

Variación espacial de la fertilidad del suelo en la EEA Andenes



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 Andenes



PERÚ

Ministerio
de Desarrollo Agrario
y Riego



Instituto
Nacional de
Innovación
Agraria

VARIACIÓN ESPACIAL DE LA FERTILIDAD DEL SUELO EN LA EEA ANDENES

MINISTERIO DE DESARROLLO AGRARIO Y RIEGO

Ministro de Desarrollo Agrario y Riego

Felipe César Meza Millán

Viceministro de Políticas y Supervisión del Desarrollo Agrario

Jorge Luis Sáenz Rabanal

Viceministro de Desarrollo de Agricultura Familiar e Infraestructura Agraria y Riego

Orlando Hernán Chirinos Trujillo

Presidente Ejecutivo del Instituto Nacional de Innovación Agraria

Jorge Juan Ganoza Roncal, M. Sc.

© Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA)

Primera edición digital:

Julio, 2026

Publicado:

Julio, 2026

Disponible en:

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

ISBN:

978-9972-44-272-8

Editado por:

Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA)

Av. La Molina 1981, Lima-Perú

Teléf. (511) 240-2400

www.gob.pe/inia

Equipo Técnico de Edición y Publicaciones:

Janet Flores / Teléfono: 964173509 / Correo electrónico: comite_publicaciones@inia.gob.pe

Todos los derechos reservados.

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

Hecho el Depósito Legal en la Biblioteca Nacional del Perú N° 2026-08267

Autores: Kenyi R. Quispe-Matos, Carlos M. Carbajal-Llosa, Sharon Y. Mejia-Maita, Ruddy A. Ore-Valeriano, Rodolfo J. Chuchon-Remon, Veronica Condori-Huaman, Ashly Lloclla-Chirinos, Richard A. Solórzano-Acosta, Juancarlos A. Cruz-Luis / **Editor general:** Cinthia S. Quispe-Apaza / **Revisión de contenido:** Anthony L. Peralta-Guzmán / **Diseño y diagramación:** Miguel Alvarez-Escalante



Tabla de contenido

Presentación	7
1. Introducción	9
2. Principios fundamentales del análisis de suelos	11
2.1. Sistemas de interpretación del análisis de suelos	11
2.1.1. Índice de saturación de bases catiónicas	11
2.1.2. Sistema de suficiencia de nutrientes	14
2.1.3. El pH del suelo: modulador de la solubilidad de nutrientes	21
2.2. Análisis geoestadístico de las propiedades del suelo	23
3. Muestreo y análisis de suelos en la EEA Andenes	25
3.1. Ubicación	25
3.2. Muestreo estratificado del suelo	26
3.2.1. Determinación de los puntos de muestreo	27
3.2.2. Muestreo de suelos en los puntos identificados	28
3.3. Análisis de suelos	29
3.4. Resultados de los análisis de suelos	30
3.5. Geoestadística: metodología para el mapeo de las propiedades del suelo	32
3.6. Análisis de autocorrelación espacial: cómputo del índice de Moran	33
3.7. Interpolación <i>kriging</i> y validación cruzada con indicadores geoestadísticos	33
3.7.1. Generación y ajuste del variograma	33
3.7.2. Interpolación <i>kriging</i>	33
3.7.3. Validación cruzada	34
3.8. Resultado del análisis geoestadístico de las propiedades fisicoquímicas del suelo	34
3.9. Mapeo digital de las propiedades del suelo	37
4. Recomendaciones de manejo de la fertilidad del suelo en la EEA Andenes	61
4.1. Índice de saturación de bases catiónicas	61
4.1.1. Variación espacial de las relaciones catiónicas	61
4.2. Niveles de suficiencia de nutrientes disponibles	62
4.2.1. Cálculos de requerimiento de fertilización fosforada de mantenimiento y construcción para el cultivo de papa	62
4.2.2. Variación espacial de zonas deficientes de K disponible	63
4.2.3. Cálculos de requerimiento de fertilización potásica de mantenimiento y construcción para el cultivo de papa	64
5. Referencias bibliográficas	67



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 Estratégico 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 en la región Cusco constituye un factor determinante para la productividad agrícola, debido a su influencia directa en la disponibilidad de nutrientes, el rendimiento de los cultivos y la eficiencia en el uso de fertilizantes. Sin embargo, las propiedades químicas del suelo pueden presentar diferencias dentro de una misma unidad productiva, por lo que resulta necesario evaluarlas mediante herramientas que permitan identificar su distribución espacial. En este contexto, la aplicación de métodos geoestadísticos y sistemas de información geográfica (SIG) ofrece la posibilidad de analizar y representar espacialmente la fertilidad del suelo, generando información técnica útil para orientar estrategias de manejo sitio-específico y mejorar la eficiencia en la aplicación de insumos agrícolas. Bajo este enfoque, la Estación Experimental Agraria Andenes (EEA Andenes), ubicada en el departamento de Cusco, constituye un espacio estratégico para desarrollar estudios orientados a fortalecer el manejo sostenible del recurso suelo y contribuir a una agricultura más eficiente y rentable.

El documento titulado “Variación espacial de la fertilidad del suelo en la EEA Andenes” reúne información relacionada con el muestreo, análisis e interpretación de la distribución espacial de las propiedades edáficas. Además, describe de manera clara la metodología de análisis geoespacial empleada, la cual puede ser reproducida y adaptada a otros sistemas agrícolas. Asimismo, brinda un diagnóstico detallado del estado del suelo, contribuyendo a la toma de decisiones en torno a la fertilización, el manejo agronómico de los cultivos y el uso adecuado del terreno, promoviendo así una producción agrícola más eficiente y sostenible.

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



1. Introducción

En los Andes, las prácticas tradicionales de manejo del suelo como el barbecho, el uso de terrazas y la rotación de cultivos han sido fundamentales para sostener la producción agrícola durante siglos (Rolando et al., 2017). Las terrazas surgieron como una adaptación a las superficies inclinadas, permitiendo reducir la pendiente, controlar la erosión y disminuir la pérdida de agua, favoreciendo así el cultivo en zonas de ladera (Posthumus y Stroosnijder, 2010). Sin embargo, en la actualidad, la disminución de áreas cultivables, la reducción de la productividad de los suelos y la creciente presión por incrementar la producción de alimentos han impulsado la reducción de los periodos de barbecho (Sarmiento y Bottner, 2002), así como una mayor dependencia del uso de fertilizantes inorgánicos para aumentar los rendimientos (Pestalozzi, 2000). Estos cambios en el uso del suelo y la intensificación agrícola, sumados a los efectos del cambio climático, han contribuido a acelerar los procesos de degradación del suelo (De Valença et al., 2017).

La agricultura tradicional basada en cultivos andinos suele complementarse con sistemas mixtos de producción, lo que exige estrategias de manejo capaces de responder a la elevada heterogeneidad de las condiciones edáficas y climáticas presentes en la región. En este contexto, el monitoreo de la fertilidad del suelo constituye un componente esencial para promover una gestión agrícola sostenible y evitar procesos de degradación asociados al uso inadecuado o excesivo de fertilizantes. Por ello, la incorporación de herramientas de agricultura de precisión, integrando técnicas de geoestadística, análisis de suelos y sistemas de información geográfica, permite evaluar la variabilidad espacial de la fertilidad mediante métodos como la interpolación *kriging*, el índice de Moran y el análisis de semivariogramas. Estas herramientas se han consolidado como enfoques fundamentales para caracterizar la variabilidad espacial de las propiedades fisicoquímicas del suelo en contextos complejos como el de la EEA Andenes (Culman et al., 2021; Chinea-Horta y Rodríguez-Izquierdo, 2021). Los resultados derivados de estos análisis se expresan en mapas temáticos que representan la distribución y heterogeneidad de parámetros clave, facilitando una planificación de la fertilización más precisa, eficiente y adaptada a las particularidades de cada zona.

En este contexto, el presente documento tiene como finalidad analizar la distribución espacial de las propiedades fisicoquímicas del suelo en la EEA Andenes mediante la integración de análisis de laboratorio, herramientas geoestadísticas y sistemas de información geográfica. A partir de esta evaluación, se busca generar información técnica que permita identificar patrones espaciales en la fertilidad del suelo y establecer criterios para un manejo más eficiente de fertilizantes y enmiendas, acorde con las características específicas de cada sector evaluado. De esta manera, el estudio contribuirá al desarrollo de estrategias de manejo sitio-específico orientadas a optimizar la productividad agrícola, mejorar la eficiencia en el uso de insumos agrícolas y promover la sostenibilidad de los sistemas productivos en las condiciones agroecológicas de la región Cusco.



2. Principios fundamentales del análisis de suelos

2.1. Sistemas de interpretación del análisis de suelos

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

2.1.1. Índice de saturación de bases catiónicas

a. Concepto

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

b. Origen y aplicabilidad del concepto

El concepto de BCSR tuvo su origen en las investigaciones de William Albrecht en la década de 1930, quien estudió la relación entre la proporción de cationes básicos intercambiables en la capacidad de intercambio catiónico (CIC) del suelo y la productividad de los cultivos (Culman et al., 2021). Albrecht, basado en estudios realizados en suelos agrícolas de Misuri, propuso que un balance adecuado entre calcio (Ca^{2+}), magnesio (Mg^{2+}) y potasio (K^+) mejora la estructura del suelo, la disponibilidad de nutrientes y el desarrollo radicular de las plantas (Chaganti y Culman, 2017). Su hipótesis argumenta que una desviación de los valores óptimos de las proporciones catiónicas en la solución suelo, limita la absorción de nutrientes de los cultivos, debido a que un desequilibrio entre los iones en solución afecta los mecanismos que regulan la reactividad y disponibilidad de los nutrientes del suelo. Estos mecanismos reguladores del equilibrio iónico se ilustran en la Figura 1. Se considera que sólo una pequeña fracción de los nutrientes que requieren las plantas se encuentran en la solución suelo o en alguna forma reactiva. Además, este esquema sostiene que cada mecanismo es un reservorio iónico (Quispe-Matos et al., 2025).

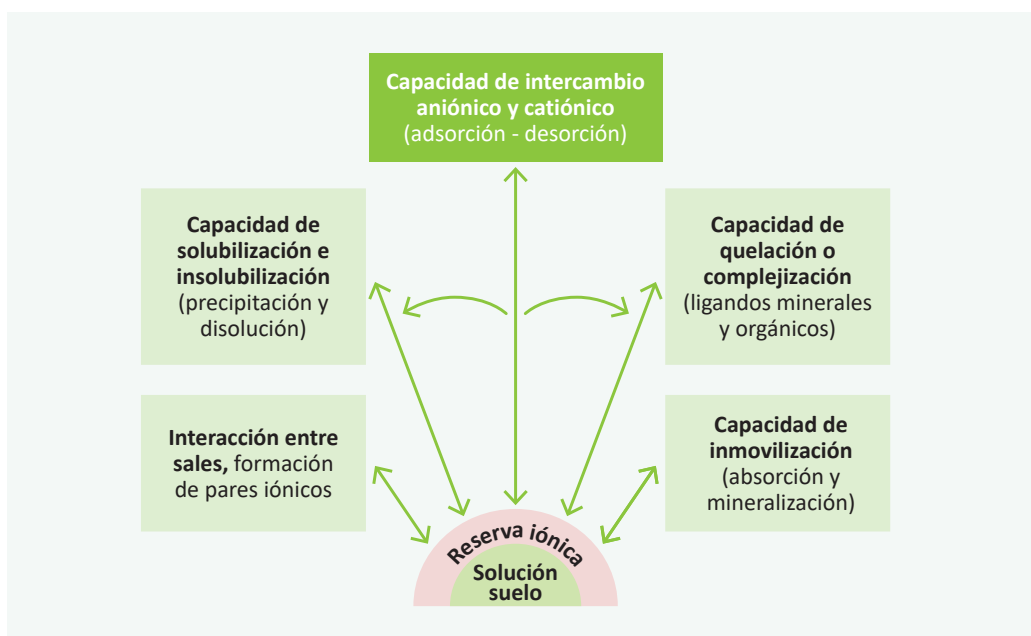


Figura 1. Mecanismos que mantienen en equilibrio los iones en la solución suelo (adaptado de McLean, 1977)

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

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

El pH del suelo es una de las variables más importantes en la toma de decisiones agronómicas, dado que permite identificar la necesidad de corregir desbalances iónicos. Este parámetro determina si se requiere la aplicación de cal o yeso agrícola para contrarrestar el exceso de Al^{3+} o Na^+ , respectivamente. Ambos insumos contienen alto contenido de calcio (Ca^{2+}) y son las principales herramientas para aumentar la saturación de Ca^{2+} y reducir la de Mg^{2+} , Na^+ y Al^{3+} . La cal y el yeso pueden generar efectos positivos y negativos sobre las propiedades del suelo y la producción vegetal, principalmente a través de tres mecanismos: elevación del pH, incremento de la saturación de Ca^{2+} o aumento de los niveles de azufre (S). El criterio de uso y las respuestas en el suelo se ilustran en la Figura 2 (Espinosa y Molina, 1999).

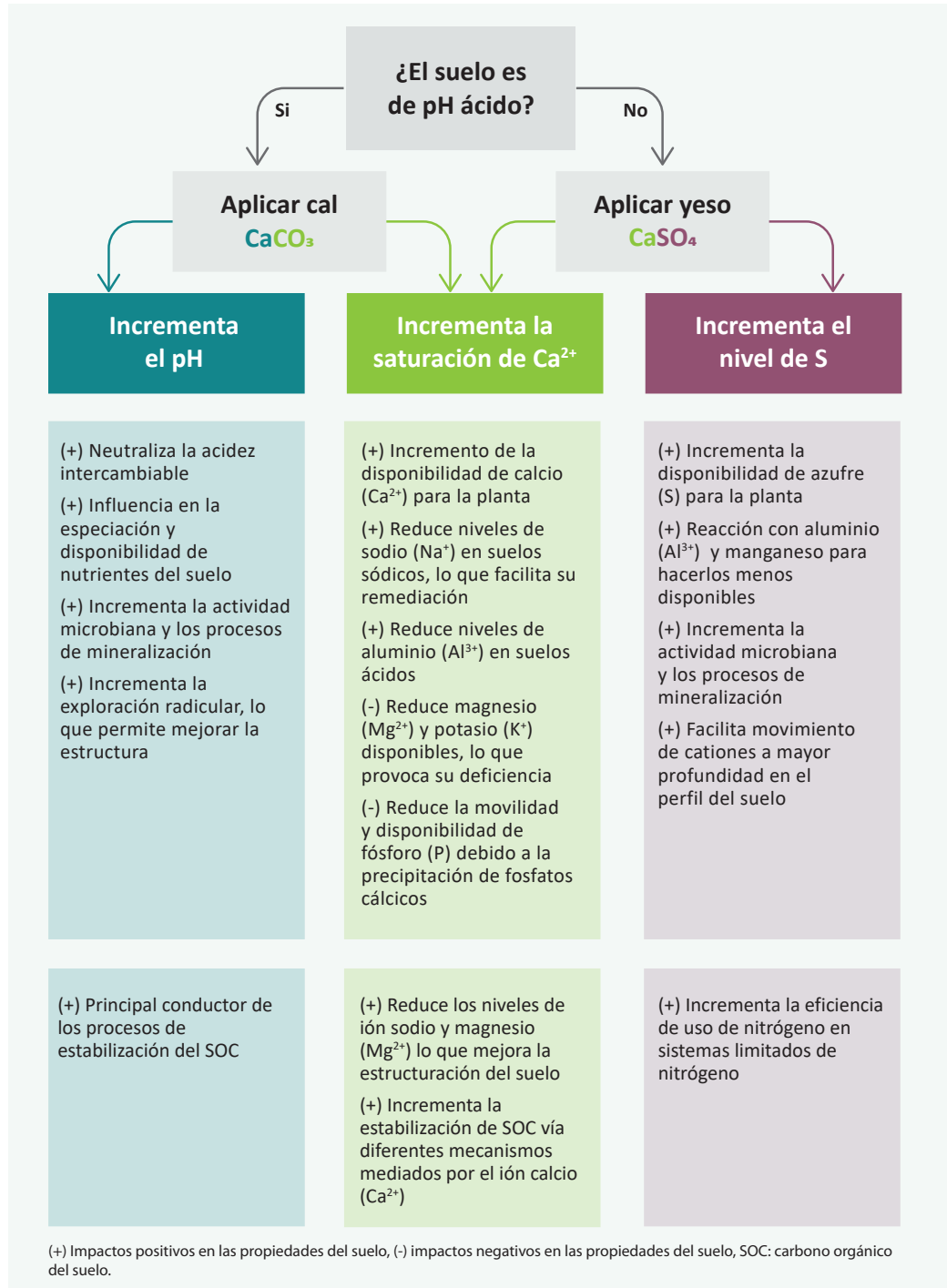


Figura 2. Criterios de uso de la cal y el yeso, y su respuesta en la relación de saturación de cationes básicos (BCSR) (adaptado de Culman et al., 2021)

2.1.2. Sistema de suficiencia de nutrientes

a. Concepto

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

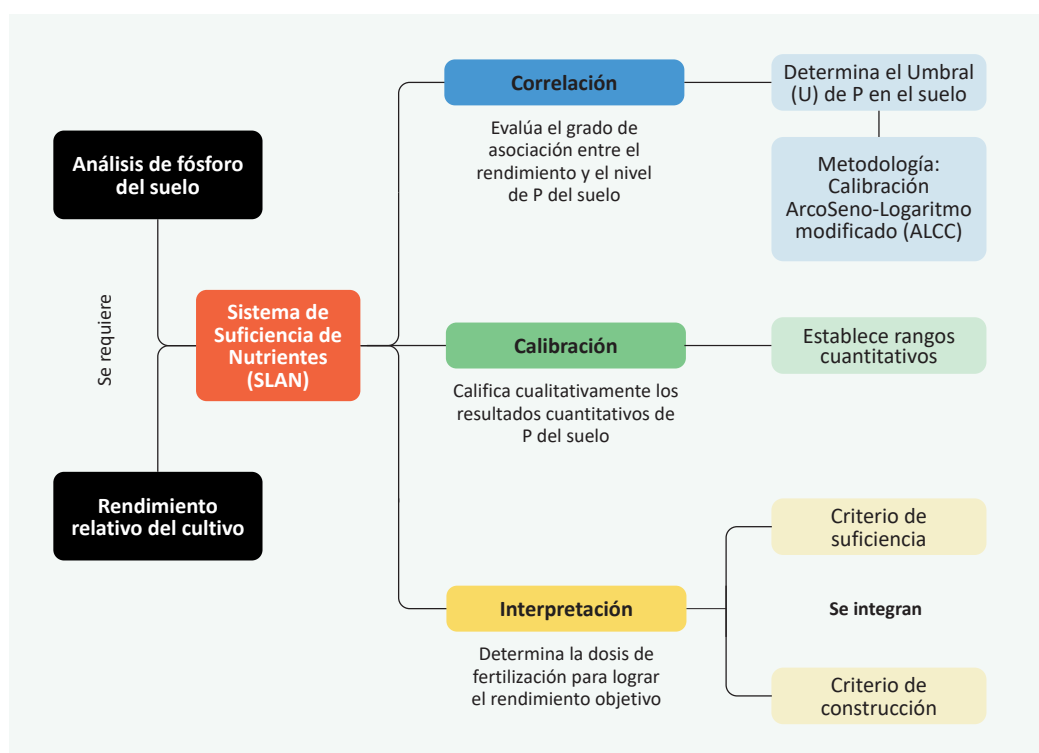


Figura 3. Esquema modelo para la implementación del sistema de suficiencia de nutrientes para el fósforo del suelo

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, y su uso considera únicamente la reposición del nutriente extraído por el cultivo, dado que se encuentra en forma fácilmente disponible (García y Ciampitti, 2010).

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

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

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

Ejemplo práctico:

Se realizó un análisis de suelos en un cultivo de papa, y se obtuvo 27 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 30 mg de P-Olsen por kg de suelo y el rendimiento potencial es de 50 t ha⁻¹. El análisis de correlación y calibración indica que el nivel obtenido de 27 mg de P-Olsen por kg de suelo permite obtener un rendimiento relativo (RR) del 90 %.

Primer paso: calcular el rendimiento alcanzado con 27 mg de P-Olsen por kg de suelo utilizando la Fórmula 2:

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

$$\text{Rendimiento alcanzado} = \frac{90 \times 50}{100} = 45 \text{ t ha}^{-1}$$

Este resultado indica que el nivel actual de P (27 mg kg⁻¹) está por debajo del umbral crítico (30 mg kg⁻¹), lo que limita el rendimiento a solo el 90 % del potencial, 45 t ha⁻¹ en lugar de 50 t ha⁻¹.

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

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

$$\text{Incremento de raíces y brotes} = 0,35 \times 45 \text{ t ha}^{-1} = 15,75 \text{ t ha}^{-1}$$

Además de los 45 t ha⁻¹ de producción, el cultivo genera 15,75 t ha⁻¹ de biomasa en raíces y brotes, lo que debe considerarse en el balance nutricional.

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

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

$$\text{Rendimiento objetivo} = 15,75 \text{ t ha}^{-1} + 45 \text{ t ha}^{-1} = 60,75 \text{ t ha}^{-1}$$

Cuarto paso: calcular el requerimiento de P utilizando la Fórmula 5. Para este cálculo y con fines prácticos se considera una extracción de 0,7 kg de fósforo por tonelada de producción.

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

$$\text{Requerimiento de P} = 0,7 \text{ kg de P t}^{-1} \times 60,75 \text{ t ha}^{-1} = 42,53 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

A partir de estos resultados, se interpreta que el criterio de suficiencia estima un requerimiento de 42,53 kg de P ha⁻¹ para alcanzar un rendimiento objetivo de 60,75 t ha⁻¹, el cual está conformado por 15,75 t ha⁻¹ de biomasa radicular y vegetativa, y 45 t ha⁻¹ de producción.

c. Aplicación de los criterios de mantenimiento y construcción

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

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

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

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

A continuación, se presentarán ejemplos prácticos en el cultivo de papa para la aplicación del criterio de mantenimiento, así como de los criterios de mantenimiento y construcción (adaptado de Quispe-Matos et al., 2025).

Ejemplo práctico (criterio de mantenimiento)

Se realizó un análisis de suelos en un cultivo de papa, y se obtuvo 15 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 30 mg de P-Olsen por kg de suelo y el rendimiento potencial es de 50 t ha⁻¹. 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 60 %.

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

$$\text{Rendimiento alcanzado} = \frac{60 \times 50}{100} = 30 \text{ t ha}^{-1}$$

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.

$$\text{Incremento de raíces y brotes} = 0,35 \times 30 \text{ t ha}^{-1} = 10,5 \text{ t ha}^{-1}$$

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

$$\text{Rendimiento objetivo} = 10,5 \text{ t ha}^{-1} + 30 \text{ t ha}^{-1} = 40,5 \text{ t ha}^{-1}$$

Cuarto paso: calcular el requerimiento de P utilizando la Fórmula 5. Para este cálculo y con fines prácticos se considera una extracción de 0,6 kg de fósforo por tonelada de producción.

$$\text{Requerimiento de P} = 0,6 \text{ kg de P t}^{-1} \times 40,5 \text{ t ha}^{-1} = 24,3 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

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 %.

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

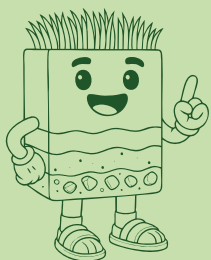
$$\text{RM de P} = \left(\frac{24,3 \text{ kg ha}^{-1}}{0,3} \right) = 81 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

De esta manera, el requerimiento de mantenimiento de fósforo en el cultivo de papa es 81 kg por hectárea.

Ejemplo práctico (criterio de mantenimiento y construcción)

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

Para este cultivo, el umbral crítico o nivel de suficiencia es de 30 mg de P-Olsen por kg de suelo y el rendimiento potencial es de 50 t ha⁻¹. El análisis de correlación y calibración indica que el nivel obtenido de 10 mg de P-Olsen por kg de suelo permite obtener un rendimiento relativo (RR) del 30 %.



Nota:

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

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

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

Segundo paso: hallar el incremento de raíces y brotes utilizando la Fórmula 3. Para este cálculo y con fines prácticos se 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 0,6 kg de fósforo por tonelada de producción.

$$\text{Requerimiento de P} = 0,6 \text{ kg de P t}^{-1} \times 20,25 \text{ t ha}^{-1} = 12,15 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

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 %.

$$\text{RM de P} = \left(\frac{12,15 \text{ kg ha}^{-1}}{0,2} \right) = 60,75 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

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.

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

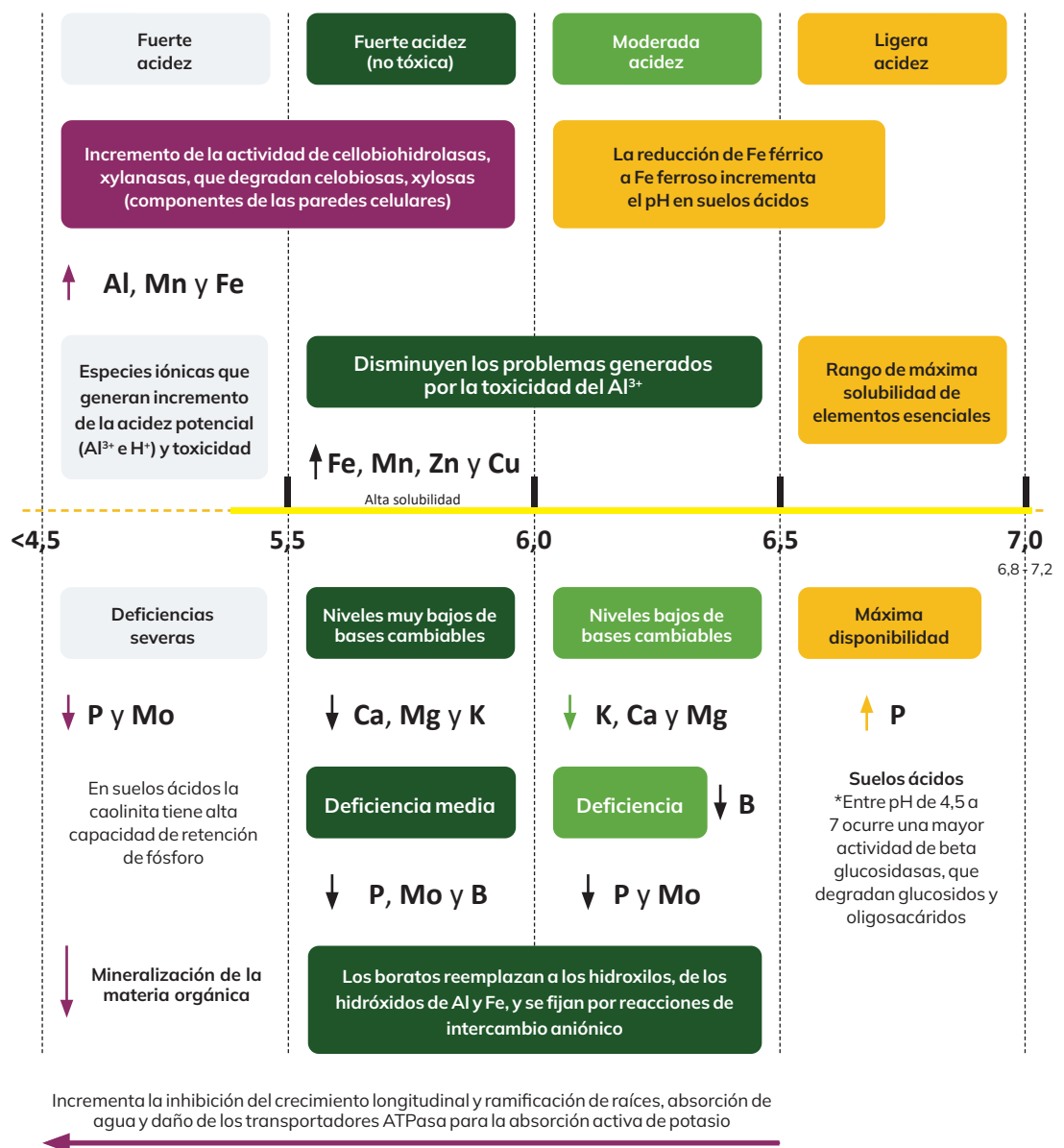
$$\text{Dosis de fertilización de P} = 60,75 \text{ kg de P ha}^{-1} + 13,5 \text{ kg de P ha}^{-1} = 74,25 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

De esta manera, el requerimiento de mantenimiento y construcción de fósforo en el cultivo de papa es 74,25 kg por hectárea.

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

La medición del pH en suelos tiene su origen en la química ácido-base de Arrhenius y Bronsted-Lowry, y se define como el logaritmo negativo en base 10 de la actividad de los iones hidrógeno (H^+) en una solución acuosa (Atkins et al., 2023). Sus aplicaciones en estudios de fertilidad inician en las primeras décadas del siglo XX, con estudios pioneros que demostraron la relación entre el pH del suelo y la solubilidad de los nutrientes esenciales (Pierre y Banwart, 1973). Actualmente, se considera que el pH del suelo controla las comunidades microbianas y la actividad enzimática de la solución suelo, además de modular los mecanismos de estabilización de carbono del suelo (Wang y Kuzyakov, 2024).

Por estos motivos, es considerada una variable maestra dentro del análisis, debido a que afecta una amplia gama de propiedades y procesos del suelo. En la Figura 4 se presenta un modelo gráfico de diagnóstico de la fertilidad del suelo en condiciones de pH ácidos según Hartemink y Barrow (2023), Wang y Kuzyakov (2024) y Alam et al. (1999).



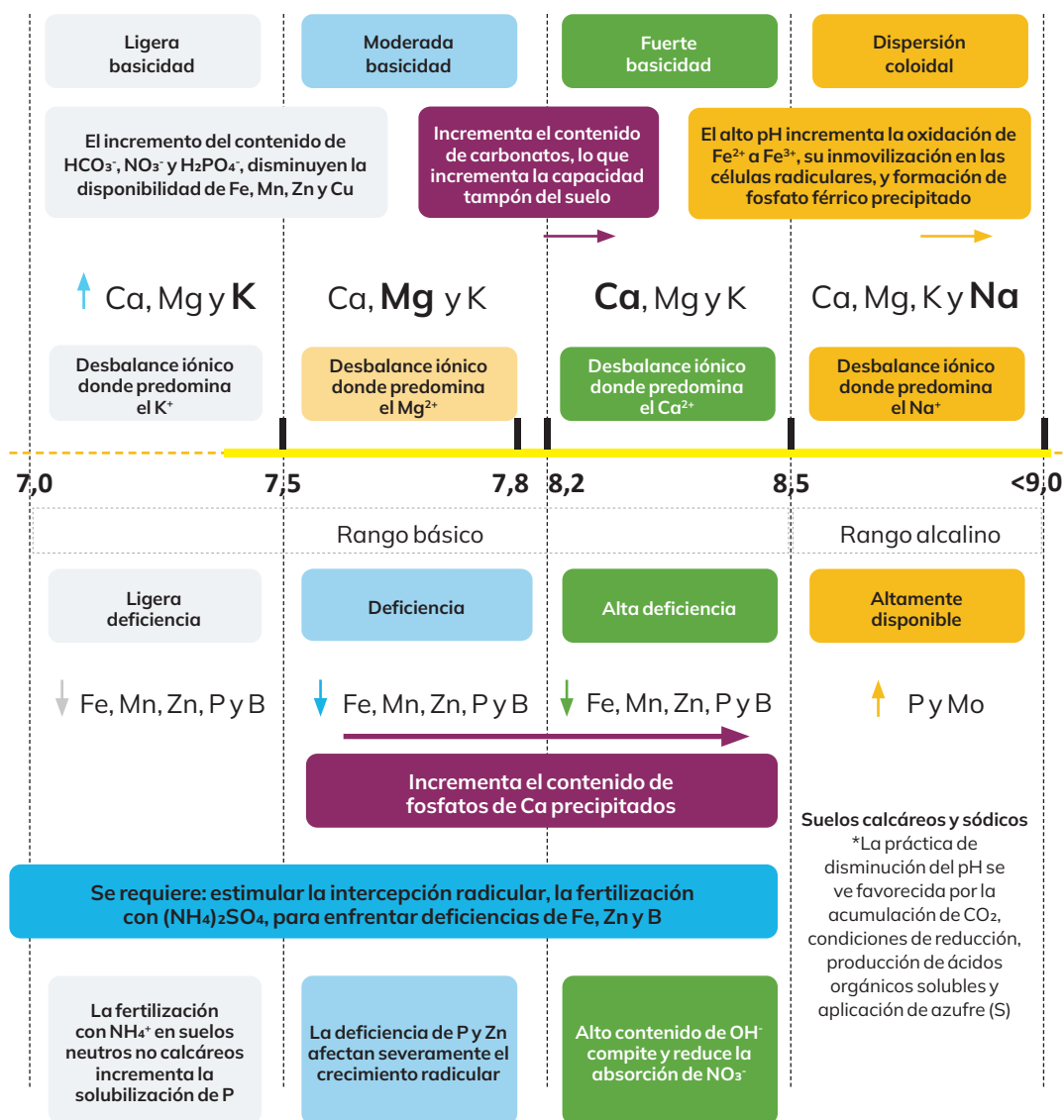


Figura 4. Diagnóstico de la fertilidad del suelo en función al pH

2.2. Análisis geoestadístico de las propiedades del suelo

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

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



3. Muestreo y análisis de suelos en la EEA Andenes

3.1. Ubicación

El muestreo se realizó específicamente en el Centro Experimental Andenes (CE Andenes), perteneciente a la EEA Andenes. El centro de investigación tiene un área de 53,6 ha y está ubicado a 3390 m s. n. m. en el distrito de Zurite, provincia de Anta, departamento de Cusco.

En la EEA Andenes se encuentran cuatro tipos de suelos: Aluviales, Coluvio-aluviales, Lacustrinos y Antrópicos (ONERN, 1988); estos últimos, originados por la intervención humana con la construcción de terrazas o terraplenes escalonados. Además, la estación cuenta con seis centros experimentales con una extensión total de 445,37 ha, siendo los cultivos priorizados: maíz (*Zea mays* L.), trigo (*Triticum aestivum* L.), papa (*Solanum tuberosum* L.) palto (*Persea americana* Mill.), y quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.); y tiene como principales líneas de acción: investigación, valoración, conservación, producción de material genético de plantas y animales, brindar asistencia técnica y otros servicios para los agricultores de la región del Cusco (Cruz-Luis et al., 2025).

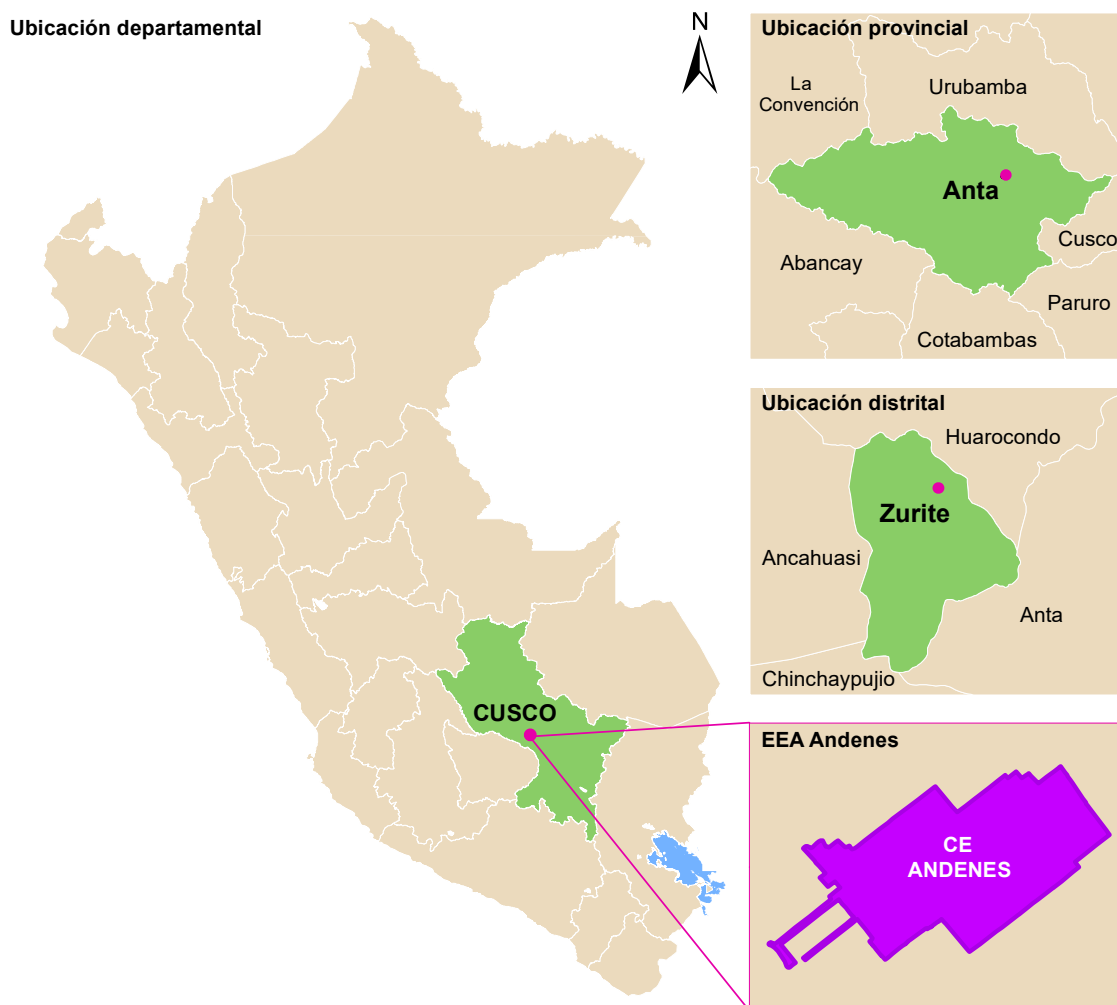


Figura 5. Ubicación del Centro Experimental Andenes

3.2. Muestreo estratificado del suelo

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

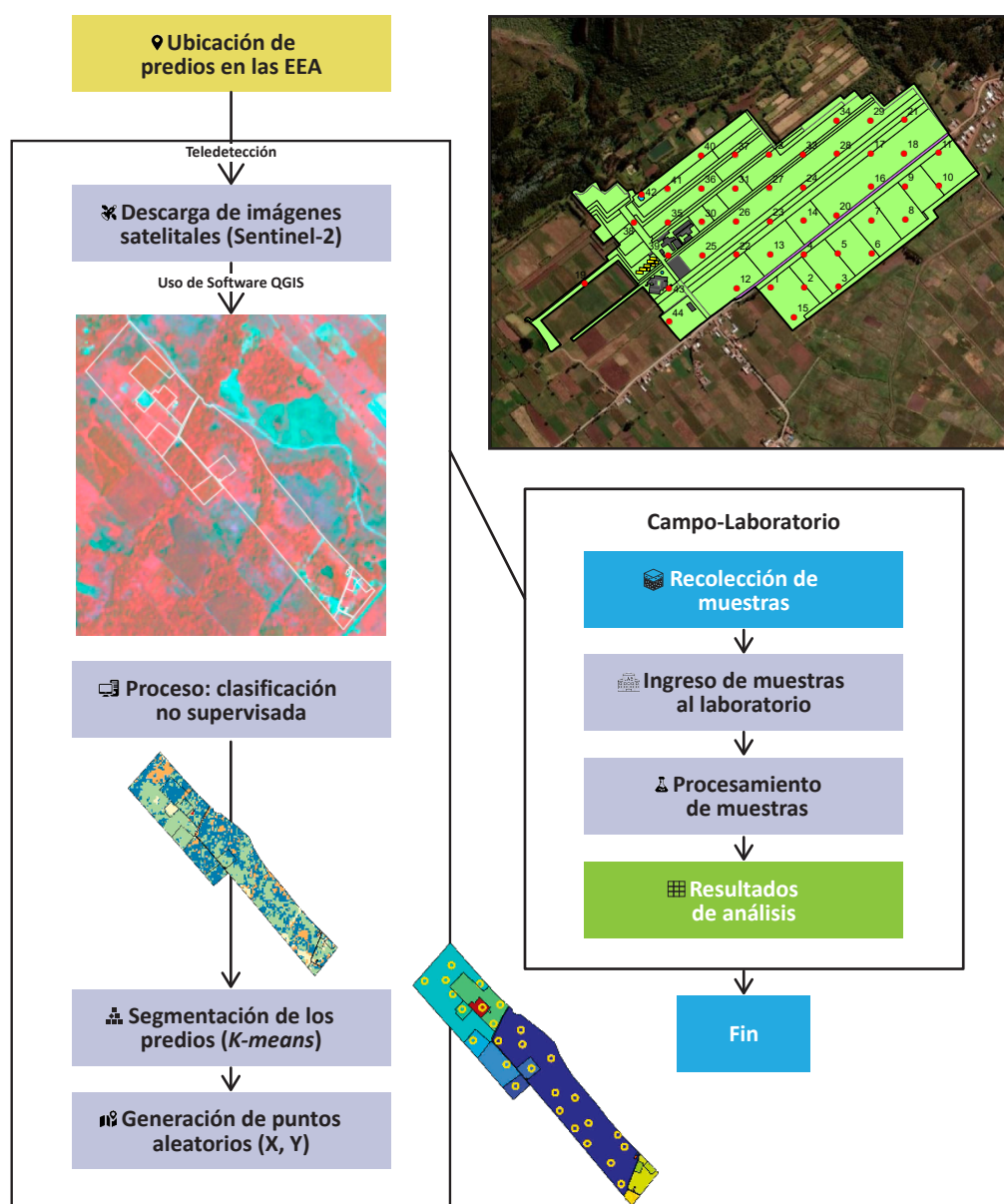


Figura 6. Flujo de trabajo para la determinación de los puntos de muestreo

3.2.1. Determinación de los puntos de muestreo

El primer paso para la determinación de los puntos de muestreo fue la descarga de las imágenes satelitales del servidor de Sentinel-2 para identificar las clases de cobertura, utilizando el algoritmo de clasificación no supervisada *K-means*. Luego, se usó el software R (R Core Team, 2018) para determinar los puntos de muestreo utilizando la función *spsample* del paquete *sp* (Pebesma y Bivand, 2005) (Figura 6). El *script* R generó las coordenadas de los puntos de muestreo según cada clase determinada, mediante el método de muestreo estratificado. Se identificaron en total 44 puntos de muestreo de suelos, como se observa en la Figura 7.

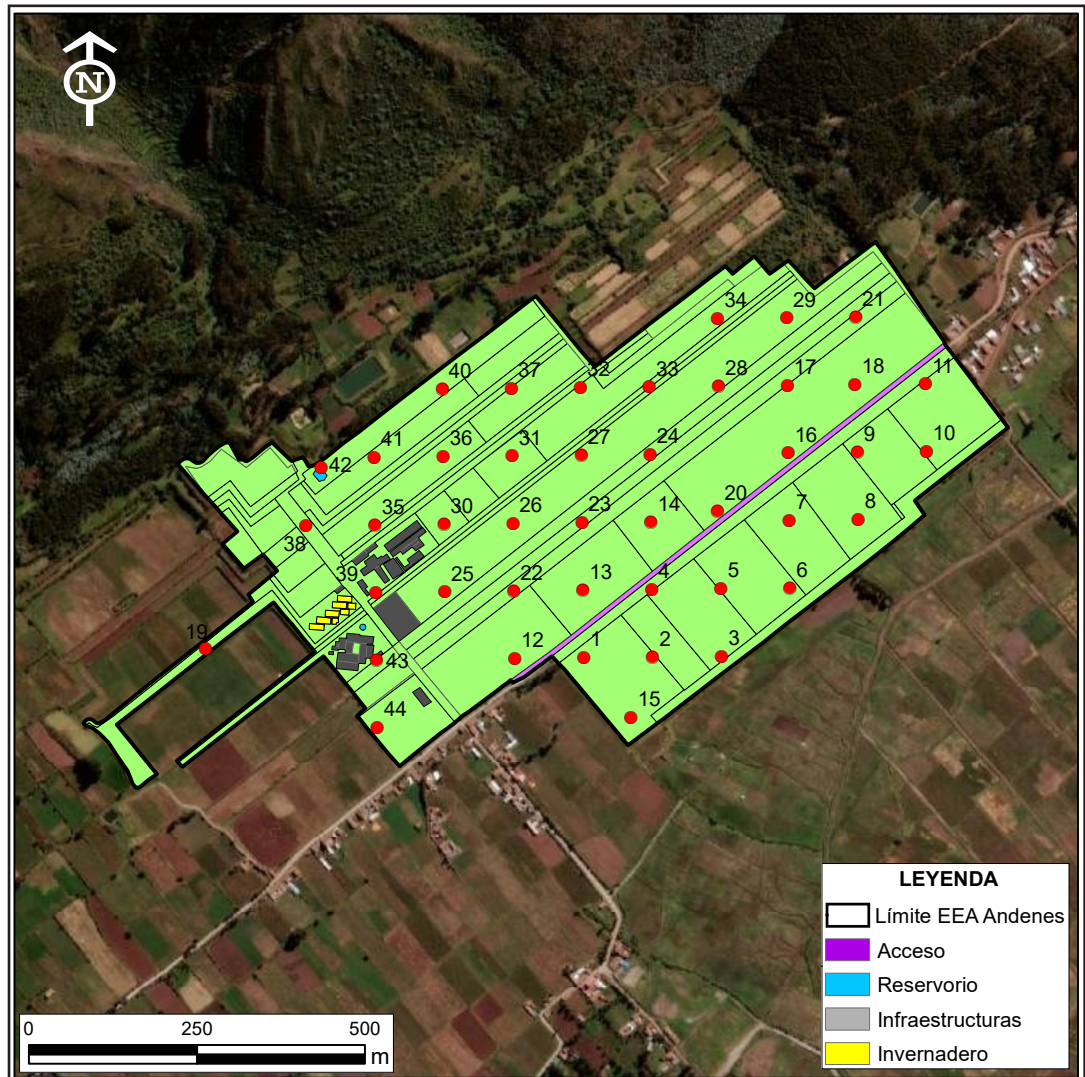


Figura 7. Puntos de muestreo del suelo en la EEA Andenes

3.2.2. Muestreo de suelos en los puntos identificados

Una vez identificadas las coordenadas de los 44 puntos de muestreo, los pasos que se siguieron para la colecta de muestras fueron los siguientes (Figura 8):

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



Figura 8. Proceso del muestreo de suelos. A) Limpieza y realización del hoyo, B) colecta 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, 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 Foliare de la EEA Moquegua para su procesamiento. El primer pretratamiento realizado fue el secado de las muestras a temperatura de 35 °C durante 48 horas. Posteriormente, se procedió con los análisis correspondientes (Tabla 1).

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

Parámetro	Método de análisis	Referencias
Porcentaje de arena, limo y arcilla	Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000. Método de densímetro tipo Bouyoucos	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT, 2002)
pH (1:2,5)	Método 9045D de la Agencia de Protección Ambiental (EPA)	Environmental Protection Agency (EPA, 2004)
Conductividad eléctrica (CE) (1:5)	ISO 11265: determinación de la conductividad eléctrica específica del suelo	International Organization for Standardization (ISO, 1994)
Carbonatos	Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000. Método del calcímetro	SEMARNAT (2002)
Materia orgánica (MO)	Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000. Método de Walkley y Black	SEMARNAT (2002)
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 muestran las estadísticas descriptivas obtenidas a partir del análisis de 44 muestras del CE Andenes. Como interpretación de estos resultados, los suelos presentan en promedio una textura franca (47,6 % arena, 28,6 % limo y 23,8 % arcilla), con una variabilidad moderada ($CV = 13,60 \%$; $20,75 \%$ y $13,15 \%$), lo que sugiere cierta heterogeneidad textural. El pH del suelo es moderadamente ácido ($6,46 \pm 0,88$, $CV = 13,69 \%$), con distribución heterogénea entre muestras o parcelas, lo que denota una variabilidad espacial. El contenido de materia orgánica es intermedio ($2,16 \% \pm 1,50 \%$), lo que demuestra una fertilidad aceptable pero mejorable, y su coeficiente de variación ($CV = 69,22 \%$) refleja gran heterogeneidad entre parcelas, lo que sugiere la necesidad de un manejo diferenciado para equilibrar la calidad del suelo. Los suelos presentan un contenido alto de Ca^{2+} ($11,62 \text{ cmol kg}^{-1}$) con variabilidad moderada-alta ($CV 53,29 \%$), y niveles bajos de Mg^{2+} , K^+ y Na^+ , con variabilidad moderada a alta según el elemento. Los valores de ácido intercambiable son muy bajos en promedio, pero en algunas parcelas se detectan concentraciones elevadas que podrían influir en la acidez del suelo. En conjunto, la composición catiónica indica suelos con buena saturación de calcio, aunque con deficiencias relativas de magnesio y potasio.

El contenido de carbonatos ($CaCO_3 = 2,78 \% \pm 1,60$) indica un contenido moderado de carbonatos, que puede ayudar a neutralizar la acidez y aportar calcio. Sin embargo, el coeficiente de variación ($CV = 57,72 \%$) indica heterogeneidad entre parcelas, lo que podría influir de forma indistinta en el pH y la disponibilidad de nutrientes. La conductividad eléctrica ($CE = 0,5 \text{ dS m}^{-1} \pm 0,32$) indica que, en general, el suelo no presenta problemas de salinidad que puedan afectar el crecimiento de cultivos sensibles. El fósforo disponible es alto en promedio ($P \text{ disp.} = 135 \text{ mg kg}^{-1}$), pero muy irregular en su distribución ($CV = 73,06 \%$), mientras que el potasio disponible tiende a ser bajo-medio con también alta variabilidad, lo que sugiere la necesidad de un manejo más equilibrado y localizado de la fertilización.

En el CE Andenes, el manejo del suelo debe orientarse a reducir la heterogeneidad espacial de la fertilidad mediante prácticas diferenciadas por parcela. Se recomienda implementar programas de fertilización de precisión, con especial énfasis en la reposición de K^+ y Mg^{2+} , así como en el manejo equilibrado del P para evitar excesos y deficiencias localizadas. Para mejorar la materia orgánica, se sugiere incorporar enmiendas orgánicas y cultivos de cobertura, lo que también favorecerá la estructura y retención de humedad. Además, el monitoreo periódico de pH, CE y nutrientes permitirá ajustar las prácticas de manejo y optimizar la producción, garantizando la sostenibilidad de los suelos a largo plazo.

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

Variable	Unidad	Media	SD	CV (%)	Mediana	Mínimo	Máximo	Skewness
pH	Unid	6,46	0,88	13,69	6,15	5,1	8,1	0,51
CEe	dS m ⁻¹	0,50	0,32	63,29	0,33	0,23	1,18	1,02
MO	%	2,16	1,50	69,22	2,05	0,5	10,7	4,44
P disp.	mg kg ⁻¹	135,03	98,65	73,06	116,07	8,6	359,36	0,66
K disp.	mg kg ⁻¹	50,11	28,03	55,94	40,19	22,39	153,13	2,16
N total	%	0,11	0,07	69,22	0,1	0,03	0,54	4,44
Arena	%	47,57	6,47	13,6	47,69	11	56,16	-4,23
Arcilla	%	23,82	3,13	13,15	24,35	12,5	31,84	-0,85
Limo	%	28,61	5,94	20,75	28,22	21,78	62,07	4,27
Ac. Int.	cmol kg ⁻¹	0,08	0,05	63,33	0,05	0,05	0,17	0,96
Al Int.	cmol kg ⁻¹	0,06	0,04	71,52	0,05	0,05	0,25	5,29
CaCO ₃	%	2,78	1,60	57,72	2,56	0,97	6,64	1,22
Ca ²⁺	cmol kg ⁻¹	11,62	6,19	53,29	8,59	5,33	27,04	1,22
K ⁺	cmol kg ⁻¹	0,22	0,13	57,43	0,18	0,1	0,72	2,59
Mg ⁺	cmol kg ⁻¹	0,73	0,28	37,7	0,68	0,41	2,19	3,74
Na ⁺	cmol kg ⁻¹	1,19	0,44	36,91	1,18	0,43	2,96	1,64
CICe	cmol kg ⁻¹	13,76	6,28	45,68	11,19	7,26	30,89	1,15
PCI	%	82,14	6,26	7,62	80,47	71,55	95,7	0,58
PMI	%	6,08	2,16	35,47	6,88	1,65	9,25	-0,71
PPI	%	1,74	0,81	46,49	1,65	0,45	5,39	1,93
PSI	%	10,03	4,39	43,74	10,75	1,69	18,11	-0,10

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

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

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

Requisitos previos para el mapeo:

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

Procedimiento

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

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

Procedimiento:

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

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

Donde:

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

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

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

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

3.7.1. Generación y ajuste del variograma

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

3.7.2. Interpolación *kriging*

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

3.7.3. Validación cruzada

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

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

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

Donde:

n: el número de muestras.

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

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

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

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

Donde:

n: el número de muestras.

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

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

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

Los resultados de la validación cruzada de las variables fisicoquímicas del suelo se presentan en la Tabla 8, donde la mayoría de las variables analizadas muestran una dependencia espacial débil o moderada en el área de estudio, predominando modelos *linear* y *linear to Sill* con rangos de influencia que varían entre 214 y 613 m, lo que evidencia estructuras espaciales relativamente amplias. Además, las propiedades del suelo presentan bajos grados de predictibilidad ($R^2 < 0,5$), con un coeficiente de determinación máximo de 0,16 en limo.

Las fracciones texturales (arena, limo y arcilla) tienen rangos de dependencia espacial entre 214 y 321 m, indicando que su variación podría responder a procesos locales (como erosión y deposición). Además, sus valores de los coeficientes de determinación son bajos (R^2 entre 0,01 y 0,16), lo que indica una organización espacial poco consistente y dominada por alto nivel de variabilidad local.

El pH y la conductividad eléctrica presentan mayores rangos (612 y 462 m, respectivamente), pero bajos grados de predictibilidad ($R^2 \leq 0,02$). Esto sugiere que, si bien existe cierta estructura espacial, los patrones a escala fina son difíciles de delimitar, por lo que se requiere un muestreo más denso para obtener mapas edáficos confiables.

La materia orgánica (MO), nitrógeno total, y aluminio intercambiable presentan dependencias espaciales extendidas (rango > 400 m), pero con coeficientes de ajuste muy bajos ($R^2 \leq 0,04$). Aunque la estructura espacial existe, la predictibilidad local es limitada bajo las condiciones de muestreo actuales.

El fósforo y potasio disponible tienen una estructura espacial amplia (423 y 443 m, respectivamente) y baja capacidad de predicción ($R^2 \leq 0,03$). Esto indica presencia de zonas con acumulación y zonas con deficiencias que no pueden ser delimitadas de forma precisa, por lo que se requiere un muestreo más intensivo.

Con respecto a los cationes (calcio, magnesio, potasio y sodio intercambiable) revelan rangos relativamente largos (entre 311 y 613 m) y valores bajos de consistencia espacial ($R^2 < 0,10$), lo que evidencia que sus distribuciones espaciales son principalmente aleatorias y controladas por procesos locales de fertilización, lavado o litología variable.

En síntesis, el diagnóstico geoestadístico evidencia que las propiedades químicas y físicas del suelo del CE Andenes presentan estructuras espaciales de coherencia media a baja, dominadas por modelos *linear* y *linear to sill*, con rangos relativamente extensos pero baja capacidad predictiva. Esto sugiere que el uso de interpoladores espaciales simples, como el *kriging* ordinario, podría no ser suficiente para representar con precisión la distribución de nutrientes y sales en el área. En este contexto, resulta conveniente complementar el análisis con información auxiliar, como mapas de uso del suelo, prácticas de manejo, pendiente y datos de sensores remotos, con la finalidad de mejorar la precisión de las estimaciones.

En consecuencia, el manejo sitio-específico y la zonificación edáfica deben sustentarse en campañas de muestreo más intensivas, con mayor densidad de puntos que permitan incrementar la precisión de las interpolaciones y la confiabilidad de los mapas generados. Asimismo, variables como el limo y el Na^+ muestran una mayor consistencia espacial relativa, por lo que podrían priorizarse en la delimitación de ambientes y en el ajuste de prácticas agronómicas o de fertilización diferenciada. En este sentido, la adopción de un enfoque de agricultura de precisión resulta clave para optimizar el uso de insumos y prevenir la degradación del suelo. La implementación de zonas de manejo diferenciado, basadas en la variabilidad espacial identificada, permitiría aplicar fertilizantes, enmiendas y riego de manera más eficiente, reduciendo costos y minimizando impactos ambientales.

Tabla 3. Modelos de semivariograma para las propiedades del suelo en la EEA Andenes

Variable	Model	Nugget (C ₀)	Sill (C ₀ +C)	Range (m)	Cross-validation	
					RMSE	R ²
Arena	Linear to Sill	8,14	10,29	321,11	3,23	0,01
Limo	Linear to Sill	2,76	9,08	217,24	2,75	0,16
Arcilla	Spherical	5,66	10,02	214,69	3,22	0,02
pH	Linear to Sill	0,71	0,81	612,04	0,91	0,02
CEe	Linear	11,70	16,57	462,77	4,09	0,01
MO	Linear	0,31	0,62	437,79	0,77	0,04
N total	Linear	1x10 ⁻³	2x10 ⁻³	438,11	0,04	0,04
P disp.	Linear to Sill	7685,03	10 378,51	423,11	98,43	0,03
K disp.	Linear	170,16	432,12	443,55	20,39	0,01
CaCO ₃	Linear to Sill	1,79	1,91	423,17	1,41	0,08
Ca ²⁺	Linear	31,21	38,82	398,00	6,65	0,03
Mg ²⁺	Linear	0,01	0,04	438,79	0,20	0,01
K ⁺	Linear to Sill	0	0,01	613,19	0,08	0,02
Na ⁺	Linear to Sill	0,08	0,15	311,61	0,37	0,09
Ac. Int.	Spherical	1x10 ⁻³	2x10 ⁻³	269,17	0,04	0,01
Al Int.	Exponential	1x10 ⁻³	2x10 ⁻³	514,87	0,18	0,01
CIce	Exponential	26,30	34,65	611,99	6,01	0,02
PCI	Gaussian	31,34	42,93	612,04	6,14	0,03
PMI	Exponential	3,327	4,84	610,13	2,28	0,06
PPI	Linear	0,30	0,36	431,97	0,59	0,02
PSI	Gaussian	16,12	20,87	614,04	4,23	0,06

CEe: conductividad eléctrica en extracto de saturación, MO: materia orgánica del suelo, P disp.: fósforo disponible, K disp.: potasio disponible, CIce: capacidad de intercambio catiónico efectiva, Ac. Int.: acidez intercambiable, Al. Int.: aluminio intercambiable, PCI: porcentaje de calcio intercambiable, PMI: porcentaje de magnesio intercambiable, PPI: porcentaje de potasio intercambiable, PSI: porcentaje de sodio intercambiable

3.9. Mapeo digital de las propiedades del suelo

Los mapas obtenidos para la EEA Andenes (Figuras 9-28) reflejan una distribución espacial predominantemente heterogénea en la mayoría de las propiedades edáficas evaluadas, con una predictibilidad geoestadística baja a moderada, tal como lo indican los bajos coeficientes de determinación (R^2) obtenidos en la validación cruzada de los semivariogramas (Tabla 3). Pese a estas limitaciones, los mapas generados permiten identificar patrones relevantes que orientan el manejo diferenciado de la fertilidad y la zonificación de prácticas de conservación.

Los mapas de arena, limo y arcilla (Figuras 15-17) muestran una distribución espacial fragmentada, con predominio de texturas francas a francas arenosas, dado que el contenido de arena presenta una media de 47,57 % y el limo 28,61 %. La baja predictibilidad de las variables arena y limo (R^2 de 0,01 y 0,16, respectivamente) indica una alta influencia de factores locales en su disposición. A pesar de ello, se identifican sectores con mayor proporción de arcilla (31,84 %), donde la capacidad de retención de nutrientes y agua es potencialmente mayor, mientras que las zonas más arenosas requerirán ajustes en el riego y la fertilización para evitar pérdidas por lixiviación.

El mapa de pH (Figura 9) evidencia valores que oscilan entre 5,1 y 8,1, con una media de 6,46, lo que indica la existencia de condiciones moderadamente ácidas hasta ligeramente alcalinas. Su modelo de semivariograma sugiere una continuidad moderada, aunque sus bajos coeficientes de determinación ($R^2 = 0,02$) limita la confiabilidad del patrón.

Por su parte, la conductividad eléctrica (Figura 10) presenta una distribución más definida, con valores que oscilan entre 0,23 y 1,18 dS m⁻¹ y una media de 0,50 dS m⁻¹, lo que indica la presencia de zonas con riesgo de salinidad que varía de ausente a leve. Su rango espacial de 462,8 m y el bajo coeficiente de determinación ($R^2 = 0,01$) indican que, si bien existe un gradiente, la capacidad de predicción espacial es limitada, por lo que se recomienda complementar con monitoreos anuales.

Los mapas de MO y N total (Figuras 11 y 14) muestran distribuciones espaciales débiles, con R^2 de 0,04 y modelos lineales que indican una dependencia espacial muy baja. La media del contenido de MO es de 2,16 %, con un coeficiente de variación alto (CV = 69,22 %), lo que refleja una marcada heterogeneidad local, probablemente asociada a la aplicación diferencial de enmiendas orgánicas. A pesar de la baja predictibilidad, se identifican sectores con contenidos superiores al 4 % de MO, donde la fertilidad natural es más alta y podría reducirse el uso de fertilizantes nitrogenados.

Con respecto a los nutrientes disponibles, el fósforo presenta una media de 135 mg kg⁻¹ y alcanza valores extremadamente altos (hasta 359 mg kg⁻¹), lo que sugiere acumulación de este nutriente; en contraste, el potasio disponible muestra una media más moderada (50 mg kg⁻¹).

Los cationes intercambiables (Figuras 18-21) revelan una organización espacial débil (R^2 entre 0,01 y 0,09). El calcio intercambiable (media 11,62 cmol kg⁻¹) muestra un rango moderado (398 m), mientras que el magnesio, potasio y sodio presentan distribuciones más irregulares.

La acidez y el aluminio intercambiable, con medias muy bajas (0,08 y 0,06 cmol kg⁻¹ respectivamente), son prácticamente constantes en el área, lo que se refleja en sus modelos esféricos y exponenciales con bajo poder predictivo.

El PCI domina ampliamente el complejo de cambio (media 82,14 %), lo que confiere una buena estabilidad estructural al suelo, aunque su distribución irregular sugiere que no es posible delimitar zonas homogéneas de manejo con base únicamente en estos indicadores.

En conjunto, los mapas de la EEA Andenes evidencian una organización espacial compleja y mayormente impredecible, donde ninguna variable alcanza un R^2 superior a 0,16 en la validación cruzada. Esto refleja la fuerte influencia de factores antropogénicos y microtopográficos que fragmentan la continuidad espacial de los procesos pedogenéticos. Pese a estas limitaciones, la información generada constituye un primer acercamiento al mapeo digital de suelos en estos lugares, y sienta las bases para futuros muestreos más densos y el uso de covariables ambientales de alta resolución que permitan mejorar la precisión de los modelos geoestadísticos en este tipo de paisajes.

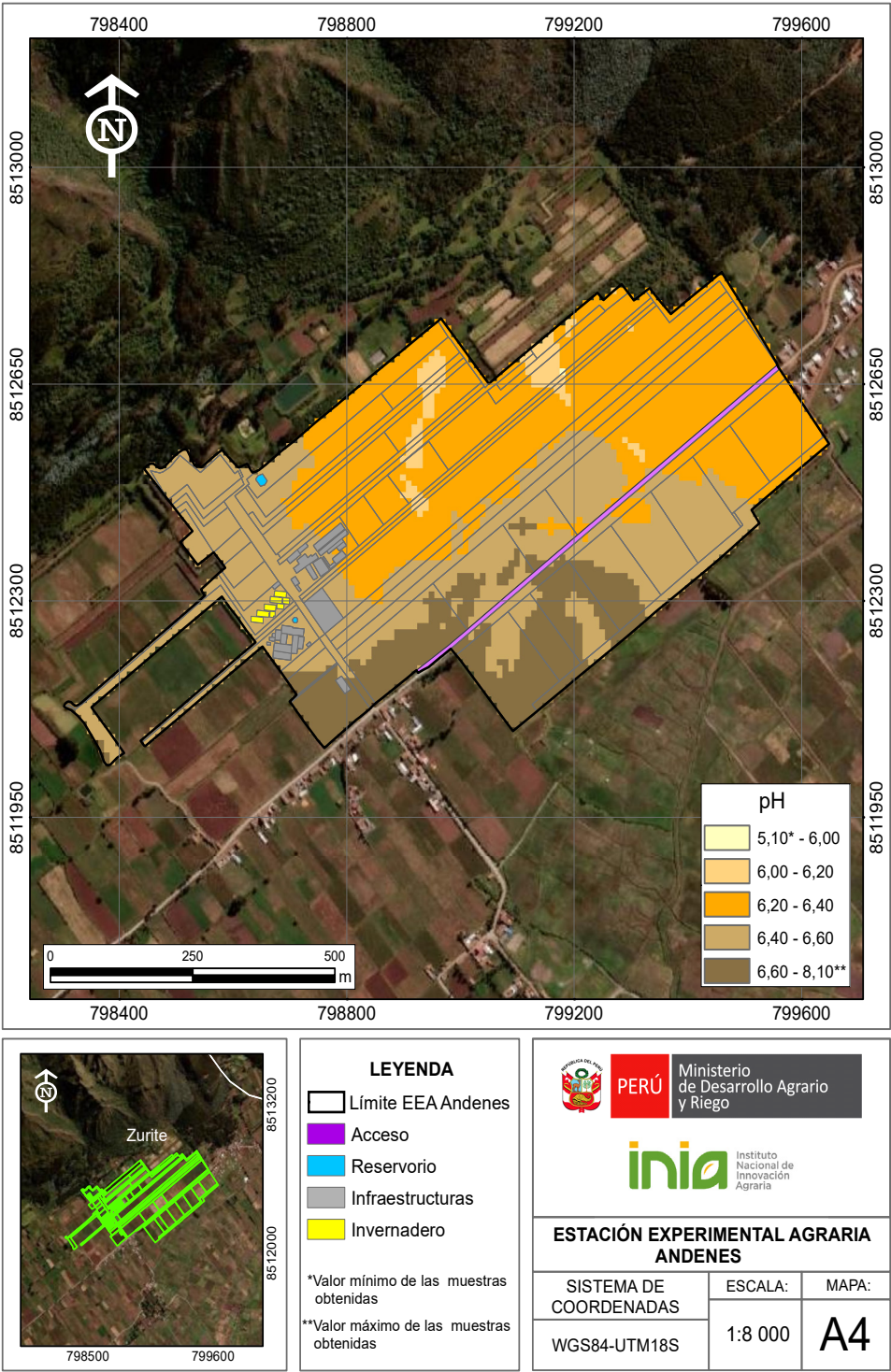


Figura 9. Mapa de variación espacial del pH

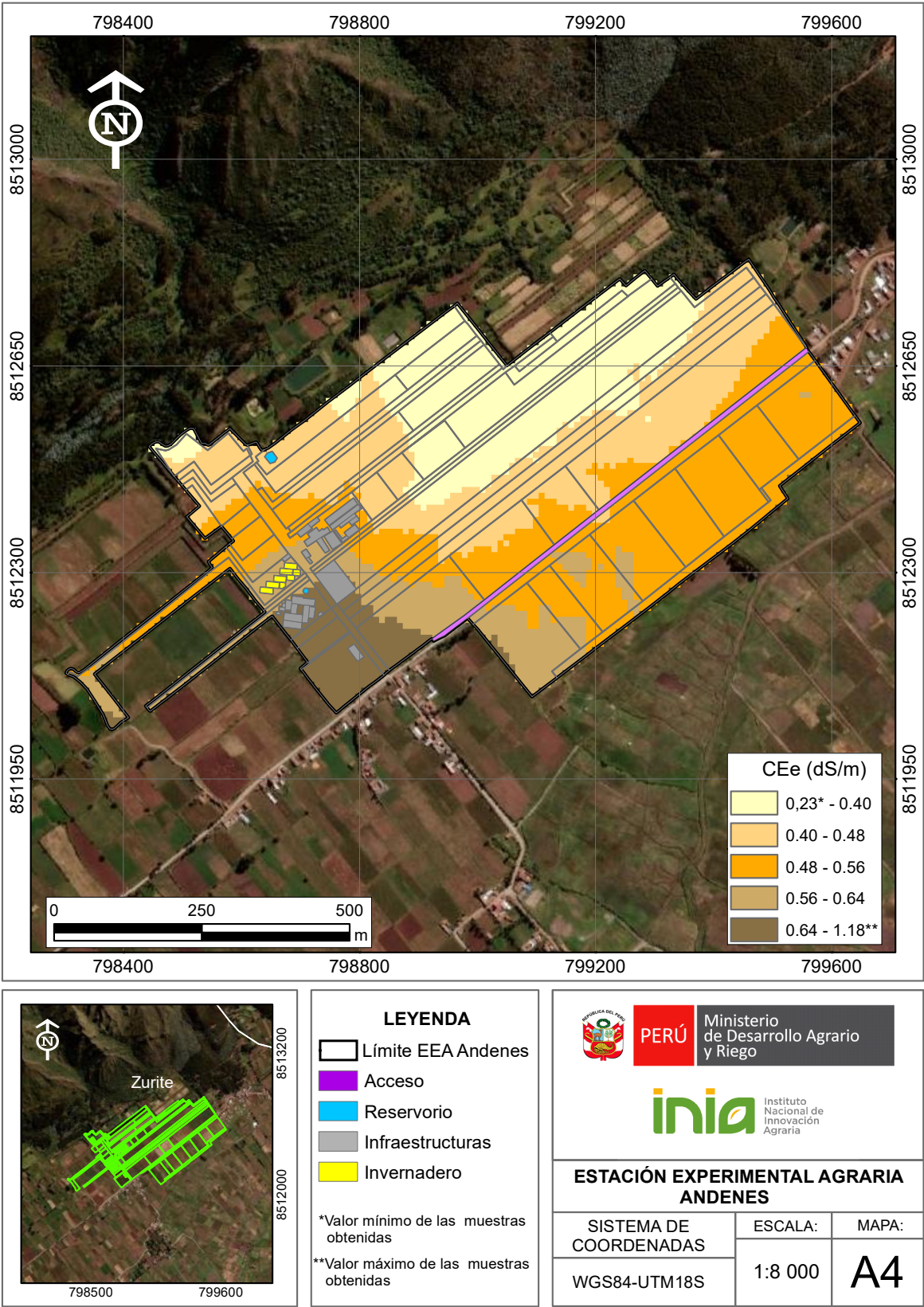


Figura 10. Mapa de variación espacial de la conductividad eléctrica en extracto de saturación

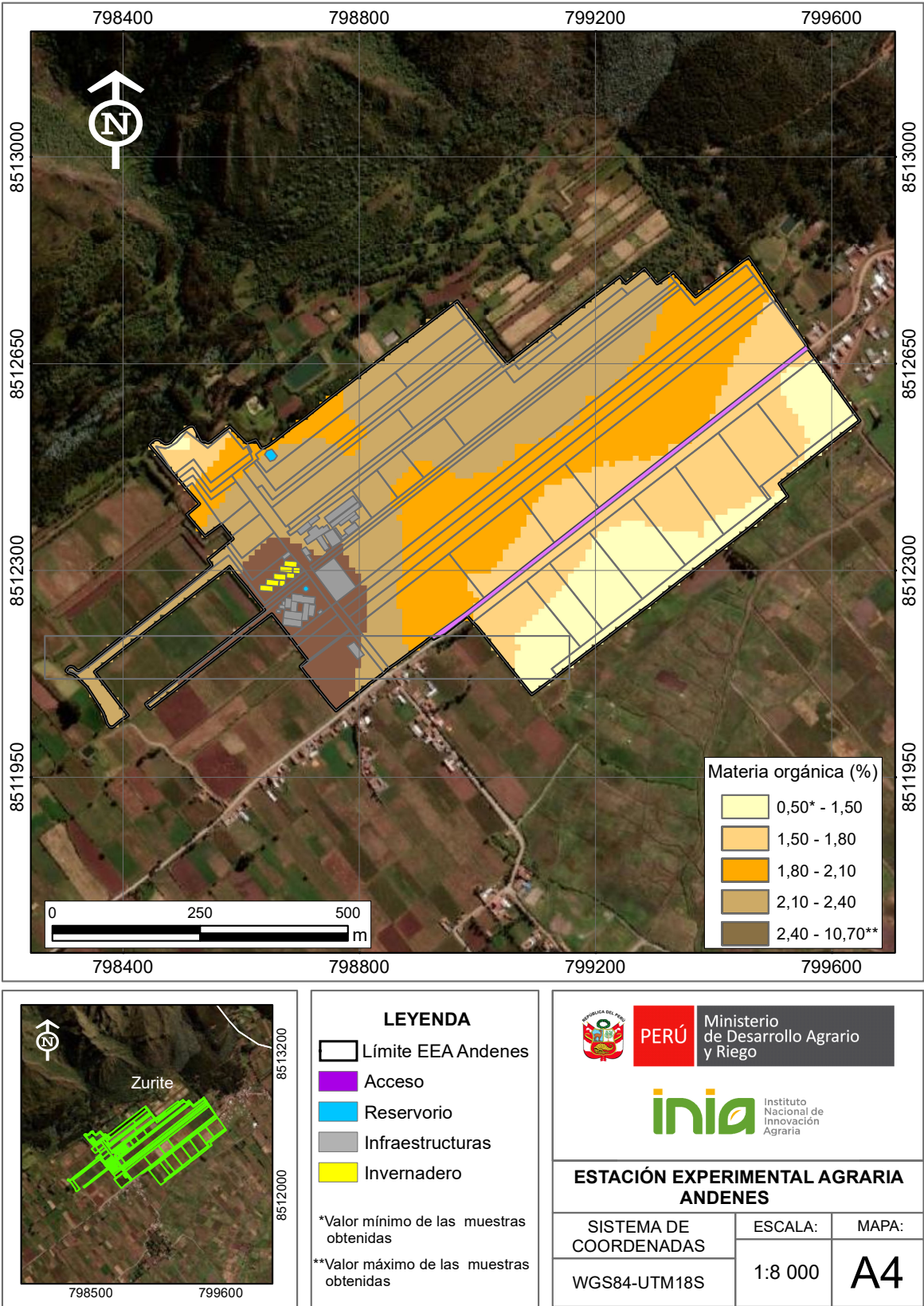


Figura 11. Mapa de variación espacial del porcentaje de materia orgánica

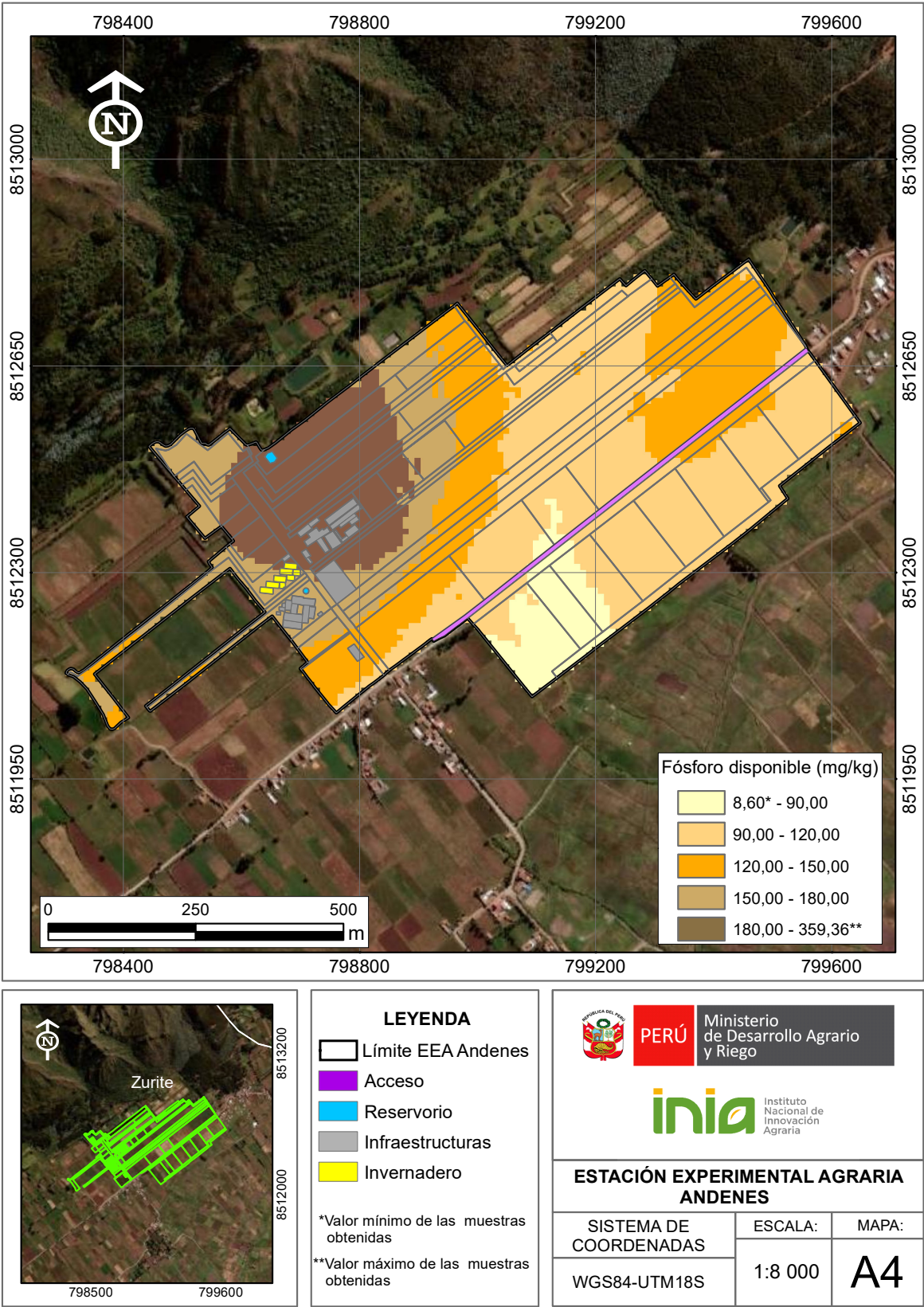


Figura 12. Mapa de variación espacial del fósforo disponible

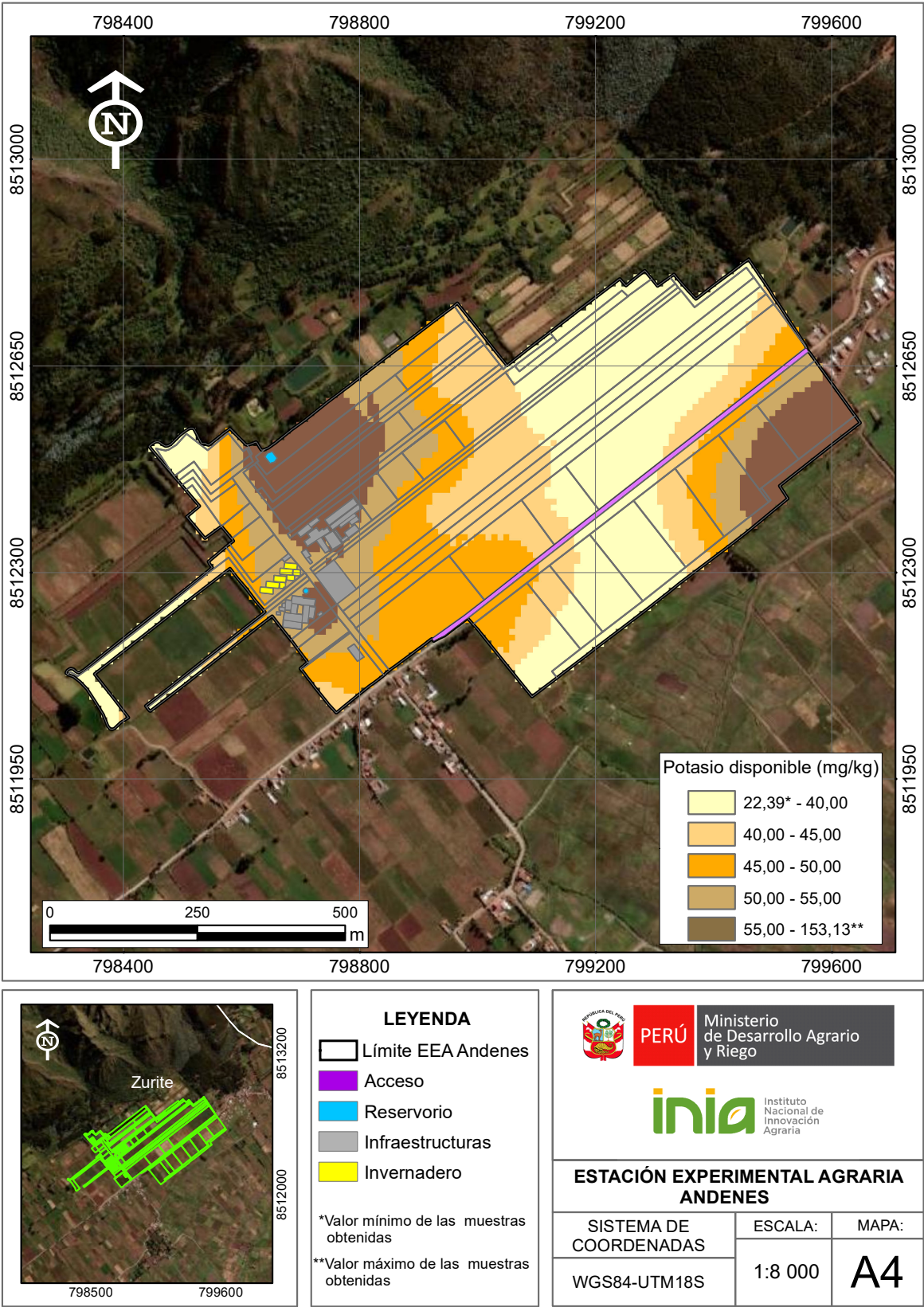


Figura 13. Mapa de variación espacial del potasio disponible

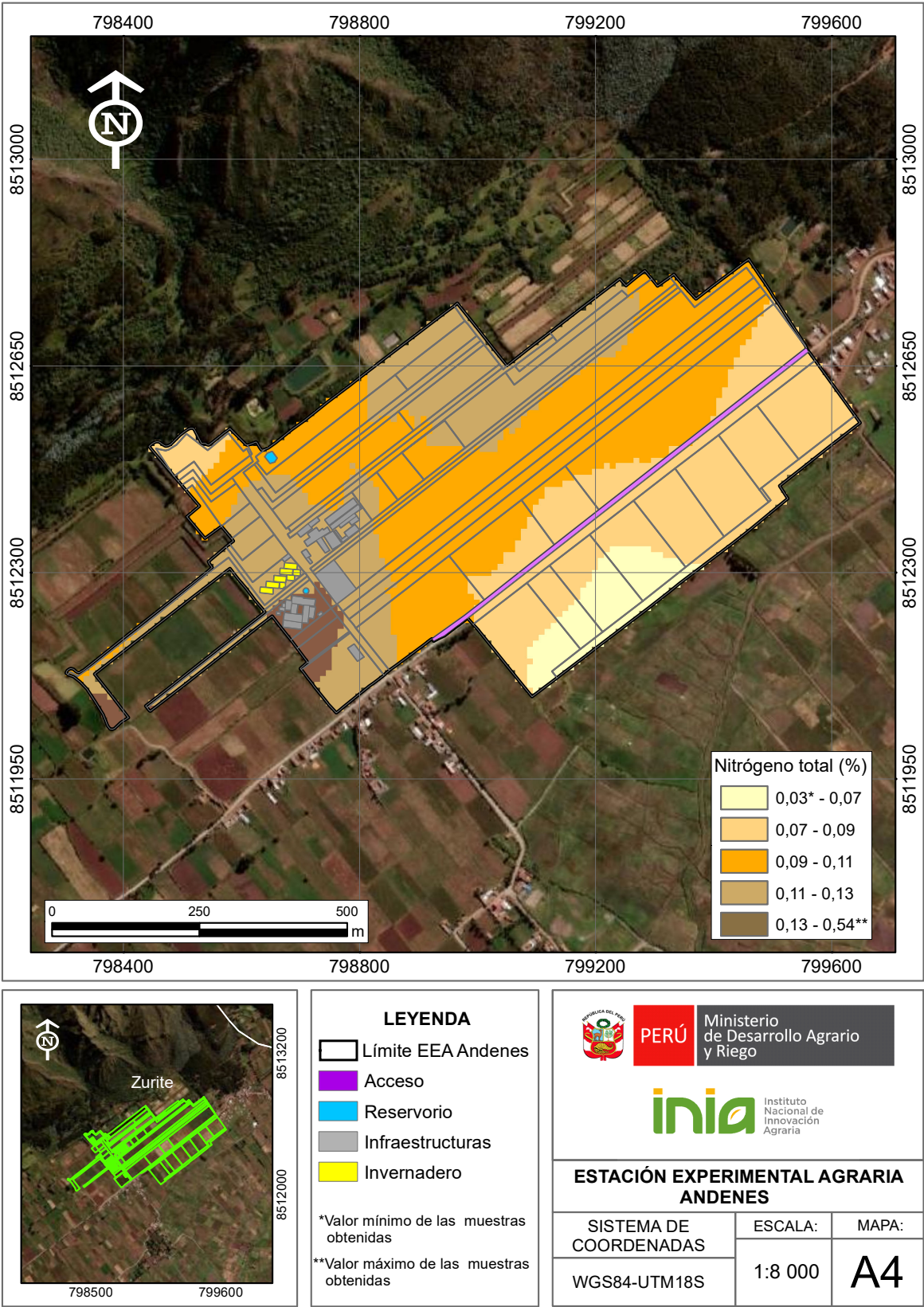


Figura 14. Mapa de variación espacial del porcentaje de nitrógeno total

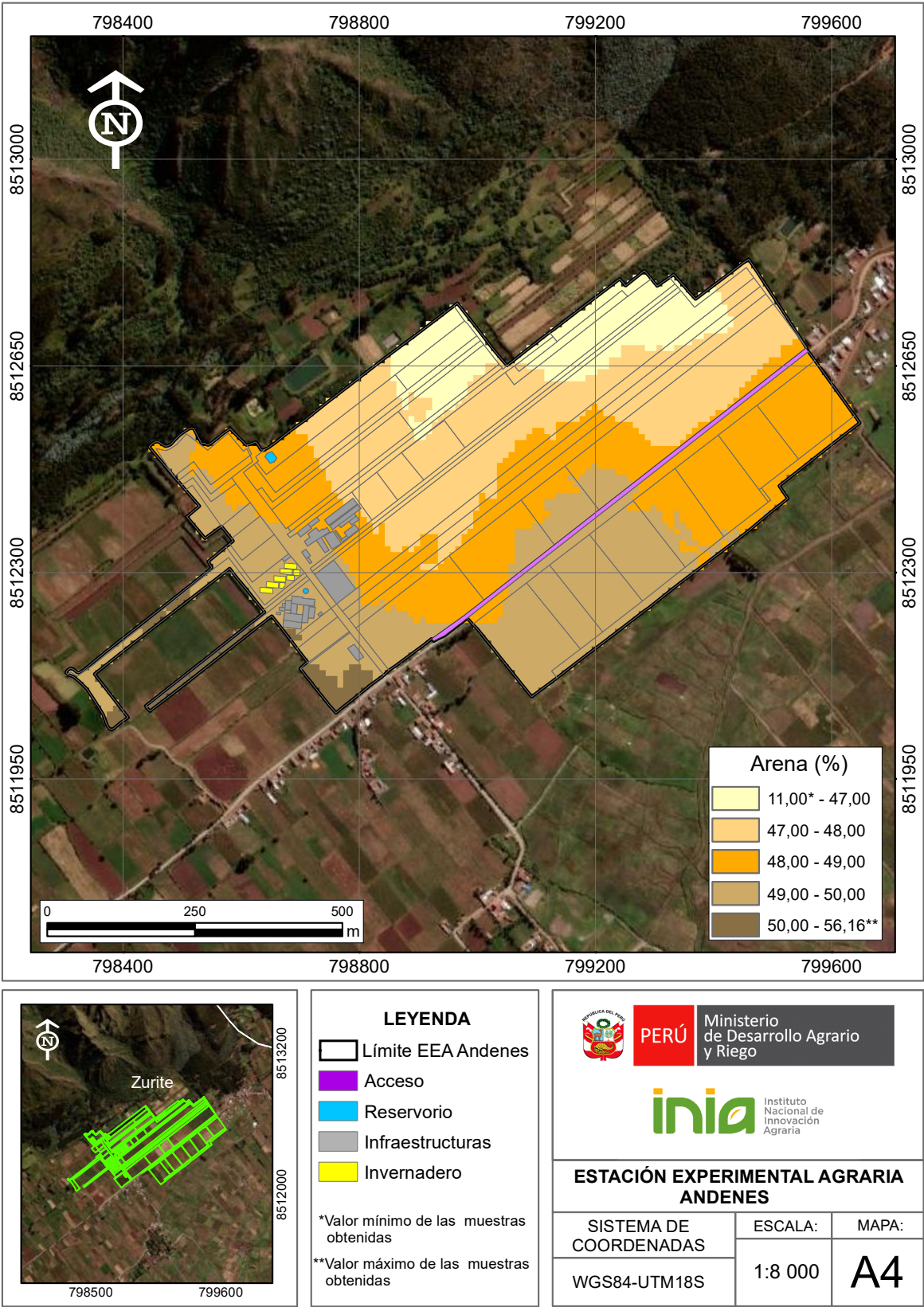


Figura 15. Mapa de variación espacial del porcentaje de arena

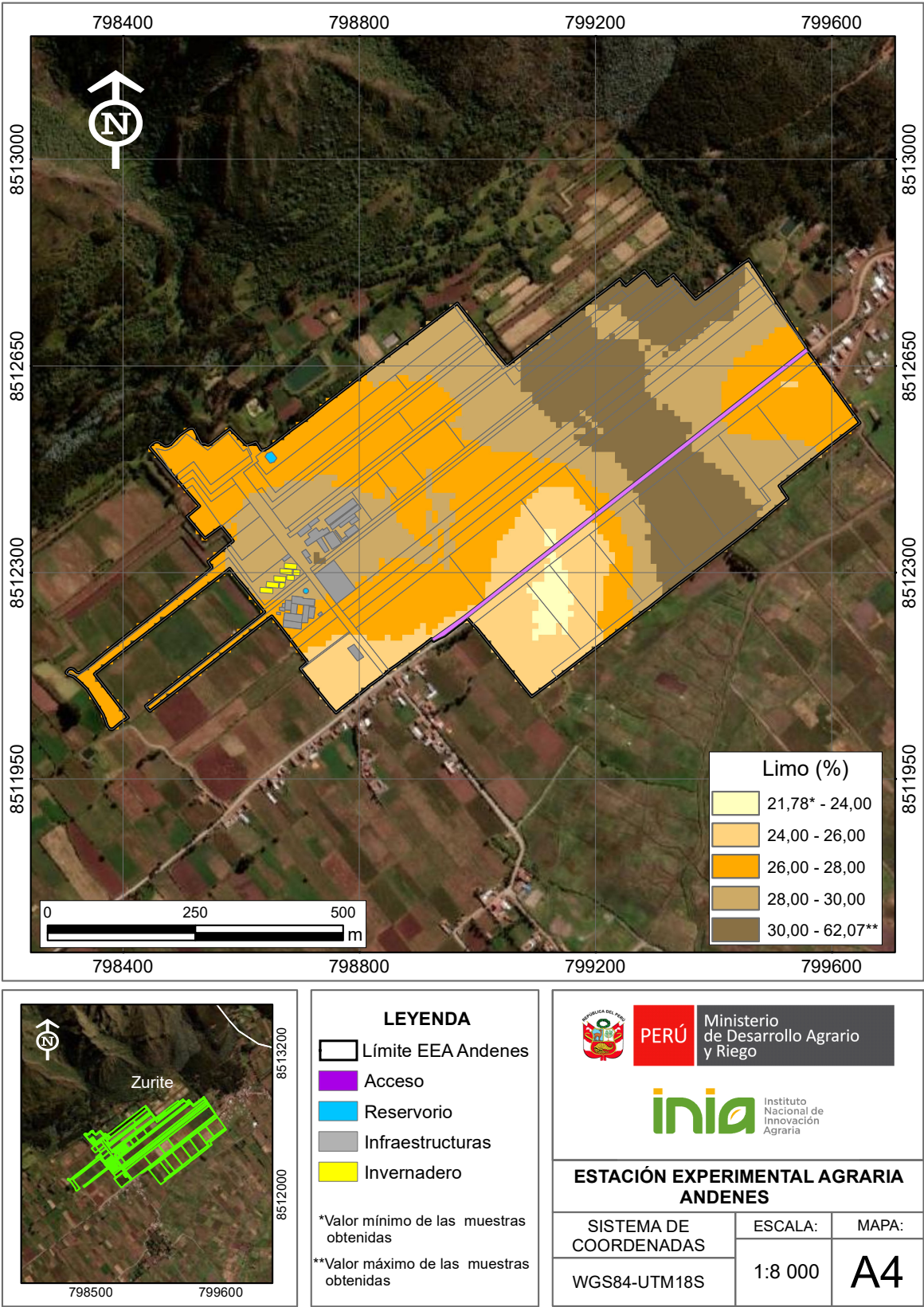


Figura 16. Mapa de variación espacial del porcentaje de limo

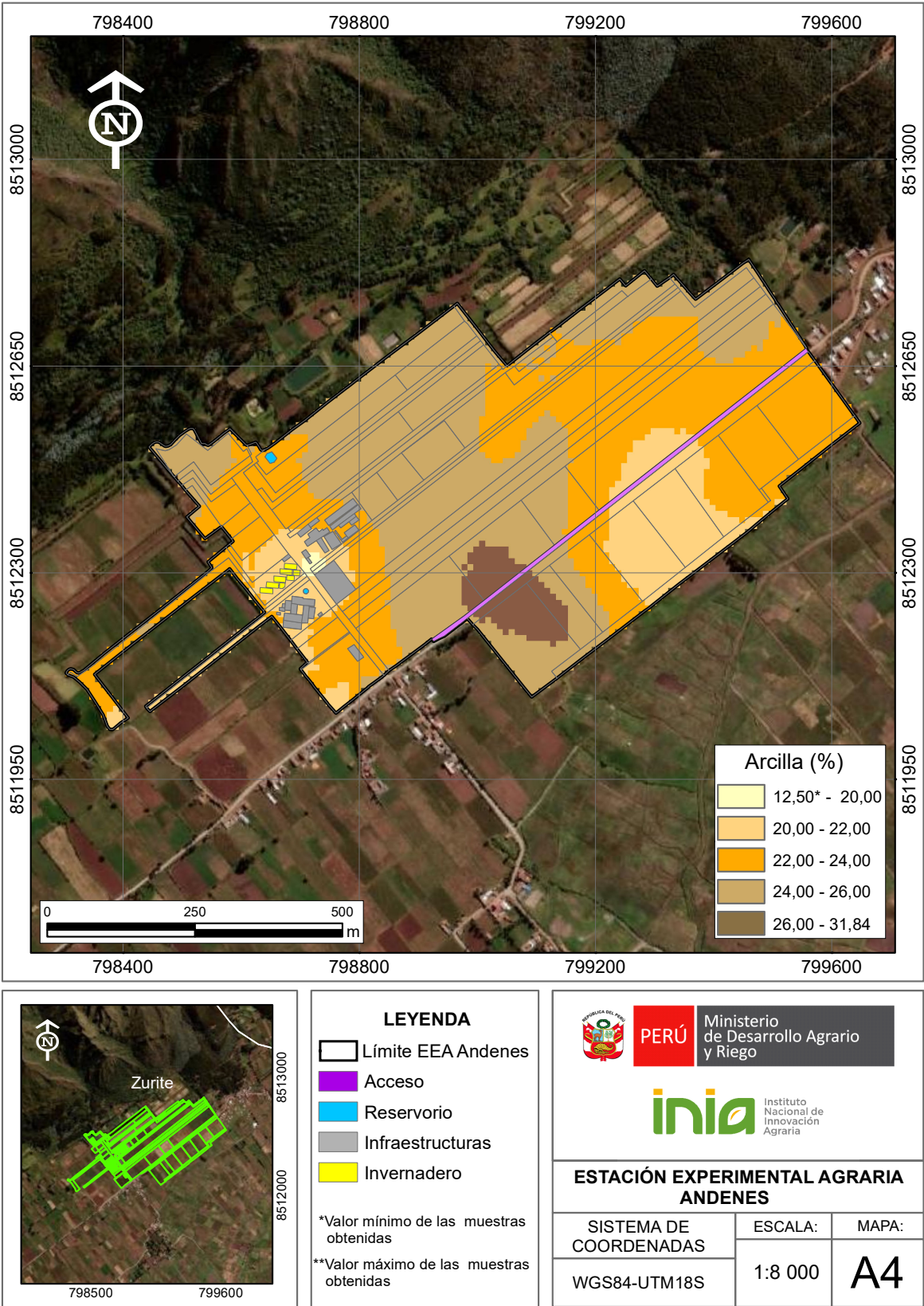


Figura 17. Mapa de variación espacial del porcentaje de arcilla

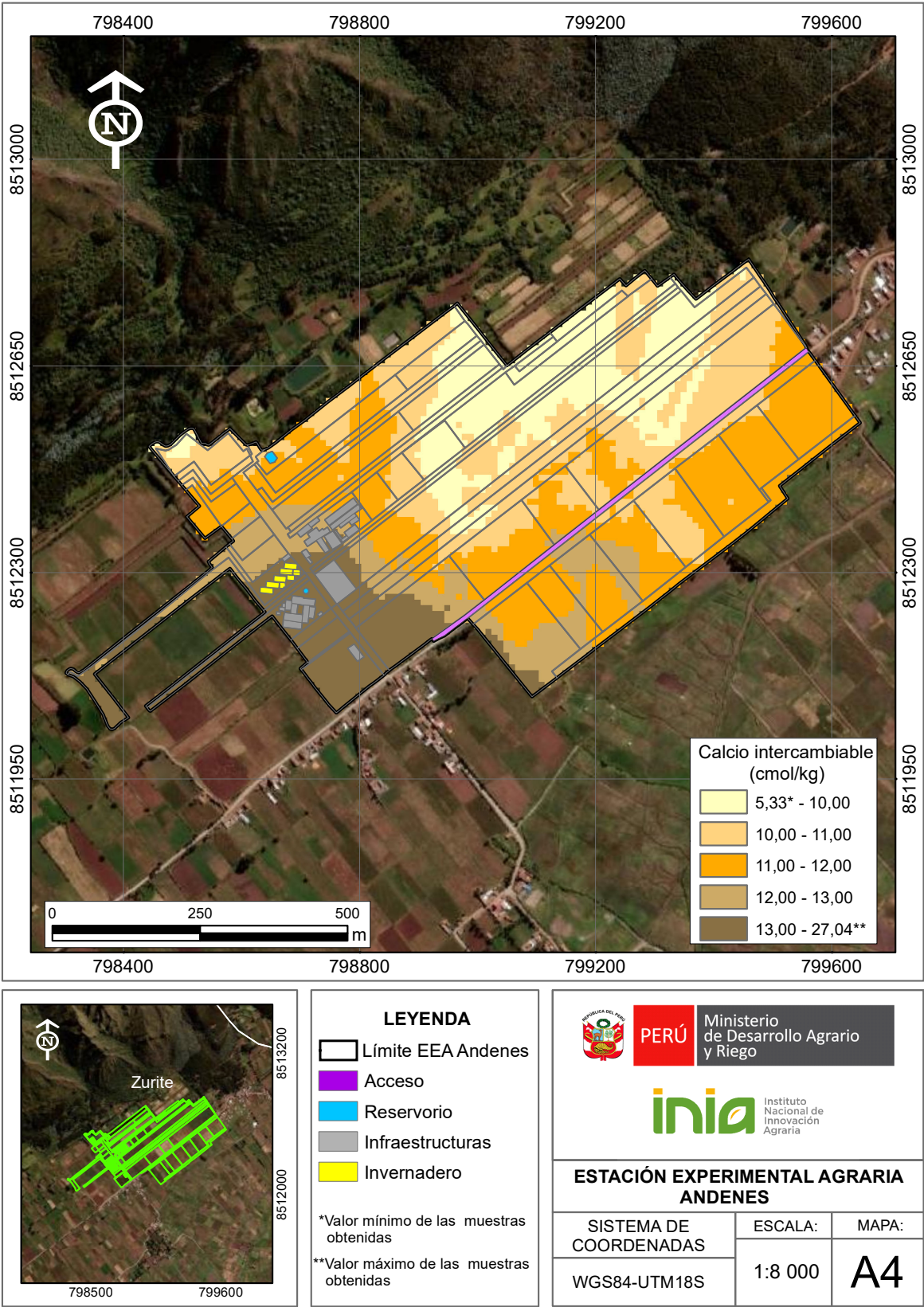


Figura 18. Mapa de variación espacial del calcio intercambiable

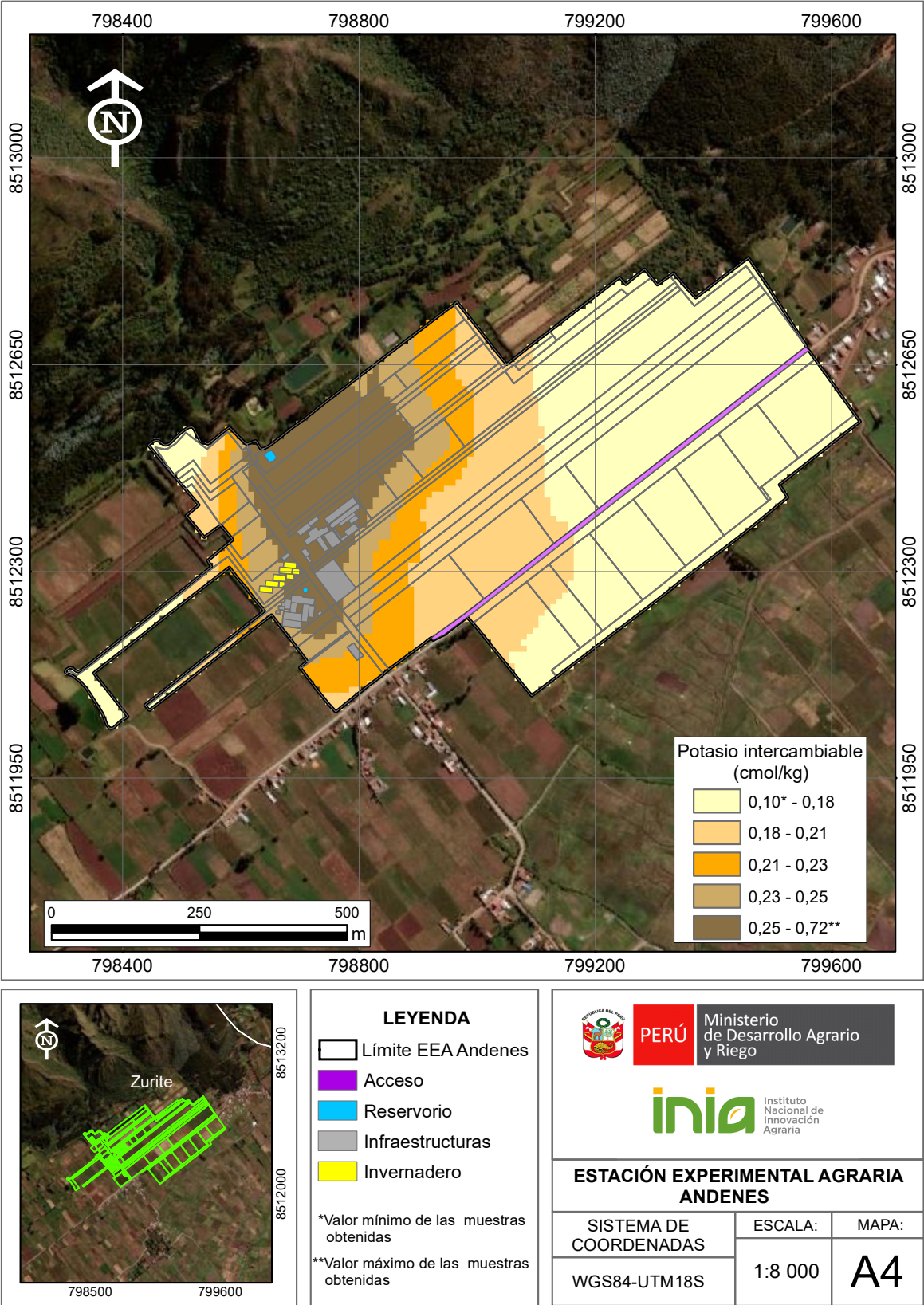


Figura 19. Mapa de variación espacial del potasio intercambiable

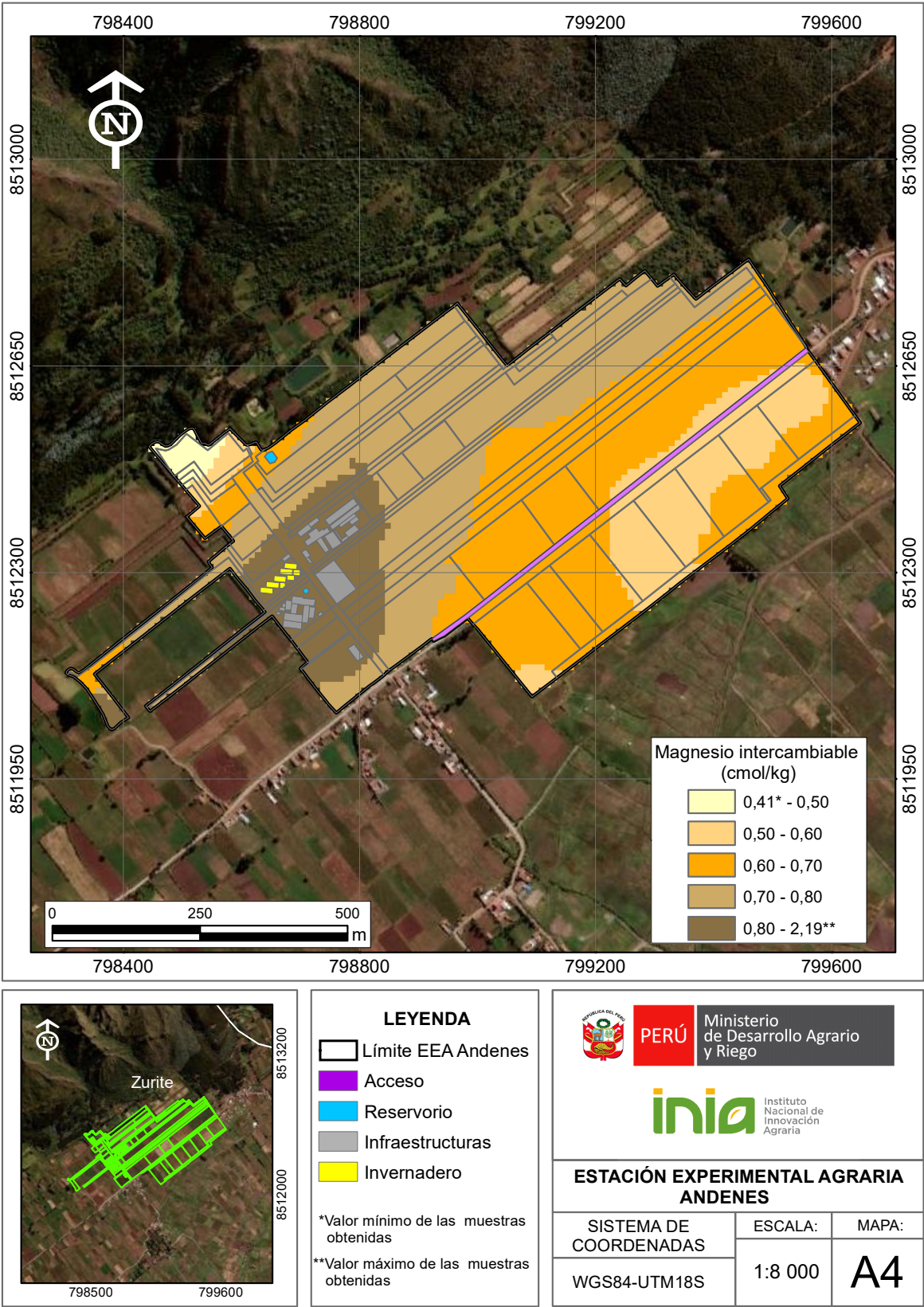


Figura 20. Mapa de variación espacial del magnesio intercambiable

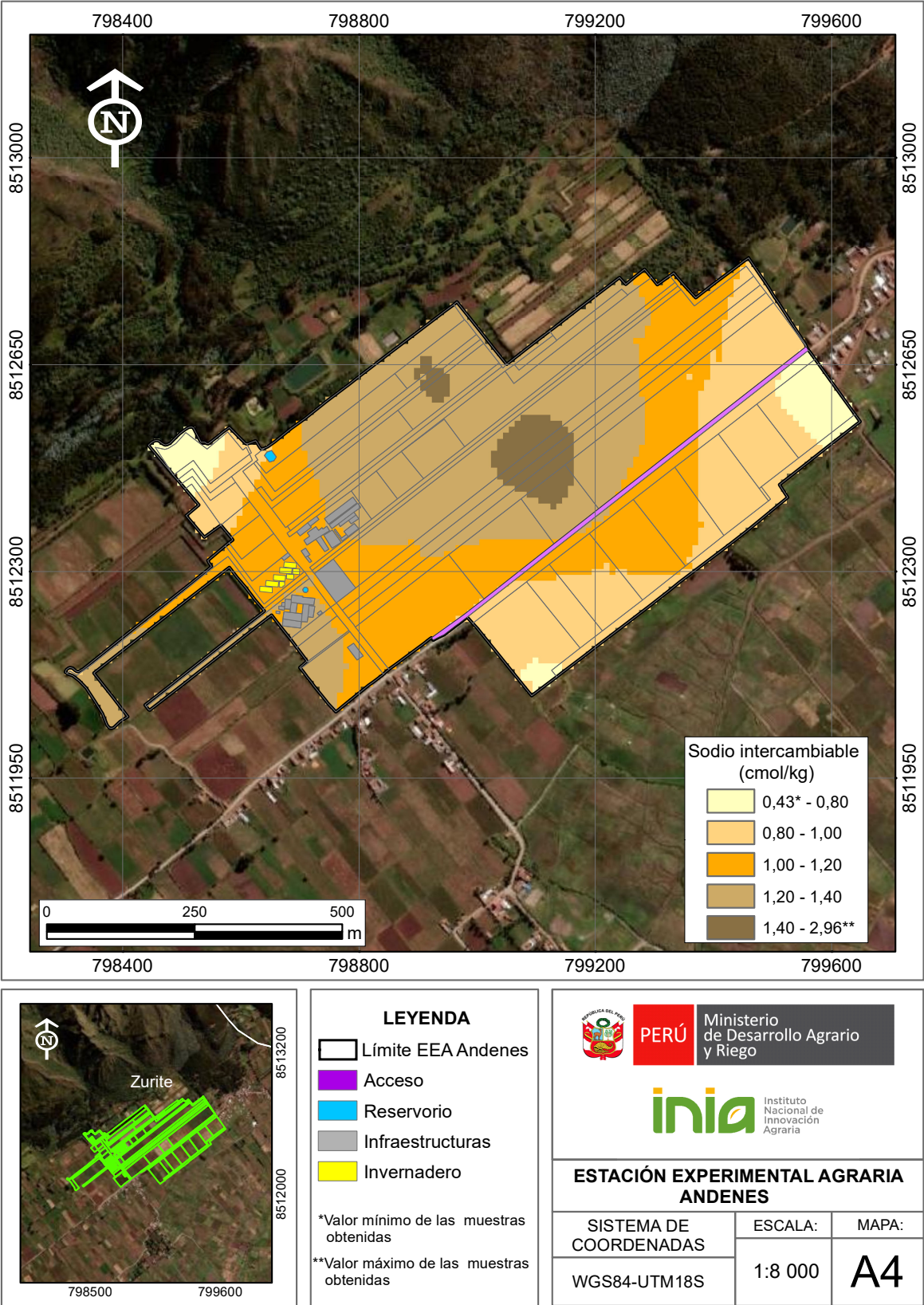


Figura 21. Mapa de variación espacial del sodio intercambiable

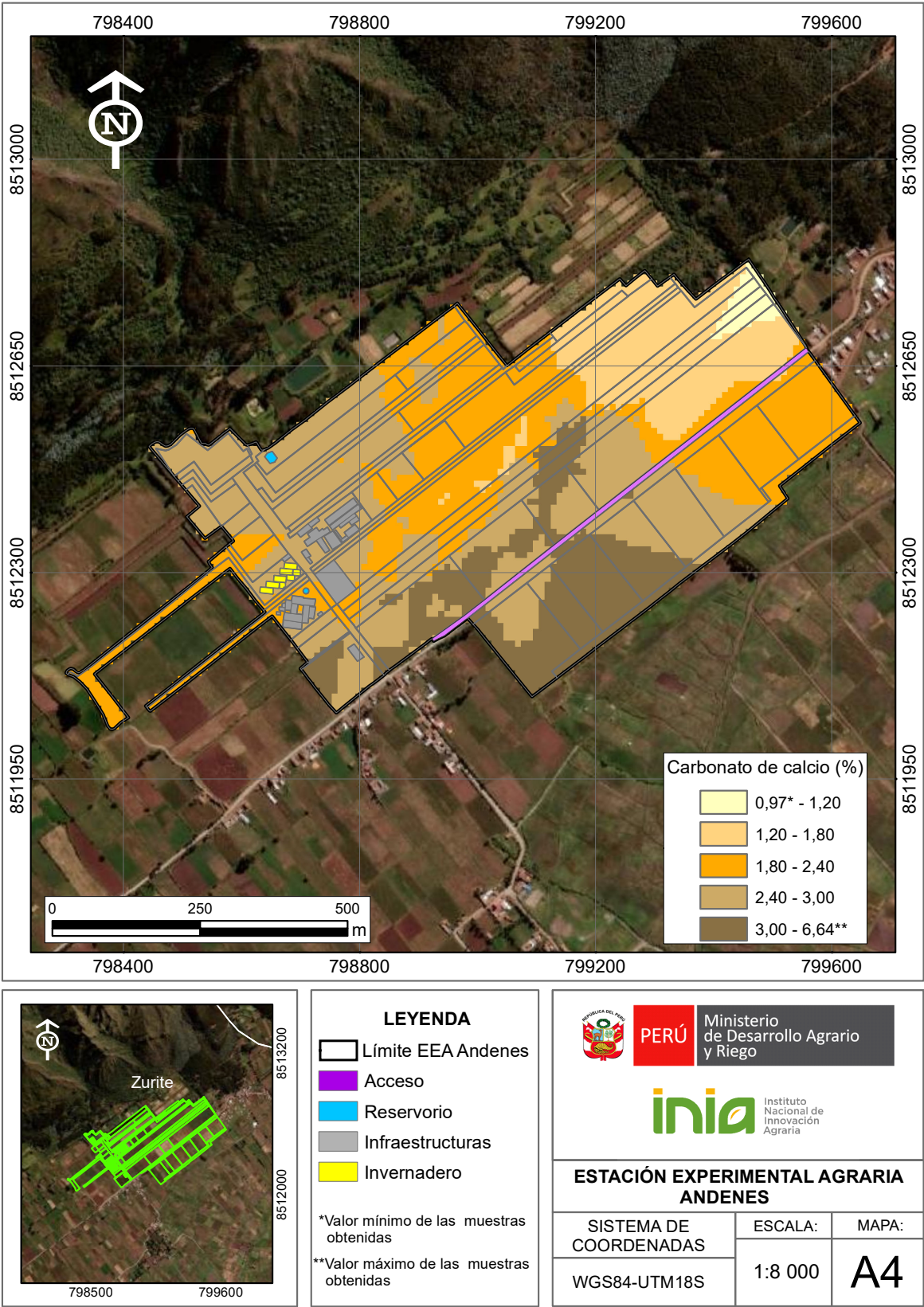


Figura 22. Mapa de variación espacial del porcentaje de carbonatos de calcio

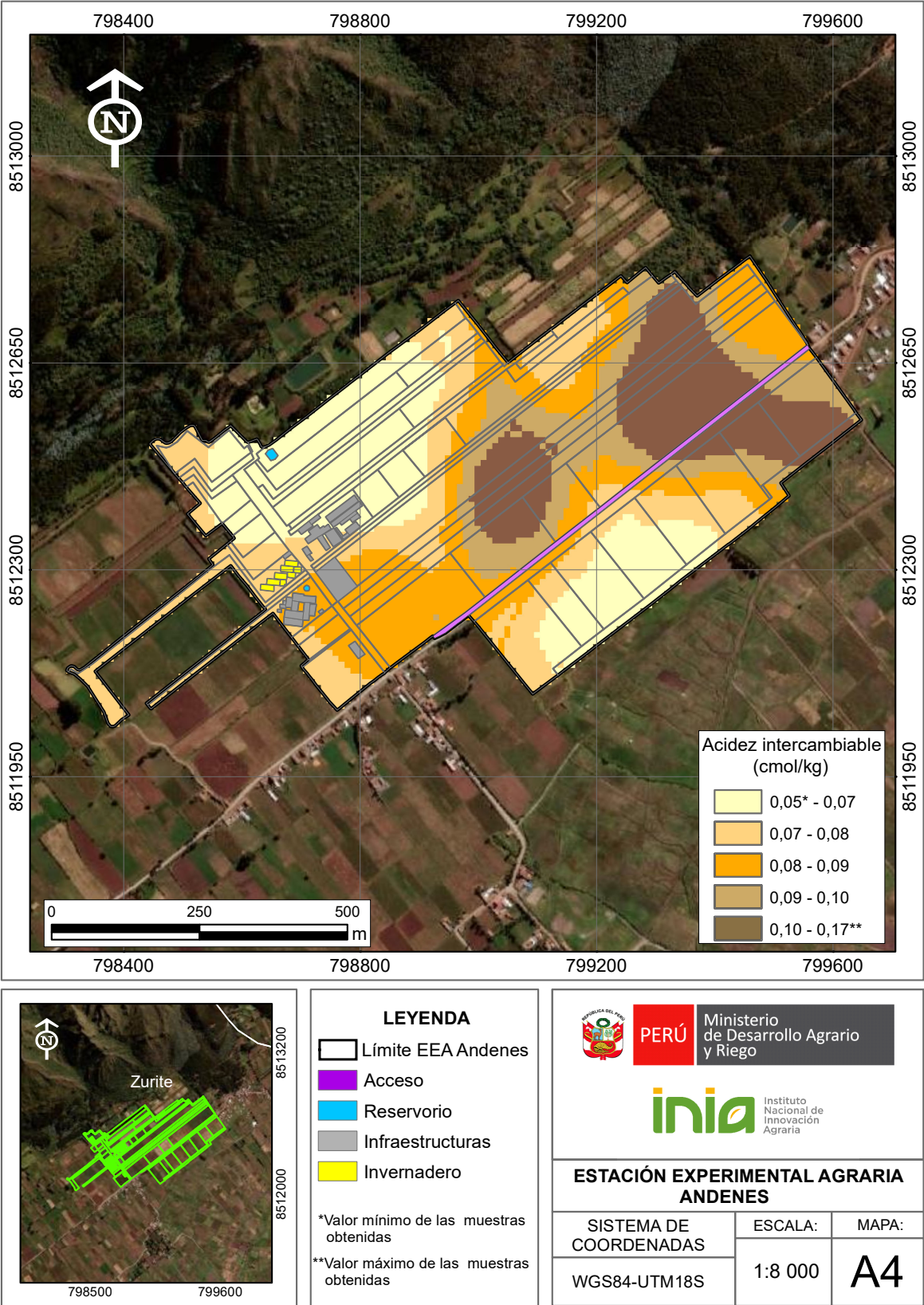


Figura 23. Mapa de variación espacial de la acidez intercambiable

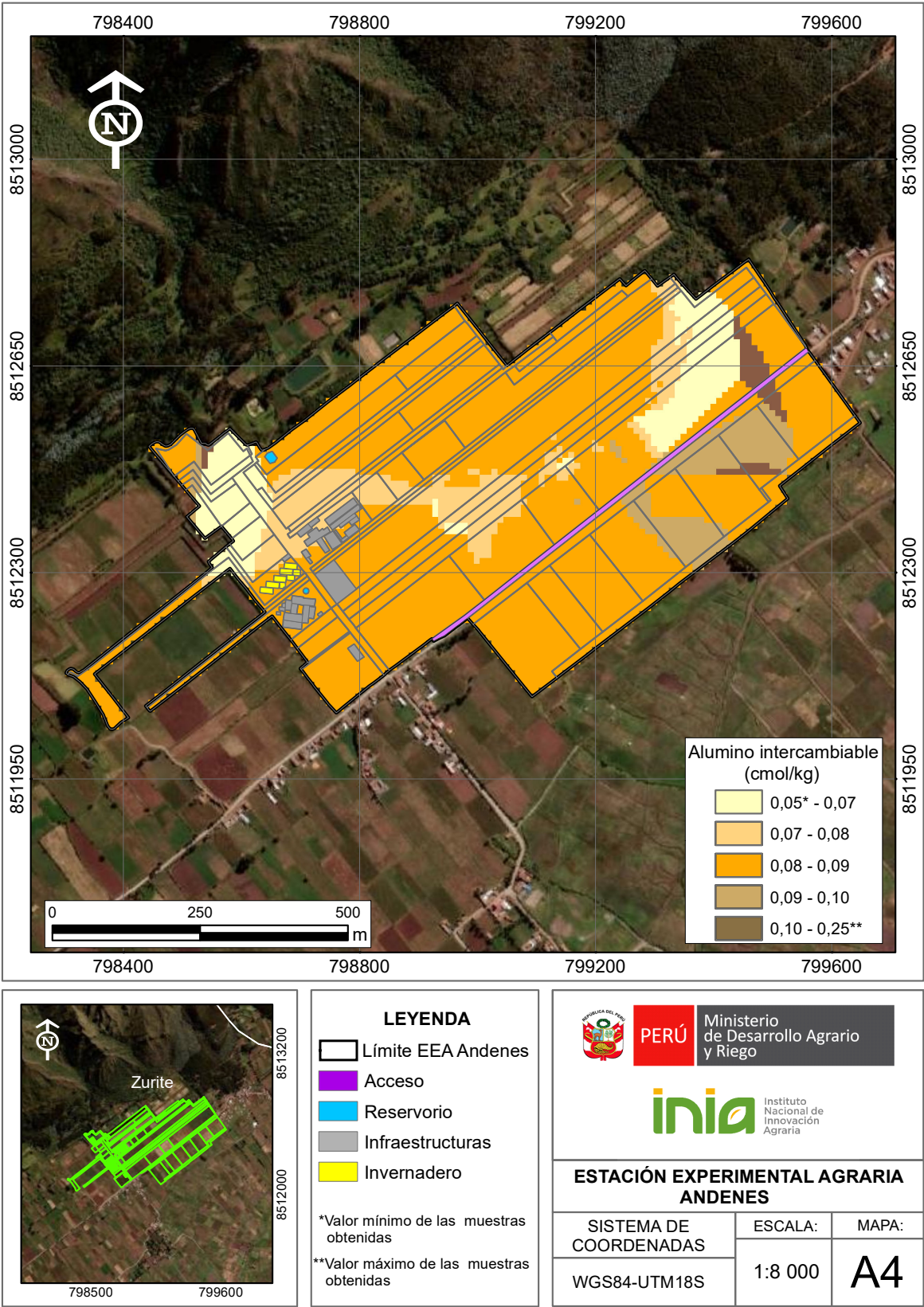


Figura 24. Mapa de variación espacial del aluminio intercambiable

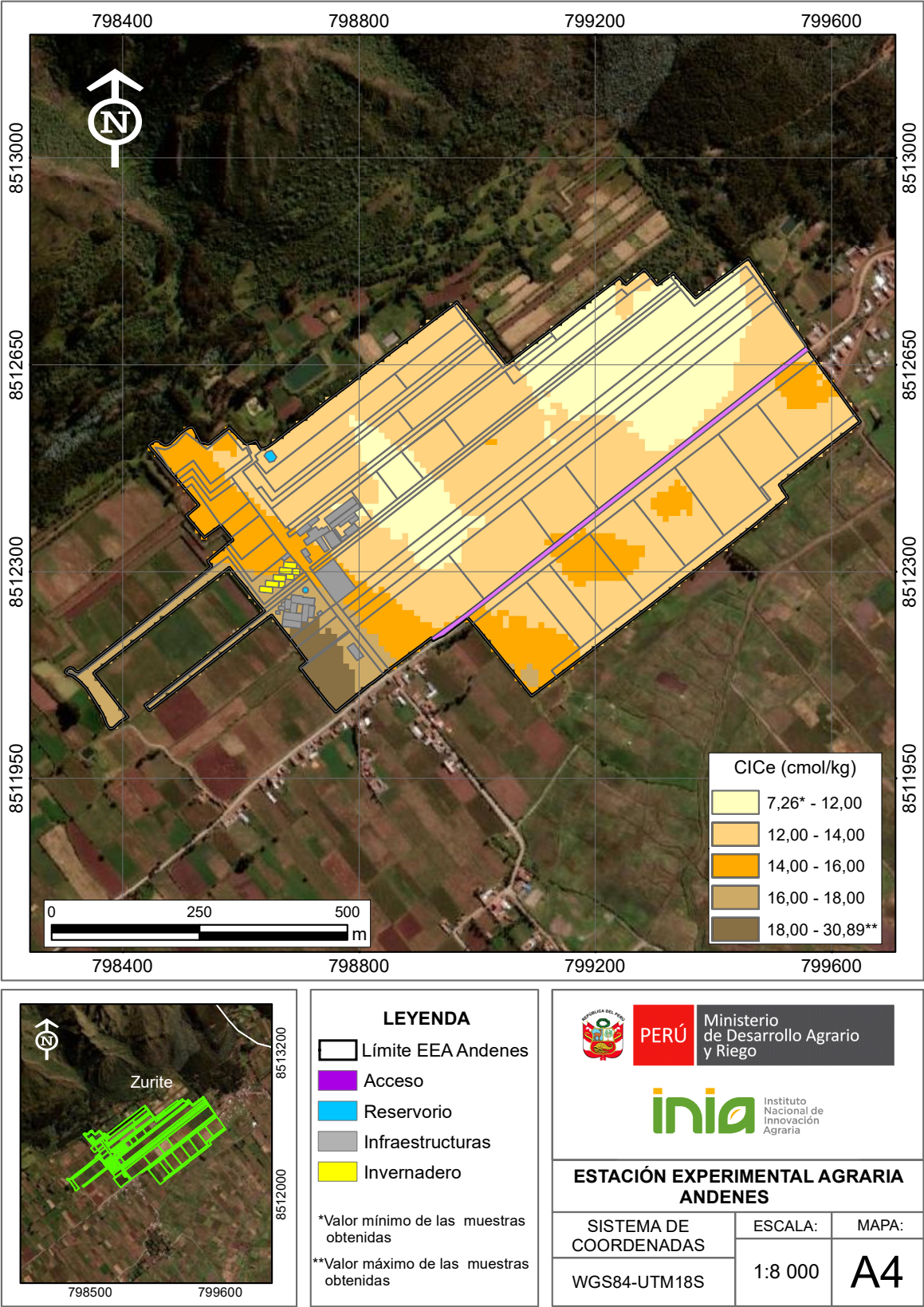


Figura 25. Mapa de variación espacial de la capacidad de intercambio catiónico efectivo

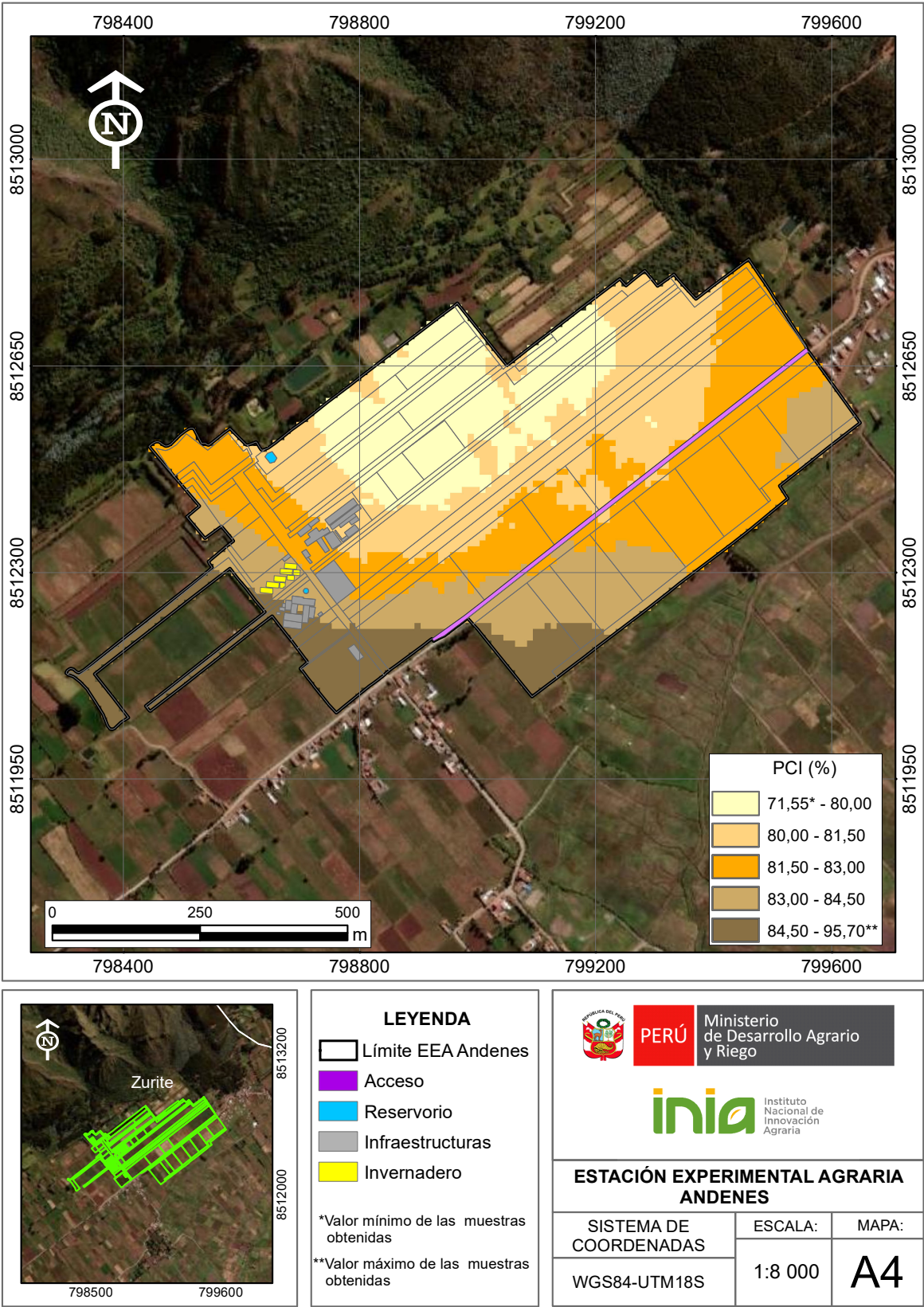


Figura 26. Mapa de variación espacial del porcentaje de calcio intercambiable

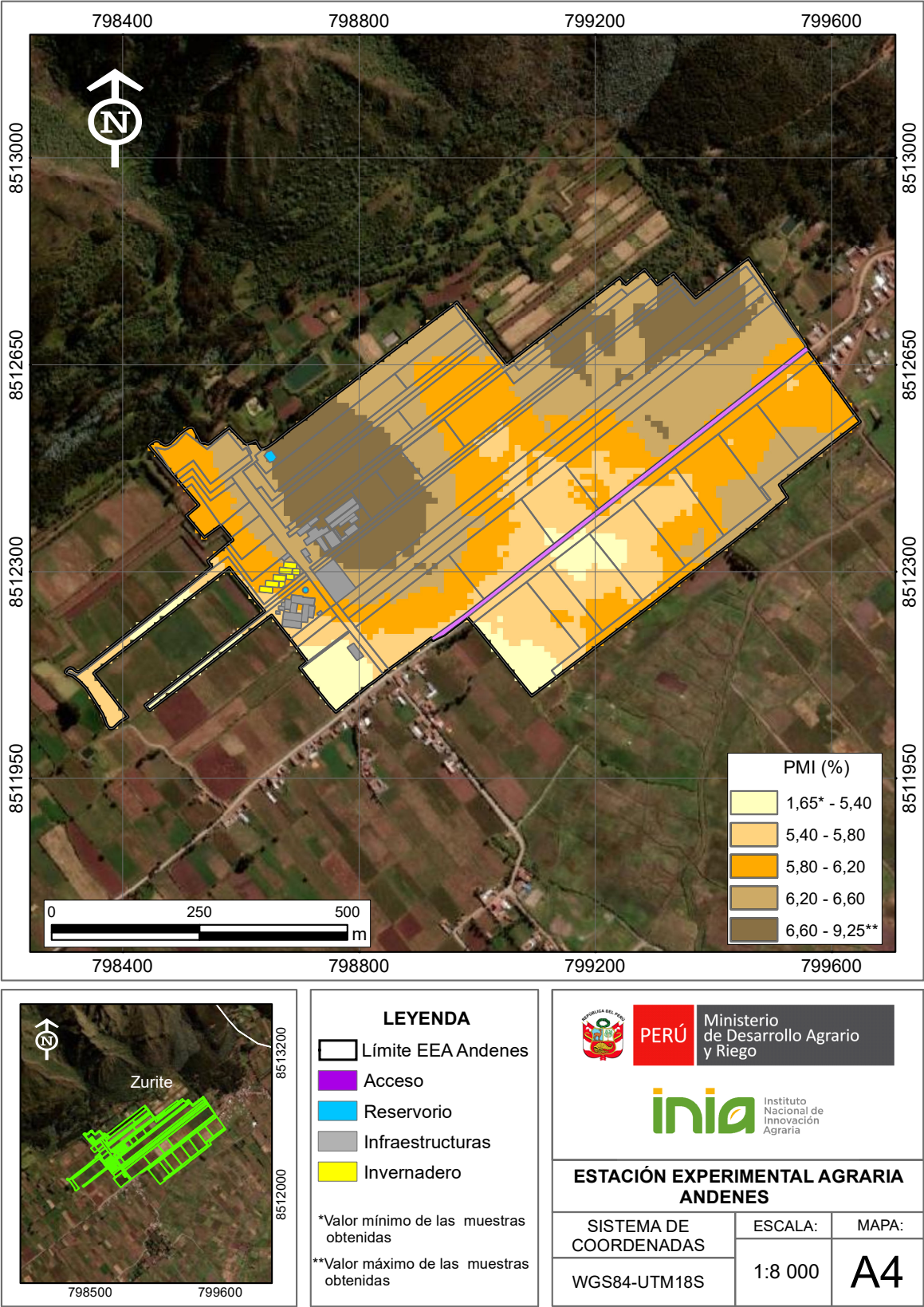


Figura 27. Mapa de variación espacial del porcentaje de magnesio intercambiable

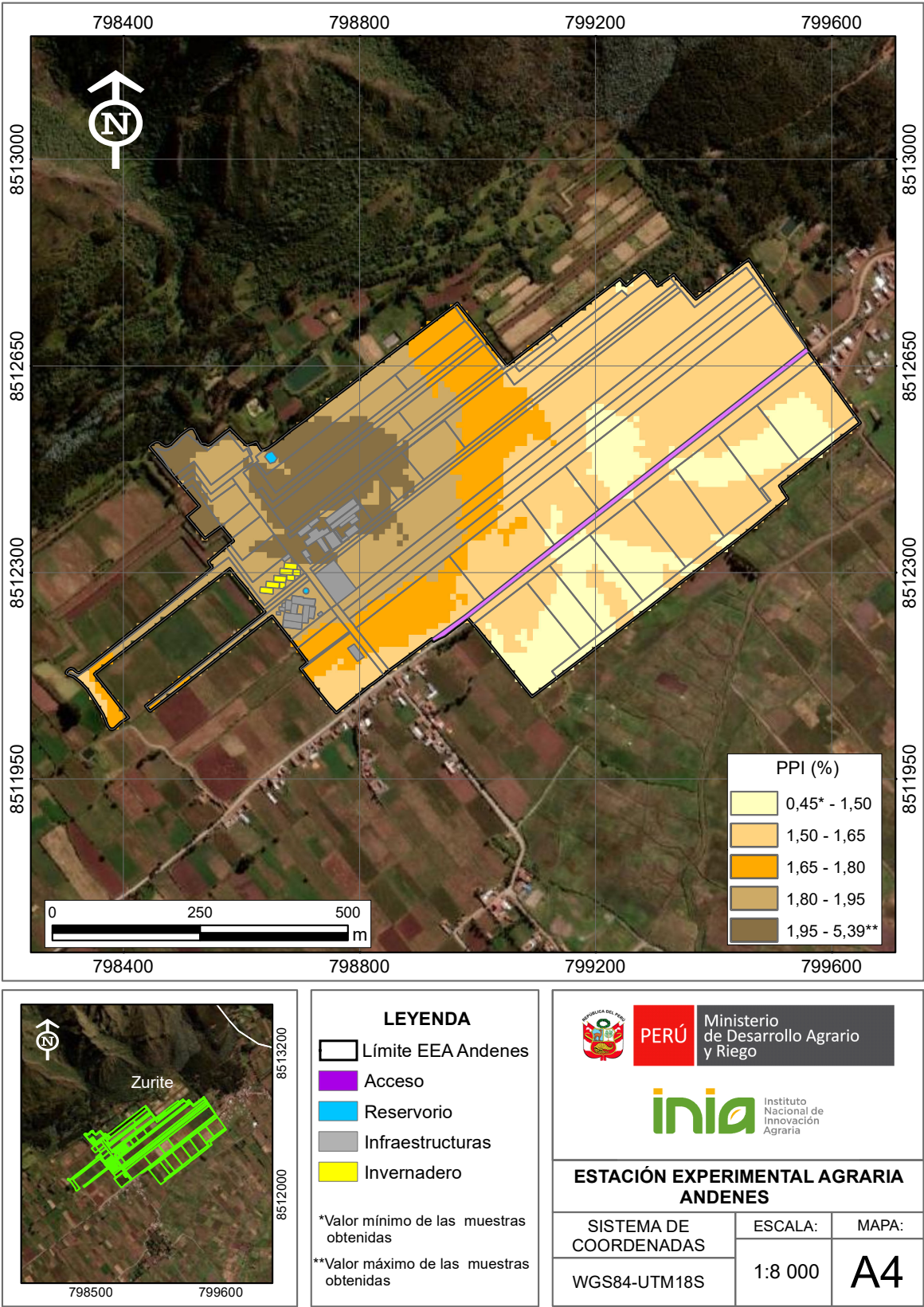


Figura 27. Mapa de variación espacial del porcentaje de potasio intercambiable

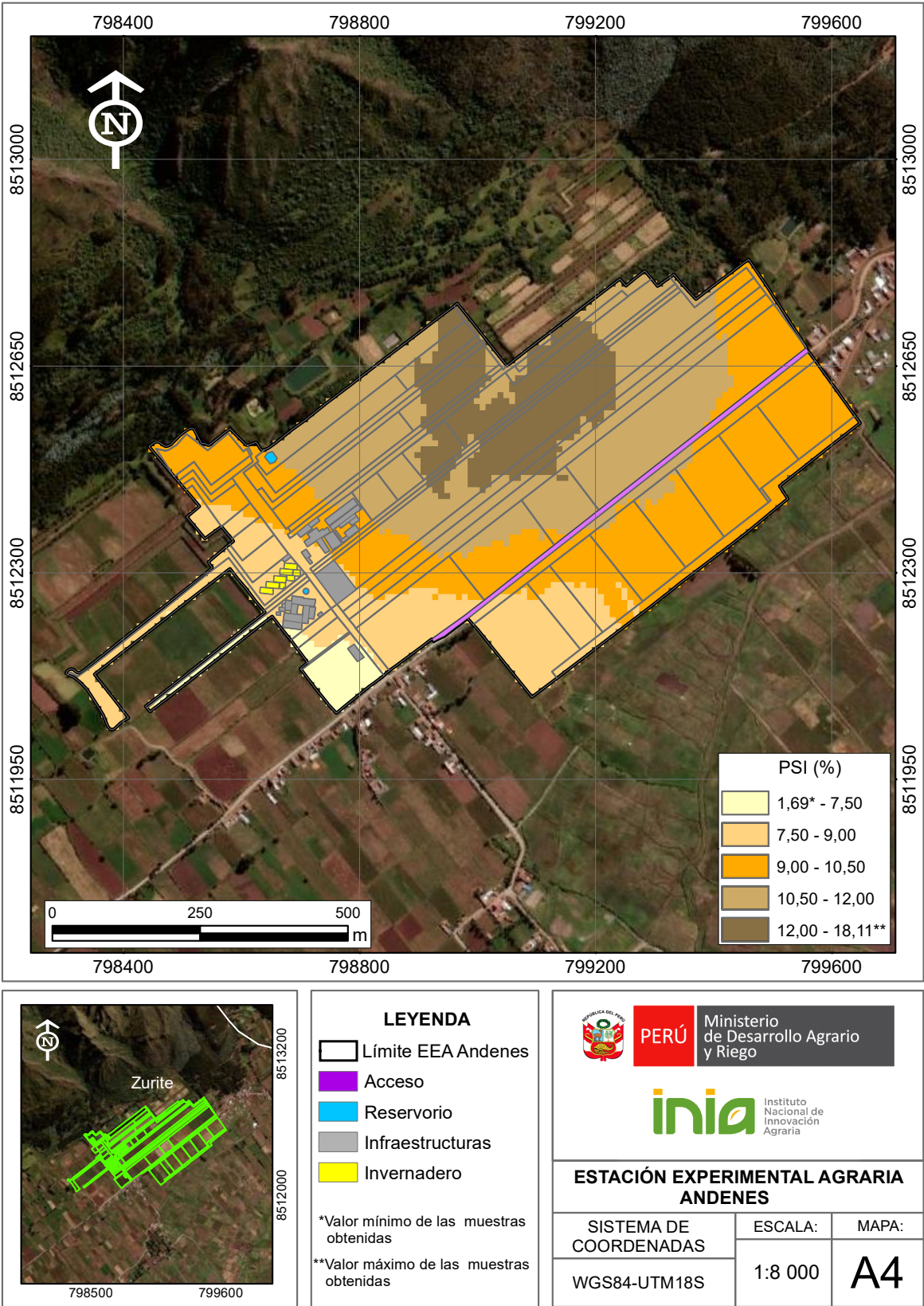


Figura 28. Mapa de variación espacial del porcentaje de sodio intercambiable





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

4.1. Índice de saturación de bases catiónicas

4.1.1. Variación espacial de las relaciones catiónicas

De acuerdo con Silvera-Pablo (2008) se recomienda una distribución adecuada de saturación de cada uno de los cationes cambiables:

Saturación de Ca^{2+} = 60-75 %

Saturación de Mg^{2+} = 12-20 %

Saturación de K^+ = 3-7 %

Saturación de $\text{Al} + \text{H}$ = 0-15 %

Saturación de micronutrientes = 3-5 %

El análisis del complejo de intercambio catiónico revela la presencia de desequilibrios del perfil nutricional de los suelos del CE Andenes. El porcentaje de saturación de calcio (PCI = 82,14 %) supera ampliamente el rango óptimo de 60-75 %, lo que indica una dominancia excesiva del Ca^{2+} en los sitios de intercambio que, lejos de ser un beneficio, genera antagonismos que bloquean activamente la absorción de magnesio y potasio por parte de los cultivos. Este desequilibrio se confirma con los valores del porcentaje de saturación de magnesio (PMI = 6,08 %) y del porcentaje de saturación de potasio (PPI = 1,74 %), ambos por debajo de sus rangos óptimos de 15-20 % y 3-7 % respectivamente. Además, la relación Ca/Mg calculada a partir de los valores medios de la tabla supera el umbral, produciendo una competencia iónica desfavorable para la absorción de Mg^{2+} en la raíz. Esto tiene como consecuencia la deficiencia de magnesio, afectando directamente en la distribución de fotosintatos que sirven para el metabolismo de compuestos que permiten el crecimiento y desarrollo de las plantas (Chen et al., 2018).

Frente a este escenario de bajo contenido de magnesio, se recomienda aplicar sulfato de magnesio directamente al suelo. Este fertilizante presenta la ventaja adicional de no elevar el pH, además de aportar azufre. Asimismo, en condiciones de bajo contenido de potasio — como ocurre en los suelos del CE Andenes — un adecuado suministro de magnesio favorece el desarrollo radicular y mejora la absorción de potasio (Qin et al., 2024). También, para la deficiencia de potasio recomienda la aplicación de sulfato de potasio (K_2SO_4) de manera fraccionada para minimizar la lixiviación y maximizar su eficiencia de uso.

El pH máximo de 8,1 indica que los suelos del CE Andenes presentan alcalinidad en sectores específicos del área. Esta condición se ve reforzada por un contenido medio de CaCO_3 de 2,78 % y un valor máximo de 6,64 %. La presencia de zonas con pH superior a 7,5 y altos niveles de carbonatos constituye una limitación localizada pero significativa, dado que bajo estas condiciones la disponibilidad de fósforo, zinc, hierro y manganeso disminuye considerablemente. En consecuencia, se recomienda la aplicación de materia orgánica, como compost o estiércol bien descompuesto, debido a que contribuye a mejorar la capacidad tampón del suelo mediante la formación de ácidos húmicos y fúlvicos.

4.2. Niveles de suficiencia de nutrientes disponibles

4.2.1. Cálculos de requerimiento de fertilización fosforada de mantenimiento y construcción para el cultivo de papa

Los indicadores geoestadísticos del fósforo disponible muestran una débil estructura espacial, con un modelo ajustado de tipo “*Lineal to Sill*”. El *nugget* (C_0) fue de 7 685,03 y el *sill* ($C_0 + C$) de 10 378,51, lo cual sugiere que el fósforo disponible varía fuertemente a pequeña escala, posiblemente asociado a factores locales como valores altos de pH, compactación o fertilización excesiva.

El rango de autocorrelación espacial es muy bajo ($range = 423,11$ m), y su relevancia práctica es limitada debido a la baja capacidad predictiva del modelo ($R^2 = 0,03$) y un error cuadrático medio relativamente alto ($RMSE = 98,43$ mg kg⁻¹). Esta débil estructura espacial limita la confiabilidad de interpolaciones como *kriging* ordinario para generar mapas precisos de disponibilidad de fósforo. En consecuencia, la fertilización fosfatada debe ser diseñada con base en análisis de suelos sitio-específicos, preferentemente a escala de lote o sublote, evitando extrapolaciones espaciales imprecisas.

Para los cálculos de fertilización fosforada en el cultivo de papa, se adoptará como referencia un nivel crítico de 30 mg kg⁻¹ y un rendimiento potencial de 50 t ha⁻¹ convencional con alta tecnología. El nivel mínimo de fósforo obtenido en los análisis es 8,6 mg kg⁻¹, por lo que se espera respuesta positiva a la aplicación de fertilizantes fosfatados. Para este caso, se tomará como ejemplo este valor de fósforo disponible. En este sentido, el plan de fertilización se formulará considerando los criterios de mantenimiento y construcción de fertilidad, con el objetivo de reponer el fósforo extraído por la cosecha e incrementar las reservas del nutriente en el suelo. El cálculo se realiza siguiendo la metodología descrita por Quispe-Matos et al. (2025).

Primer paso: calcular el rendimiento alcanzado con 8,6 mg de P-Olsen por kg de suelo, considerando que con este nivel de fósforo se alcanza un rendimiento relativo de 20 %.

$$\text{Rendimiento alcanzado} = \frac{20 \times 50 \text{ t ha}^{-1}}{100} = 10 \text{ t ha}^{-1}$$

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

$$\text{Incremento de raíces y brotes} = 0,35 \times 10 \text{ t ha}^{-1} = 3,5 \text{ t ha}^{-1}$$

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

$$\text{Rendimiento objetivo} = 3,5 \text{ t ha}^{-1} + 30 \text{ t ha}^{-1} = 33,5 \text{ t ha}^{-1}$$

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

$$\text{Requerimiento de P} = 2 \text{ kg de P t}^{-1} \times 33,5 \text{ t ha}^{-1} = 67 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

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 %.

$$\text{RM de P} = \frac{67 \text{ kg de P ha}^{-1}}{0,30} = 223,3 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

Sexto paso: finalmente 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, y que el incremento anual requerido (IAR) en este ejemplo es de 1,0 mg de P por kg de suelo.

$$\text{RC} = 1,0 \text{ mg de P kg}^{-1} \times \frac{6 \text{ kg de P ha}^{-1}}{1 \text{ mg de P kg}^{-1}} = 6 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

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

$$\text{Dosis de fertilización de P} = 223,3 \text{ kg de P ha}^{-1} + 6 \text{ kg de P ha}^{-1} = 229,3 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

De esta manera, la dosis de fertilización anual sería de 1141,5 kg ha⁻¹ de fosfato diamónico (DAP), el cual tiene una riqueza de 46 % de P₂O₅. Con esta dosis de fertilización se abastece el requerimiento y construcción de fósforo en el suelo para sostener el rendimiento a largo plazo del cultivo de papa.

4.2.2. Variación espacial de zonas deficientes de K disponible

El K disponible en el suelo del CE Andenes presenta una distribución espacial ajustada a un modelo lineal, con un *Nugget* de 170,16, un *Sill* de 432,12 y un rango de 443,55 m, lo que indica que la variabilidad del potasio se extiende a distancias relativamente amplias; sin embargo, el RMSE de 20,39 evidencia un nivel moderado de error en las predicciones y el R² de 0,01 muestra que el modelo explica muy poco la variabilidad observada, lo que sugiere un ajuste deficiente y la influencia de factores adicionales como la textura del suelo o el manejo del riego.

El K disponible tiene valor medio de 50,11 mg/kg, con una desviación estándar de 28,03 mg kg⁻¹ y un coeficiente de variación (CV) de 55,94 %, lo que indica una alta variabilidad espacial. Este valor elevado de CV sugiere que, aunque el promedio es moderado, existen zonas con concentraciones significativamente más bajas y otras mucho más altas, evidenciando una distribución no uniforme del potasio en el área evaluada. Desde el punto de vista agronómico, esta variabilidad resalta la necesidad de implementar un manejo zonificado para optimizar la aplicación de fertilizantes y mejorar la uniformidad del potasio en el suelo.

El bajo nivel de potasio disponible en algunas zonas del suelo puede explicarse por varios factores, de los cuales destaca la presencia de otros cationes como sodio, calcio y magnesio, que compiten con el potasio y reducen su disponibilidad. Asimismo, el bajo contenido de materia orgánica (2,16 %) limita la capacidad del suelo para retener y suministrar este nutriente. Finalmente, una fertilización inadecuada y una baja actividad microbiana, que afecta la liberación de nutrientes, pueden contribuir a los bajos niveles de potasio disponible en el suelo.

4.2.3. Cálculos de requerimiento de fertilización potásica de mantenimiento y construcción para el cultivo de papa

En el área de estudio se registró un valor mínimo de potasio disponible de 22,39 mg kg⁻¹. Las zonas con concentraciones cercanas a este nivel requieren suplementación potásica, especialmente cuando se destinen a cultivos con alta demanda de este nutriente.

A continuación, se realizará el cálculo del requerimiento de fertilización potásica utilizando el criterio de mantenimiento y construcción para el cultivo de papa, tomando como referencia el valor mínimo de potasio disponible registrado (22,39 mg kg⁻¹). El cálculo se realiza adaptando la metodología descrita por Quispe-Matos et al., 2025.

El umbral crítico o nivel de suficiencia se establece en 150 mg de K por kg de suelo, con un rendimiento potencial estimado de 50 t ha⁻¹. Asimismo, el análisis de correlación y calibración indica que el nivel de 22,39 mg de K por kg de suelo corresponde a un rendimiento relativo (RR) del 40 %.

Primer paso: calcular el rendimiento con 22,39 mg de K por kg de suelo.

$$\text{Rendimiento alcanzado} = \frac{40 \times 50 \text{ t ha}^{-1}}{100} = 20 \text{ t ha}^{-1}$$

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

$$\text{Incremento de raíces y brotes} = 0,35 \times 20 \text{ t ha}^{-1} = 7 \text{ t ha}^{-1}$$

Tercer paso: determinar el rendimiento objetivo, añadiendo el incremento de raíces y brotes al rendimiento alcanzado.

$$\text{Rendimiento objetivo} = 20 \text{ t ha}^{-1} + 7 \text{ t ha}^{-1} = 27 \text{ t ha}^{-1}$$

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

$$\text{Requerimiento de K} = 20 \text{ kg de K t}^{-1} \times 27 \text{ t ha}^{-1} = 540 \text{ kg de K ha}^{-1}$$

Quinto paso: determinar el requerimiento de mantenimiento (RM). El RM integra el requerimiento de K, con el concepto de eficiencia de uso del nutriente en el sistema (la fracción del nutriente que realmente está disponible para el cultivo) y posibles pérdidas (por inmovilización, fijación, erosión o volatilización). Para este caso práctico, se considera una eficiencia de uso de K del 70 %.

$$\text{RM de K} = \frac{540 \text{ kg de K ha}^{-1}}{0,70} = 771,42 \text{ kg de K ha}^{-1}$$

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

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

Entonces, el plan de fertilización para el primer año sería el siguiente:

$$\text{Dosis de fertilización de K} = 771,42 \text{ kg de K ha}^{-1} + 40 \text{ kg de K ha}^{-1} = 811,42 \text{ kg de K ha}^{-1}$$

De esta manera, la dosis de fertilización anual sería de 1622,84 kg ha⁻¹ de cloruro de potasio, el cual tiene una riqueza de 60 % de K₂O. Con esta dosis de fertilización se abastece el requerimiento y construcción de potasio en el suelo para sostener el rendimiento a largo plazo del cultivo de papa.



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 Tinguavita, 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. <https://doi.org/10.2136/sssaj1958.03615995002200040013x>
- Brock, C., Jackson-Smith, D., Kumarappan, S., Culman, S., Doohan, D., y Herms, C. (2021). The prevalence and practice of soil balancing among organic corn farmers. *Renewable Agriculture and Food Systems*, 36(4), 1-10. <https://doi.org/10.1017/S1742170520000381>
- Buresh, R.J., Smithson, P.C., y Hellums, D.T. (1997). Building Soil Phosphorus Capital in Africa. En R. J. Buresh, P. A. Sanchez, y F. Calhoun (Eds.), *Replenishing Soil Fertility in Africa* (pp. 111-149). Soil Science Society of America, Inc; American Society of Agronomy, Inc. https://apps.worldagroforestry.org/Units/Library/Books/PDFs/91_Replenishing_soil_fertility_in_africa.pdf
- Chaganti, V., y Culman, S. (2017). Historical perspective of soil balancing theory and identifying knowledge gaps: A review. *Crop, Forage y Turfgrass Management*, 3(1), 1-7. <https://doi.org/10.2134/cftm2016.10.0072>
- Chen, Z. C., Peng, W. T., Li, J., y Liao, H. (2018). Functional dissection and transport mechanism of magnesium in plants. *Seminars in Cell & Developmental Biology*, 74, 142-152. <https://doi.org/10.1016/j.semcdb.2017.08.005>
- Chinea-Horta, A., y Rodríguez-Izquierdo, L. (2021). Comportamiento geoespacial de algunas propiedades del suelo en el cultivo de la caña de azúcar. *Ingeniería Agrícola*, 11(1). <https://www.redalyc.org/journal/5862/586269368001/html/>
- Cruz-Luis, J. A., Ortiz-Morera, N. C., Quispe-Torres, D. R., Atalaya-Lopez, J. S., Macavilca-Villar, P. M., Ramírez-Aparicio, J. A., Salinas-Rivera, J. L., Escobar-Cuadros, F., Carbajal-Llosa, C. M., Olivarez-Rivera, E. L., Casaretto-Castagnino, D., y Ganoza-Roncal, J. J. (2025). *Atlas de las Estaciones Experimentales Agrarias del INIA*. Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA). <http://hdl.handle.net/20.500.12955/2763>
- Culman, S. W., Brock, C., Doohan, D., Jackson-Smith, D., Herms, C., Chaganti, V. N., Kleinhenz, M., Springer, 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* (1a ed.). International Plant Nutrition Institute. <https://doi.org/10.13140/2.1.3888.9281>
- Garbanzo-León, G., Alemán-Montes, B., Alvarado-Hernández, A., y Henríquez-Henríquez, C. (2017). Validación de modelos geoestadísticos y convencionales en la determinación de la variación espacial de la fertilidad de suelos del Pacífico Sur de Costa Rica. *Investigaciones Geográficas*, (93), 20–41. <https://doi.org/10.14350/rig.54706>
- García, F. O., y Ciampitti, I. A. (2010). Enfoques alternativos para el diagnóstico de fertilidad de suelos el enfoque “tradicional”. *Informaciones Agronómicas*, (3), 17-25. <https://fertilizar.org.ar/wp-content/uploads/2011/09/17.pdf>
- Graham, E. R. (1959). *An explanation of theory and methods of soil testing*. Bulletin 734. University of Missouri, Agricultural Experiment Station. <https://mdh.contentdm.oclc.org/digital/collection/agexptstn/id/25261/>
- Hartemink, A.E., y Barrow, N.J. (2023). Soil pH - nutrient relationships: the diagram. *Plant and Soil*, 486, 209–215. <https://doi.org/10.1007/s11104-022-05861-z>
- Halstead, R. L., MacLean, A. J., y Nielsen, K. F. (1958). Ca: Mg ratios in soil and the yield and composition of alfalfa. *Canadian Journal of Soil Science*, 38(2), 85-93. <https://doi.org/10.4141/cjss58-014>
- Havlin, J. L., Tisdale, S. L., Nelson, W. L., y Beaton, J. D. (2016). *Soil fertility and fertilizers*. Pearson Education India.
- Instituto Nacional de Recursos Naturales. (1996). *Mapa de suelos del Perú*.
- International Organization for Standardization. (1994). *Soil quality — Determination of specific electrical conductivity*.
- International Organization for Standardization. (1995). *Soil quality — Determination of total nitrogen — Modified Kjeldahl method*. <https://www.iso.org/standard/19239.html>
- Kopittke, P. M., y Menzies, N. W. (2007). A review of the use of the basic cation saturation ratio and the “ideal” soil. *Soil Science Society of America Journal*, 71(2), 259–265. <https://doi.org/10.2136/sssaj2006.0186>

- Marino, M. A., y Echeverría, H. E. (2018). Umbral de requerimiento de fósforo en suelos Argiudoles y guía para la fertilización de alfalfa (*Medicago sativa* L.). *Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica*, 31, 7-18. <https://fertilizar.org.ar/wp-content/uploads/2021/09/Art-2.pdf>
- McLean, E. O. (1977). Contrasting concepts in soil test interpretation: Sufficiency levels of available nutrients versus basic cation saturation ratios. En T. R. Peck, J. T. Cope Jr., y D. A. Whitney (Eds.), *Soil testing: correlating and interpreting the analytical results* (pp. 39-54). ASA Special Publications. <https://doi.org/10.2134/asaspecpub29.c3>
- 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>
- Oficina Nacional de Evaluación de Recursos Naturales. (1988). *Los Recursos Naturales del Perú*. Lima.
- Pestalozzi, H. (2000) Sectoral fallow systems and the management of soil fertility: The rationality of indigenous knowledge in the High Andes of Bolivia. *Mountain Research and Development*, 20(1), 64-71. [https://doi.org/10.1659/0276-4741\(2000\)020\[0064:SFSATM\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1659/0276-4741(2000)020[0064:SFSATM]2.0.CO;2)
- Pebesma, E. J., y Bivand, R. S. (2005). Classes and methods for spatial data in R. *R News*, 5(2), 9–13. <http://cran.r-project.org/doc/Rnews/>
- Pierre, W. H., y Banwart, W. L. (1973). Excess-Base and Excess-Base/Nitrogen ratio of various crop species and parts of Plants. *Agronomy Journal*, 65(1), 91-96. <https://doi.org/10.2134/agronj1973.00021962006500010028x>
- Posthumus, H., y Stroosnijder, L. (2010) To terrace or not: The short-term impact of bench terraces on soil properties and crop response in the Peruvian Andes. *Environment, Development and Sustainability*, 12(2), 263-276. <https://doi.org/10.1007/s10668-009-9193-4>
- Qin, H., Zhang, X., Tian, G., Liu, C., Xing, Y., Feng, Z., Lyu, M., Liu, J., Xu, X., Zhu, Z., Jiang, Y., & Ge, S. (2024). Magnesium alleviates growth inhibition under low potassium by enhancing photosynthesis and carbon-nitrogen metabolism in apple plants. *Plant Physiology And Biochemistry*, 214, 108875. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2024.108875>
- Quispe-Matos, K. R., Carbajal-Llosa, C. M., Mejia-Maita, S. Y., Llerena-Arroyo, R. A., Solórzano-Acosta, R. A., y Cruz-Luis, J. A. (2025). *Variación espacial de la fertilidad del suelo en la EEA Canaán*. Instituto Nacional de Innovación Agraria. <http://hdl.handle.net/20.500.12955/2852>
- R Core Team. (2018). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing.
- Rolando J, Turin C, Ramírez D, Mares V, Monerris J, y Quiroz, R. (2017) Key ecosystem services and ecological intensification of agriculture in the tropical high-Andean Puna as affected by land-use and climate changes. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 236, 221-233. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.12.010>

- Sarmiento, L., y Bottner, P. (2002) Carbon and nitrogen dynamics in two soils with different fallow times in the high tropical Andes: Indications for fertility restoration. *Applied Soil Ecology*, 19(1), 79-89. [https://doi.org/10.1016/S0929-1393\(01\)00178-0](https://doi.org/10.1016/S0929-1393(01)00178-0)
- 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>
- Wang, C., y Kuzyakov, Y. (2024). Soil organic matter priming: The pH effects. *Global Change Biology*, 30(6). <https://doi.org/10.1111/gcb.17349>
- Yang, M., Zhou, D., Hang, H., Chen, S., Liu, H., Su, J., Lv, H., Jia, H. y Zhao, G. (2024). Effects of balancing exchangeable cations Ca, Mg, and K on the growth of tomato seedlings (*Solanum lycopersicum* L.) based on increased soil cation exchange capacity. *Agronomy*, 14(3), 1-13. <https://doi.org/10.3390/agronomy14030629>
- Zhang, G. Q. (1999). *Effects of exchangeable soil calcium, magnesium and calcium/magnesium ratios on plant nutrition and growth of lettuce on an ultisol* [Thesis submitted to obtain the degree of Master of Science in Agronomy and Soil Science]. University of Hawai'i at Manoa. <https://scholarspace.manoa.hawaii.edu/items/8a99ab1e-dcd5-4822-9889-c99836d9526a>

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



Ver nuestro alcance
de acreditación



Ver nuestros servicios



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



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

ISBN: 978-9972-44-272-8



PERÚ

Ministerio
de Desarrollo Agrario
y Riego

inia

Instituto
Nacional de
Innovación
Agraria



@INIAPeru