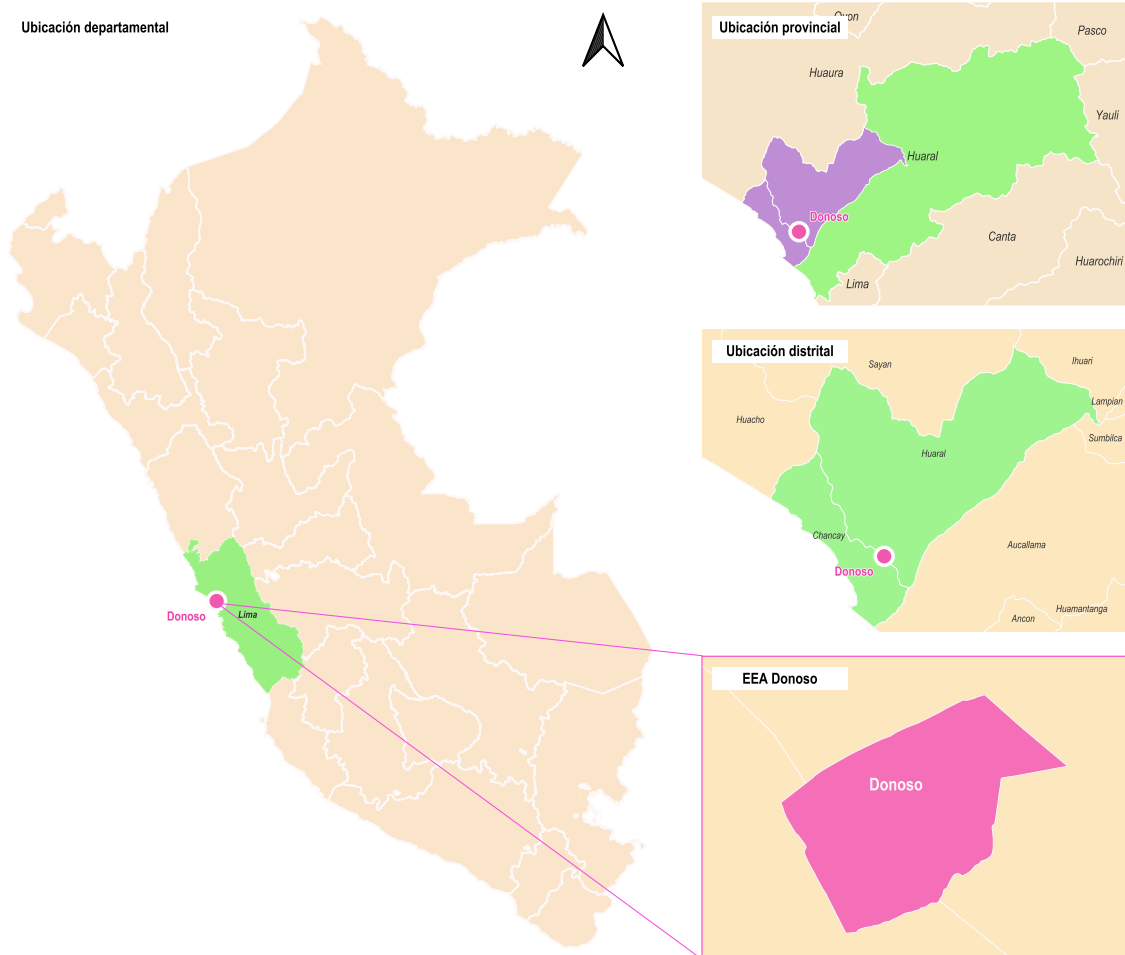


Figura 5. Ubicación de la EEA Donoso

### 3.2. Muestreo estratificado del suelo

Con el objetivo de obtener una representación espacial adecuada de las condiciones edáficas en la EEA Donoso, se aplicó un diseño de muestreo estratificado basado en unidades de cobertura identificadas mediante análisis de imágenes satelitales. Este enfoque metodológico permite reducir la varianza intraestrato y optimizar la representatividad de las muestras en relación con la heterogeneidad espacial del área evaluada. La estratificación previa al muestreo garantiza una caracterización más precisa de las propiedades edáficas relevantes para el manejo del suelo, como parte de una estrategia integral de monitoreo de fertilidad. El proceso combinó técnicas de clasificación no supervisada y muestreo probabilístico espacial, utilizando herramientas de análisis geoespacial y estadística computacional. A continuación, se detallan los procedimientos aplicados para la determinación y colecta de los puntos de muestreo (Figura 6).

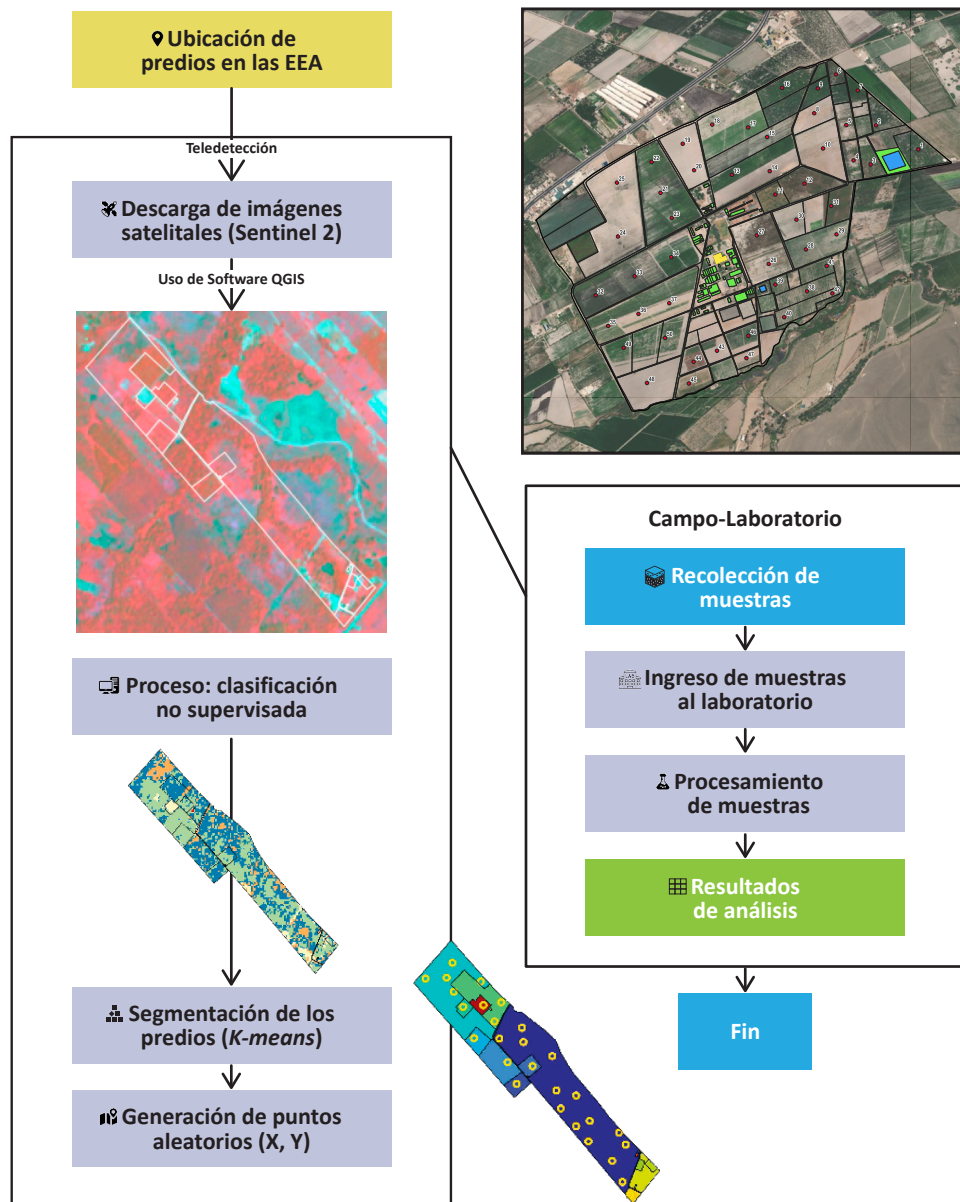


Figura 6. Flujo de trabajo para la determinación de los puntos de muestreo

### 3.2.1. Determinación de los puntos de muestreo

El primer paso para la determinación de los puntos de muestreo fue la descarga de las imágenes satelitales del servidor de Sentinel 2 para identificar las clases de cobertura, utilizando el algoritmo de clasificación no supervisada *K-means*. Luego, se usó el software R (R Core Team, 2018) para determinar los puntos de muestreo utilizando la función *spsample* del paquete *sp* (Pebesma y Bivand, 2005). El script de R generó las coordenadas de los puntos de muestreo según cada clase determinada, mediante el método de muestreo estratificado. Se identificaron en total 50 puntos de muestreo de suelos, como se observa en la Figura 7.

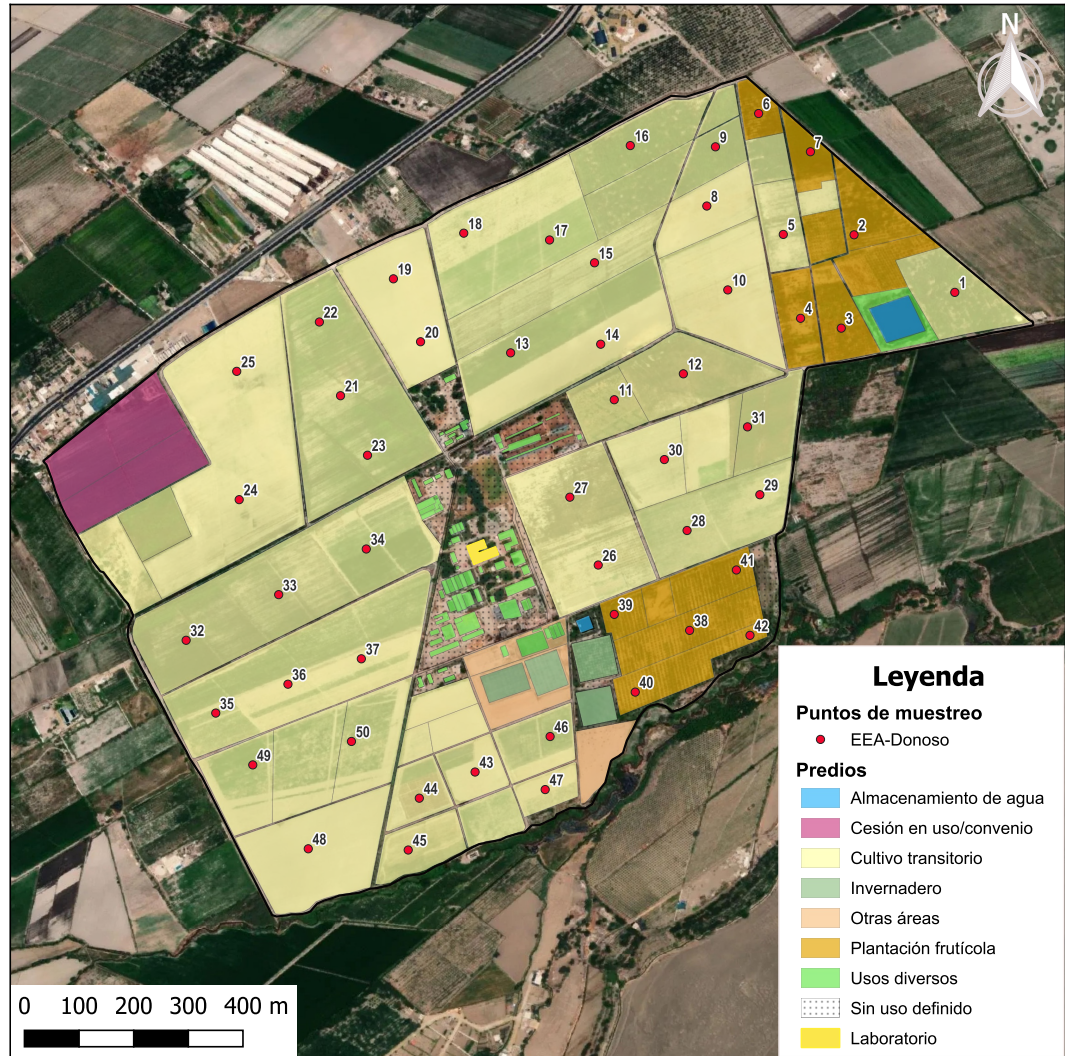


Figura 7. Puntos de muestreo de suelos en el EEA Donoso

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

Una vez identificadas las coordenadas de los 50 puntos de muestreo, los pasos que se siguieron para la colecta de muestras fueron los siguientes, y se encuentran ilustrados en la Figura 8:

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



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

### 3.3. Análisis de suelos

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

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

| Parámetro                           | Método de análisis  | Referencia   |
|-------------------------------------|---|--|
| 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 se presentan en la Tabla 2, en donde se describen las estadísticas descriptivas del promedio de las 50 muestras analizadas.

Los suelos de la EEA Donoso presentan, en promedio, una textura franco-arenosa (61.03 % arena, 21.86 % arcilla, 17.11 % limo), con una variabilidad moderada (CV entre el 16.85 y el 31.88 %), lo que sugiere cierta heterogeneidad textural. El pH del suelo es ligeramente alcalino ( $7.9 \pm 0.25$ , CV = 3.25 %), con distribución simétrica y valores estables, lo que denota poca variabilidad espacial. El contenido de materia orgánica es bajo ( $1.62 \% \pm 0.50 \%$ , CV  $\approx 31 \%$ ), una limitante frecuente en suelos intensamente cultivados o naturalmente pobres, que compromete la capacidad de retención de humedad y nutrientes.

La capacidad de intercambio catiónico (CIC) es moderadamente alta ( $9.1 \text{ cmol kg}^{-1}$ ) y presenta una clara dominancia del calcio intercambiable (71.6 %), seguido del magnesio intercambiable (19.9 %). En contraste, el potasio intercambiable (3.6 %) y el sodio intercambiable (4.9 %) exhiben alta variabilidad (41.55 % y 20.39 %, respectivamente) y una marcada asimetría positiva (*skewness*), con valores extremos que en varios casos superan el doble de la mediana. Los niveles elevados de sodio observados en ciertos sectores podrían afectar la estructura del suelo y su permeabilidad, lo que sugiere un riesgo de sodicidad localizada.

El contenido de carbonato de calcio ( $13.83 \% \pm 10.05 \%$ ) también evidencia una alta variabilidad y asimetría (*skewness* = 1.77), lo que sugiere sectores con acumulaciones relevantes de cal, probablemente ligadas a condiciones geológicas o materiales parentales con carbonato.

La conductividad eléctrica ( $8.10 \text{ dS m}^{-1} \pm 8.44$ ) presenta una variabilidad extremadamente alta (CV > 100 %), con valores máximos hasta seis veces superiores a la mediana, lo cual es indicativo de problemas de salinidad en zonas puntuales. Los nutrientes como el fósforo disponible (P-Olsen) y el potasio disponible también muestran alta dispersión (CV  $\approx 47 \%$  y  $43 \%$ , respectivamente), reflejando *hotspots* de acumulación posiblemente ligados a fertilización localizada o condiciones de drenaje diferenciadas.

Ante esta heterogeneidad química y textural, resulta esencial aplicar herramientas geoestadísticas que permitan mapear patrones espaciales con mayor precisión, optimizar el muestreo y guiar un manejo agronómico sitio-específico. En este contexto, el uso de yeso agrícola es una estrategia recomendable para corregir los efectos del sodio intercambiable elevado, ya que aporta calcio sin modificar el pH, mejora la floculación de arcillas y favorece la lixiviación del sodio. En conjunto, estos suelos presentan fertilidad química moderada pero heterogénea, con riesgos localizados de salinidad y sodicidad, lo cual exige un enfoque de manejo ajustado a las condiciones locales y dinámicas del paisaje.

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

| Variables                                 | Media  | Mediana | SD    | CV       | Mínimo | Máximo | Skewness |
|---|--------|---------|-------|----------|--------|--------|----------|
| pH  | 7.90   | 8.00    | 0.25  | 3.25 %   | 7.41   | 8.40   | -0.30    |
| CE (dS m <sup>-1</sup> )                  | 8.10   | 4.21    | 8.44  | 105.18 % | 1.33   | 48.70  | 2.62     |
| MO (%)                                    | 1.62   | 1.60    | 0.50  | 30.93 %  | 0.56   | 2.35   | -0.22    |
| Arcilla (%)                               | 21.86  | 22.88   | 6.16  | 28.47 %  | 5.60   | 33.60  | -0.20    |
| Limo (%)                                  | 17.11  | 16.00   | 5.40  | 31.88 %  | 6.00   | 31.28  | 0.50     |
| Arena (%)                                 | 61.03  | 61.84   | 10.18 | 16.85 %  | 45.12  | 82.40  | 0.17     |
| Ca <sup>2+</sup> (cmol kg <sup>-1</sup> ) | 6.52   | 6.65    | 0.67  | 10.32 %  | 5.01   | 7.83   | -0.49    |
| Mg <sup>2+</sup> (cmol kg <sup>-1</sup> ) | 1.82   | 1.69    | 0.43  | 24.04 %  | 1.11   | 2.80   | 0.62     |
| Na <sup>+</sup> (cmol kg <sup>-1</sup> )  | 0.44   | 0.44    | 0.08  | 18.34 %  | 0.31   | 0.64   | 0.19     |
| K <sup>+</sup> (cmol kg <sup>-1</sup> )   | 0.33   | 0.31    | 0.14  | 43.14 %  | 0.15   | 1.01   | 2.45     |
| CIC (cmol kg <sup>-1</sup> )              | 9.10   | 9.21    | 0.76  | 8.41 %   | 7.25   | 10.45  | -0.70    |
| PCI (%)                                   | 71.59  | 71.56   | 4.18  | 5.90 %   | 61.24  | 79.75  | -0.33    |
| PMI (%)                                   | 19.93  | 18.83   | 4.33  | 21.93 %  | 12.96  | 30.40  | 0.67     |
| PPI (%)                                   | 3.62   | 3.32    | 1.49  | 41.55 %  | 1.78   | 10.38  | 2.17     |
| PSI (%)                                   | 4.86   | 4.72    | 0.98  | 20.39 %  | 3.23   | 8.78   | 1.27     |
| CaCO <sub>3</sub> (%)                     | 13.83  | 11.22   | 10.05 | 73.41 %  | 0.88   | 57.00  | 1.77     |
| Fe (mg kg <sup>-1</sup> )                 | 4.89   | 4.51    | 1.95  | 40.32 %  | 0.89   | 9.50   | 0.61     |
| Cu (mg kg <sup>-1</sup> )                 | 0.46   | 0.27    | 0.43  | 94.09 %  | 0.01   | 1.48   | 0.99     |
| Zn (mg kg <sup>-1</sup> )                 | 0.93   | 0.83    | 0.60  | 64.87 %  | 0.13   | 4.00   | 2.75     |
| Mn (mg kg <sup>-1</sup> )                 | 0.85   | 0.84    | 0.22  | 26.66 %  | 0.43   | 1.39   | 0.15     |
| P-Olsen (mg kg <sup>-1</sup> )            | 11.19  | 10.73   | 5.23  | 47.25 %  | 1.87   | 31.58  | 1.21     |
| K disp. (mg kg <sup>-1</sup> )            | 128.24 | 118.35  | 54.83 | 43.19 %  | 57.90  | 395.06 | 2.48     |

CE: Conductividad eléctrica en extracto de saturación, SD: desviación estándar, CV: coeficiente de variación, K disp.: Potasio disponible, MO: materia orgánica del suelo, CIC: capacidad de intercambio catiónico, PCI: porcentaje de calcio intercambiable, PMI: porcentaje de magnesio intercambiable, P-Olsen: fósforo determinado por el método de Olsen, PPI: porcentaje de potasio intercambiable, PSI: porcentaje de sodio intercambiable.

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

Este protocolo está diseñado para ser aplicado en el análisis espacial de cualquier propiedad del suelo (materia orgánica, pH, 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

- 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.

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

Donde:

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

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

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

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

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

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

### 3.7.1. Generación y ajuste del variograma

- 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*

- 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 el Cu (RMSE = 0.001 y  $R^2 = 0.98$ ), el Mn (RMSE = 0.091 y  $R^2 = 0.97$ ), la CIC (RMSE = 0.013 y  $R^2 = 0.91$ ), el Zn (RMSE = 0.001 y  $R^2 = 0.85$ ), el Na<sup>+</sup> intercambiable (RMSE = 0.052 y  $R^2 = 0.71$ ), el Ca<sup>2+</sup> intercambiable (RMSE = 0.009 y  $R^2 = 0.69$ ) y la materia orgánica del suelo (RMSE = 0.004 y  $R^2 = 0.68$ ). Estos resultados indican un alto grado de predictibilidad espacial de las mencionadas variables y que la interpretación derivada a partir de esas características puede replicarse en zonas no muestreadas.

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

| Variable          | Modelo             | Nugget (C <sub>0</sub> ) | Sill (C <sub>0</sub> +C) | Range (m) | Cross-validation |                |
|-------------------|--------------------|--------------------------|--------------------------|-----------|------------------|----------------|
|                   |                    |                          |                          |           | RMSE             | R <sup>2</sup> |
| Arena             | <i>Gaussian</i>    | 0.227                    | 1.021                    | 974.86    | 0.570            | 0.59           |
| Limo              | <i>Linear</i>      | 0.089                    | 0.000                    | 911.48    | 0.420            | 0.45           |
| Arcilla           | <i>Spherical</i>   | 0.334                    | 0.358                    | 919.78    | 0.076            | 0.47           |
| pH                | <i>Gaussian</i>    | 0.028                    | 0.037                    | 974.86    | 0.153            | 0.22           |
| CE                | <i>Spherical</i>   | 0.246                    | 0.763                    | 974.86    | 0.797            | 0.24           |
| MO                | <i>Spherical</i>   | 0.136                    | 0.289                    | 793.46    | 0.004            | 0.68           |
| P-Olsen           | <i>Exponential</i> | 0.036                    | 0.390                    | 831.58    | 0.570            | 0.22           |
| K disp.           | <i>Exponential</i> | 0.167                    | 0.926                    | 658.07    | 0.740            | 0.36           |
| CaCO <sub>3</sub> | <i>Gaussian</i>    | 0.458                    | 0.765                    | 698.73    | 0.623            | 0.32           |
| Ca <sup>2+</sup>  | <i>Spherical</i>   | 0.255                    | 0.487                    | 747.67    | 0.009            | 0.69           |
| Mg <sup>2+</sup>  | <i>Linear</i>      | 0.142                    | 0.193                    | 974.86    | 0.232            | 0.17           |
| Na <sup>+</sup>   | <i>Exponential</i> | 0.001                    | 0.008                    | 852.04    | 0.052            | 0.71           |
| K <sup>+</sup>    | <i>Spherical</i>   | 0.004                    | 0.011                    | 659.80    | 0.102            | 0.20           |
| CIC               | <i>Spherical</i>   | 0.083                    | 0.673                    | 753.15    | 0.013            | 0.91           |
| PCI               | <i>Exponential</i> | 0.006                    | 0.292                    | 823.00    | 0.572            | 0.17           |
| PMI               | <i>Exponential</i> | 0.383                    | 0.428                    | 658.27    | 0.668            | 0.04           |
| PPI               | <i>Spherical</i>   | 0.138                    | 0.201                    | 658.06    | 0.427            | 0.09           |
| PSI               | <i>Linear</i>      | 0.422                    | 0.709                    | 660.19    | 0.087            | 0.47           |
| Fe                | <i>Spherical</i>   | 0.006                    | 0.214                    | 974.86    | 1.258            | 0.37           |
| Cu                | <i>Gaussian</i>    | 0.001                    | 0.267                    | 803.51    | 0.001            | 0.98           |
| Zn                | <i>Spherical</i>   | 0.070                    | 0.208                    | 874.16    | 0.001            | 0.85           |
| Mn                | <i>Linear</i>      | 0.001                    | 0.003                    | 680.04    | 0.091            | 0.97           |

CE: Conductividad eléctrica en extracto de saturación, CIC: capacidad de intercambio catiónico, K disp.: potasio disponible, MO: materia orgánica del suelo, PCI: porcentaje de calcio intercambiable, PMI: porcentaje de magnesio intercambiable, P-Olsen: fósforo determinado por el método Olsen, PPI: porcentaje de potasio intercambiable, PSI: porcentaje de sodio intercambiable, RMSE: raíz del error cuadrático medio, R<sup>2</sup>: coeficiente de determinación.

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

Las propiedades del suelo se representan mediante mapas interpolados (Figuras 9–22), los cuales muestran la variación espacial de las principales características físicas y químicas de los suelos de la EEA Donoso. Asimismo, entre las propiedades del suelo evaluadas, las características relacionadas con disponibilidad de micronutrientes como el Zn, Cu y Mn, las asociadas a la sodicidad como el balance catiónico entre  $Ca^{2+}$  y  $Na^+$ , y la implicancia de la fertilidad potencial medida en función de la CIC y la materia orgánica, alcanzaron un mayor grado de ajuste entre los valores observados y predichos. Por ende, dichas variables son las de mayor predictibilidad espacial y su diagnóstico es fundamental para definir zonas de manejo sitio-específicos.

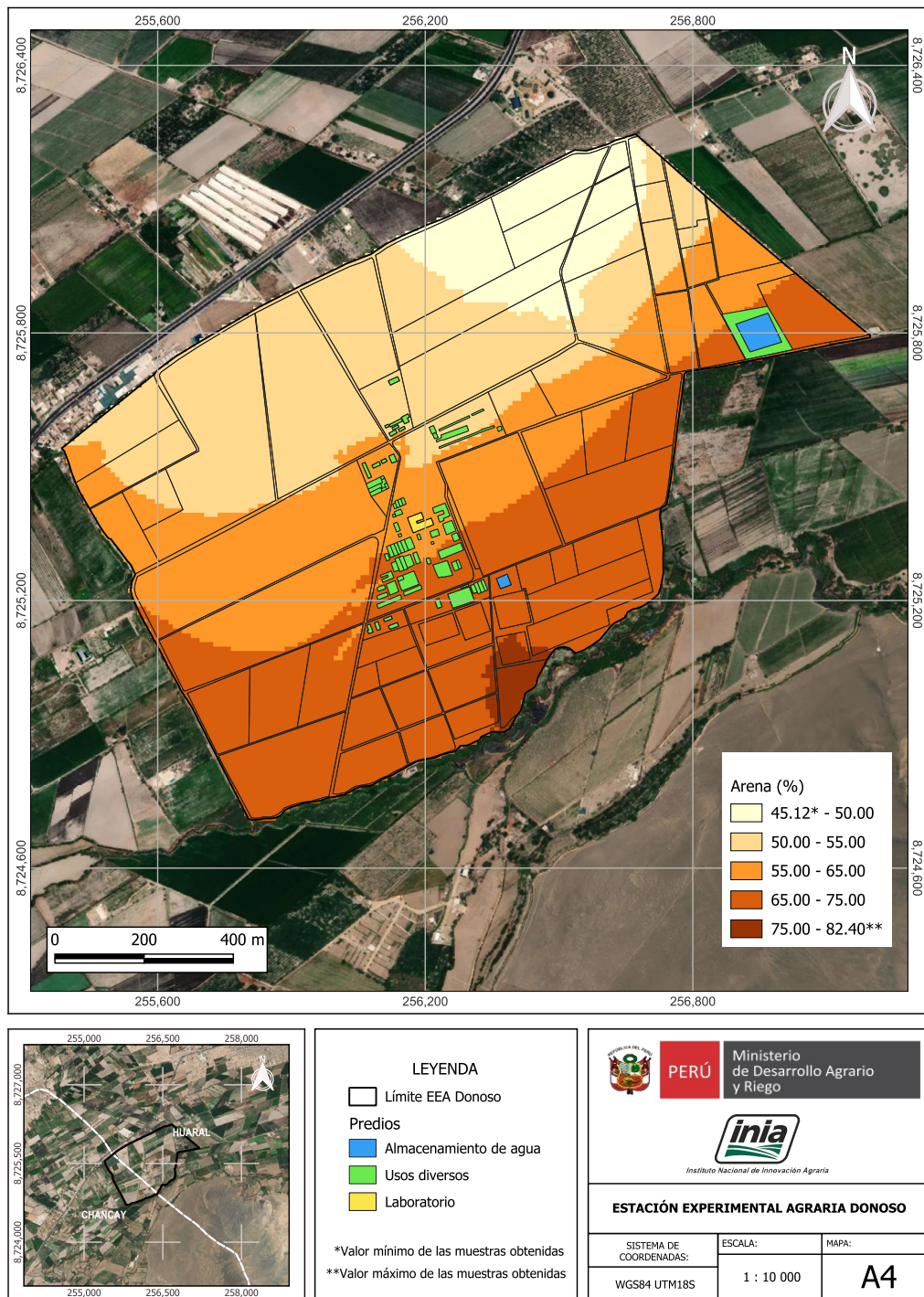


Figura 9. Mapa de variación espacial del porcentaje de arena

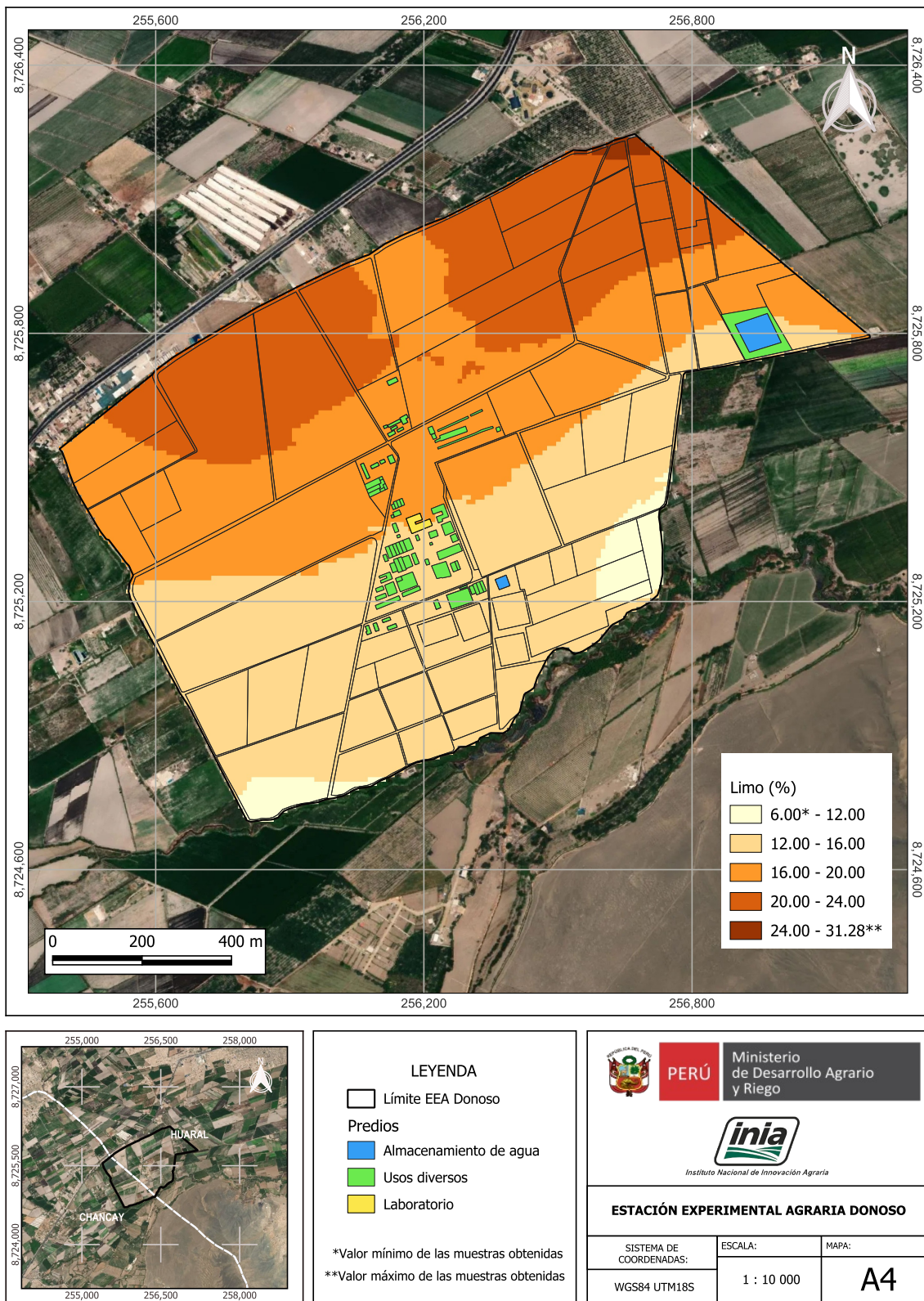


Figura 10. Mapa de variación espacial del porcentaje de limo

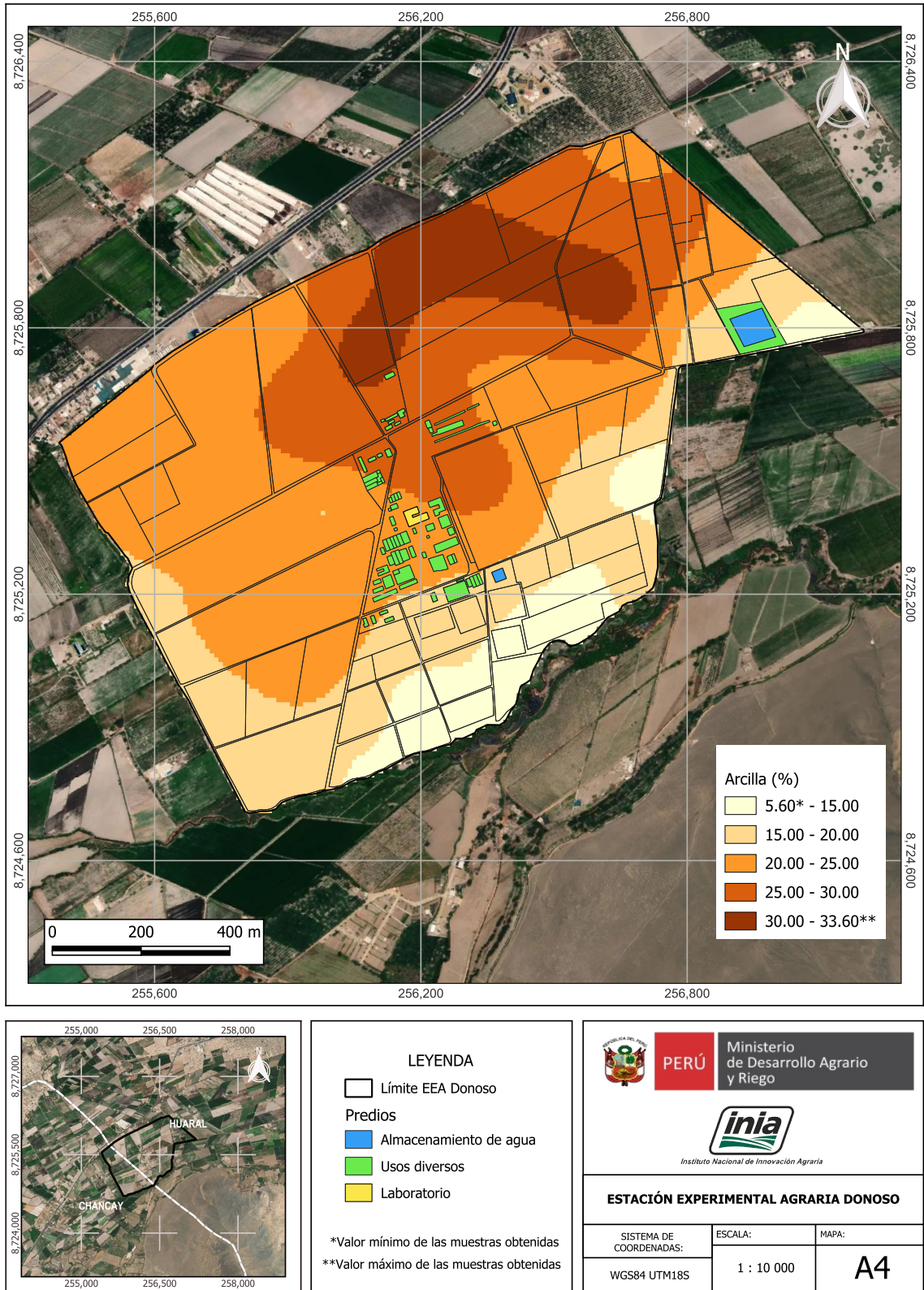


Figura 11. Mapa de variación espacial del porcentaje de arcilla

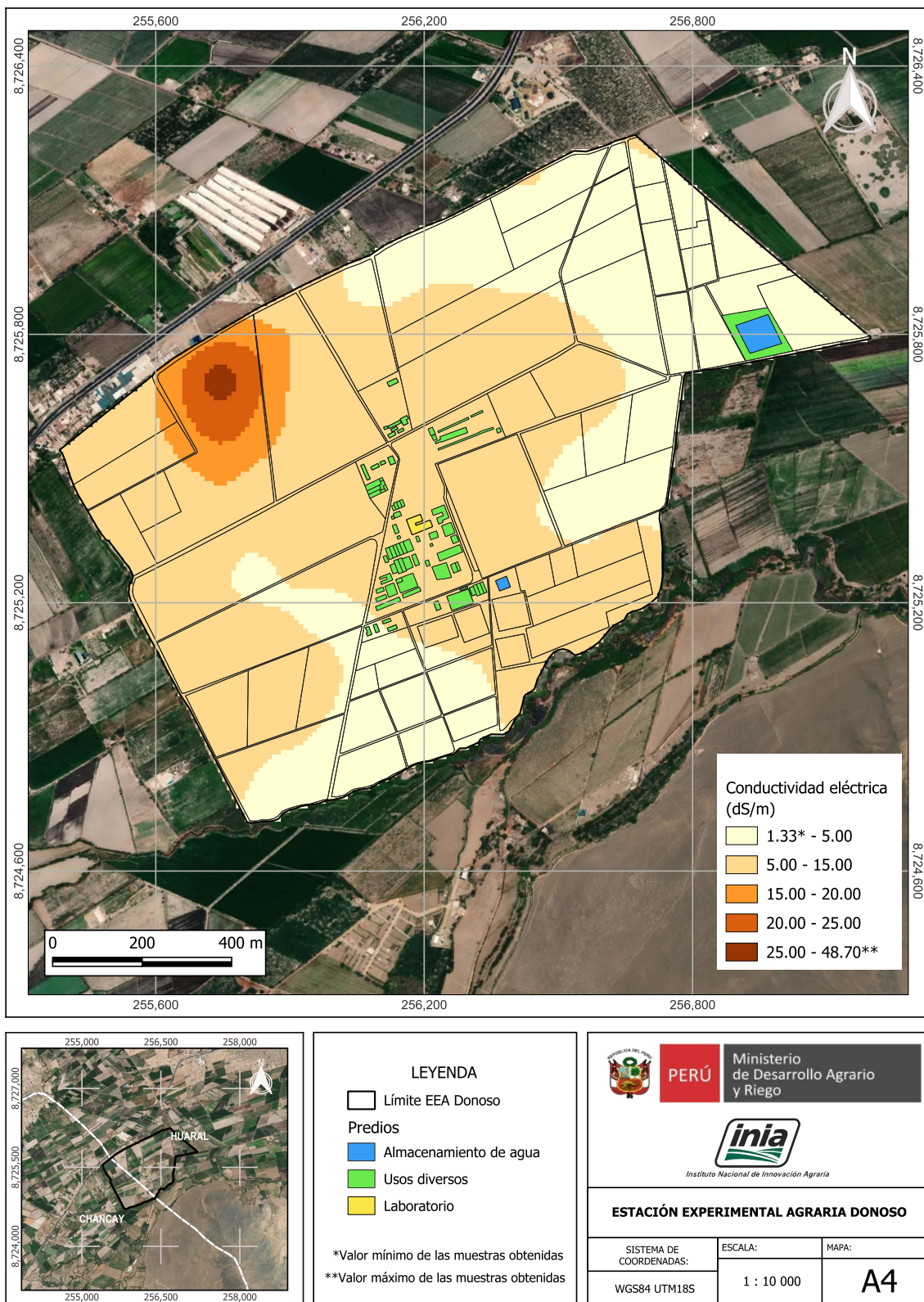


Figura 12. Mapa de variación espacial de la conductividad eléctrica (CE)

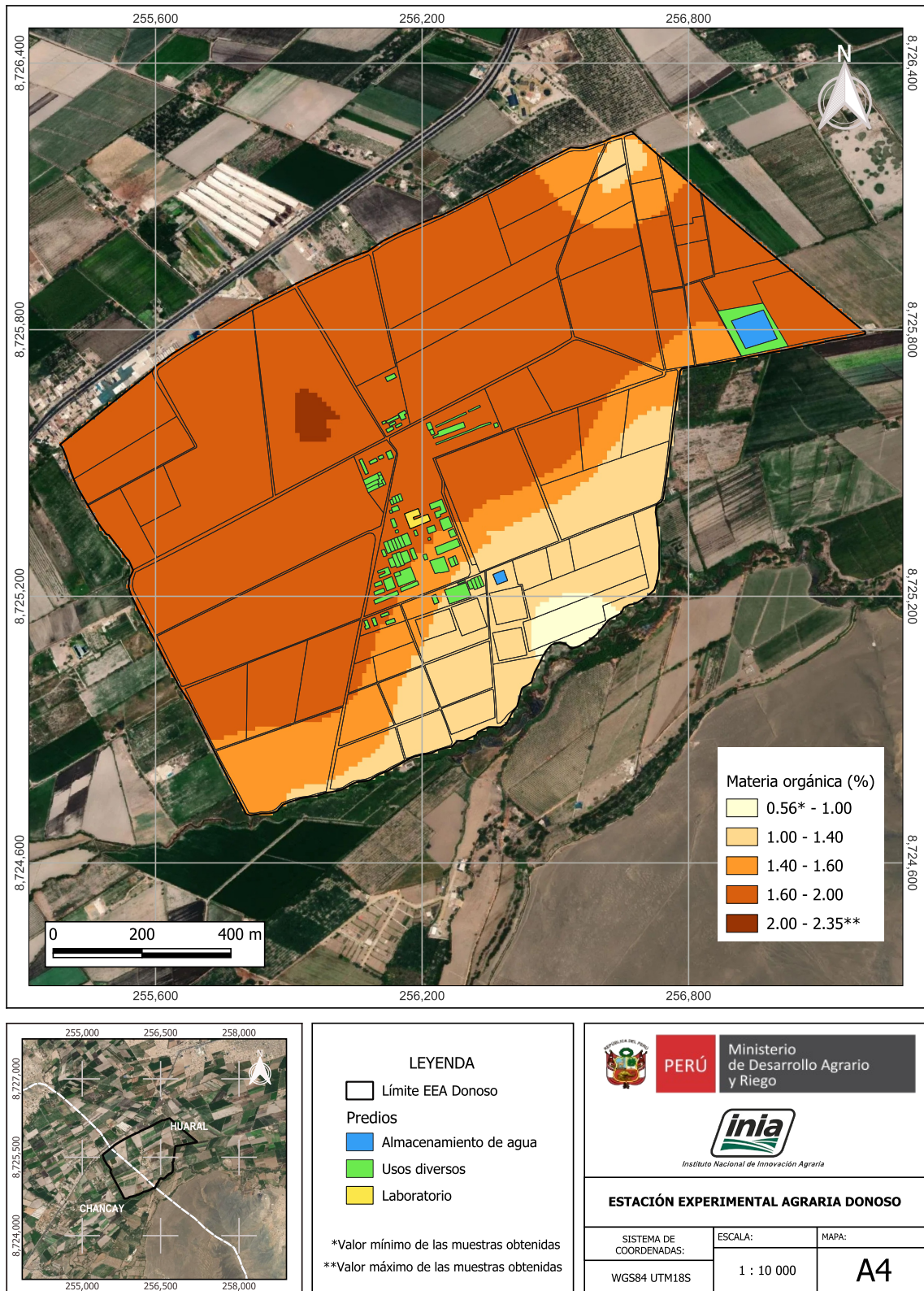
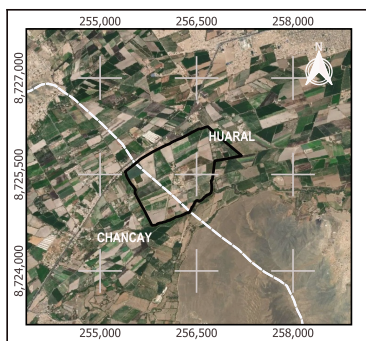
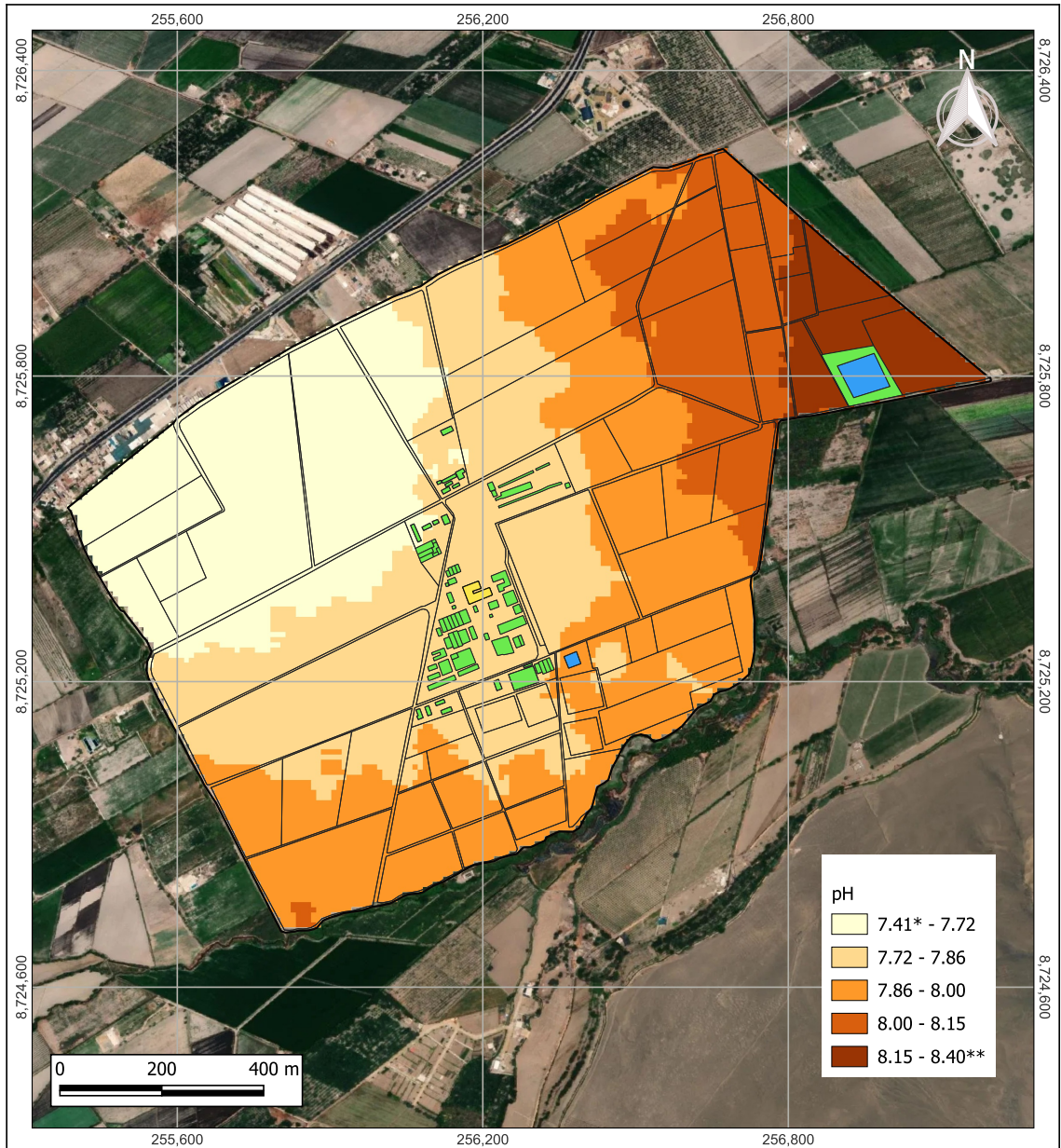


Figura 13. Mapa de variación espacial del porcentaje de la materia orgánica (MO)



**LEYENDA**

- Límite EEA Donoso
- Predios**
- Almacenamiento de agua
- Usos diversos
- Laboratorio

\*Valor mínimo de las muestras obtenidas  
 \*\*Valor máximo de las muestras obtenidas

**PERÚ** Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego

*Instituto Nacional de Innovación Agraria*

---

**ESTACIÓN EXPERIMENTAL AGRARIA DONOSO**

|                         |            |           |
|-------------------------|------------|-----------|
| SISTEMA DE COORDENADAS: | ESCALA:    | MAPA:     |
| WGS84 UTM18S            | 1 : 10 000 | <b>A4</b> |

**Figura 14.** Mapa de variación espacial del pH

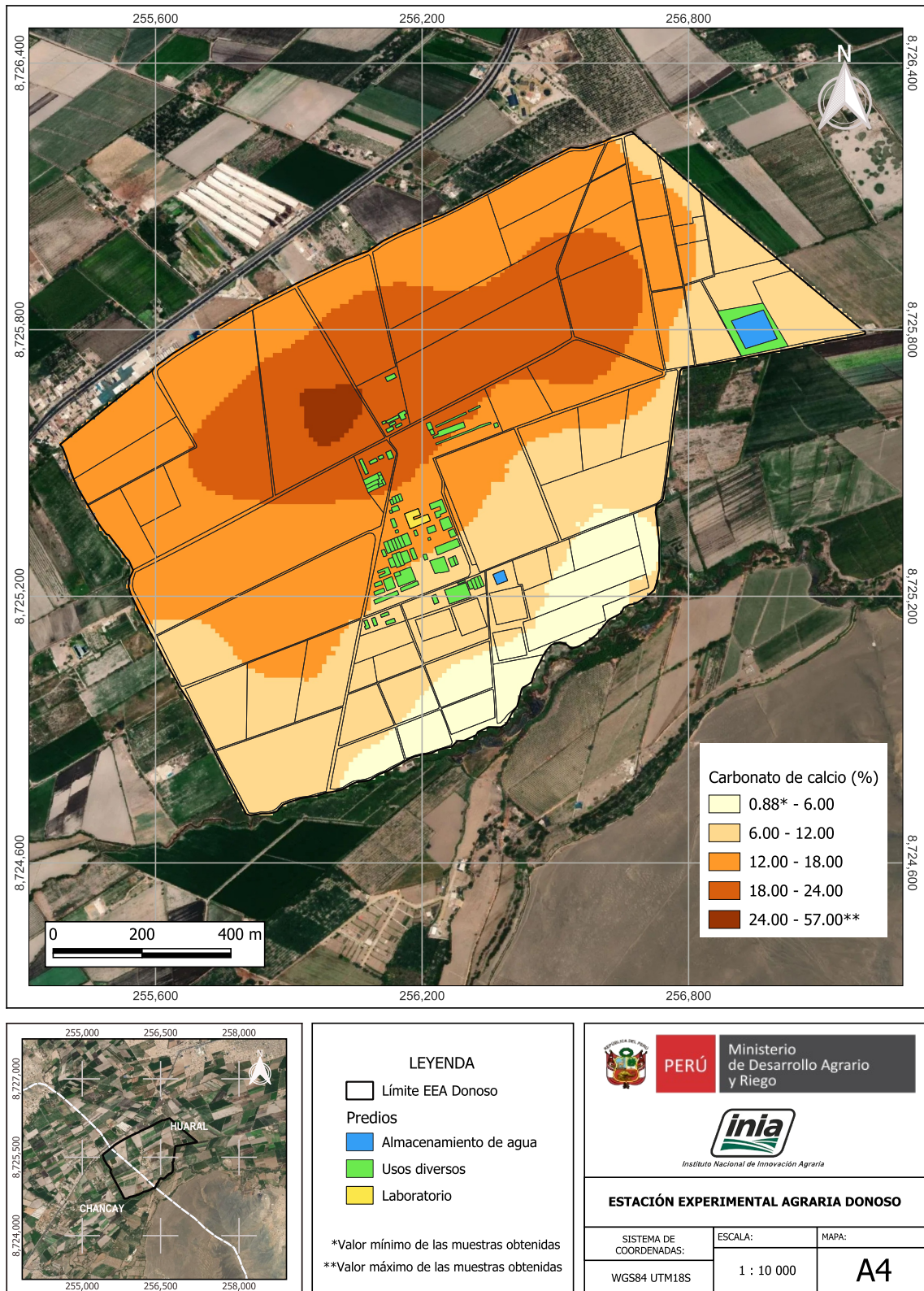


Figura 15. Mapa de variación espacial del porcentaje de carbonato de calcio (CaCO<sub>3</sub>)

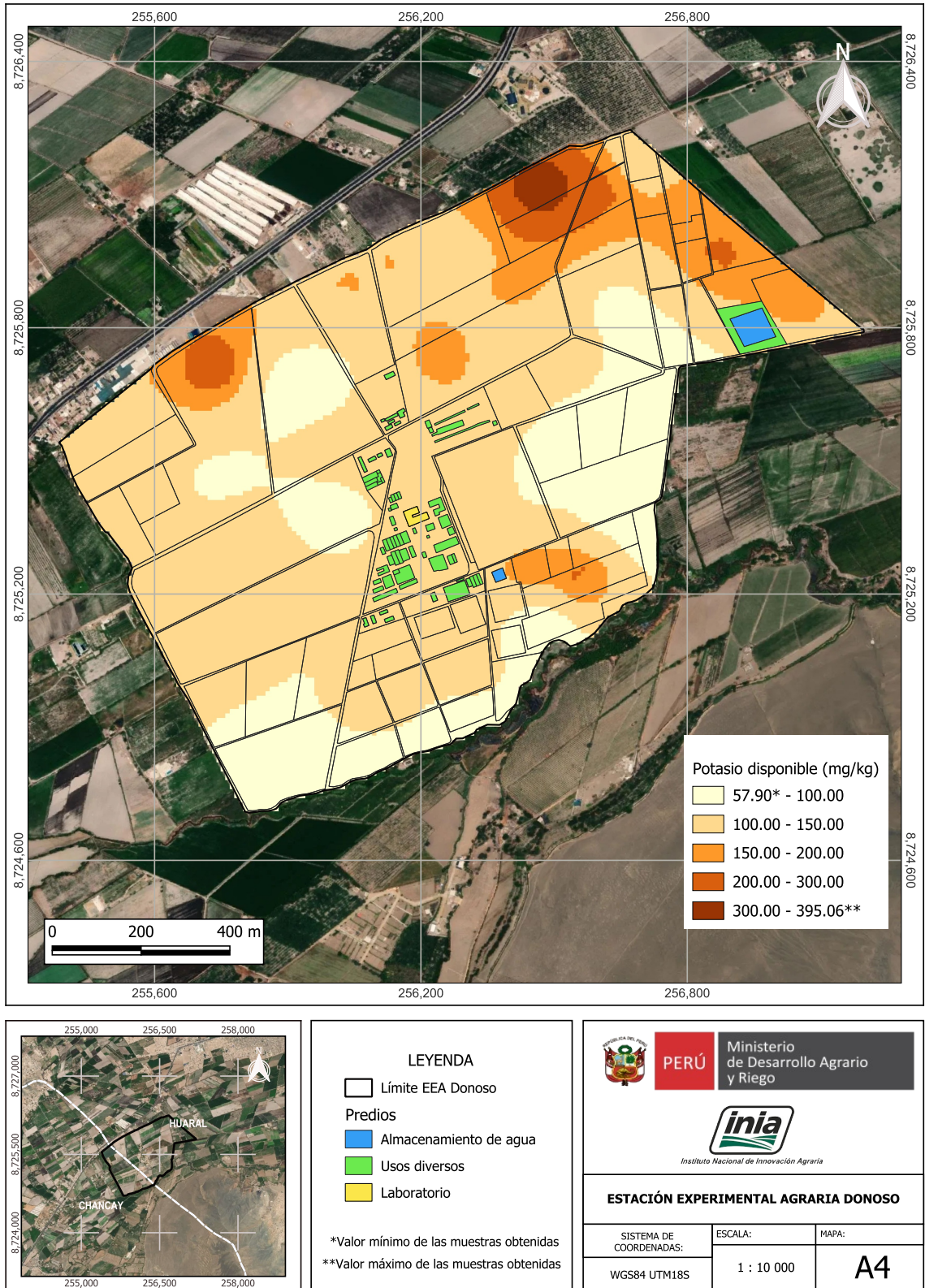


Figura 16. Mapa de variación espacial del potasio disponible

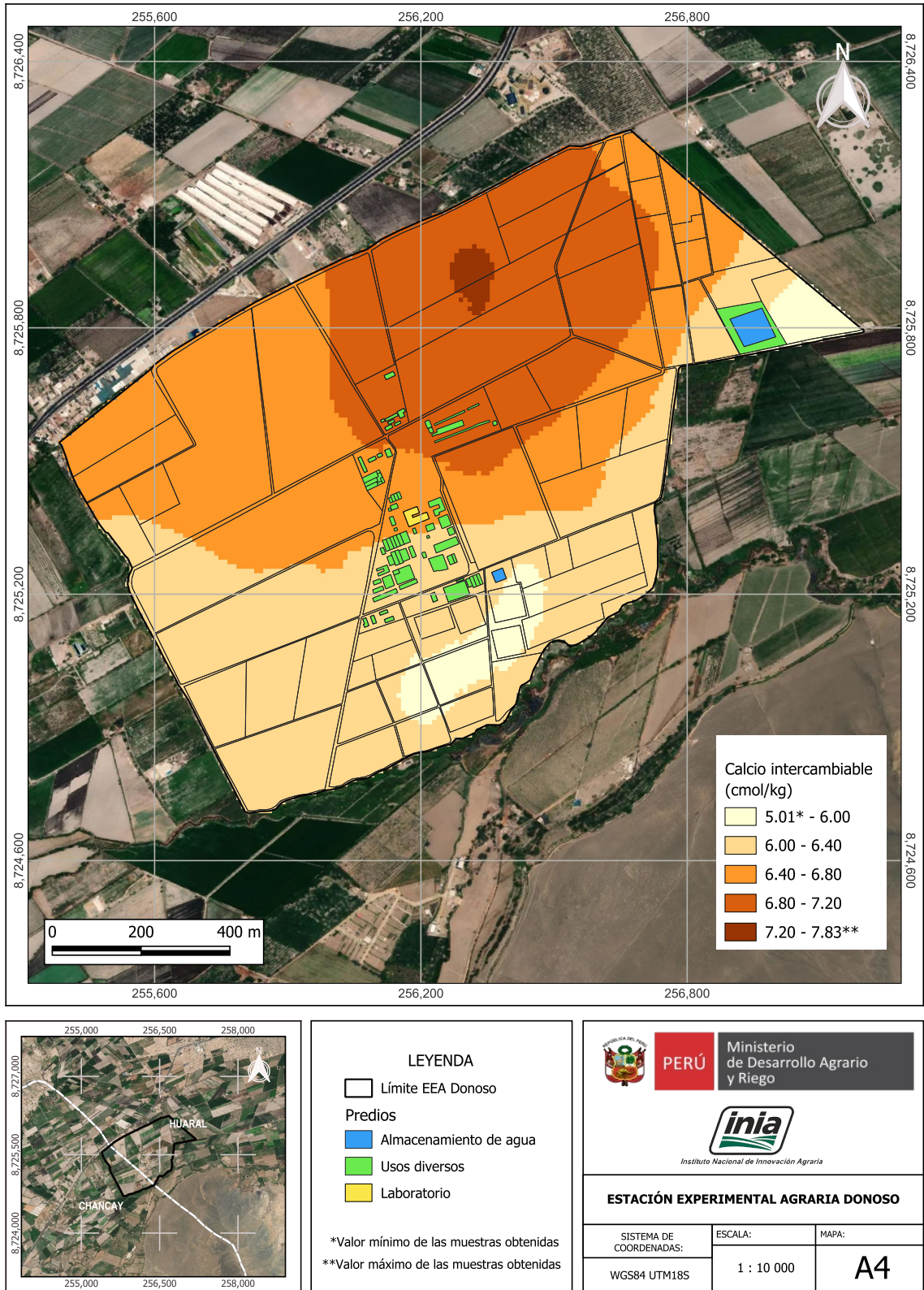


Figura 17. Mapa de variación espacial del calcio ( $\text{Ca}^{+2}$ ) intercambiable

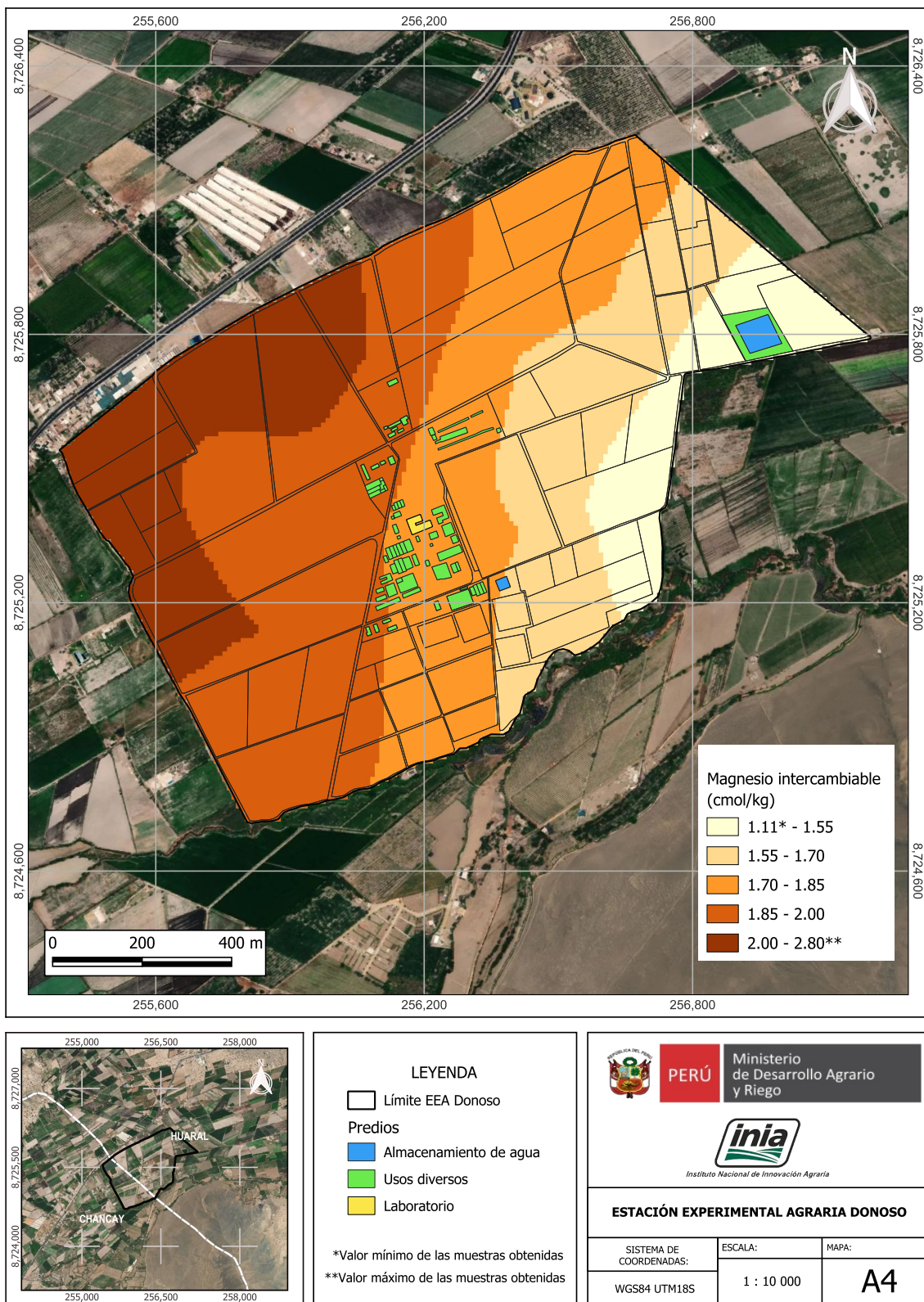


Figura 18. Mapa de variación espacial del magnesio ( $Mg^{2+}$ ) intercambiable

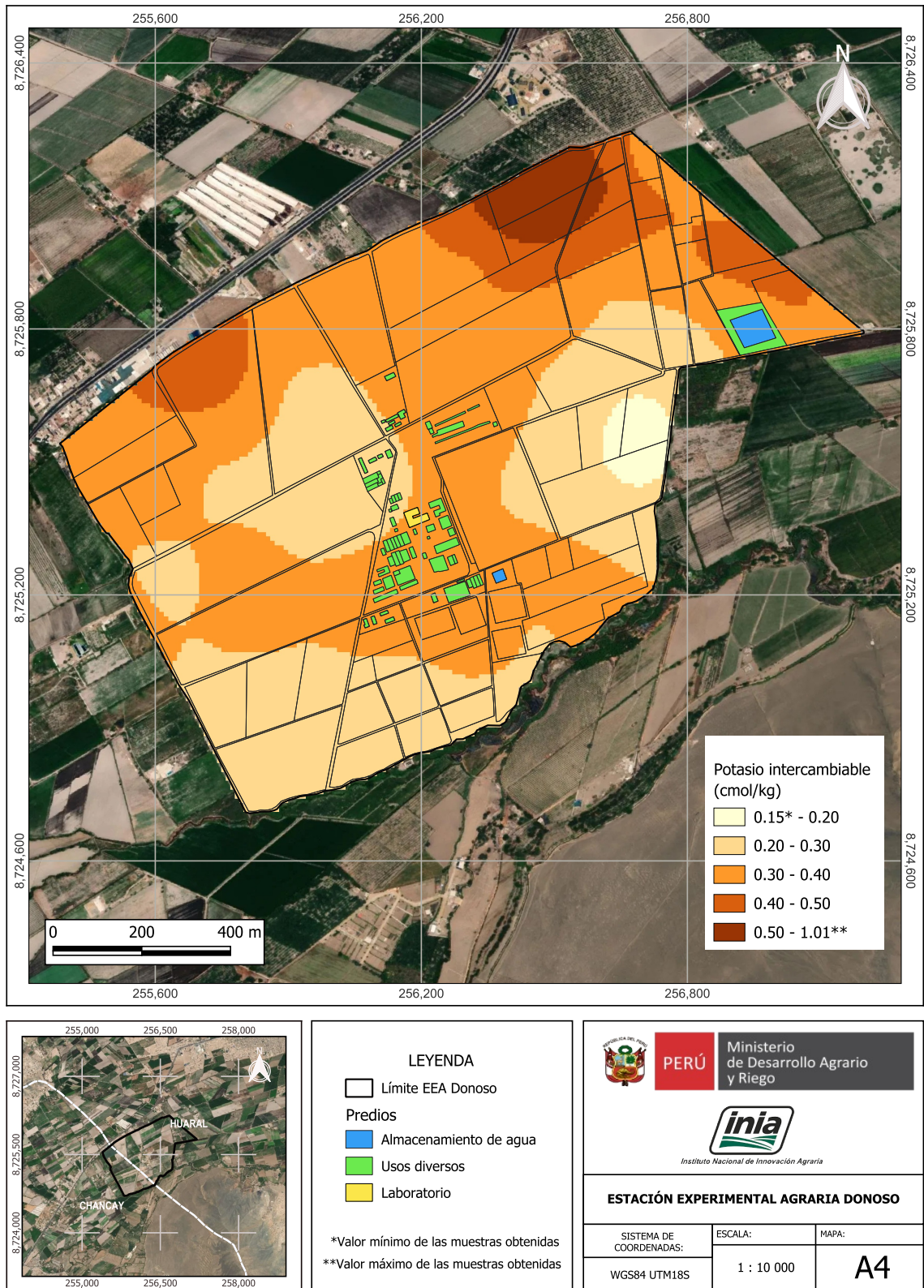


Figura 19. Mapa de variación espacial del potasio ( $K^+$ ) intercambiable

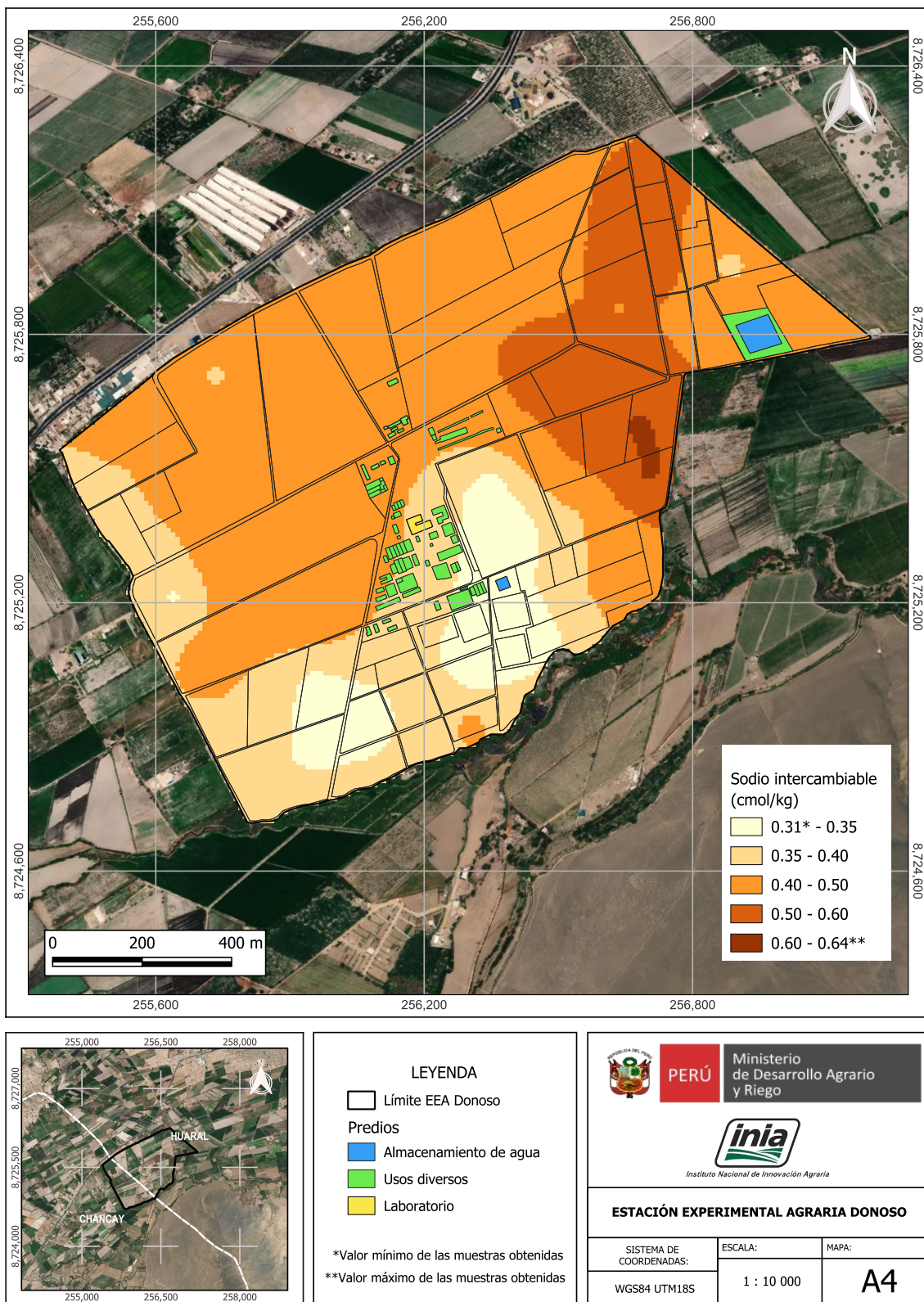


Figura 20. Mapa de variación espacial del sodio (Na<sup>+</sup>) intercambiable

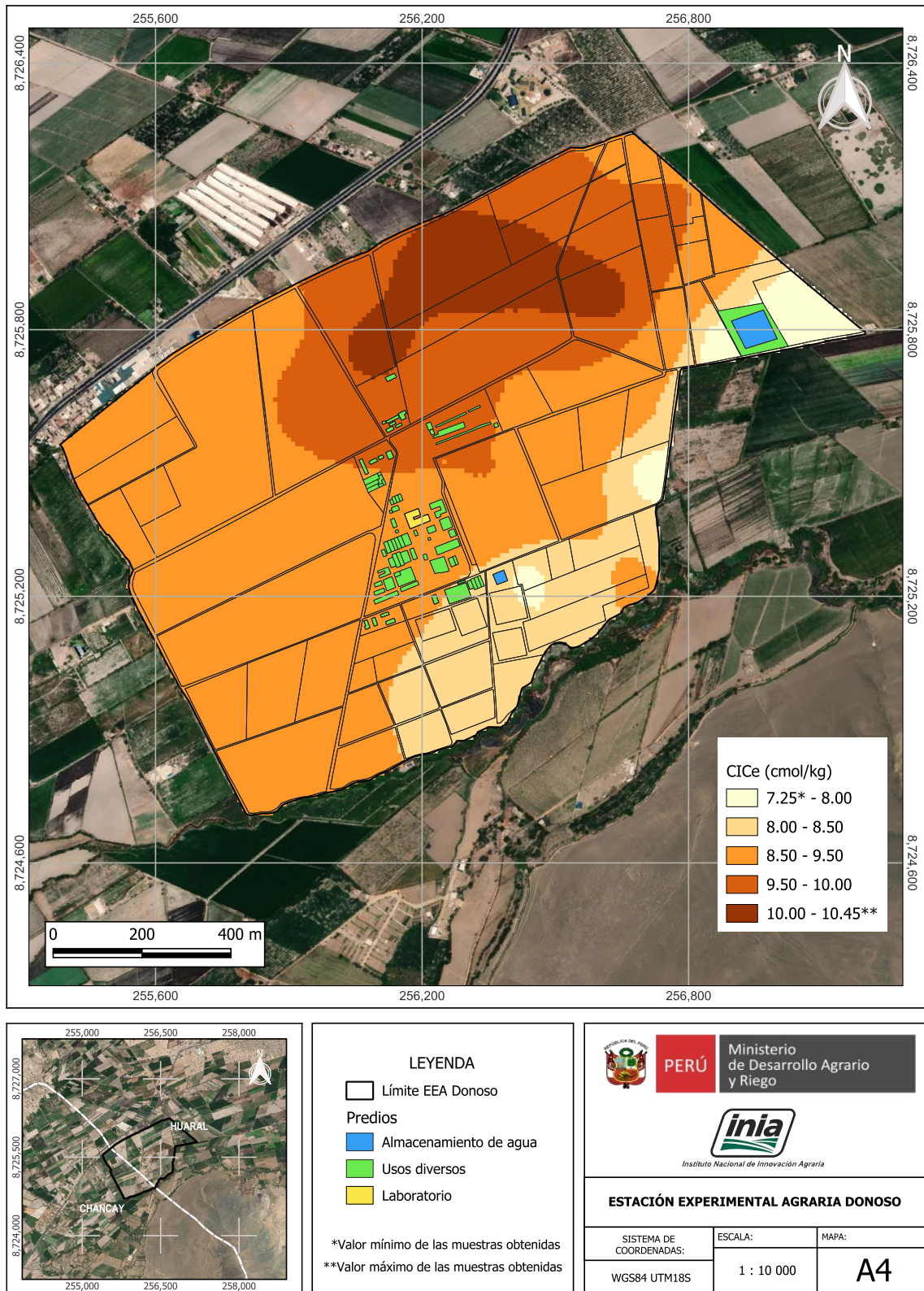
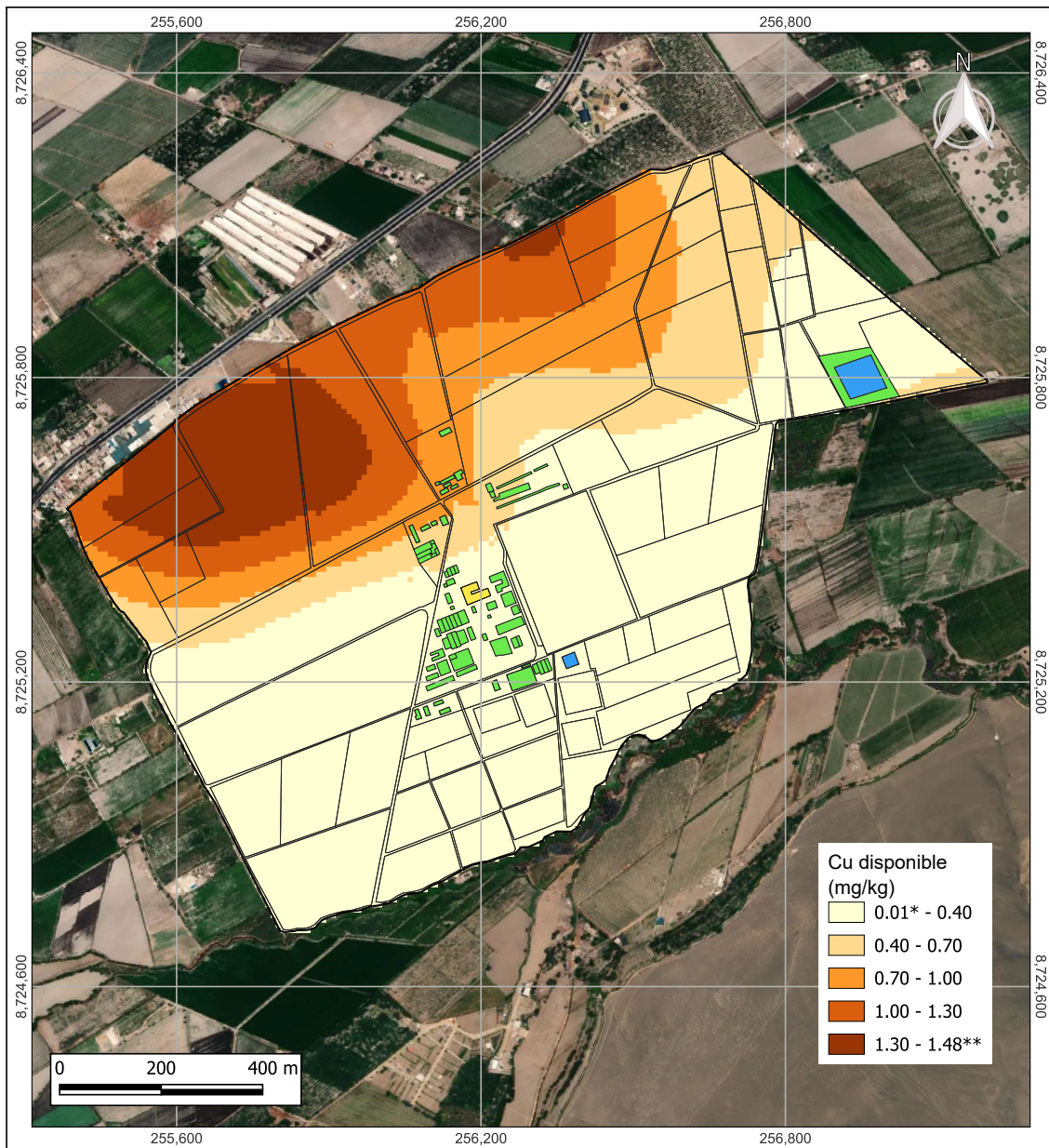


Figura 21. Mapa de variación espacial de la capacidad de intercambio catiónico (CIC) efectiva



|                         |   |           |  |                         |         |       |              |
|-------------------------|---|-----------|--|-------------------------|---------|-------|--------------|
|                         | <p><b>LEYENDA</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li><span style="border: 1px solid black; display: inline-block; width: 15px; height: 10px; margin-right: 5px;"></span> Límite EEA Donoso</li> <li><b>Predios</b></li> <li><span style="background-color: blue; display: inline-block; width: 15px; height: 10px; margin-right: 5px;"></span> Almacenamiento de agua</li> <li><span style="background-color: green; display: inline-block; width: 15px; height: 10px; margin-right: 5px;"></span> Usos diversos</li> <li><span style="background-color: yellow; display: inline-block; width: 15px; height: 10px; margin-right: 5px;"></span> Laboratorio</li> </ul> |           | <p><b>Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego</b></p> <p><b>inia</b><br/>Instituto Nacional de Innovación Agraria</p> |                         |         |       |              |
|                         | <p><b>ESTACIÓN EXPERIMENTAL AGRARIA DONOSO</b></p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 33%;">SISTEMA DE COORDENADAS:</td> <td style="width: 33%;">ESCALA:</td> <td style="width: 33%;">MAPA:</td> </tr> <tr> <td>WGS84 UTM18S</td> <td>1 : 10 000</td> <td style="text-align: center; font-size: 24px;"><b>A4</b></td> </tr> </table>   |           |  | SISTEMA DE COORDENADAS: | ESCALA: | MAPA: | WGS84 UTM18S |
| SISTEMA DE COORDENADAS: | ESCALA:   | MAPA:     |  |                         |         |       |              |
| WGS84 UTM18S            | 1 : 10 000  | <b>A4</b> |  |                         |         |       |              |

\*Valor mínimo de las muestras obtenidas  
\*\*Valor máximo de las muestras obtenidas

Figura 22. Mapa de variación espacial del cobre (Cu) disponible

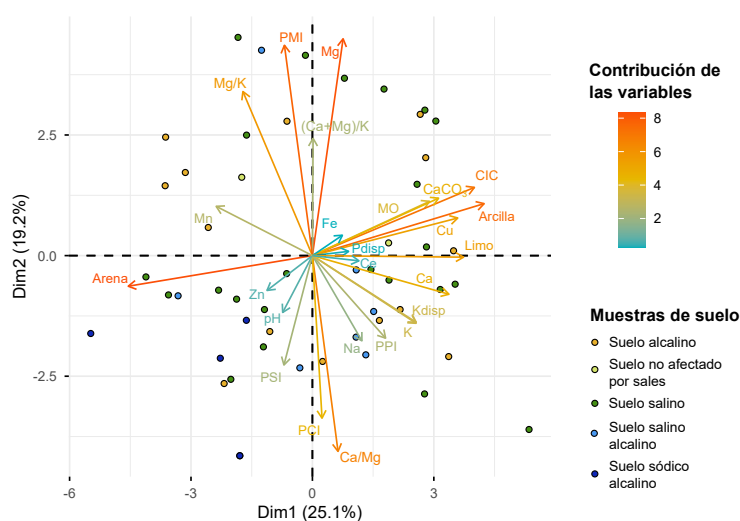


## 4. Recomendaciones de manejo de la fertilidad del suelo en la EEA Donoso

### 4.1. Índice de saturación de bases catiónicas

En suelos fuertemente calcáreos y alcalinos, los sitios de intercambio catiónico están saturados, principalmente, por  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$ . En la EEA Donoso, se ha identificado que el 75 % de los suelos presentan más de 6.82 % de  $\text{CaCO}_3$  y el 50 % de los suelos presentan pH mayores a 8.00. En estos suelos, el  $\text{K}^+$  permanece como un nutriente “diluido” en un complejo de cambio altamente saturado por  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$ .

Los indicadores geoestadísticos para el porcentaje de potasio intercambiable (PPI) evidenciaron una baja estructuración espacial, con un *nugget* ( $C_0$ ) de 0.138 y un *sill* ( $C_0 + C$ ) de 0.201 (Tabla 3), los cuales indican una limitada variabilidad espacial del PPI tanto a corta como a mayor distancia. Asimismo, el modelo presentó un bajo  $R^2$  (0.09) y un RMSE de  $\pm 0.427$ , reflejando una baja precisión y calidad en las predicciones. Esta falta de estructura puede atribuirse a interacciones catiónicas no modeladas, como la saturación por  $\text{Mg}^{2+}$  (Figura 23). Para mejorar la predictibilidad espacial del potasio, se recomienda incrementar la densidad de muestreo y aplicar modelos geoestadísticos asistidos por variables edáficas auxiliares (textura, CIC, materia orgánica o niveles de  $\text{Mg}^{2+}$  intercambiable).



**Figura 23.** Análisis de componentes principales de 23 variables fisicoquímicas de los suelos de la EEA Donoso. CIC: capacidad de intercambio catiónico, Ca/Mg: relación Ca y Mg, (Ca+Mg)/K: relación de la suma Ca y Mg sobre el K, K disp.: potasio disponible, Mg/Kg: relación Mg y K, MO: materia orgánica, PMI: porcentaje de Mg intercambiable, PPI: porcentaje de potasio intercambiable

De esta manera, el análisis revela que el PPI no puede ser interpolado confiablemente a escala espacial en los suelos de la EEA Donoso. En este contexto, y bajo el enfoque BCSR, se observa una tendencia marcada hacia saturaciones catiónicas dominadas por magnesio en la Tabla 2 (19.93 %, CV = 21.93 %), mientras que el PPI muestra valores considerablemente más bajos (media = 3.62 %, CV = 41.55 %). Esta relación Mg/K desfavorable puede afectar la disponibilidad efectiva del K, limitar su absorción y generar desequilibrios nutricionales a nivel radicular. Por ello, al no poder modelar el PPI espacialmente, adquiere mayor relevancia el uso del K disponible ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) como variable de referencia para los cálculos de fertilización con el enfoque SLAN, y para la elaboración de mapas de predicción espacial de los requerimientos de fertilización.

## 4.2. Niveles de suficiencia de nutrientes disponibles

En suelos alcalinos, la disponibilidad del fósforo (P) se ve afectada principalmente por procesos de precipitación química, especialmente con cationes como  $\text{Ca}^{2+}$ , que se encuentra en alta saturación en estas condiciones edáficas. De esta manera, en los suelos de la EEA Donoso, el fósforo tiende a formar fosfatos cálcicos poco solubles, tales como hidroxiapatita y fosfatos tricálcicos. Estos compuestos reducen significativamente la disponibilidad del P para las plantas, por lo que se encuentran niveles de P-Olsen por debajo de  $13.12 \text{ mg kg}^{-1}$ , en el 75 % de los suelos analizados. Este fenómeno limita la fracción del fósforo total que puede encontrarse en forma de fosfato monovalente ( $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ), especie iónica más asimilable por las raíces.

Según el enfoque SLAN, la proporción del fósforo disponible para el cultivo es más relevante que la cantidad total de este elemento en el suelo. En este estudio, el P disponible (P-Olsen) presentó una media de  $11.19 \text{ mg kg}^{-1}$  y un coeficiente de variación (CV) de 47.2 % (Tabla 2), lo que indica una alta heterogeneidad espacial y con niveles de menos de  $15 \text{ mg kg}^{-1}$  en gran parte del territorio analizado (Figura 24). Sin embargo, los indicadores geoestadísticos del P disponible del suelo muestran que no hay un buen grado de ajuste entre los valores observados y los valores predichos a nivel espacial ( $\text{RMSE} = 0.57$  y  $\text{R}^2 = 0.22$ ). De esta manera, el requerimiento de fertilización fosforada sólo es posible realizarlo mediante un análisis de suelo sitio-específico. En este caso, se tomará como ejemplo el valor de  $10.73 \text{ mg kg}^{-1}$  (mediana) para la estimación de la fertilización de mantenimiento y construcción en el cultivo de palto.

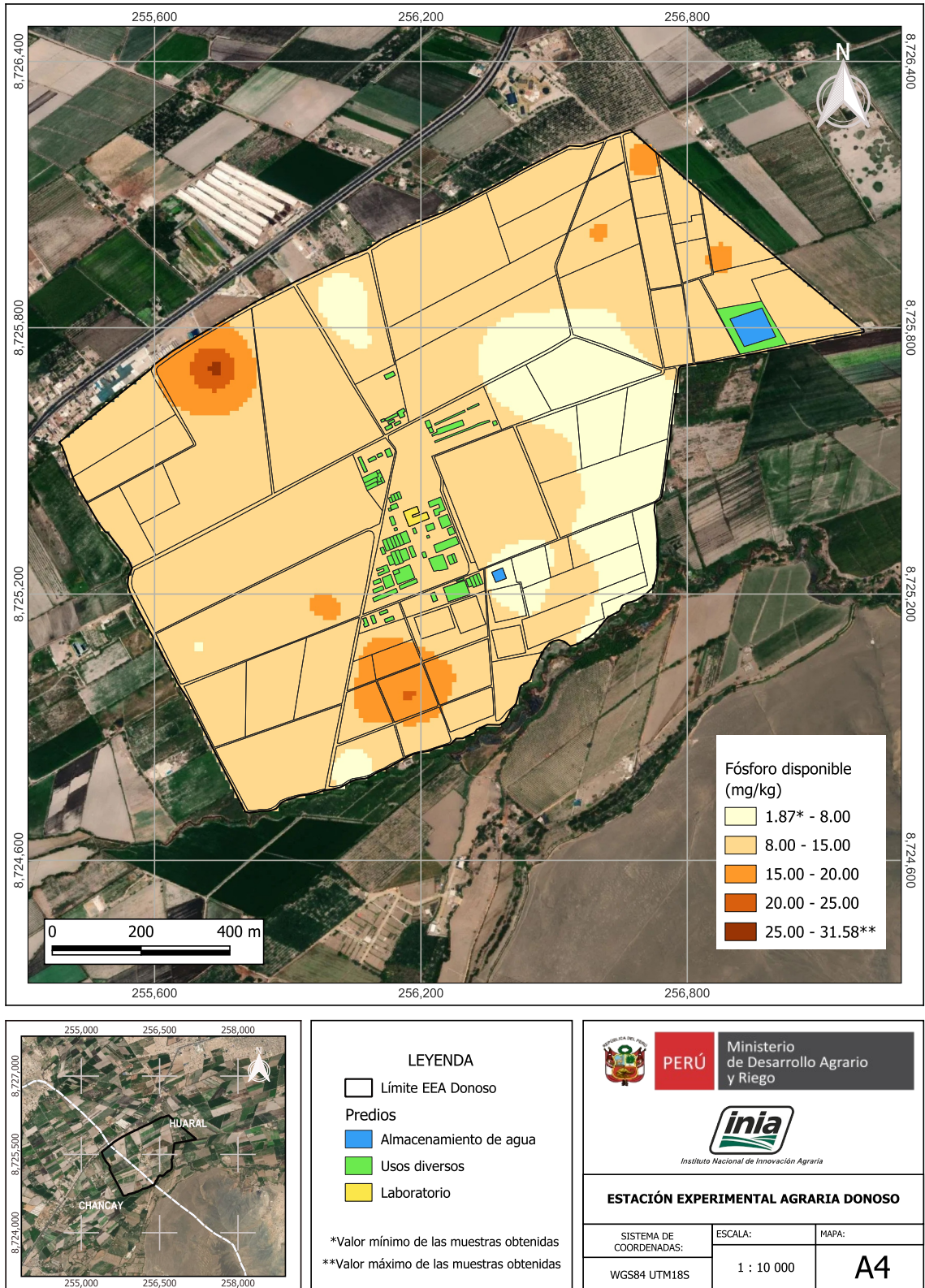


Figura 24. Mapa de variación espacial del fósforo disponible

Para el cálculo de la fertilización anual, se considerará la siguiente información: 35 % de fósforo de requerimiento adicional para el incremento de raíces y brotes nuevos, 1.06 kg de extracción de P por tonelada de producción, 30 % de eficiencia de uso del nutriente, un y 52 % de riqueza de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> del fertilizante fosfato monoamónico (MAP).

Para el cultivo de palto, 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 10.73 mg de P-Olsen por kg de suelo permite obtener un rendimiento relativo (RR) del 50 %. El cálculo de la dosis anual de fertilización de fósforo se detalla a continuación:

**Primer paso:** calcular el rendimiento con 10.73 mg de P-Olsen por kg de suelo, utilizando la fórmula 2:

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

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

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

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

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

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

$$\text{Requerimiento de P} = 1.06 \text{ kg de P t}^{-1} \times 20.25 \text{ t ha}^{-1} = 21.47 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

**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 30 %.

$$\text{RM de P} = \frac{21.47 \text{ kg de P ha}^{-1}}{0.30} = 71.57 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

**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 conoce como 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.

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

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

Dosis de fertilización de P =  $71.57 \text{ kg de P ha}^{-1} + 9 \text{ kg de P ha}^{-1} = 80.57 \text{ kg de P ha}^{-1}$

De esta manera, la dosis de fertilización anual sería de  $354.82 \text{ kg de fosfato monoamónico ha}^{-1}$  (52 % de  $\text{P}_2\text{O}_5$ ). Con esta dosis de fertilizante, se logra restaurar el fósforo disponible hasta niveles óptimos para el cultivo de palto y asegurar una reserva de fósforo en el suelo que sustenta rendimientos sostenidos a largo plazo. Dada la importancia crítica del fósforo para procesos fisiológicos como la división celular, formación de raíces y floración, este se debe fraccionar en toda la campaña agrícola. Este enfoque, basado en mapas de P disponible y modelos estadísticos, permite una fertilización precisa y eficiente, reduciendo costos y riesgos ambientales asociados al uso indiscriminado de fertilizantes.

### 4.3. El pH del suelo

Los principales problemas de los suelos de la EEA Donoso son la alcalinidad y la salinidad. El 75 % de los suelos analizados presentan valores de  $\text{CaCO}_3$  equivalente superiores al 6.82 %, y el 50 % presentan un pH superior a 8.00. En estas condiciones, la disponibilidad de micronutrientes como hierro (Fe), zinc (Zn) y manganeso (Mn) puede verse limitada en toda el área de estudio, con diferentes grados de deficiencia (Figuras 25, 26 y 27).

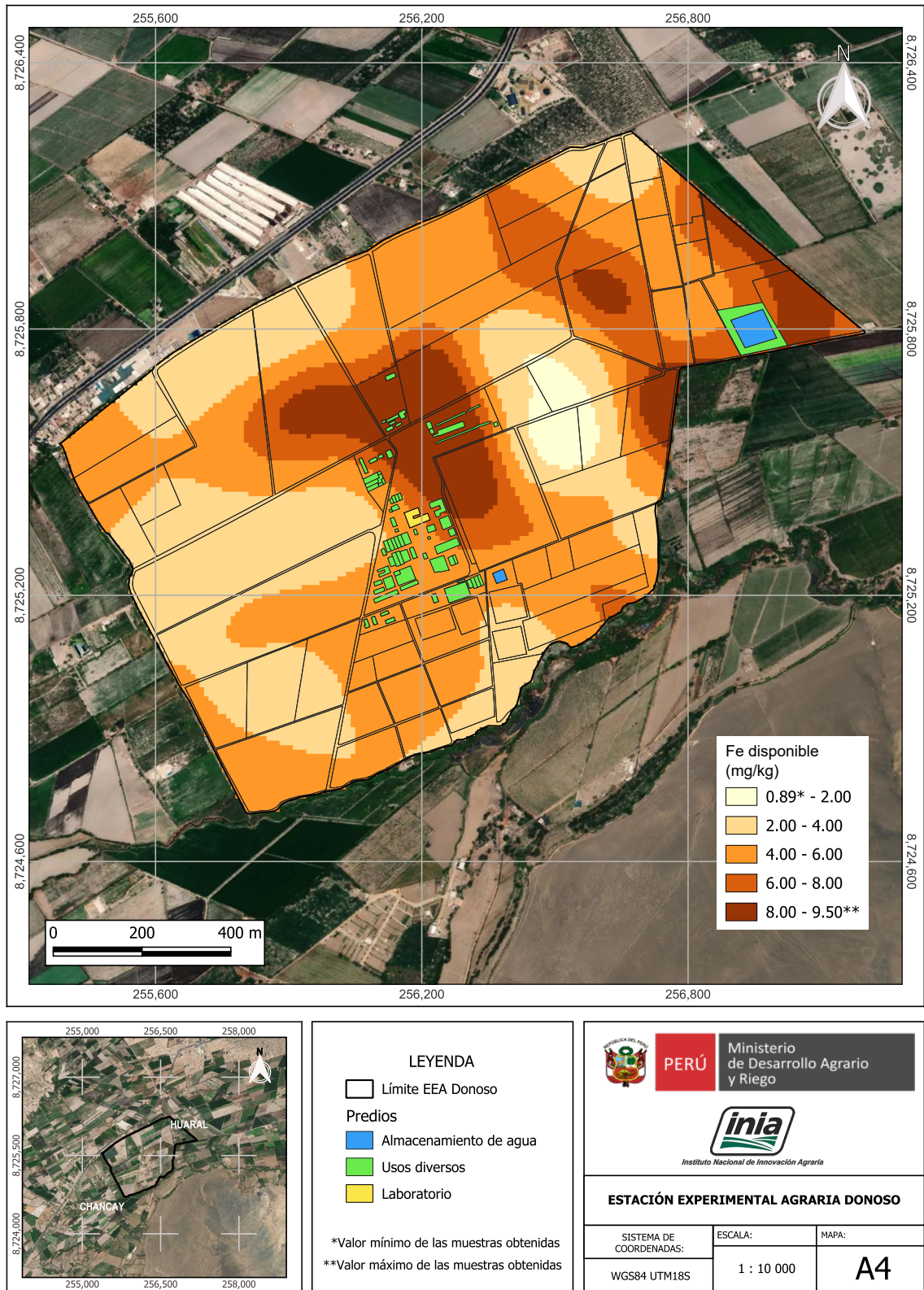


Figura 25. Mapa de variación espacial del hierro (Fe) disponible

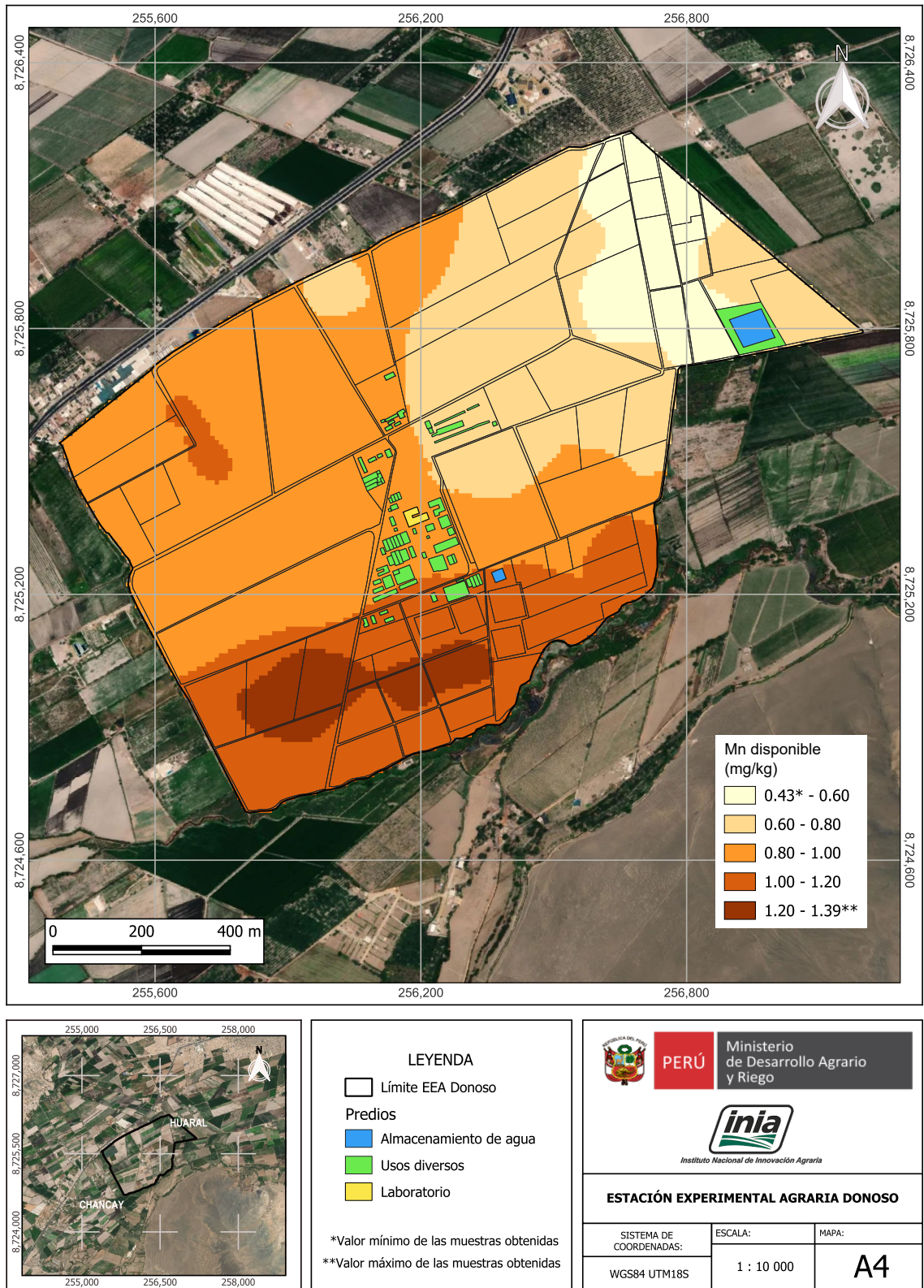


Figura 26. Mapa de variación espacial del manganeso (Mn) disponible

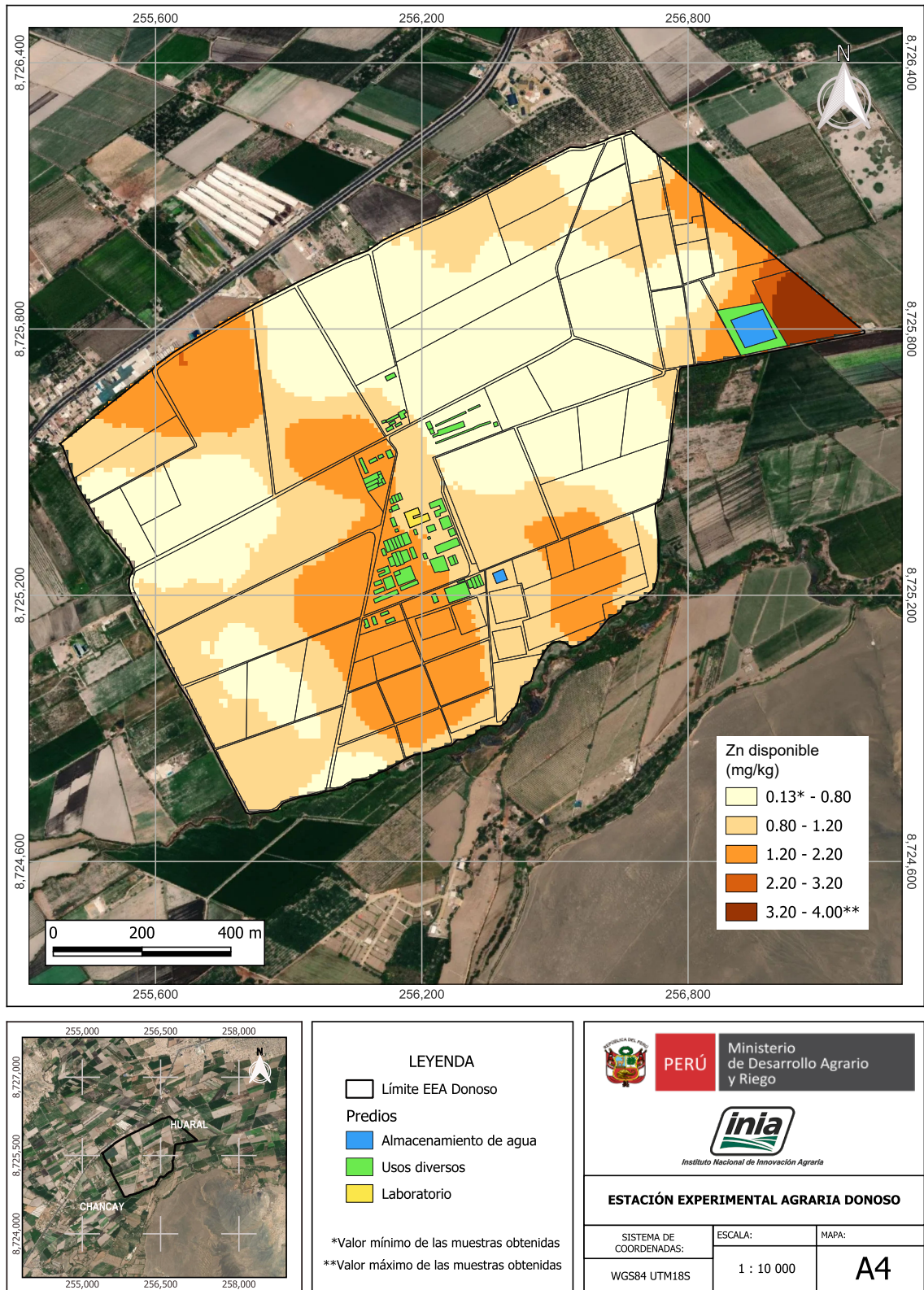


Figura 27. Mapa de variación espacial del zinc (Zn) disponible

Los indicadores geoestadísticos obtenidos para el pH del suelo mostraron un valor de *nugget* ( $C_0$ ) bajo (0.028), lo que sugiere una baja variabilidad a microescala, es decir, los valores de pH no cambian de forma significativa a distancias muy cortas. Asimismo, el valor del *sill* ( $C_0 + C$ ) fue de 0.037, confirmando que la variabilidad del pH del suelo sigue siendo baja incluso a mayor escala espacial, lo cual es consistente con una distribución homogénea del pH en el área de estudio. Además, el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) fue relativamente bajo (0.22), lo que implica que solo el 22 % de la variabilidad espacial del pH fue explicada por el modelo. El bajo valor de  $R^2$  refleja la baja predictibilidad espacial del pH en el área de estudio, haciendo difícil para el modelo identificar patrones espaciales significativos.

Estos resultados permiten concluir que el pH del suelo en el área de estudio es una variable espacialmente estable y presenta poca variación en el terreno ( $CV = 3.25\%$ ). Por lo tanto, la media aritmética del pH es representativa para realizar diagnósticos agronómicos a escala predial, para este parámetro en particular. No obstante, los resultados geoestadísticos muestran una distribución espacial variable del Fe, Mn y Zn disponibles, con moderada y alta predictibilidad espacial ( $R^2$  de 0.37, 0.97 y 0.85, respectivamente), lo que refuerza la necesidad de realizar diagnósticos precisos por sitio y ajustar las dosis y frecuencias de aplicación edáfica y foliar en función a los mapas de fertilidad de la EEA Donoso. Esta estrategia no solo mejoraría la eficiencia nutricional, sino que también minimizaría pérdidas por inmovilización en el suelo, optimizando la productividad de los cultivos en la EEA Donoso.

Para el diagnóstico de la deficiencia, es importante determinar los niveles críticos de micronutrientes extraídos en laboratorio por el método del ácido etilendiaminotetraacético (EDTA), antes de aplicar estrategias de corrección edáfica y foliar. Para el Fe, se considera que un contenido menor a  $10 \text{ mg kg}^{-1}$  indica deficiencia en suelos calcáreos y salinos. En el caso del Mn, el nivel crítico suele fijarse en torno a  $1 \text{ mg kg}^{-1}$ , por debajo del cual los cultivos manifiestan síntomas típicos de falta de este elemento. Finalmente, para el Zn, valores inferiores a  $0.8 \text{ mg kg}^{-1}$  señalan deficiencia. Estos umbrales permiten diseñar aplicaciones edáficas y foliares precisas de quelatos de Fe, Mn y Zn, ajustando dosis y frecuencia en función a las zonas de manejo identificadas, para garantizar una nutrición eficiente en ambientes de pH elevado.



## 5. Referencias bibliográficas

- Alam, S. M., Naqvi, S. S. M., y Ansari, R. (1999). Impact of soil pH on nutrient uptake by crop plants. En M. Pessaraki (Ed.), *Handbook of plant and crop stress*, (pp. 51-60). Marcel Dekker Inc.
- Álvarez-Herrera, J. G., Ruiz-Berrío, H. D., y Acosta-Tova, D. F. (2021). Evaluación geoestadística de atributos hidrofísicos del suelo en la granja 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.
- Barber, S. A. (1995). *Soil nutrient bioavailability: A mechanistic approach*. John Wiley y Sons.
- Bear, F. E., Prince, A. L., y Malcolm, J. L. (1945). *Potassium needs of New Jersey soils*. New Jersey Agricultural Experiment Station.
- Bray, R. H. (1958). The correlation of a phosphorus soil test with the response of wheat through a modified Mitscherlich equation. *Soil Science Society of America Journal*, 22(4), 314-317. <https://doi.org/10.2136/sssaj1958.03615995002200040013x>
- Brock, C., Jackson-Smith, D., Kumarappan, S., Culman, S., Doohan, D., y Herms, C. (2021). The prevalence and practice of soil balancing among organic corn farmers. *Renewable Agriculture and Food Systems*, 36(4) 1-10. <https://doi.org/10.1017/S1742170520000381>
- Buresh, R. J., Smithson, P. C., y Hellums, D. T. (1997). Building Soil Phosphorus Capital in Africa. En R. J. Buresh, P. A. Sanchez, y F. Calhoun (Eds.), *Replenishing Soil Fertility in Africa* (pp. 111-149). Soil Science Society of America, Inc; American Society of Agronomy, Inc. <https://doi.org/10.2136/sssaspepub51.c6>
- Chaganti, V., y Culman, S. (2017). Historical perspective of soil balancing theory and identifying knowledge gaps: A review. *Crop, Forage & Turfgrass Management*, 3(1), 1-7. <https://doi.org/10.2134/cftm2016.10.0072>
- Chinea-Horta, A., y Rodríguez-Izquierdo, L. (2021). Comportamiento geoespacial de algunas propiedades del suelo en el cultivo de la caña de azúcar. *Ingeniería Agrícola*, 11(1). <https://www.redalyc.org/journal/5862/586269368001/html/>
- Cruz-Luis, J. A., Ortiz-Morera, N., Quispe-Torres, D. R., Atalaya-Lopez, J. S., Macavilca-Villar, P. M., Ramírez-Aparacio, J. A., Salinas-Rivera, J. L., Escobar-Cuadros, F., Carbajal-Llosa, C. M., Olivarez-Rivera, E. L., Casaretto-Castagnino, D., Ganoza-Roncal, J. J. (2025). *Atlas de las Estaciones Experimentales Agrarias del INIA*. Instituto Nacional de Innovación Agraria. <http://hdl.handle.net/20.500.12955/2763>
- Culman, S. W., Brock, C., Doohan, D., Jackson-Smith, D., Herms, C., Chaganti, V. N., Kleinhenz, M., Sprunger, C. D. y Spargo, J. (2021). Base cation saturation ratios vs. sufficiency level of nutrients: A false dichotomy in practice. *Agronomy Journal*, 113(6), 5623-5634. <https://doi.org/10.1002/agj2.20787>
- de Valença, A. W., Vanek, S. J., Meza, K., Ccanto, R., Olivera, E., Scurrah, M., Lantinga, E. A., y Fonte, S. J. (2017). Land use as a driver of soil fertility and biodiversity across an agricultural landscape in the Central Peruvian Andes. *Ecological Applications*, 27(4), 1138-1154. <https://doi.org/10.1002/eap.1508>
- Díaz-Chuquizuta, H., Arévalo-Aranda, Y., Samaniego-Puente, J. C., Siquiera-Bahia, R. de C., y Solórzano-Acosta, R. A. (2025). *Manual para la fertilización del cultivo de maíz amarillo duro en condiciones de la selva peruana*. Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA). <http://hdl.handle.net/20.500.12955/2687>

- Environmental Protection Agency. (2004). *Method 9045D: Soil and waste pH, part of test methods for evaluating solid waste, physical/chemical methods*. <https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-12/documents/9045d.pdf>
- Espinosa, J., y Molina, E. (1999). *Acidez y encalado de los suelos* (1.ª ed.). International Plant Nutrition Institute. <https://doi.org/10.13140/2.1.3888.9281>
- Garbanzo-León, G., Alemán-Montes, B., Alvarado-Hernández, A., y Henríquez-Henríquez, C. (2017). Validación de modelos geoestadísticos y convencionales en la determinación de la variación espacial de la fertilidad de suelos del Pacífico Sur de Costa Rica. *Investigaciones Geográficas*, (93), 20-41. [dx.doi.org/10.14350/rig.54706](https://doi.org/10.14350/rig.54706)
- García, F. O., y Ciampitti, I. A. (2010). Enfoques alternativos para el diagnóstico de fertilidad de suelos el enfoque “tradicional”. *Informaciones Agronómicas*, (3), 17-25. <https://fertilizar.org.ar/wp-content/uploads/2011/09/17.pdf>
- Graham, E. R. (1959). *An explanation of theory and methods of soil testing*. University of Missouri, Agricultural Experiment Station.
- Halstead, R. L., MacLean, A. J., y Nielsen, K. F. (1958). Ca: Mg ratios in soil and the yield and composition of alfalfa. *Canadian Journal of Soil Science*, 38(2), 85-93. <https://cdnsiencepub.com/doi/10.4141/cjss58-014>
- Havlin, J. L., Tisdale, S. L., Nelson, W. L., y Beaton, J. D. (2016). *Soil fertility and fertilizers*. Pearson Education India.
- Heuvelink, G. B. M., y Webster, R. (2022). Spatial statistics and soil mapping: A blossoming partnership under pressure. *Spatial Statistics*, 50. <https://doi.org/10.1016/j.spasta.2022.100639>
- 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. En T. R. Peck, J. T. Cope Jr. y D. A. Whitney, *Soil testing: correlating and interpreting the analytical results* (pp. 39-54). <https://doi.org/10.2134/asapecpub29.c3>
- Moral-García, F. J. (2004). Aplicación de la geoestadística en las ciencias ambientales. *Ecosistemas*, 1(11). <https://www.revistaecosistemas.net/index.php/ecosistemas/article/view/582>
- Niebla-Torres, R. E., Barrezueta-Unda, S., Luna-Romero, Á., y Chabla-Carrillo, J. (2021). Aplicación de modelos geoestadísticos para definir la variabilidad de un perfil del suelo. *Revista Metropolitana de Ciencias Aplicadas*, 4(1), 188-195. <https://doi.org/10.62452/zx01j782>

- Quispe, K., Mejía, S., Carbajal, C., Alejandro, L., Verástegui, P., y Solórzano, R. (2024). Spatial Variability of Soil Acidity and Lime Requirements for Potato Cultivation in the Huánuco Highlands. *Agriculture*, 14(12). <https://doi.org/10.3390/agriculture14122286>
- Quispe-Matos, K. R., Carbajal-Llosa, C. M., Mejía-Maita, S. Y., Llerena-Arroyo, R. A., Solórzano-Acosta, R. A., y Cruz-Luis, J. A. (2025). *Variación espacial de la fertilidad del suelo en la EEA Canaán*. Instituto Nacional de Innovación Agraria. <http://hdl.handle.net/20.500.12955/2852>
- 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>
- 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/>
- Reza, S. K., Nayak, D. C., Mukhopadhyay, S., Chattopadhyay, T., y Singh, S. K. (2017). Characterizing spatial variability of soil properties in alluvial soils of India using geostatistics and geographical information system. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 63(11), 1489-1498. <https://doi.org/10.1080/03650340.2017.1296134>
- R Core Team. (2018). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing. <https://www.r-project.org/>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2002). Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000, que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de los suelos. Estudio, muestreo y análisis. Diario Oficial de la Federación (31 de diciembre de 2002). <https://www.ordenjuridico.gob.mx/Documentos/Federal/wo69255.pdf>
- Teixeira, W. G., Alvarez V, V. H., Neves, J. C. L., y Paulucio, R. B. (2020). Evaluation of traditional methods for estimating lime requirement in Brazilian soils. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 44. <https://www.rbcjournal.org/article/evaluation-of-traditional-methods-for-estimating-lime-requirement-in-brazilian-soils/>
- Wang, C., y Kuzyakov, Y. (2024). Soil organic matter priming: The pH effects. *Global Change Biology*, 30(6). <https://doi.org/10.1111/gcb.17349>
- Yang, M., Zhou, D., Hang, H., Chen, S., Liu, H., Su, J., Lv, H., y Zhao, G. (2024). Effects of balancing exchangeable cations Ca, Mg, and K on the growth of tomato seedlings (*Solanum lycopersicum* L.) based on increased soil cation exchange capacity. *Agronomy*, 14(3), 629. <https://doi.org/10.3390/agronomy14030629>
- Zhang, G. Q. (1999). *Effects of exchangeable soil calcium, magnesium and calcium/magnesium ratios on plant nutrition and growth of lettuce on an ultisol* [Tesis de grado de Magister en ciencias, University of Hawaii at Manoa]. ScholarSpace. <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*







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

ISBN: 978-9972-44-243-8



9 789972 442438



PERÚ

Ministerio  
de Desarrollo Agrario  
y Riego



Instituto Nacional de Innovación Agraria



@INIAPerú