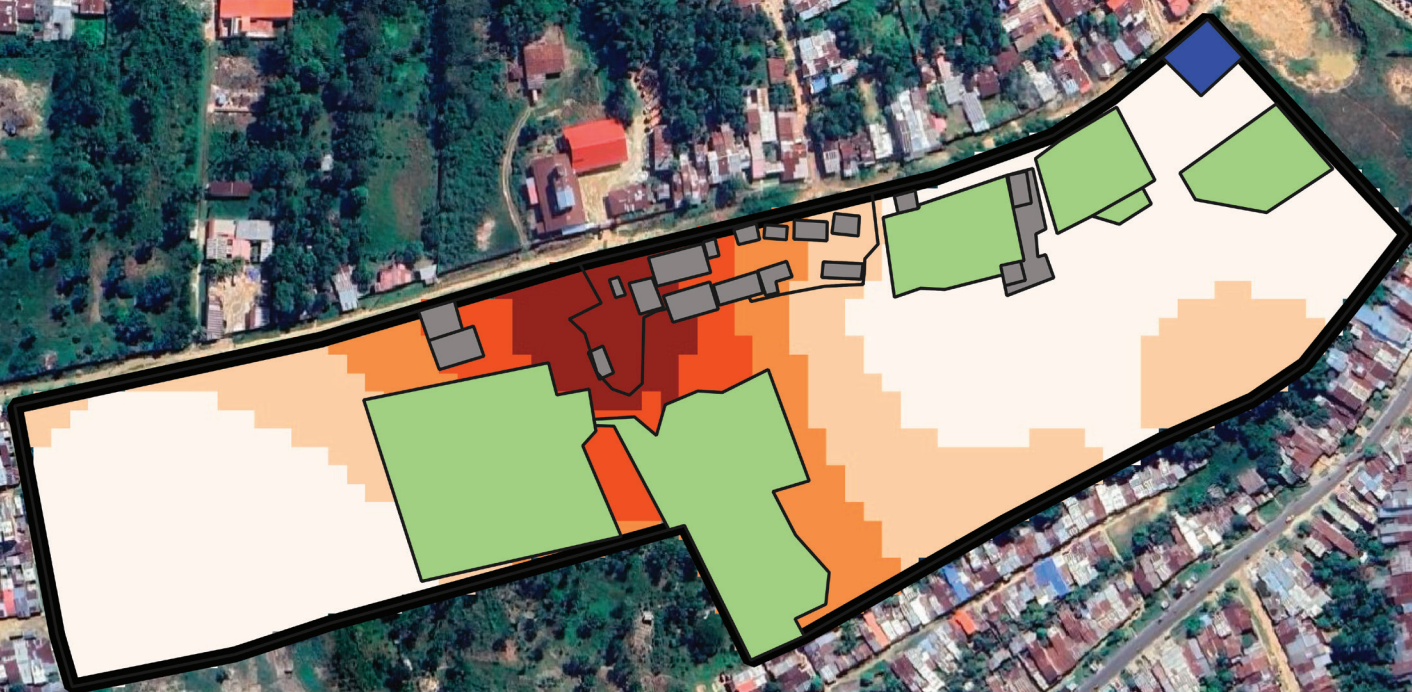


Variación espacial de la fertilidad del suelo en la EEA San Roque



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 Roque



PERÚ

Ministerio
de Desarrollo Agrario
y Riego



Instituto
Nacional de
Innovación
Agraria

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

MINISTERIO DE DESARROLLO AGRARIO Y RIEGO

Ministro de Desarrollo Agrario y Riego

Felipe César Meza Millán

Viceministro de Políticas y Supervisión del Desarrollo Agrario

Jorge Luis Sáenz Rabanal

Viceministro de Desarrollo de Agricultura Familiar e Infraestructura Agraria y Riego

Orlando Hernán Chirinos Trujillo

Presidente Ejecutivo del Instituto Nacional de Innovación Agraria

Jorge Juan Ganoza Roncal, M. Sc.

© Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA)

Primera edición digital:

Julio, 2026

Publicado:

Julio, 2026

Disponible en:

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

ISBN:

978-9972-44-274-2

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° 2026-08763

Autores: Kenyi R. Quispe-Matos, Carlos M. Carbajal-Llosa, Sharon Y. Mejia-Maita, Johan A. Rivas-Segovia, Ruddy A. Ore-Valeriano, Rodolfo J. Chuchon-Remon, 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

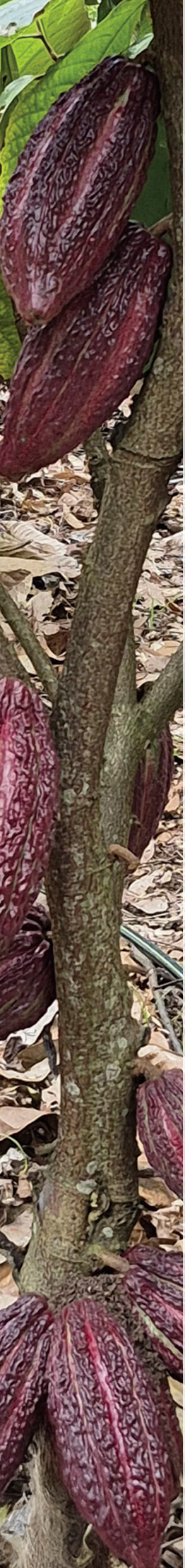


Tabla de contenido

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 Roque	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. Resultados del análisis geoestadístico de las propiedades 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 Roque	53
4.1. Índice de saturación de bases catiónicas	53
4.1.1. Variación espacial de los desbalances iónicos con niveles deficitarios de Mg^{2+} y Ca^{2+}	53
4.1.2. Variación espacial de los desbalances iónicos con niveles elevados de porcentaje de saturación de aluminio e hidrogeno	56
4.2. Niveles de suficiencia de nutrientes disponibles	58
4.2.1. Requerimiento de fertilización fosforada de suficiencia para el cultivo de plátano	58
5. Referencias bibliográficas	61



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 variabilidad espacial de la fertilidad del suelo constituye un aspecto crítico para la gestión agrícola sostenible en la región Loreto, ya que influye directamente en el rendimiento de los cultivos, la eficiencia del uso de fertilizantes y la sostenibilidad de los sistemas productivos. El uso de herramientas geoestadísticas y sistemas de información geográfica (SIG) permite modelar los patrones espaciales de las propiedades edáficas y facilita la implementación de estrategias de manejo sitio-específico. En este contexto, la Estación Experimental Agraria San Roque (EEA San Roque), ubicada en el departamento de Loreto, ofrece las condiciones necesarias para llevar a cabo este tipo de estudios, constituyéndose como un referente para el desarrollo de futuras investigaciones en la región.

El presente documento incluye, la interpretación de los análisis de suelos mediante técnicas geoestadísticas para evaluar la fertilidad en la EEA San Roque; la generación de mapas temáticos de las propiedades edáficas para facilitar la toma de decisiones en el manejo del suelo; y recomendaciones específicas por zona, basadas en los resultados del análisis geoestadístico.

M. Sc. Jorge Juan Ganoza Roncal

Presidente Ejecutivo

Instituto Nacional de Innovación Agraria



1. Introducción

Una de las mayores amenazas para la sostenibilidad agrícola y la producción de alimentos en la región amazónica es la degradación del suelo. Esta problemática es particularmente crítica en suelos aluviales jóvenes, caracterizados por baja capacidad de intercambio catiónico, alta saturación de aluminio y severas deficiencias de fósforo disponible (Peña-Venegas y Vanegas, 2010; Villacis-Fajardo et al., 2023). La degradación se intensifica por prácticas como la roza, tumba y quema, las cuales reducen el contenido de materia orgánica y favorecen la lixiviación de cationes básicos, proceso agravado por las altas precipitaciones características de la región (Bruijnzeel, 2004).

La región Loreto se caracteriza por una alta biodiversidad y una producción agrícola diversificada, que incluye cultivos como maíz amarillo duro, cacao, plátano, camu camu, pijuayo y palto. Sin embargo, también es uno de los departamentos más afectados por la degradación del suelo, con una superficie degradada acumulada del 14,68 % (Ministerio del Ambiente, 2015). Esta situación se debe principalmente a que sus suelos, mayormente Entisols e Inceptisols derivados de sedimentos fluviales del Amazonas, presentan características que limitan su capacidad productiva: pH ácido producto de la meteorización intensa, textura fina a franco arenosa, baja profundidad efectiva en laderas con pendiente pronunciada y alta susceptibilidad a la erosión hídrica. Estas condiciones generan gradientes espaciales pronunciados en fósforo disponible, potasio disponible y materia orgánica, limitando la retención de nutrientes y afectando el rendimiento de los cultivos estratégicos de la región (MINAGRI-INIA, 2018). Adicionalmente, la presencia de humedales pantanosos introduce variabilidad edáfica adicional mediante suelos hidromórficos saturados, lo que restringe las posibilidades de uso agroforestal (Derecho Ambiente y Recursos Naturales, 2021). Esta heterogeneidad espacial hace necesario un monitoreo sistemático de la fertilidad del suelo, orientado a planificar una fertilización sostenible y corregir los desbalances edáficos críticos que limitan la producción agrícola.

En este contexto, el presente documento tiene como objetivo evaluar la variabilidad espacial de la fertilidad del suelo en la Estación Experimental Agraria San Roque, mediante la integración de técnicas geoestadísticas y sistemas de información geográfica. De forma específica, se busca generar mapas temáticos de las principales propiedades edáficas, delimitar zonas de manejo diferencial y formular recomendaciones para el uso eficiente de insumos agrícolas, contribuyendo al fortalecimiento de una agricultura sostenible en el área de influencia de la estación.



2. Principios fundamentales del análisis de suelos

2.1. Sistemas de interpretación del análisis de suelos

La recomendación de fertilizantes mediante el análisis químico de suelos implica una serie de etapas secuenciales e interrelacionadas, que comprenden el muestreo de suelos, el análisis químico, la interpretación de los resultados analíticos y la elaboración de recomendaciones. Si bien las metodologías empleadas en cada etapa pueden influir en la recomendación final, las discrepancias más marcadas entre laboratorios de una misma región obedecen, en la mayoría de los casos, a diferencias en los criterios de interpretación utilizados (Quispe-Matos et al., 2025).

2.1.1. Índice de saturación de bases catiónicas

a. Concepto

El índice de saturación de bases catiónicas (BCSR, por sus siglas en inglés) es un enfoque ampliamente utilizado en la ciencia del suelo para evaluar la fertilidad edáfica a partir del equilibrio relativo de cationes básicos intercambiables en la Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) (Culman et al., 2021). Esta teoría, inicialmente propuesta por William Albrecht y posteriormente consolidada en la agronomía moderna, postula la existencia de proporciones óptimas entre calcio (Ca^{2+}), magnesio (Mg^{2+}), potasio (K^+) y, en algunos casos, sodio (Na^+), que en conjunto maximizan el crecimiento y rendimiento de los cultivos (Yang et al., 2024). Asimismo, se ha documentado que estas proporciones óptimas varían en función de la mineralogía del suelo y los requerimientos específicos de cada cultivo (Kopittke y Menzies, 2007). No obstante, estudios recientes han cuestionado la universalidad del BCSR, señalando que los enfoques basados en suficiencia de nutrientes (SLAN), que establecen niveles mínimos de disponibilidad independientemente del equilibrio catiónico, pueden ser más adecuados en ciertos contextos edáficos (Brock et al., 2021).

b. Origen y aplicabilidad del concepto

El concepto de BCSR tiene su origen en las investigaciones de William Albrecht durante la década de 1930, quien estudió la relación entre las proporciones de cationes básicos intercambiables en la capacidad de intercambio catiónico (CIC) y la productividad de los cultivos (Culman et al., 2021). A partir de estudios realizados en suelos agrícolas de Misuri, Albrecht propuso que un balance adecuado entre calcio (Ca^{2+}), magnesio (Mg^{2+}) y potasio (K^+) mejora la estructura del suelo, la disponibilidad de nutrientes y el desarrollo radicular de las plantas (Chaganti y Culman, 2017). Su hipótesis sostiene que cualquier desviación de las proporciones catiónicas óptimas en la solución suelo limita la absorción de nutrientes, ya que el desequilibrio iónico afecta los mecanismos que regulan la reactividad y disponibilidad de los nutrientes. Estos mecanismos reguladores del equilibrio iónico se ilustran en la Figura 1, donde se muestra que solo una pequeña fracción de los nutrientes requeridos por las plantas se encuentra en la solución suelo o en formas reactivas disponibles. Asimismo, este esquema conceptual sostiene que cada mecanismo representa un reservorio iónico diferenciado (Quispe-Matos et al., 2025).

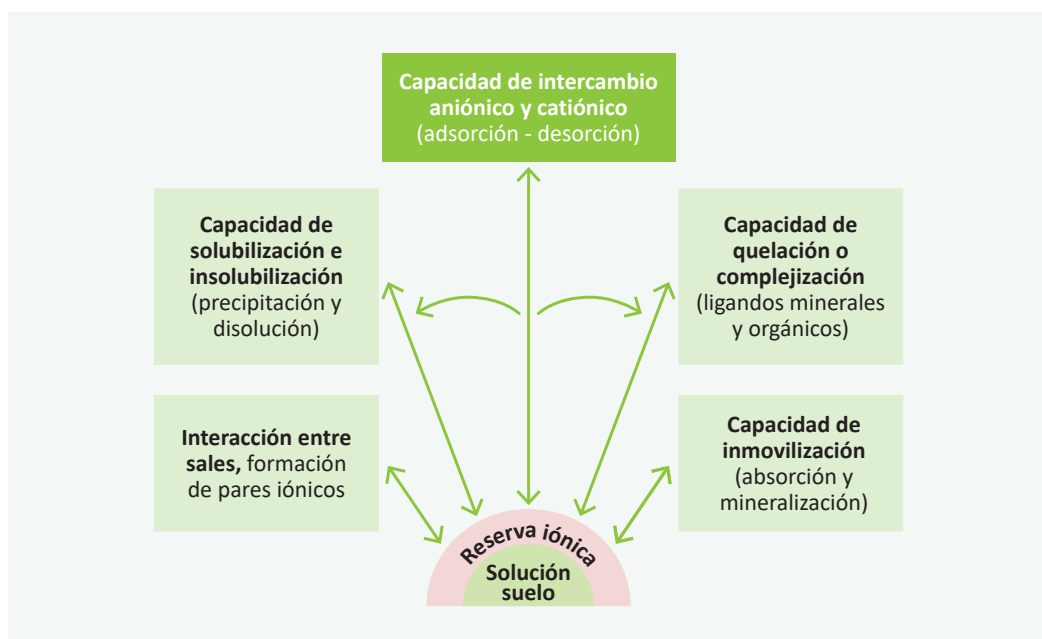


Figura 1. Mecanismos que mantienen en equilibrio los iones en la solución suelo (adaptado de McLean, 1977)

Bear et al. (1945), con base en estudios realizados en suelos agrícolas de Nueva Jersey, proporcionaron evidencia empírica que respaldó la hipótesis de Albrecht. Según estos autores, y en concordancia con los trabajos posteriores de Halstead et al. (1958) y Graham (1959), la saturación óptima de bases en suelos con alta capacidad de intercambio catiónico (CIC) debería distribuirse aproximadamente en 65-75 % de Ca^{2+} , 10-15 % de Mg^{2+} , 3-7 % de K^{+} y menos del 5 % de Na^{+} . Asimismo, la saturación de hidrógeno (H^{+}) y aluminio (Al^{3+}) debería mantenerse por debajo del 15 % para evitar efectos fitotóxicos en suelos ácidos. A partir de estos hallazgos, el BCSR fue establecido como criterio para la formulación de programas de fertilización y enmiendas de suelos (Zhang, 1999).

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

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

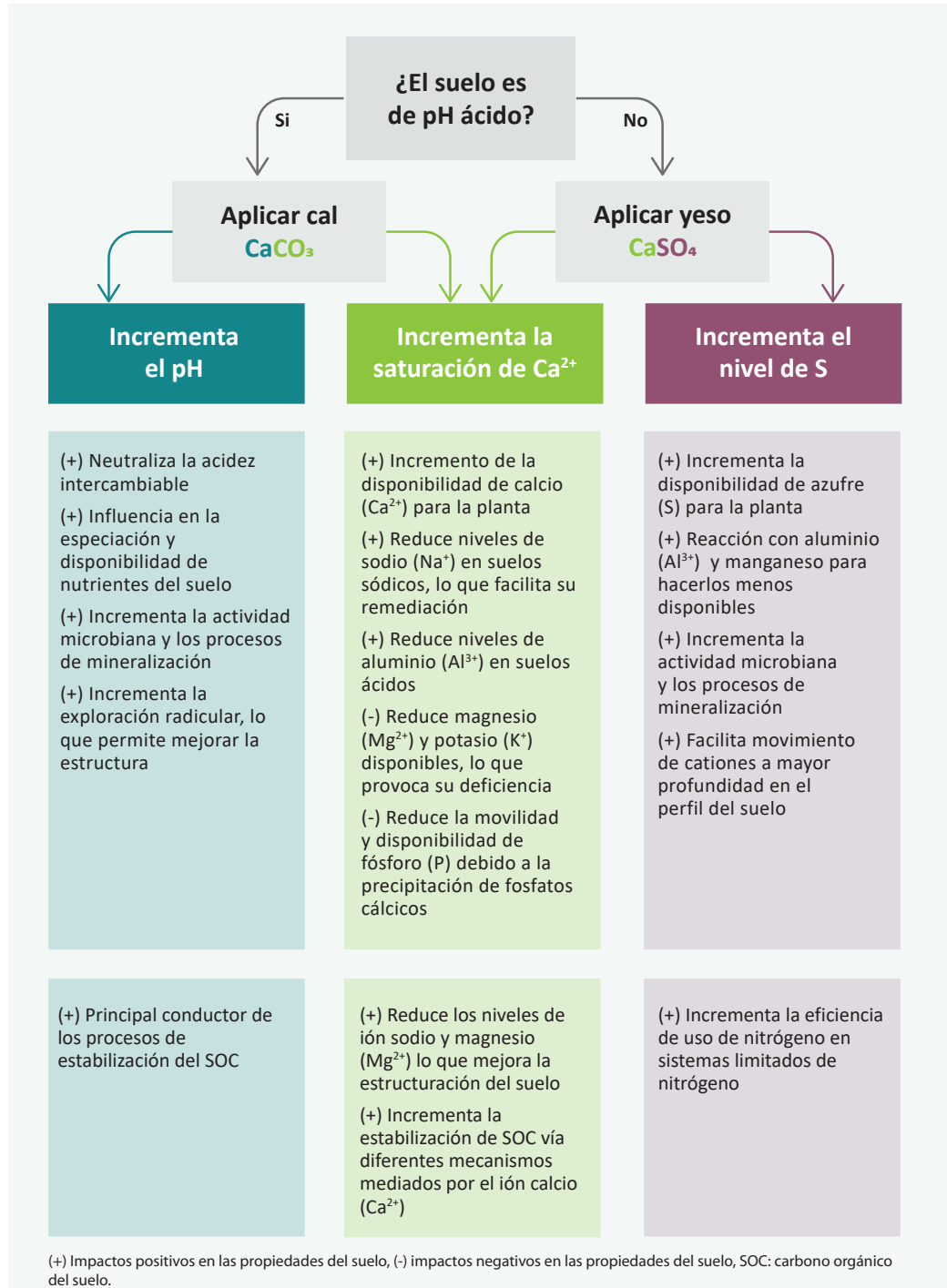


Figura 2. Criterios para el uso de la cal y el yeso, y su respuesta en la relación de saturación de cationes básicos (adaptado de Culman et al., 2021)

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). Esta teoría, aunque presenta sustento científico, también ha sido criticada debido a que no contempla la interacción entre nutrientes y los problemas estructurales del suelo. Sin embargo, es una herramienta fundamental para la interpretación de análisis de suelos. Para su aplicación práctica, el diagnóstico de la fertilidad mediante el SLAN requiere de tres etapas: la correlación, calibración y la interpretación de los análisis de suelos (Quispe-Matos et al., 2025), que se describen en la Figura 3.

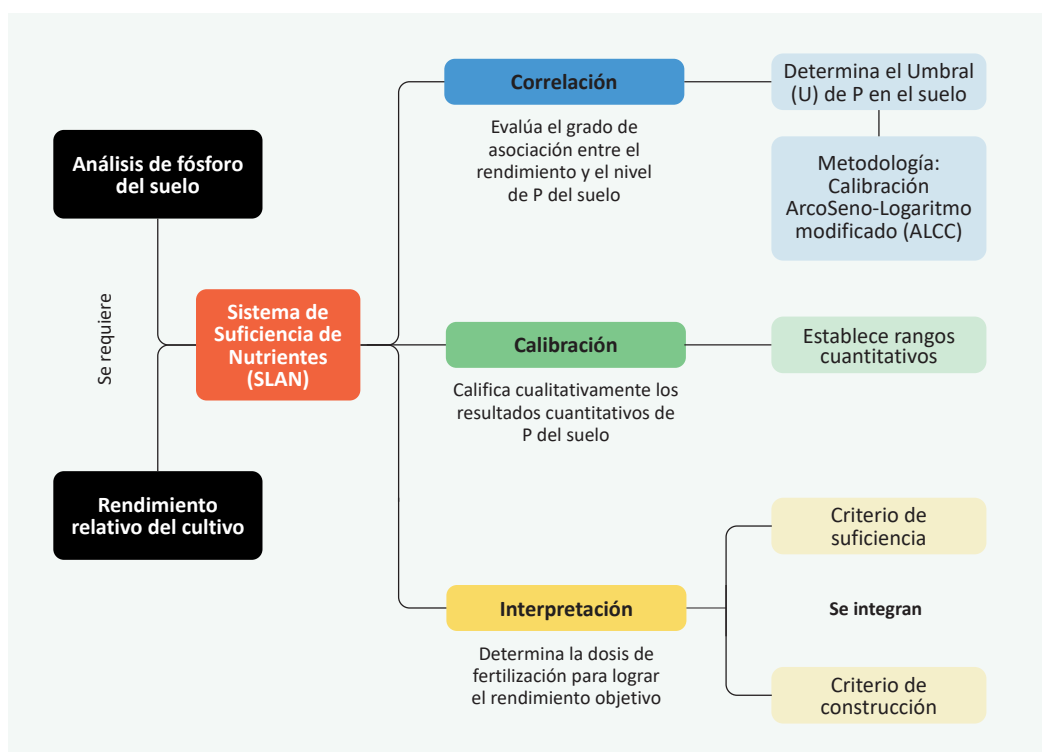


Figura 3. Esquema modelo para la implementación del sistema de suficiencia de nutrientes (SLAN) para el P del suelo

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

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

b. Aplicación del criterio de suficiencia

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

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

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

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

Ejemplo práctico:

Se realizó un análisis de suelos en un cultivo de maíz amarillo duro, y se obtuvo 15 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 20 mg de P-Bray por kg de suelo y el rendimiento potencial es de 7 t ha⁻¹. El análisis de correlación y calibración indica que el nivel obtenido de 15 mg de P-Bray por kg de suelo permite obtener un rendimiento relativo (RR) del 80 %.

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

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

$$\text{Rendimiento alcanzado} = \frac{80 \times 7 \text{ t ha}^{-1}}{100} = 5,6 \text{ t ha}^{-1}$$

Este resultado indica que el nivel actual de P (15 mg kg⁻¹) está por debajo del umbral crítico (20 mg kg⁻¹), lo que limita el rendimiento a solo el 80 % del potencial, 5,6 t ha⁻¹ en lugar de 7 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.

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

$$\text{Incremento de raíces y brotes} = 0,35 \times 5,6 \text{ t ha}^{-1} = 1,96 \text{ t ha}^{-1}$$

Además de las 5,6 t ha⁻¹ de producción, el cultivo genera 1,96 t ha⁻¹ de biomasa en raíces y brotes, lo que debe considerarse en el balance nutricional.

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

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

$$\text{Rendimiento objetivo} = 1,96 \text{ t ha}^{-1} + 5,6 \text{ t ha}^{-1} = 7,56 \text{ t ha}^{-1}$$

Cuarto paso: calcular el requerimiento de P utilizando la Fórmula 5. Para este cálculo y con fines prácticos se considera una extracción de 1,06 kg de fósforo por tonelada de producción.

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

$$\text{Requerimiento de P} = 1,06 \text{ kg de P t}^{-1} \times 7,56 \text{ t ha}^{-1} = 8,01 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

A partir de estos resultados, se interpreta que el criterio de suficiencia estima un requerimiento de 8,01 kg de P ha⁻¹ para alcanzar un rendimiento objetivo de 7,56 t ha⁻¹, el cual está conformado por 1,96 t ha⁻¹ de biomasa radicular y vegetativa, y 5,6 t ha⁻¹ de producción.

c. Aplicación de los criterios de mantenimiento y construcción

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

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

Los criterios de construcción y mantenimiento incorporan enfoques contemporáneos orientados al mejoramiento sostenido de la fertilidad del suelo en el largo plazo. Este enfoque integral tiene como finalidad aumentar gradualmente la concentración de nutrientes mediante aplicaciones que exceden los requerimientos inmediatos del cultivo, hasta alcanzar niveles óptimos definidos a partir de estudios de calibración y respuesta agronómica (Marino y Echeverría, 2018). Su aplicación resulta especialmente importante en suelos con disponibilidad media o baja de nutrientes, así como en aquellos con elevada capacidad de adsorción, donde la saturación progresiva de los sitios de intercambio contribuye a disminuir la fijación de nutrientes esenciales, como el fósforo (P) y el potasio (K), favoreciendo así una mayor disponibilidad para los ciclos productivos posteriores (Havlin et al., 2016).

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

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

Ejemplo práctico (criterio de mantenimiento)

Se realizó un análisis de suelos en un cultivo de maíz amarillo duro, y se obtuvo 10 mg de P 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 20 mg de P-Bray por kg de suelo y el rendimiento potencial es de 7 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 50 %.

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

$$\text{Rendimiento alcanzado} = \frac{50 \times 7 \text{ t ha}^{-1}}{100} = 3,5 \text{ t ha}^{-1}$$

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.

$$\text{Incremento de raíces y brotes} = 0,35 \times 3,5 \text{ t ha}^{-1} = 1,225 \text{ t ha}^{-1}$$

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

$$\text{Rendimiento objetivo} = 3,5 \text{ t ha}^{-1} + 1,23 \text{ t ha}^{-1} = 4,73 \text{ t ha}^{-1}$$

Cuarto paso: calcular el requerimiento de P utilizando la Fórmula 5. Para este cálculo y con fines prácticos se considera una extracción de 1,06 kg de fósforo por tonelada de producción.

$$\text{Requerimiento de P} = 1,06 \text{ kg de P t}^{-1} \times 4,73 \text{ t ha}^{-1} = 5 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

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 %.

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

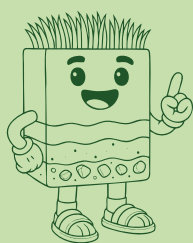
$$\text{RM de P} = \frac{5 \text{ kg de P ha}^{-1}}{0,3} = 16,66 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

De esta manera, el requerimiento de mantenimiento de fósforo en el cultivo de maíz amarillo duro es 16,66 kg por hectárea.

Ejemplo práctico (criterio de mantenimiento y construcción)

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

Para este cultivo, el umbral crítico o nivel de suficiencia es de 20 mg de P-Bray por kg de suelo y el rendimiento potencial es de 7 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:

$$\text{Rendimiento alcanzado} = \frac{30 \times 7 \text{ t ha}^{-1}}{100} = 2,1 \text{ t ha}^{-1}$$

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

$$\text{Incremento de raíces y brotes} = 0,35 \times 2,1 \text{ t ha}^{-1} = 0,74 \text{ t ha}^{-1}$$

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

$$\text{Rendimiento objetivo} = 2,1 \text{ t ha}^{-1} + 0,74 \text{ t ha}^{-1} = 2,84 \text{ t ha}^{-1}$$

Cuarto paso: calcular el requerimiento de P utilizando la Fórmula 5. Para este cálculo y con fines prácticos se considera una extracción de 1,06 kg de fósforo por tonelada de producción.

$$\text{Requerimiento de P} = 1,06 \text{ kg de P t}^{-1} \times 2,84 \text{ t ha}^{-1} = 3 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

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

$$\text{RM de P} = \frac{3 \text{ kg de P ha}^{-1}}{0,20} = 15 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

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.

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

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

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

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

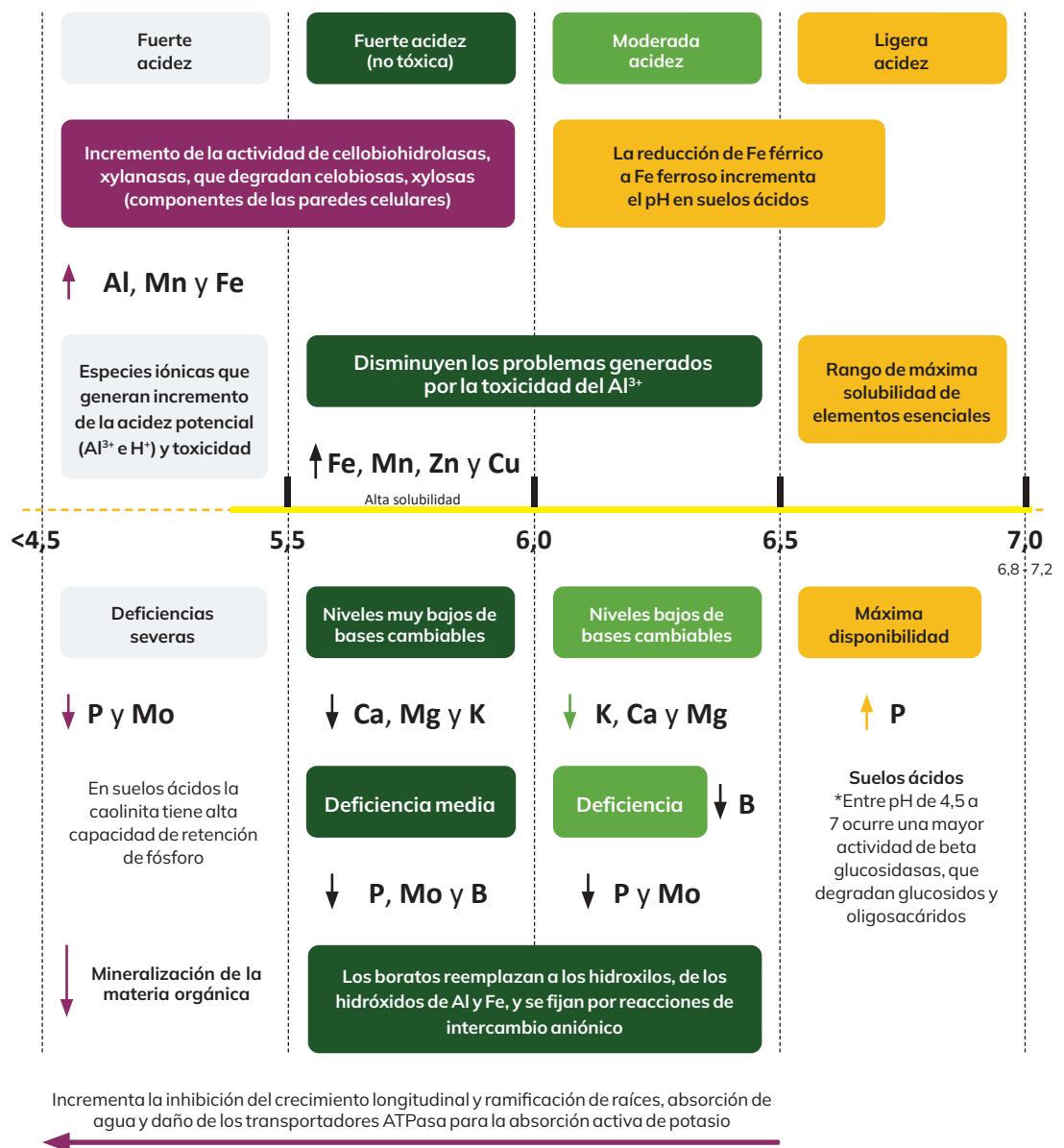
$$\text{Dosis de fertilización de P} = 15 \text{ kg de P ha}^{-1} + 13,5 \text{ kg de P ha}^{-1} = 28,5 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

De esta manera, el requerimiento de mantenimiento y construcción de fósforo en el cultivo de maíz amarillo maduro es 28,5 kg por hectárea.

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

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

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



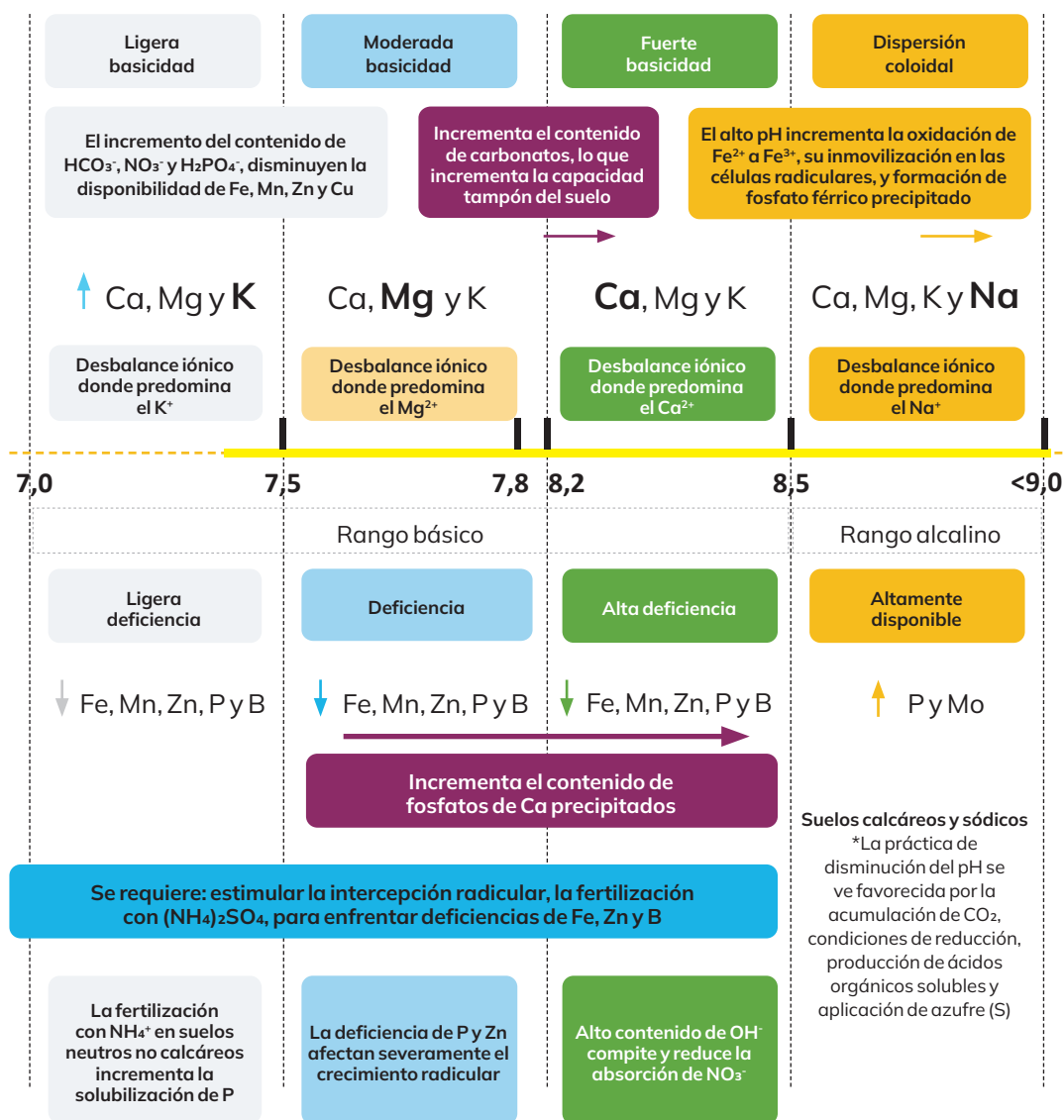


Figura 4. Diagnóstico de la fertilidad del suelo en función al pH

2.2. Análisis geoestadístico de las propiedades del suelo

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

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



3. Muestreo y análisis de suelo en la EEA San Roque

3.1. Ubicación

La EEA San Roque cuenta con tres centros experimentales: San Roque, El Dorado y San Miguel, con una extensión total de 2532,26 ha; siendo los cultivos priorizados: el maíz amarillo duro (*Zea mays* L.), camu camu (*Myrciaria dubia* (Kunth) McVaugh), pijuayo (*Bactris gasipaes* Kunth) y palto (*Persea americana* Mill.) entre otros cultivos. En la estación se realizan trabajos de conservación y valoración de los recursos genéticos, investigación y desarrollo tecnológico en el área agrícola y forestal, la producción de material genético de calidad, además de brindar asistencias técnicas y otros servicios para los agricultores de la región Loreto. La EEA se encuentra en la región natural Selva Baja u Omagua a 104 m s. n. m. con precipitaciones anuales de hasta 4000 mm y temperatura máxima de 32 °C (Cruz-Luis et al., 2025).

El estudio se realizó en el Centro Experimental San Roque (CE San Roque), el cual pertenece a la EEA San Roque y se ubica en el distrito de San Juan Bautista, provincia de Maynas, departamento de Loreto (Figura 5). En esta zona predominan suelos del grupo Podzol háplico y presentan incipiente desarrollo genético, drenaje pobre, reacción ácida y bajo contenido de fósforo y potasio disponible (IIAP, 2002).

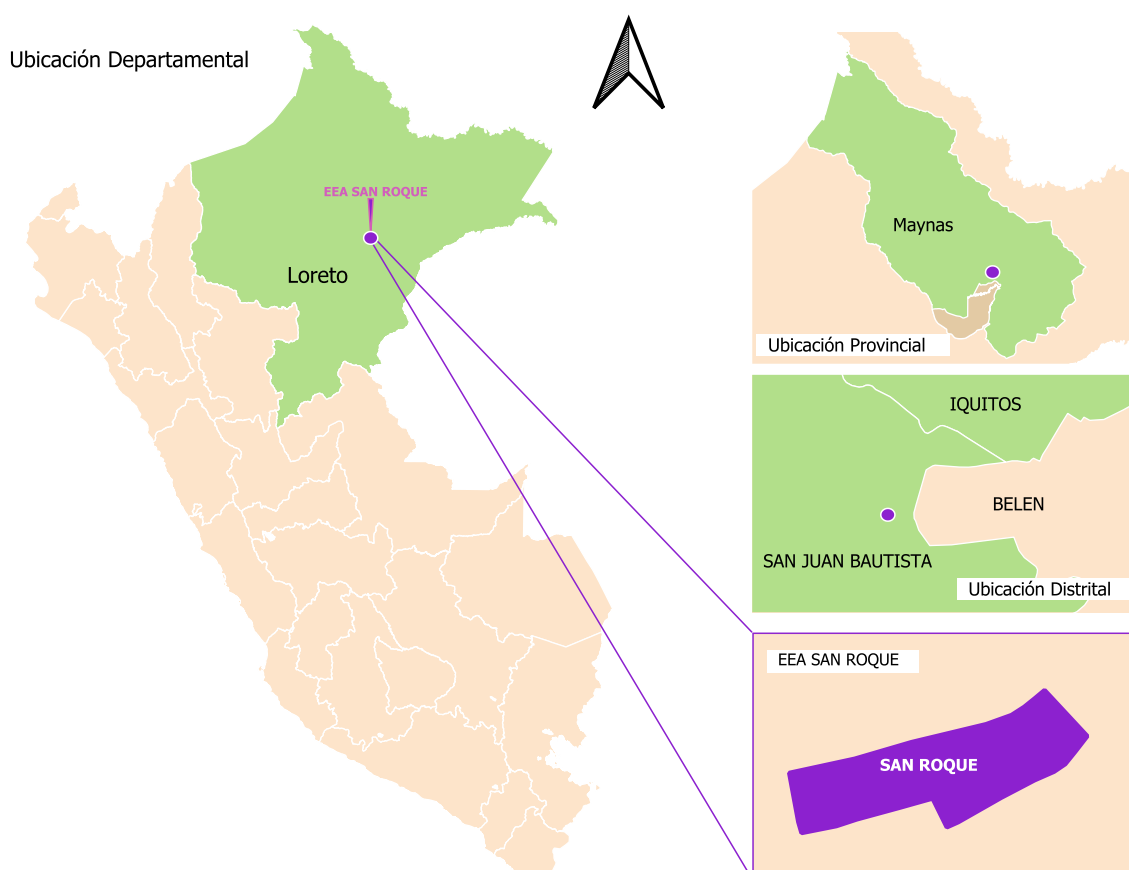


Figura 5. Ubicación del Centro Experimental San Roque

3.2. Muestreo estratificado del suelo

Con el objetivo de obtener una representación espacial adecuada de las condiciones edáficas del CE San Roque, 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).

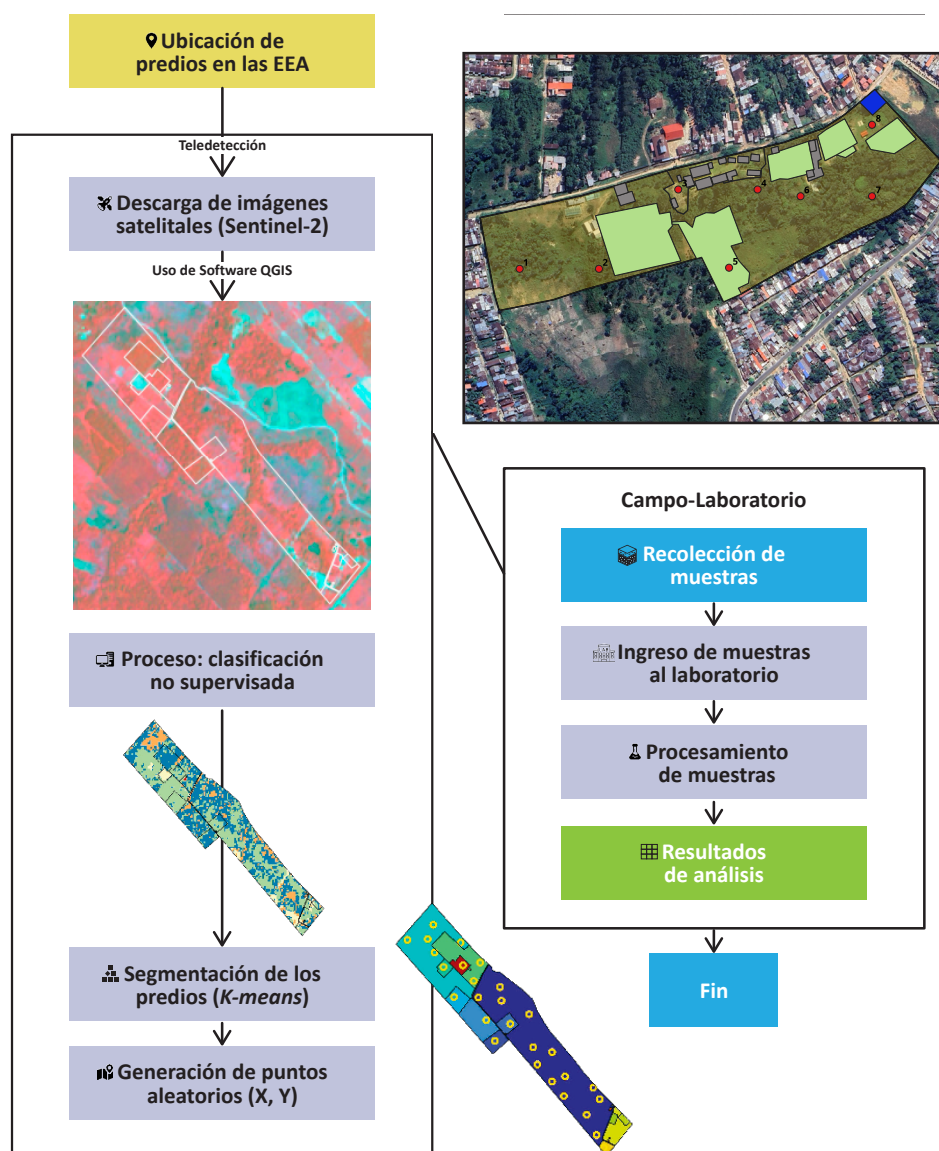


Figura 6. Flujo de trabajo para la determinación de los puntos de muestreo

3.2.1. Determinación de los puntos de muestreo

La determinación de los puntos de muestreo se inició con la descarga de imágenes satelitales del servidor Sentinel-2, las cuales fueron utilizadas para identificar las clases de cobertura mediante el algoritmo de clasificación no supervisada *K-means*. Posteriormente, se utilizó el software R (R Core Team, 2018) para determinar los puntos de muestreo mediante la función *spsample* del paquete *sp* (Pebesma y Bivand, 2005) (Figura 6). A través de un *script* en R, se generaron las coordenadas de los puntos de muestreo para cada clase de cobertura identificada, aplicando un método de muestreo estratificado. Se identificaron en total 8 puntos de muestreo de suelos, como se observa en la Figura 7.

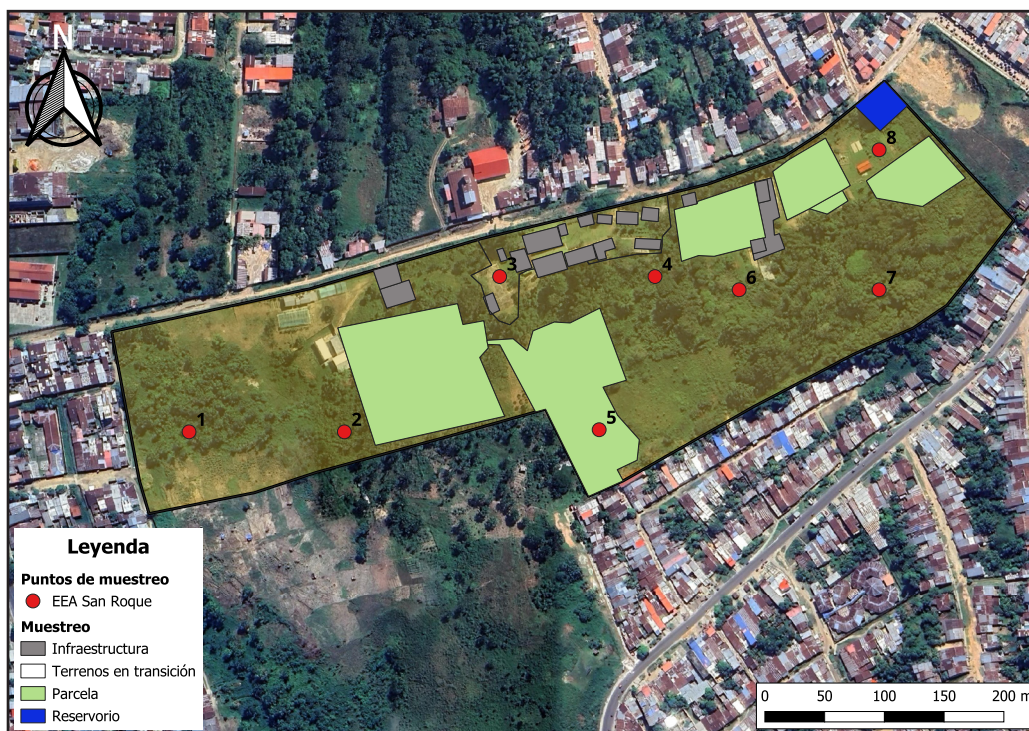


Figura 7. Puntos de muestreo del suelo en el Centro Experimental San Roque

3.2.2. Muestreo de suelos en los puntos identificados

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

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



Figura 8. Proceso del muestreo de suelos. A) Limpieza y realización del hoyo, B) colecta de 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 trasladadas a un laboratorio de análisis de suelos que cuente, de preferencia, con métodos analíticos acreditados. En este trabajo, las muestras fueron procesadas en el Laboratorio de Suelos, Aguas y Foliares de la EEA El Porvenir.

El primer pretratamiento consistió en el secado de las muestras a 35 °C durante 48 horas. Posteriormente, se efectuaron 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)
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 Bray y Kurtz	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 suelos del CE San Roque se caracterizan por un predominio de fracciones gruesas y, en menor medida, de fracciones más finas (Tabla 2). Esta condición favorece una rápida infiltración del agua, pero limita la retención hídrica y de nutrientes; la homogeneidad (baja asimetría en arena) sugiere unidades de manejo uniformes por textura. La reacción del suelo (pH) es en general fuertemente ácida (4,60) y con un alto porcentaje de saturación de aluminio que limita el crecimiento de los cultivos inhibiendo el crecimiento radicular, alterando procesos fisiológicos y dañando la membrana celular. Además, el aluminio reacciona con el fósforo formando compuestos insolubles y compite con la absorción de nutrientes como el calcio, magnesio y potasio.

La materia orgánica se clasifica como baja (0,79 %), pero con una alta variabilidad espacial, limitando la capacidad del suelo para suministrar nitrógeno, la estabilización de agregados y la capacidad tampón o buffer del suelo. La capacidad de intercambio catiónico es muy baja en todas las zonas, esto debido a la alta acidez intercambiable (presencia de aluminio) y a la baja materia orgánica, siendo necesaria la aplicación de enmiendas orgánicas para aumentar este parámetro.

Respecto a los nutrientes disponibles, el fósforo muestra una alta variabilidad entre zonas, encontrándose áreas con deficiencias importantes y otras con niveles adecuados. En el caso del potasio, los niveles son bajos en todas las zonas evaluadas. Por ello, se recomienda evitar recomendaciones de fertilización generales y basar las decisiones de manejo en diagnósticos específicos por zona, complementados con análisis foliares.

Desde el punto de vista de la fertilidad, la estación demanda de un enfoque zonal: el muestreo y la interpretación deben realizarse por unidades de manejo definidas por materia orgánica, fósforo y micronutrientes. Además, se debe fraccionar y aplicar potasio únicamente donde el diagnóstico indique deficiencia.

Finalmente, se recomienda integrar monitoreo periódico del suelo y del agua de riego, junto con análisis foliar en cultivos sensibles a la acidez, como parte de un sistema de manejo adaptativo. Este enfoque permitirá transitar de recomendaciones generales a estrategias zonales precisas que optimicen la eficiencia del fertilizante, reduzcan riesgos ambientales y mejoren la sostenibilidad de la producción en el CE San Roque.

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

Variables	Unidad	Media	SD	CV	Mediana	Mínimo	Máximo	Skewness
Arena	%	74,64	20,06	26,88	85,3	33	90,3	-1,56
Limo	%	14,71	10,53	71,57	8,8	7,8	37,1	1,66
Arcilla	%	10,65	10,36	97,29	6,9	1,9	29,9	1,37
pH	Unidad	4,6	1,17	25,46	4,2	3,56	6,7	1,21
MO	%	0,79	0,72	90,25	0,55	0,25	2,5	2,43
Sat. Al+H	%	40,61	9,34	23	37,27	27,18	53,76	0,41
P disp.	mg kg ⁻¹	129,06	188,62	146,15	27,95	1,11	529,18	1,67
K disp.	mg kg ⁻¹	30,8	12,72	41,3	29,8	16	50,8	0,31
Ca ²⁺	cmol kg ⁻¹	2,01	2,69	133,83	0,77	0,46	8,38	2,39
Mg ²⁺	cmol kg ⁻¹	0,23	0,17	76,61	0,17	0,05	0,53	0,73
K ⁺	cmol kg ⁻¹	0,15	0,03	21,53	0,14	0,12	0,22	1,71
CICe	cmol kg ⁻¹	3,73	2,89	77,43	2,64	1,12	9,1	0,99
Ac. Int.	cmol kg ⁻¹	1,34	1,02	76,7	1,14	0,4	3,3	1
PCI	%	47,45	25,88	54,54	42,23	13,68	92,09	0,45
PMI	%	7,01	4,6	65,62	5,29	2,5	16,16	0,81
PPI	%	6,07	3,39	55,9	5,69	2,42	10,71	0,14

MO: materia orgánica del suelo, Sat. Al+H: saturación de aluminio e hidrógeno, P disp.: fósforo disponible, K disp.: potasio disponible, CICe: capacidad de intercambio catiónico efectiva, Ac. Int.: acidez intercambiable, PCI: porcentaje de calcio intercambiable, PMI: porcentaje de magnesio intercambiable, PPI: porcentaje de potasio intercambiable, SD: desviación estándar, CV: coeficiente de variación, *Skewness*: asimetría.

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

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

Requisitos previos para el mapeo:

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

Procedimiento:

- a. **Preparación de los datos:** asegurar que los datos de entrada (formato CSV, *shapefile*, u otro) contengan las coordenadas (X, Y) y los valores de la variable de interés (ej. porcentaje de materia orgánica). Asimismo, verificar que no existan valores nulos o erróneos. Existe la opción de que el complemento detecte valores atípicos, los represente en una previsualización del ploteo de puntos y los elimine para el análisis. Esta herramienta es opcional.
- b. **Análisis exploratorio de los datos:** realizar un análisis exploratorio de 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.

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

Donde:

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

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

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

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

3.7.1. Generación y ajuste del variograma

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

3.7.2. Interpolación *kriging*

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

3.7.3. Validación cruzada

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

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

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

Donde:

n: el número de muestras.

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

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

- b. **Coeficiente 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 del suelo

Algunas variables físicas y químicas muestran alto grado de ajuste predictivo y rangos de autocorrelación a escala del lugar de estudio, lo que las convierte en variables modelo para la zonificación de fertilidad. Entre estas propiedades, destacan pH, arcilla, arena y el porcentaje de calcio intercambiable. Todas estas variables presentan R^2 alto en comparación al resto de las variables y modelos variográficos bien definidos (Tabla 3) y constituyen las variables más estables para interpolación directa y para conformar unidades de manejo diferencial.

En este escenario, el análisis geoestadístico permite diferenciar dos usos técnicos: (a) mapeo directo y definición de zonas basadas en variables altamente estructuradas y (b) estimación indirecta de variables débilmente estructuradas mediante técnicas geoestadísticas que incorporen covariables. En la práctica, eso implica emplear las propiedades de alta predictibilidad como covariables en modelos de *kriging* de regresión o *co-kriging* para mejorar la estimación de P disponible, acidez intercambiable y MO, en lugar de confiar en *kriging* simple sobre series con bajo R^2 . Además, la presencia de modelos “*linear to sill*” para algunas variables sugiere la coexistencia de una tendencia regional (por ejemplo, gradientes texturales o de manejo) que debe modelarse explícitamente (*kriging* universal) antes de interpolar.

Desde un enfoque avanzado de fertilidad, el análisis geoestadístico permite dos ventajas concretas y complementarias: (1) diseñar prácticas de manejo y aplicación de enmiendas por zonas con base en mapas de K^+ , saturación de aluminio y pH (por ejemplo, delimitar zonas a encalar cuando los mapas de acidez intercambiable y saturación de aluminio indiquen acidez); y (2) optimizar la aplicación de fósforo mediante una estrategia híbrida: uso de mapas derivados de covariables (textura, y saturaciones catiónicas) para orientar zonas de muestreo intensivo, seguido de formular dosis localizadas fraccionadas y control de eficiencia mediante ensayos en parcelas con diferentes niveles de fertilidad. El potasio, puede gestionarse mediante tasas variables de fertilización apoyadas en los mapas de variación espacial.

En síntesis, la sede de la EEA San Roque dispone de un conjunto de propiedades con un grado de ajuste predictivo que permite una zonificación de fertilidad basada en evidencia espacial. Aprovechar estas variables como columna vertebral de la cartografía y aplicar técnicas avanzadas (regresión-*kriging*, *co-kriging*, integración de sensores proximales) para estimar propiedades de baja estructura transforma el conocimiento espacial en decisiones de fertilización precisas, eficientes y resilientes frente a la heterogeneidad del suelo.

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

Variable	Model	Nugget (C ₀)	Sill (C ₀ +C)	Range (m)	Cross-validation	
					RMSE	R ²
Arena	<i>Linear to Sill</i>	0	425,58	315,22	14,01	0,45
Limo	<i>Linear to Sill</i>	0	113,8	315,22	9,15	0,17
Arcilla	<i>Gaussian</i>	0	122,44	315,22	6,53	0,56
pH	<i>Linear</i>	1,3	1,36	315,21	1,39	0,62
MO	<i>Spherical</i>	0,12	0,77	315,21	0,81	0,16
Sat. Al+H	<i>Spherical</i>	0	94,642	315,22	6,84	0,4
P disp.	<i>Spherical</i>	11 366,31	51 971,21	310,57	202,53	0,11
K ⁺	<i>Exponential</i>	0	0	315,22	0,04	0,29
Ca ²⁺	<i>Spherical</i>	3,9	10,28	315,18	3,18	0,38
Mg ²⁺	<i>Linear</i>	0,028	0,028	315,21	0,2	0,4
K disp.	<i>Spherical</i>	173,1	183,2	315,1	15,25	0,25
CICe	<i>Spherical</i>	3,86	10,95	315,18	3,49	0,26
Ac. Int.	<i>Linear</i>	0,95	0,98	315,21	1,21	0,22
PCI	<i>Linear</i>	657,34	658,53	315,21	29,86	0,43
PMI	<i>Linear to Sill</i>	9,18	19,72	314,5	5,157	0,03
PPI	<i>Linear</i>	11,26	11,7	315,21	4,15	0,36

MO: materia orgánica del suelo, Sat. Al+H: saturación de aluminio e hidrógeno, P disp.: fósforo disponible, K disp.: Potasio disponible, CICe: capacidad de intercambio catiónico efectiva, Ac. Int.: acidez intercambiable, PCI: porcentaje de calcio intercambiable, PMI: porcentaje de magnesio intercambiable, PPI: porcentaje de potasio intercambiable, R²: coeficiente de determinación, RMSE: error cuadrático medio.

3.9. Mapeo digital de las propiedades del suelo

Los mapas generados para la sede de la EEA San Roque (Figuras 9-21) reflejan la marcada heterogeneidad espacial de las propiedades físicas y químicas del suelo, con implicancias directas en la fertilidad y en el manejo de los cultivos en la EEA. En términos texturales, la arcilla y la arena presentan estructuras espaciales medianamente definidas (rangos de 315,22 m con $R^2 = 0,56$, y $0,45$), lo que permite delimitar unidades relativamente homogéneas de manejo. En contraste, el limo muestra un patrón errático y poco predecible, lo que limita su aporte a la zonificación.

Respecto a las propiedades químicas, el pH evidencia continuidad espacial amplia (rango 315,21 m, $R^2 = 0,62$), consolidándose como una de las variables más confiables para definir Unidades de Manejo (UM). La saturación de aluminio e hidrógeno y acidez intercambiable presentan también rangos elevados ($range = 315$ m) pero con ajuste débil, aun así, confirma la presencia de sectores con problemas de acidez que requieren atención específica.

En relación con la fertilidad, el potasio disponible constituye un indicador más estable ($R^2 = 0,25$, rango 315,1 m), con mapas que permiten ubicar áreas de alta acumulación frente a otras deficitarias, abriendo la posibilidad de implementar esquemas de fertilización variable. En cambio, el fósforo disponible tiene baja estructura espacial ($R^2 = 0,11$), lo que revela una fuerte heterogeneidad y confirma la necesidad de un muestreo intensivo o de estrategias de manejo más generalizadas. Igualmente, la materia orgánica muestra un patrón bajo, con limitada predictibilidad, lo que refuerza la importancia de aplicar prácticas sistemáticas de incorporación de residuos y abonos verdes a escala predial.

Las bases intercambiables presentaron comportamientos contrastantes: Mg^{2+} y Ca^{2+} revelan estructuras espaciales más claras y confiables, K^+ muestra patrones más débiles o poco estables. En el caso de la saturación de aluminio y la acidez intercambiable los ajustes fueron bajos para ambas variables, lo que restringe su uso cartográfico como variable principal.

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

Desde el punto de vista agronómico, los mapas del CE San Roque constituyen una herramienta estratégica para la definición de unidades de manejo basadas en variables de alta confiabilidad (arena, arcilla, pH, K^+ y Ca^{2+}). Las variables con menor predictibilidad (P disponible, porcentaje de magnesio intercambiable) deben complementarse con muestreo más denso o el uso de covariables proximales. Este enfoque permite diseñar prácticas de fertilización sitio-específica, manejo acidez, y estrategias de conservación de carbono edáfico, favoreciendo un mejor equilibrio entre productividad y sostenibilidad en los predios experimentales de la estación.

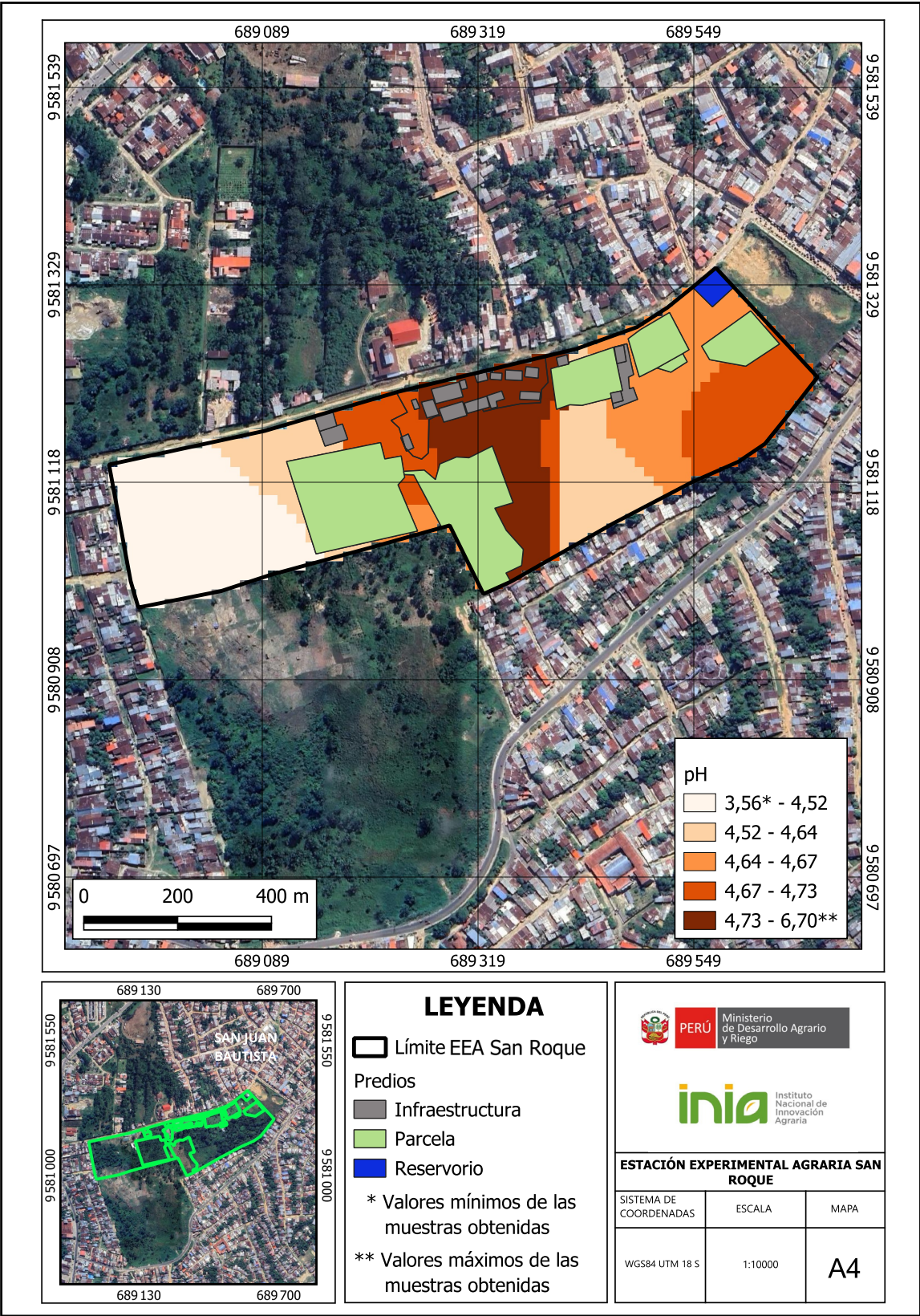


Figura 9. Mapa de variación espacial del pH

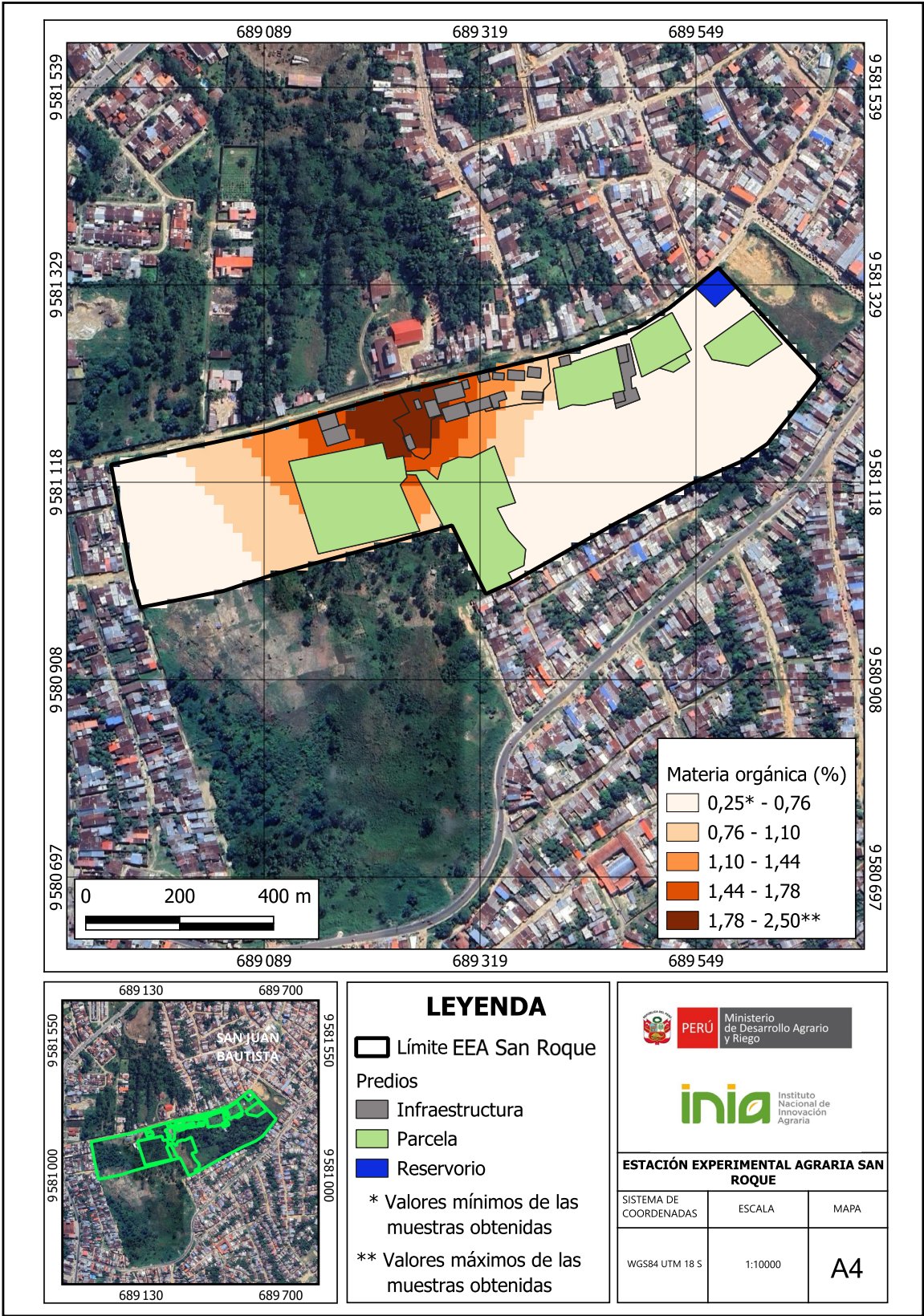


Figura 10. Mapa de variación espacial del porcentaje de materia orgánica

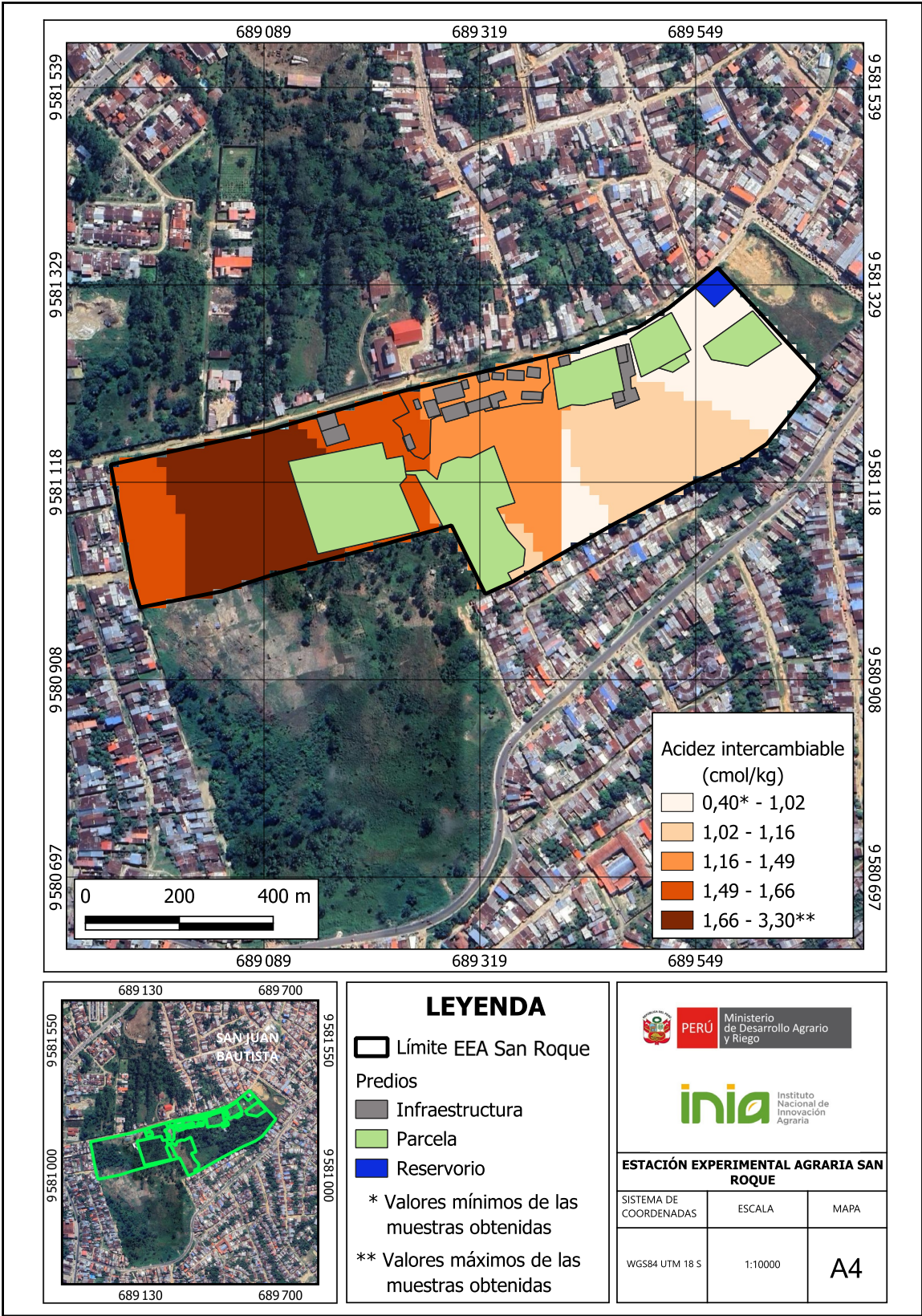


Figura 11. Mapa de variación espacial de la acidez intercambiable

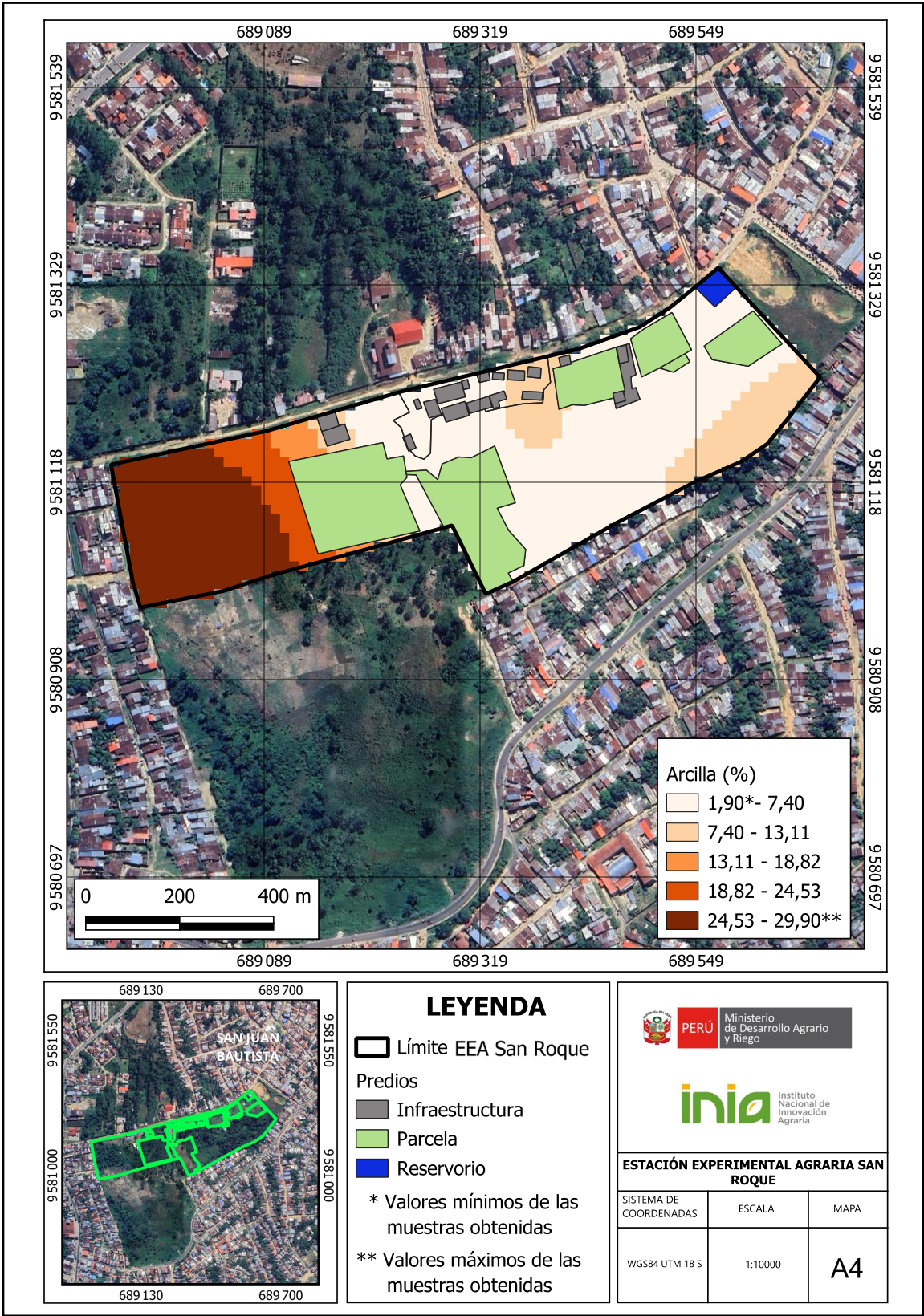


Figura 12. Mapa de variación espacial del porcentaje de arcilla

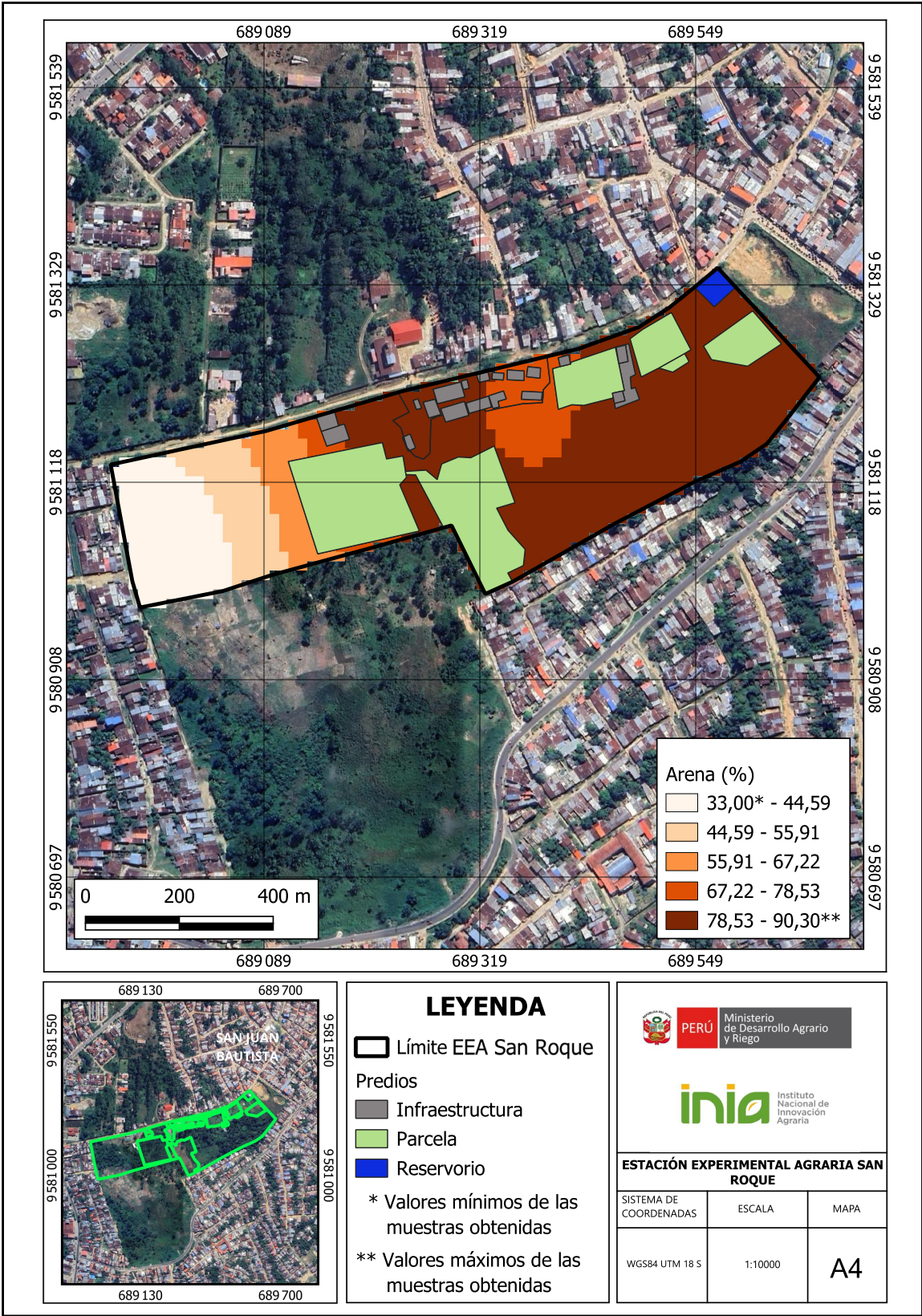


Figura 13. Mapa de variación espacial del porcentaje de arena

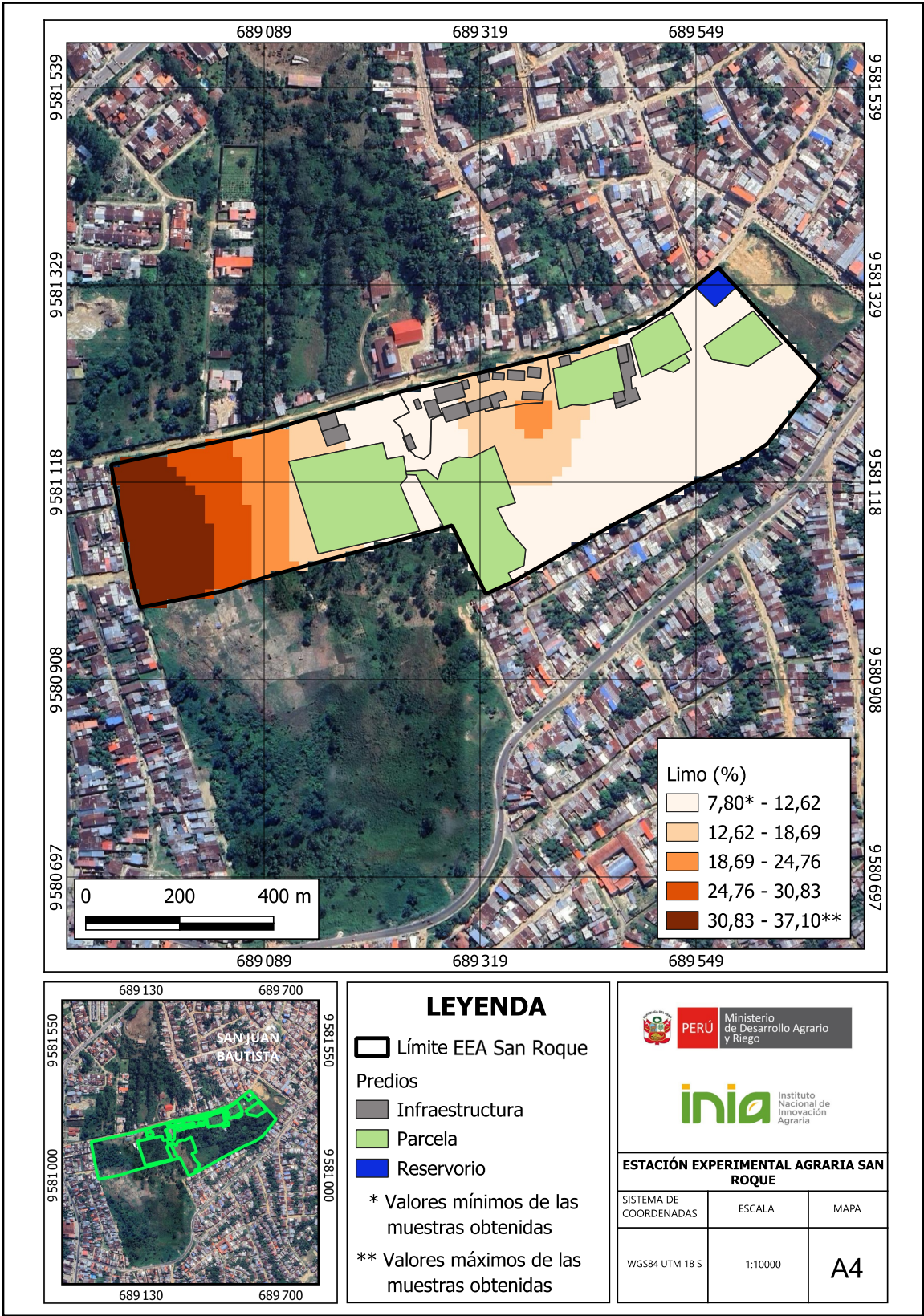


Figura 14. Mapa de variación espacial del porcentaje de limo

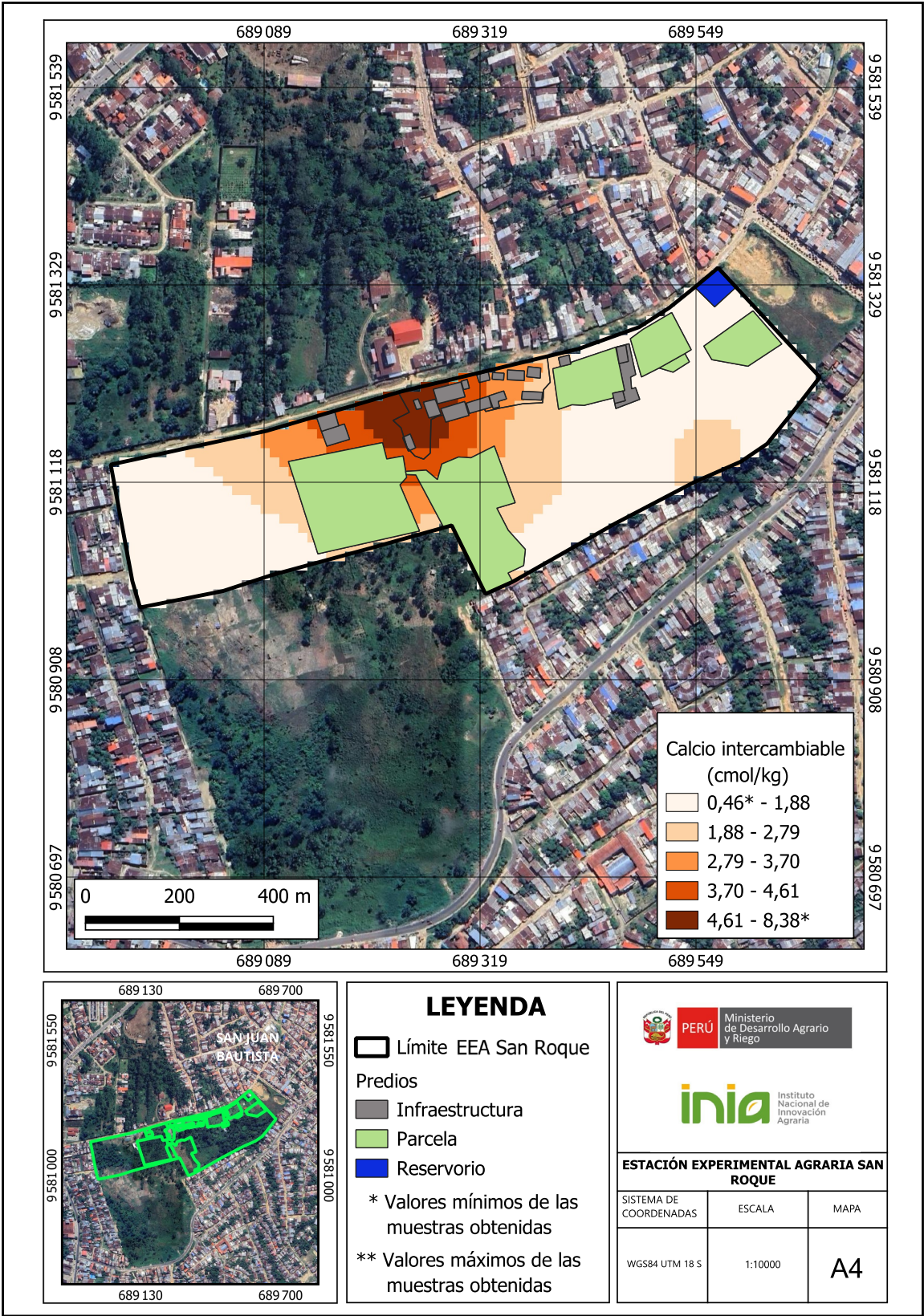


Figura 15. Mapa de variación espacial de calcio intercambiable

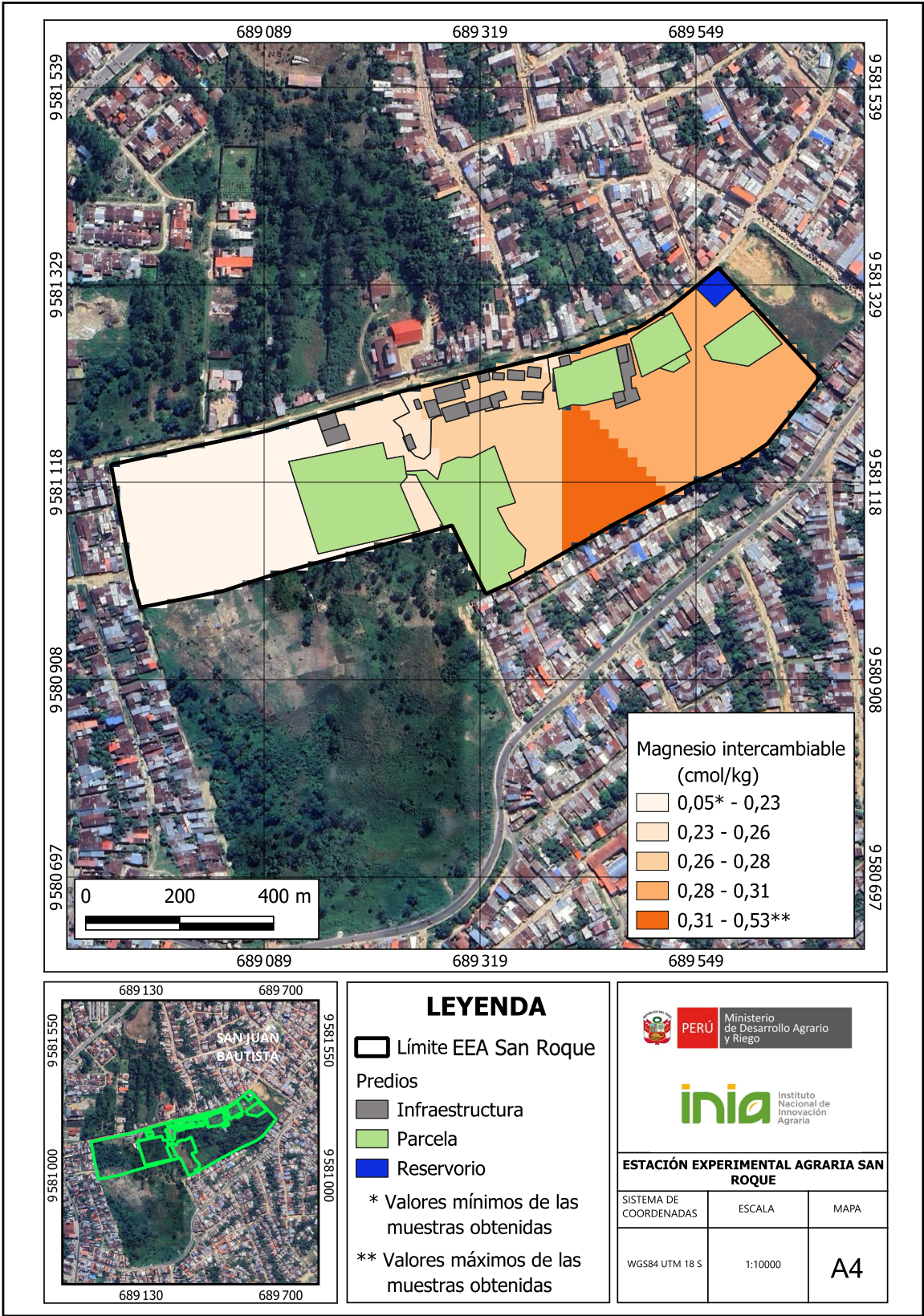


Figura 16. Mapa de variación espacial de magnesio intercambiable

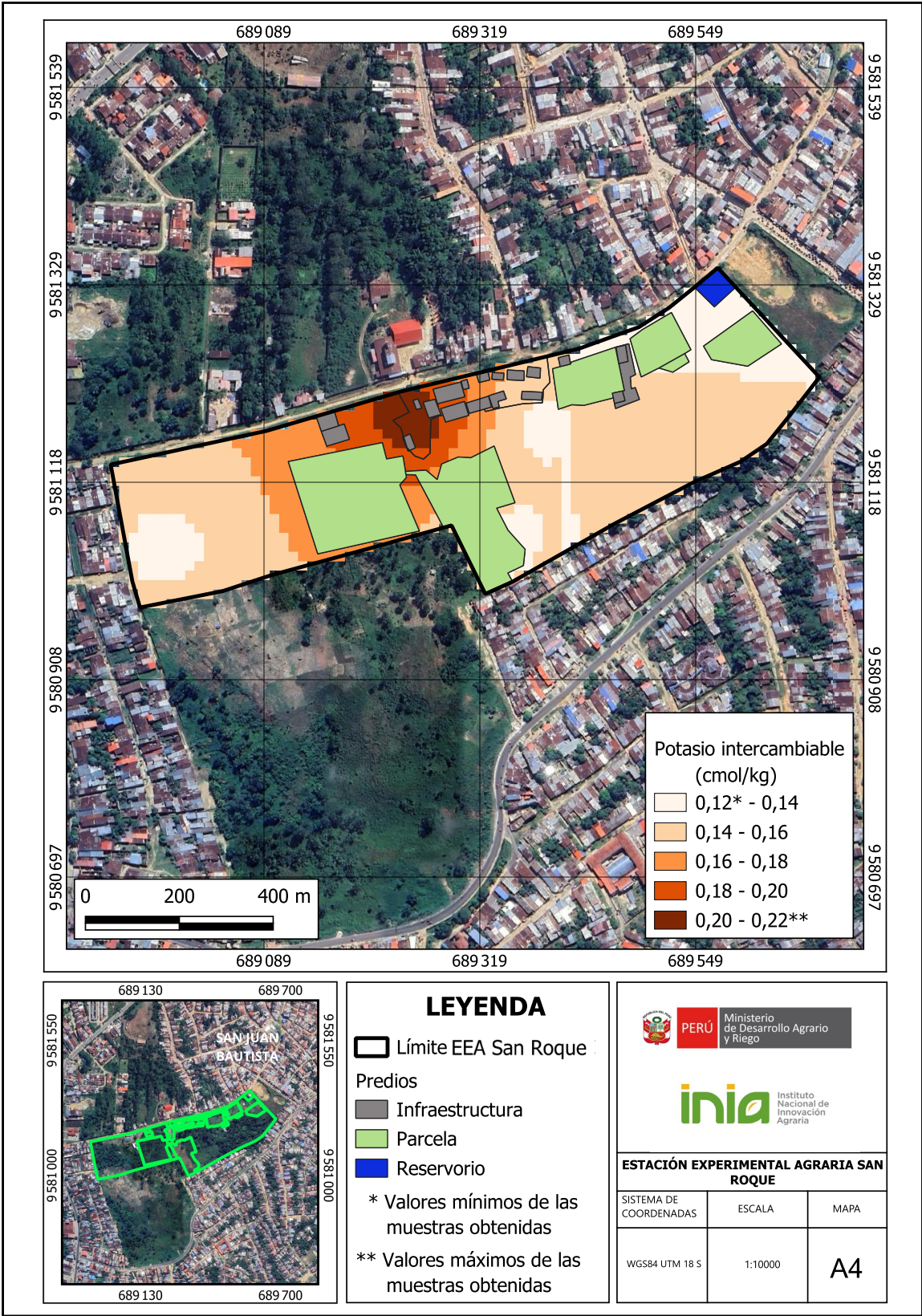


Figura 17. Mapa de variación espacial de potasio intercambiable

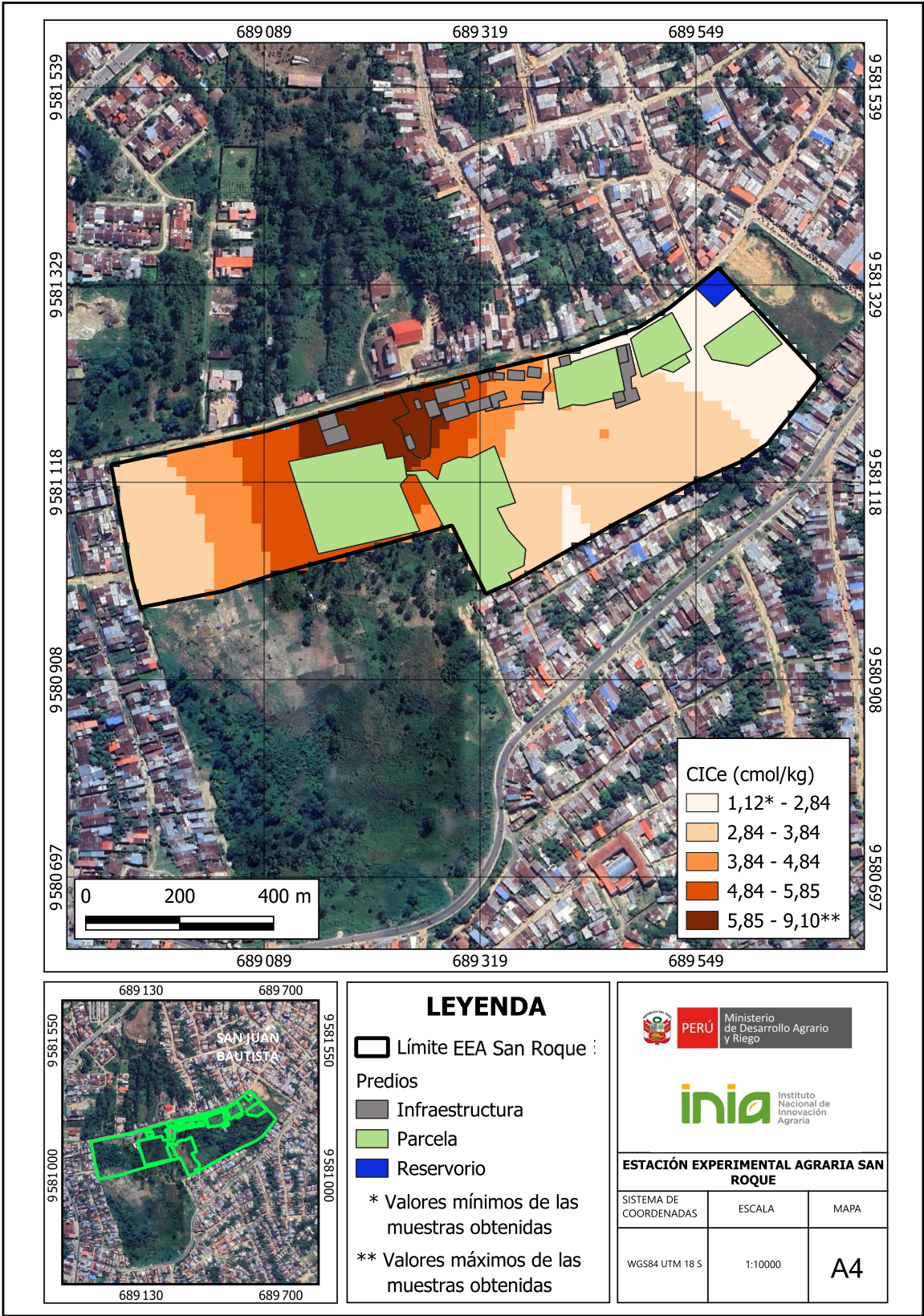


Figura 18. Mapa de variación espacial de la capacidad de intercambio catiónico efectiva

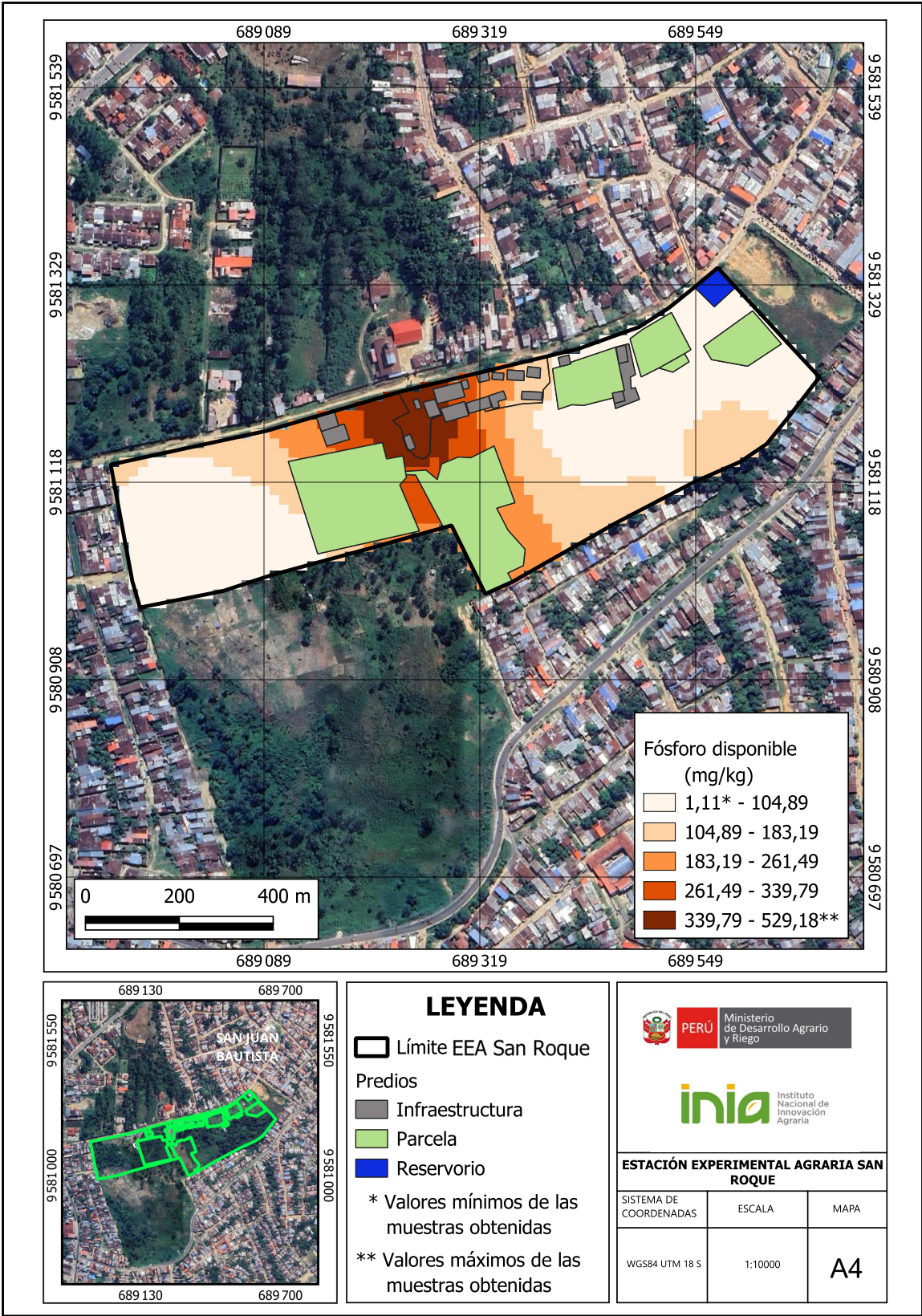


Figura 19. Mapa de variación espacial de fósforo disponible

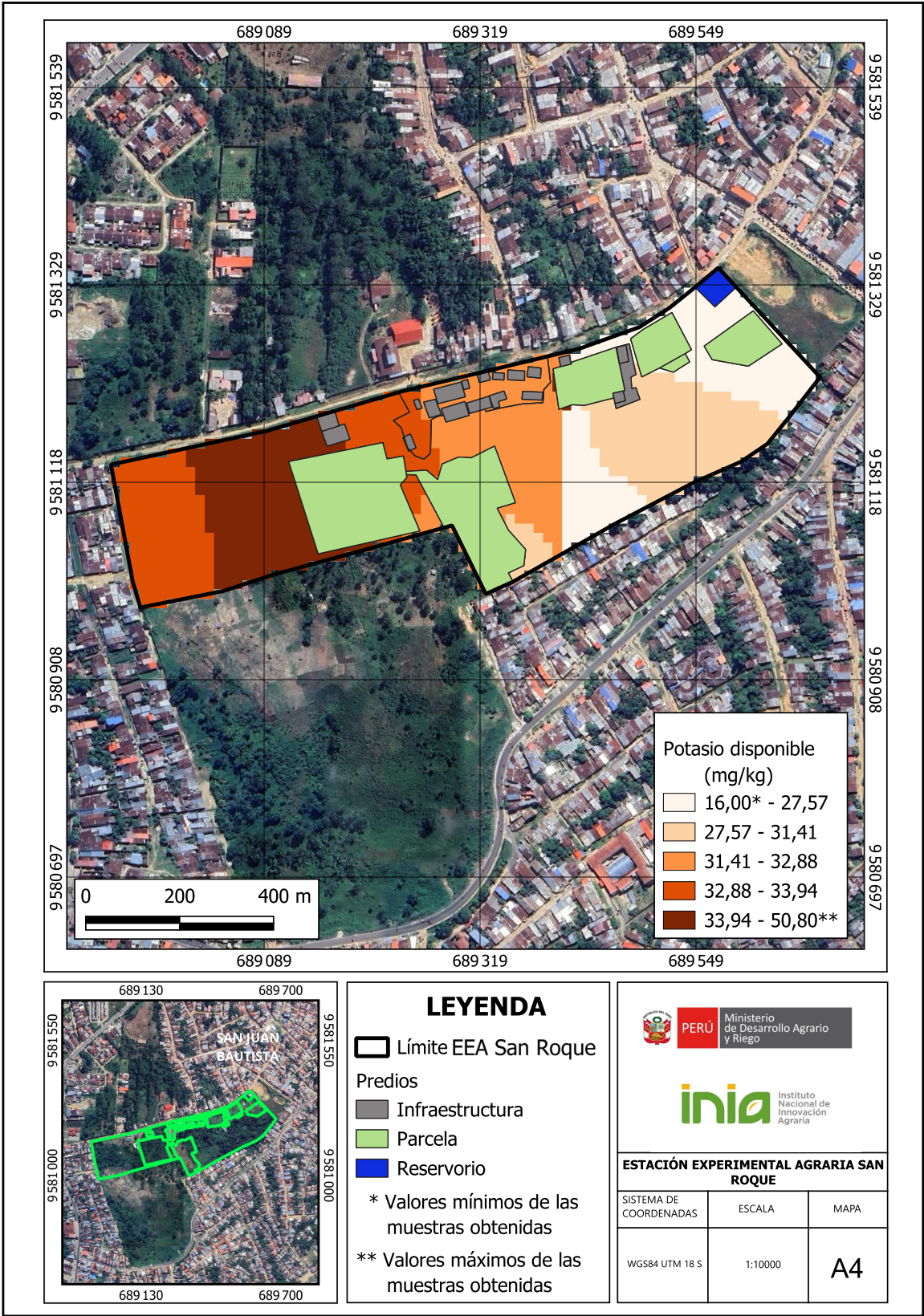


Figura 20. Mapa de variación espacial de potasio disponible

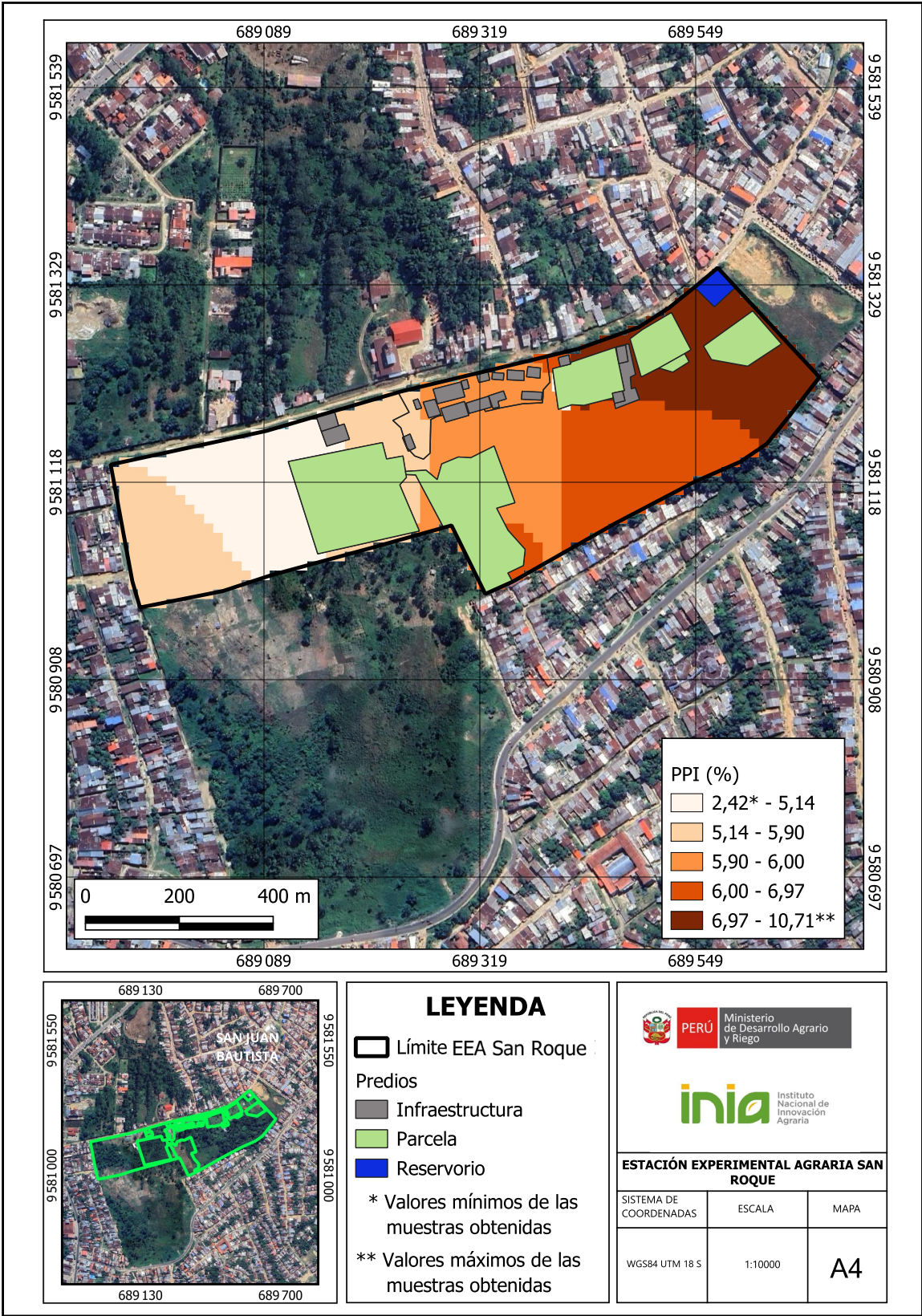


Figura 21. Mapa de variación espacial del porcentaje de potasio intercambiable





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

4.1. Índice de saturación de bases catiónicas

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

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

En los suelos del CE San Roque, el pH ($4,60 \pm 1,17$), la CICE ($3,73 \pm 2,89 \text{ cmol kg}^{-1}$) y la acidez intercambiable ($1,34 \pm 1,02 \text{ cmol kg}^{-1}$) mostraron evidencias para la interpretación de la saturación de cationes básicos. De esta manera, el diagnóstico de las relaciones catiónicas muestra que el PPI ($6,07 \pm 3,39 \%$), se encuentra en condiciones óptimas que benefician la salud del suelo, mejorando la nutrición vegetal ya que el potasio es clave para la fotosíntesis, síntesis de proteínas y transporte de azúcares; asimismo, aumenta la tolerancia al estrés y mejora la calidad de cosecha. No obstante, la alta variabilidad espacial permite identificar zonas de manejo con preocupación agronómica, en donde el PPI es alto ($10,71 \%$), este desbalance podría causar deficiencias de calcio y magnesio, problemas fisiológicos en cultivos, riesgo de desequilibrio químico del suelo, así como también indicar una sobre fertilización potásica. Precisamente, los valores de PCI ($47,45 \pm 25,88 \%$, $CV = 54,54 \%$) y PMI ($7,01 \pm 4,60 \%$, $CV = 65,62 \%$), presentan una media muy baja y existe alta variabilidad y zonas con niveles deficientes.

El PCI presentó un grado moderado de ajuste espacial ($R^2 = 0,43$), lo que permitió identificar zonas con distintos niveles de insuficiencia de Ca^{2+} , tal como se observa en el mapa de la Figura 22. Los rangos identificados fueron: zona 1 ($13,68\text{--}44,65 \%$), zona 2 ($44,65\text{--}49,55 \%$), zona 3 ($49,55\text{--}50,23 \%$), zona 4 ($50,23\text{--}55,92 \%$) y zona 5 ($55,92\text{--}92,09 \%$).

De manera similar, el PMI permitió identificar zonas con diferentes grados de insuficiencia de Mg^{2+} (Figura 23), clasificadas en cuatro categorías: zona 1 ($2,50\text{--}5,19 \%$), zona 2 ($5,19\text{--}6,77 \%$), zona 3 ($6,77\text{--}8,35 \%$) y zona 4 ($8,35\text{--}9,93 \%$). Estas zonas abarcaron prácticamente toda la superficie interpolada del CE San Roque.

En cultivos como el cacao y el plátano, predominantes en la región Loreto, el calcio contribuye a la estabilización de los agregados del suelo, mejora la estructura y reduce la compactación, además de ser esencial para el crecimiento radicular y el desarrollo de órganos reproductivos; asimismo, su deficiencia puede generar desórdenes fisiológicos como necrosis apical. Por su parte, el magnesio, al formar parte central de la clorofila y activar enzimas metabólicas, facilita el transporte de fotoasimilados hacia los frutos, favoreciendo su desarrollo y rendimiento (Marschner, 2011). Dada la alta variabilidad espacial del PCI y PMI en el CE San Roque, la estrategia de manejo debe enfocarse en ajustar dosis, fuente y forma de aplicación de fertilizantes según zonas de manejo identificadas.

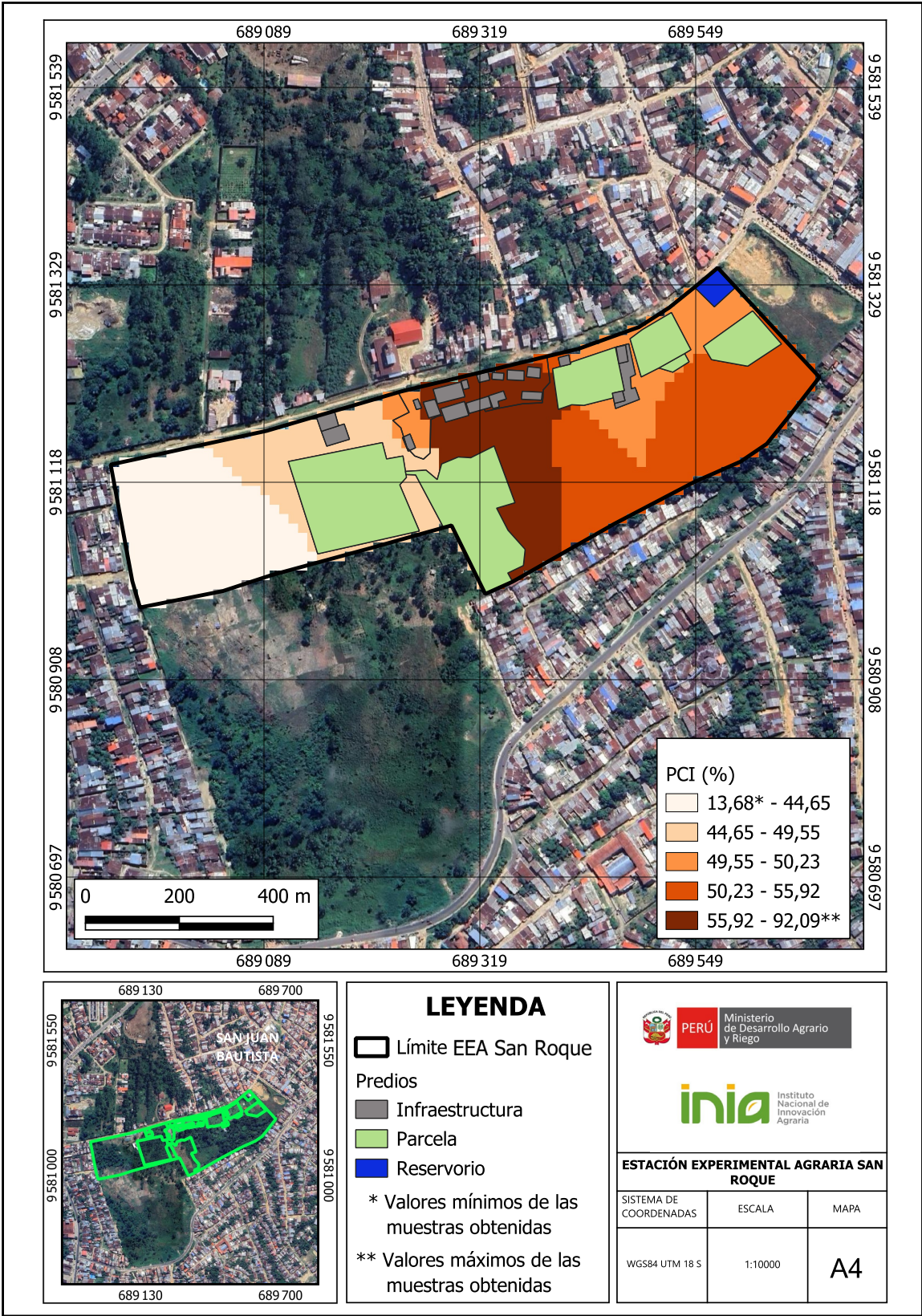


Figura 22. Mapa de variación espacial del porcentaje de calcio intercambiable

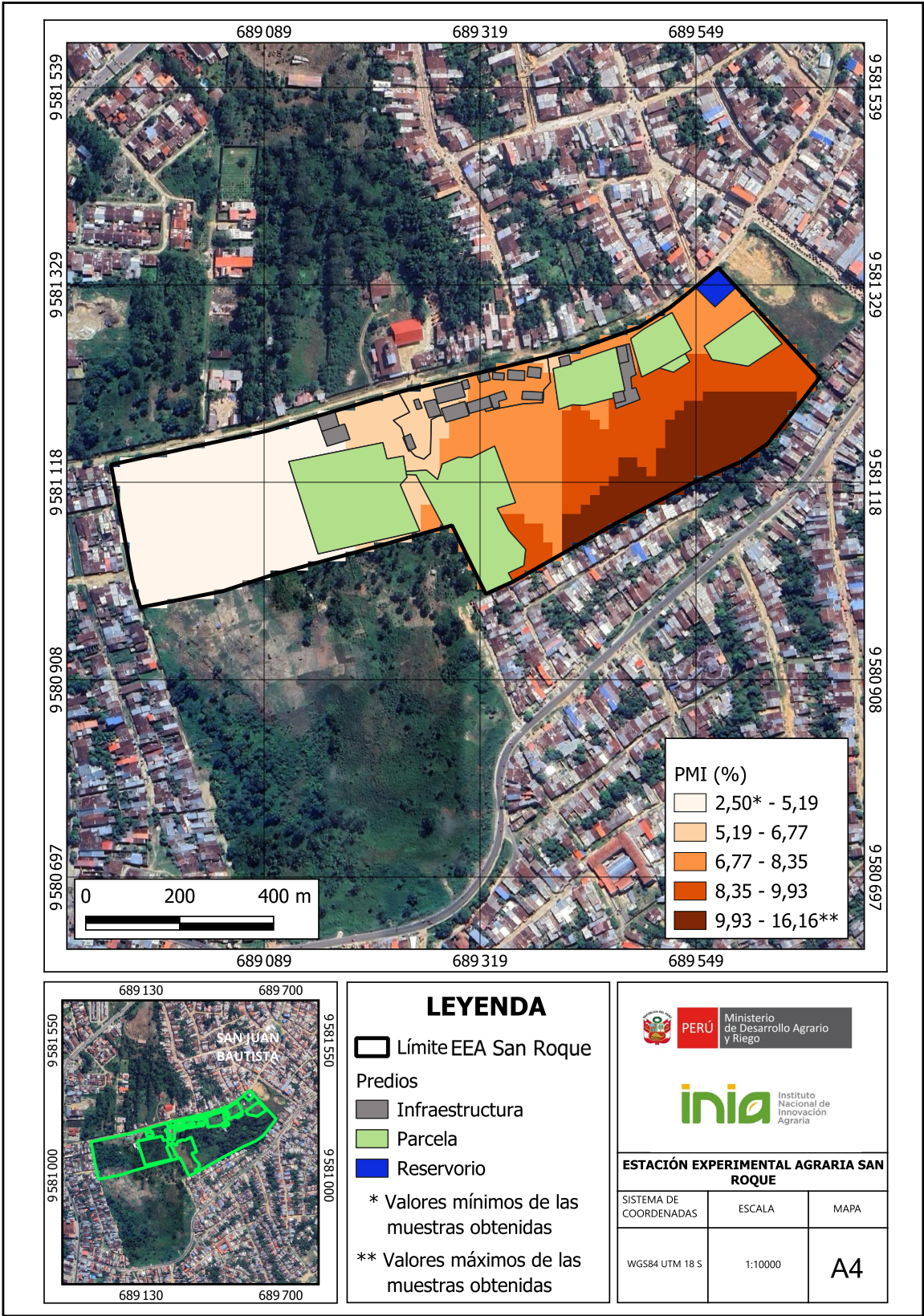


Figura 23. Mapa de variación espacial del porcentaje de magnesio intercambiable

4.1.2. Variación espacial de los desbalances iónicos con niveles elevados de porcentaje de saturación de aluminio e hidrógeno

De acuerdo con las propiedades químicas evaluadas, los suelos de la del CE San Roque se clasifican, en términos generales, como fuertemente ácidos ($\text{pH} = 4,60$), aunque presentan una alta variabilidad espacial, con valores que oscilan entre 3,56 y 6,70. Asimismo, el porcentaje de saturación de aluminio e hidrógeno presentó un grado moderado de ajuste entre los valores observados y los predichos ($R^2 = 0,40$), lo que permitió identificar, en el mapa de la Figura 24, zonas con diferentes niveles de riesgo por acidez: una zona de bajo riesgo ($\% \text{ Sat. Al} + \text{H} < 32,82 \%$), una zona de riesgo moderado ($\% \text{ Sat. Al} + \text{H} = 32,82\text{--}43,58 \%$) y una zona de alto riesgo ($\% \text{ Sat. Al} + \text{H} = 43,58\text{--}53,76 \%$).

La acidez del suelo reduce la disponibilidad y absorción de nutrientes esenciales, como fósforo, calcio, magnesio y molibdeno, e incrementa la solubilidad del aluminio tóxico. Esta condición limita el crecimiento radicular y puede afectar negativamente el rendimiento y la calidad de la producción. Dichos efectos pueden manifestarse de manera diferenciada en cultivos estratégicos como cacao y plátano, debido a que, aunque ambos son cultivos tropicales, presentan distintas tolerancias fisiológicas y radicales a los suelos ácidos (Barrezueta-Unda, 2019).

En el caso del cacao, clones como el CCN-51 toleran suelos con pH extremadamente ácidos ($< 5,5$), mostrando una mayor extracción de N, P y Mg en grano, hoja y cáscara. Sin embargo, en términos generales, el pH óptimo para maximizar la disponibilidad y absorción de nutrientes se encuentra entre 5,5 y 7 (Rosas-Patiño et al., 2021). Por otro lado, en plátano la acidez extrema ($< 5,0$) causa toxicidad por Al y Mn, inhibe raíces y reduce disponibilidad de K y P, los cuales son clave para el desarrollo de pseudotallos y frutos. Para este cultivo los suelos ligeramente ácidos ($\text{pH} 5,5\text{--}6,5$) son ideales para su desarrollo óptimo (Delgado Bejarano et al., 2023).

Con el fin de mitigar los efectos de la acidez identificados en los suelos del CE San Roque, se propone el uso de cal agrícola para elevar el pH a 5,5-6,5 ideal para cultivos estratégicos. Asimismo, se propone complementar con yeso agrícola ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), el cual, aunque no eleva el pH del suelo, aporta calcio y contribuye a mejorar su estructura.

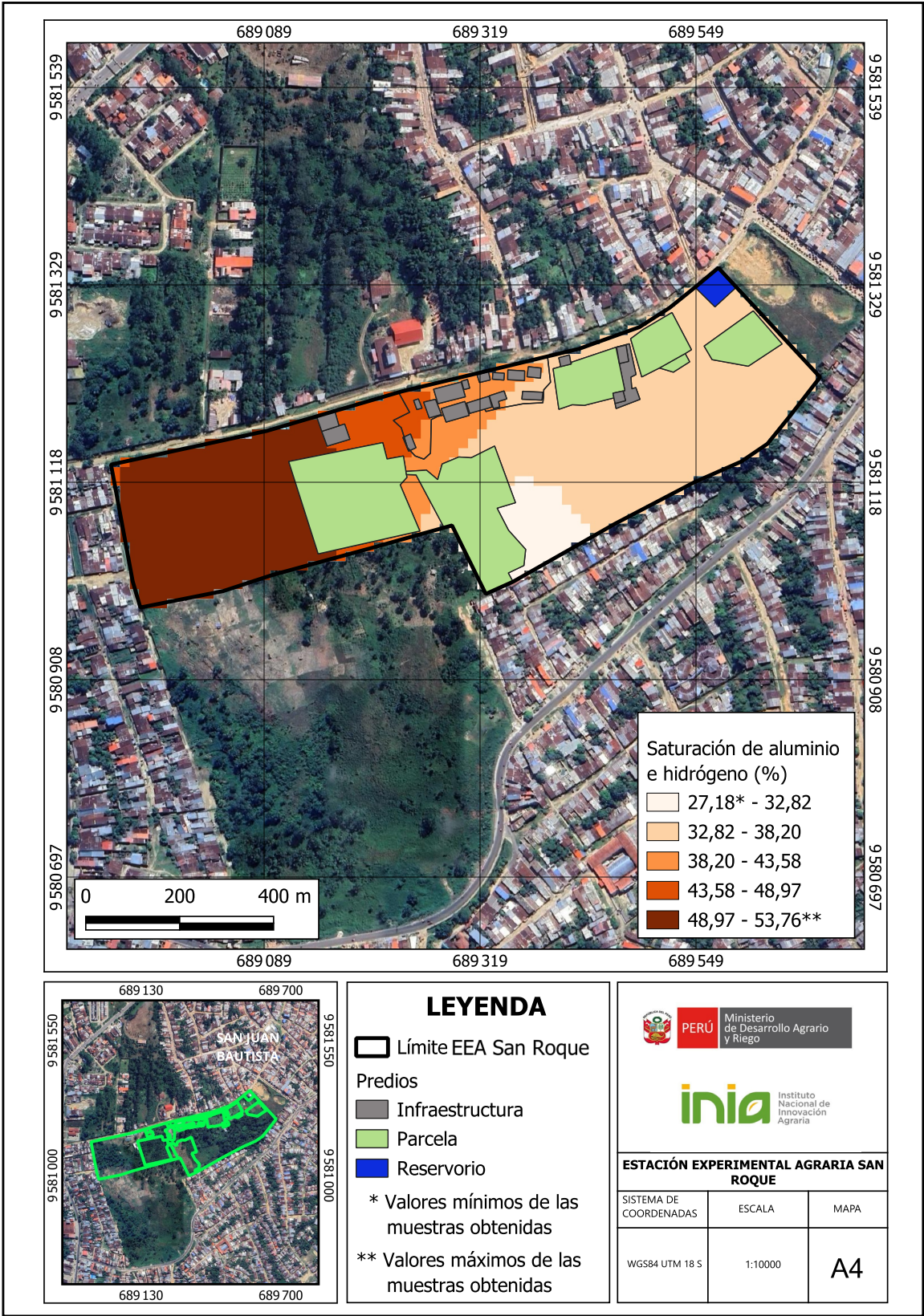


Figura 24. Mapa de variación espacial del porcentaje de la saturación de aluminio e hidrógeno

4.2. Niveles de suficiencia de nutrientes disponibles

4.2.1. Requerimiento de fertilización fosforada de suficiencia para el cultivo de plátano

El comportamiento geoestadístico del fósforo disponible muestra una estructura espacial débil, con un modelo ajustado de tipo esférico. El *nugget* (C_0) fue de 11 366,31 y el *sill* ($C_0 + C$) de 51 971,21, valores extremadamente altos indicando una variabilidad muy alta en el contenido de fósforo; también tiene un error de predicción muy alto que dificulta el manejo con precisión, posiblemente asociado a factores locales como acumulación de residuos orgánicos, microambientes de humedad o diferencias en manejo previo de fertilización.

El P disponible tiene baja capacidad predictiva ($R^2 = 0,11$), quiere decir que el modelo esférico explica solo el 11 % de su variabilidad espacial y el 89 % restante es aleatorio o sigue un patrón no capturado. 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 los cálculos de fertilización fosforada en el cultivo de plátano, se tomará como referencia un nivel crítico de 10 mg kg^{-1} y un rendimiento potencial de 50 t ha^{-1} de plátano convencional con alta tecnología. De esta manera, el nivel de fósforo ($129,06 \pm 188,62 \text{ mg kg}^{-1}$) es suficiente para el cultivo, por lo que no se espera respuesta a mayores niveles de la fertilización. En este sentido, se considerará el plan de fertilización en función al criterio de suficiencia, para reponer lo extraído por la cosecha. El cálculo se realiza siguiendo la metodología descrita por Quispe-Matos et al., (2025).

Primer 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.

$$\text{Incremento de raíces y brotes} = 0,35 \times 50 \text{ t ha}^{-1} = 17,50 \text{ t ha}^{-1}$$

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

$$\text{Rendimiento objetivo} = 50 \text{ t ha}^{-1} + 17,50 \text{ t ha}^{-1} = 67,50 \text{ t ha}^{-1}$$

Tercer paso: calcular el requerimiento de P utilizando la Fórmula 5. Para este cálculo y con fines prácticos se considera una extracción de 0,25 kg de fósforo por tonelada de producción.

$$\text{Requerimiento de P} = 0,25 \text{ kg de P t}^{-1} \times 67,50 \text{ t ha}^{-1} = 16,88 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

De esta manera, la dosis de fertilización anual sería de $74,34 \text{ kg ha}^{-1}$ de fosfato monoamónico (52 % de P_2O_5). Con esta dosis anual de fertilizante se logra reponer el P extraído por el rendimiento producido en el sistema productivo de plátano en el CE San Roque. Dada la naturaleza inmóvil del fósforo en el perfil edáfico, se recomienda fraccionar esta dosis durante toda la campaña agrícola, mejorando así la eficiencia de absorción en las fases fenológicas críticas del cultivo.





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.
- Barrezueta-Unda, S. (2019). Propiedades de algunos suelos cultivados con cacao en la provincia El Oro, Ecuador. *CienciaUAT*, 155-166. <https://doi.org/10.29059/cienciauat.v14i1.1210>
- Bear, F. E., Prince, A. L., y Malcolm, J. L. (1945). *Potassium needs of New Jersey soils*. New Jersey Agricultural Experiment Station.
- Bray, R. H. (1958). The correlation of a phosphorus soil test with the response of wheat through a modified Mitscherlich equation. *Soil Science Society of America Journal*, 22(4), 314–317. <https://doi.org/10.2136/sssaj1958.03615995002200040013x>
- Brock, C., Jackson-Smith, D., Kumarappan, S., Culman, S., Doohan, D., y Herms, C. (2021). The prevalence and practice of soil balancing among organic corn farmers. *Renewable Agriculture and Food Systems*, 36(4), 1-10. <https://doi.org/10.1017/S1742170520000381>
- Buresh, R.J., Smithson, P.C., y Hellums, D.T. (1997). Building Soil Phosphorus Capital in Africa. En R. J. Buresh, P. A. Sanchez, y F. Calhoun (Eds.), *Replenishing Soil Fertility in Africa* (pp. 111-149). Soil Science Society of America, Inc; American Society of Agronomy, Inc. https://apps.worldagroforestry.org/Units/Library/Books/PDFs/91_Replenishing_soil_fertility_in_africa.pdf
- Bruijnzeel, L. (2004). Hydrological functions of tropical forests: not seeing the soil for the trees? *Agriculture Ecosystems & Environment*, 104(1), 185-228. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2004.01.015>
- Chaganti, V., y Culman, S. (2017). Historical perspective of soil balancing theory and identifying knowledge gaps: A review. *Crop, Forage y Turfgrass Management*, 3(1), 1-7. <https://doi.org/10.2134/cftm2016.10.0072>
- Chinea-Horta, A., y Rodríguez-Izquierdo, L. (2021). Comportamiento geoespacial de algunas propiedades del suelo en el cultivo de la caña de azúcar. *Ingeniería Agrícola*, 11(1). <https://www.redalyc.org/journal/5862/586269368001/html/>
- Cruz-Luis, J. A., Ortiz-Morera, N. C., Quispe-Torres, D. R., Atalaya-Lopez, J. S., Macavilca-Villar, P. M., Ramírez-Aparicio, J. A., Salinas-Rivera, J. L., Escobar-Cuadros, F., Carbajal-Llosa, C. M., Olivarez-Rivera, E. L., Casaretto-Castagnino, D., y Ganoza-Roncal, J. J. (2025). *Atlas de las Estaciones Experimentales Agrarias del INIA*. Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA). <http://hdl.handle.net/20.500.12955/2763>
- Culman, S. W., Brock, C., Doohan, D., Jackson-Smith, D., Herms, C., Chaganti, V. N., Kleinhenz, M., Sprunger, C. D. y Spargo, J. (2021). Base cation saturation ratios vs. sufficiency level of nutrients: A false dichotomy in practice. *Agronomy Journal*, 113(6), 5623-5634. <https://doi.org/10.1002/agj2.20787>

- Delgado Bejarano, L., Calle, D. A., Cardona, S. P., Castañeda Sánchez, D., Bernal, M. Á., y Henao, S. Z. (2023). Relationship between soil acidity and productivity of banana (*Musa* spp.) in Urabá, Colombia. *Chilean journal of agricultural & animal sciences*, 39(2), 228-238. <http://dx.doi.org/10.29393/chjaa39-20rb1s60020>
- Derecho Ambiente y Recursos Naturales. (2021). *Loreto Sostenible al 2021*. Documento de Análisis Regional. https://www.dar.org.pe/archivos/publicacion/loreto2021_final_re.pdf
- Díaz-Chuquizuta, H., Arévalo-Aranda, Y., Samaniego-Puente, J. C., Siquiera-Bahia, R. de C., y Solórzano-Acosta, R. A. (2025). Manual para la fertilización del cultivo de maíz amarillo duro en condiciones de la selva peruana. Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA). <http://hdl.handle.net/20.500.12955/2687>
- Environmental Protection Agency. (2004). *Method 9045D: Soil and Waste pH, part of Test Methods for Evaluating Solid Waste, Physical/Chemical Methods*. <https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-12/documents/9045d.pdf>
- Espinosa, J. y Molina, E. (1999). *Acidez y encalado de los suelos* (1a ed.). International Plant Nutrition Institute. <https://doi.org/10.13140/2.1.3888.9281>
- Garbanzo-León, G., Alemán-Montes, B., Alvarado-Hernández, A., y Henríquez-Henríquez, C. (2017). Validación de modelos geoestadísticos y convencionales en la determinación de la variación espacial de la fertilidad de suelos del Pacífico Sur de Costa Rica. *Investigaciones Geográficas*, (93), 20–41. <https://doi.org/10.14350/rig.54706>
- García, F. O., y Ciampitti, I. A. (2010). Enfoques alternativos para el diagnóstico de fertilidad de suelos el enfoque “tradicional”. *Informaciones Agronómicas*, (3), 17-25. <https://fertilizar.org.ar/wp-content/uploads/2011/09/17.pdf>
- Graham, E. R. (1959). *An explanation of theory and methods of soil testing*. Bulletin 734. University of Missouri, Agricultural Experiment Station. <https://mdh.contentdm.oclc.org/digital/collection/agexptstn/id/25261/>
- Hartemink, A.E., y Barrow, N.J. (2023). Soil pH - nutrient relationships: the diagram. *Plant and Soil*, 486, 209–215. <https://doi.org/10.1007/s11104-022-05861-z>
- Halstead, R. L., MacLean, A. J., y Nielsen, K. F. (1958). Ca: Mg ratios in soil and the yield and composition of alfalfa. *Canadian Journal of Soil Science*, 38(2), 85-93. <https://doi.org/10.4141/cjss58-014>
- Havlin, J. L., Tisdale, S. L., Nelson, W. L., y Beaton, J. D. (2016). *Soil fertility and fertilizers*. Pearson Education India.
- Instituto Nacional de Recursos Naturales. (1996). *Mapa de suelos del Perú*.
- International Organization for Standardization. (1994). *Soil quality - Determination of specific electrical conductivity*.
- International Organization for Standardization. (1995). *Soil quality - Determination of total nitrogen - Modified Kjeldahl method*. <https://www.iso.org/standard/19239.html>

- Kopittke, P. M., y Menzies, N. W. (2007). A review of the use of the basic cation saturation ratio and the “ideal” soil. *Soil Science Society of America Journal*, 71(2), 259–265. <https://doi.org/10.2136/sssaj2006.0186>
- Marino, M. A., y Echeverría, H. E. (2018). Umbral de requerimiento de fósforo en suelos Argiudoles y guía para la fertilización de alfalfa (*Medicago sativa* L.). *Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica*, 31, 7-18. <https://fertilizar.org.ar/wp-content/uploads/2021/09/Art-2.pdf>
- 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>
- Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego - Instituto Nacional de Innovación Agraria. (2018). Caracterización edafológica de estaciones experimentales amazónicas. *Boletín Técnico INIA-Loreto*, 15, 1-45.
- Ministerio del Ambiente (2015). Cuantificación y Análisis de la Deforestación en la Amazonia Peruana en el período 2010–2011–2013–2014. Lima, Perú: MINAM. Retrieved from http://infobosques.com/portal/wp-content/uploads/2017/03/Memoria_Descriptiva_Cambios_Cobertura_Bosque_2014.pdf
- 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/>
- Peña-Venegas, C. P., y Vanegas Cardona, G. I. (2010). *Dinámica de los suelos amazónicos: Procesos de degradación y alternativas para su recuperación*. Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas (Sinchi). <https://www.sinchi.org.co/files/publicaciones/publicaciones/pdf/librosuelosweb.pdf>
- Pierre, W. H., y Banwart, W. L. (1973). Excess-Base and Excess-Base/Nitrogen ratio of various crop species and parts of Plants. *Agronomy Journal*, 65(1), 91-96. <https://doi.org/10.2134/agronj1973.00021962006500010028x>
- Quispe-Matos, K. R., Carbajal-Llosa, C. M., Mejia-Maita, S. Y., Llerena-Arroyo, R. A., Solórzano-Acosta, R. A., y Cruz-Luis, J. A. (2025). *Variación espacial de la fertilidad del suelo en la EEA Canaán*. Instituto Nacional de Innovación Agraria. <http://hdl.handle.net/20.500.12955/2852>
- R Core Team. (2018). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing.

- Rosas-Patiño, G., Puentes-Páramo, Y. J., y Menjivar-Flores, J. C. (2021). Efecto del pH sobre la concentración de nutrientes en cacao (*Theobroma cacao* L.) en la Amazonia Colombiana. *Revista U D C A Actualidad & Divulgación Científica*, 24(1). <https://doi.org/10.31910/rudca.v24.n1.2021.1643>
- 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>
- Trangmar, B., Yost, R., y Uehara, G. (1986). Application of Geostatistics to Spatial Studies of Soil Properties. *Advances in agronomy* (pp. 45-94). [https://doi.org/10.1016/s0065-2113\(08\)60673-2](https://doi.org/10.1016/s0065-2113(08)60673-2)
- Villacis-Fajardo, J. D., Arévalo-López, L. A., Rengifo-Panduro, A. M., y Villacis-Fajardo, N. A. (2023). Fertilidad natural de los suelos aluviales en la Amazonía. *Revista Peruana De Investigación Agropecuaria*, 2(1), e32. <https://doi.org/10.56926/repia.v2i1.32>
- Wang, C., y Kuzyakov, Y. (2024). Soil organic matter priming: The pH effects. *Global Change Biology*, 30(6). <https://doi.org/10.1111/gcb.17349>
- Yang, M., Zhou, D., Hang, H., Chen, S., Liu, H., Su, J., Lv, H., Jia, H. y Zhao, G. (2024). Effects of balancing exchangeable cations Ca, Mg, and K on the growth of tomato seedlings (*Solanum lycopersicum* L.) based on increased soil cation exchange capacity. *Agronomy*, 14(3), 1-13. <https://www.mdpi.com/2073-4395/14/3/629>
- 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: 978-9972-44-274-2



PERÚ

Ministerio
de Desarrollo Agrario
y Riego

inia

Instituto
Nacional de
Innovación
Agraria



@INIAPeru