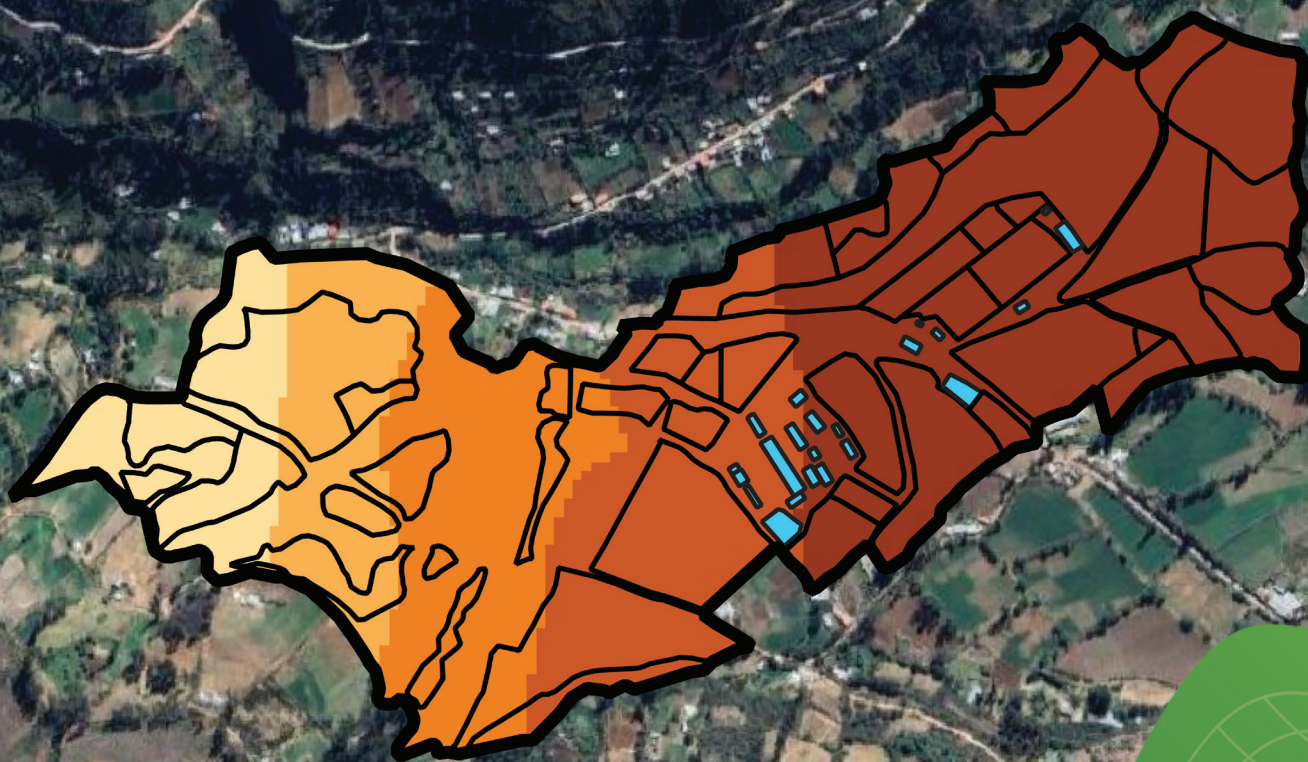


Variación espacial de la fertilidad del suelo en la EEA Chumbibamba



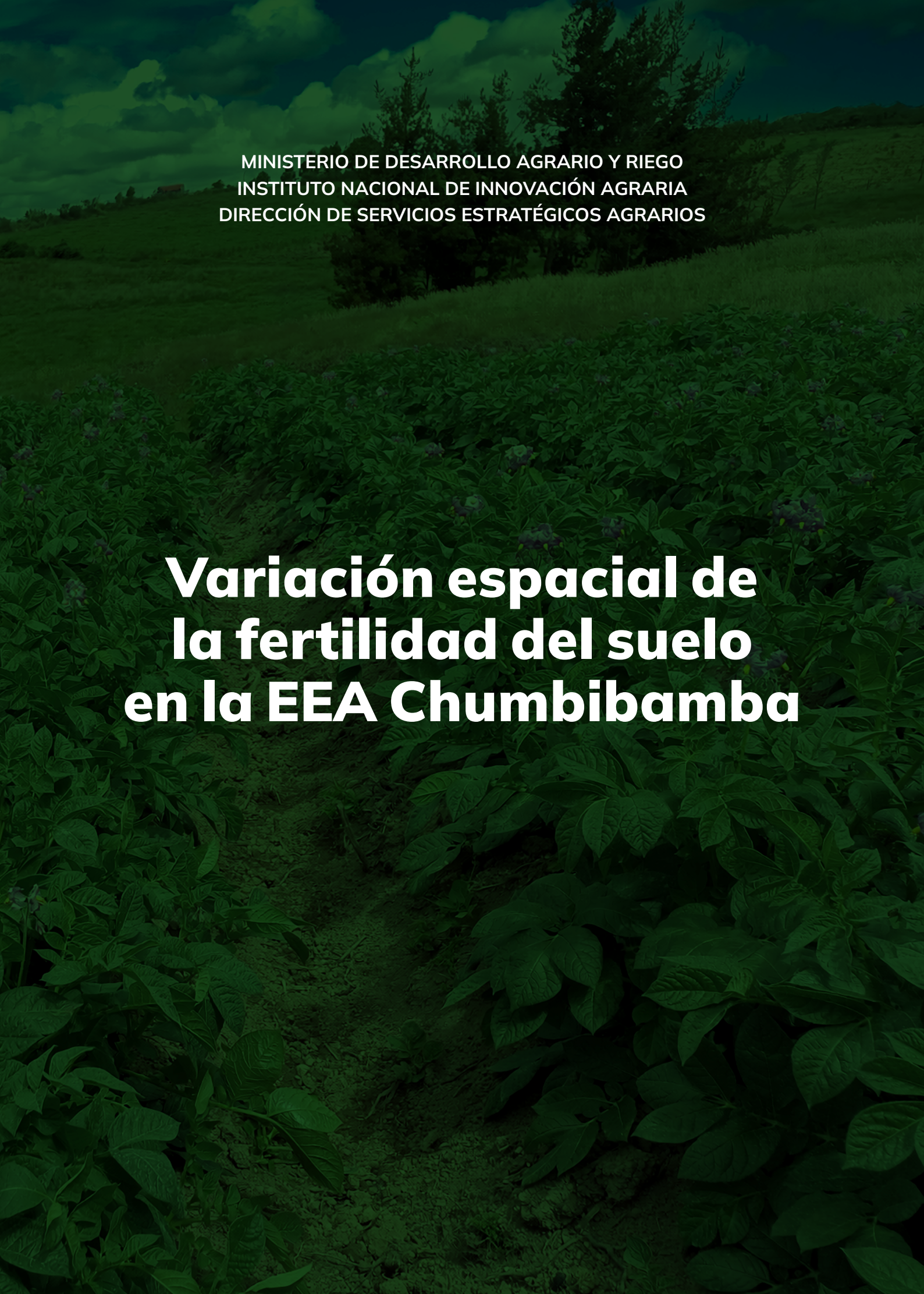
PERÚ

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 Chumbibamba



PERÚ

Ministerio
de Desarrollo Agrario
y Riego

inia

Instituto
Nacional de
Innovación
Agraria

VARIACIÓN ESPACIAL DE LA FERTILIDAD DEL SUELO EN LA EEA CHUMBIBAMBA

MINISTERIO DE DESARROLLO AGRARIO Y RIEGO

Ministro de Desarrollo Agrario y Riego

Marco Antonio Vinelli Ruiz

Viceministro de Políticas y Supervisión del Desarrollo Agrario

Manuel Felipe Layseca Ortigas

Viceministro de Desarrollo de Agricultura Familiar e Infraestructura Agraria y Riego

José Angello Tangherlini Casal

Presidente Ejecutivo del Instituto Nacional de Innovación Agraria

Christian Alfredo Barrantes Bravo, Dr.

© Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA)

Primera edición digital:

Septiembre, 2026

Publicado:

Septiembre, 2026

Disponible en:

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

ISBN:

978-9972-44-277-3

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° 2026-10843

Autores: Kenyi R. Quispe-Matos, Carlos M. Carbajal-Llosa, Sharon Y. Mejia-Maita, Esthefany I. Gavino-Lulo, Bruno A. Gamarra-Tambine, Ruddy A. Ore-Valeriano, Rodolfo J. Chuchon-Remon, Larry V. Juarez-Mendoza, 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 Chumbibamba	25
3.1. Ubicación	25
3.2. Muestreo estratificado del suelo	26
3.2.1. Determinación de los puntos de muestreo	27
3.2.2. Muestreo de suelos en los puntos identificados	28
3.3. Análisis de suelos	29
3.4. Resultados de los análisis de suelos	30
3.5. Geoestadística: metodología para el mapeo de las propiedades del suelo	32
3.6. Análisis de autocorrelación espacial: cómputo del índice de Moran	33
3.7. Interpolación <i>kriging</i> y validación cruzada con indicadores geoestadísticos	33
3.7.1. Generación y ajuste del variograma	33
3.7.2. Interpolación <i>kriging</i>	33
3.7.3. Validación cruzada	34
3.8. Resultados del análisis geoestadístico de las propiedades fisicoquímicas del suelo	35
3.9. Mapeo digital de las propiedades del suelo	37
4. Recomendaciones de manejo de la fertilidad del suelo en la EEA Chumbibamba	57
4.1. Índice de saturación de bases catiónicas	57
4.1.1. Variación espacial de los desbalances iónicos con niveles deficitarios de K^+ y Mg^{2+}	57
4.1.2. Variación espacial de los desbalances iónicos con niveles elevados de carbonato de calcio y calcio intercambiable	58
4.2. Niveles de suficiencia de nutrientes disponibles	61
4.2.1. Cálculos del requerimiento de fertilización fosforada según los criterios de mantenimiento y construcción para el maíz morado	61
4.2.2. Cálculos del requerimiento de fertilización potásica según el criterio de suficiencia para el maíz morado	63
5. Referencias bibliográficas	65



Presentación

El Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA) es un organismo técnico especializado adscrito al Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego (MIDAGRI), que desarrolla investigación, transferencia de tecnología, asistencia técnica, conservación y puesta en valor de recursos genéticos, la extensión agropecuaria y producción de semillas, 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 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 Estación Experimental Agraria Chumbibamba (EEA Chumbibamba), ubicada en la región Apurímac, constituye un área estratégica para el análisis de las propiedades del suelo bajo condiciones de alta heterogeneidad ambiental. La variabilidad espacial de la fertilidad del suelo en estos sistemas productivos justifica la aplicación de herramientas de geoestadística, las cuales permiten cuantificar la dependencia espacial de variables como pH, materia orgánica y nutrientes disponibles, mediante el uso de semivariogramas e interpolación espacial. Este enfoque facilita la generación de mapas temáticos que evidencian la distribución de la fertilidad a nivel de campo, permitiendo identificar zonas con requerimientos diferenciados de manejo. En consecuencia, los resultados obtenidos en esta estación contribuyen a optimizar la toma de decisiones en fertilización, promoviendo un uso más eficiente de insumos agrícolas, la reducción de pérdidas por lixiviación y una mejora sostenida de la productividad.

El presente manual, “Variación espacial de la fertilidad del suelo en la EEA Chumbibamba”, 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 del estado del suelo, para facilitar la toma de decisiones sobre la fertilización, el manejo del cultivo y el uso del terreno, favoreciendo una producción más eficiente y sostenible.

Dr. Christian Alfredo Barrantes Bravo

Presidente Ejecutivo

Instituto Nacional de Innovación Agraria



1. Introducción

La degradación del suelo en las regiones tropicales constituye una de las principales amenazas para la sostenibilidad de la agricultura y la seguridad alimentaria. En la región andina, este problema se ve agravado por prácticas de manejo inadecuadas, como el sobrepastoreo y otras actividades agrícolas que aceleran el deterioro de los recursos edáficos (de Valença et al., 2017). Históricamente, los agricultores andinos han empleado estrategias tradicionales de conservación y manejo del suelo, tales como el barbecho, la construcción de terrazas y la rotación de cultivos, las cuales han permitido mantener la productividad agrícola durante siglos (Rolando et al., 2017). No obstante, en las últimas décadas, la creciente demanda de alimentos, la reducción de las áreas aptas para el cultivo y la disminución de la fertilidad de los suelos han impulsado una intensificación de las actividades agrícolas. Como consecuencia, se han acortado los periodos de barbecho (Sarmiento y Bottner, 2002) y se ha incrementado la dependencia de fertilizantes inorgánicos con el fin de sostener o aumentar los rendimientos agrícolas (Pestalozzi, 2000). Estos cambios en el uso y manejo de la tierra, junto con los efectos del cambio climático, han contribuido significativamente en acelerar los procesos de degradación del suelo en los ecosistemas andinos (de Valença et al., 2017).

En la región de Apurímac, la agricultura constituye una de las actividades económicas más importantes, destacando el cultivo de papa, maíz, chirimoya, palto, entre otros productos agrícolas. Sin embargo, de acuerdo con el Censo Agropecuario de 1972, la superficie de tierras destinadas a la actividad agrícola se ha reducido considerablemente, llegando a disminuir casi a la mitad. En contraste, se ha registrado un incremento de aproximadamente 7,20 % en las tierras no agrícolas. Esta situación estaría asociada a procesos de sobreexplotación de los recursos naturales, los cuales han provocado la degradación de la cobertura vegetal y del suelo (Gobierno Regional Apurímac, 2008).

Frente a la creciente degradación de los suelos en la región de Apurímac, y con el propósito de evitar que prácticas como la sobrefertilización agraven esta problemática, resulta indispensable evaluar y monitorear la variabilidad de sus propiedades fisicoquímicas. Para ello, se dispone actualmente de herramientas tecnológicas como los sistemas de posicionamiento global (GPS), la teledetección y los sistemas de información geográfica (SIG), que permiten georreferenciar, recopilar y analizar información del suelo de manera rápida y eficiente. Estas tecnologías facilitan la elaboración de mapas detallados que reflejan la variabilidad espacial de las propiedades edáficas, contribuyendo a una gestión más precisa de las áreas agrícolas. Además, la aplicación de técnicas de interpolación espacial, como el kriging, en combinación con los SIG, permite identificar zonas críticas de degradación, mejorar la toma de decisiones sobre fertilización y orientar estrategias de recuperación y conservación de los suelos (Culman et al., 2021; Chinea-Horta y Rodríguez-Izquierdo, 2021).

En este contexto, el presente manual tiene el objetivo de integrar la interpretación de análisis de suelo con herramientas geoestadísticas para evaluar la variabilidad espacial de la fertilidad edáfica en la EEA Chumbibamba. Con este propósito, se elaboran mapas temáticos georreferenciados de las propiedades fisicoquímicas del suelo, los cuales facilitan la toma de decisiones para su manejo sostenible. Finalmente, se plantean recomendaciones específicas para cada zona, basadas en los resultados obtenidos mediante el análisis geoestadístico.



2. Principios fundamentales del análisis de suelos

2.1. Sistemas de interpretación del análisis de suelos

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

2.1.1. Índice de saturación de bases catiónicas

a. Concepto

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

b. Origen y aplicabilidad del concepto

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

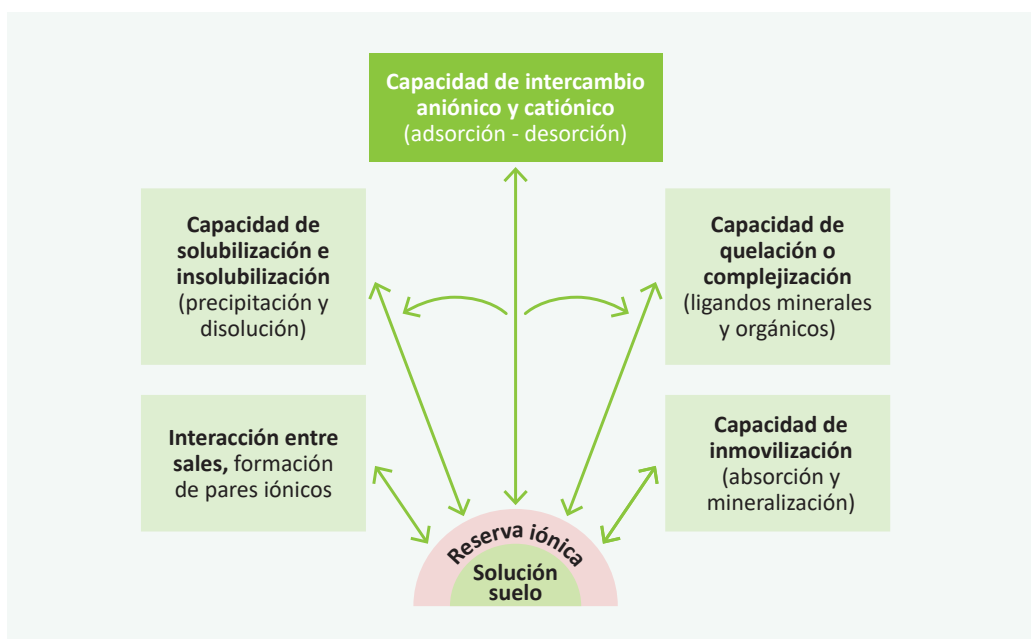


Figura 1. Mecanismos que mantienen en equilibrio los iones en la solución suelo (adaptado de McLean, 1977)

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

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

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

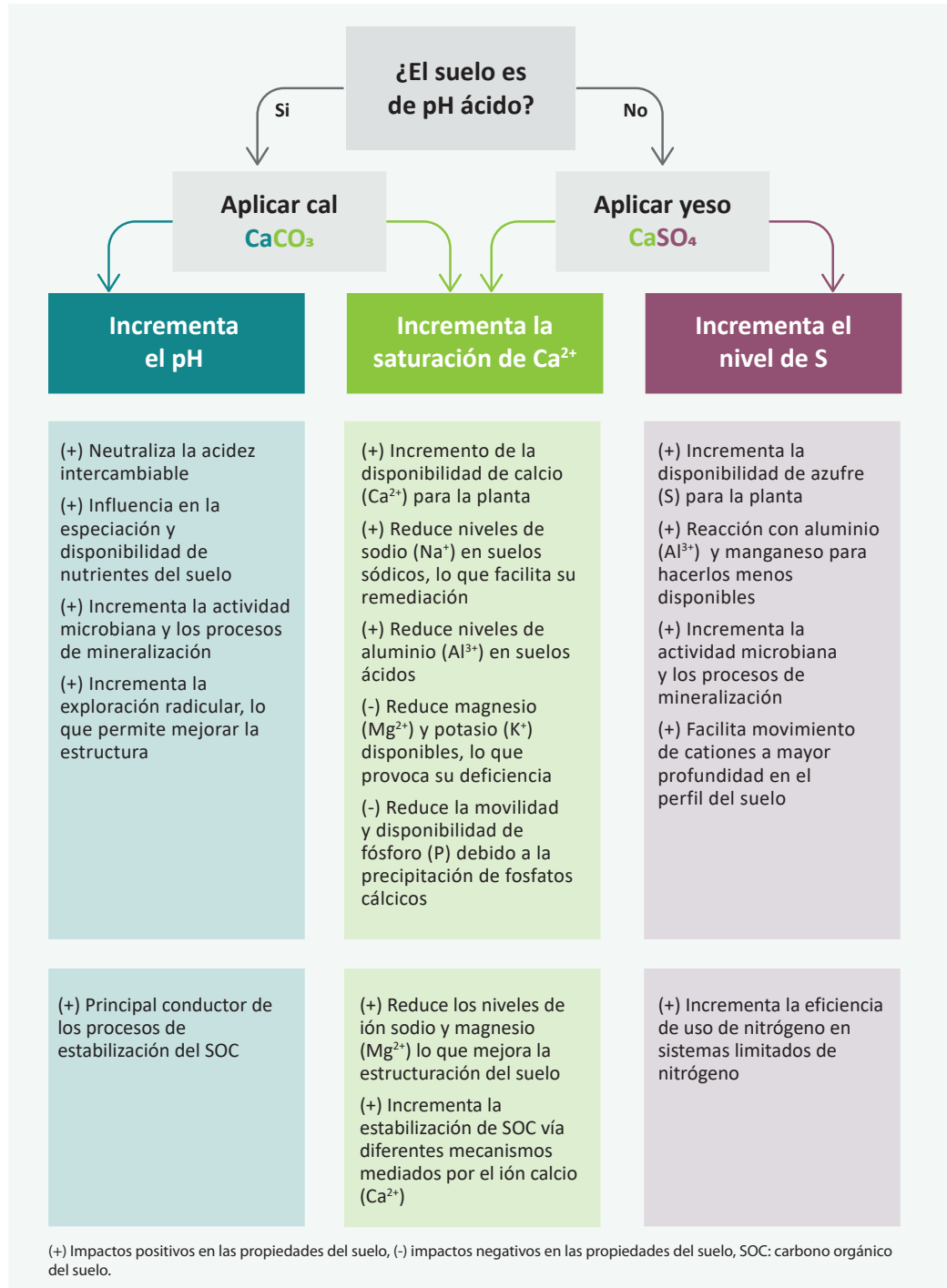


Figura 2. Criterios para el uso de la cal y el yeso, y su respuesta en la relación de saturación de cationes básicos (adaptado de Culman et al., 2021)

2.1.2. Sistema de suficiencia de nutrientes

a. Concepto

El sistema de suficiencia de nutrientes (SLAN, por sus siglas en inglés) se basa en una expresión matemática general de la Ley de rendimientos decrecientes, según la cual el aumento del rendimiento de un cultivo por unidad de nutriente disponible disminuye a medida que el nivel de nutriente disponible se acerca al nivel de suficiencia o umbral crítico (McLean, 1977). Aunque este modelo posee una base científica ampliamente aceptada, también ha sido objeto de críticas debido a que no incorpora de manera directa las interacciones entre nutrientes ni las limitaciones físicas y estructurales del suelo. A pesar de las limitaciones, el SLAN continúa siendo una herramienta esencial para la evaluación e interpretación de análisis de suelos. Su aplicación en el diagnóstico de la fertilidad comprende tres etapas principales: correlación, calibración e interpretación de los resultados de los análisis de suelos (Quispe-Matos et al., 2025), las cuales se presentan en la Figura 3.

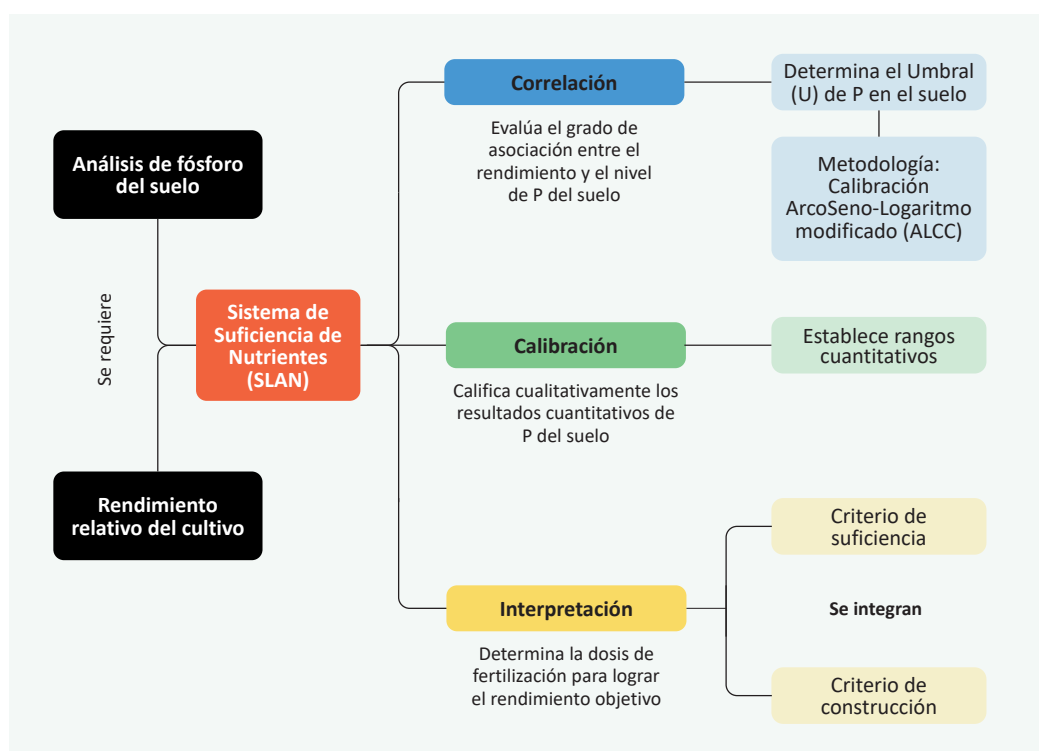


Figura 3. Esquema modelo para la implementación del sistema de suficiencia de nutrientes para el fósforo del suelo

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

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

b. Aplicación del criterio de suficiencia

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

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

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

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

Ejemplo práctico:

Se realizó un análisis de suelo en un cultivo de maíz morado, y se obtuvo 12 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 15 mg de P-Olsen por kg de suelo y el rendimiento potencial es de 5,2 t ha⁻¹. El análisis de correlación y calibración indica que el nivel obtenido de 12 mg de P-Olsen por kg de suelo permite obtener un rendimiento relativo (RR) del 80 %.

Primer paso: calcular el rendimiento alcanzado con 12 mg de P-Olsen por kg de suelo utilizando la Fórmula 2:

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

$$\text{Rendimiento alcanzado} = \frac{80 \times 5,2 \text{ t ha}^{-1}}{100} = 4,16 \text{ t ha}^{-1}$$

Este resultado indica que el nivel actual de P (12 mg kg⁻¹) está por debajo del umbral crítico (15 mg kg⁻¹), lo que limita el rendimiento a solo el 80 % del potencial, 4,16 t ha⁻¹ en lugar de 5,2 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.

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

$$\text{Incremento de raíces y brotes} = 0,35 \times 4,16 \text{ t ha}^{-1} = 1,46 \text{ t ha}^{-1}$$

Además de las 4,16 t ha⁻¹ de producción, el cultivo genera 1,46 t ha⁻¹ de biomasa en raíces y brotes, lo que debe considerarse en el balance nutricional

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

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

$$\text{Rendimiento objetivo} = 4,16 \text{ t ha}^{-1} + 1,46 \text{ t ha}^{-1} = 5,62 \text{ t ha}^{-1}$$

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

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

$$\text{Requerimiento de P} = 1,06 \text{ kg de P t}^{-1} \times 5,62 \text{ t ha}^{-1} = 5,96 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

A partir de estos resultados, se interpreta que el criterio de suficiencia estima un requerimiento de 5,96 kg de P ha⁻¹ para alcanzar un rendimiento objetivo de 5,62 t ha⁻¹, el cual está conformado por 1,46 t ha⁻¹ de biomasa radicular y vegetativa, y 4,16 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 al criterio de construcción, este se aplica cuando el nutriente se encuentra en niveles muy bajos en el suelo, con el objetivo de incrementar progresivamente su concentración hasta alcanzar valores cercanos al nivel crítico, asegurando así una fertilidad sostenida en el tiempo. Alternativamente, el criterio de construcción se puede aplicar para complementar los requerimientos de nutrientes estimados para la fertilización de suficiencia y mantenimiento (García y Ciampitti, 2010).

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

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

A continuación, se presentarán ejemplos prácticos en el cultivo de maíz morado 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 maíz morado, y se obtuvo 9 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 15 mg de P-Olsen por kg de suelo y el rendimiento potencial es de 5,2 t ha⁻¹. El análisis de correlación y calibración indica que el nivel obtenido de 9 mg de P-Olsen por kg de suelo permite obtener un rendimiento relativo (RR) del 50 %.

Primer paso: calcular el rendimiento alcanzado con 9 mg de P-Olsen por kg de suelo, utilizando la Fórmula 2:

$$\text{Rendimiento alcanzado} = \frac{50 \times 5,2 \text{ t ha}^{-1}}{100} = 2,6 \text{ t ha}^{-1}$$

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.

$$\text{Incremento de raíces y brotes} = 0,35 \times 2,6 \text{ t ha}^{-1} = 0,91 \text{ t ha}^{-1}$$

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

$$\text{Rendimiento objetivo} = 2,6 \text{ t ha}^{-1} + 0,91 \text{ t ha}^{-1} = 3,51 \text{ t ha}^{-1}$$

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.

$$\text{Requerimiento de P} = 1,06 \text{ kg de P t}^{-1} \times 3,51 \text{ t ha}^{-1} = 3,72 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

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

$$\text{RM de P} = \frac{\text{Requerimiento de P}}{\text{Eficiencia de uso del P}} = 12,4 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

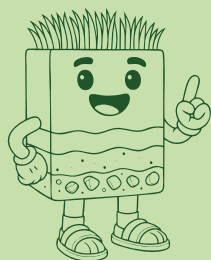
$$\text{RM de P} = \frac{\text{Requerimiento de P}}{\text{Eficiencia de uso del P}} \quad \dots(6)$$

$$\frac{3,72 \text{ kg de P ha}^{-1}}{0,3}$$

Ejemplo práctico (criterio de mantenimiento y construcción)

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

Para este cultivo, el umbral crítico o nivel de suficiencia es de 15 mg de P-Olsen por kg de suelo y el rendimiento potencial es de 5,2 t ha⁻¹. 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 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 5 mg de P-Olsen por kg de suelo, utilizando la Fórmula 2:

$$\text{Rendimiento alcanzado} = \frac{30 \times 5,2 \text{ t ha}^{-1}}{100} = 1,56 \text{ t ha}^{-1}$$

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

$$\text{Incremento de raíces y brotes} = 0,35 \times 1,56 \text{ t ha}^{-1} = 0,55 \text{ t ha}^{-1}$$

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

$$\text{Rendimiento objetivo} = 1,56 \text{ t ha}^{-1} + 0,55 \text{ t ha}^{-1} = 2,11 \text{ t ha}^{-1}$$

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.

$$\text{Requerimiento de P} = 1,06 \text{ kg de P t}^{-1} \times 2,11 \text{ t ha}^{-1} = 2,24 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

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

$$\text{RM de P} = \frac{2,24 \text{ kg de P ha}^{-1}}{0,20} = 11,2 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

Sexto paso: calcular el requerimiento de construcción anual (RC) usando la Fórmula 7. Para este cálculo y con fines prácticos se considera que es necesario fertilizar con 9 kg de P por hectárea para incrementar 1 mg de P por kg del suelo, a lo cual se denomina necesidad de construcción de fertilidad (NCF), y que el incremento anual requerido (IAR) en este ejemplo es de 1,5 mg de P por kg de suelo.

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

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

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

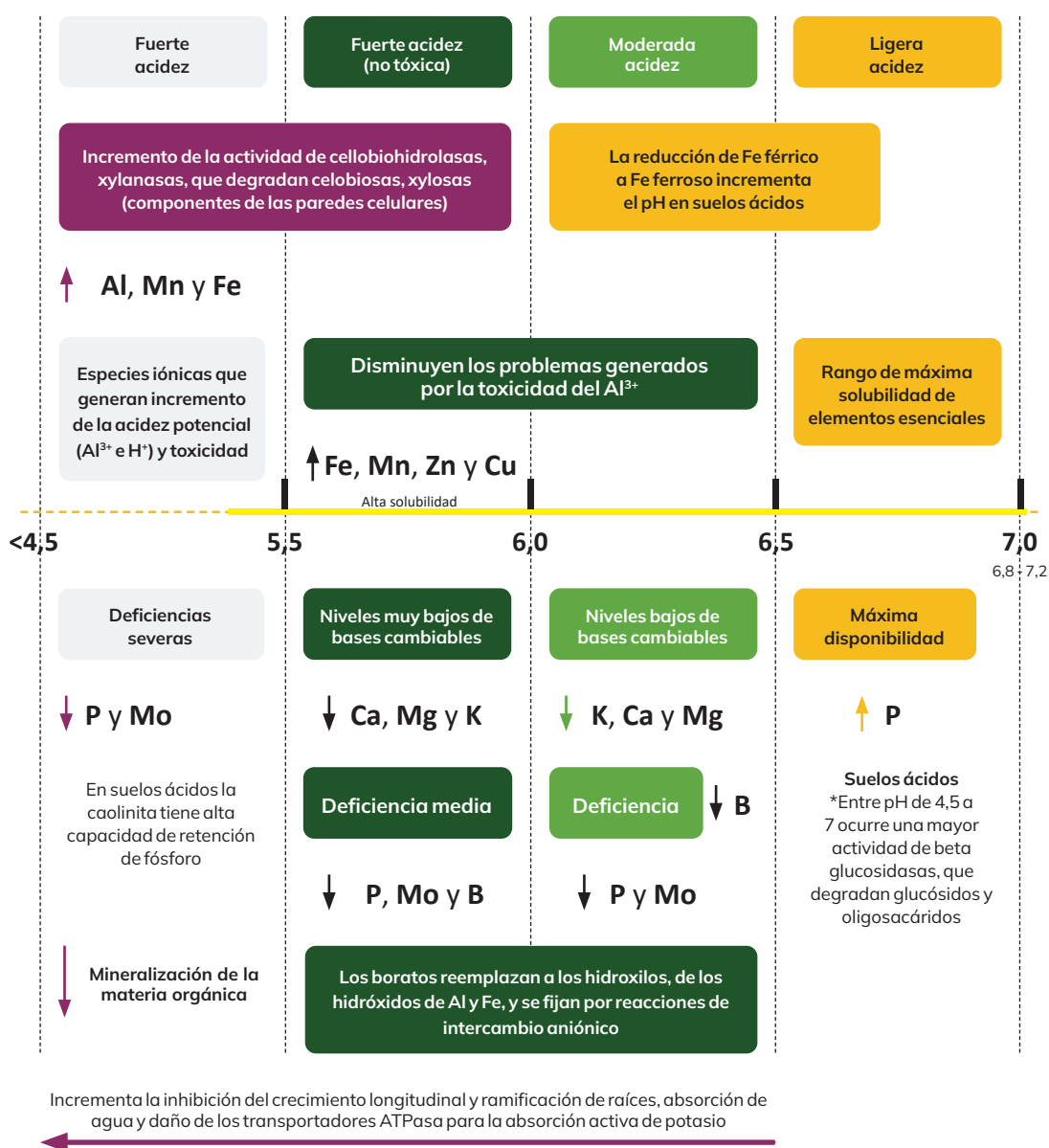
$$\text{Dosis de fertilización de P} = RM + RC \quad \dots(8)$$

$$\text{Dosis de fertilización P} = 11,2 \text{ kg de P ha}^{-1} + 13,5 \text{ kg de P ha}^{-1} = 24,7 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

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

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

Por estos motivos, es considerada una variable maestra dentro del análisis, debido a que afecta a una amplia gama de propiedades y procesos del suelo. En la Figura 4 se 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).



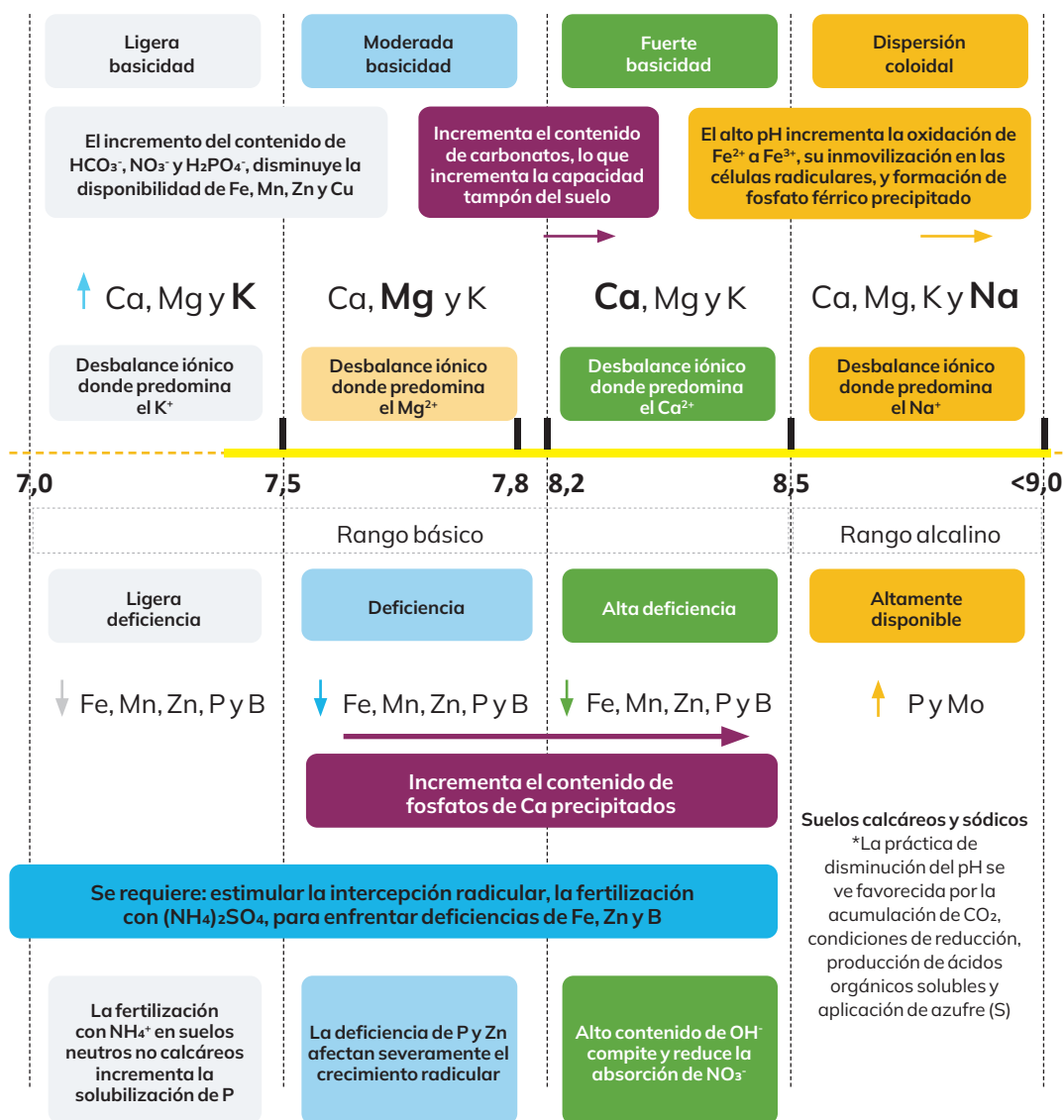


Figura 4. Diagnóstico de la fertilidad del suelo en función al pH

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 Chumbibamba

3.1. Ubicación

La EEA Chumbibamba se localiza en el distrito de Talavera, provincia de Andahuaylas, departamento de Apurímac (Figura 5), con una superficie total de 47,56 ha. Además, se ubica a 2832 m s. n. m. en la región natural Quechua, con una precipitación promedio máxima de 1000 mm/año y temperatura media anual entre 12 °C y 17 °C (Cruz-Luis et al., 2025). De manera general, la provincia de Talavera presenta una litología constituida por calizas detríticas, cuarciarenitas grises calcáreas, areniscas finas de color gris violáceo y de arcillas verdes y violáceas con fuerte proporción de cristales de yeso (Salazar-Gutiérrez, 2016).

En la estación se realizan trabajos de investigación, valoración, conservación, producción de material genético de plantas y animales, además de brindar asistencias técnicas y otros servicios a los agricultores de la región de Apurimac. Los cultivos priorizados para estas actividades son: maíz amiláceo (*Zea mays* L.), maíz morado (*Zea mays* L.), avena (*Avena sativa* L.), kiwicha (*Amaranthus caudatus*), quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.)

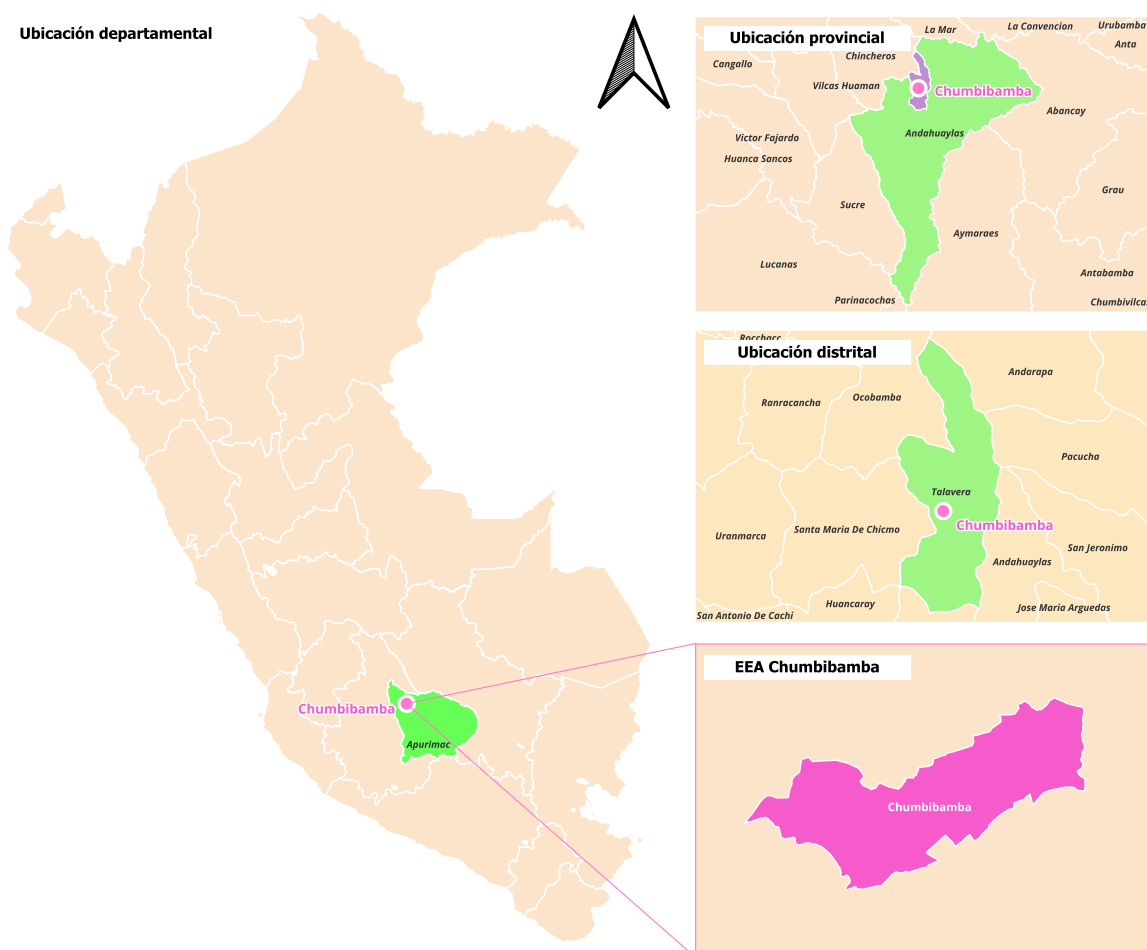


Figura 5. Ubicación de la EEA Chumbibamba

3.2. Muestreo estratificado del suelo

Para lograr una representación espacial robusta de las condiciones edáficas en la EEA Chumbibamba, se implementó un esquema de muestreo estratificado basado en unidades de cobertura previamente delimitadas mediante el análisis de imágenes satelitales. Este diseño permite disminuir la variabilidad dentro de cada estrato y mejorar la representatividad de las muestras frente a la heterogeneidad espacial del área de estudio. La estratificación previa favorece una caracterización más precisa de las propiedades del suelo relevantes para su manejo, en el marco de un sistema integral de evaluación de la fertilidad. El procedimiento integró técnicas de clasificación no supervisada y métodos de muestreo probabilístico espacial, apoyados en herramientas de análisis geoespacial y estadística computacional. A continuación, se describen los procedimientos empleados para la definición y recolección de los puntos de muestreo (Figura 6).

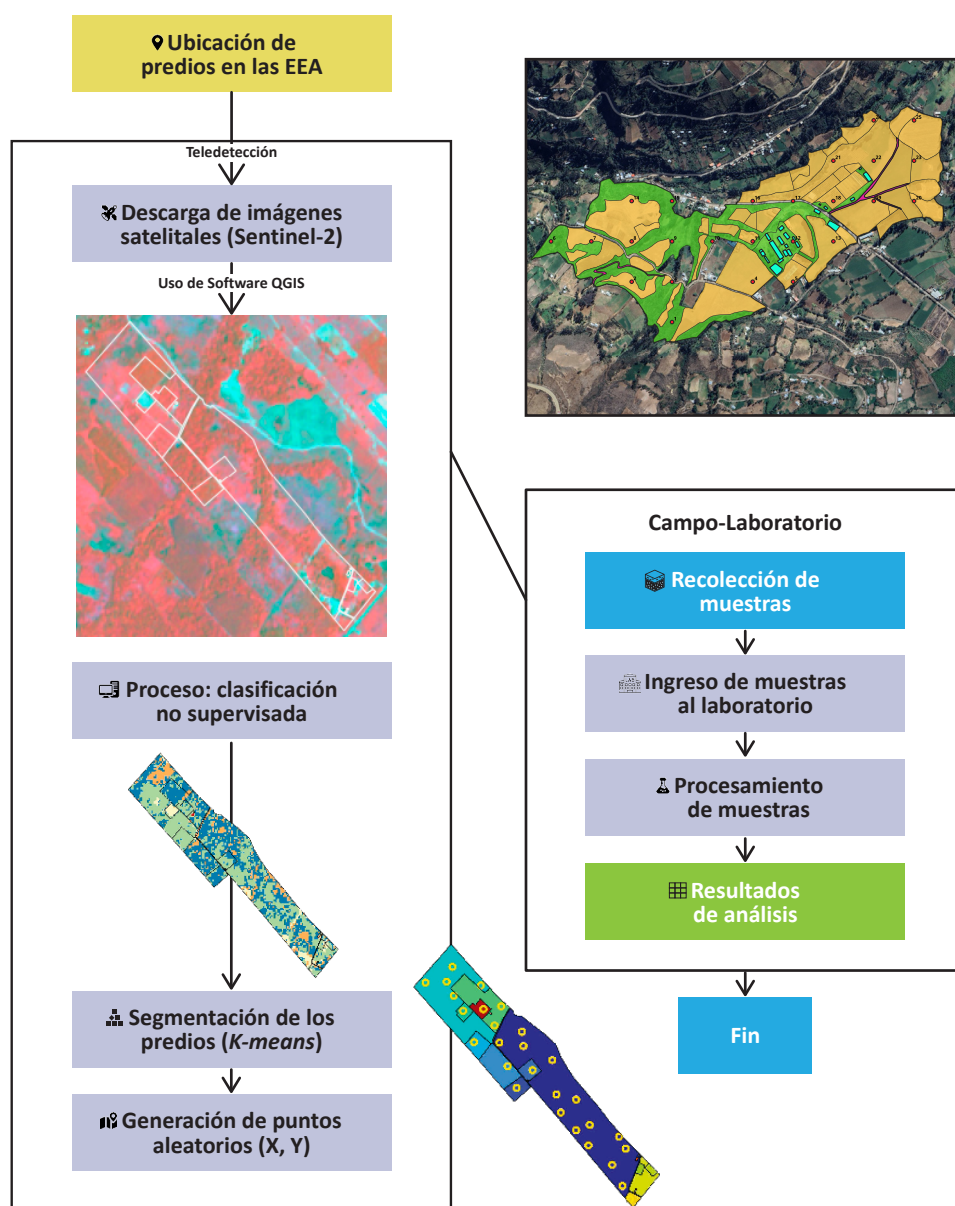


Figura 6. Flujo de trabajo para la determinación de los puntos de muestreo

3.2.1. Determinación de los puntos de muestreo

El primer paso para la determinación de los puntos de muestreo fue la descarga de las imágenes satelitales del servidor de Sentinel-2 para identificar las clases de cobertura, utilizando el algoritmo de clasificación no supervisada *K-means*. Luego, se usó el software R (R Core Team, 2018) para determinar los puntos de muestreo utilizando la función *spsample* del paquete *sp* (Pebesma y Bivand, 2005) (Figura 6). El *script* R generó las coordenadas de los puntos de muestreo según cada clase determinada, mediante el método de muestreo estratificado. Se identificaron en total 25 puntos de muestreo de suelos, como se observa en la Figura 7.

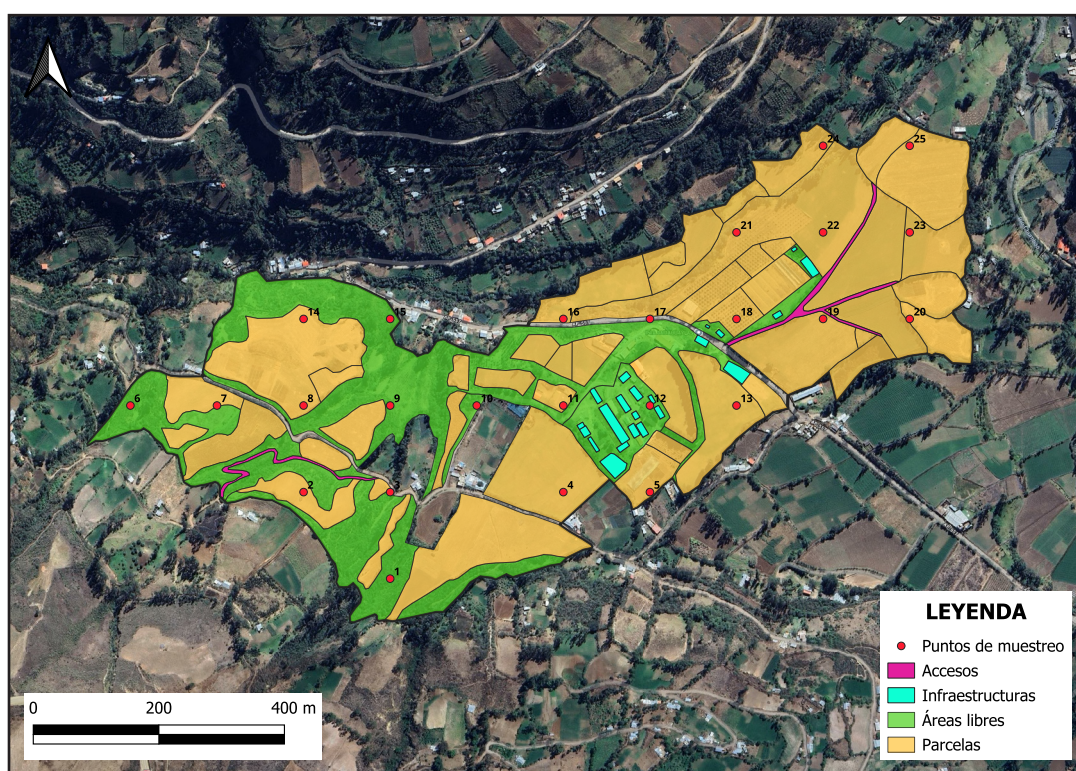


Figura 7. Puntos de muestreo de suelos en la EEA Chumbibamba

3.2.2. Muestreo de suelos en los puntos identificados

Una vez identificadas las coordenadas de los 25 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 aproximadamente 30 cm de profundidad y 20 × 20 cm de área.
- Tomar la muestra de la pared del hoyo. La “rebanada” debe tener de 2 a 3 cm de grosor y entre 20 a 40 cm de largo.
- Eliminar los residuos de los bordes de la pala para evitar contaminación.
- Depositar la muestra en un balde o contenedor.
- Desterronar la muestra y eliminar raíces, restos orgánicos u otros contaminantes.
- Tomar una porción aproximada de 1 kg en dos bolsas de plástico, y entre estas colocar la cartilla de identificación.



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

3.3. Análisis de suelos

Una vez recolectadas, las muestras de suelo fueron trasladadas a un laboratorio especializado en análisis edafológicos, priorizando el uso de metodologías estandarizadas. En el presente estudio, el procesamiento se llevó a cabo en el laboratorio de la EEA Canaán, donde se ejecutaron los procedimientos analíticos correspondientes. Como etapa inicial, las muestras fueron sometidas a un pretratamiento de secado a 35 °C durante 48 horas. Posteriormente, se realizaron los análisis fisicoquímicos conforme a los métodos descritos en la Tabla 1.

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

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

Según los datos presentados en la Tabla 2, los suelos de la EEA Chumbibamba se caracterizan por un predominio de fracciones gruesas y una baja variabilidad entre las muestras ($CV = 10,26 \%$), lo que evidencia una composición relativamente homogénea. Esta condición indica una mayor presencia de materiales arenosos (contenido promedio de arena = $40,53 \%$), asociados a una rápida infiltración del agua y una menor capacidad de retención hídrica. En contraste, la menor proporción de fracciones finas sugiere una capacidad limitada para la retención de nutrientes y agua, aunque contribuye a una adecuada estabilidad estructural del suelo.

El pH en promedio (media = $7,87$) es ligeramente alcalino, con presencia de niveles de carbonatos muy variables espacialmente. Estas condiciones pueden reducir la solubilidad y disponibilidad de micronutrientes esenciales, como hierro (Fe), zinc (Zn), manganeso (Mn), cobre (Cu) y boro (B), especialmente en los sectores con mayor alcalinidad. Como consecuencia, pueden presentarse deficiencias nutricionales manifestadas por síntomas de clorosis en los cultivos, por lo que se recomienda implementar un manejo nutricional adecuado para prevenir o corregir estos efectos.

La conductividad eléctrica (media = $0,79 \text{ dS m}^{-1}$) evidencia, en términos generales, niveles bajos de salinidad, por lo que no se prevén restricciones significativas para el desarrollo de los cultivos. Sin embargo, en sectores puntuales donde los valores superan 1 dS/m , podrían presentarse efectos adversos sobre la germinación y el establecimiento de especies sensibles a las sales.

El contenido promedio de materia orgánica ($2,25 \%$) se clasifica como medio, lo que favorece la capacidad del suelo para suministrar nitrógeno, contribuir a la estabilidad de los agregados y amortiguar las variaciones químicas, desempeñando un papel importante en el mantenimiento de la fertilidad y calidad del suelo. Asimismo, la capacidad de intercambio catiónico presenta valores moderados (media = $27,77 \text{ cmol kg}^{-1}$), sustentados por una elevada saturación de bases, con predominio del calcio intercambiable. Esta condición es característica de suelos calcáreos con buena fertilidad química; sin embargo, el mantenimiento o incremento del contenido de materia orgánica mediante la incorporación de enmiendas orgánicas resulta fundamental para mejorar la capacidad de retención de nutrientes, la estructura del suelo y su productividad a largo plazo.

El contenido de carbonato de calcio (CaCO_3) presentó un valor promedio de $5,8 \%$, con un rango entre $1,9$ y $18,8 \%$ y un coeficiente de variación de $98,7 \%$, lo que evidencia una marcada heterogeneidad espacial. En general, estos valores corresponden a un suelo moderadamente calcáreo, aunque se identificaron sectores puntuales con contenidos elevados, clasificados como muy calcáreos. Esta condición es consistente con el pH ligeramente alcalino registrado ($7,87$). La presencia de carbonatos contribuye a la estabilidad de la estructura del suelo; sin embargo, también puede reducir la disponibilidad de nutrientes, especialmente del fósforo y de micronutrientes como el hierro y el zinc, lo que puede afectar el desarrollo de cultivos sensibles (Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2026).

En términos de nutrientes disponibles, el fósforo disponible presenta alta variabilidad ($CV = 104,96 \%$), es decir, hay zonas con deficiencia que requieren atención localizada y otras zonas con suficiencia. En el caso del potasio, presentó una media de $239,2 \text{ mg kg}^{-1}$, con valores entre $166,4$ y $293,2 \text{ mg kg}^{-1}$ y un coeficiente de variación de $15,36 \%$, clasificado como baja variabilidad. Este resultado revela una distribución relativamente homogénea del K en el área de estudio, por lo que, las recomendaciones de fertilización potásica deben basarse en dosis de mantenimiento uniformes en el lote, orientadas a reponer la extracción del cultivo más que a corregir deficiencias localizadas.

Desde la perspectiva de la fertilidad del suelo, la estación requiere un enfoque de manejo por zonas, en el que el muestreo y la interpretación se realicen según unidades homogéneas previamente definidas. En este contexto, las principales acciones se orientan al incremento progresivo de la materia orgánica mediante la aplicación de compost, lo que contribuye a mejorar la estabilidad de la capacidad de intercambio catiónico. Para la corrección de zonas con alto porcentaje de carbonatos, además de enmiendas orgánicas, se recomienda el uso de quelatos y la incorporación de micorrizas.

Finalmente, es fundamental implementar un monitoreo periódico del suelo y del agua de riego, junto con análisis foliares en cultivos sensibles, como parte de un sistema de manejo adaptativo que permita pasar de recomendaciones generales a estrategias zonales más precisas, mejorando la eficiencia del uso de fertilizantes, reduciendo impactos ambientales y fortaleciendo la sostenibilidad de la producción en la EEA Chumbibamba.

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

Variable	Unidad	Media	SD	CV (%)	Mínimo	Mediana	Máximo	Skewness
Arena	%	40,53	4,16	10,26	34,69	40,69	50,69	1,2
Arcilla	%	27,02	4,02	14,86	16,74	26,74	31,74	-0,94
Limo	%	32,45	3,4	10,46	24,57	32,57	38,57	-0,01
pH	Unidad	7,87	0,21	2,61	7,5	7,8	8,2	0,06
CEe	dS m ⁻¹	0,79	0,16	20,82	0,45	0,8	1,28	0,53
CaCO ₃	%	5,8	5,72	98,67	1,9	2,7	18,8	1,25
MO	%	2,25	0,65	28,72	1,1	2,3	3,5	0
P disp.	mg kg ⁻¹	17,4	18,26	104,96	0,8	9,5	70	1,53
K disp.	mg kg ⁻¹	239,19	36,73	15,36	166,4	252	293,2	-0,53
Ca ²⁺	cmol kg ⁻¹	25,39	5,85	23,03	20,1	23,2	41	1,66
Mg ²⁺	cmol kg ⁻¹	1,76	0,44	25,01	0,97	1,9	2,3	-0,35
K ⁺	cmol kg ⁻¹	0,48	0,1	21,02	0,3	0,5	0,6	-0,37
Na ⁺	cmol kg ⁻¹	0,12	0,04	32,04	0,1	0,1	0,2	1,96
CICe	cmol kg ⁻¹	27,77	5,51	19,85	22,79	25,38	42,93	1,75
N total	%	0,12	0,03	27,36	0,06	0,12	0,18	0,09
PCI	%	90,99	2,79	3,07	87,25	90,21	96,23	0,56
PMI	%	6,72	2,34	34,82	2,71	7,32	9,74	-0,5
PPI	%	1,79	0,5	28,09	0,81	1,93	2,54	-0,53
PSI	%	0,42	0,13	31,1	0,27	0,4	0,84	2,56

SD: desviación estándar, *Skewness*: asimetría, CV: coeficiente de variación, 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, 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 físico-químicas del suelo

En la Tabla 3 se presentan los resultados del análisis geoestadístico de las propiedades del suelo en la EEA Chumbibamba, y evidencian una distribución espacial heterogénea que permite agrupar las variables de acuerdo con su nivel de predictibilidad. Esta diferenciación resulta fundamental para determinar su potencial aplicación en procesos de zonificación y en estrategias de manejo de precisión.

Entre las propiedades químicas evaluadas, el porcentaje de calcio intercambiable (PCI), el porcentaje de magnesio intercambiable (PMI) y el Mg^{2+} intercambiable mostraron el mejor desempeño geoestadístico. Estas variables se ajustaron a un modelo lineal, con rangos de dependencia espacial entre 300 y 500 m, y coeficientes de determinación (R^2) elevados (0,82; 0,74 y 0,76, respectivamente), lo que indica la presencia de una estructura espacial sólida y estable a la escala de la EEA Chumbibamba.

De manera complementaria, el N total ($R^2 = 0,54$), el $CaCO_3$ ($R^2 = 0,66$), materia orgánica ($R^2 = 0,48$), Ca^{2+} intercambiable ($R^2 = 0,46$), potasio disponible ($R^2 = 0,34$) y el pH (R^2 de 0,42) muestran también una estructura espacial moderada, con rangos amplios que permiten su interpolación directa y su utilización como variables modelo para la zonificación de la fertilidad.

En contraste, el fósforo disponible ($R^2 = 0,14$), fracciones texturales ($\leq 0,08$) y el Na^+ intercambiable ($R^2 = 0,02$) presentan una estructura espacial débil, lo que refleja una fuerte influencia del manejo y procesos locales. Estas variables no son adecuadas para *kriging* ordinario, pero pueden beneficiarse de enfoques de estimación indirecta que incorporen covariables con mayor predictibilidad espacial.

En este contexto, el análisis geoestadístico en la EEA Chumbibamba permite diferenciar dos usos técnicos complementarios: (a) el mapeo directo y la definición de zonas de manejo basadas en variables con estructura espacial robusta, como PCI, PMI y Mg^{2+} intercambiable y (b) la estimación indirecta de propiedades débilmente estructuradas mediante técnicas avanzadas, como regresión-*kriging* o co-*kriging* empleando covariables. Asimismo, la presencia de modelos del tipo *linear to sill* en varias variables, sugiere la coexistencia de tendencias regionales asociadas a gradientes edáficos y de manejo, lo que refuerza la conveniencia de aplicar *kriging* universal para capturar dichos patrones antes de la interpolación.

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

Variable	Modelo	Nugget (C _o)	Sill (C _o +C)	Range (m)	Cross-validation	
					RMSE	R ²
Arena	<i>Linear</i>	17,20	17,63	519,50	4,10	0,01
Arcilla	<i>Linear to Sill</i>	8,08	12,66	710,28	3,27	0,08
Limo	<i>Exponential</i>	14,19	10,49	353,70	3,50	0,08
pH	<i>Linear</i>	0,01	0,04	489,52	0,15	0,42
CEe	<i>Linear</i>	0,02	0,02	402,32	0,14	0,36
CaCO ₃	<i>Linear</i>	1,81	30,85	488,49	3,29	0,66
MO	<i>Spherical</i>	0,03	0,51	710,42	0,47	0,48
P disp.	<i>Linear</i>	214,14	241,85	710,00	15,57	0,14
K disp.	<i>Linear to Sill</i>	255,23	1823,71	710,42	29,88	0,34
Ca ⁺²	<i>Linear to Sill</i>	2,96	35,40	710,28	3,58	0,46
Mg ⁺²	<i>Linear</i>	0,00	0,20	497,02	0,21	0,76
K ⁺	<i>Linear</i>	0,00	0,01	486,50	0,09	0,24
Na ⁺	<i>Linear</i>	0,00	0,00	580,42	0,04	0,02
CICe	<i>Linear to Sill</i>	4,68	29,80	710,28	3,56	0,38
N total	<i>Linear to Sill</i>	0,00	0,001	580,23	0,02	0,54
PCI	<i>Linear</i>	0,00	8,36	511,77	1,17	0,82
PMI	<i>Linear</i>	0,00	3,43	297,51	1,17	0,74
PPI	<i>Linear</i>	0,00	0,28	493,91	0,34	0,55
PSI	<i>Exponential</i>	0,00	0,002	221,69	0,05	0,05

RMSE: raíz del error cuadrático medio, R²: coeficiente de determinación, CEe: conductividad eléctrica en extracto de saturación, MO: materia orgánica, N total: nitrógeno total, P disp.: fósforo disponible, K disp.: potasio disponible, CICe: capacidad de intercambio catiónico efectiva, PCI: porcentaje de calcio intercambiable, PMI: porcentaje de magnesio intercambiable, PPI: porcentaje de potasio intercambiable, PSI: porcentaje de sodio intercambiable

3.9. Mapeo digital de las propiedades del suelo

Los mapas generados para la EEA Chumbibamba (Figuras 9-25) reflejan la marcada heterogeneidad espacial de las propiedades físicas y químicas del suelo, con implicancias directas en la fertilidad y en el manejo de los cultivos en la estación.

En términos texturales, las fracciones de arena y arcilla presentaron estructuras espaciales definidas, con amplias zonas de influencia reflejadas en rangos de 519,50 y 710,28 m, respectivamente. Sin embargo, los bajos valores de R^2 obtenidos en el ajuste de los modelos indican una capacidad predictiva limitada, lo que dificulta la delimitación de unidades de manejo relativamente homogéneas y restringe su utilidad para la zonificación del área de estudio.

El pH presenta una distribución espacial incipiente, con valores que oscilan principalmente entre ligeramente a moderadamente alcalinos. El patrón observado sugiere sectores relativamente estables desde el punto de vista químico, donde la disponibilidad de nutrientes puede optimizarse mediante enmiendas específicas. En las zonas con pH más elevado existe mayor contenido de carbonatos, por lo que es importante monitorear la disponibilidad de micronutrientes como hierro y zinc, que son limitados en condiciones alcalinas.

La conductividad eléctrica del extracto de saturación (CEe) presentó un valor medio de 0,79 dS m^{-1} , con un rango de 0,45 a 1,28 dS m^{-1} y un coeficiente de variación de 20,82 %. Estos valores corresponden a suelos no salinos, sin restricciones relevantes para el desarrollo de la mayoría de los cultivos. El mapa permitió distinguir un gradiente espacial suave, desde sectores con muy baja salinidad (0,45–0,75 dS m^{-1}) hasta zonas con niveles ligeramente superiores (0,79–1,28 dS m^{-1}), que, si bien se mantienen por debajo del umbral de 2 dS m^{-1} , señalan áreas donde debería vigilarse el manejo del riego y drenaje para prevenir procesos de salinización en el largo plazo.

En relación con la fertilidad, el contenido de carbonatos constituye un indicador robusto ($R^2 = 0,66$ y rango = 488,49 m), con mapas que permiten ubicar áreas de alta acumulación frente a otras deficitarias, abriendo la posibilidad de implementar esquemas de fertilización variable. En cambio, el fósforo disponible tiene baja estructura espacial ($R^2 = 0,14$), lo que revela una fuerte heterogeneidad y confirma la necesidad de un muestreo intensivo o de estrategias de manejo más generalizadas. En el caso de la materia orgánica, mostró una amplia continuidad espacial pero limitada predictibilidad, lo que refuerza la importancia de aplicar prácticas sistemáticas de incorporación de residuos y abonos verdes a escala predial.

Las bases intercambiables presentaron comportamientos contrastantes: mientras Ca^{2+} y Mg^{2+} revelan estructuras espaciales claras y confiables, K^+ y Na^+ mostraron patrones débiles o poco estables con un ajuste bajo, lo que restringe su uso cartográfico como variables principales. Los mapas de Ca^{2+} y Mg^{2+} permitieron delimitar zonas con niveles medios (20–30 cmol kg^{-1} de Ca y 1,2–1,8 cmol kg^{-1} de Mg) y sectores con contenidos más altos (> 30 cmol kg^{-1} de Ca y > 2,0 cmol kg^{-1} de Mg), que constituyen ambientes edáficos diferenciados útiles para ajustar prácticas de enclado, selección de cultivos y manejo de fertilización de bases.

La saturación de cationes intercambiables (PCI, PMI y PPI) arrojaron ajustes estadísticos sólidos, lo que respalda su inclusión como indicadores sintéticos en la evaluación y manejo del recurso suelo en la estación con el enfoque BSCR.

Desde el punto de vista agronómico, los mapas de la EEA Chumbibamba constituyen una herramienta estratégica para la definición de unidades de manejo basadas en variables de alta confiabilidad (PCI, PMI y Mg^{2+} intercambiable, $CaCO_3$). Las variables con menor predictibilidad (arena, arcilla, limo, fósforo disponible, sodio intercambiable, y PSI) deben complementarse con muestreo más denso o el uso de covariables proximales. Este enfoque permite orientar la implementación de prácticas de manejo sitio-específico, incluyendo la fertilización diferenciada, el control de la salinidad y la sodicidad, así como estrategias para la conservación y el incremento del carbono edáfico, contribuyendo a optimizar la productividad de los cultivos y promover la sostenibilidad de los sistemas agrícolas en los predios experimentales de la estación.

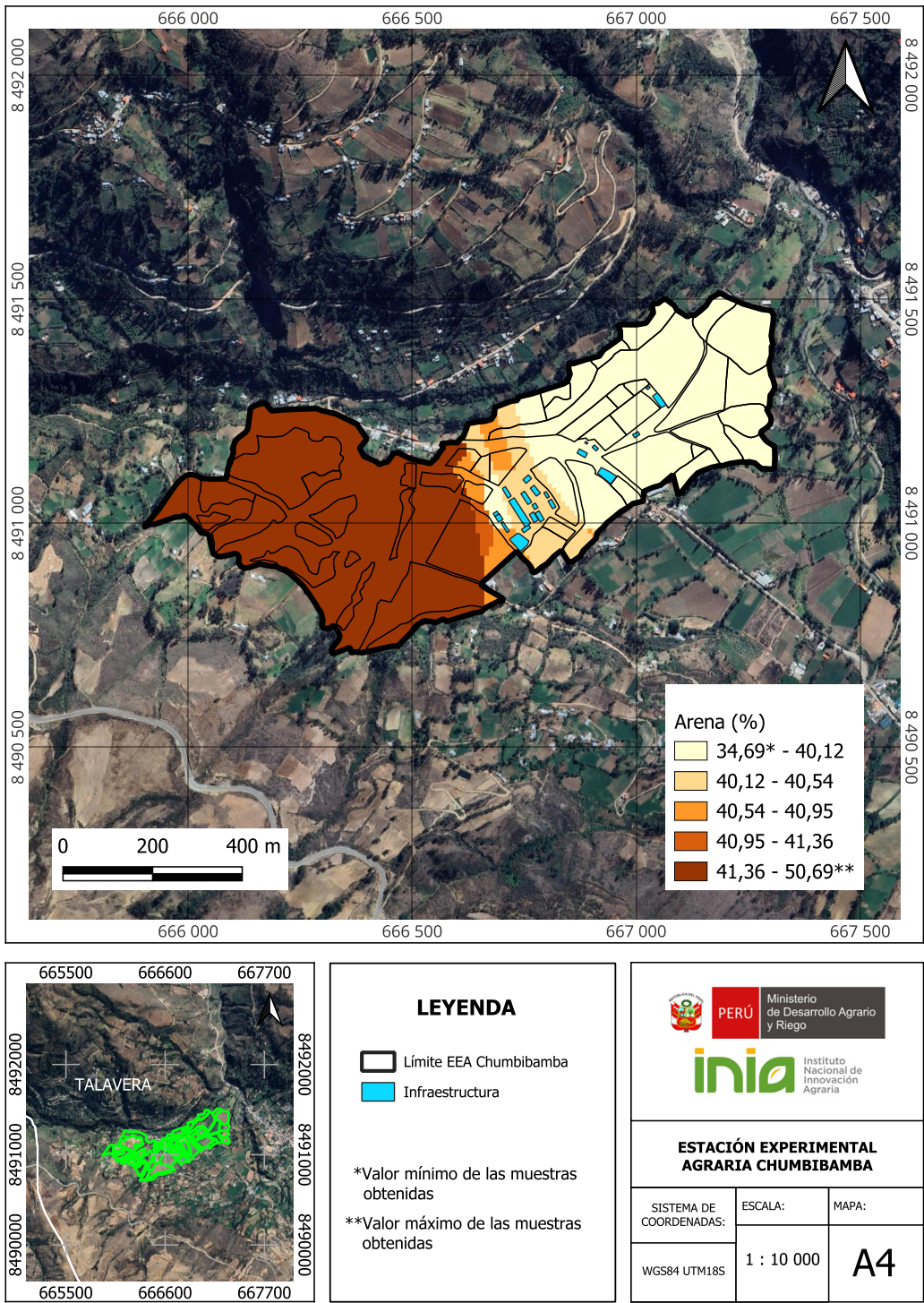


Figura 9. Mapa de variación espacial del porcentaje de arena

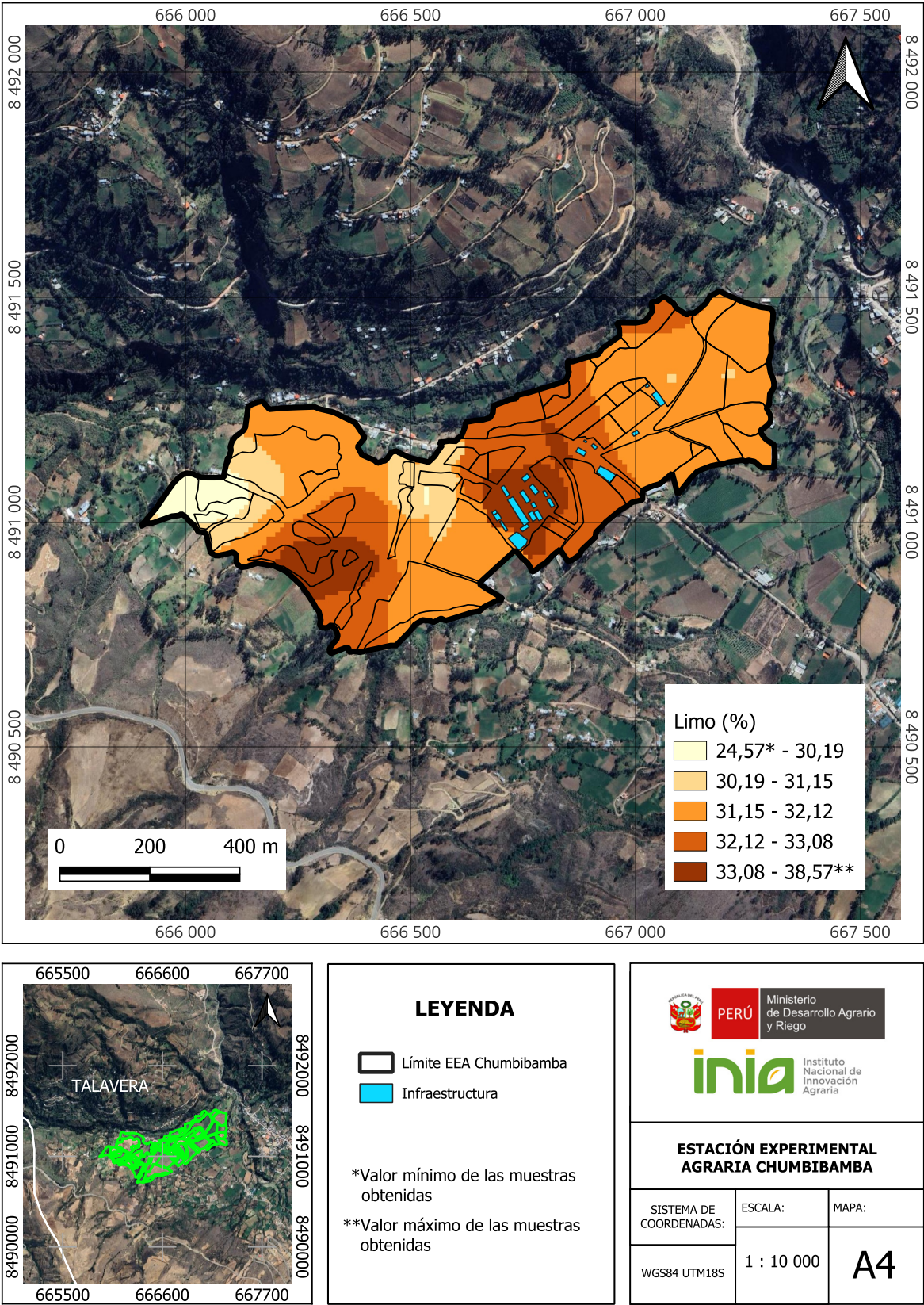


Figura 10. Mapa de variación espacial del porcentaje de limo

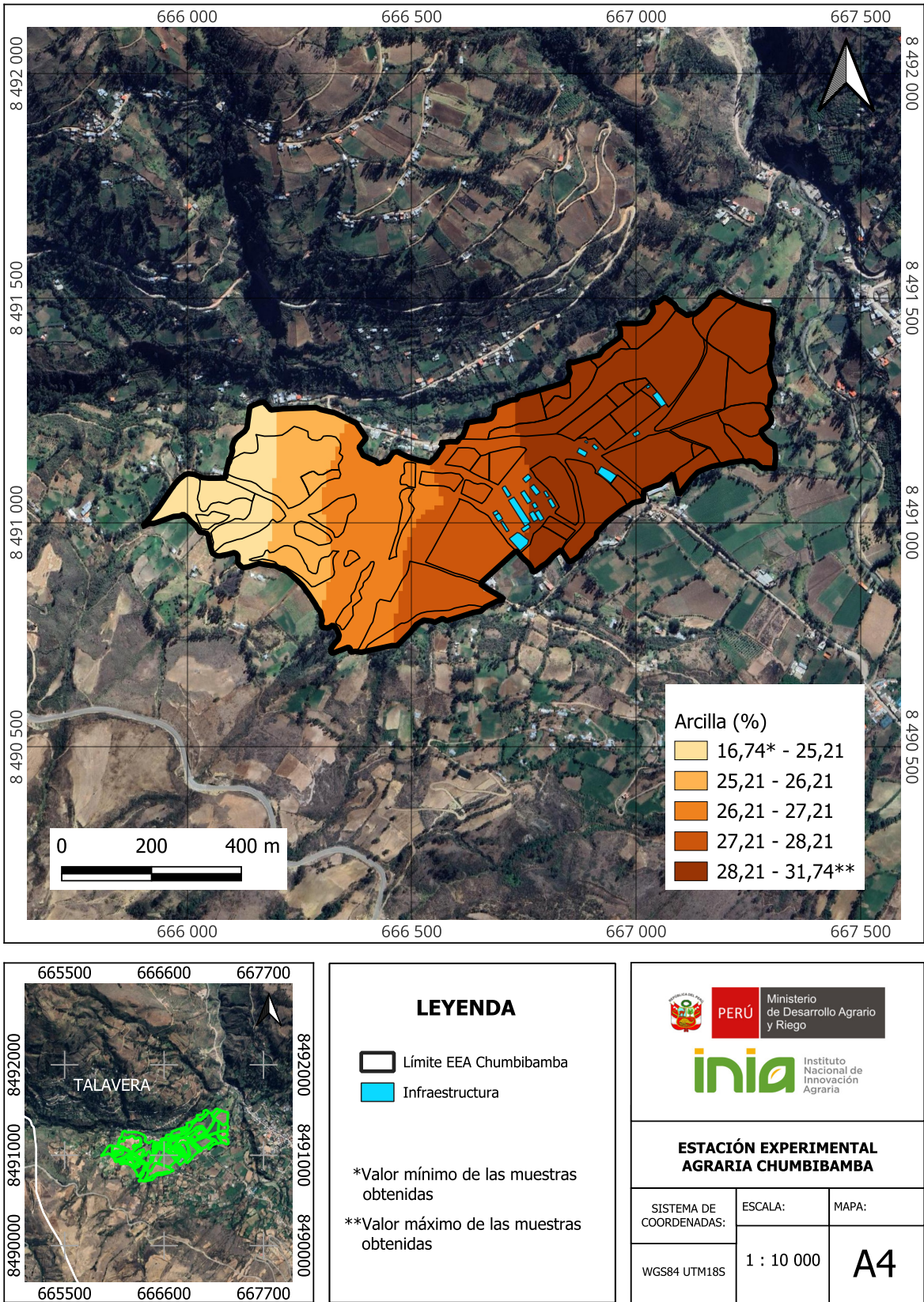


Figura 11. Mapa de variación espacial del porcentaje de arcilla

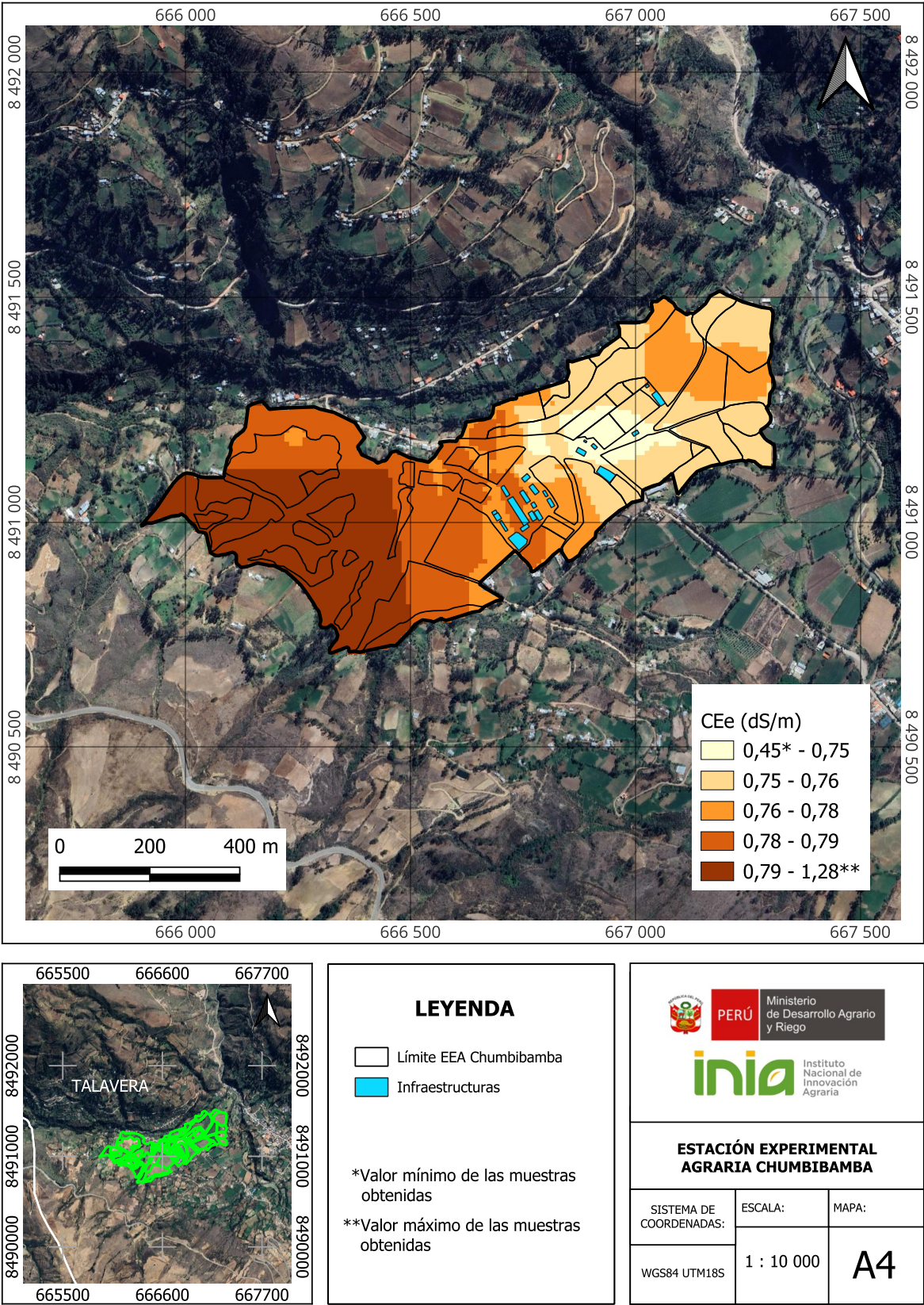


Figura 12. Mapa de variación espacial de la conductividad eléctrica en extracto de saturación

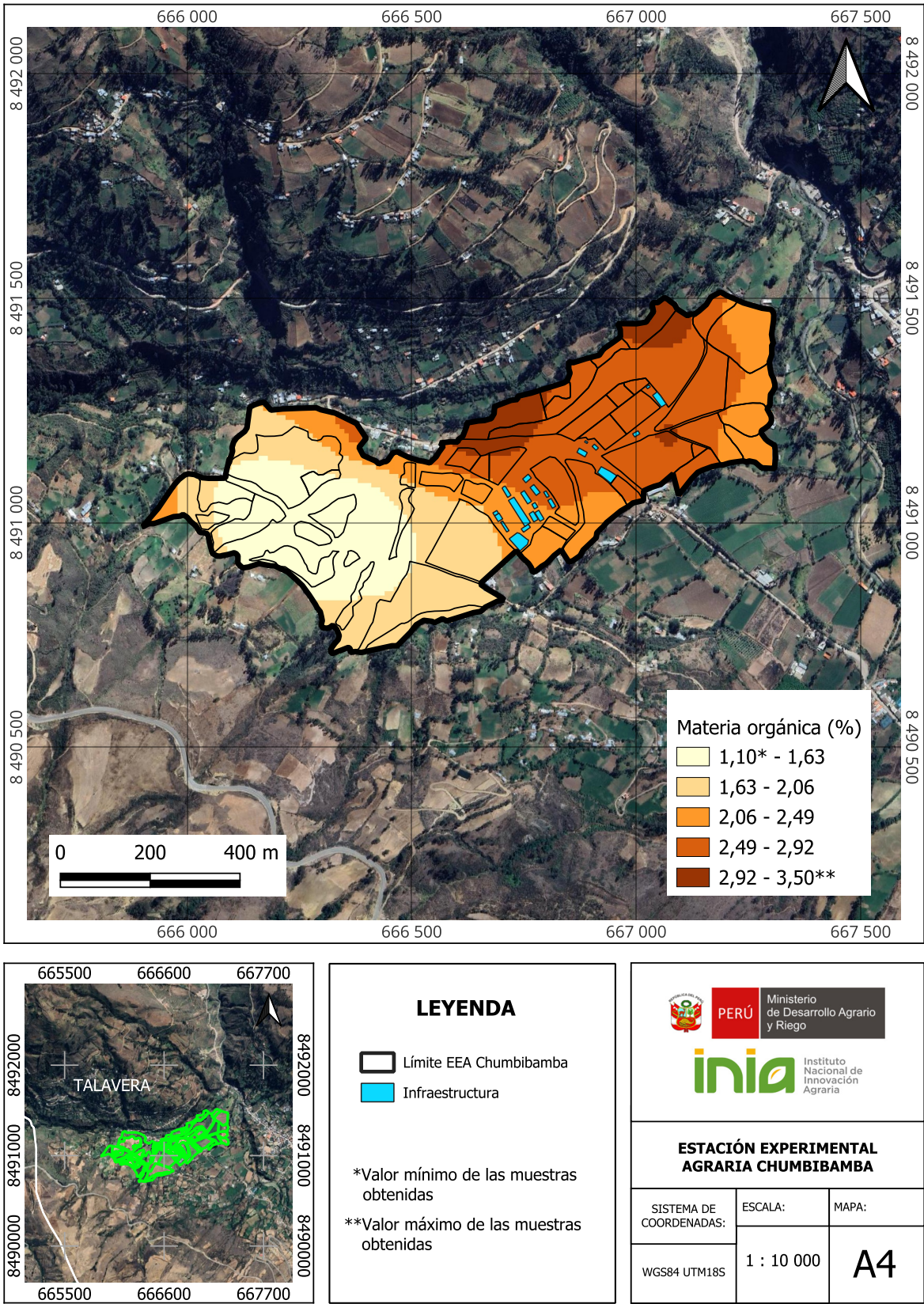


Figura 13. Mapa de variación espacial del porcentaje de materia orgánica

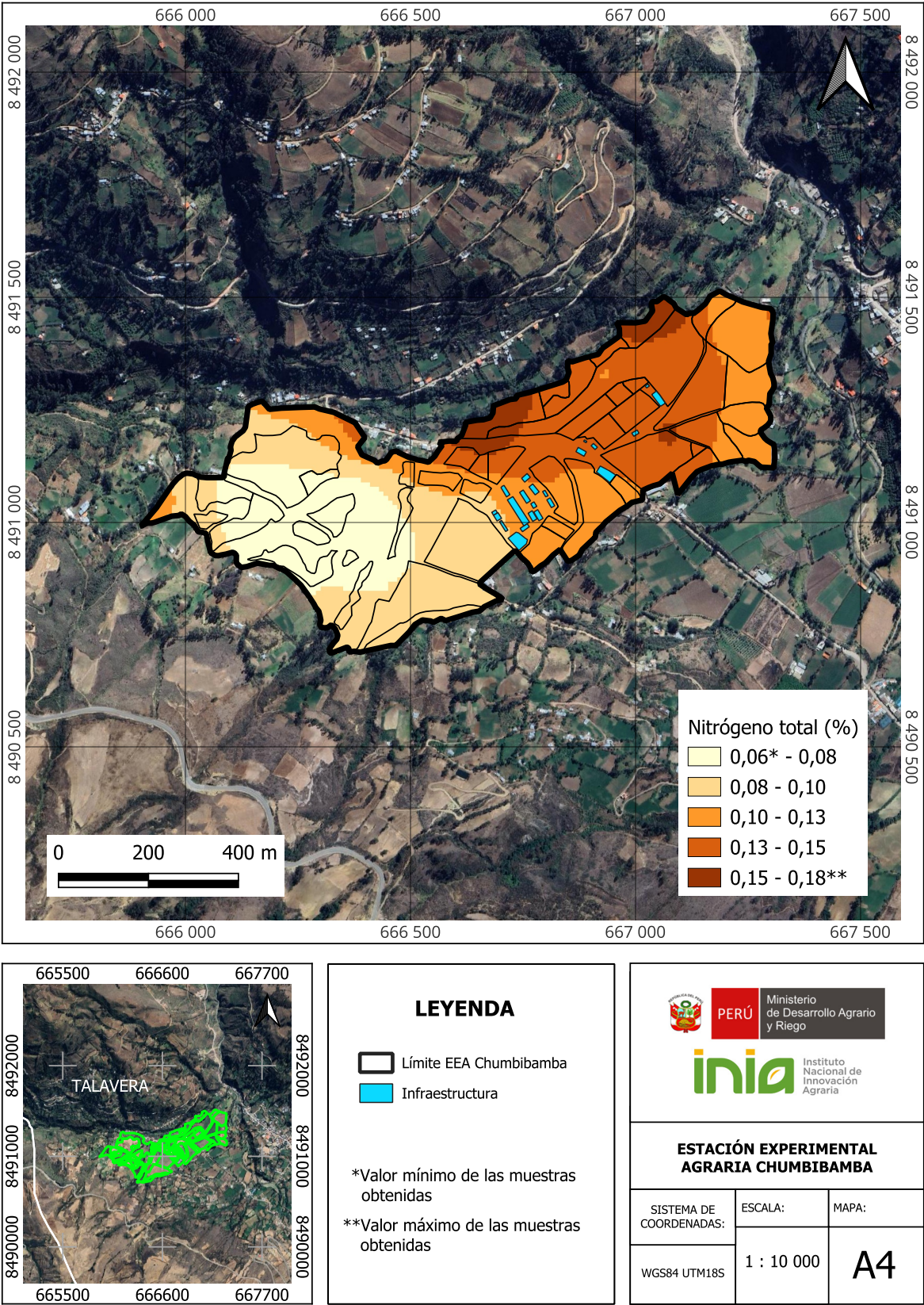


Figura 14. Mapa de variación espacial del porcentaje de nitrógeno total

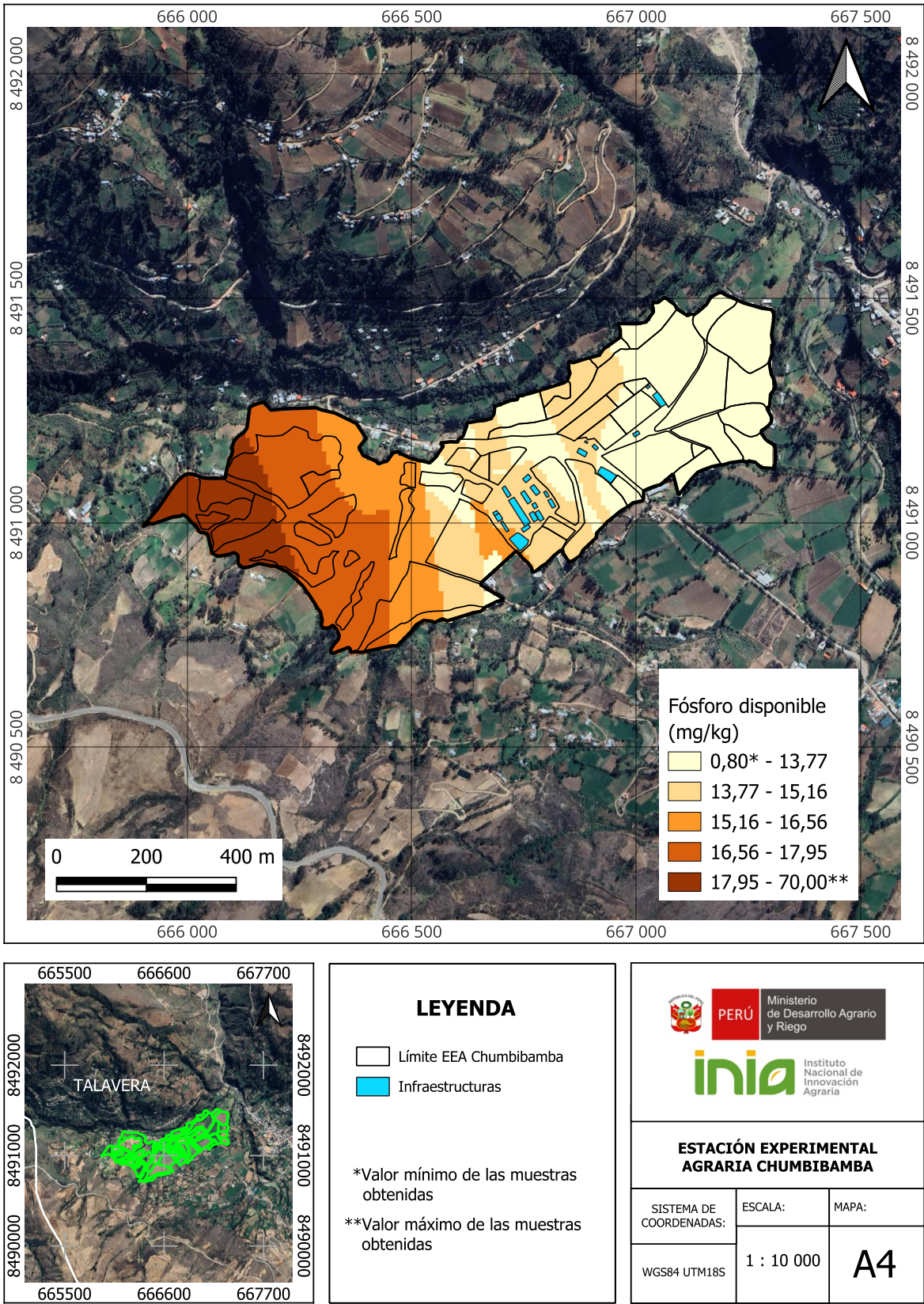


Figura 15. Mapa de variación espacial del fósforo disponible

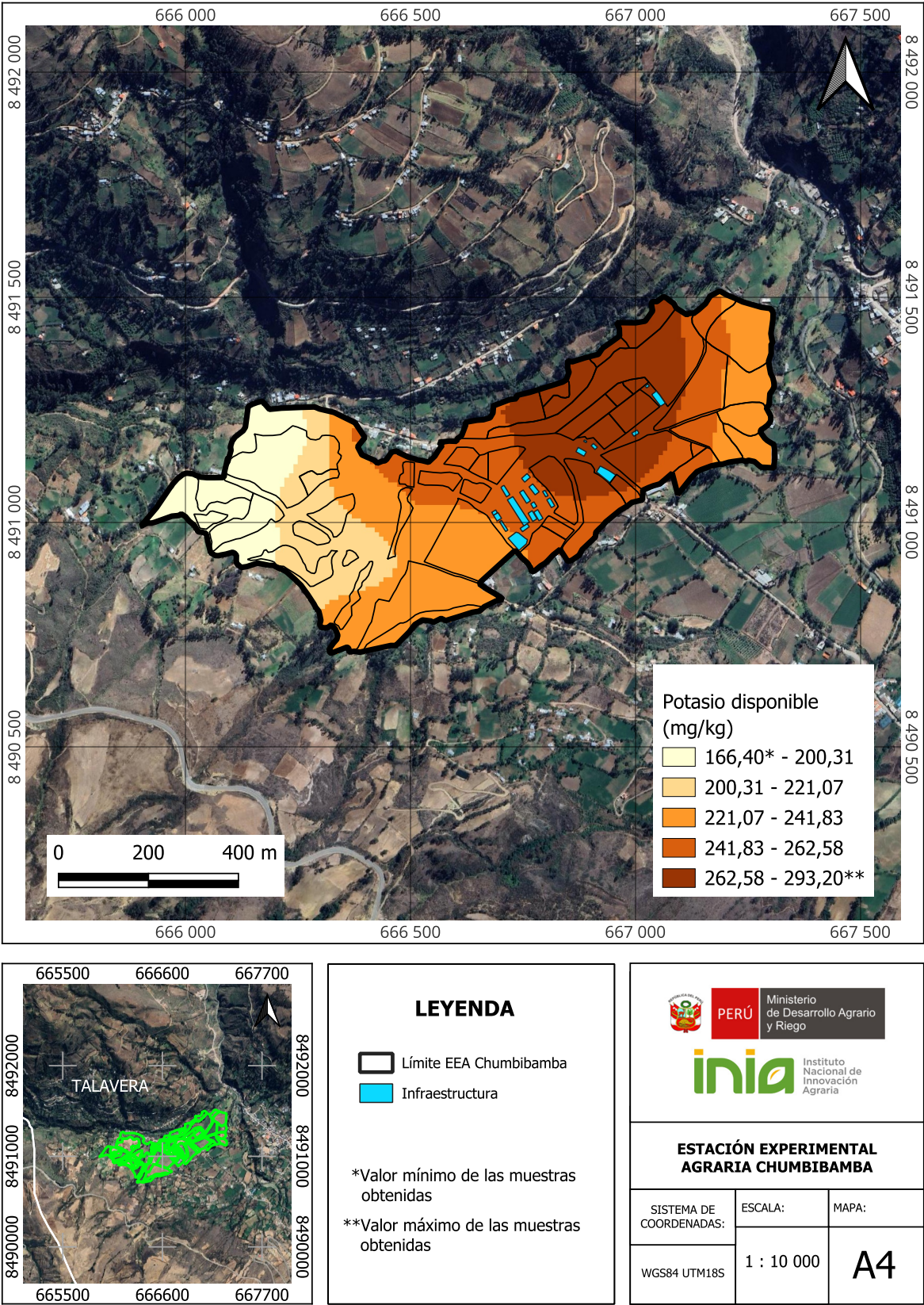


Figura 16. Mapa de variación espacial del potasio disponible

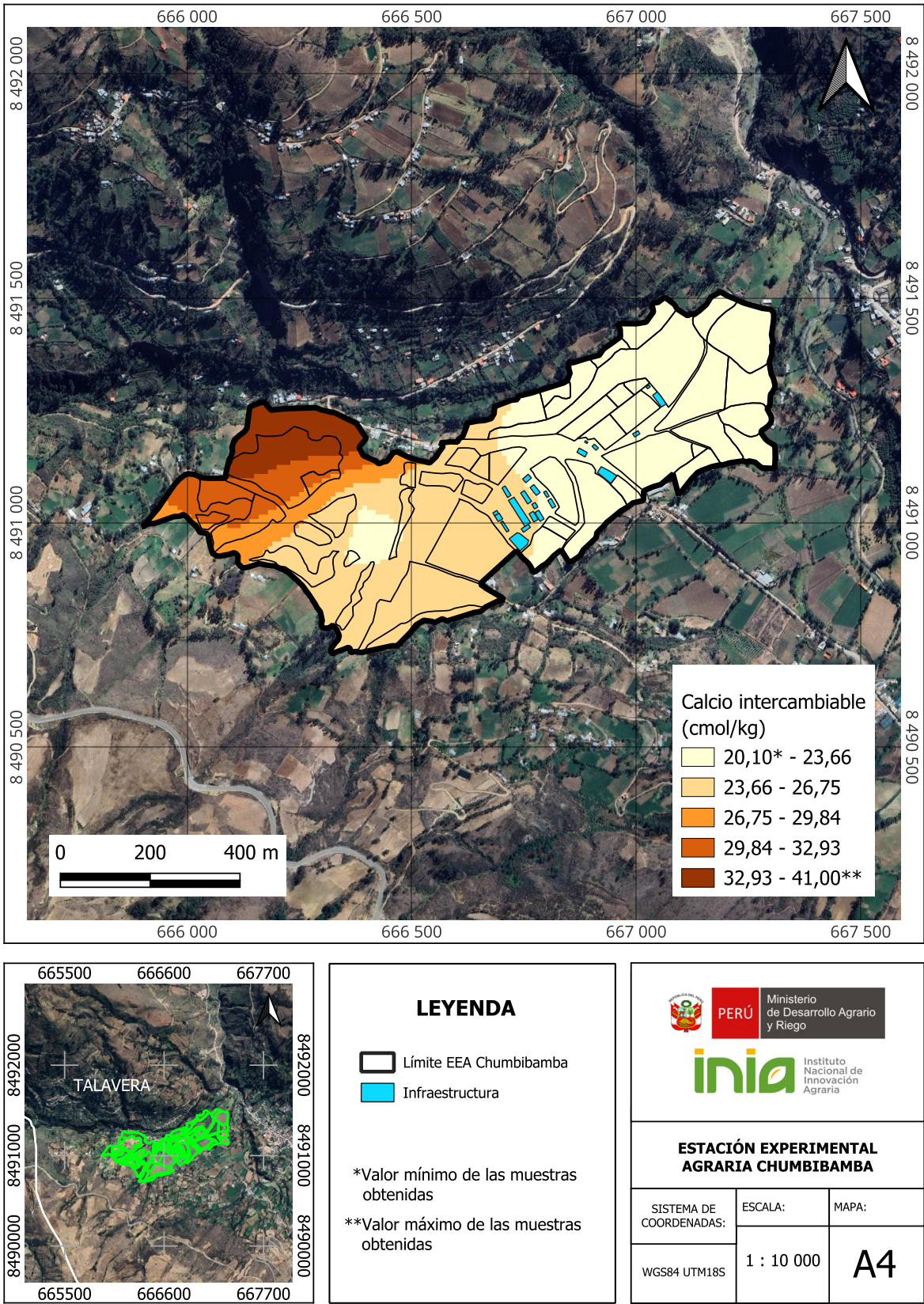


Figura 17. Mapa de variación espacial del calcio intercambiable

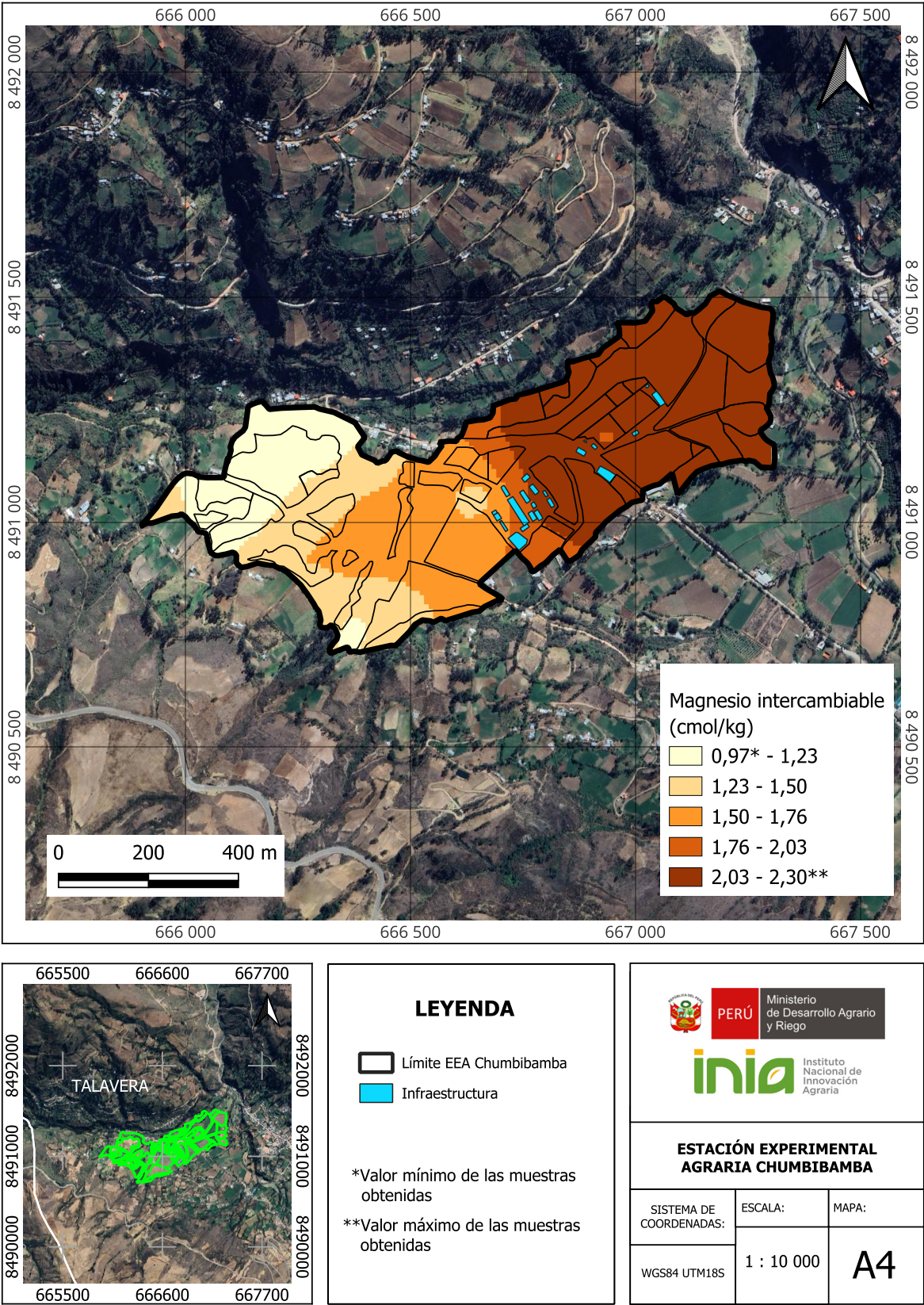


Figura 18. Mapa de variación espacial del magnesio intercambiable

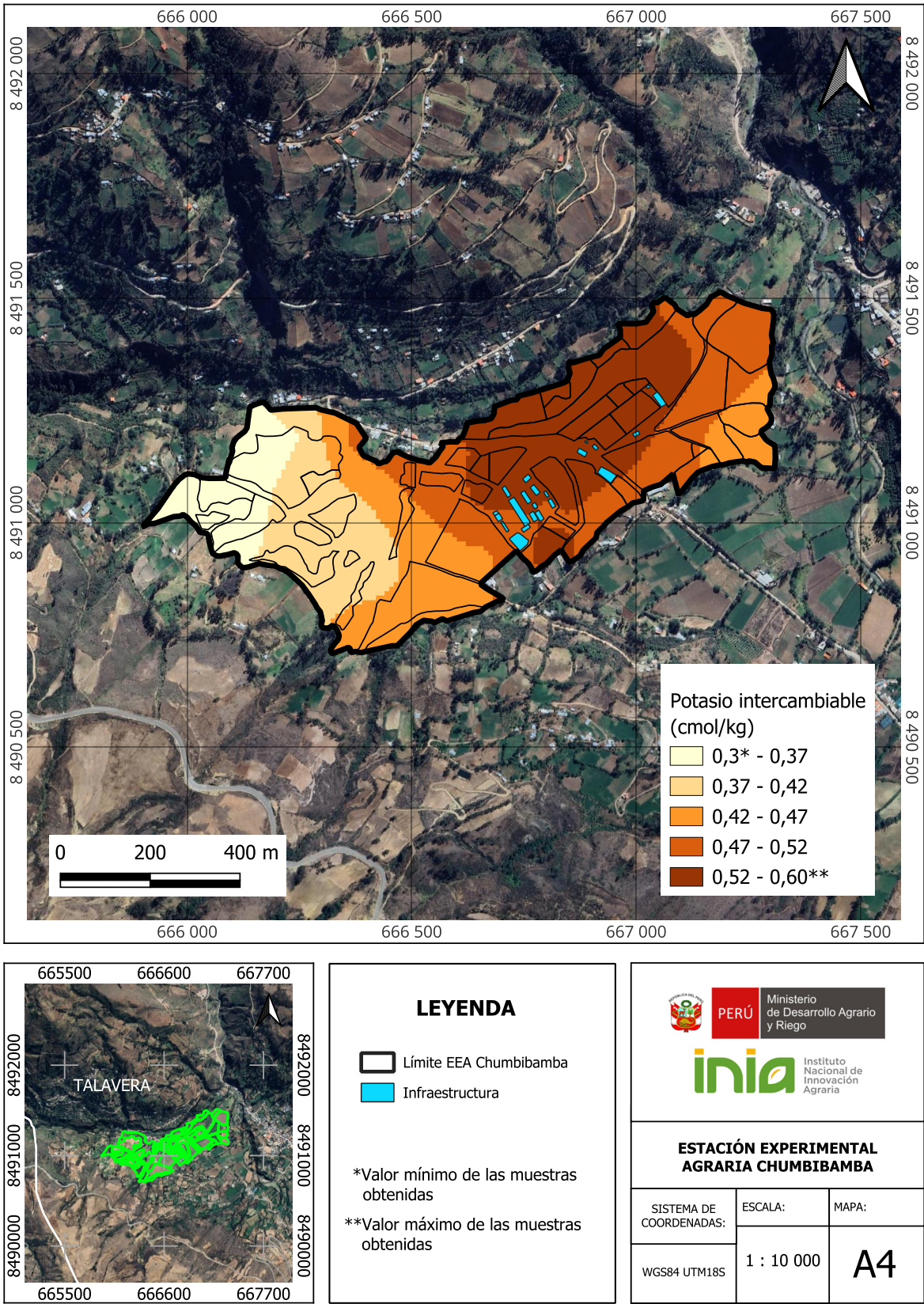


Figura 19. Mapa de variación espacial del potasio intercambiable

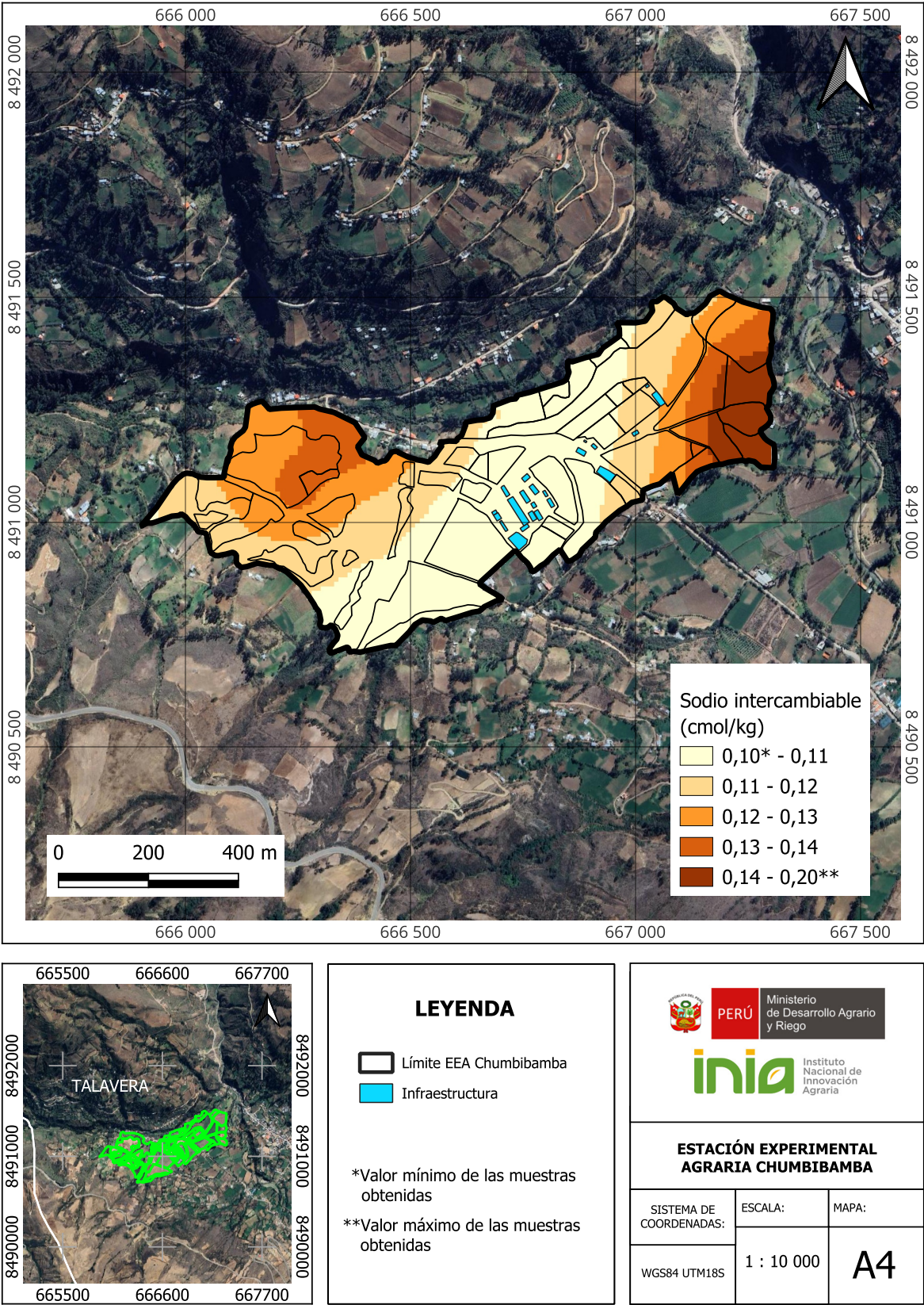


Figura 20. Mapa de variación espacial del sodio intercambiable

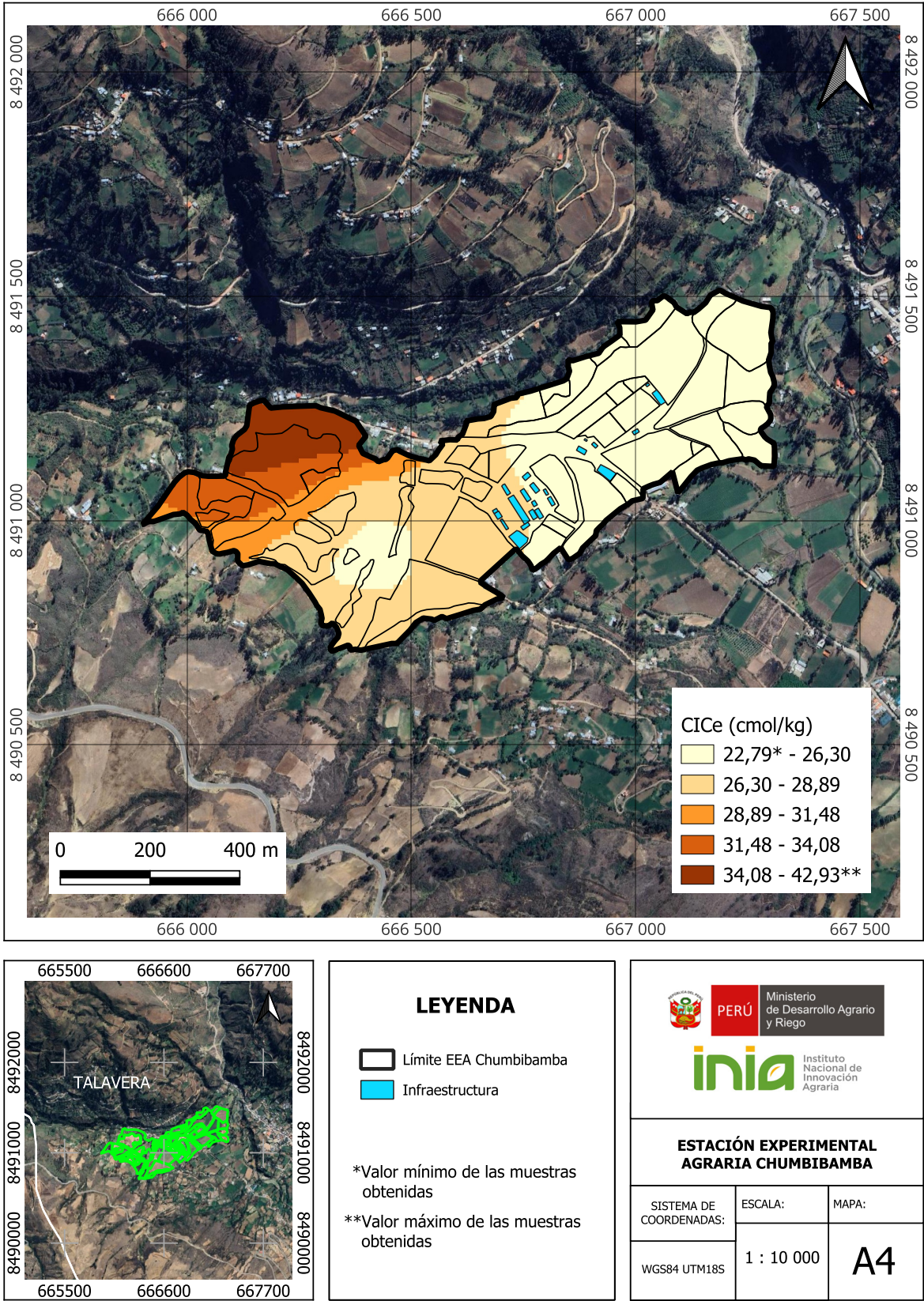


Figura 21. Mapa de variación espacial de la capacidad de intercambio catiónico efectiva

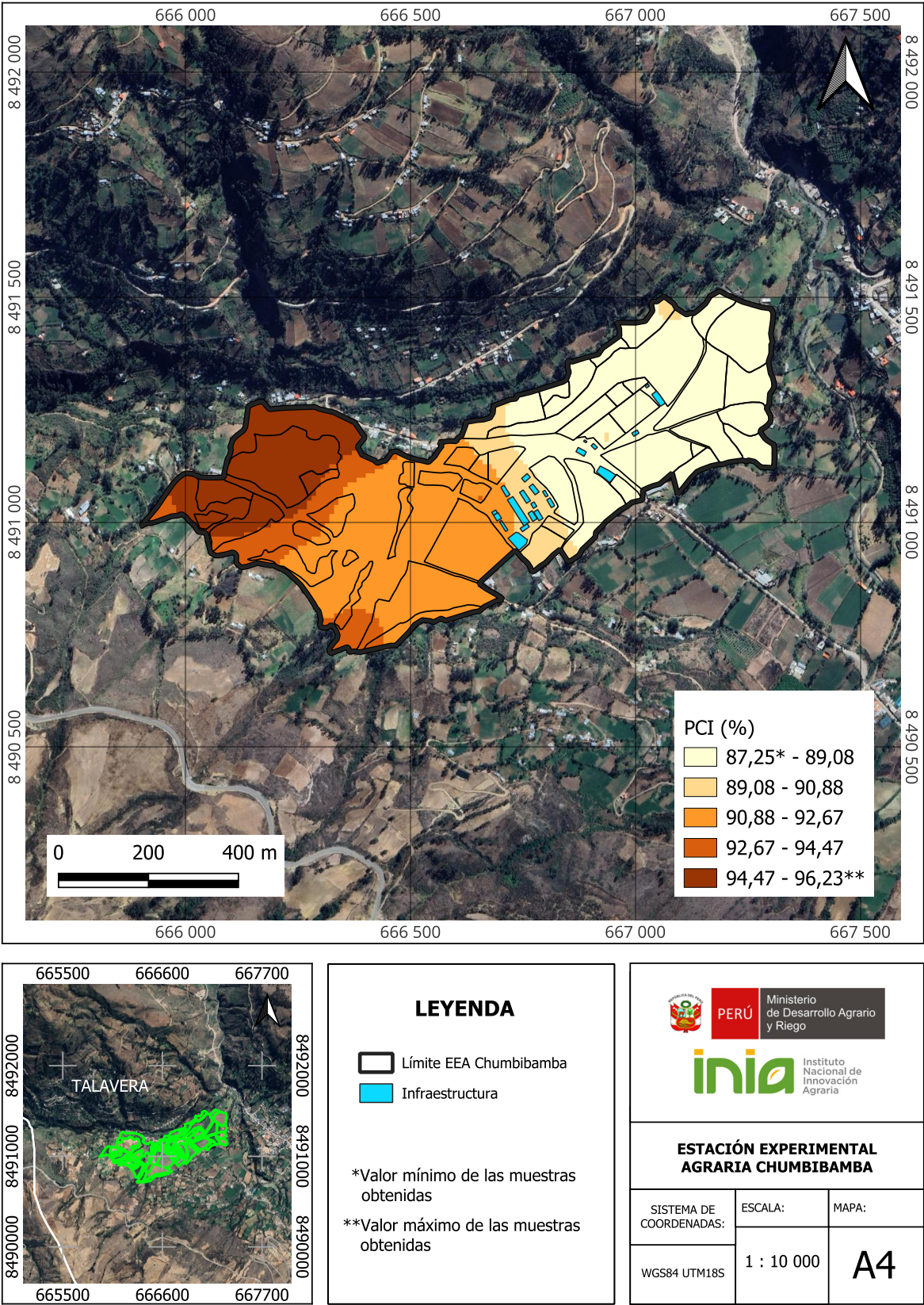


Figura 22. Mapa de variación espacial del porcentaje de calcio intercambiable

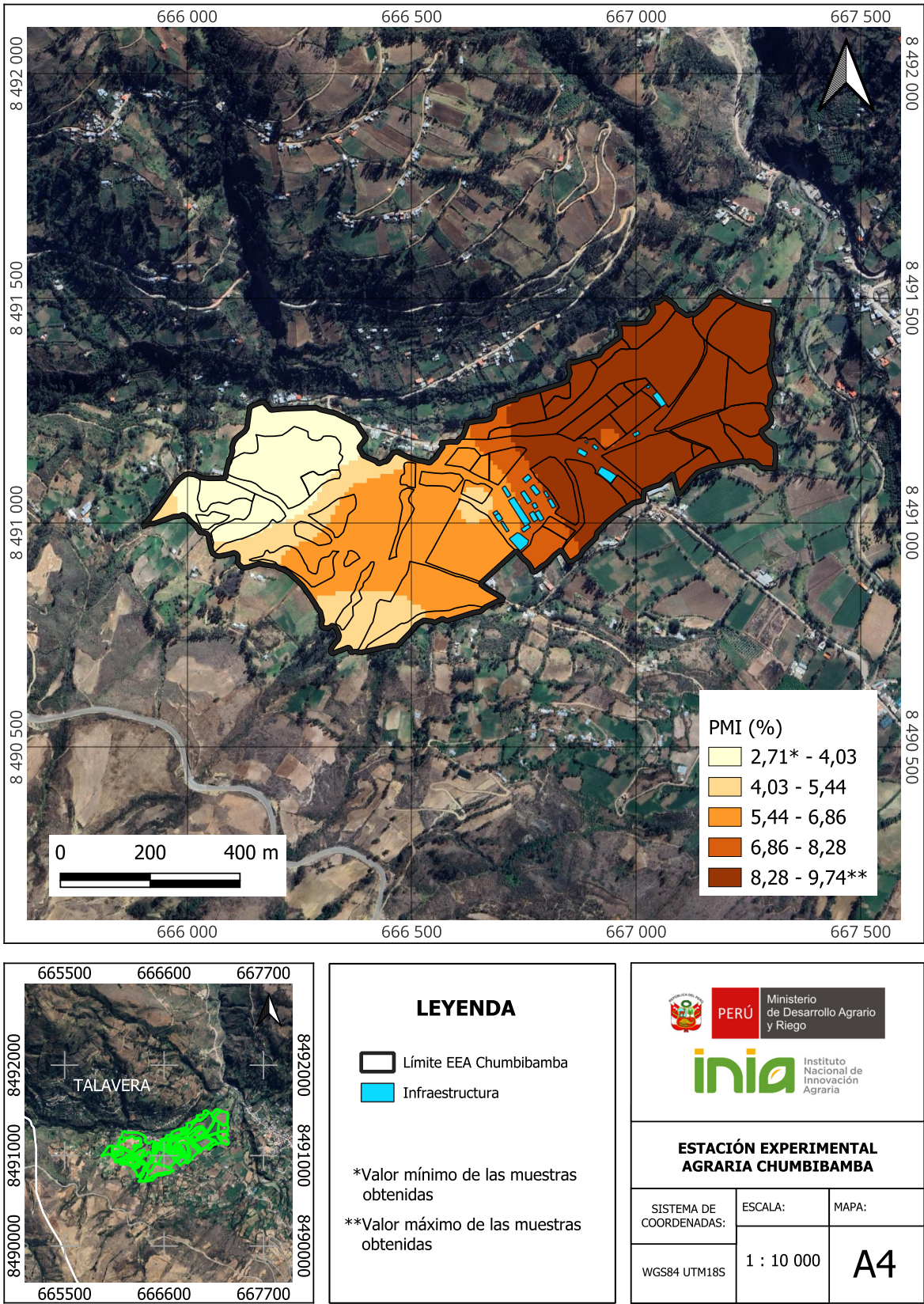


Figura 23. Mapa de variación espacial del porcentaje de magnesio intercambiable

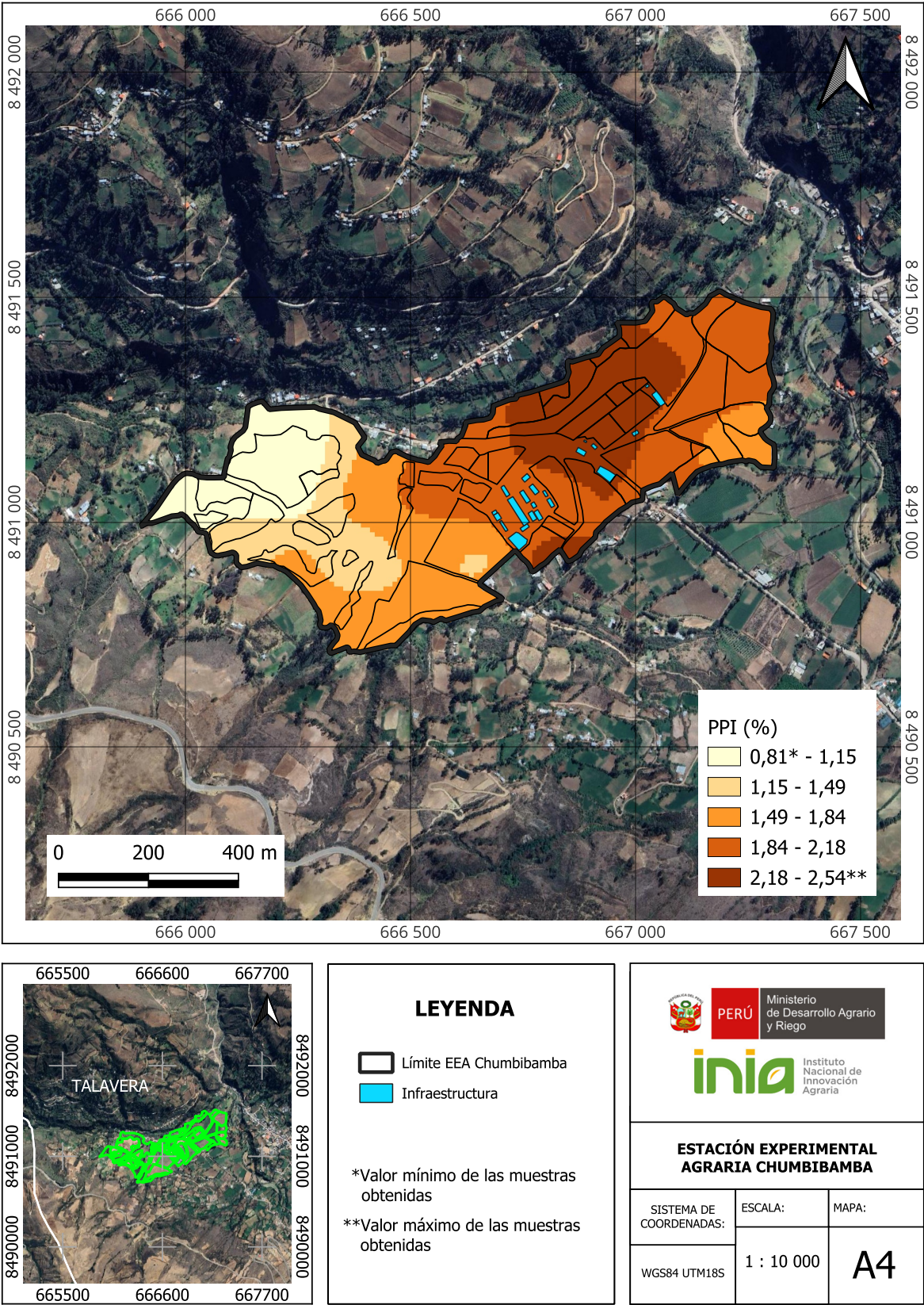


Figura 24. Mapa de variación espacial del porcentaje de potasio intercambiable

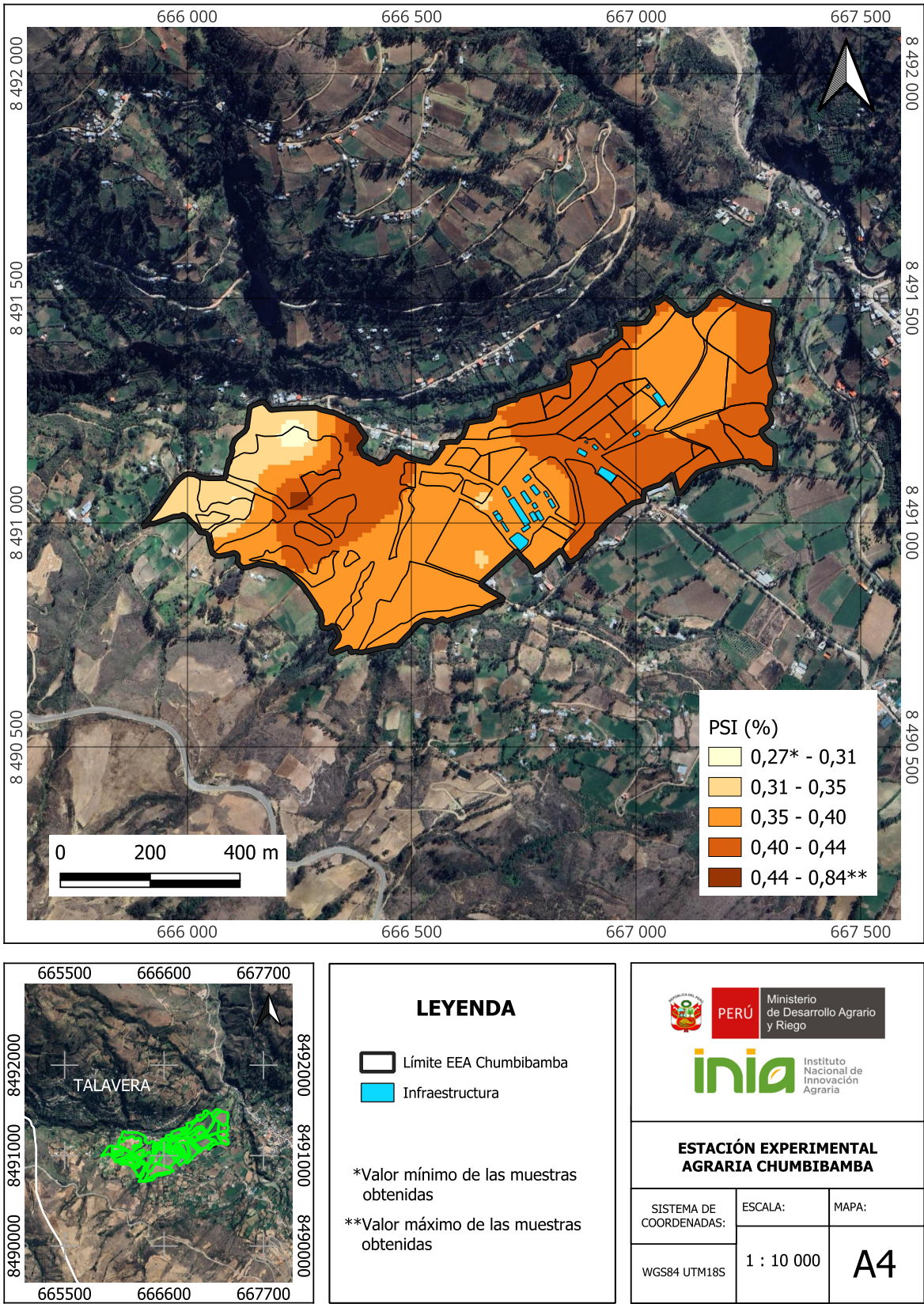


Figura 25. Mapa de variación espacial del porcentaje de sodio intercambiable





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

4.1. Índice de saturación de bases catiónicas

4.1.1. Variación espacial de los desbalances iónicos con niveles deficitarios de K^+ y Mg^{2+}

Desde la perspectiva edafológica del modelo BCSR, el equilibrio relativo entre los cationes básicos en el complejo de cambio (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ y Na^+) es un determinante clave para la nutrición vegetal y la fertilidad química del suelo.

En los suelos de la EEA Chumbibamba el pH ($7,87 \pm 0,21$), la CE ($0,79 \pm 0,16 \text{ dS m}^{-1}$) y el contenido de $CaCO_3$ ($5,80 \pm 5,72 \%$) mostraron evidencias no restrictivas para la interpretación de la saturación de cationes básicos.

De esta manera, el diagnóstico de las relaciones catiónicas muestra que el porcentaje de calcio intercambiable ($PCI = 90,99 \pm 2,79 \%$) se encuentra en niveles elevados, condición que podría afectar el equilibrio nutricional del suelo. Un predominio marcado de Ca^{2+} en el complejo de intercambio puede favorecer, por efecto de acción de masas, el desplazamiento de otros cationes esenciales como Mg^{2+} y K^+ , incrementando potencialmente su susceptibilidad a pérdidas por lixiviación. Asimismo, en combinación con valores elevados de pH, esta condición puede reducir la disponibilidad de algunos micronutrientes (Fe, Zn, B y Cl), con posibles implicancias para la nutrición vegetal (Parvej et al., 2025). Pero desde el punto de vista físico y en condiciones óptimas, el contenido de calcio también puede favorecer la agregación, mejorar la estructura y aireación (Marschner, 2011).

Los mapas derivados del porcentaje de magnesio intercambiable (PMI) y del porcentaje de potasio intercambiable (PPI), permitieron identificar zonas con contrastes claros en la participación relativa de estas bases en la CICe. En el caso del PMI, se identificaron sectores con baja participación de Mg^{2+} ($< 5,44 \%$) y otros con participación media ($5,44\text{--}9,74 \%$). Por su parte, el mapa de PPI permitió diferenciar áreas con baja participación de K^+ ($< 1,84 \%$) y otras con participación media ($1,84\text{--}2,54 \%$). Esta diferenciación espacial proporciona unidades cartográficas de utilidad para el manejo sitio-específico de la fertilización potásica y para optimizar el equilibrio entre los cationes intercambiables Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^+ .

El magnesio desempeña un papel clave en la fotosíntesis y en la activación de enzimas metabólicas, además de favorecer el transporte de fotoasimilados hacia los órganos de reserva, contribuyendo así al crecimiento y rendimiento de los cultivos (Marschner, 2011). Por su parte, el potasio es uno de los cationes más relevantes en la fisiología vegetal, ya que interviene en numerosos procesos bioquímicos y fisiológicos, está ampliamente distribuido en los tejidos vegetales y contribuye también a incrementar la resistencia de las plantas frente a diversas enfermedades (Mengel y Kirkby, 2000). En este sentido, la deficiencia de ambos nutrientes puede limitar significativamente el crecimiento, el desarrollo y la productividad de cultivos de importancia en la EEA. Considerando la elevada variabilidad

espacial del potasio y del magnesio intercambiables, el manejo agronómico debe enfocarse en la aplicación diferenciada de fertilizantes potásicos y magnésicos según las zonas de manejo identificadas, incorporando además el análisis de las relaciones Ca/Mg y K/Mg para prevenir posibles desbalances nutricionales.

4.1.2. Variación espacial de los desbalances iónicos con niveles elevados de carbonato de calcio y calcio intercambiable

Gran parte de la superficie presenta pH entre 7,50 y 8,20, y porcentaje de carbonato de calcio (CaCO_3) entre 1,90 y 18,80 % (Figuras 26 y 27). Este último presentó un grado moderado de ajuste de los valores observados con los predichos ($R^2 = 0,66$), lo que permitió identificar diferentes zonas con diferentes porcentajes de carbonatos (zona 1: 1,90 – 5,11 %; zona 2: 5,11 – 8,46 %; zona 3: 8,46 – 11,81 %; zona 4: 11,81 – 15,16 % y zona 5: 15,16 – 18,80 %)

El alto contenido de porcentaje de carbonato de calcio (zona 5: 15,16 – 18,80 %), trae consigo efectos en el suelo y en cultivos predominantes de la región, como el maíz amiláceo y la quinua, por lo que resulta necesario analizar algunos aspectos edafológicos y fisiológicos derivados.

En el suelo, físicamente influye en la estructura y la formación de agregados: cantidades moderadas de carbonato pueden favorecer la estabilidad de agregados macro, pero niveles excesivos tienden a reducir la estabilidad de microagregados y modificar la distribución de tamaño de partículas, lo que puede alterar la porosidad, compactación y capacidad de retención de agua (Umer et al., 2020). Químicamente, los carbonatos incrementan el pH del suelo, manteniéndolo neutro a fuertemente alcalino, lo cual afecta la solubilidad y disponibilidad de nutrientes. Por ejemplo, la elevada alcalinidad favorece la precipitación de fósforo como fosfatos de calcio, reduciendo su disponibilidad para plantas, e inhibe la disponibilidad de micronutrientes como Fe, Zn, Cu y Mn, con potenciales deficiencias nutricionales (Bolan et al., 2023). Además, altas concentraciones de CaCO_3 pueden estar inversamente correlacionadas con la capacidad de intercambio catiónico efectiva (CECe) cuando la fracción activa del carbonato domina, alterando la retención y el intercambio de cationes nutritivos esenciales (Umer et al., 2020).

Los cultivos, como el maíz predominante en la región, pueden verse afectados por desequilibrios catiónicos asociados a suelos con alto porcentaje de saturación de calcio. En el caso de la quinua, cultivo moderadamente tolerante a condiciones edáficas adversas pero sensible a desbalances nutricionales, un alto contenido de Ca^{2+} asociado a suelos calcáreos puede inducir deficiencias de Mg^{2+} y K^+ , manifestadas en clorosis intervenal, menor área foliar efectiva y alteraciones en el balance osmótico, lo que repercute negativamente en su desarrollo (Youssef et al., 2023).

El uso de mapas de saturación catiónica y relaciones Ca/K y Ca/Mg posibilita la implementación de estrategias de fertilización específicas, orientadas a corregir deficiencias relativas de K^+ y Mg^{2+} mediante fuentes adecuadas y ajustes de dosis.

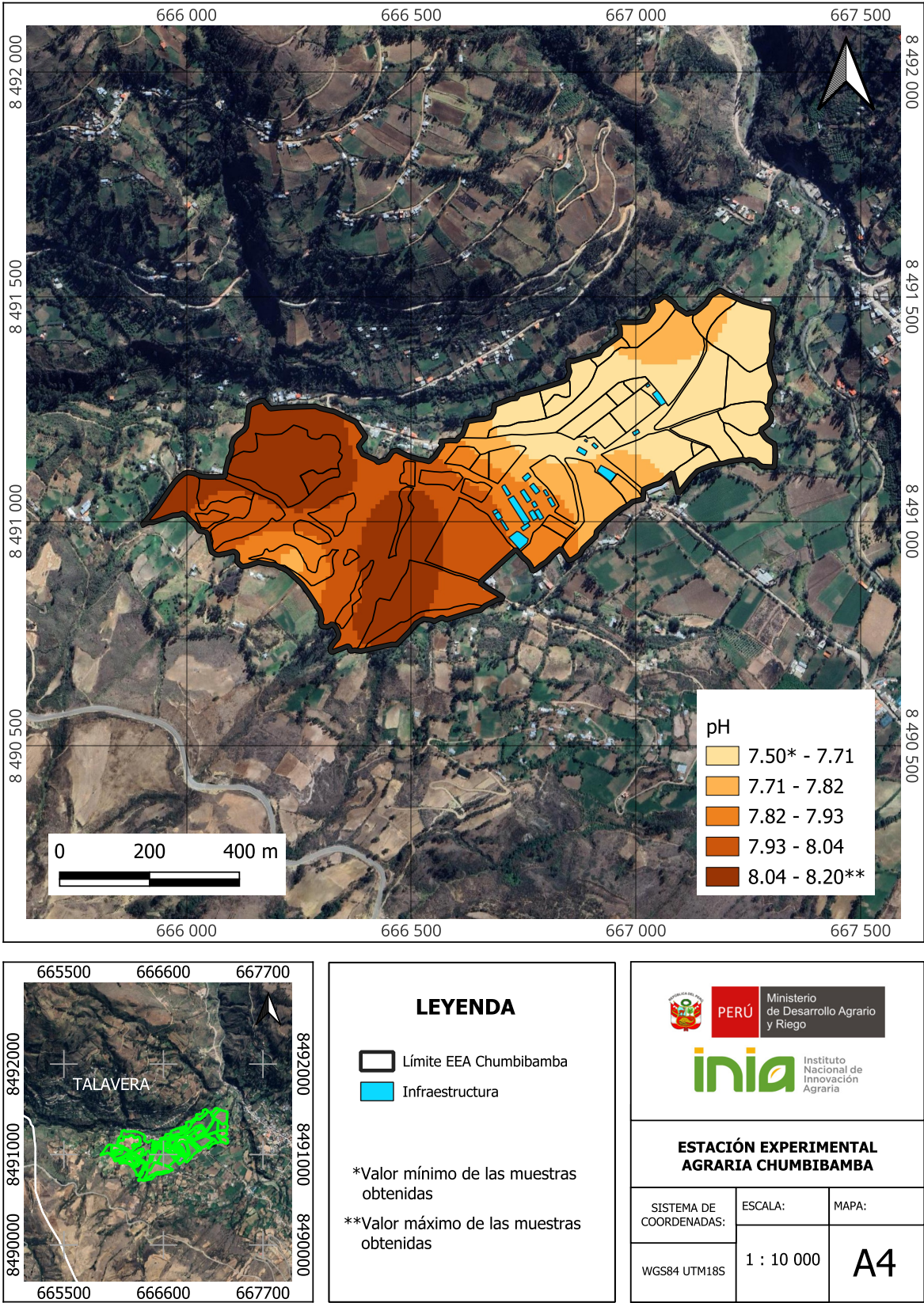


Figura 26. Mapa de variación espacial del pH

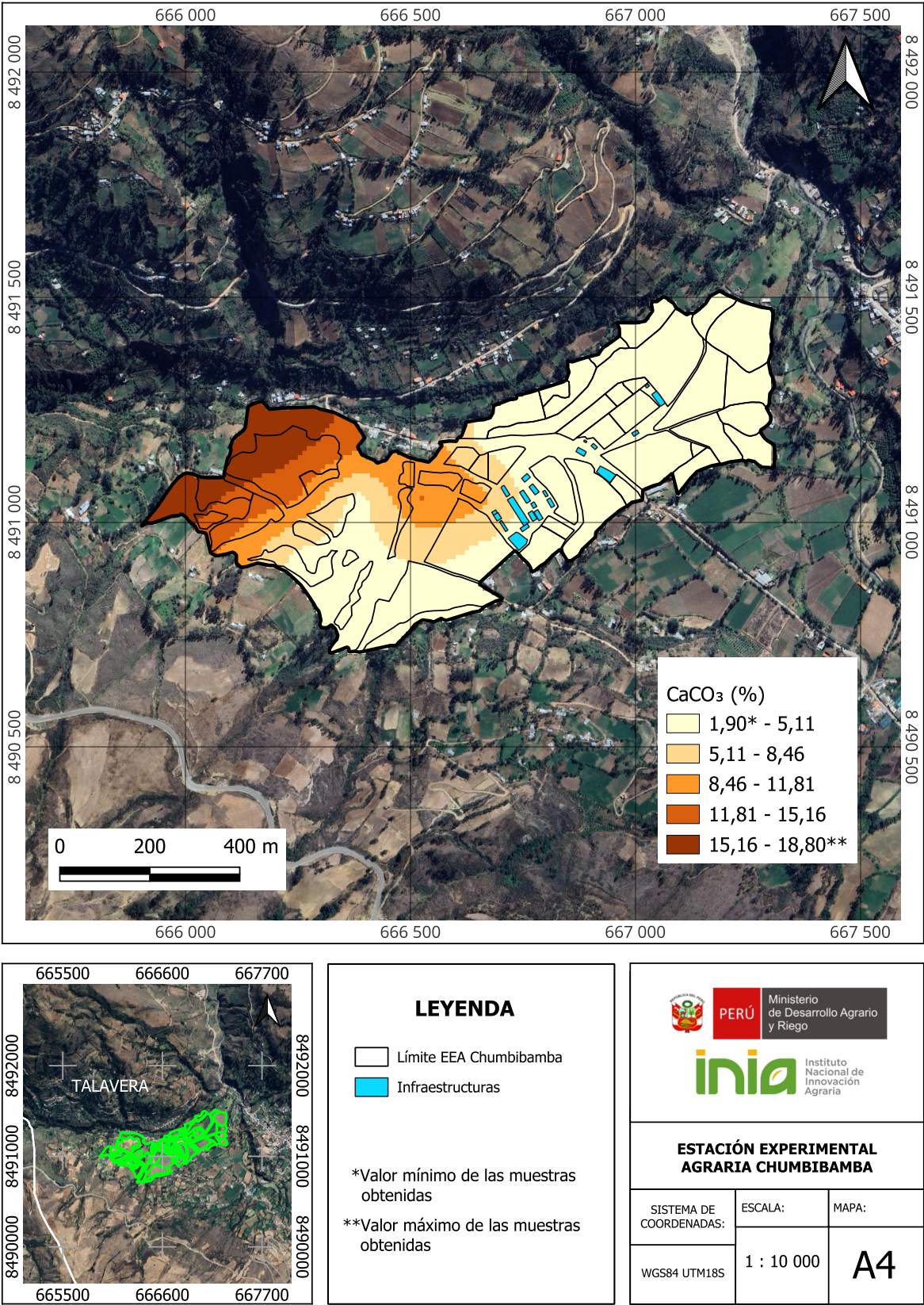


Figura 27. Mapa de variación espacial del porcentaje de carbonato de calcio

4.2. Niveles de suficiencia de nutrientes disponibles

4.2.1. Cálculos del requerimiento de fertilización fosforada según los criterios de mantenimiento y construcción para el maíz morado

El comportamiento geoestadístico del fósforo disponible muestra una estructura espacial débil, con un modelo ajustado de tipo lineal, pero con un rango amplio (rango = 710 m). El *nugget* (C_0) fue de 214,14 y el *sill* ($C_0 + C$) de 241,85, lo que implica que el 86 % de la variación total es atribuible al error no estructurado o a fuentes de variabilidad no explicadas por la distancia. Esto sugiere que el fósforo es muy variable, posiblemente asociado a factores locales como acumulación de carbonatos, microambientes de humedad o diferencias en manejo previo de fertilización.

La variabilidad espacial del fósforo evidencia que este nutriente puede constituir un factor limitante para el desarrollo vegetal en determinadas zonas, donde sería necesaria la aplicación de fertilización fosfatada de mantenimiento. En contraste, en otras áreas su disponibilidad podría ser adecuada o incluso elevada, lo que sugiere la posibilidad de ajustar la fertilización bajo criterios de suficiencia, especialmente en cultivos con altas demandas nutricionales.

Para los cálculos de fertilización fosforada en el cultivo de maíz morado, se adoptará como referencia un nivel crítico de 15 mg kg⁻¹ y un rendimiento potencial de 5,2 t ha⁻¹ convencional con alta tecnología. El nivel de fósforo mínimo de los suelos analizados es 0,8 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 procedimiento de cálculo se basa en la metodología propuesta por Quispe-Matos et al. (2025).

Primer paso: calcular el rendimiento alcanzado con 0.8 mg de P-Olsen por kg de suelo, considerando que con este nivel de fósforo se alcanza un rendimiento relativo de 10 %.

$$\text{Rendimiento alcanzado} = \frac{10 \times 5,2 \text{ t ha}^{-1}}{100} = 0,52 \text{ t ha}^{-1}$$

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

$$\text{Incremento de raíces y brotes} = 0,35 \times 0,52 \text{ t ha}^{-1} = 0,182 \text{ t ha}^{-1}$$

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

$$\text{Rendimiento objetivo} = 0,52 \text{ t ha}^{-1} + 0,182 \text{ t ha}^{-1} = 0,702 \text{ t ha}^{-1}$$

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.

$$\text{Requerimiento de P} = 2 \text{ kg de P t}^{-1} \times 0,702 \text{ t ha}^{-1} = 1,4 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

Quinto paso: determinar el requerimiento de mantenimiento (RM), haciendo uso de la Fórmula 6. Para este caso práctico, se considera una eficiencia de uso de P del 30 %.

$$\text{RM de P} = \frac{1,4 \text{ kg de P ha}^{-1}}{0,30} = 4,66 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

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.

$$\text{Dosis de fertilización de P} = 4,66 \text{ kg de P ha}^{-1} + 6 \text{ kg de P ha}^{-1} = 10,66 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

De esta manera, la dosis de fertilización anual sería de 53,06 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 maíz morado.

4.2.2. Cálculos del requerimiento de fertilización potásica según el criterio de suficiencia para el maíz morado

El comportamiento geoestadístico del potasio disponible muestra una estructura espacial con un modelo ajustado de tipo lineal, pero con un rango amplio (rango = 710,42 m). El *nugget* (C_0) fue de 255,23 y el *sill* ($C_0 + C$) de 1823,71. Esto sugiere que el potasio es muy variable, posiblemente asociado al historial de fertilización o al material parental.

El potasio disponible (K disp.) se clasificó en un nivel de medio a alto y presentó una distribución relativamente homogénea en el área de estudio, lo que indica una adecuada capacidad del suelo para suministrar este nutriente a los cultivos. En consecuencia, las decisiones de fertilización potásica deben orientarse a reponer el potasio extraído por los cultivos, siguiendo el criterio de suficiencia.

Para los cálculos de la fertilización potásica en el cultivo de maíz morado, se adoptó como referencia un nivel crítico de potasio de 200 mg kg⁻¹ y un rendimiento potencial de 5,2 t ha⁻¹ bajo un sistema de producción convencional con alta tecnología. Asimismo, se consideró el contenido mínimo de potasio registrado en los suelos analizados (166,40 mg kg⁻¹), el cual, de acuerdo con el análisis de correlación y calibración, corresponde a un rendimiento relativo (RR) del 80 %. El cálculo se realiza adaptando la metodología descrita por Quispe-Matos et al., 2025.

Primer paso: calcular el rendimiento con 166,40 mg de K por kg de suelo, utilizando la Fórmula 2:

$$\text{Rendimiento alcanzado} = \frac{80 \times 5,2 \text{ t ha}^{-1}}{100} = 4,16 \text{ t ha}^{-1}$$

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

$$\text{Incremento de raíces y brotes} = 0,35 \times 4,16 \text{ t ha}^{-1} = 1,456 \text{ t ha}^{-1}$$

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

$$\text{Rendimiento objetivo} = 4,16 \text{ t ha}^{-1} + 1,456 \text{ t ha}^{-1} = 5,616 \text{ t ha}^{-1}$$

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.

$$\text{Requerimiento de K} = 20 \text{ kg de K t}^{-1} \times 5,616 \text{ t ha}^{-1} = 112,32 \text{ kg de K ha}^{-1}$$

De esta manera, la dosis de fertilización anual sería de 225,57 kg ha⁻¹ de cloruro de potasio, el cual tiene una riqueza de 60 % de K₂O. Con esta dosis de fertilización se repone lo extraído por el cultivo de maíz morado.



5. Referencias bibliográficas

- Alam, S. M., Naqvi, S. S. M., y Ansari, R. (1999). Impact of soil pH on nutrient uptake by crop plants. En M. Pessarakli (Ed.), *Handbook of Plant Nutrition* (pp. 51-60). Marcel Dekker, Inc.
- Álvarez-Herrera, J. G., Ruiz-Berrío, H. D., y Acosta-Tova, D. F. (2021). Evaluación geoestadística de atributos hidrofísicos del suelo en la granja Tunguavita, Paipa, Colombia. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 31(1), 127-140. <https://www.redalyc.org/journal/911/91168742009/html/>
- Atkins, P. W., De Paula, J., y Keeler, J. (2023). *Atkins' physical chemistry*. Oxford University Press.
- Bear, F. E., Prince, A. L., y Malcolm, J. L. (1945). *Potassium needs of New Jersey soils*. New Jersey Agricultural Experiment Station.
- Bolan, N., Srivastava, P., Rao, C. S., Satyanaraya, P., Anderson, G. C., Bolan, S., Nortjé, G. P., Kronenberg, R., Bardhan, S., Abbott, L. K., Zhao, H., Mehra, P., Satyanarayana, S., Khan, N., Wang, H., Rinklebe, J., Siddique, K. H., y Kirkham, M. (2023). Distribution, characteristics and management of calcareous soils. En S. Donald (Ed.), *Advances in agronomy* (pp. 81-130). Academic Press.
- Bray, R. H. (1958). The correlation of a phosphorus soil test with the response of wheat through a modified Mitscherlich equation. *Soil Science Society of America Journal*, 22(4), 314–317. <https://doi.org/10.2136/sssaj1958.03615995002200040013x>
- Brock, C., Jackson-Smith, D., Kumarappan, S., Culman, S., Doohan, D., y Herms, C. (2021). The prevalence and practice of soil balancing among organic corn farmers. *Renewable Agriculture and Food Systems*, 36(4), 1-10. <https://doi.org/10.1017/S1742170520000381>
- Buresh, R.J., Smithson, P.C., y Hellums, D.T. (1997). Building Soil Phosphorus Capital in Africa. En R. J. Buresh, P. A. Sanchez, y F. Calhoun (Eds.), *Replenishing Soil Fertility in Africa* (pp. 111-149). Soil Science Society of America, Inc; American Society of Agronomy, Inc. https://apps.worldagroforestry.org/Units/Library/Books/PDFs/91_Replenishing_soil_fertility_in_africa.pdf
- Chaganti, V., y Culman, S. (2017). Historical perspective of soil balancing theory and identifying knowledge gaps: A review. *Crop, Forage y Turfgrass Management*, 3(1), 1-7. <https://doi.org/10.2134/cftm2016.10.0072>
- Chinea-Horta, A., y Rodríguez-Izquierdo, L. (2021). Comportamiento geoespacial de algunas propiedades del suelo en el cultivo de la caña de azúcar. *Ingeniería Agrícola*, 11(1). <https://www.redalyc.org/journal/5862/586269368001/html/>
- Cruz-Luis, J. A., Ortiz-Morera, N. C., Quispe-Torres, D. R., Atalaya-Lopez, J. S., Macavilca-Villar, P. M., Ramírez-Aparicio, J. A., Salinas-Rivera, J. L., Escobar-Cuadros, F., Carbajal-Llosa, C. M., Olivarez-Rivera, E. L., Casaretto-Castagnino, D., y Ganoza-Roncal, J. J. (2025). *Atlas de las Estaciones Experimentales Agrarias del INIA*. Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA). <http://hdl.handle.net/20.500.12955/2763>
- Culman, S. W., Brock, C., Doohan, D., Jackson-Smith, D., Herms, C., Chaganti, V. N., Kleinhenz, M., 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>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (03 de julio de 2026). Management of calcareous soils. <https://www.fao.org/soils-portal/soil-management/management-of-some-problem-soils/calcareous-soils/en/>
- Garbanzo-León, G., Alemán-Montes, B., Alvarado-Hernández, A., y Henríquez-Henríquez, C. (2017). Validación de modelos geoestadísticos y convencionales en la determinación de la variación espacial de la fertilidad de suelos del Pacífico Sur de Costa Rica. *Investigaciones Geográficas*, (93), 20–41. <https://doi.org/10.14350/rig.54706>
- García, F. O., y Ciampitti, I. A. (2010). Enfoques alternativos para el diagnóstico de fertilidad de suelos el enfoque “tradicional”. *Informaciones Agronómicas*, (3), 17-25. <https://fertilizar.org.ar/wp-content/uploads/2011/09/17.pdf>
- Gobierno Regional Apurímac, Gerencia de Recursos Naturales y Gestión del Medio Ambiente. (2008). Fortalecimiento de capacidades para la prevención y mitigación de la desertificación y sequía en la región Apurímac. <https://sinia.minam.gob.pe/sites/default/files/siar-apurimac/archivos/public/docs/505.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>
- Marschner, H. (Ed.). (2011). *Marschner’s mineral nutrition of higher plants*. Academic press.
- 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>
- Mengel, K., y Kirkby, E. A. (2000). *Principios de Nutrición Vegetal* (4ta ed.). International Potash Institute.
- Moral-García, F. J. (2004). Aplicación de la geoestadística en las ciencias ambientales. *Ecosistemas*, 1(11). <https://revistaecosistemas.net/index.php/ecosistemas/article/view/582>
- Niebla-Torres, R. E., Barrezueta-Unda, S., Luna-Romero, Á., y Chabla-Carrillo, J. (2021). Aplicación de modelos geoestadísticos para definir la variabilidad de un perfil del suelo. *Revista Metropolitana de Ciencias Aplicadas*, 4(1), 188-195. <https://doi.org/10.62452/zx01j782>
- Parvej, M. R., Keay, J., y Lee, R. (2025) *When More Is Less: How Excess Nutrients Can Cause Deficiencies in Crops*. University of Missouri Extension. <https://hdl.handle.net/10355/110549>
- Pebesma, E. J., y Bivand, R. S. (2005). Classes and methods for spatial data in R. *R News*, 5(2), 9–13. <https://cran.r-project.org/doc/Rnews/>
- 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)
- Pierre, W. H., y Banwart, W. L. (1973). Excess-Base and Excess-Base/Nitrogen ratio of various crop species and parts of Plants. *Agronomy Journal*, 65(1), 91-96. <https://doi.org/10.2134/agronj1973.00021962006500010028x>
- Quispe-Matos, K. R., Carbajal-Llosa, C. M., Mejia-Maita, S. Y., Llerena-Arroyo, R. A., Solórzano-Acosta, R. A., y Cruz-Luis, J. A. (2025). *Variación espacial de la fertilidad del suelo en la EEA Canaán*. Instituto Nacional de Innovación Agraria. <http://hdl.handle.net/20.500.12955/2852>

- R Core Team. (2018). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing.
- Rolando J, Turin C, Ramírez D, Mares V, Moneris 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>
- Salazar-Gutiérrez, E. (2016). *Estudio geológico de la Región Apurímac*. https://sigrid.cenepred.gob.pe/docs/PARA%20PUBLICAR/OTROS/Estudio_geologico_de_la_region_Apurimac_ZEE.pdf
- 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).
- Umer, M. I., Rajab, S. M., & Ismail, H. K. (2020). Effect of CaCO₃ Form on Soil Inherent Quality Properties of Calcareous Soils. *Materials Science Forum*, 1002, 459-467. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.1002.459>
- 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>
- Youssef, S. M., Shaaban, A., Abdelkhalik, A., Tawwab, A. R. A. E., Halim, L. R. A. A., Rabee, L. A., Alwutayd, K. M., Ahmed, R. M. M., Alwutayd, R., y Hemida, K. A. (2023). Compost and Phosphorus/Potassium-Solubilizing Fungus Effectively Boosted Quinoa's Physio-Biochemical Traits, Nutrient Acquisition, Soil Microbial Community, and Yield and Quality in Normal and Calcareous Soils. *Plants*, 12(17). <https://doi.org/10.3390/plants12173071>
- Zhang, G. Q. (1999). *Effects of exchangeable soil calcium, magnesium and calcium/magnesium ratios on plant nutrition and growth of lettuce on an ultisol* [Thesis submitted to obtain the degree of Master of Science in Agronomy and Soil Science]. University of Hawai'i at Manoa. <http://hdl.handle.net/10125/56495>

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: 978-9972-44-277-3



PERÚ

Ministerio
de Desarrollo Agrario
y Riego

inia

Instituto
Nacional de
Innovación
Agraria

      @INIAPeru