

Variación espacial de la fertilidad del suelo en la EEA San Bernardo



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 San Bernardo



PERÚ

Ministerio
de Desarrollo Agrario
y Riego

inia

Instituto
Nacional de
Innovación
Agraria

VARIACIÓN ESPACIAL DE LA FERTILIDAD DEL SUELO EN LA EEA SAN BERNARDO

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:

978-9972-44-275-9

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° 2026-10840

Autores: Kenyi R. Quispe-Matos, Carlos M. Carbajal-Llosa, Sharon Y. Mejia-Maita, Ruddy A. Ore-Valeriano, Rodolfo J. Chuchon-Remon, Ricky R. Reginaldo-Quispe, 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 San Bernardo	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>	34
3.7.3. Validación cruzada	34
3.8. Resultado 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 San Bernardo	59
4.1. Índice de saturación de bases catiónicas	59
4.1.1. Variación espacial de los desbalances iónicos con niveles deficitarios de Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^{+}	59
4.1.2. Variabilidad espacial de la acidez, saturación de aluminio y disponibilidad de nutrientes para la corrección mediante encalado	61
4.2. Niveles de suficiencia de nutrientes disponibles	63
4.2.1. Cálculos del requerimiento de fertilización fosforada según los criterios de mantenimiento y construcción para el cacao	63
4.2.2. Cálculos del requerimiento de fertilización potásica según los criterios de mantenimiento y construcción para el cacao	64
5. Referencias bibliográficas	67



Presentación

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

El INIA, a través de la Dirección de Servicios 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 San Bernardo (EEA San Bernardo), situada en el departamento de Madre de Dios, dispone de un espacio idóneo para desarrollar diversos estudios, entre ellos la evaluación de la variabilidad de la fertilidad del suelo. Este aspecto resulta clave por su impacto en el rendimiento de los cultivos, la eficiencia en el uso de fertilizantes y la sostenibilidad de los sistemas productivos. Para su análisis, se emplean herramientas geoestadísticas y sistemas de información geográfica (SIG), que permiten modelar los patrones espaciales de las propiedades del suelo y facilitan la aplicación de estrategias de manejo sitio-específico más eficientes. Asimismo, este tipo de investigación puede constituir una base de referencia para futuros estudios en la región.

El presente manual, “Variación espacial de la fertilidad del suelo en la EEA San Bernardo”, 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 preciso 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 zonas tropicales constituye un desafío fundamental para la sostenibilidad agrícola y la conservación del equilibrio ambiental, debido a la alta susceptibilidad de estos suelos a procesos como la erosión, la lixiviación y la pérdida de nutrientes esenciales (Baumhauer, 2025). En la Estación Experimental Agraria San Bernardo (EEA San Bernardo), caracterizada por un clima cálido, precipitaciones abundantes y una amplitud térmica moderada, las condiciones ambientales incrementan la vulnerabilidad del suelo frente a dichos procesos degradativos. Las intensas lluvias favorecen el lavado de nutrientes y la alteración de la estructura edáfica, mientras que las temperaturas relativamente estables aceleran la descomposición de la materia orgánica, limitando su acumulación y reduciendo una de las principales fuentes de fertilidad del suelo.

La interacción entre las condiciones climáticas y las prácticas agrícolas puede generar una marcada heterogeneidad en la calidad del suelo, originando áreas con diferente capacidad productiva dentro de una misma unidad de manejo. En este contexto, resulta fundamental realizar análisis detallados que permitan identificar dichas variaciones espaciales y ajustar las estrategias de fertilización de acuerdo con las características específicas de cada sector (Singh et al., 2025). Esta aproximación no solo favorece una gestión más eficiente de los recursos, sino que también contribuye a reducir los impactos ambientales asociados al uso inadecuado o excesivo de fertilizantes (Bhunja et al., 2018).

En la EEA San Bernardo, las actividades agrícolas predominantes, combinadas con la presión antrópica y las condiciones climáticas propias de la región, ejercen una demanda creciente sobre los recursos edáficos, intensificando procesos como la compactación, la disminución de la materia orgánica y las alteraciones en las propiedades físicas y químicas del suelo. Para evaluar la distribución espacial de estas características, es posible emplear enfoques geoestadísticos que incorporan técnicas como el análisis de semivariogramas y la interpolación mediante *kriging*. Estas herramientas permiten caracterizar con alta precisión los patrones de variación de las propiedades fisicoquímicas del suelo y generar mapas temáticos que representan su comportamiento espacial. La información obtenida constituye una base fundamental para la toma de decisiones orientadas a optimizar el manejo del suelo y promover una agricultura más eficiente y sostenible (Yong-zhen, 2005).

En este sentido, el presente manual tiene como propósito analizar la distribución espacial de la fertilidad del suelo en la EEA San Bernardo a partir de la evaluación de sus propiedades fisicoquímicas y la aplicación de herramientas de análisis espacial. La generación de mapas temáticos permitirá delimitar áreas con características homogéneas, proporcionando información relevante para optimizar el manejo del suelo y las prácticas de fertilización en la estación.



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 al solución suelo se pueden observar en la Figura 1.

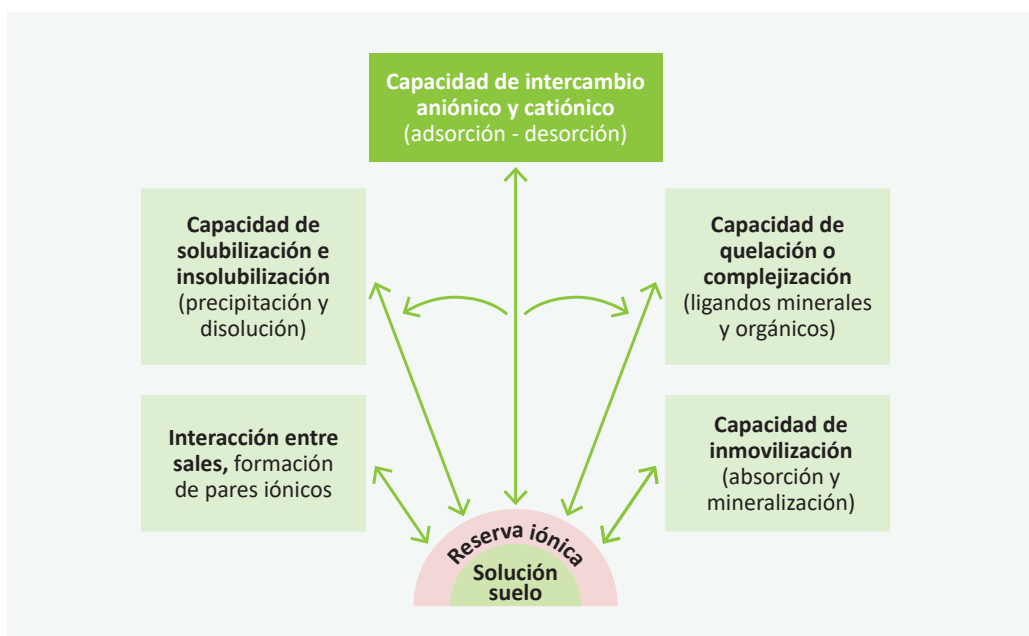


Figura 1. Mecanismos que mantienen en equilibrio los iones en la solución suelo (adaptado de McLean, 1977)

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).

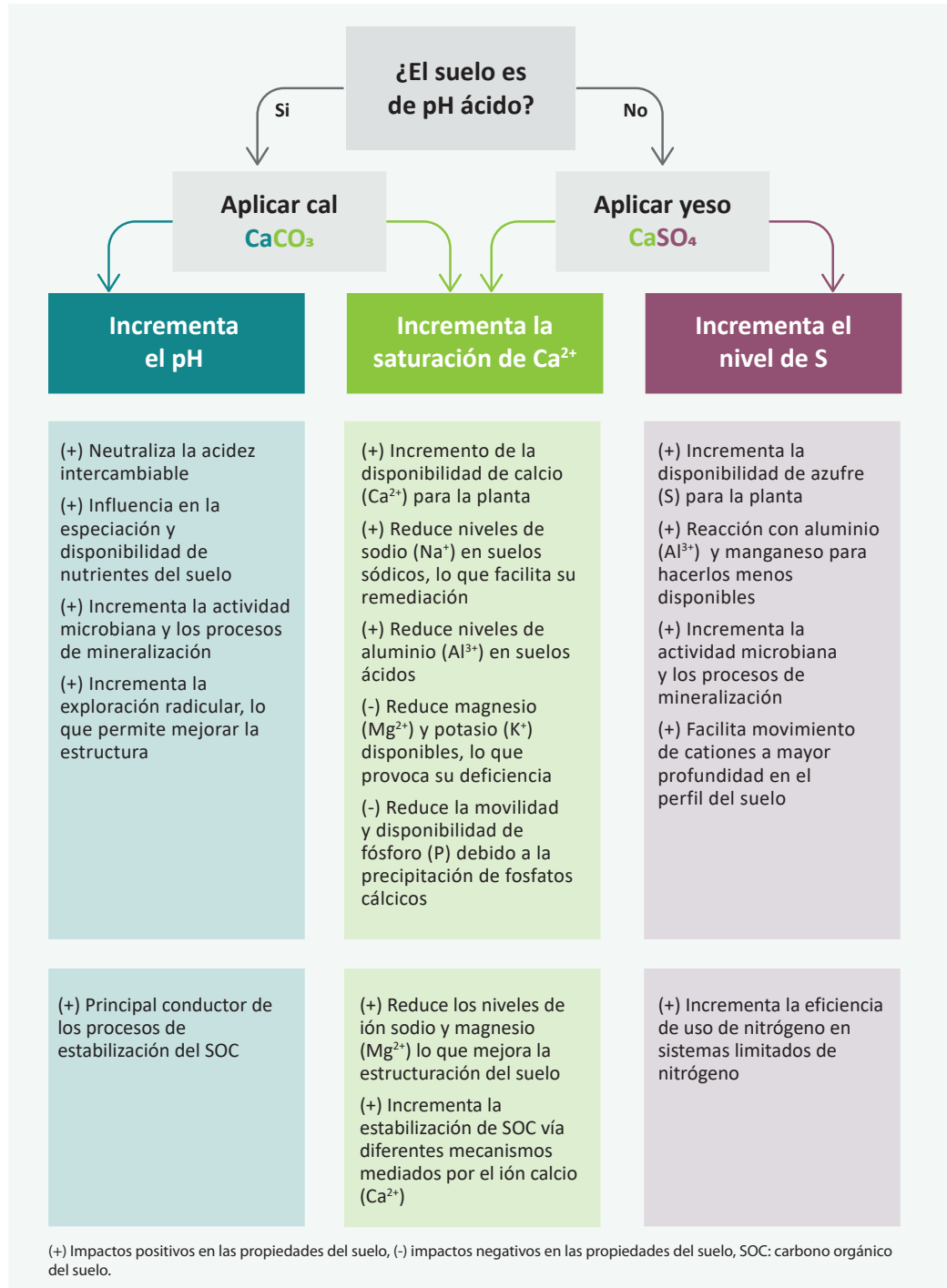


Figura 2. Criterios para el uso de la cal y el yeso, y su respuesta en la relación de saturación de cationes básicos (adaptado de Culman et al., 2021)

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.

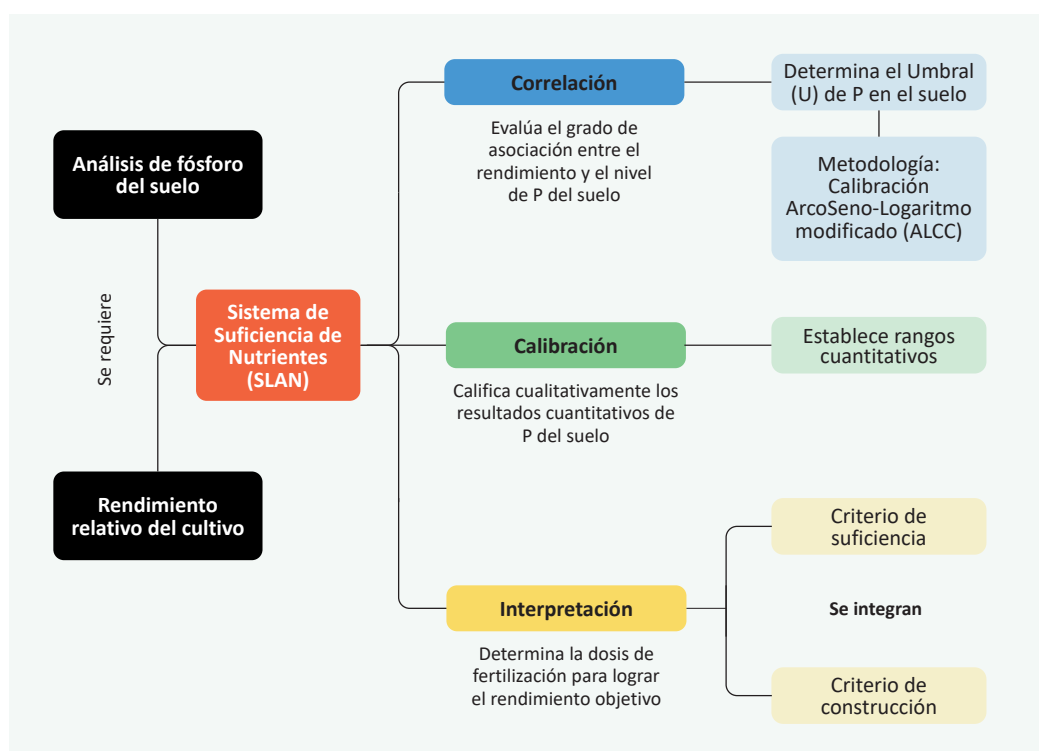


Figura 3. Esquema modelo para la implementación del sistema de suficiencia de nutrientes para el fósforo del suelo

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 cacao, considerando un suelo con alto contenido de este nutriente.

Ejemplo práctico:

Se realizó un análisis de suelos en un cultivo de cacao, y se obtuvo 12 mg de P por kg de suelo utilizando el método de Bray y Kurtz (P-Bray).

Para este cultivo, el umbral crítico o nivel de suficiencia es de 15 mg de P-Bray por kg de suelo y el rendimiento potencial es de 3 t ha⁻¹. El análisis de correlación y calibración indica que el nivel obtenido de 12 mg de P-Bray por kg de suelo permite obtener un rendimiento relativo (RR) del 90 %.

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

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

$$\text{Rendimiento alcanzado} = \frac{90 \times 3 \text{ t ha}^{-1}}{100} = 2,7 \text{ t ha}^{-1}$$

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 90 % del potencial, 2,7 t ha⁻¹ en lugar de 3 t ha⁻¹.

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

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

$$\text{Incremento de raíces y brotes} = 0,35 \times 2,7 \text{ t ha}^{-1} = 0,95 \text{ t ha}^{-1}$$

Además de los 2,7 t ha⁻¹ de producción, el cultivo genera 0,95 t ha⁻¹ de biomasa en raíces y brotes, lo que debe considerarse en el balance nutricional.

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

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

$$\text{Rendimiento objetivo} = 2,7 \text{ t ha}^{-1} + 0,95 \text{ t ha}^{-1} = 3,65 \text{ t ha}^{-1}$$

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

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

$$\text{Requerimiento de P} = 7,33 \text{ kg de P t}^{-1} \times 3,65 \text{ t ha}^{-1} = 26,75 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

A partir de estos resultados, se interpreta que el criterio de suficiencia estima un requerimiento de 26,75 kg de P ha⁻¹ para alcanzar un rendimiento objetivo de 3,65 t ha⁻¹, el cual está conformado por 0,95 t ha⁻¹ de biomasa radicular y vegetativa, y 2,7 t ha⁻¹ de producción.

c. Aplicación de los criterios de construcción y mantenimiento

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

Con respecto al criterio de construcción, este se aplica cuando el nutriente se encuentra en niveles muy bajos en el suelo, con el objetivo de incrementar progresivamente su concentración hasta alcanzar valores cercanos al nivel crítico, asegurando así una fertilidad sostenida en el tiempo. Alternativamente, el criterio de construcción se puede aplicar para complementar los requerimientos de nutrientes estimados para la fertilización de suficiencia y mantenimiento (García y Ciampitti, 2010).

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

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

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

Ejemplo práctico (criterio de mantenimiento)

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

Para este cultivo, el umbral crítico o nivel de suficiencia es de 15 mg de P-Bray por kg de suelo y el rendimiento potencial es de 3 t ha⁻¹. El análisis de correlación y calibración indica que el nivel obtenido de 10 mg de P-Bray por kg de suelo permite obtener un rendimiento relativo (RR) del 60 %.

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

$$\text{Rendimiento alcanzado} = \frac{60 \times 3 \text{ t ha}^{-1}}{100} = 1,8 \text{ t ha}^{-1}$$

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.

$$\text{Incremento de raíces y brotes} = 0,35 \times 1,8 \text{ t ha}^{-1} = 0,63 \text{ t ha}^{-1}$$

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

$$\text{Rendimiento objetivo} = 1,8 \text{ t ha}^{-1} + 0,63 \text{ t ha}^{-1} = 2,43 \text{ t ha}^{-1}$$

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

$$\text{Requerimiento de P} = 7,33 \text{ kg de P t}^{-1} \times 2,43 \text{ t ha}^{-1} = 17,81 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

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 %.

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

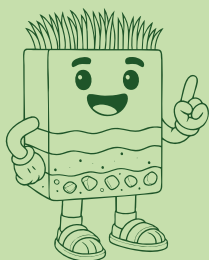
$$\text{RM de P} = \frac{17,81 \text{ kg de P ha}^{-1}}{0,3} = 59,37 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

De esta manera, el requerimiento de mantenimiento de fósforo en el cultivo de cacao es 59,37 kg por hectárea.

Ejemplo práctico (criterio de mantenimiento y construcción)

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

Para este cultivo, el umbral crítico o nivel de suficiencia es de 15 mg de P-Bray por kg de suelo y el rendimiento potencial es de 3 t ha⁻¹. El análisis de correlación y calibración indica que el nivel obtenido de 5 mg de P-Bray por kg de suelo permite obtener un rendimiento relativo (RR) del 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-Bray por kg de suelo, utilizando la Fórmula 2.

$$\text{Rendimiento alcanzado} = \frac{30 \times 3 \text{ t ha}^{-1}}{100} = 0,9 \text{ t ha}^{-1}$$

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.

$$\text{Incremento de raíces y brotes} = 0,35 \times 0,9 \text{ t ha}^{-1} = 0,32 \text{ t ha}^{-1}$$

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

$$\text{Rendimiento objetivo} = 0,9 \text{ t ha}^{-1} + 0,32 \text{ t ha}^{-1} = 1,22 \text{ t ha}^{-1}$$

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

$$\text{Requerimiento de P} = 7,33 \text{ kg de P t}^{-1} \times 1,22 \text{ t ha}^{-1} = 8,94 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

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

$$\text{RM de P} = \frac{8,94 \text{ kg de P ha}^{-1}}{0,2} = 44,7 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

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

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

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

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

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

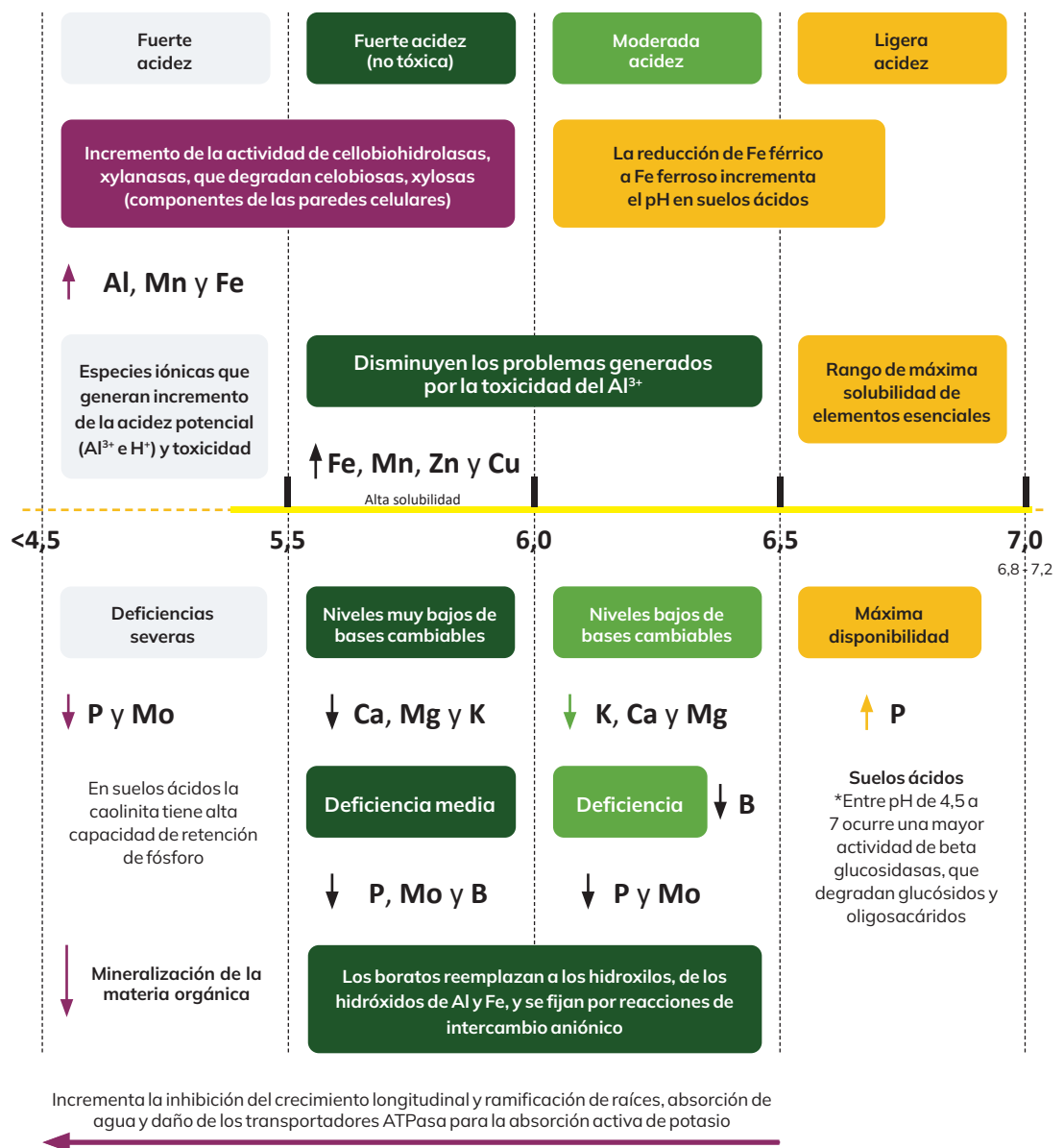
$$\text{Dosis de fertilización P} = 44,7 \text{ kg de P ha}^{-1} + 13,5 \text{ kg de P ha}^{-1} = 58,2 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

De esta manera, el requerimiento de mantenimiento y construcción de fósforo en el cultivo de cacao es 58,2 kg de P por hectárea.

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

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

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



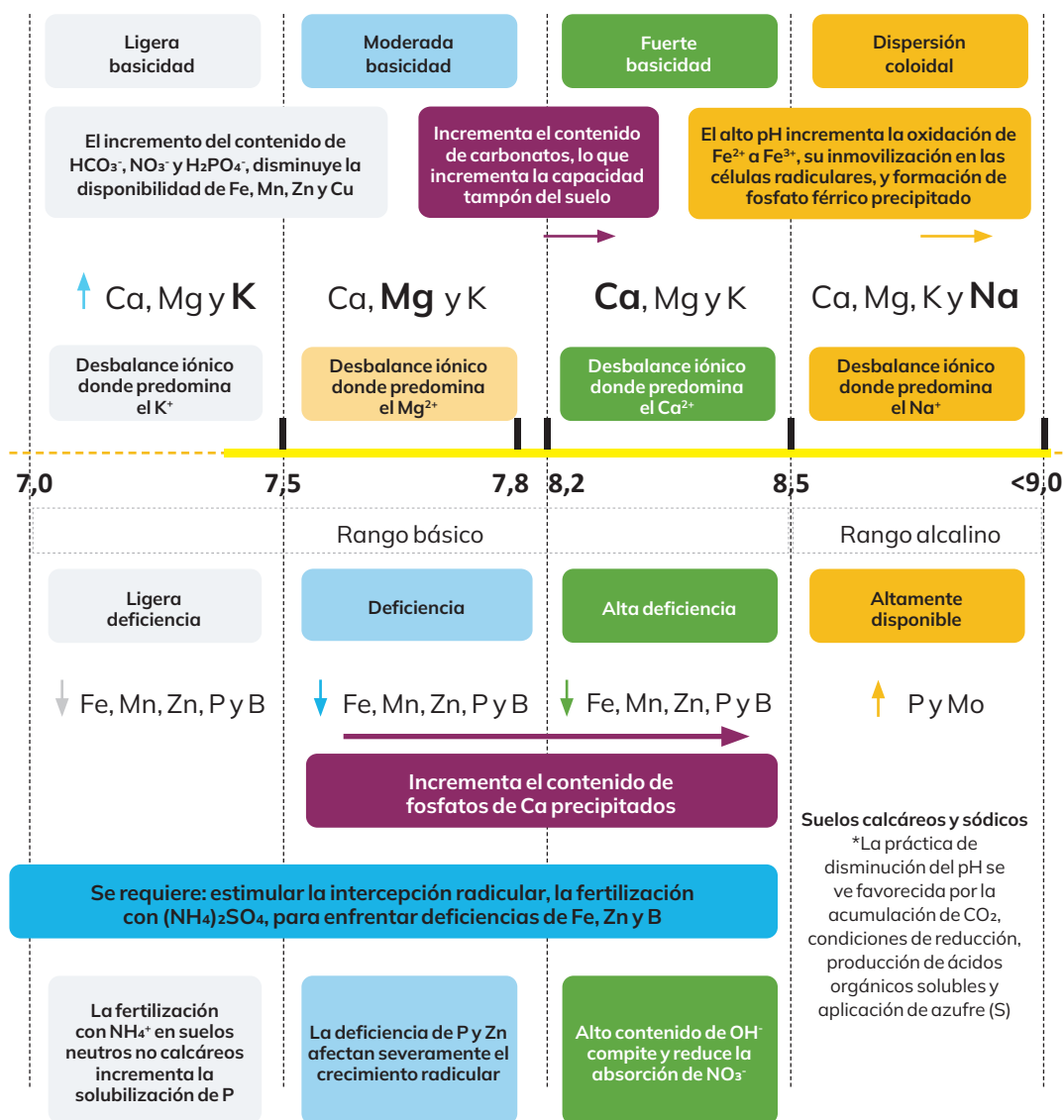


Figura 4. Diagnóstico de la fertilidad del suelo en función al pH

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 San Bernardo

3.1. Ubicación

El muestreo se realizó específicamente en el Centro Experimental San Bernardo, sede de la EEA San Bernardo, ubicado en el distrito de Tambopata, provincia de Tambopata, departamento de Madre de Dios (Figura 5), con una extensión total de 248,39 ha. El área se sitúa a 205 m s. n. m. en la región natural Selva Baja u Omagua, con precipitaciones promedio anuales de 2459 mm y temperaturas medias anuales de 19 °C a 30 °C (Cruz-Luis et al., 2025).

En la EEA San Bernardo se realizan trabajos de investigación, producción de material genético de plantas y animales, además de brindar asistencias técnicas y otros servicios a los agricultores de la región Madre de Dios. Los cultivos priorizados para estas actividades son: piña (*Ananas comosus* L. Merr.), platano (*Musa paradisiaca* L.), cacao (*Theobroma cacao* L.) y maíz amarillo duro (*Zea mays* L. var. Indurata.) (Cruz-Luis et al., 2025)

Ubicación departamental



Ubicación provincial



Ubicación distrital



EEA SAN BERNARDO



Figura 5. Ubicación de la sede de la EEA San Bernardo

3.2. Muestreo estratificado del suelo

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

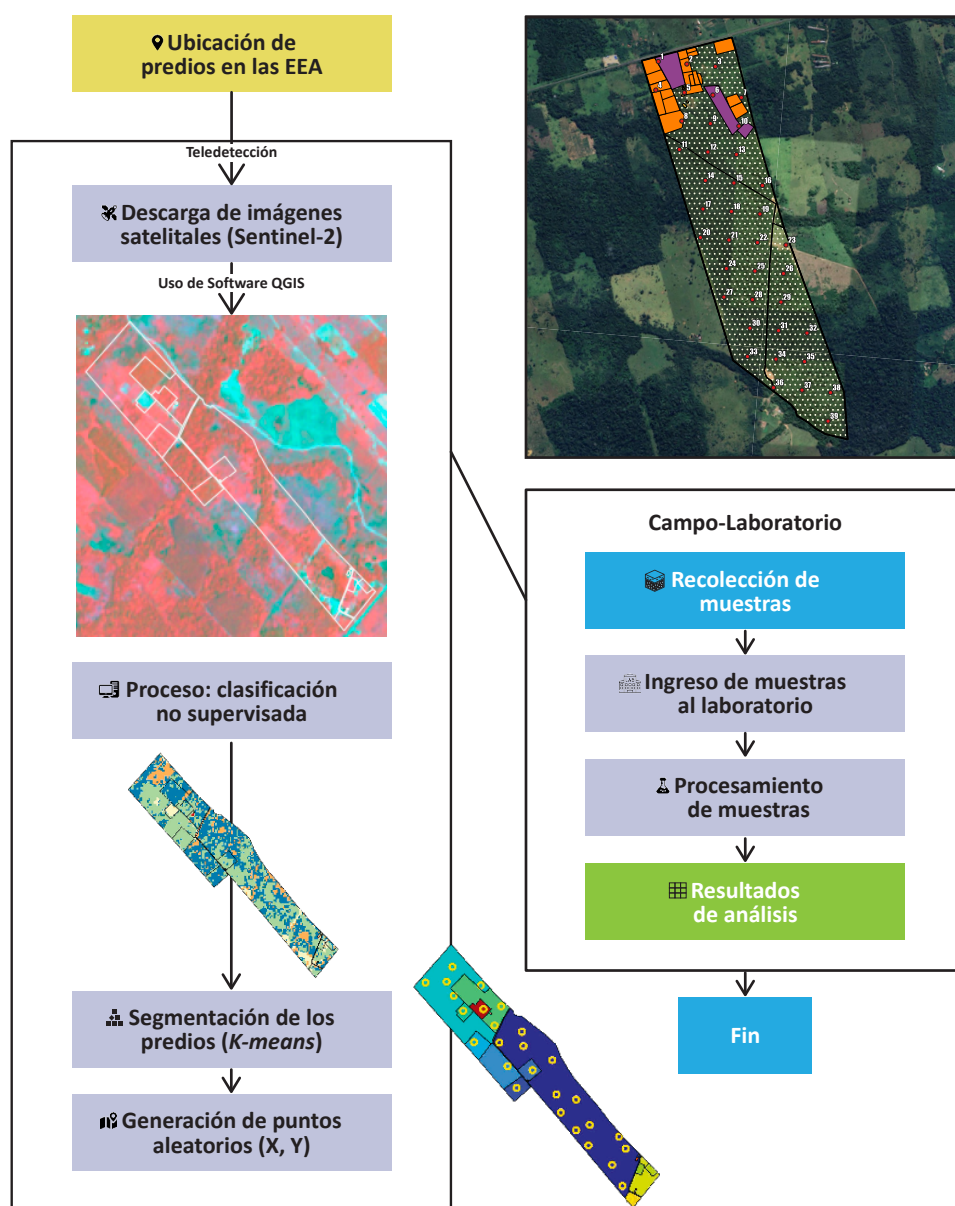


Figura 6. Flujo de trabajo para la determinación de los puntos de muestreo

3.2.1. Determinación de los puntos de muestreo

El primer paso para la determinación de los puntos de muestreo fue la descarga de las imágenes satelitales del servidor de Sentinel-2 para identificar las clases de cobertura, utilizando el algoritmo de clasificación no supervisada *K-means*. Luego, se usó el software R (R Core Team, 2018) para determinar los puntos de muestreo utilizando la función *spsample* del paquete *sp* (Pebesma y Bivand, 2005) (Figura 6). El *script* R generó las coordenadas de los puntos de muestreo según cada clase determinada, mediante el método de muestreo estratificado. Se identificaron en total 39 puntos de muestreo de suelos, como se observa en la Figura 7.

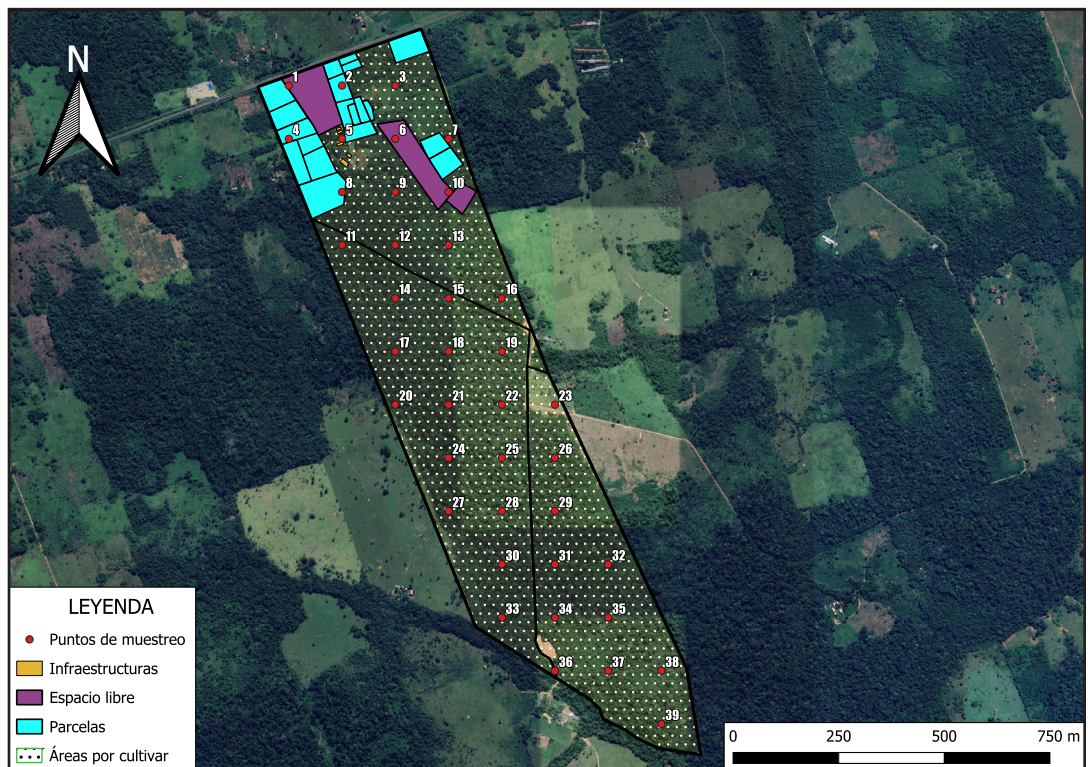


Figura 7. Puntos de muestreo de suelos en la sede de la EEA San Bernardo

3.2.2. Muestreo de suelos en los puntos identificados

Una vez identificadas las coordenadas de los 39 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 obtenidas las muestras, estas deben ser llevadas a un laboratorio de análisis de suelos, preferentemente que cuente con métodos acreditados. En este trabajo, las muestras fueron llevadas al Laboratorio de Suelos, Aguas y Foliare de la EEA Illpa para su procesamiento. El primer pretratamiento realizado fue el secado de las muestras a temperatura de 35 °C durante 48 horas. Posteriormente, se procedió con los análisis correspondientes (Tabla 1).

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

Parámetro	Método de análisis	Referencias
Porcentaje de arena, limo y arcilla	Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000. Método de densímetro tipo Bouyoucos	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT, 2002)
pH (1:2,5)	Método 9045D de la Agencia de Protección Ambiental (EPA)	Environmental Protection Agency (EPA, 2004)
Conductividad eléctrica (CE) (1:5)	ISO 11265: determinación de la conductividad eléctrica específica del suelo	International Organization for Standardization (ISO, 1994)
Carbonatos	Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000. Método del calcímetro	SEMARNAT (2002)
Materia orgánica (MO)	Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000. Método de Walkley y Black	SEMARNAT (2002)
N total	ISO 11261: determinación de Nitrógeno total por Kjeldahl Modificado	ISO (1995)
P disponible	Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000. Método Olsen	SEMARNAT (2002)
K disponible	Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000	SEMARNAT (2002)
Bases intercambiables	Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000. Extracción con acetato de amonio.	SEMARNAT (2002)

3.4. Resultados de los análisis de suelos

Los resultados se encuentran en la Tabla 2 y evidencian que los suelos presentan una textura franca a franco-arenoso, con predominio porcentual de arena (promedio = 40,35 %) y en menor proporción, arcilla (promedio = 22,42 %), reflejando también una dispersión importante de estas fracciones (CV de 54 a 49 %). Esta marcada heterogeneidad textural implica una capacidad de retención de agua y nutrientes intermedia, pero con zonas susceptibles a escurrimiento y riesgo de degradación estructural, especialmente ante riego excesivo o lluvia intensa.

Con respecto a las propiedades químicas del suelo, el pH es ácido (media = 4,24) con leve variabilidad espacial (CV = 16,6 %), lo que lo hace inadecuado para cultivos sensibles a la acidez y subraya la importancia de considerar enmiendas alcalinizantes para optimizar la disponibilidad de nutrientes. El contenido de materia orgánica es bajo (media = 1,70 %), mostrando tendencia típica de suelos tropicales manejados intensamente, y su dispersión (CV = 37,5 %) indica áreas degradadas que requieren programas de rehabilitación con incorporación de residuos vegetales o compost. Además, la conductividad eléctrica posee un promedio de 0,63 dS m⁻¹, y un valor máximo de 1,88 dS m⁻¹), cuyos valores no limitan el crecimiento y desarrollo de los cultivos.

Con respecto a la fertilidad, el nivel de nitrógeno es bajo y heterogéneo, acentuando la necesidad de prácticas de fertilización nitrogenada más ajustadas y localizadas. El fósforo disponible, en promedio se sitúa en el rango adecuado (22,63 mg kg⁻¹), pero muestra gran dispersión (CV = 56 %), lo que sugiere distribución irregular de fertilizantes o diferencias en capacidad de adsorción del suelo. Algo similar ocurre con el potasio disponible, cuyo rango y variabilidad (CV = 41 %) plantean el riesgo de zonas tanto deficitarias como excesivas en este nutriente.

Entre los cationes intercambiables, el calcio es el elemento predominante; sin embargo, presenta valores bajos (media = 1,40 cmol kg⁻¹) y una elevada variabilidad (CV = 120,6 %), comportamiento que también se observa en el magnesio (CV = 103,5 %). La marcada asimetría en la distribución de los valores de sodio y aluminio intercambiable sugiere la presencia de zonas puntuales con problemas de acidez y toxicidad, así como posibles procesos de salinización o sodicidad, condiciones que podrían afectar negativamente la estructura del suelo y, en consecuencia, su productividad. En este contexto, en áreas con problemas de acidez y elevados contenidos de aluminio intercambiable, donde puede verse comprometido el desarrollo radicular de muchas especies y reducirse la eficiencia del uso de fertilizantes, resulta fundamental la aplicación de cal agrícola y otras enmiendas correctivas, así como la implementación de estrategias de agricultura de precisión que permitan identificar y tratar de manera localizada las zonas críticas de degradación en el paisaje agrícola.

La alta heterogeneidad en los valores de fertilidad y acidez pone en evidencia la necesidad de un manejo estratificado, adaptado a la variabilidad real del suelo, y el empleo de herramientas geoestadísticas para un diagnóstico y restauración eficientes, asegurando así la sustentabilidad productiva y ambiental en la EEA San Bernardo.

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

Variable	Unidad	Media	SD	CV	Mediana	Mínimo	Máximo	Skewness
pH	und	4,24	0,71	16,66	4,2	3,1	5,9	0,52
CEe	dS m ⁻¹	0,63	0,42	66,09	0,51	0,18	1,88	1,39
MO	%	1,7	0,64	37,48	1,7	0,5	3,8	0,77
P disp.	mg kg ⁻¹	22,63	12,67	55,99	18,15	7,36	55,41	1,28
K disp.	mg kg ⁻¹	28,98	11,86	40,94	26,4	10,4	58,4	0,51
N total	%	0,09	0,03	35,6	0,09	0,03	0,19	0,78
Arena	%	40,35	21,83	54,11	43,87	3,1	79,71	-0,28
Arcilla	%	22,42	7,98	35,58	22,42	4,46	41,15	0,24
Limo	%	37,24	18,21	48,9	33,29	10,7	73,6	0,56
Ac. Int.	cmol kg ⁻¹	0,99	0,69	70,32	0,97	0,01	2,93	0,67
Al Int.	cmol kg ⁻¹	0,12	0,25	198,85	0,04	0,04	1,42	3,36
Ca ²⁺	cmol kg ⁻¹	1,4	1,69	120,66	0,53	0,06	6,33	1,19
K ⁺	cmol kg ⁻¹	0,1	0,04	35,8	0,1	0,02	0,19	0,36
Mg ²⁺	cmol kg ⁻¹	0,39	0,4	103,5	0,18	0,05	1,55	1,2
Na ⁺	cmol kg ⁻¹	1,2	0,4	33,57	1,13	0,7	2,96	1,85
CICe	cmol kg ⁻¹	4,07	1,85	45,55	3,53	1,66	9,17	0,79
PCI	%	26,09	22,39	85,8	15,53	2,65	69	0,71
PMI	%	7,94	5,34	67,19	5,23	1,76	22,34	0,82
PPI	%	2,78	1,21	43,53	2,74	0,82	7,94	1,6
PSI	%	34,09	14,18	41,59	33,94	9,9	72,71	0,33
Sat. Al	%	29,1	18,66	64,1	32,92	0,18	64,2	-0,18

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

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.

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

Donde:

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

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

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

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

3.7.1. Generación y ajuste del variograma

- 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:

- 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.

- 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 fisicoquímicas del suelo

Los resultados de la validación cruzada de las variables fisicoquímicas del suelo se presentan en la Tabla 3. La caracterización geoestadística de las propiedades fisicoquímicas del suelo en la EEA San Bernardo permitió identificar una amplia gama de grados de dependencia espacial entre las diferentes variables analizadas, evidenciando patrones de organización espacial muy heterogéneos y diferenciados dentro del área de estudio. Los modelos de ajuste empleados incluyeron funciones lineales, gaussianas y esféricas, lo cual reflejó distribuciones dominadas por la variabilidad local.

En términos generales, las variables analizadas presentaron una baja consistencia espacial, alcanzando valores máximos del coeficiente de determinación (R^2) de 0,44 para la ClCe, seguida del nitrógeno total, la materia orgánica (MO) y el pH con 0,36, el PCI con 0,35 y el calcio intercambiable con 0,34. Estas variables mostraron una distribución espacial relativamente homogénea, con rangos de influencia superiores a 491,62 m y valores de RMSE moderados, lo que indica una moderada continuidad y predictibilidad espacial, siendo posible identificar tendencias generales útiles para la planificación de enmiendas y la implementación de prácticas de manejo diferenciado. El ajuste de los datos a modelos lineales o “*linear to sill*” sugiere procesos edáficos relativamente controlados, aunque con una influencia significativa de la variabilidad local. En este sentido, en algunos casos resulta necesario complementar el análisis geoestadístico con enfoques multivariados que permitan mejorar la precisión en la delimitación de unidades edáficas.

Por otro lado, las variables arena, limo, arcilla, fósforo disponible (P disponible), potasio disponible (K disponible) y los cationes intercambiables (Na^+ , K^+ , Mg^{2+}) presentaron una muy baja predictibilidad espacial, con R^2 inferiores a 0,3 y valores de RMSE bajos, entre 0,03 y 13,78. La estructura espacial de estos atributos fue débil o prácticamente aleatoria, lo que podría estar asociado a la influencia de procesos deposicionales, factores topográficos y limitaciones del diseño de muestreo. Este comportamiento dificulta la generación de mapas temáticos precisos y evidencia la necesidad de incrementar la densidad de muestreo, así como de incorporar metodologías de interpolación más robustas para mejorar la confiabilidad en la caracterización espacial de estas propiedades del suelo.

En conjunto, estos resultados indican que tanto las propiedades físicas como químicas evaluadas presentan una baja organización espacial a la escala de estudio, lo que sugiere una predominancia de la variabilidad local sobre patrones espaciales estructurados. En este contexto, el uso de enfoques geoestadísticos sigue siendo útil para identificar tendencias generales; sin embargo, su capacidad predictiva es limitada para variables dominadas por la heterogeneidad puntual, lo que refuerza la necesidad de ajustar los diseños de muestreo y complementar el análisis con metodologías adicionales cuando se requiera una mayor precisión en la delimitación espacial.

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

Variable	Model	Nugget (C ₀)	Sill (C ₀ +C)	Range (m)	Cross-validation	
					RMSE	R ²
Arena	<i>Linear</i>	157,26	186,91	1309,27	13,78	0,2
Limo	<i>Gaussian</i>	51,4	83,72	743,79	8,11	0,17
Arcilla	<i>Linear</i>	34,28	38,43	1343,83	6,51	0,07
pH	<i>Linear to Sill</i>	0,06	0,22	1430,06	0,32	0,36
CEe	<i>Spherical</i>	0,07	0,23	1355,65	0,36	0,3
MO	<i>Spherical</i>	0,1	0,41	1726,66	0,44	0,36
N total	<i>Spherical</i>	2×10^{-3}	4×10^{-3}	1661,53	0,02	0,36
P disp.	<i>Linear to Sill</i>	8,98	14,49	1410,79	3,52	0,06
K disp.	<i>Spherical</i>	57,19	96,74	1054,88	9,03	0,1
Ca ²⁺	<i>Linear to Sill</i>	0,01	0,06	761,27	0,19	0,34
Mg ²⁺	<i>Linear to Sill</i>	3×10^{-3}	0,01	554,39	0,07	0,14
Na ⁺	<i>Linear to Sill</i>	0,03	0,04	1340,23	0,19	0,14
K ⁺	<i>Linear</i>	3×10^{-3}	4×10^{-3}	1239	0,03	0,04
Al ³⁺	<i>Linear</i>	0,18	0,42	1437,67	0,52	0,23
Al Int.	<i>Linear</i>	0,03	0,05	1390,16	0,2	0,04
CICe	<i>Linear to Sill</i>	0,23	1,02	1662,01	0,62	0,44
PCI	<i>Linear to Sill</i>	7,68	52,24	491,62	5,72	0,35
PMI	<i>Linear</i>	7,03	5,85	1133,38	2,71	0,03
PPI	<i>Linear to Sill</i>	0,8	1,05	1863,93	0,98	0,03
PSI	<i>Linear to Sill</i>	20,17	104,83	574,25	8,69	0,27
Sat. Al	<i>Gaussian</i>	96,33	173,76	758,83	11,7	0,12

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, Sat. Al: saturación de aluminio.

3.9. Mapeo digital de las propiedades del suelo

Las propiedades del suelo se han representado en los respectivos mapas interpolados (Figura 9-28), mostrando la variación espacial de las características físicas y químicas de los suelos de la sede de la EEA San Bernardo. Los mapas generados muestran gradientes espaciales bien definidos en diversas propiedades edáficas, reflejando patrones de distribución que permiten identificar zonas de manejo homogéneas y diferenciar áreas según la variabilidad real del suelo. Esta organización espacial observada está condicionada tanto por el material parental como por las prácticas de manejo agrícola, lo cual da lugar a una estructura edáfica compleja con transiciones evidentes en textura, fertilidad y acidez del suelo.

El pH presenta un patrón de variación marcado por sectores extensos de clasificación moderada a fuertemente ácida, particularmente asociada a mayores contenidos de materia orgánica o sectores con drenaje poco eficiente. Estas variaciones sostienen decisiones de manejo específicas, como la aplicación de enmiendas calcáreas y el ajuste de la fertilización fosfatada conforme a la reacción del suelo, previniendo deficiencias de micronutrientes sensibles a la acidez.

El potasio disponible muestra una distribución espacial heterogénea, donde las mayores concentraciones se asocian con texturas francas a arcillosas y una mayor saturación de bases. Este patrón justifica la aplicación diferenciada de fertilizantes potásicos: se pueden reducir en sectores con suficiente contenido y enfocar en aquellas áreas deficitarias, optimizando la eficiencia del uso de insumos y reduciendo costos sin comprometer el rendimiento de los cultivos.

El calcio intercambiable muestra una distribución heterogénea, cubriendo la mayor parte de la estación con niveles considerados bajos para el desarrollo de las plantas. Las variaciones graduales de este elemento indican una capacidad de intercambio catiónico heterogénea a lo largo de la sede de la EEA San Bernardo y refuerzan las condiciones edáficas favorables para el suministro de macronutrientes secundarios. Las áreas con menor contenido pueden delimitarse para la aplicación específica de correctivos calcáreos.

El magnesio y el sodio intercambiables presentan una distribución espacial caracterizada por gradientes suaves y variaciones localizadas, reflejando tanto la heterogeneidad mineralógica del suelo como la influencia de las prácticas agrícolas históricas. El magnesio se mantiene, en general, en niveles regulares, aunque se identificaron algunas microzonas con menores concentraciones que requieren un monitoreo más detallado. Por su parte, el sodio presenta niveles relativamente altos en la mayor parte del área de estudio; sin embargo, esta condición no constituye un indicio de salinización ni de sodicidad, debido al bajo pH, la conductividad eléctrica inferior a 4 dS/m y las elevadas precipitaciones características de los suelos de selva, las cuales favorecen el lavado de sales. En este contexto, la aplicación de enmiendas calcáreas podría contribuir a corregir la acidez del suelo y mejorar la disponibilidad de magnesio, particularmente en las zonas donde se identificaron niveles más bajos de este nutriente.

El aluminio y la acidez intercambiable se concentran en áreas específicas, particularmente en sectores de mayor acidez o drenaje limitado, indicando la necesidad de seguimiento puntual y posibles intervenciones localizadas para mitigar cualquier impacto negativo en el desarrollo radicular y la absorción de nutrientes.

En cuanto a las fracciones texturales, la arena, limo y arcilla muestran patrones de distribución que delimitan sectores con suelos franco-arenosos frente a otros de textura más fina. Estas diferencias texturales controlan directamente la retención de humedad, la aireación y el comportamiento de los nutrientes, determinando la respuesta a la fertilización y la frecuencia de riego recomendada.

Las zonas más arenosas necesitarán reposiciones de nutrientes más frecuentes, mientras que las de textura fina permiten una gestión más eficiente y sostenida.

En resumen, los mapas espaciales elaborados para la EEA San Bernardo evidencian patrones de variación que contribuyen a comprender la distribución de las propiedades del suelo y proporcionan información útil para la planificación de estrategias de manejo de la fertilidad. No obstante, debido a la precisión moderada y baja de los modelos empleados, estos mapas deben interpretarse como herramientas orientativas más que como representaciones exactas para la toma de decisiones específicas a nivel de campo. En este contexto, su principal utilidad radica en la identificación de tendencias espaciales generales y en el apoyo a la planificación de muestreos más detallados que permitan mejorar el conocimiento de la variabilidad del suelo.

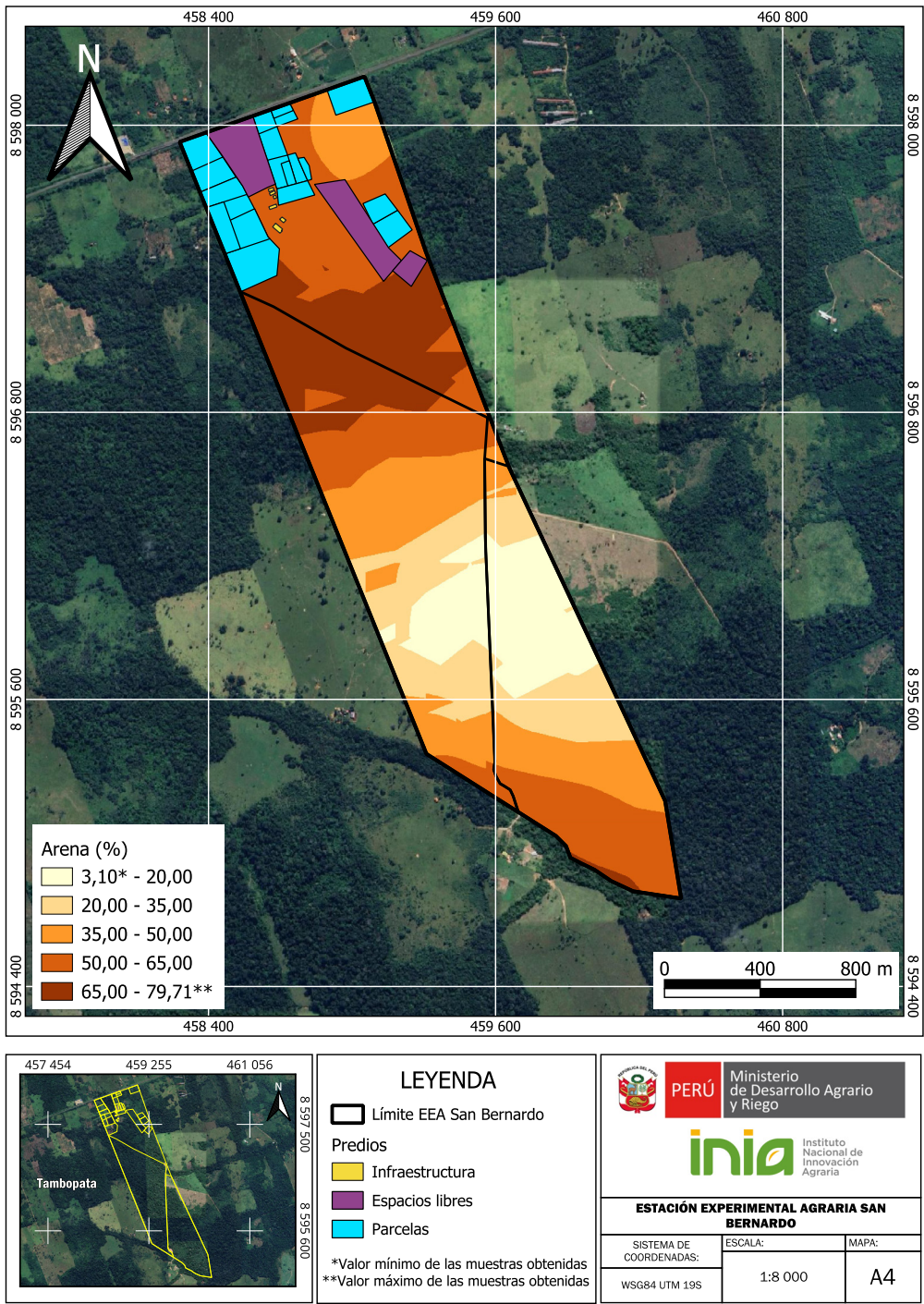


Figura 9. Mapa de variación espacial del porcentaje de arena

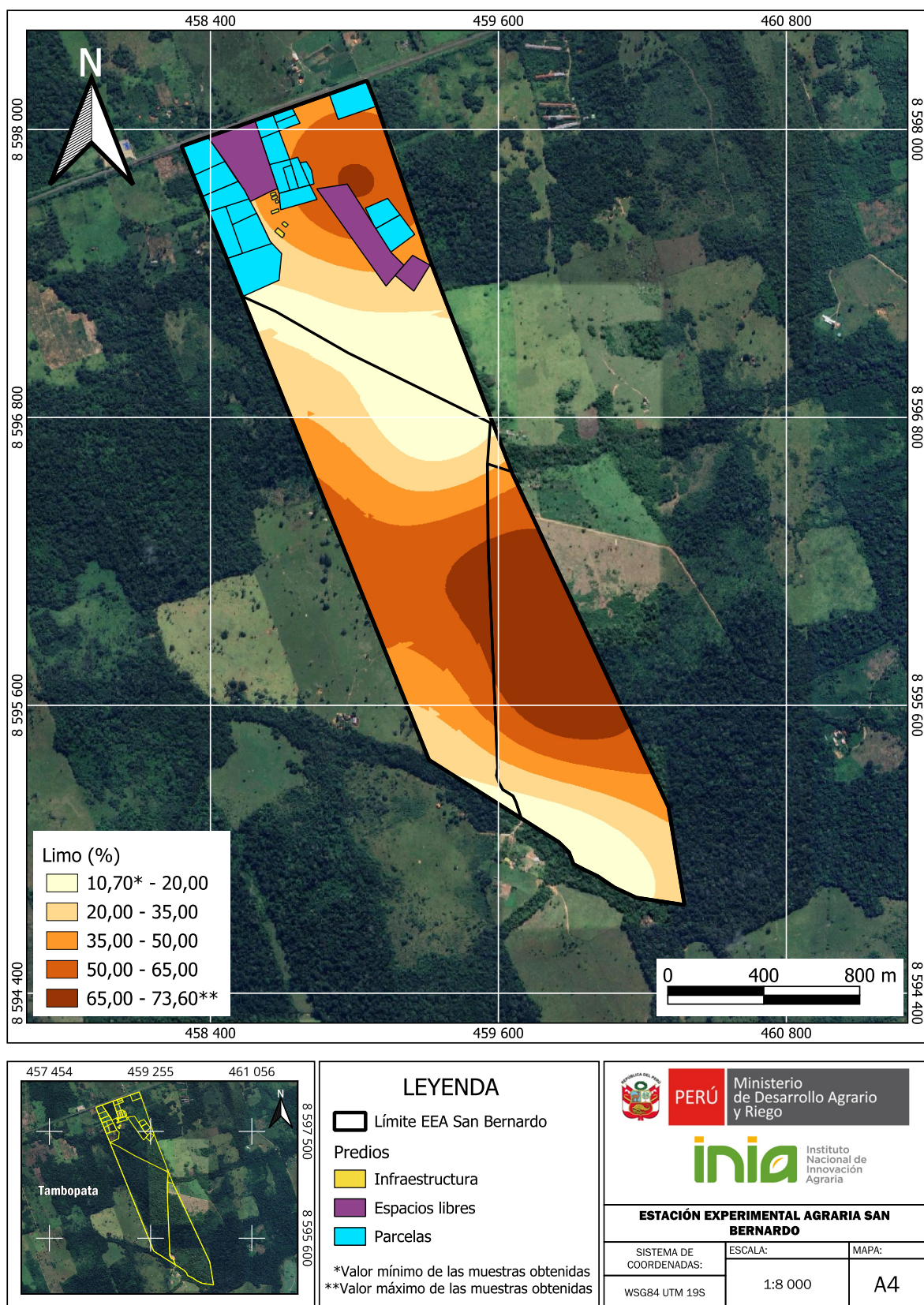


Figura 10. Mapa de variación espacial del porcentaje de limo

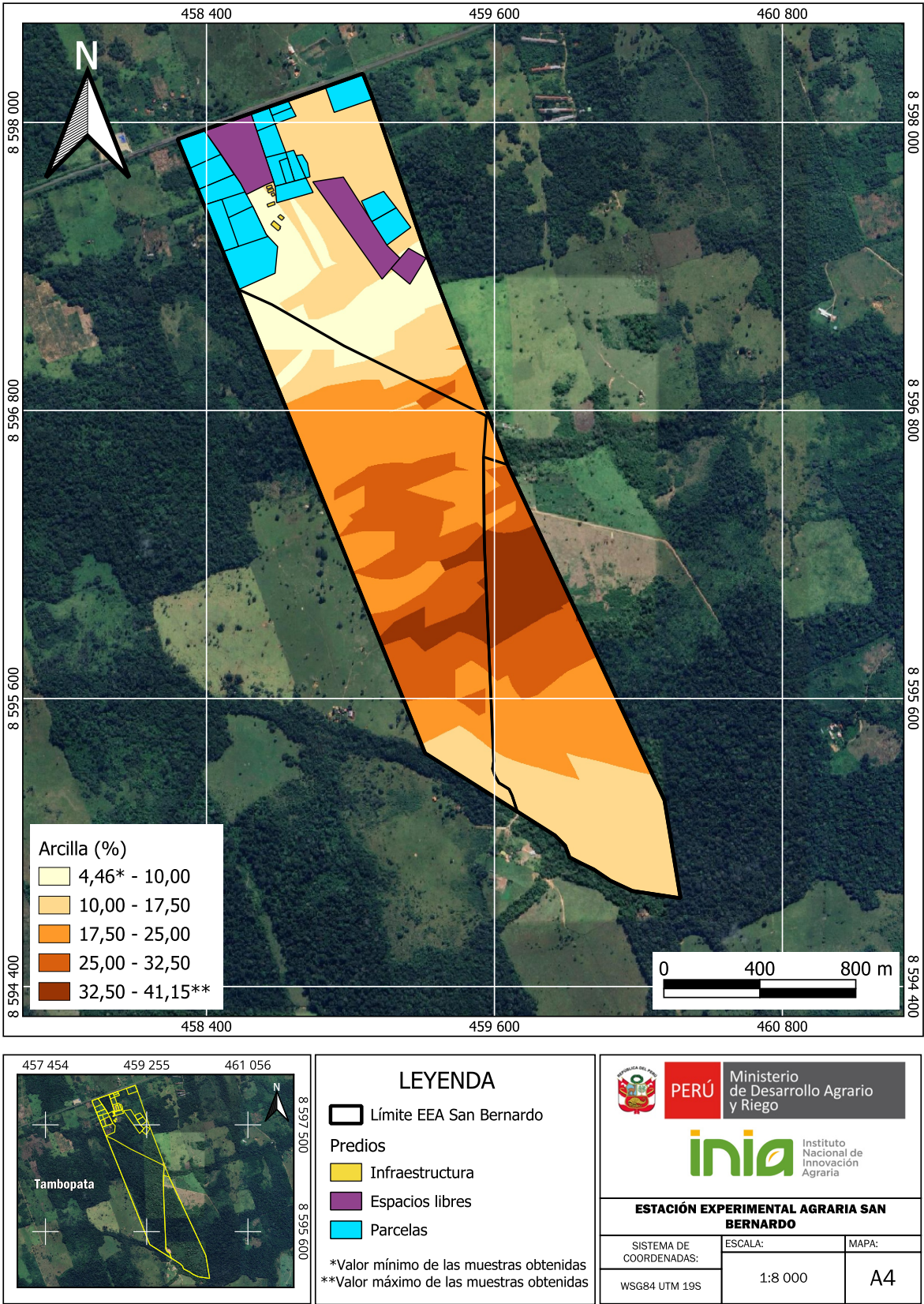


Figura 11. Mapa de variación espacial del porcentaje de arcilla

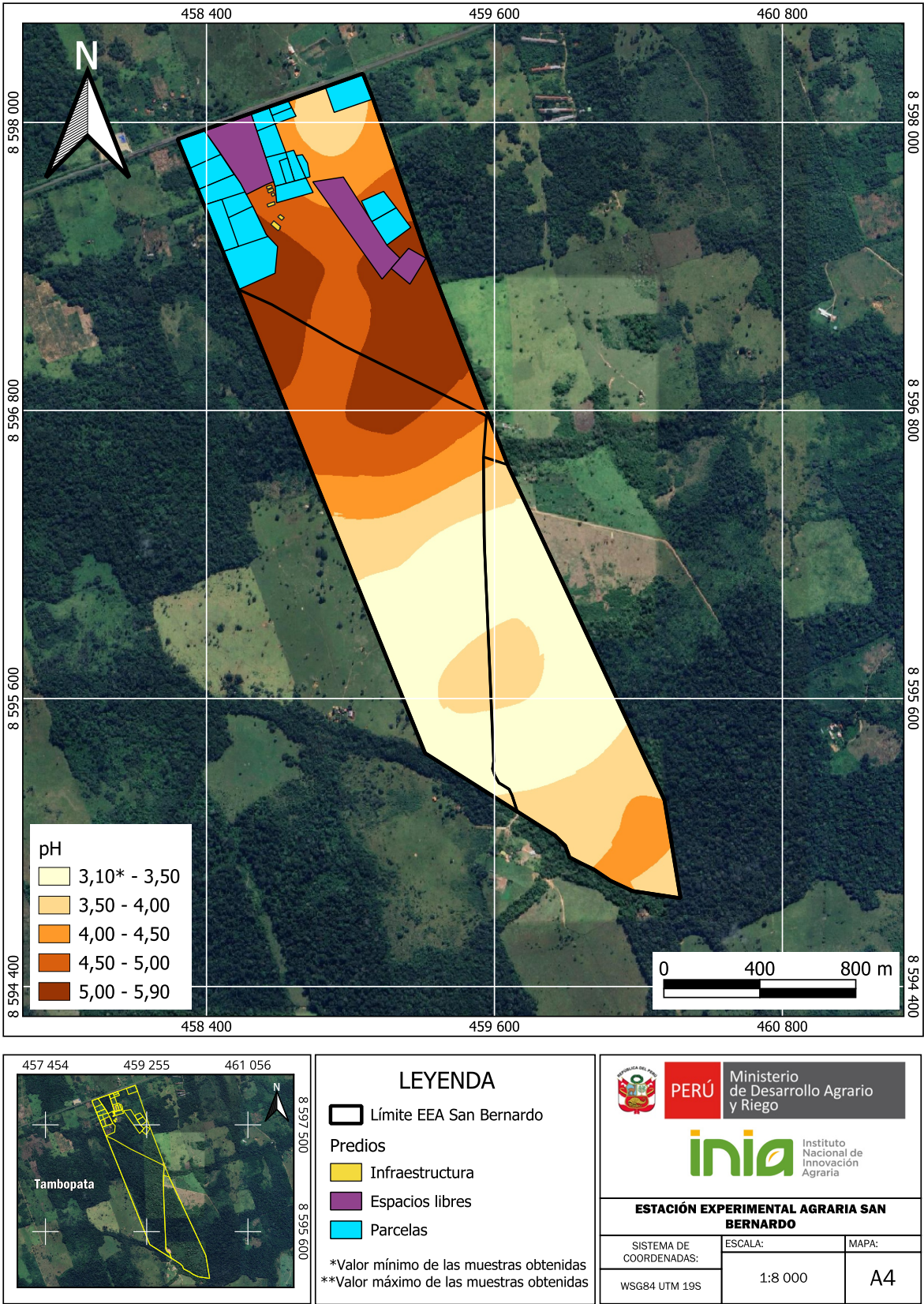


Figura 12. Mapa de variación espacial del pH

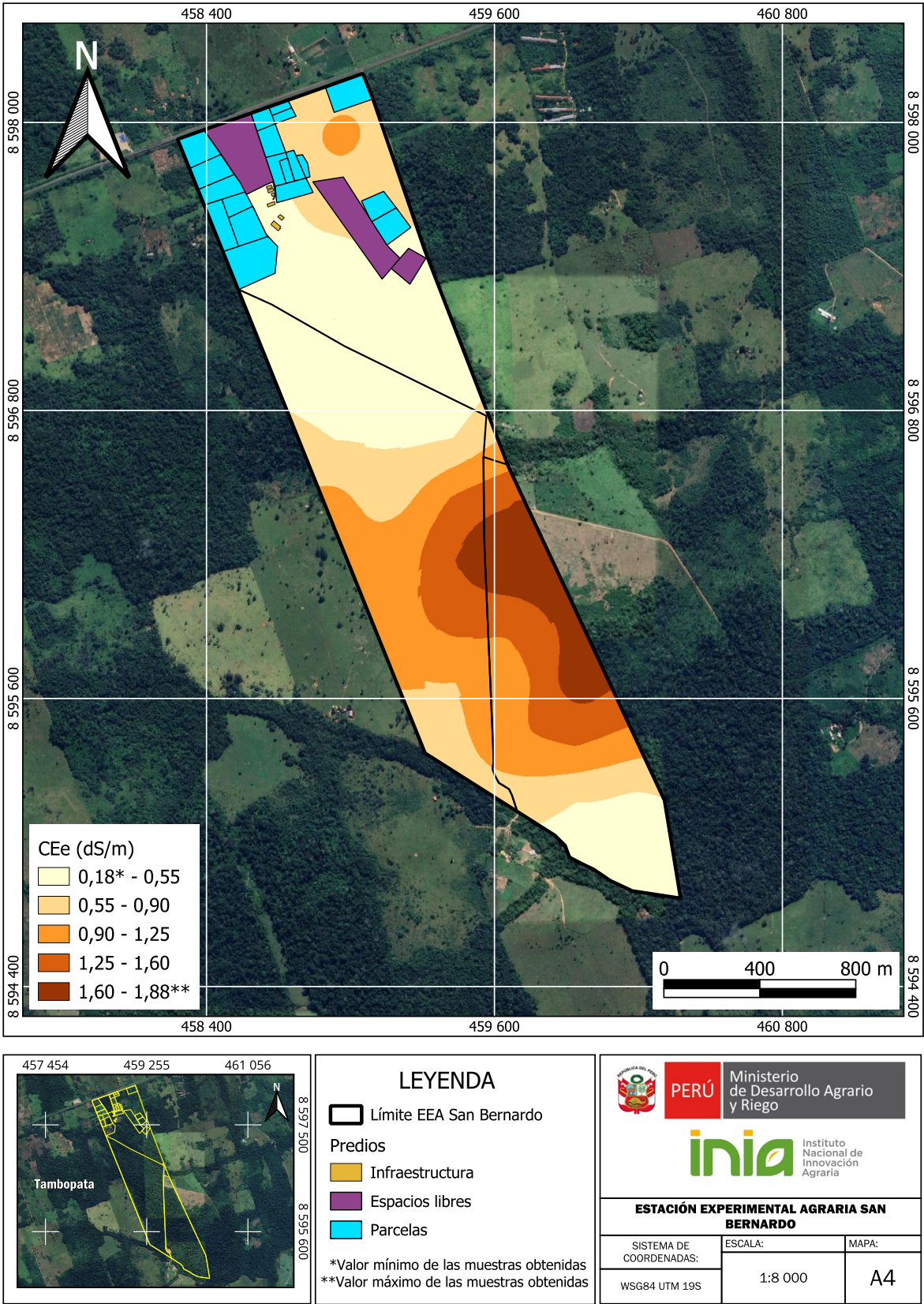


Figura 13. Mapa de variación espacial de la conductividad eléctrica en extracto de saturación

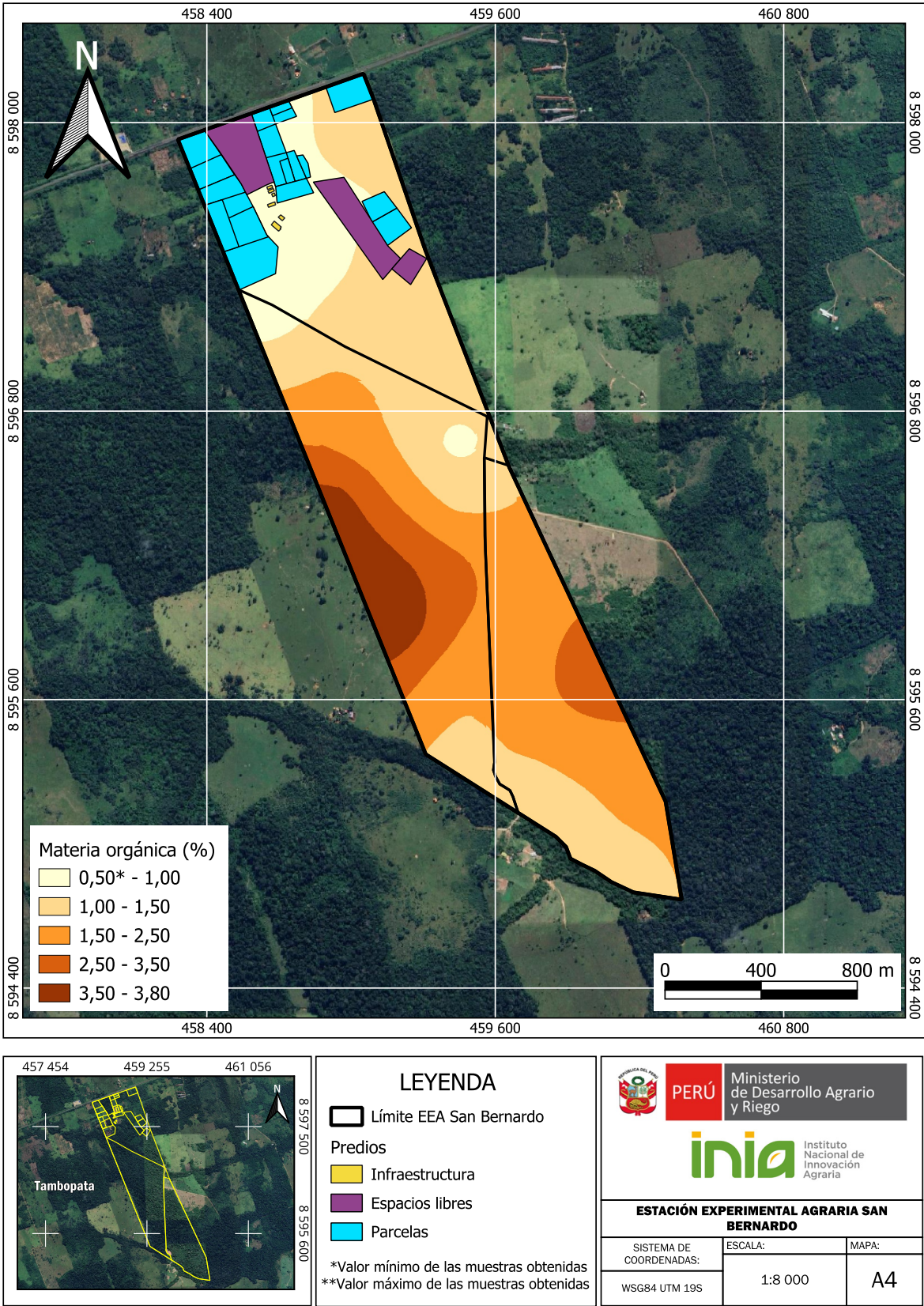


Figura 14. Mapa de variación espacial del porcentaje de materia orgánica

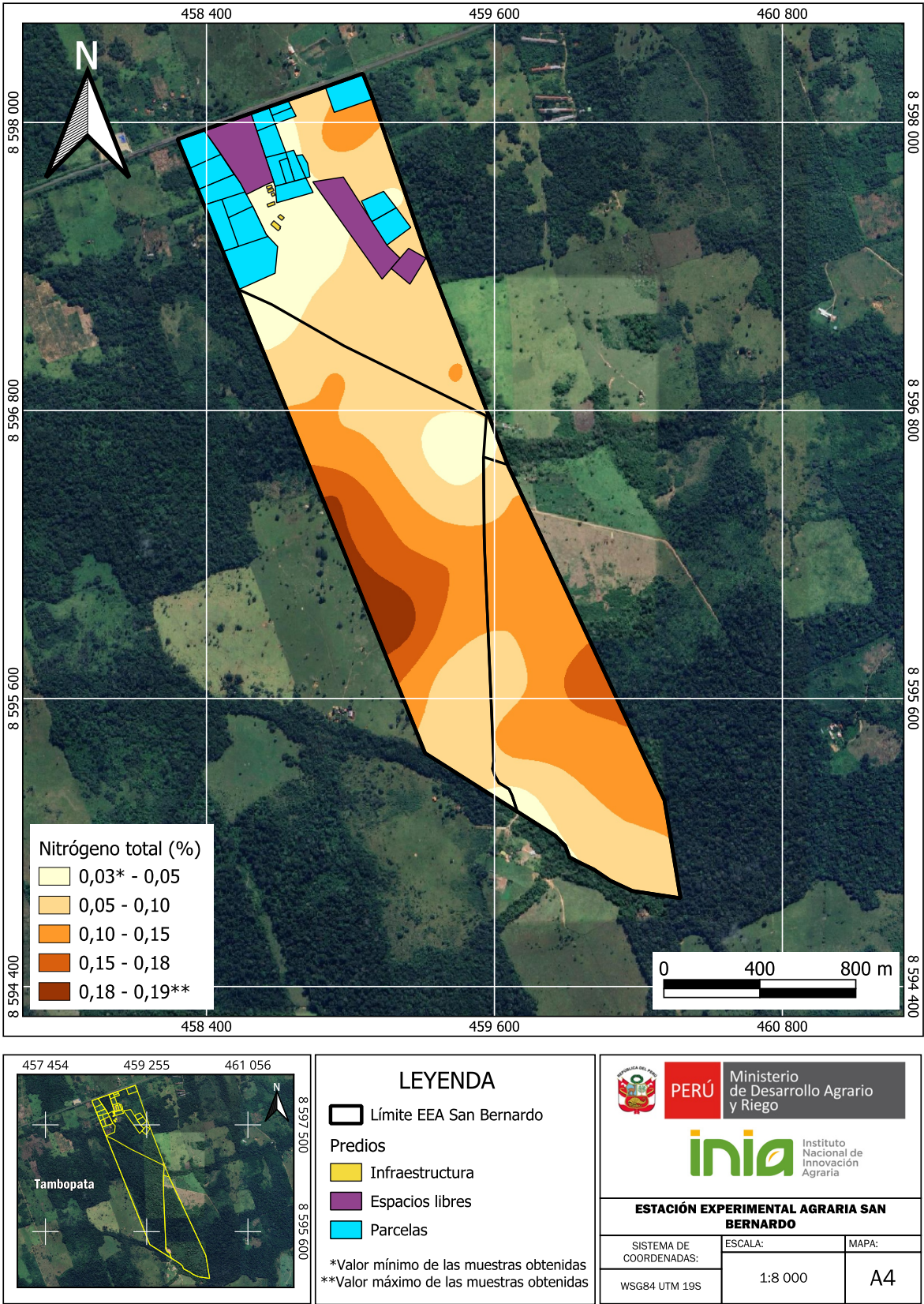


Figura 15. Mapa de variación espacial del porcentaje de nitrógeno total

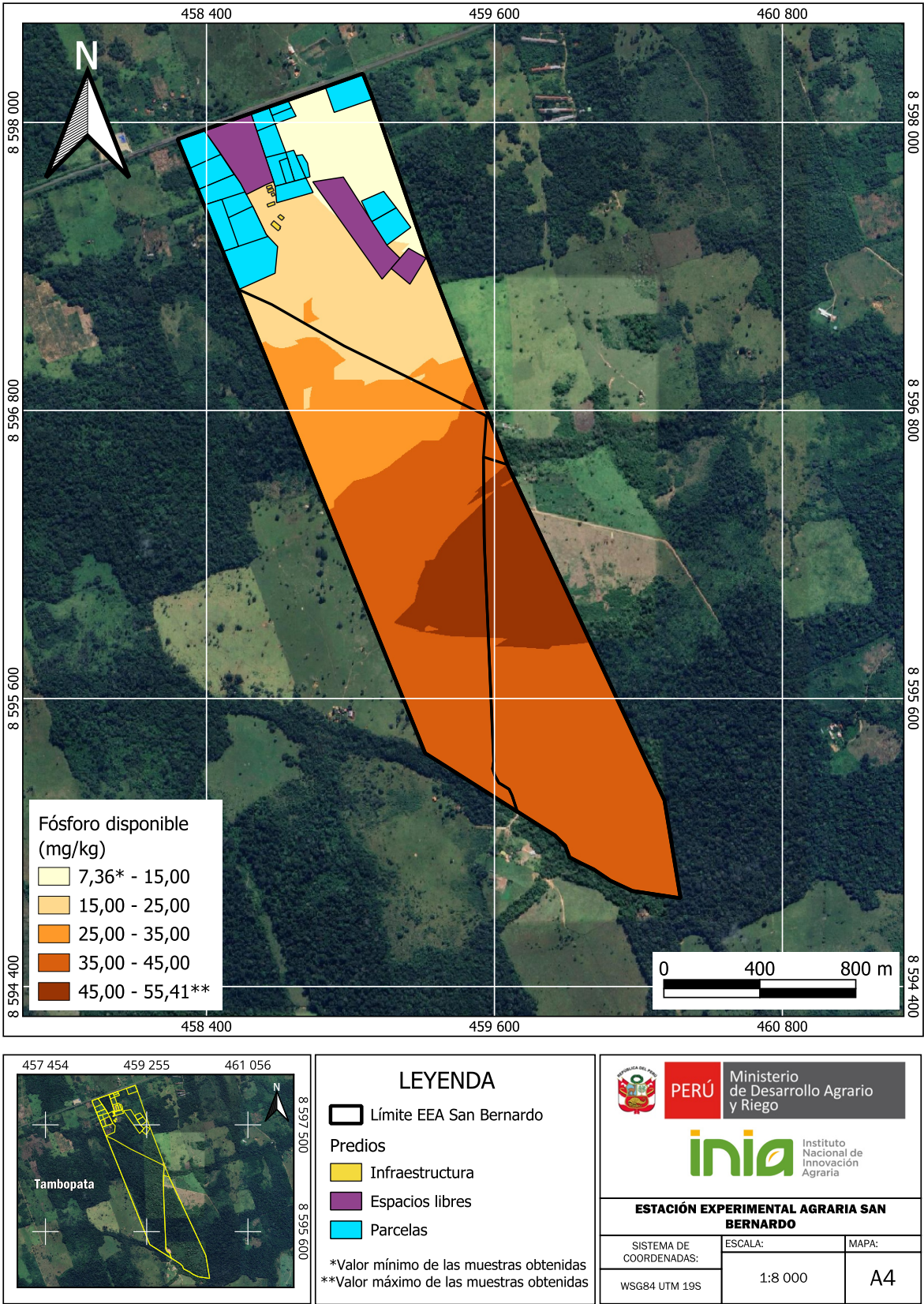


Figura 16. Mapa de variación espacial del fósforo disponible

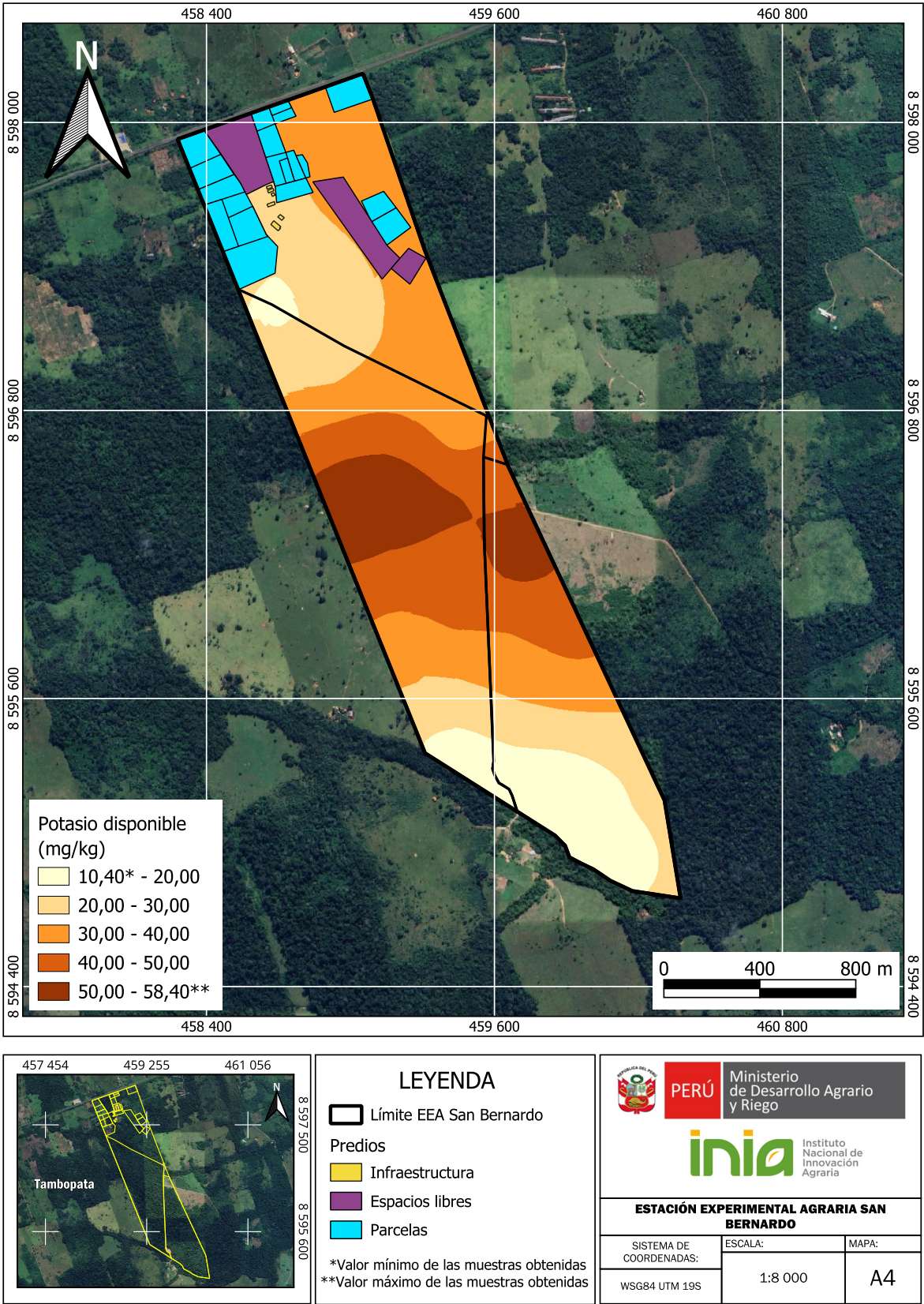


Figura 17. Mapa de variación espacial del potasio disponible

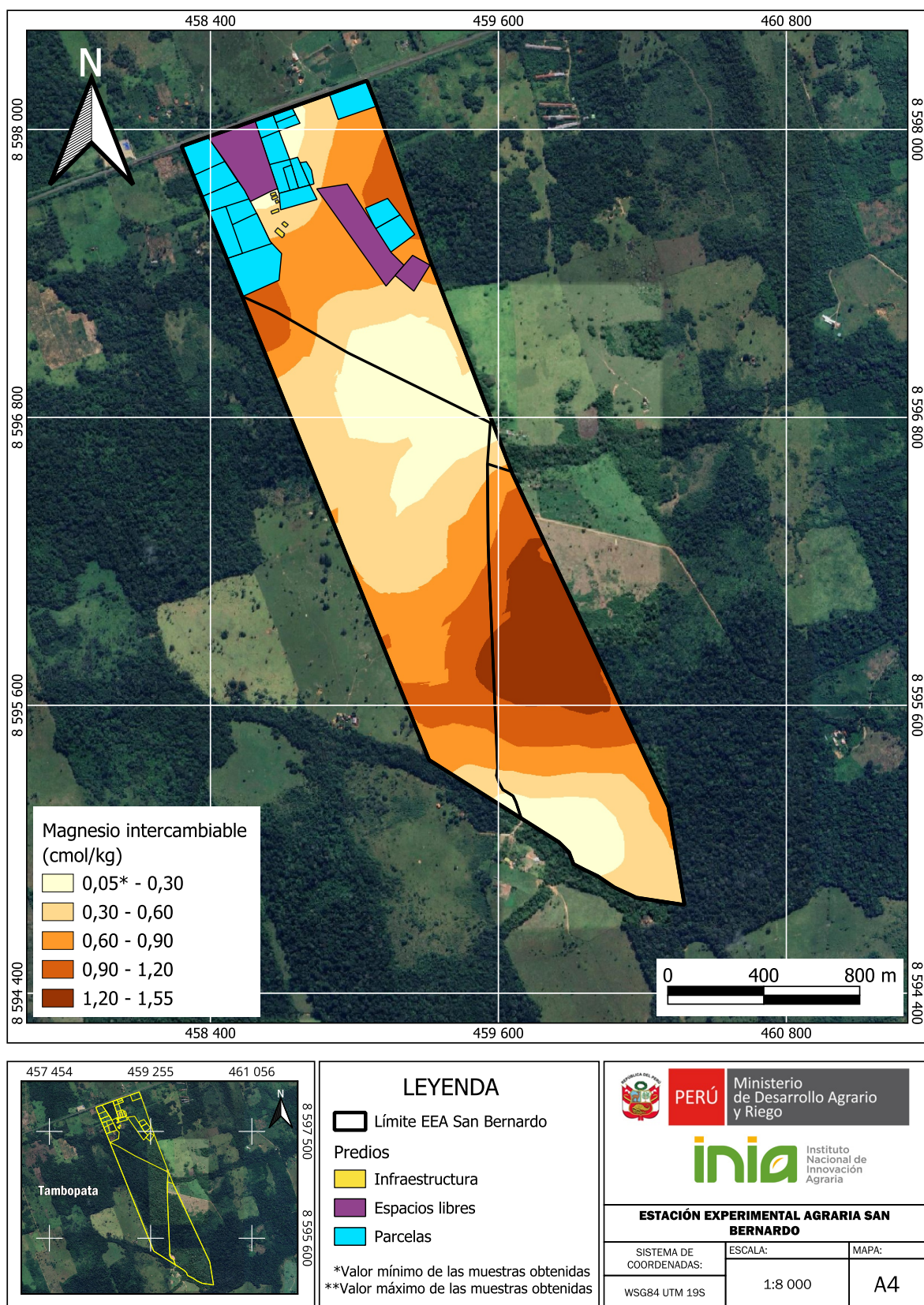


Figura 18. Mapa de variación espacial del magnesio intercambiable

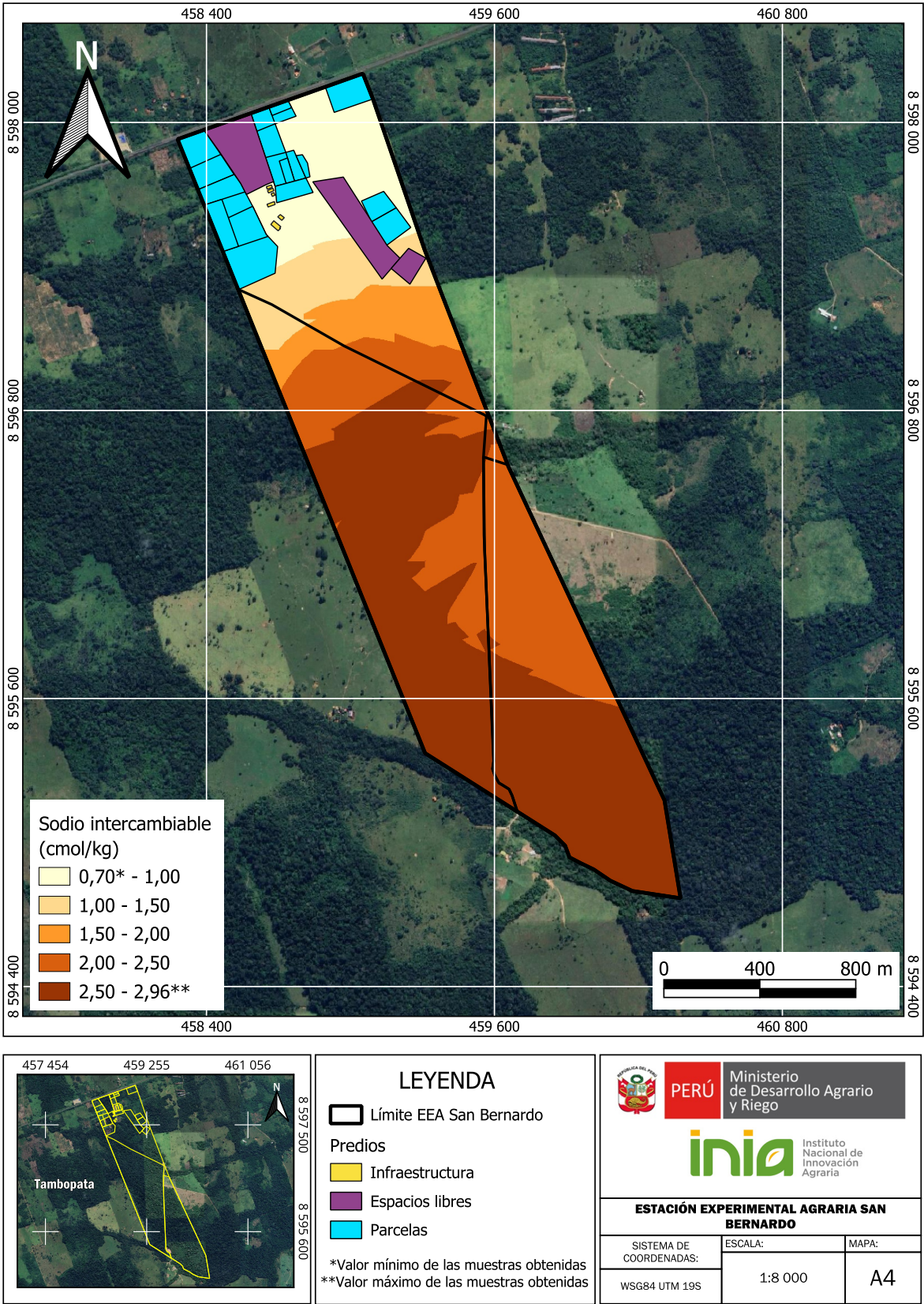


Figura 19. Mapa de variación espacial del sodio intercambiable

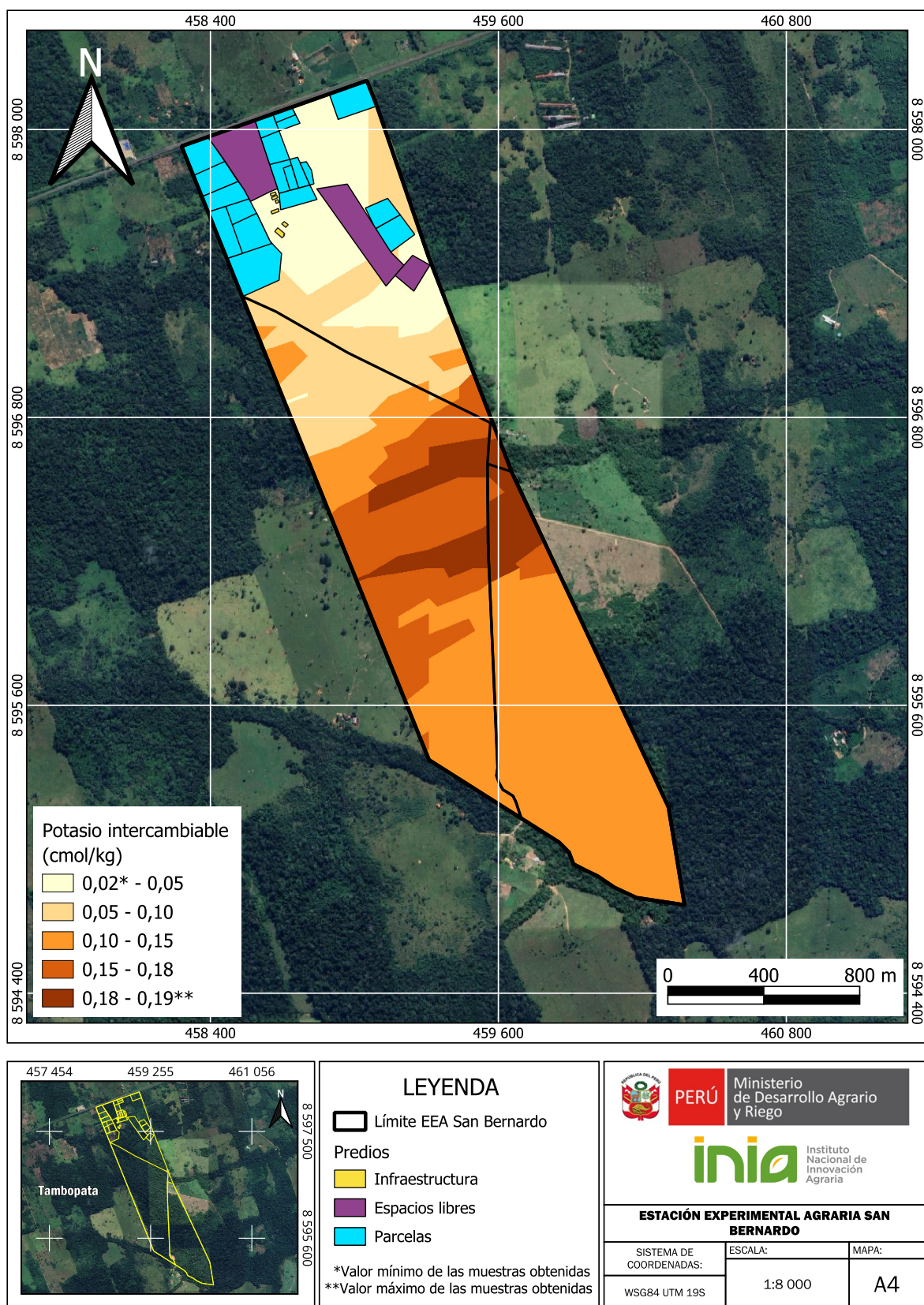


Figura 20. Mapa de variación espacial del potasio intercambiable

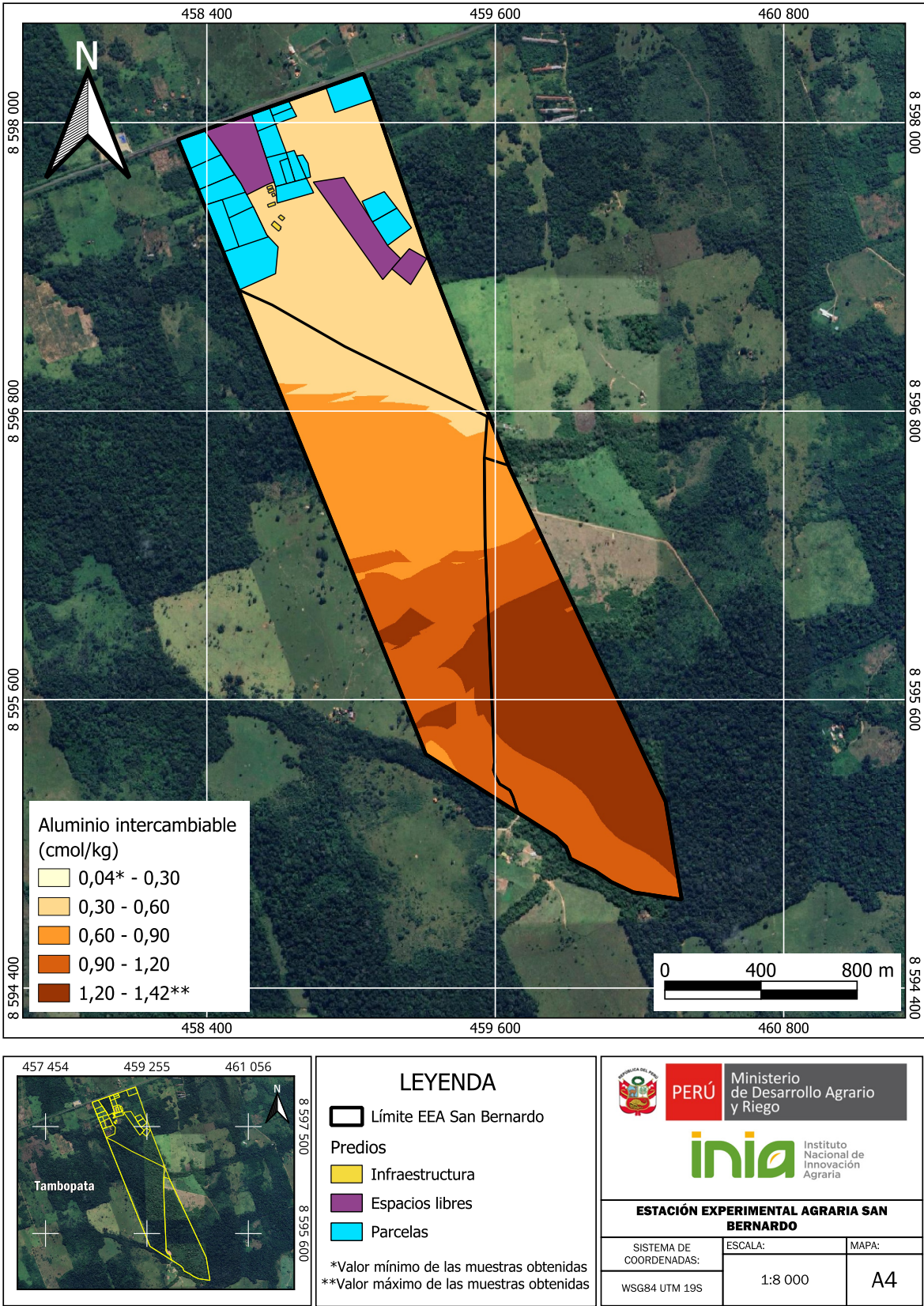


Figura 21. Mapa de variación espacial del aluminio intercambiable

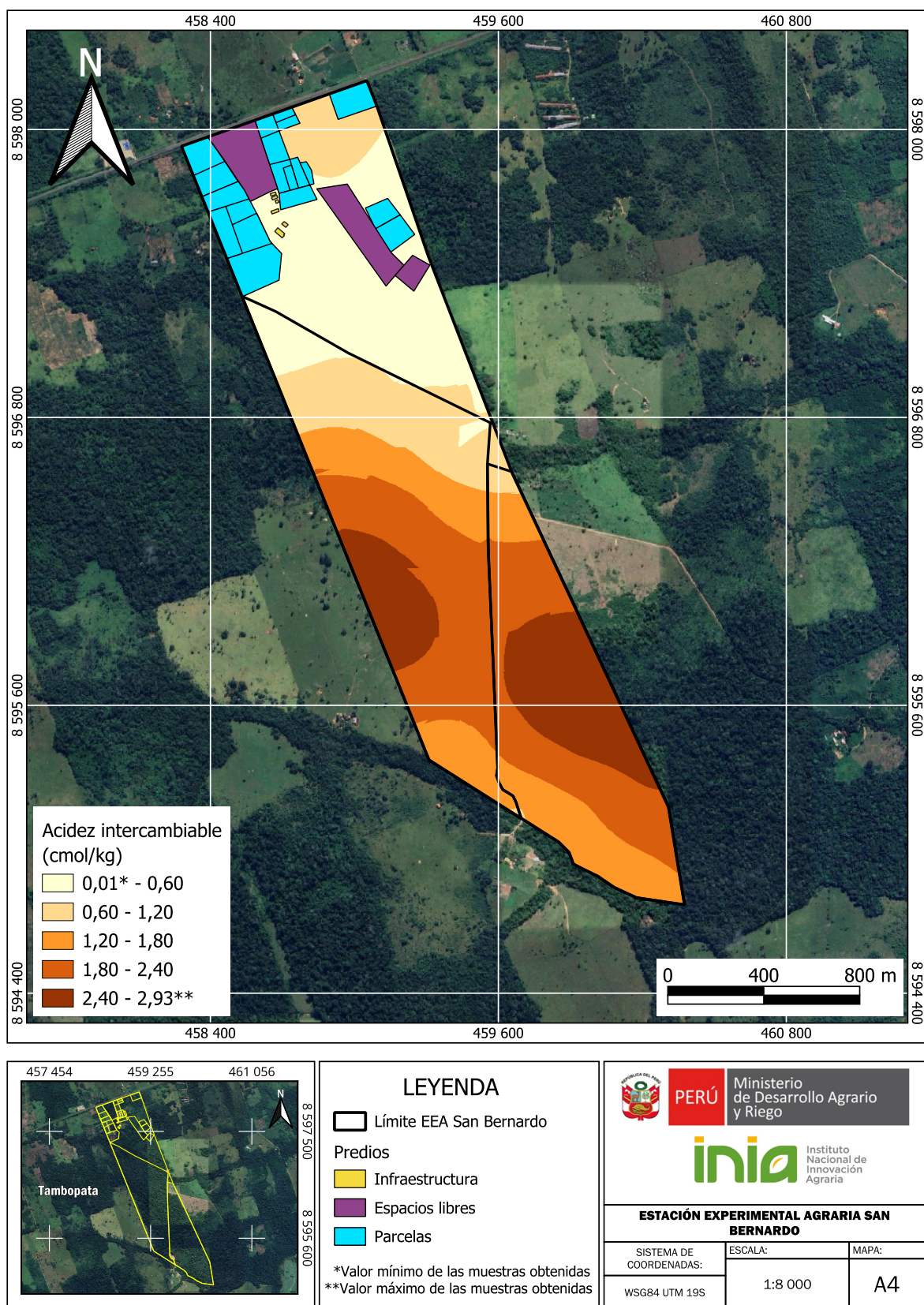


Figura 22. Mapa de variación espacial de la acidez intercambiable

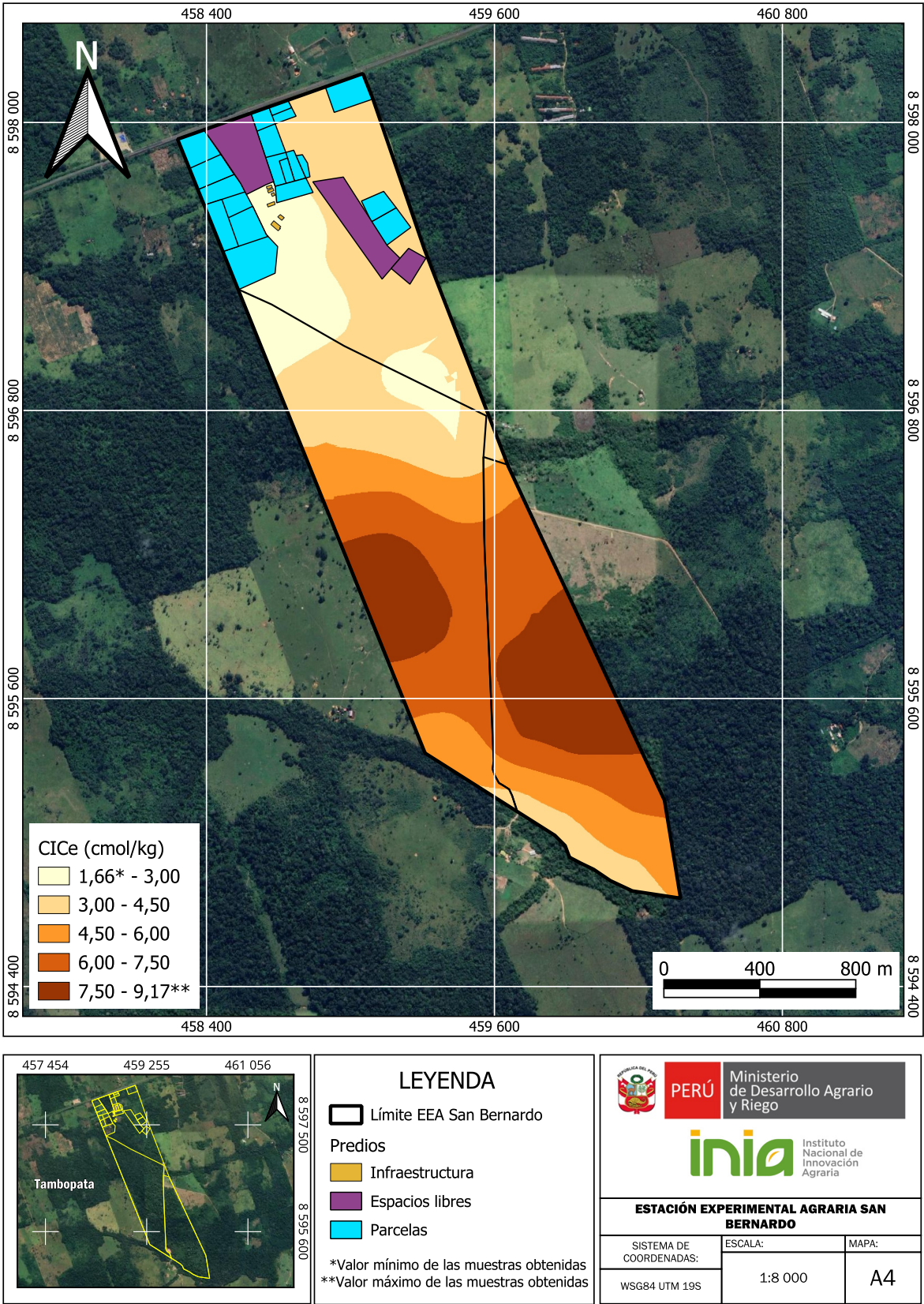


Figura 23. Mapa de variación espacial de la capacidad de intercambio catiónico efectiva

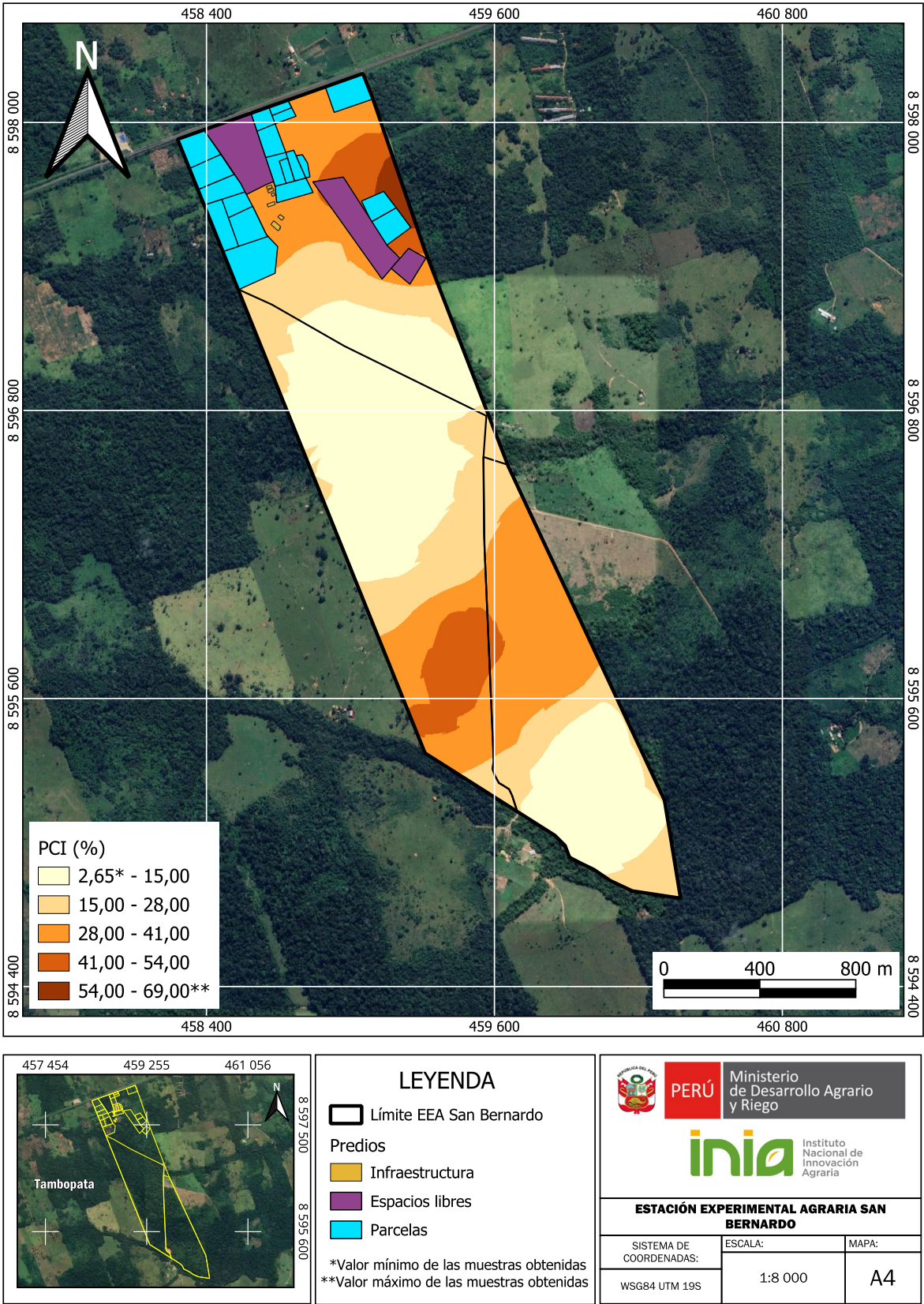


Figura 24. Mapa de variación espacial del porcentaje de calcio intercambiable

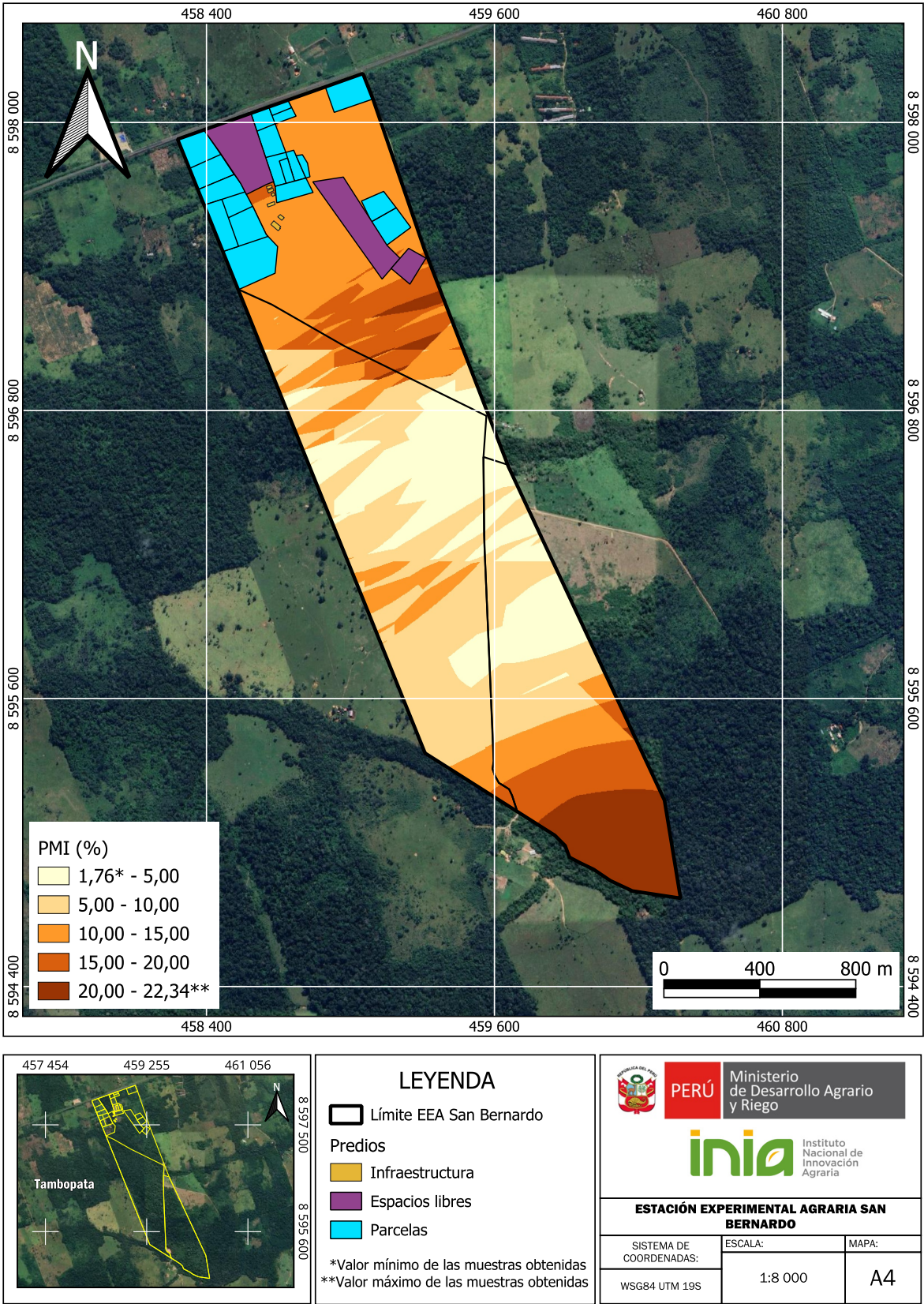


Figura 25. Mapa de variación espacial del porcentaje de magnesio intercambiable

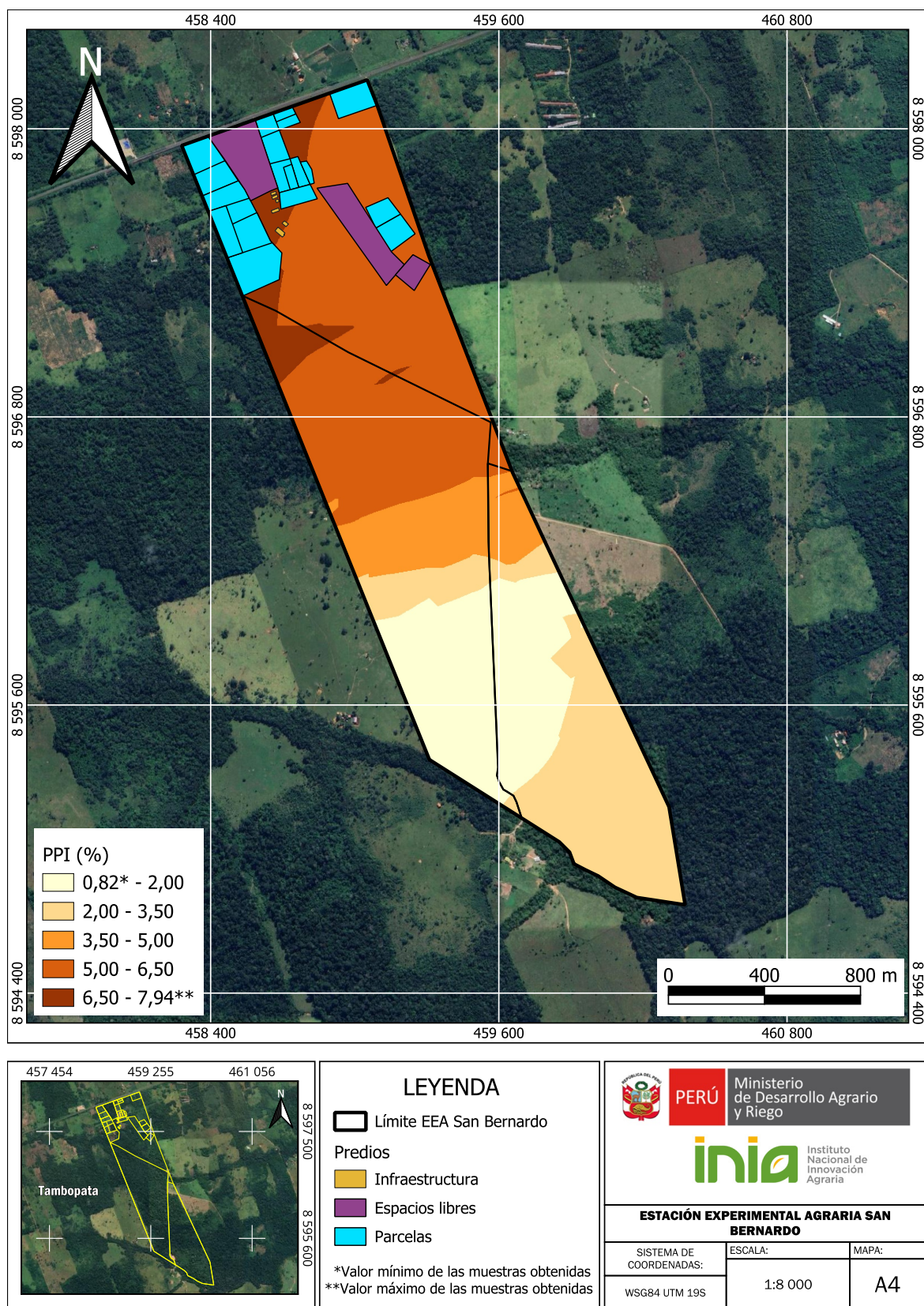


Figura 26. Mapa de variación espacial del porcentaje de potasio intercambiable

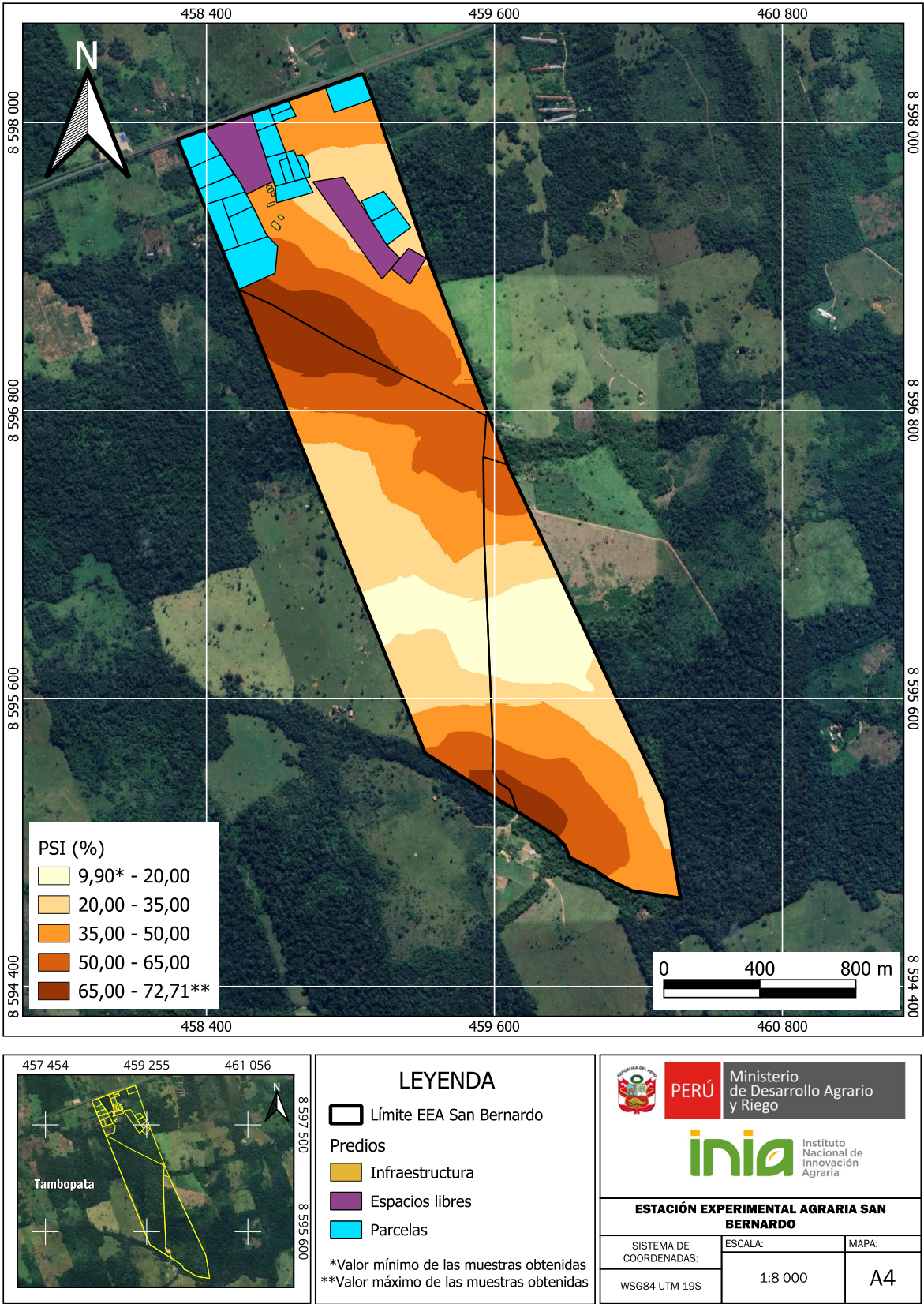


Figura 27. Mapa de variación espacial del porcentaje de sodio intercambiable

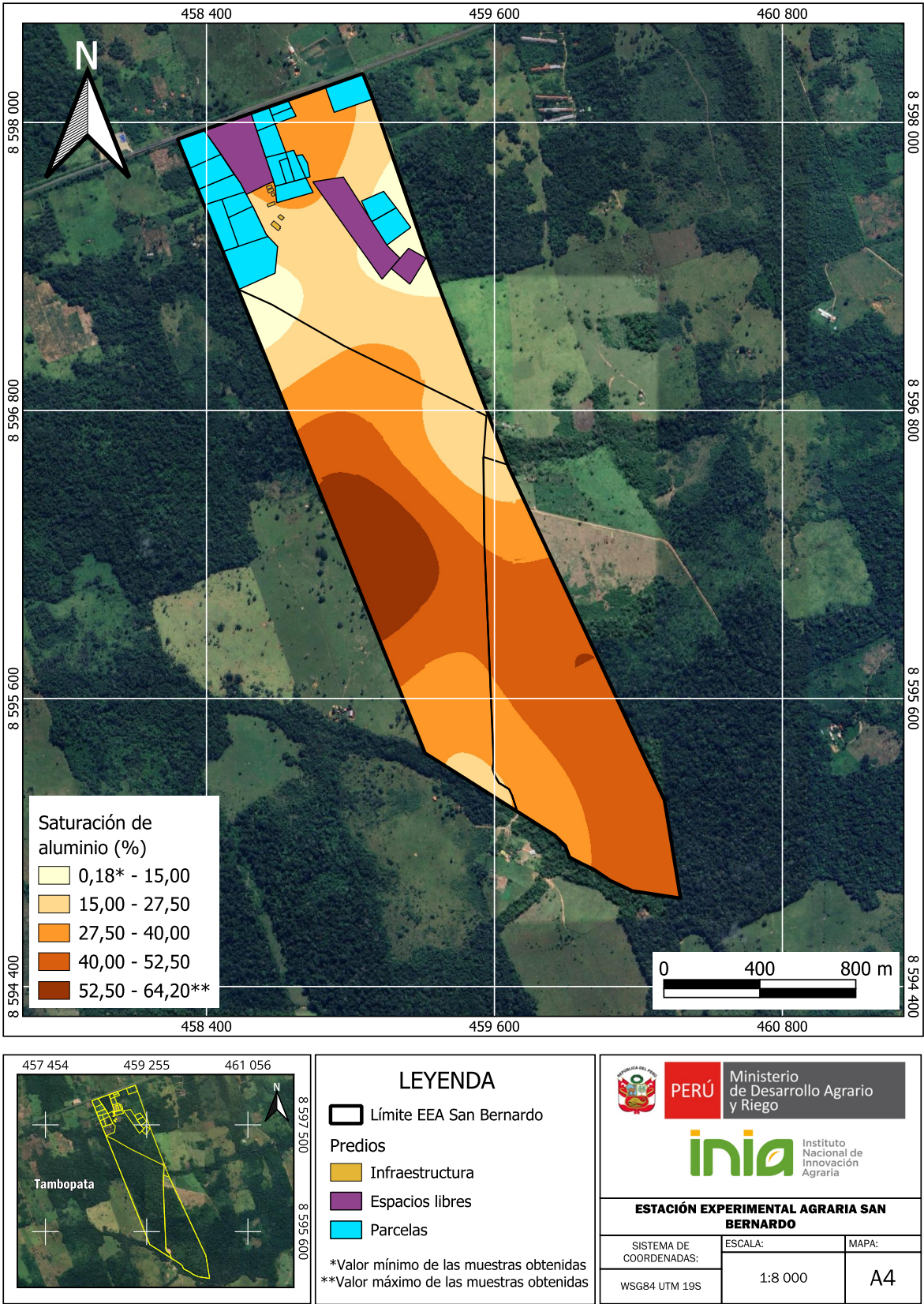


Figura 28. Mapa de variación espacial del porcentaje de saturación de aluminio



4. Recomendaciones de manejo de la fertilidad del suelo en la EEA San Bernardo

4.1. Índice de saturación de bases catiónicas

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

Desde el enfoque edafológico del modelo BCSR, el balance relativo entre los cationes básicos del complejo de intercambio (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ y Na^+) constituye un factor fundamental para la nutrición de las plantas y la fertilidad química del suelo.

En los suelos de la sede de la EEA San Bernardo, el pH ($4,24 \pm 0,71$), materia orgánica ($1,70 \pm 0,64$ %), acidez ($0,99 \pm 0,69$ cmol kg^{-1}) y aluminio intercambiable ($0,12 \pm 0,25$ cmol kg^{-1}) 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 promedio de calcio intercambiable ($26,09 \pm 22,39$ %), de magnesio intercambiable ($7,94 \pm 5,34$ %) y de potasio intercambiable ($2,78 \pm 1,21$ %) tienen niveles muy bajos, afectando significativamente sus propiedades físicas, químicas y biológicas, lo que a su vez impacta negativamente en el crecimiento de las plantas.

Según Cruz-Macías et al. (2020), el pH, el porcentaje de saturación de calcio y la capacidad de intercambio catiónico efectiva pueden tener una correlación negativa con la saturación de aluminio. Esto indica que, a medida que aumenta la saturación de Al, disminuyen el pH, la saturación de calcio y la CICe. Este comportamiento se debe a que el aluminio ocupa sitios de intercambio catiónico, desplazando cationes básicos como el calcio y reduciendo su disponibilidad para las plantas.

La predictibilidad espacial de la variable Ca es moderada ($R^2 = 0,34$), esto permitió identificar zonas de manejo con preocupación agronómica, en donde el calcio podría provocar desbalance iónico al estar en niveles deficientes. Precisamente, la alta variabilidad observada permitió identificar zonas con niveles deficientes de Ca, evidenciando diferentes grados de insuficiencia en el área de estudio (Figura 29): zona 1 ($0,06 - 1,00$ cmol/kg), zona 2 ($1,00 - 2,00$ cmol/kg), zona 3 ($2,00 - 3,50$ cmol/kg), zona 4 ($3,50 - 5,00$ cmol/kg) y zona 5 ($5,00 - 6,33$ cmol/kg).

La importancia de mantener niveles adecuados de calcio en el suelo radica en que este elemento favorece la estabilidad de los agregados, mejora la estructura del suelo y reduce la compactación. Además, desempeña un papel fundamental en el crecimiento radicular y en el desarrollo de los órganos reproductivos; por ello, su deficiencia puede ocasionar alteraciones fisiológicas, como la necrosis apical. En cuanto al magnesio, este constituye el núcleo central de la clorofila y participa en la activación de enzimas metabólicas, facilitando el transporte de fotoasimilados hacia los frutos, lo que contribuye a su crecimiento y productividad (Marschner, 2011). Respecto al potasio, este es considerado el catión de mayor importancia en la fisiología vegetal, debido a que se encuentra presente en los tejidos de las plantas y participa en diversas funciones fisiológicas y bioquímicas; asimismo, contribuye al incremento de la resistencia frente a enfermedades en numerosas especies cultivadas (Mengel y Kirkby, 2000). En consecuencia, la deficiencia de estos elementos puede afectar el crecimiento, desarrollo y productividad de cultivos como cacao y banano, los cuales tienen gran importancia en la EEA San Bernardo, por lo que sería necesaria una fertilización más cuidadosa y frecuente para suplir las deficiencias de dichos nutrientes.

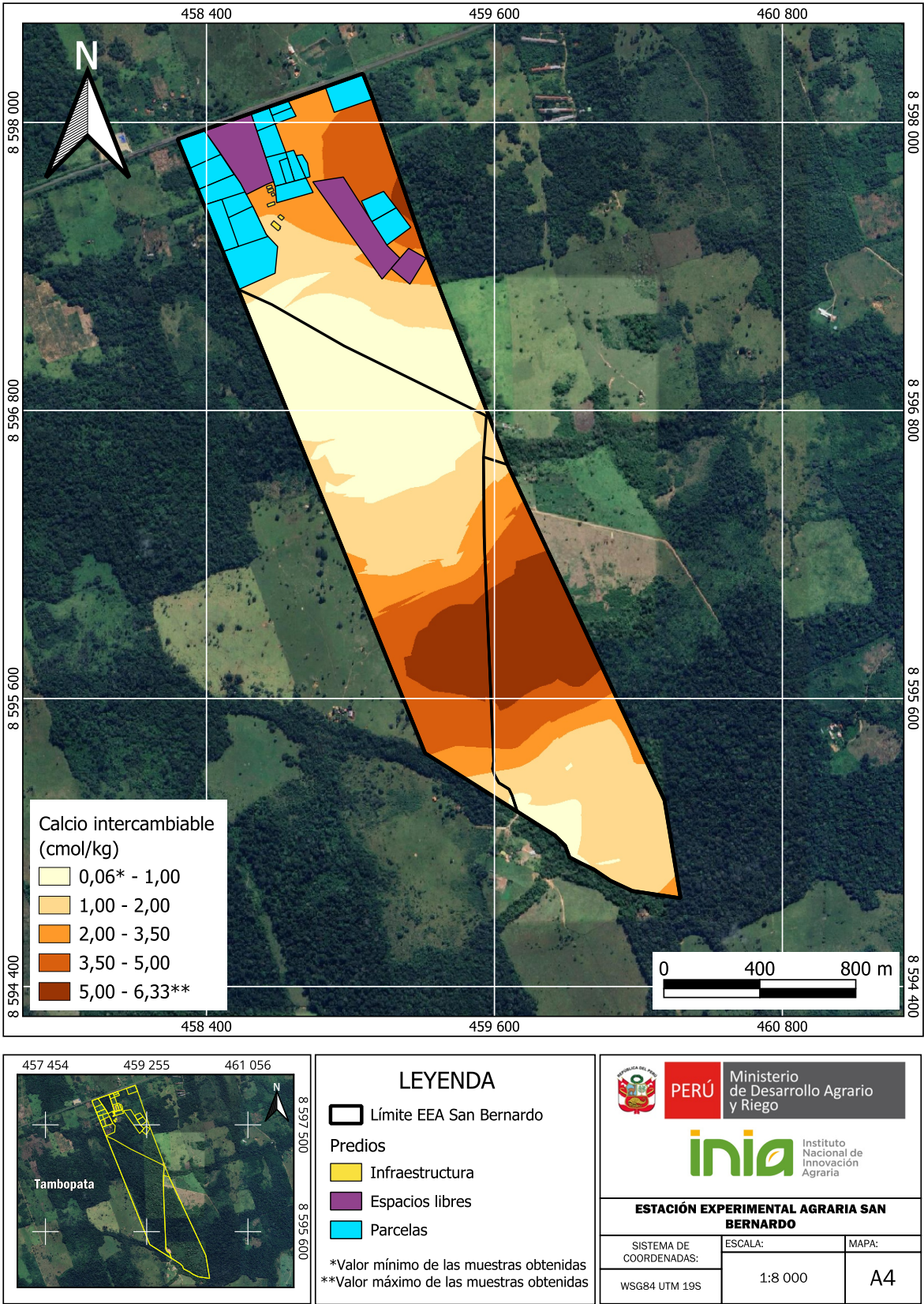


Figura 29. Mapa de variación espacial del calcio intercambiable

4.1.2. Variabilidad espacial de la acidez, saturación de aluminio y disponibilidad de nutrientes para la corrección mediante encalado

De acuerdo con las condiciones químicas analizadas, los suelos de la sede de la EEA San Bernardo son clasificados como fuertemente ácidos, debido a que la superficie presenta pH entre 3,10 y 5,90. Además, la saturación de aluminio presentó un promedio de 29,10 % pero con una alta variabilidad a lo largo de toda la zona, desde 0,18 % hasta 64,20 %, permitiendo identificar áreas con alta probabilidad de toxicidad por aluminio, lo cual constituye también un indicador de elevada acidez del suelo.

La acidez del suelo explica el bajo contenido de bases como calcio, magnesio y potasio, además de afectar la disponibilidad del fósforo, cuyos valores oscilaron entre 7,36 y 55,41 mg/kg, lo que podría ocasionar un crecimiento deficiente de las plantas, especialmente durante las primeras etapas de desarrollo. Asimismo, el fósforo presentó un alto coeficiente de variación (55,99 %) y un coeficiente de asimetría (*skewness* = 1,28), lo que indica una elevada heterogeneidad en su distribución entre las muestras de suelo. En concordancia con ello, el modelo geoestadístico sugiere una variabilidad espacial significativa a escalas relativamente amplias, junto con una capacidad limitada para predecir la distribución del fósforo disponible.

La disponibilidad de potasio también disminuye en suelos muy ácidos, lo que puede afectar la resistencia de las plantas frente a condiciones de estrés. En la EEA San Bernardo, el K disponible presentó una variabilidad moderada y un amplio rango de concentraciones entre las muestras, lo que sugiere diferencias en la disponibilidad de este nutriente en distintas áreas del campo. Asimismo, el modelo esférico y el rango de 1054,88 m evidencian que la variabilidad espacial del potasio disponible ejerce influencia a distancias relativamente grandes.

En condiciones fuertemente ácidas, la disponibilidad de micronutrientes como el molibdeno y el boro puede disminuir. Asimismo, la biota del suelo, que desempeña un papel fundamental en los procesos de descomposición y ciclado de nutrientes, está estrechamente influenciada por el pH del suelo. En suelos ácidos, la actividad de algunos microorganismos beneficiosos, como las bacterias del género *Rhizobium*, puede verse inhibida, mientras que diversos hongos, como los mohos, presentan mayor tolerancia a estas condiciones y pueden predominar en la comunidad microbiana del suelo. De manera general, condiciones ácidas del suelo pueden afectar negativamente a organismos como bacterias, lombrices de tierra, hongos micorrízicos arbusculares y nematodos, alterando el equilibrio biológico del suelo (Weil y Brady, 2017).

Con el fin de mitigar los efectos de la acidez identificada en los suelos en la EEA San Bernardo, se propone la aplicación de enmiendas químicas. Entre ellas, la cal agrícola es una de las más utilizadas para incrementar el pH y reducir la acidez de los suelos, constituyendo una de las prácticas más efectivas para la corrección de suelos ácidos. Asimismo, el incremento del contenido de materia orgánica contribuye a amortiguar los efectos de la acidez, mejorar la estructura del suelo y aumentar la capacidad de intercambio catiónico (CIC), lo que a su vez favorece una mayor disponibilidad de nutrientes para las plantas.

Se puede determinar el requerimiento de encalado del suelo basado en el método de Minas Gerais 5A (Teixeira et al., 2020). Este método considera la capacidad buffer del suelo en función al porcentaje de arcilla, y el requerimiento de encalado en función a un nivel mínimo de acidez intercambiable tolerable y un nivel mínimo de requerimiento de Ca^{2+} y Mg^{2+} .

La capacidad buffer del suelo (B) se estima utilizando el porcentaje de arcilla mediante la Fórmula 12:

$$B = 0,0302 + 0,06235 \times \text{arcilla (\%)} - 0,000257 \times \text{arcilla(\%)}^2 \quad \dots(12)$$

Posteriormente, cuando el porcentaje de acidez tolerable (PAT) es mayor a 25 % y la suma de Ca^{2+} y Mg^{2+} es mayor a $3,5 \text{ cmol kg}^{-1}$, el requerimiento de cal (RC) se calcula mediante la Fórmula 13:

$$\text{RC} = B [0,25 \times \text{CICe}] \quad \dots(13)$$

Por otro lado, cuando el PAT es mayor a 25 % y la suma de Ca^{2+} y Mg^{2+} es menor a $3,5 \text{ cmol kg}^{-1}$, el requerimiento de cal se estima mediante la Fórmula 14:

$$\text{RC} = B[0,25 \times \text{CICe}] + [3,5 - (\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})] \quad \dots(14)$$

Mediante este procedimiento es posible estimar el requerimiento de encalado en las zonas más degradadas. De esta manera, la aplicación de cal permitirá incrementar el pH del suelo y la fertilidad potencial, en función del aumento de las cargas variables del suelo y de los contenidos de Ca^{2+} y Mg^{2+} . Además, contribuirá a disminuir la reactividad de los precipitados de fosfatos de Fe y Al, así como los efectos tóxicos del aluminio e hidrógeno sobre el crecimiento radicular y la absorción de potasio. Asimismo, se evita el sobredosificado de cal en zonas donde se requieren menores dosis, previniendo la adsorción del boro y la consecuente reducción de su disponibilidad.

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 cacao

Los indicadores geoestadísticos del fósforo disponible evidencian una estructura espacial débil, ajustada a un modelo de tipo *linear to sill*, con limitada continuidad espacial efectiva. El *nugget* (C_0) alcanzó un valor de 8,98 y el *sill* ($C_0 + C$) fue de 14,49, lo que indica una alta proporción de variabilidad no estructurada. En este sentido, el fósforo disponible presenta una marcada variación a escala local, posiblemente asociada a una aplicación heterogénea de fertilizantes o a diferencias en la capacidad de adsorción del suelo.

El rango de autocorrelación espacial es de 1410,79 m, y su relevancia práctica es limitada debido a la baja capacidad predictiva del modelo ($R^2 = 0,06$) y un RMSE de 3,52 mg kg⁻¹. Esta estructura espacial limita la confiabilidad de interpolaciones como *kriging* ordinario para generar mapas precisos de disponibilidad de fósforo. En consecuencia, la fertilización fosfatada debe ser diseñada con base en análisis de suelo sitio-específicos, preferentemente a escala de lote o sublote, evitando extrapolaciones espaciales imprecisas.

Para la estimación de la fertilización fosforada en el cultivo de cacao, se considerará un nivel crítico de 15 mg kg⁻¹ y un rendimiento potencial de 3 t ha⁻¹ bajo un sistema convencional. El valor mínimo de fósforo disponible registrado en los suelos evaluados es de 7,36 mg kg⁻¹, lo que indica una probable respuesta favorable a la aplicación de fertilizantes fosfatados. En este análisis se tomará dicho valor como referencia para el cálculo correspondiente. Bajo este enfoque, el plan de fertilización se diseñará a partir de criterios de mantenimiento y construcción de la fertilidad del suelo, orientados a compensar el fósforo extraído por la cosecha y a incrementar sus reservas en el sistema edáfico. El procedimiento de cálculo se basa en la metodología propuesta por Quispe-Matos et al. (2025).

Primer paso: determinar el rendimiento alcanzado con 7,36 mg de P-Bray por kg de suelo, tomando en cuenta que este nivel de fósforo permite alcanzar un rendimiento relativo de 50 %.

$$\text{Rendimiento alcanzado} = \frac{50 \times 3 \text{ t ha}^{-1}}{100} = 1,5 \text{ t ha}^{-1}$$

Segundo paso: calcular 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.

$$\text{Incremento de raíces y brotes} = 0,35 \times 1,5 \text{ t ha}^{-1} = 0,53 \text{ t ha}^{-1}$$

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

$$\text{Rendimiento objetivo} = 1,5 \text{ t ha}^{-1} + 0,53 \text{ t ha}^{-1} = 2,03 \text{ t ha}^{-1}$$

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

$$\text{Requerimiento de P} = 2 \text{ kg de P t}^{-1} \times 2,03 \text{ t ha}^{-1} = 4,06 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

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 %.

$$\text{RM de P} = \frac{4,06 \text{ kg de P ha}^{-1}}{0,30} = 13,5 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

Sexto paso: finalmente, el requerimiento de construcción anual (RC) se estimará aplicando la Fórmula 7. Para este cálculo, y con fines prácticos, se asume que es necesario aplicar 6 kg de P ha⁻¹ para aumentar en 1 mg kg⁻¹ el contenido de fósforo en el suelo. Considerando un incremento anual requerido (IAR) de 1,0 mg kg⁻¹ de P en este caso, se procede a estimar la dosis correspondiente de fertilización para la construcción de la fertilidad del 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.

$$\text{Dosis de fertilización de P} = 13,5 \text{ kg de P ha}^{-1} + 6 \text{ kg de P ha}^{-1} = 19,5 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

De este modo, la dosis anual de fertilización estimada corresponde a 97,07 kg ha⁻¹ de fosfato diamónico (DAP), con un contenido de 46 % de P₂O₅. Esta aplicación permite cubrir tanto el requerimiento del cultivo como la reposición y construcción de las reservas de fósforo en el suelo, contribuyendo a mantener la productividad del cultivo de cacao en el largo plazo.

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

Los indicadores geoestadísticos del potasio disponible en el suelo muestran un bajo ajuste entre los valores observados y los estimados espacialmente, con un RMSE de 9,03 mg kg⁻¹ y un coeficiente de determinación (R²) de 0,1. La concentración promedio fue de 28,98 mg kg⁻¹, lo que indica, en términos generales, una disponibilidad limitada para la mayoría de los cultivos, mientras que los valores variaron entre 10,4 y 58,4 mg kg⁻¹. Esta amplitud refleja una distribución heterogénea del potasio en el área evaluada, donde algunas zonas próximas a los valores más bajos podrían requerir aportes suplementarios, particularmente en sistemas agrícolas con alta demanda de K. Para el cálculo de requerimientos, se considerará como referencia el valor mínimo registrado de potasio disponible (10,4 mg kg⁻¹), con el fin de estimar las necesidades de mantenimiento y de construcción de la fertilidad del suelo.

Para el cacao, el umbral crítico o nivel de suficiencia es de 150 mg de K por kg de suelo y el rendimiento potencial es de 3 t ha⁻¹. El análisis de correlación y calibración indica que el nivel obtenido de 10,4 mg de K por kg de suelo permite obtener un rendimiento relativo (RR) del 40 %.

Primer paso: calcular el rendimiento con 10,4 mg de K por kg de suelo.

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

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

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

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

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

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

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

Quinto paso: determinar el requerimiento de mantenimiento (RM), haciendo uso de la Fórmula 6. El RM integra el requerimiento de K, con el concepto de eficiencia de uso del nutriente en el sistema (la fracción del nutriente que realmente está disponible para el cultivo) y posibles pérdidas (por inmovilización, fijación, erosión o volatilización). Para este caso práctico, se considera una eficiencia de uso de K del 70 %.

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

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

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

Entonces, el plan de fertilización para el primer año se estima de la siguiente manera:

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

De esta forma, la dosis anual de fertilización estimada corresponde a 172,56 kg ha⁻¹ de cloruro de potasio, con un contenido de 60 % de K₂O. Esta aplicación permite cubrir tanto los requerimientos del cultivo como la reposición y construcción de las reservas de potasio en el suelo, contribuyendo a mantener la productividad del cultivo de cacao en el largo plazo.



5. Referencias bibliográficas

- Alam, S. M., Naqvi, S. S. M., y Ansari, R. (1999). Impact of soil pH on nutrient uptake by crop plants. En M. Pessarakli (Ed.), *Handbook of Plant Nutrition* (pp. 51-60). Marcel Dekker, Inc.
- Álvarez-Herrera, J. G., Ruiz-Berrío, H. D., y Acosta-Tova, D. F. (2021). Evaluación geoestadística de atributos hidrofísicos del suelo en la granja Tunguavita, Paipa, Colombia. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 31(1), 127-140. <https://revistas.umng.edu.co/index.php/rcin/article/view/5396>
- Atkins, P. W., De Paula, J., y Keeler, J. (2023). *Atkins' physical chemistry*. Oxford University Press.
- Baumhauer, R. (2025). Soils, Soil Erosion, and Desertification. En *Geography of the physical environment* (pp. 125-146). https://doi.org/10.1007/978-3-662-71406-5_7
- Bear, F. E., Prince, A. L., y Malcolm, J. L. (1945). *Potassium needs of New Jersey soils*. New Jersey Agricultural Experiment Station.
- Bhunja, G. S., Shit, P. K., y Chattopadhyay, R. (2018). Assessment of spatial variability of soil properties using geostatistical approach of lateritic soil (West Bengal, India). *Annals of Agricultural Science*, 16(14), 436-443. <https://doi.org/10.1016/j.aasci.2018.06.003>
- 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). <https://repositorio.inia.gob.pe/items/fad35e32-4130-4ed6-ae19-ee657f4800de>

- Cruz-Macías, W. O., Rodríguez-Larramendi, L. A., Salas-Marina, M. Á., Hernández-García, V., Campos-Saldaña, R. A., Chávez-Hernández, M. H., y Gordillo-Curiel, A. (2020). Efecto de la materia orgánica y la capacidad de intercambio catiónico en la acidez de suelos cultivados con maíz en dos regiones de Chiapas, México. *Terra Latinoamericana*, 38(3), 475-480. <http://www.terralatinoamericana.org.mx/index.php/terra/es/article/view/506>
- 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>
- 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). <https://repositorio.inia.gob.pe/items/f83f5b06-2ef1-49e4-990f-8ee714bc34bd>
- Environmental Protection Agency. (2004). *Method 9045D: Soil and Waste pH, part of Test Methods for Evaluating Solid Waste, Physical/Chemical Methods*. <https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-12/documents/9045d.pdf>
- Espinosa, J. y Molina, E. (1999). *Acidez y encalado de los suelos* (1a ed.). International Plant Nutrition Institute. <https://doi.org/10.13140/2.1.3888.9281>
- Garbanzo-León, G., Alemán-Montes, B., Alvarado-Hernández, A., y Henríquez-Henríquez, C. (2017). Validación de modelos geoestadísticos y convencionales en la determinación de la variación espacial de la fertilidad de suelos del Pacífico Sur de Costa Rica. *Investigaciones Geográficas*, (93), 20–41. <https://doi.org/10.14350/rig.54706>
- García, F. O., y Ciampitti, I. A. (2010). Enfoques alternativos para el diagnóstico de fertilidad de suelos el enfoque “tradicional”. *Informaciones Agronómicas*, (3), 17-25. <https://fertilizar.org.ar/wp-content/uploads/2011/09/17.pdf>
- Graham, E. R. (1959). *An explanation of theory and methods of soil testing*. Bulletin 734. University of Missouri, Agricultural Experiment Station. <https://mdh.contentdm.oclc.org/digital/collection/agexptstn/id/25261/>
- Hartemink, A.E., y Barrow, N.J. (2023). Soil pH - nutrient relationships: the diagram. *Plant and Soil*, 486, 209–215. <https://doi.org/10.1007/s11104-022-05861-z>
- Halstead, R. L., MacLean, A. J., y Nielsen, K. F. (1958). Ca: Mg ratios in soil and the yield and composition of alfalfa. *Canadian Journal of Soil Science*, 38(2), 85-93. <https://doi.org/10.4141/cjss58-014>
- Havlin, J. L., Tisdale, S. L., Nelson, W. L., y Beaton, J. D. (2016). *Soil fertility and fertilizers*. Pearson Education India.
- Instituto Nacional de Recursos Naturales. (1996). *Mapa de suelos del Perú*.
- International Organization for Standardization. (1994). *Soil quality — Determination of specific electrical conductivity*.

- International Organization for Standardization. (1995). *Soil quality — Determination of total nitrogen — Modified Kjeldahl method*. <https://www.iso.org/standard/19239.html>
- Kopittke, P. M., y Menzies, N. W. (2007). A review of the use of the basic cation saturation ratio and the “ideal” soil. *Soil Science Society of America Journal*, 71(2), 259–265. <https://doi.org/10.2136/sssaj2006.0186>
- Marino, M. A., y Echeverría, H. E. (2018). Umbral de requerimiento de fósforo en suelos Argiudoles y guía para la fertilización de alfalfa (*Medicago sativa* L.). *Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica*, 31, 7-18. <https://fertilizar.org.ar/wp-content/uploads/2021/09/Art-2.pdf>
- 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* (4^{ta} ed.). International Potash Institute.
- Moral-García, F. J. (2004). Aplicación de la geoestadística en las ciencias ambientales. *Ecosistemas*, 1(11). <https://www.revistaecosistemas.net/index.php/ecosistemas/article/view/582>
- Niebla-Torres, R. E., Barrezueta-Unda, S., Luna-Romero, Á., y Chabla-Carrillo, J. (2021). Aplicación de modelos geoestadísticos para definir la variabilidad de un perfil del suelo. *Revista Metropolitana de Ciencias Aplicadas*, 4(1), 188-195. <https://doi.org/10.62452/zx01j782>
- Pebesma, E. J., y Bivand, R. S. (2005). Classes and methods for spatial data in R. *R News*, 5(2), 9–13. <http://cran.r-project.org/doc/Rnews/>
- Pierre, W. H., y Banwart, W. L. (1973). Excess-Base and Excess-Base/Nitrogen ratio of various crop species and parts of Plants. *Agronomy Journal*, 65(1), 91-96. <https://access.onlinelibrary.wiley.com/doi/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 Canadá*. Instituto Nacional de Innovación Agraria. <http://hdl.handle.net/20.500.12955/2852>
- R Core Team. (2018). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2002). Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000, que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de los suelos. Estudio, muestreo y análisis. Diario Oficial de la Federación (31 de diciembre de 2002). <https://www.ordenjuridico.gob.mx/Documentos/Federal/wo69255.pdf>
- Teixeira, W. G., Álvarez V, V. H., Neves, J. C. L., y Paulucio, R. B. (2020). Evaluation of traditional methods for estimating lime requirement in Brazilian soils. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. <https://www.rbcjournal.org/article/evaluation-of-traditional-methods-for-estimating-lime-requirement-in-brazilian-soils/>

- Singh, M., Bacon, A. R., Nunes, M. R., y Sharma, L. (2025). Long-term fertilization restructured spatial patterns of soil phosphorus, organic matter, and bulk density in Florida soils. *Discover Soil*, 2(1). <https://doi.org/10.1007/s44378-025-00142-4>
- 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>
- Weil, R., y Brady, N. (2017). *The nature and properties of soils* (15.^a ed.). Pearson.
- 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://www.mdpi.com/2073-4395/14/3/629>
- Yong-Zhen D. (2005). *La aplicación de la geoestadística a la ciencia del suelo*. Geografía Tropical.
- Zhang, G. Q. (1999). *Effects of exchangeable soil calcium, magnesium and calcium/magnesium ratios on plant nutrition and growth of lettuce on an ultisol* [Thesis submitted to obtain the degree of Master of Science in Agronomy and Soil Science]. University of Hawai'i at Manoa. <https://scholarspace.manoa.hawaii.edu/items/8a99ab1e-dcd5-4822-9889-c99836d9526a>

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



Ver nuestro alcance
de acreditación



Ver nuestros servicios



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



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

ISBN: 978-9972-44-275-9



PERÚ

Ministerio
de Desarrollo Agrario
y Riego

inia

Instituto
Nacional de
Innovación
Agraria



@INIAPeru