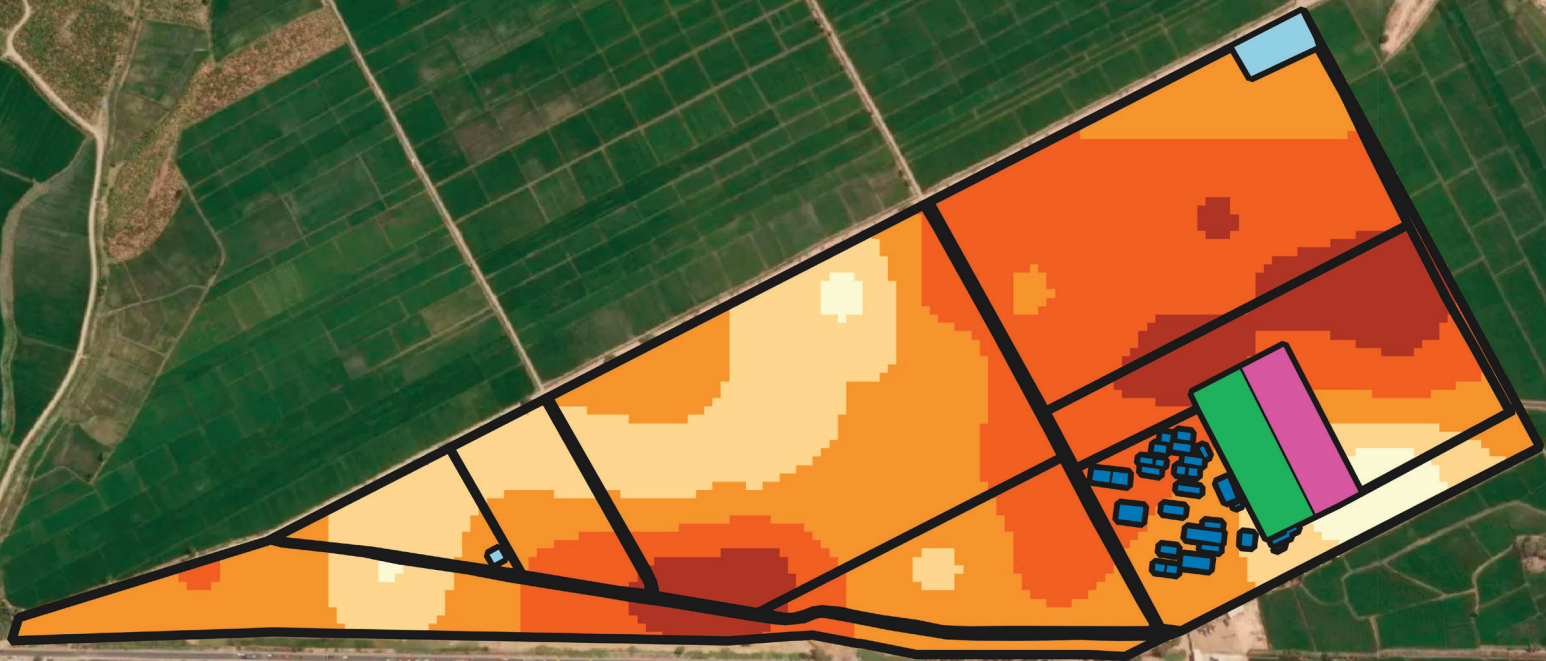


Variación espacial de la fertilidad del suelo en la EEA El Chira



PERÚ

Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego



Instituto Nacional de Innovación Agraria



The background of the entire page is a photograph of a rural landscape. In the foreground, there is a field of tall, green grass. In the middle ground, a long, dark fence runs across the frame. Behind the fence, several palm trees are visible against a clear sky. The overall color palette is dominated by greens and blues, with a slight teal tint.

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 El Chira



VARIACIÓN ESPACIAL DE LA FERTILIDAD DEL SUELO EN LA EEA EL CHIRA

MINISTERIO DE DESARROLLO AGRARIO Y RIEGO

Ministro de Desarrollo Agrario y Riego

Vladimir Germán Cuno Salcedo

Viceministra de Políticas y Supervisión del Desarrollo Agrario

Carmen Inés Vegas Guerrero

Viceministro de Desarrollo de Agricultura Familiar e Infraestructura Agraria y Riego

Orlando Hernán Chirinos Trujillo

Presidente Ejecutivo del Instituto Nacional de Innovación Agraria

Jorge Juan Ganoza Roncal, M. Sc.

© Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA)

Primera edición digital:

Febrero, 2026

Publicado:

Febrero, 2026

Disponible en:

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

ISBN:

978-9972-44-244-5

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° 2026-01782

Autores: Kenyi R. Quispe-Matos, Carlos M. Carbajal-Llosa, Sharon Y. Mejia-Maita, Rodolfo J. Chuchon-Remon, Rosa K. Arroyo-Isuiza, Nilton A. Hermoza-Ayme, Albert E. Fernandez-Puquio, Raúl E. Castro-Angulo, Richard A. Solórzano-Acosta, Juancarlos Cruz-Luis / **Editor general:** Cinthia S. Quispe-Apaza / **Revisión de contenido:** Héctor A. Ramírez-Maguiña, 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 El Chira	25
3.1. Ubicación de la EEA El Chira	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	34
3.7.1. Generación y ajuste del variograma	34
3.7.2. Interpolación <i>kriging</i>	34
3.7.3. Validación cruzada	34
3.8. Mapeo digital de las propiedades del suelo	38
4. Recomendaciones de manejo de la fertilidad del suelo en la EEA El Chira	55
4.1. Índice de saturación de bases catiónicas	55
4.1.1. Variación espacial de los desbalances iónicos con niveles deficitarios de K^+	55
4.1.2. Variación espacial de los desbalances iónicos con niveles elevados de Na^+	55
4.2. Niveles de suficiencia de nutrientes disponibles	59
4.3. El pH del suelo	60
5. Referencias bibliográficas	65



Presentación

El Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA) es un organismo técnico especializado adscrito al Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego (MIDAGRI), que desarrolla investigación, transferencia de tecnología, asistencia técnica, conservación y puesta en valor de recursos genéticos, la extensión agropecuaria y producción de semillas, 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. En este contexto, resulta imprescindible comprender la dinámica espacial de la fertilidad del suelo como base para el diseño de estrategias de manejo más eficientes y sostenibles.

La fertilidad del suelo presenta una distribución espacial heterogénea que incide de manera directa en el rendimiento de los cultivos, la eficiencia en el uso de fertilizantes y la sostenibilidad de los sistemas agrícolas, particularmente en ambientes heterogéneos. Los métodos tradicionales de evaluación, basados en promedios generales o mediciones puntuales, no capturan adecuadamente esta variabilidad, lo que limita la formulación de recomendaciones agronómicas ajustadas a las condiciones reales del terreno. Por ello, la integración de herramientas geoestadísticas con sistemas de información geográfica (SIG) permite analizar y modelar los patrones espaciales de las propiedades edáficas, proporcionando información técnica clave para el manejo sitio-específico, la conservación del recurso suelo y la planificación optimizada de la fertilización.

El presente documento “Variación espacial de la fertilidad del suelo en la EEA El Chira” integra, el muestreo, análisis e interpretación de 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 exacto del edafosistema en el área de estudio, para facilitar la toma de decisiones en la gestión agrícola sostenible.

M. Sc. Jorge Juan Ganoza Roncal

Presidente Ejecutivo

Instituto Nacional de Innovación Agraria



1. Introducción

La zonificación y el mapeo de suelos son técnicas usadas en la agricultura de precisión que permiten identificar variaciones espaciales en las propiedades del suelo, como la salinidad, el contenido de nutrientes y el pH. Esta categorización de los suelos permite adecuar el manejo agronómico específico a cada zona según sus propiedades y deficiencias (Ge et al., 2011). Por ejemplo, se puede realizar la aplicación localizada de enmiendas orgánicas y correcciones químicas, optimizando la fertilización y la estructura del suelo para aumentar la eficiencia y productividad agrícola (Bhamini et al., 2025). De esta forma, es posible reducir aplicaciones de fertilizante innecesarias, mitigar los riesgos de degradación y reducir costos de producción. Así como establecer redes de monitoreo que evalúen la efectividad de las prácticas agronómicas y anticipen cambios en la calidad del suelo, brindando una base técnica para decisiones de manejo a mediano y largo plazo (Mamabolo et al., 2025).

En particular, el departamento de Piura constituye una zona idónea para la aplicación del mapeo de suelos. Esta región se posiciona como una de las principales áreas agrícolas del país, destacando por su significativa contribución a la producción y exportación de cultivos estratégicos. En Piura se desarrollan sistemas de agricultura intensiva orientados a la agroexportación, como los cultivos de uva y arándano, así como sistemas agrícolas de menor escala vinculados también a la exportación, entre los que destacan el banano y el mango. Asimismo, se cultivan productos de alta relevancia para el abastecimiento local, como el arroz, cultivo para el cual Piura presenta la mayor superficie agrícola a nivel nacional (Sistema Integrado de Estadística Agraria, 2025); sin embargo, esta región enfrenta una serie de desafíos relacionados a desbalances iónicos como la alta sodicidad del suelo y el pH alcalino. Los suelos sódicos afectan negativamente la fertilidad, al generar procesos de compactación y baja aireación y conductividad hidráulica, con la consecuente disminución en el rendimiento de los cultivos y la erosión de los suelos (Stavi et al., 2021). Por ende, el monitoreo de la fertilidad del suelo es una actividad indispensable para la planificación y gestión sostenible de la producción de cultivos y la corrección oportuna de las deficiencias o excedentes en los parámetros edáficos. En este escenario, la Estación Experimental Agraria El Chira, constituye un entorno estratégico para la aplicación de técnicas geoestadísticas de agricultura de precisión y su posterior validación.

En este sentido, el presente documento tiene como objetivo evaluar la variación espacial de la fertilidad del suelo en la EEA El Chira, con la finalidad de generar información técnica que contribuya a la planificación agrícola y al fortalecimiento de los sistemas productivos de la región. Para ello, se plantea diagnosticar el estado actual de la fertilidad del suelo e identificar sus principales limitantes, elaborar mapas de variabilidad espacial de las propiedades edáficas que permitan reconocer diferencias en la calidad de este recurso, y recomendar estrategias de manejo orientadas a optimizar el uso de insumos agrícolas, incrementar la productividad y promover la sostenibilidad de los sistemas productivos de la EEA.



2. Principios fundamentales del análisis de suelos

2.1. Sistemas de interpretación del análisis de suelos

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

2.1.1. Índice de saturación de bases catiónicas

a. Concepto

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

b. Origen y aplicabilidad del concepto

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

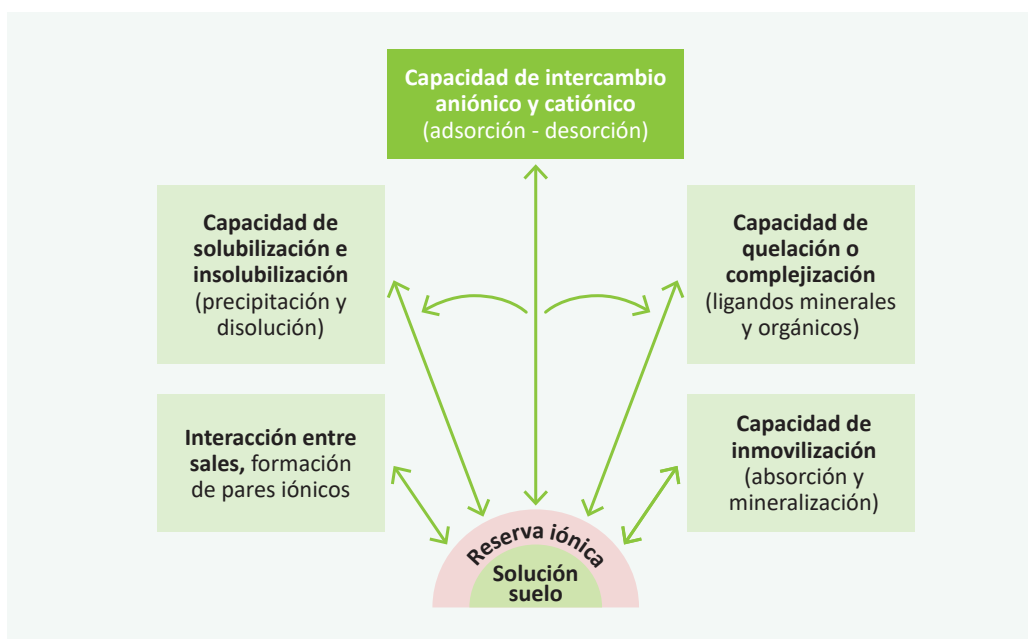


Figura 1. Mecanismos que mantienen en equilibrio los iones en la solución suelo (adaptado de McLean, 1977)

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

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

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

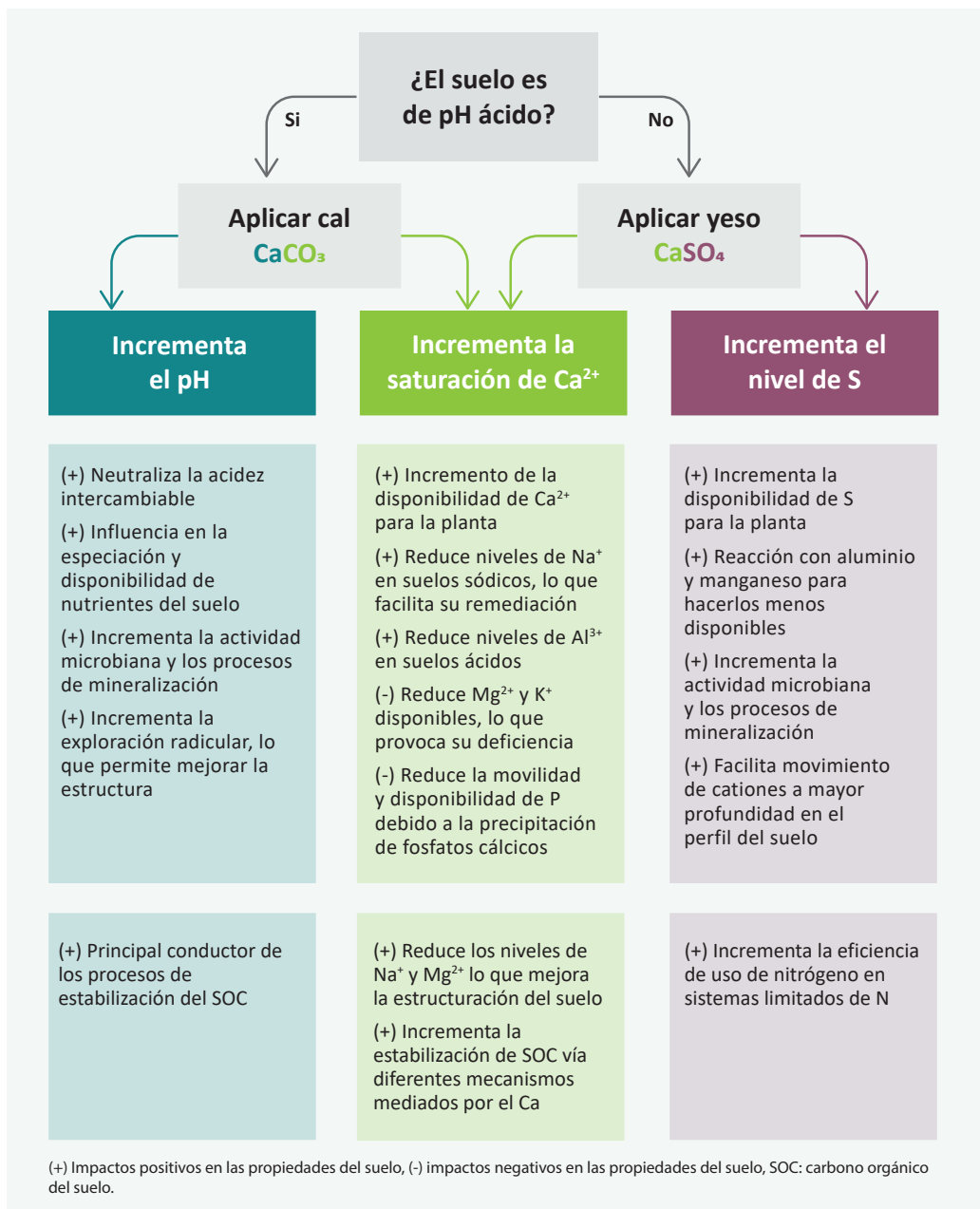


Figura 2. Criterios de uso de la cal y el yeso, y su respuesta en la relación de saturación de cationes básicos (adaptado de Culman et al., 2021)

2.1.2. Sistema de suficiencia de nutrientes

a. Concepto

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

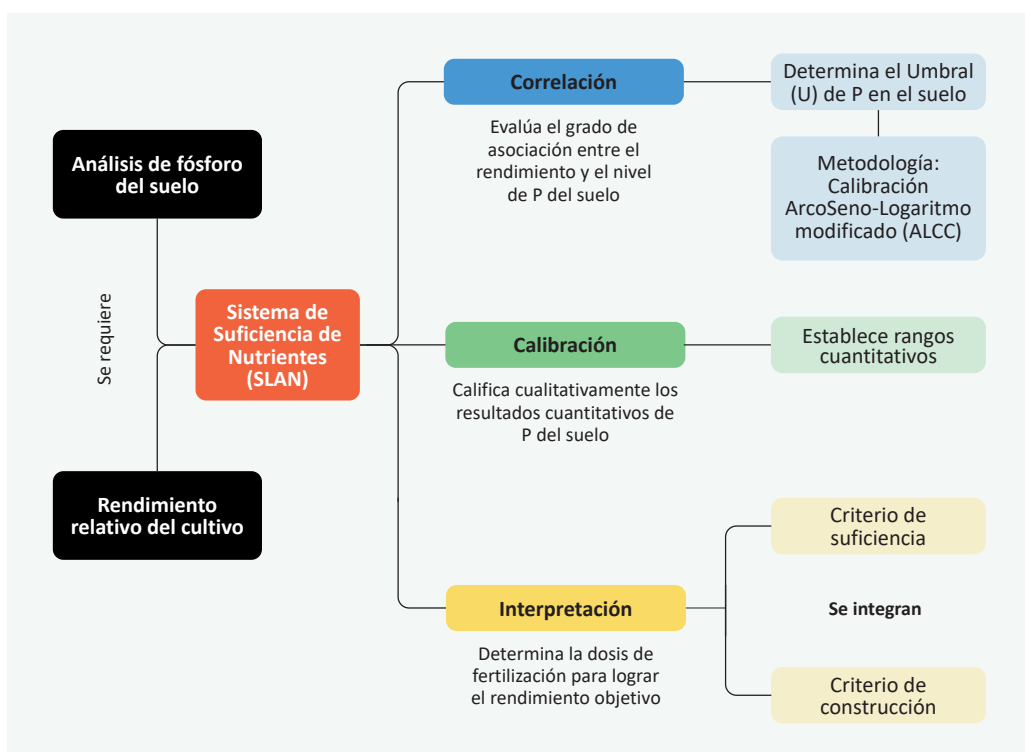


Figura 3. Esquema modelo para la implementación del sistema de suficiencia de nutrientes para el fósforo del suelo

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

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

b. Aplicación del criterio de suficiencia

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

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

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

A continuación, se presenta un ejemplo práctico para determinar el requerimiento de fósforo (P) necesario para alcanzar un rendimiento objetivo en el cultivo de palto, considerando un suelo con alto contenido de este nutriente.

Ejemplo práctico:

Se realizó un análisis de suelos en un cultivo de palto, y se obtuvo 15 mg de P por kg de suelo utilizando el método de Olsen (P-Olsen).

Para este cultivo, el umbral crítico o nivel de suficiencia es de 20 mg de P-Olsen por kg de suelo y el rendimiento potencial es de 30 t ha⁻¹. El análisis de correlación y calibración indica que el nivel obtenido de 15 mg de P-Olsen por kg de suelo permite obtener un rendimiento relativo (RR) del 80 %.

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

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

$$\text{Rendimiento alcanzado} = \frac{80 \times 30 \text{ t ha}^{-1}}{100} = 24 \text{ t ha}^{-1}$$

Este resultado indica que el nivel actual de P-Olsen (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, 24 t ha⁻¹ en lugar de 30 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.

$$\text{Incremento de raíces y brotes} = 0.35 \times \text{Rendimiento alcanzado} \quad \dots(3)$$

$$\text{Incremento de raíces y brotes} = 0.35 \times 24 \text{ t ha}^{-1} = 8.4 \text{ t ha}^{-1}$$

Además de las 24 t ha⁻¹ de producción, el cultivo genera 8.4 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:

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

$$\text{Rendimiento objetivo} = 8.4 \text{ t ha}^{-1} + 24 \text{ t ha}^{-1} = 32.4 \text{ t ha}^{-1}$$

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.

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

$$\text{Requerimiento de P} = 1.06 \text{ kg de P t}^{-1} \times 32.4 \text{ t ha}^{-1} = 34.34 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

A partir de estos resultados, se interpreta que el criterio de suficiencia estima un requerimiento de 34.34 kg de P ha⁻¹ para alcanzar un rendimiento objetivo de 32.4 t ha⁻¹, el cual está conformado por 8.4 t ha⁻¹ de biomasa radicular y vegetativa, y 24 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 por 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 nutriente estimados para la fertilización de suficiencia y mantenimiento (García y Ciampitti, 2010).

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

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

A continuación, se presentarán ejemplos prácticos con el cultivo de palto para la aplicación de los criterios de mantenimiento y de construcción.

Ejemplo práctico (criterio de mantenimiento)

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

Para este cultivo, el umbral crítico o nivel de suficiencia es de 20 mg de P-Olsen por kg de suelo y el rendimiento potencial es de 30 t ha⁻¹. El análisis de correlación y calibración indica que el nivel obtenido de 10 mg de P-Olsen por kg de suelo permite obtener un rendimiento relativo (RR) del 50 %.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

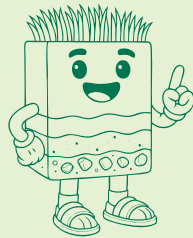
$$\text{Requerimiento de P} = \frac{21.47 \text{ kg de P ha}^{-1}}{0.30} = 71.57 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

De esta manera, el requerimiento de mantenimiento de fósforo en el cultivo de palto es 71.57 kg de P ha⁻¹.

Ejemplo práctico (criterios de mantenimiento y construcción)

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

Para este cultivo, el umbral crítico o nivel de suficiencia es de 20 mg de P-Olsen por kg de suelo y el rendimiento potencial es de 30 t ha⁻¹. El análisis de correlación y calibración indica que el nivel obtenido de 5 mg de P-Olsen por kg de suelo permite obtener un rendimiento relativo (RR) del 30 %.



Nota:

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

Primer paso: calcular el rendimiento con 5 mg de P-Olsen por kg de suelo, utilizando la fórmula 2.

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

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.

$$\text{Incremento de raíces y brotes} = 0.35 \times 9.0 \text{ t ha}^{-1} = 3.15 \text{ t ha}^{-1}$$

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

$$\text{Rendimiento objetivo} = 9.0 \text{ t ha}^{-1} + 3.15 \text{ t ha}^{-1} = 12.15 \text{ t ha}^{-1}$$

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.

$$\text{Requerimiento de P} = 1.06 \text{ kg de P t}^{-1} \times 12.15 \text{ t ha}^{-1} = 12.88 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

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 %.

$$\text{RM de P} = \frac{12.88 \text{ kg de P ha}^{-1}}{0.20} = 64.40 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

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 le denomina necesidad de construcción de fertilidad (NCF), y que el incremento anual requerido (IAR) en este ejemplo es de 1.5 mg de P por kg de suelo.

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

$$RC = 1.5 \text{ mg de P kg}^{-1} \times \frac{9 \text{ kg de P ha}^{-1}}{1 \text{ mg de P kg}^{-1}} = 13.5 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

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

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

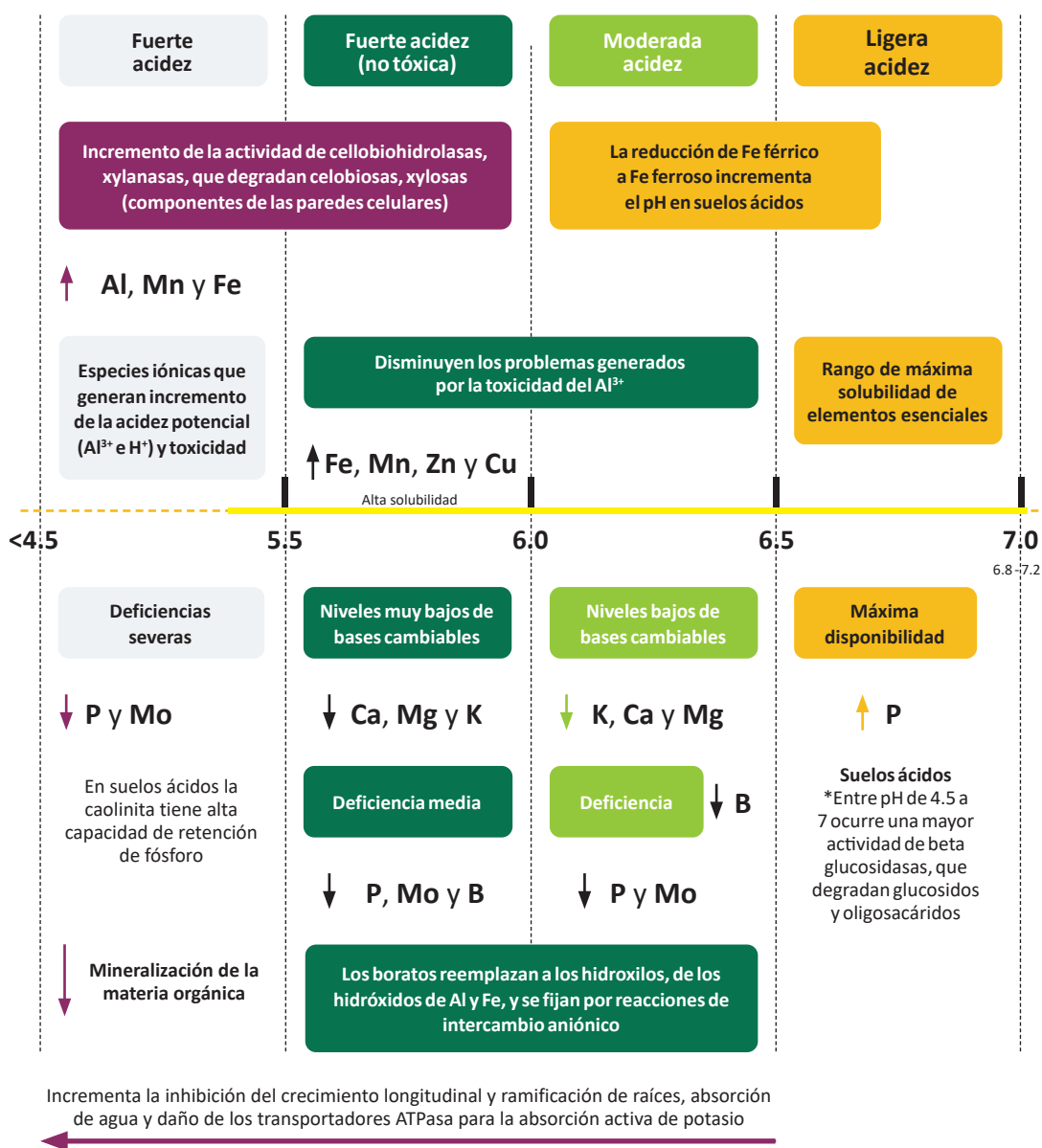
$$\text{Dosis de fertilización de P} = 64.40 \text{ kg de P ha}^{-1} + 13.5 \text{ kg de P ha}^{-1} = 77.90 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

De esta manera, el requerimiento de mantenimiento y construcción de fósforo en el cultivo de palto es 77.90 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 Wang y Kuzyakov (2024) y Alam et al. (1999).



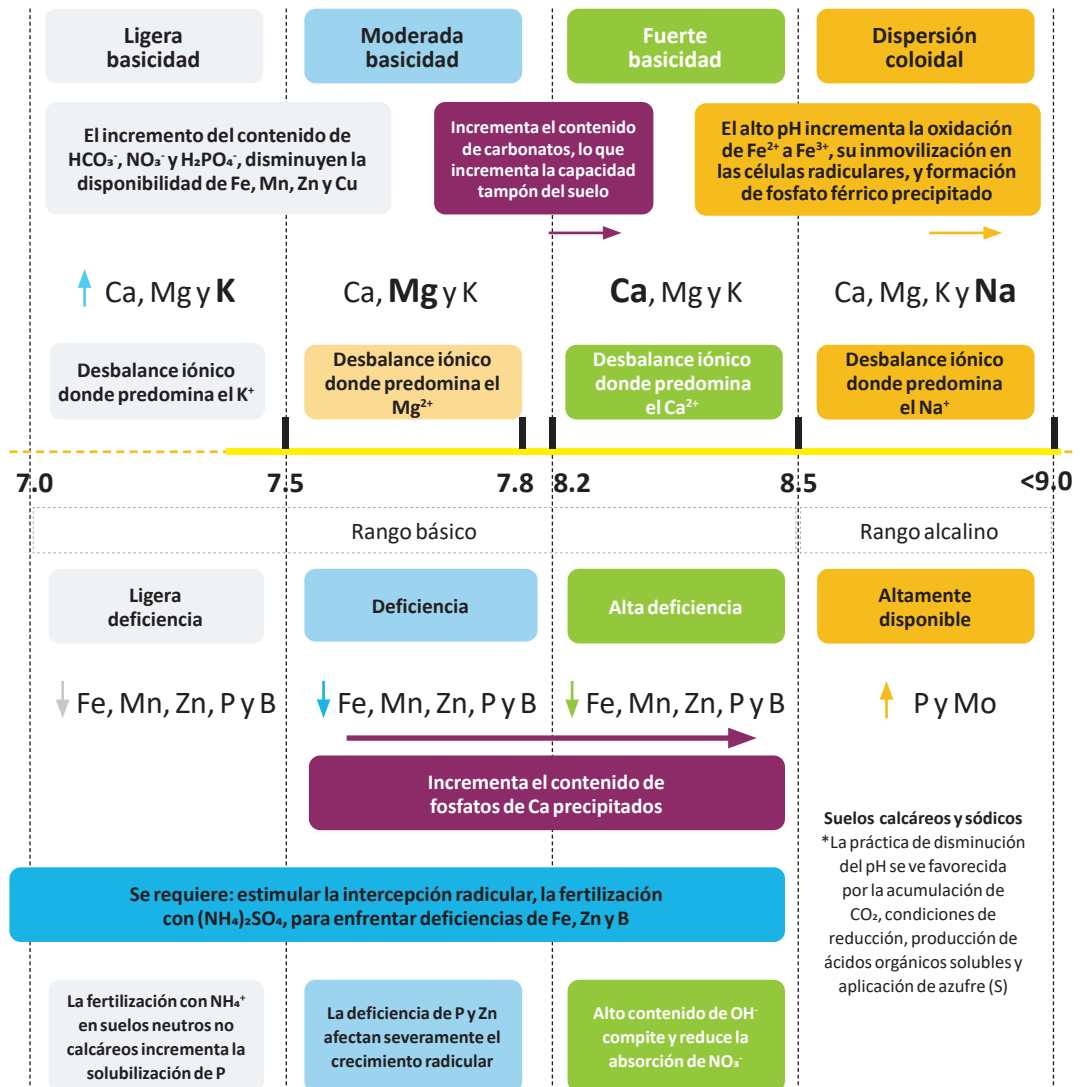


Figura 4. Diagnóstico de la fertilidad del suelo en función al pH

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

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



3. Muestreo y análisis de suelos en la EEA El Chira

3.1. Ubicación de la EEA El Chira

La EEA El Chira cuenta con dos centros experimentales (El Chira y Hualtaco), con una extensión total de 119.40 ha, siendo los cultivos priorizados: banano (*Musa × paradisiaca* L.), cacao (*Theobroma cacao* L.), café (*Coffea arabica* L.), mango (*Mangifera indica* L.), arroz (*Oryza sativa* L.), caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L.) y algodón (*Gossypium hirsutum* L.).

En la estación se realiza investigación, valoración, conservación, producción de material genético de plantas y animales, además de brindar asistencia técnica y otros servicios para los agricultores de la región de Piura. La EEA El Chira se encuentra en el distrito Marcavelica, en la provincia de Sullana, en el departamento de Piura (Figura 5), en la región Costa o Chala a 330 m s. n. m. con precipitaciones anuales de hasta 2000 mm y temperaturas medias anuales que varían entre los 24 a 32 °C (Cruz-Luis et al., 2025).

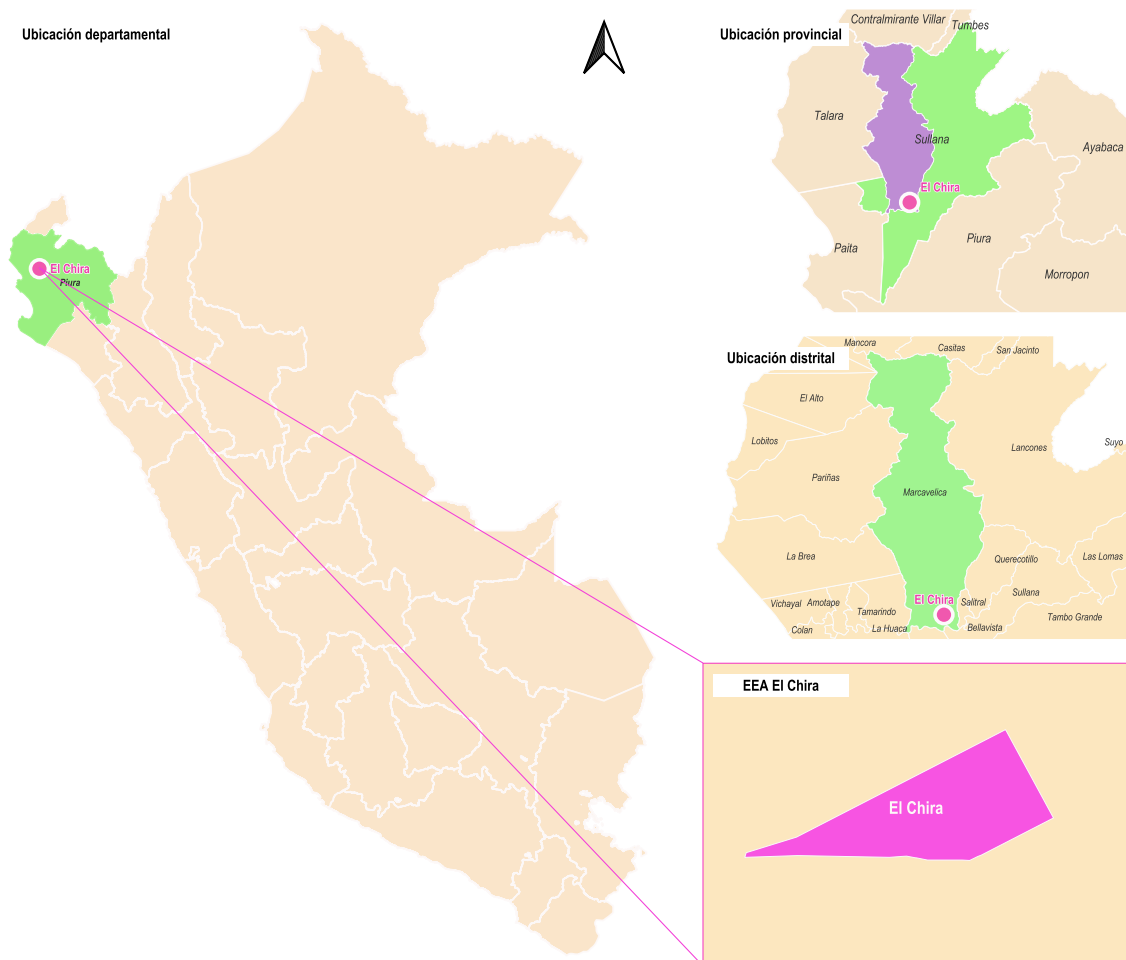


Figura 5. Ubicación de la EEA El Chira

3.2. Muestreo estratificado del suelo

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

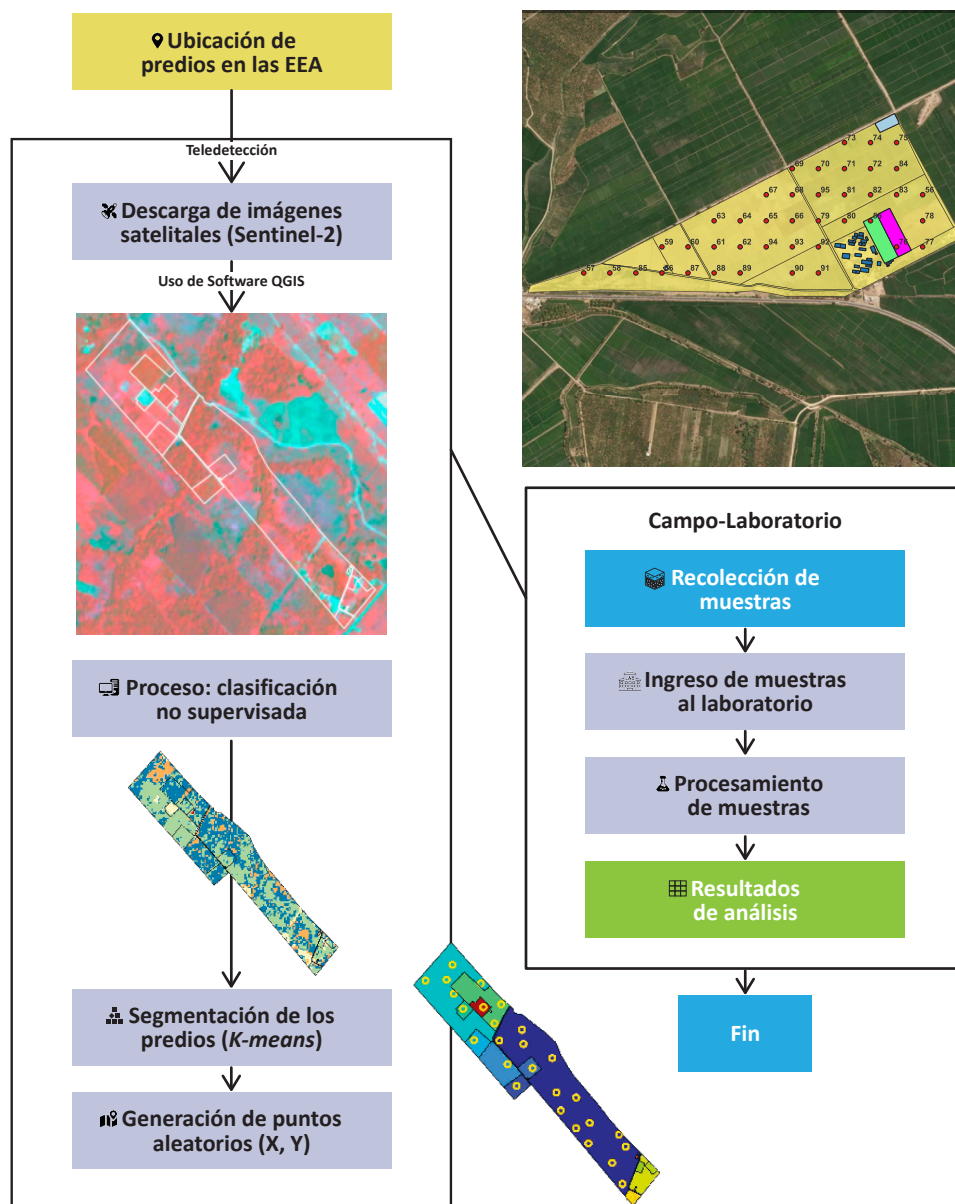


Figura 6. Flujo de trabajo para la determinación de los puntos de muestreo

3.2.1. Determinación de los puntos de muestreo

El primer paso para la determinación de los puntos de muestreo fue la descarga de las imágenes satelitales del servidor de Sentinel-2 para identificar las clases de cobertura, utilizando el algoritmo de clasificación no supervisada *K-means*. Luego, se usó el software R (R Core Team, 2018) para determinar los puntos de muestreo utilizando la función *spsample* del paquete *sp* (Pebesma y Bivand, 2005). El *script* de R generó las coordenadas de los puntos de muestreo según cada clase determinada, mediante el método de muestreo estratificado. Se identificaron en total 41 puntos de muestreo de suelos como se observa en la Figura 7.

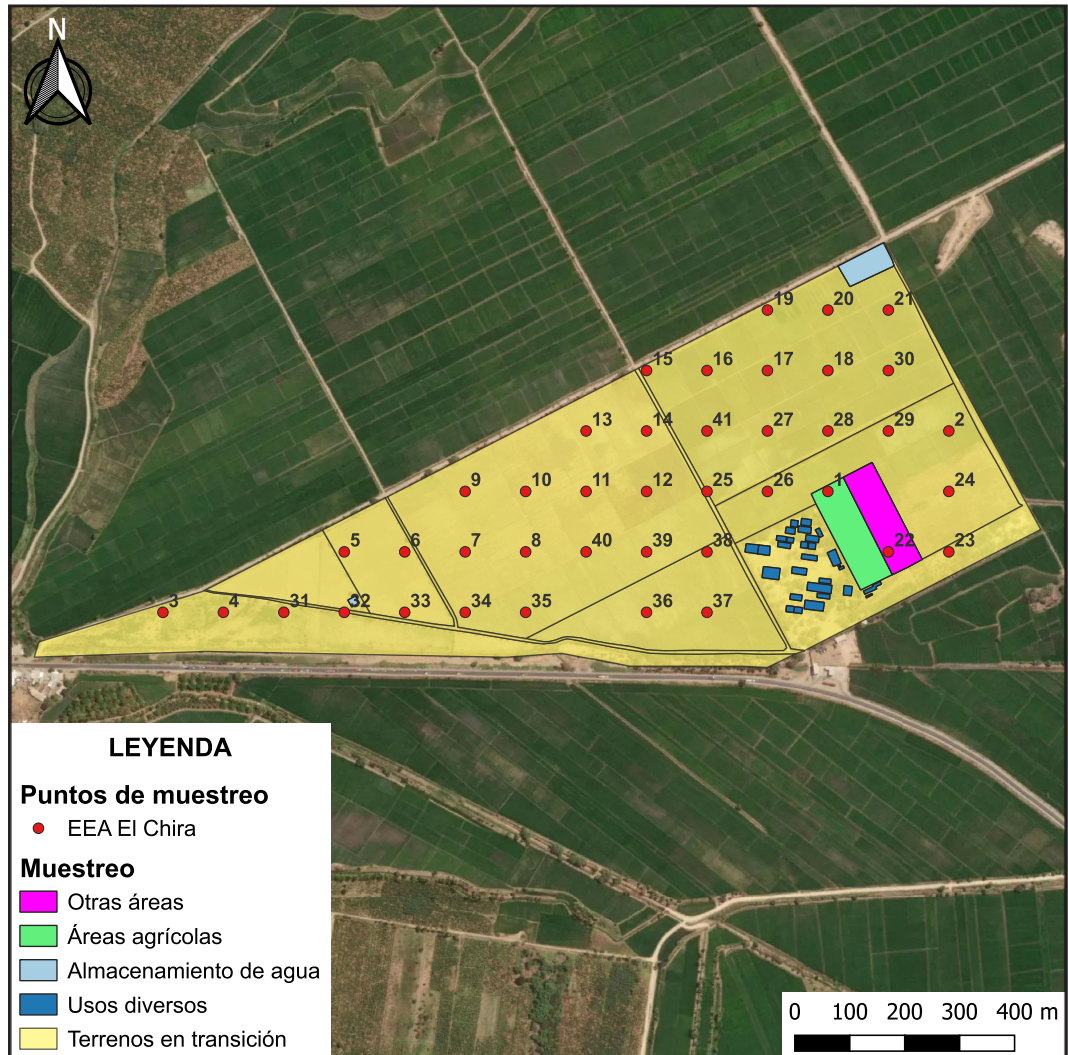


Figura 7. Puntos de muestreo de suelos en la EEA El Chira

3.2.2. Muestreo del suelo en los puntos identificados

Una vez identificadas las coordenadas de los 41 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. Entre una y la otra 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 con métodos acreditados. En este trabajo, las muestras fueron llevadas al Laboratorio de Suelos, Aguas y Foliar de la EEA El Chira 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

En la Tabla 2 se describen las estadísticas descriptivas de los resultados generales de las 41 muestras analizadas. Los suelos de la EEA El Chira se caracterizan por el predominio de fracciones gruesas con marcada heterogeneidad espacial. Esto configura un mosaico de microambientes donde coexisten zonas de rápida infiltración y baja retención hídrica, con sectores de textura más fina que retienen agua y nutrientes con mayor intensidad. La reacción del suelo (pH) es, en general, neutra a ligeramente alcalina y está acompañada por la presencia de carbonatos. Estos valores de pH condicionan la disponibilidad de micronutrientes en las áreas alcalinas y pueden favorecer la aparición de síntomas de clorosis en hojas jóvenes de cultivos sensibles, si no se corrige con el manejo nutricional adecuado. La salinidad y la sodicidad no se distribuyen de forma uniforme y la mayor parte del área presenta condiciones sin restricción de salinidad. Sin embargo, hay zonas con acumulación de sales y con sodicidad, los cuales son perjudiciales para la estructura del suelo y la infiltración del agua cuando no se da el manejo adecuado.

El contenido de materia orgánica es bajo, lo que limita la capacidad del suelo para suministrar nitrógeno de forma sostenida, y así estabilizar agregados y amortiguar variaciones químicas. Por tanto, la dinámica de fertilidad depende en gran medida de aportes externos y de prácticas de manejo que recuperen y mantengan carbono orgánico. En términos de nutrientes disponibles, los niveles de fósforo requieren atención localizada: hay parcelas con suficiencia y otras con deficiencia potencial. Por otro lado, el potasio muestra contrastes importantes entre diferentes zonas, por lo que se sugiere evitar recomendaciones generales y optar por decisiones basadas en diagnóstico zonal y en análisis foliar complementario.

Desde la perspectiva de la fertilidad del suelo, el diagnóstico debe estructurarse bajo un enfoque de zonas de manejo. En consecuencia, el muestreo y la interpretación de resultados deben realizarse por unidades definidas según la textura, la conductividad eléctrica y la presencia de sodio. Las acciones prioritarias comprenden: incrementar de manera sostenida la materia orgánica mediante compostaje, cultivos de cobertura y reincorporación de residuos de cosecha; implementar aplicaciones localizadas de fósforo y, cuando corresponda, estrategias de construcción de reservas en sectores con niveles bajos; aplicar potasio exclusivamente donde el diagnóstico evidencie deficiencia; y optimizar el riego y el drenaje para prevenir la acumulación de sales. Asimismo, en áreas con indicios de sodicidad, debe priorizarse la corrección física y química del suelo. En estos casos, la aplicación de enmiendas cálcicas y la mejora del drenaje deben preceder a la intensificación de la fertilización, dado que la recuperación estructural constituye una condición necesaria para maximizar la eficiencia agronómica en el uso de nutrientes.

Finalmente, se recomienda integrar monitoreo periódico del suelo (incluyendo CE en extracto de saturación) y del agua de riego (CE y la relación de absorción de sodio), junto con análisis foliares en cultivos sensibles, 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 la EEA El Chira.

Tabla 2. Estadísticos descriptivos de los parámetros fisicoquímicos del suelo analizados en la EEA El Chira

Variable	Unidad	Media	SD	CV	Mediana	Mín.	Máx.	Skewness
Arena	%	41.14	7.47	18.16	41.6	28.1	61.5	0.66
Arcilla	%	21.4	6.53	30.51	19.9	9.3	37.7	0.47
Limo	%	37.47	5.46	14.57	40.4	23.8	46.4	-0.62
pH	unidad	7.28	0.6	8.24	7.3	5.9	8.6	-0.45
CE	dS m ⁻¹	17.36	13.51	77.82	12.21	2.13	67.6	1.81
CaCO ₃	%	1.57	0.43	27.39	1.5	0.9	2.3	0.22
MO	%	18.12	5.22	28.81	17.98	11.76	36.72	1.42
P disp.	mg kg ⁻¹	312.77	194.13	62.07	254.8	130.4	1186.8	2.78
K disp.	mg kg ⁻¹	2.33	0.35	15.02	2.22	1.85	3.31	1.25
Ca ⁺	cmol kg ⁻¹	24.42	9.34	38.25	23.3	11	78.2	4.92
Mg ²⁺	cmol kg ⁻¹	6.37	1.3	20.41	6.5	2.4	8.2	-1.05
K ⁺	cmol kg ⁻¹	3.92	6.08	155.10	2.1	1	37.4	4.63
Na ²⁺	cmol kg ⁻¹	0.7	0.42	60.00	0.6	0.3	2.7	3.16
CICe	cmol kg ⁻¹	35.41	15.38	43.43	33.4	14.8	122.4	4.73
PCI	%	69.86	4.54	6.50	70.31	52.62	79.3	-1.61
PMI	%	19.08	4.03	21.12	20.61	4.25	23.63	-1.5
PPI	%	1.95	0.66	33.85	1.88	0.81	4.67	1.84
PSI	%	9.11	6.44	70.69	6.84	4.53	31.66	2.52

CE: Conductividad eléctrica en extracto de saturación, CICe: capacidad de intercambio catiónico efectiva, CV: coeficiente de variación, P disp.: fósforo disponible, K disp.: potasio disponible, Máx.: valor máximo, Mín.: valor mínimo, MO: materia orgánica del suelo, 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, SD: desviación estándar, Skewness: coeficiente de 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, texturas, 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 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) estén 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 sus principales características. Para ello, calcular las 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:

- a. Abrir el complemento *Smart-Map*.
- b. Cargar la capa vectorial de los puntos georreferenciados.
- c. Seleccionar la variable a analizar.
- d. Delimitar los puntos de muestreo con el contorno del área de estudio.
- e. Definir el tamaño de celda del ráster de salida (ej. 5 m x 5 m, dependiendo de la resolución deseada).
- f. 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

- a. Calcular el variograma experimental utilizando el complemento **Smart-Map**.
- b. Ajustar un modelo teórico (esférico, exponencial o gaussiano) al variograma.
- c. 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).
- d. Calcular la proporción **Sill-nugget** (PSV).

3.7.2. Interpolación *kriging*

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

3.7.3. Validación cruzada

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

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

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [z_1(x_i) - z_2(x_i)]^2} \quad \dots(10)$$

Donde:

n: el número de muestras.

$z_1(x_i)$: valores predichos en el sitio i.

$z_2(x_i)$: valores observados en el sitio i.

b. 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.

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

Donde:

n: el número de muestras.

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

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

La caracterización geoestadística de las propiedades del suelo en la EEA El Chira revela una estructura espacial robusta de la fertilidad del suelo, lo que permite pasar de observaciones puntuales a mapas de manejo con alta confianza técnica. Algunas variables físicas y químicas muestran alto grado de ajuste predictivo ($R^2 > 0.70$) y rangos de autocorrelación a escala de la EEA, lo que las convierte en variables modelo para la zonificación de fertilidad. Entre estas propiedades destacan el Mg^{2+} intercambiable, saturaciones catiónicas (PCI, PMI, PSI), K^+ intercambiable, K^+ disponible y Na^+ intercambiable. Todas estas propiedades presentan R^2 muy altos y modelos de semivariograma bien definidos (Tabla 3). En particular, la arcilla y el pH (también con fuerte estructura espacial) constituyen las variables más estables para interpolación directa y para conformar unidades de manejo diferencial.

En términos texturales, la arcilla y el limo presentan estructuras espaciales bien definidas (rangos de 410 y 455 m, con R^2 elevados), lo que permite delimitar unidades relativamente homogéneas de manejo. En contraste, la arena muestra un patrón errático y poco predecible, lo que limita su aporte a la zonificación.

Respecto a las propiedades químicas, el pH evidencia una continuidad espacial amplia (rango 464 m, $R^2 = 0.877$), consolidándose como una de las variables más confiables para definir unidades de manejo (UM). La conductividad eléctrica y el sodio intercambiable presentan también rangos de continuidad elevados (>690 m) y buen ajuste, lo que confirma la presencia de sectores con problemas de salinidad y sodicidad que requieren atención específica.

En relación con la fertilidad, el potasio disponible constituye un indicador robusto ($R^2 = 0.946$, rango 808 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 carece prácticamente de estructura espacial ($R^2 = 0.040$), lo que revela una fuerte heterogeneidad y confirma la necesidad de un muestreo intensivo o de estrategias de manejo más generalizadas. La materia orgánica mostró un patrón intermedio, con cierta continuidad, pero limitada predictibilidad, lo que refuerza la importancia de aplicar prácticas sistemáticas de incorporación de residuos y abonos verdes a escala predial.

Las bases intercambiables presentaron comportamientos contrastantes: mientras Mg^{2+} y Na^+ revelan estructuras espaciales claras y confiables, Ca^{2+} y K^+ mostraron patrones débiles o poco estables. En el caso del $CaCO_3$, el ajuste fue bajo, lo que restringe su uso cartográfico como variable principal.

La saturación de cationes intercambiables (PCI, PMI, PPI, PSI) arrojaron ajustes estadísticos sólidos (R^2 entre 0.885 y 0.966), lo que respalda su inclusión como indicadores sintéticos en la evaluación y manejo del recurso suelo en la estación con el enfoque BCSR.

En este escenario, el análisis geoestadístico permite diferenciar dos usos técnicos: el mapeo directo y definición de zonas basadas en variables altamente estructuradas, y la 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 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.

Por otro lado, desde un enfoque avanzado de fertilidad, el análisis geoestadístico permite dos ventajas concretas y complementarias. Primero, nos permite diseñar prácticas de manejo y aplicación de enmiendas por zonas con base en mapas de Na^+ , K^+ , saturación por Ca^{2+} y pH. Por ejemplo, se pueden delimitar zonas a enmendar con yeso o a someter a medidas de drenaje cuando los mapas de Na y PSI indiquen riesgo de sodicidad. Por último, es posible optimizar la aplicación de fósforo mediante una estrategia híbrida, con el uso de mapas derivados de covariables (textura, CE y saturaciones catiónicas), para orientar zonas de muestreo intensivo, formular dosis localizadas en bandas y controlar la eficiencia mediante ensayos en parcelas con diferentes niveles de fertilidad. El potasio, puesto que muestra alta predictibilidad, puede gestionarse mediante tasas variables de fertilización apoyadas en los mapas de variación espacial.

En síntesis, la EEA El Chira dispone de un conjunto de propiedades con alto 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* e 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 de la EEA El Chira

Variable	Unidad	Modelo	Nugget (C ₀)	Sill (C ₀ +C)	Range (m)	Cross-validation	
						RMSE	R ²
Arena	%	<i>Linear to Sill</i>	28.709	56.839	243.492	274.334	0.344
Limo	%	<i>Spherical</i>	11.377	42.620	455.505	99.203	0.741
Arcilla	%	<i>Gaussian</i>	12.394	31.656	409.833	21.989	0.885
pH	unidad	<i>Linear to Sill</i>	0.027	0.500	464.172	0.016	0.877
CE	dS m ⁻¹	<i>Linear to Sill</i>	81.244	128.443	693.335	307.328	0.811
MO	%	<i>Linear to Sill</i>	0.143	0.191	580.698	0.001	0.656
P disp.	mg kg ⁻¹	<i>Exponential</i>	2.288	19.184	0.003	7.684	0.040
K disp.	mg kg ⁻¹	<i>Linear to Sill</i>	783.173	32 000.813	808.423	29 796 642.708	0.946
CaCO ₃	%	<i>Linear to Sill</i>	0.044	0.05	464.721	0.000	0.408
Ca ²⁺	cmol kg ⁻¹	<i>Linear</i>	9.054	14.840	682.621	22.692	0.527
Mg ²⁺	cmol kg ⁻¹	<i>Linear to Sill</i>	0.628	1.542	509.933	0.014	0.969
Na ⁺	cmol kg ⁻¹	<i>Linear to Sill</i>	1.852	12.445	747.200	5.497	0.920
K ⁺	cmol kg ⁻¹	<i>Linear</i>	0.006	0.083	539.537	0.000	0.961
CICe	cmol kg ⁻¹	<i>Linear to Sill</i>	23.058	54.623	790.172	262.467	0.674
PCI	%	<i>Linear</i>	1.897	9.479	533.506	2.476	0.966
PMI	%	<i>Linear to Sill</i>	0.013	17.455	693.940	8.456	0.957
PPI	%	<i>Linear</i>	0.134	0.258	517.518	0.003	0.885
PSI	%	<i>Linear</i>	0.000	9.831	545.791	11.444	0.929

CE: Conductividad eléctrica en extracto de saturación, P disp.: fósforo disponible, K disp.: potasio disponible, MO: materia orgánica del suelo, 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, RMSE: raíz del error cuadrático medio, R²: coeficiente de determinación.

3.8. Mapeo digital de las propiedades del suelo

Los mapas generados para la EEA El Chira (Figuras 9-23) 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.

Desde el punto de vista agronómico, los mapas de la EEA El Chira constituyen una herramienta estratégica para la definición de unidades de manejo basadas en variables de alta confiabilidad (arcilla, limo, pH, CE, K disponible, Mg^{2+} , Na^+ y saturación de cationes). Las variables con menor predictibilidad (P disponible, MO, Ca^{2+} y $CaCO_3$) deben complementarse con muestreo más denso o el uso de covariables proximales. Este enfoque permite diseñar prácticas de fertilización sitio-específica, manejo de sales y sodicidad, y estrategias de conservación de carbono edáfico, favoreciendo un mejor equilibrio entre productividad y sostenibilidad en los predios experimentales de la estación.

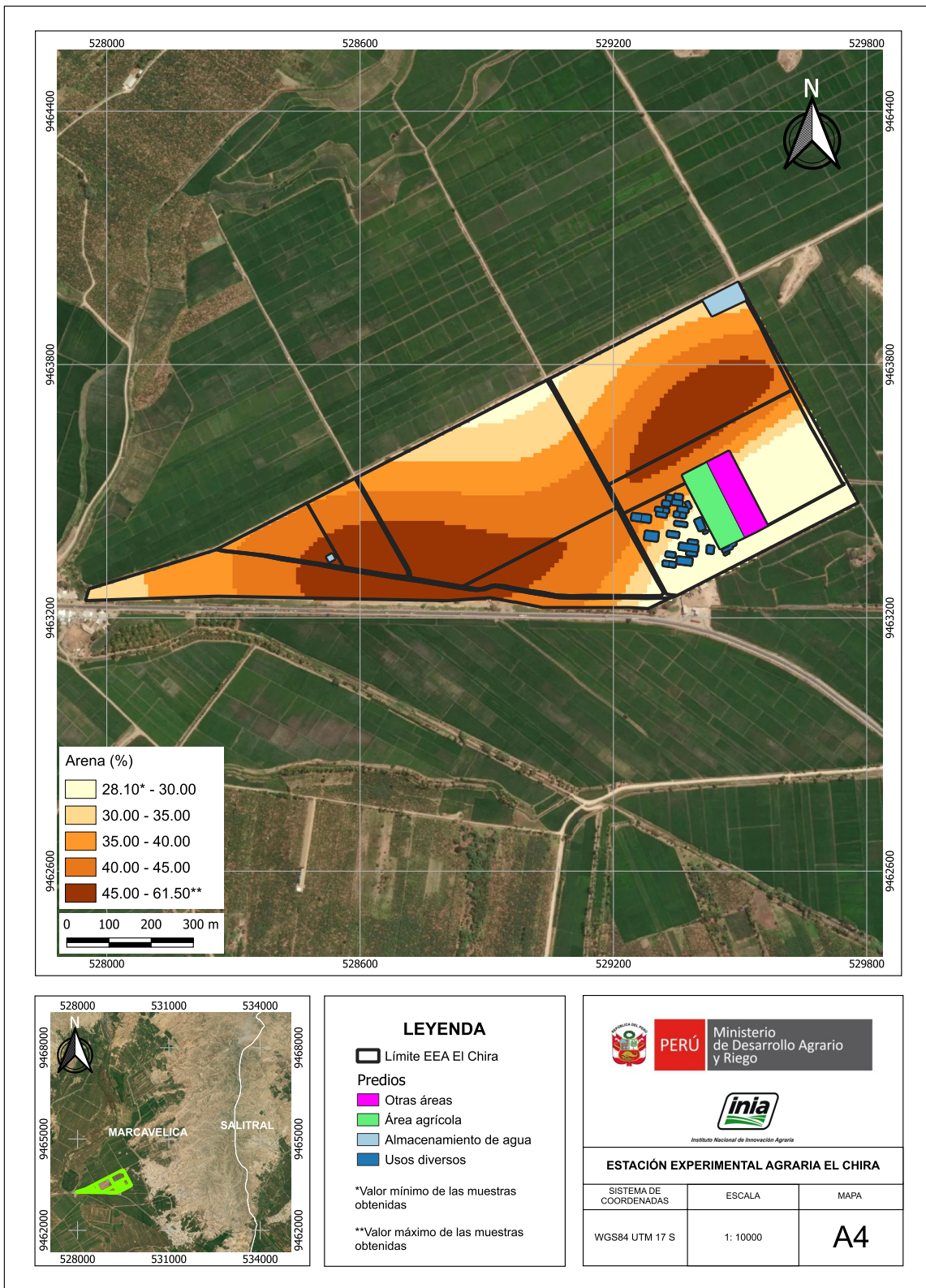


Figura 9. Mapa de variación espacial del porcentaje de arena

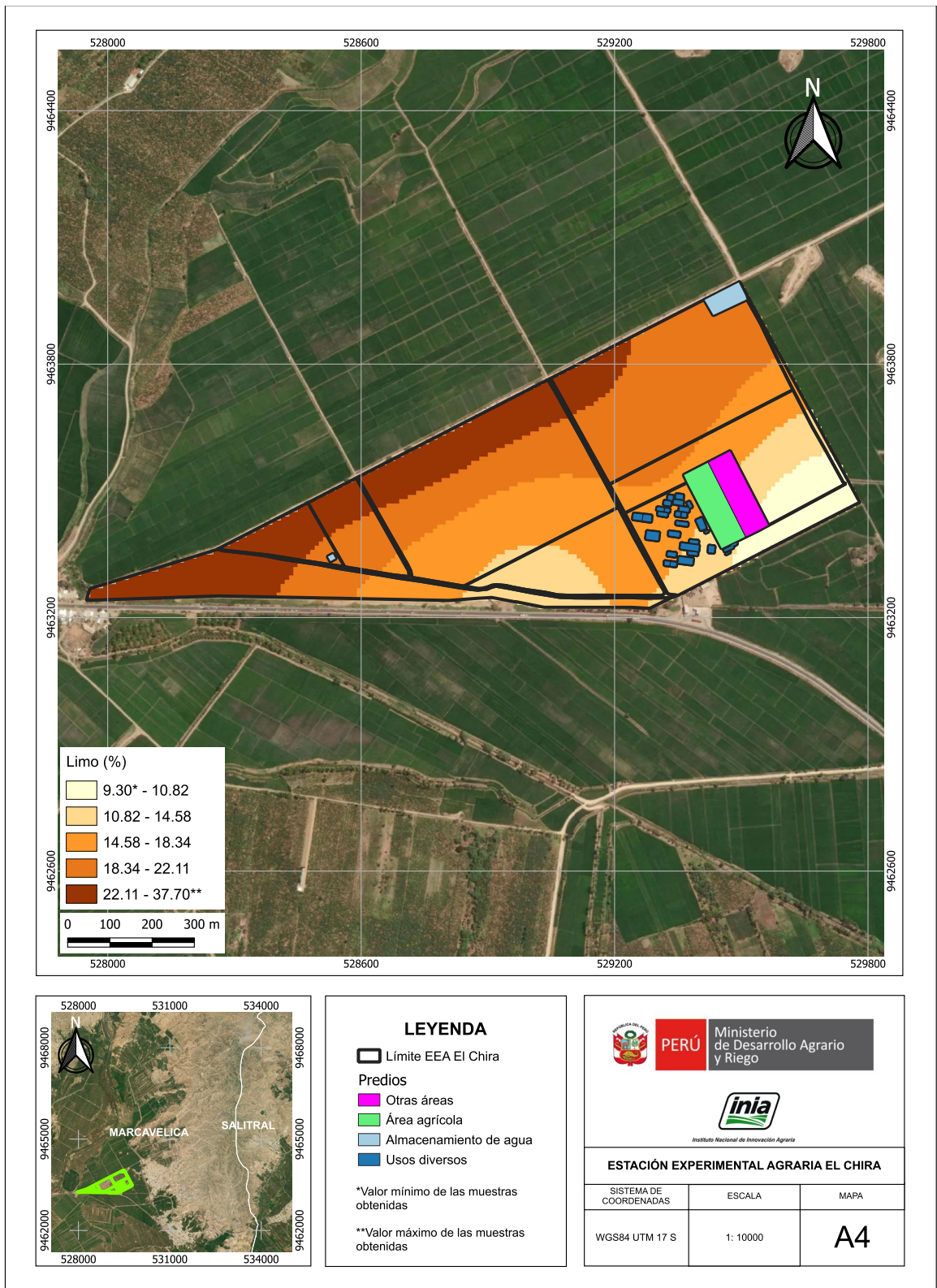


Figura 10. Mapa de variación espacial del porcentaje de limo

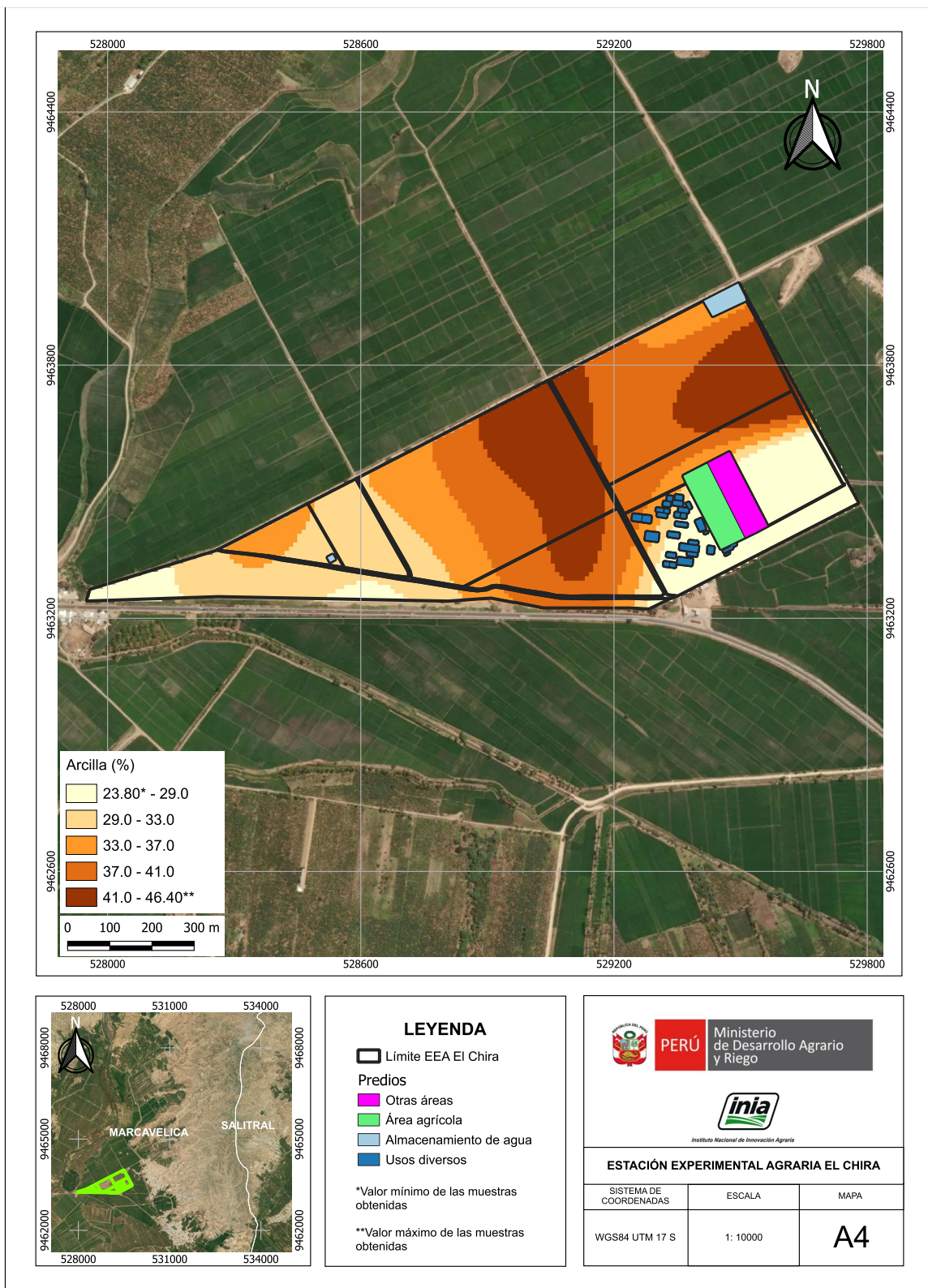


Figura 11. Mapa de variación espacial del porcentaje de arcilla

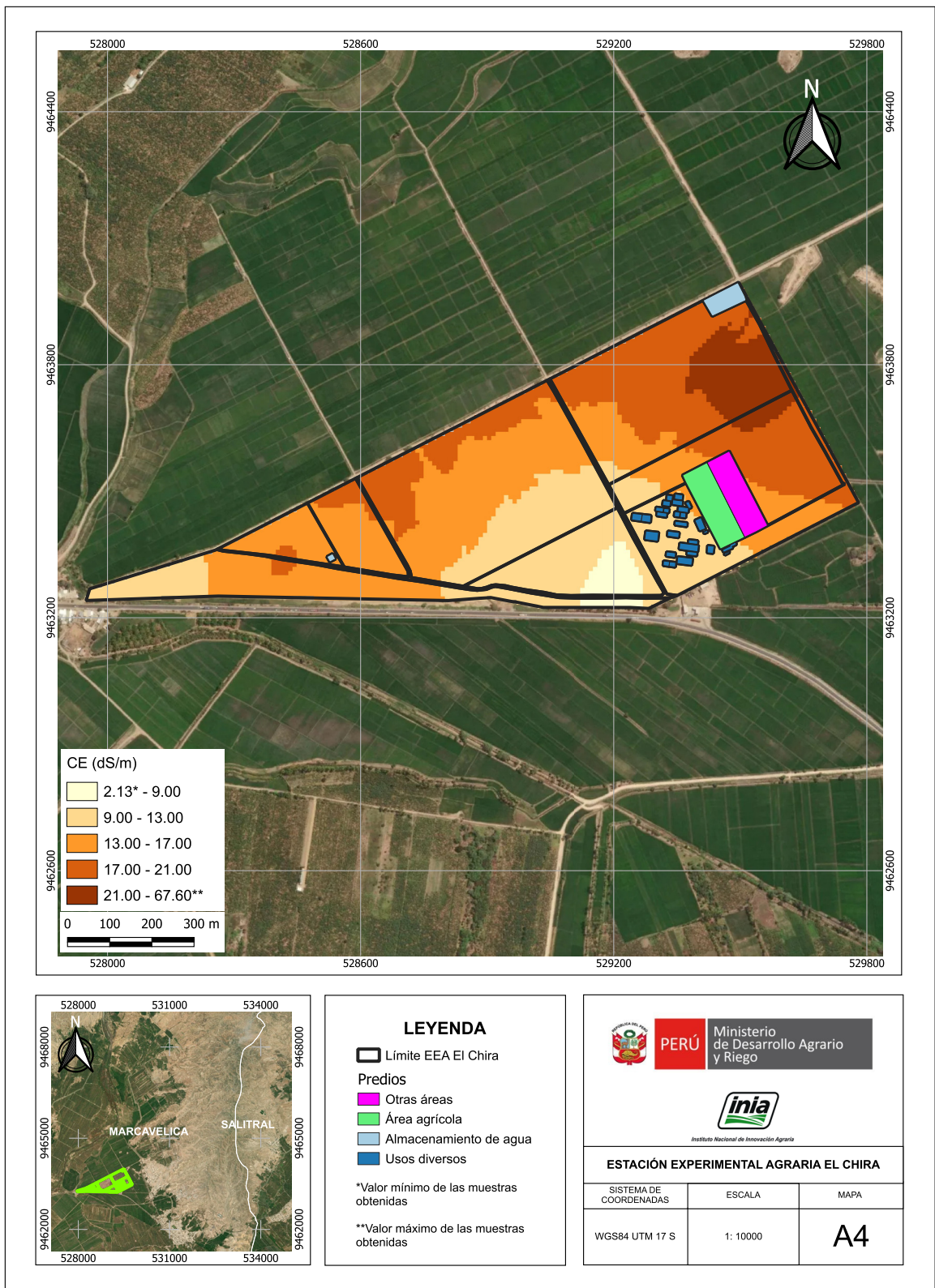


Figura 12. Mapa de variación espacial de la conductividad eléctrica

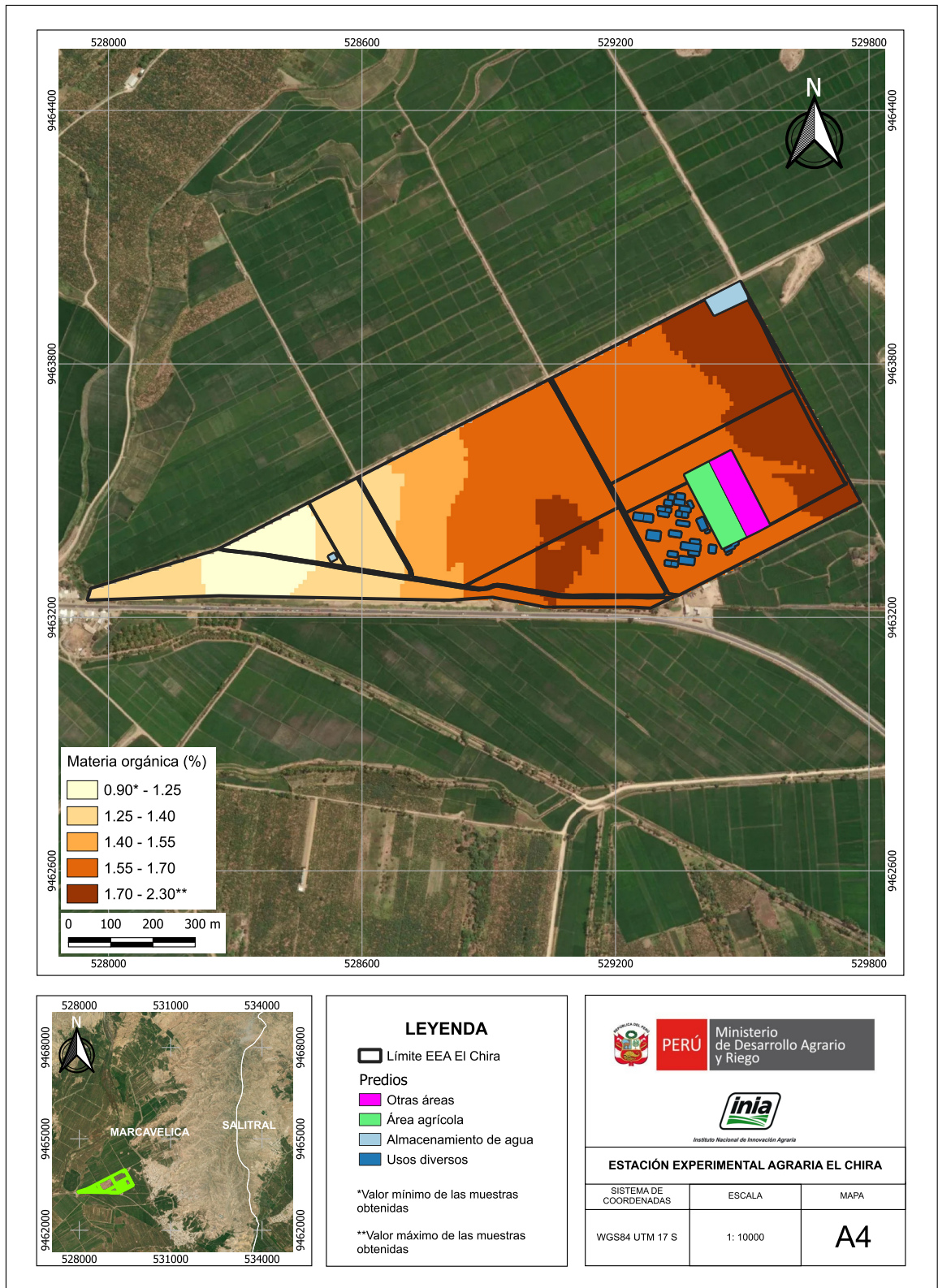


Figura 13. Mapa de variación espacial del porcentaje de materia orgánica

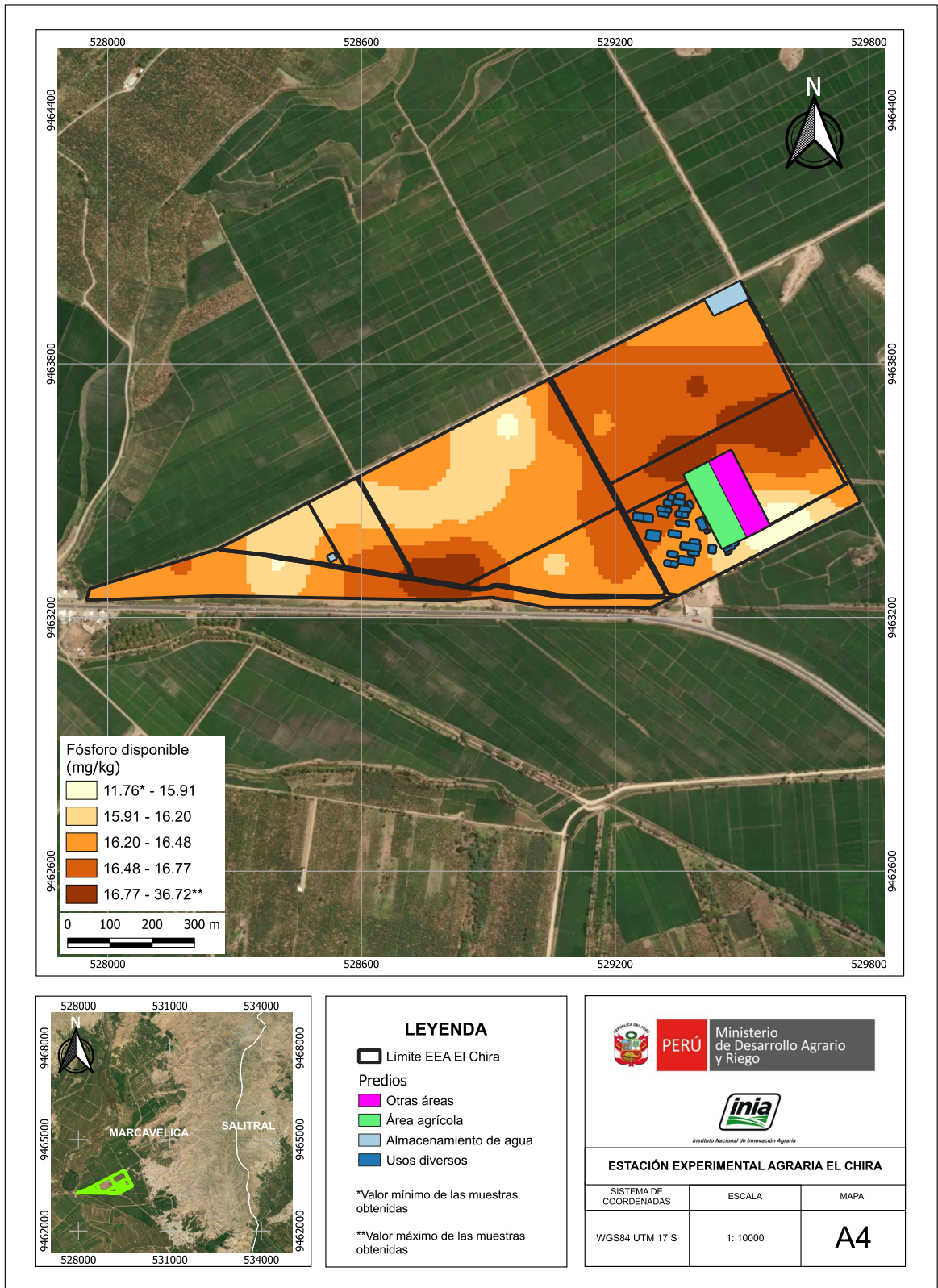


Figura 14. Mapa de variación espacial del fósforo disponible

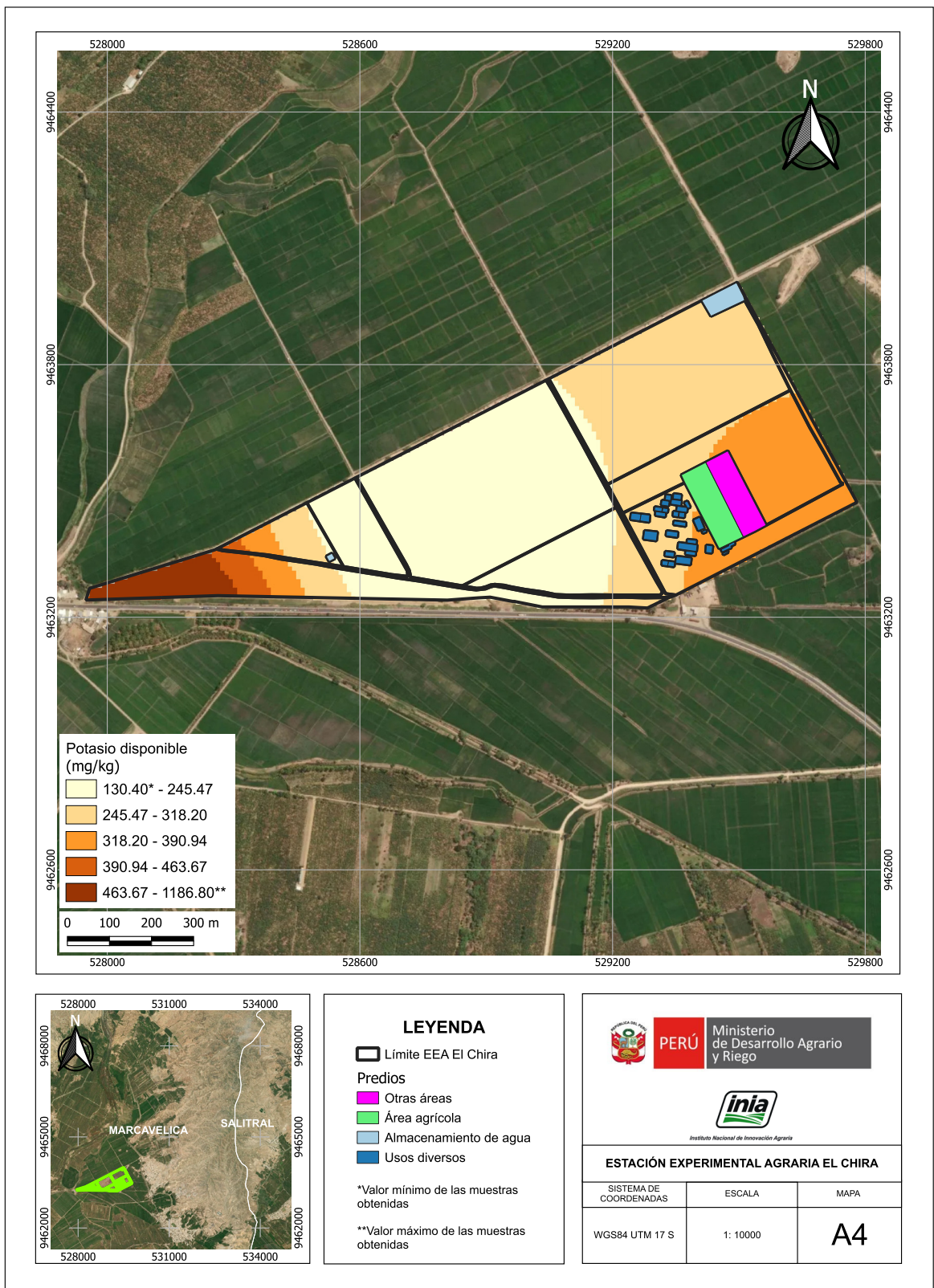


Figura 15. Mapa de variación espacial del potasio disponible

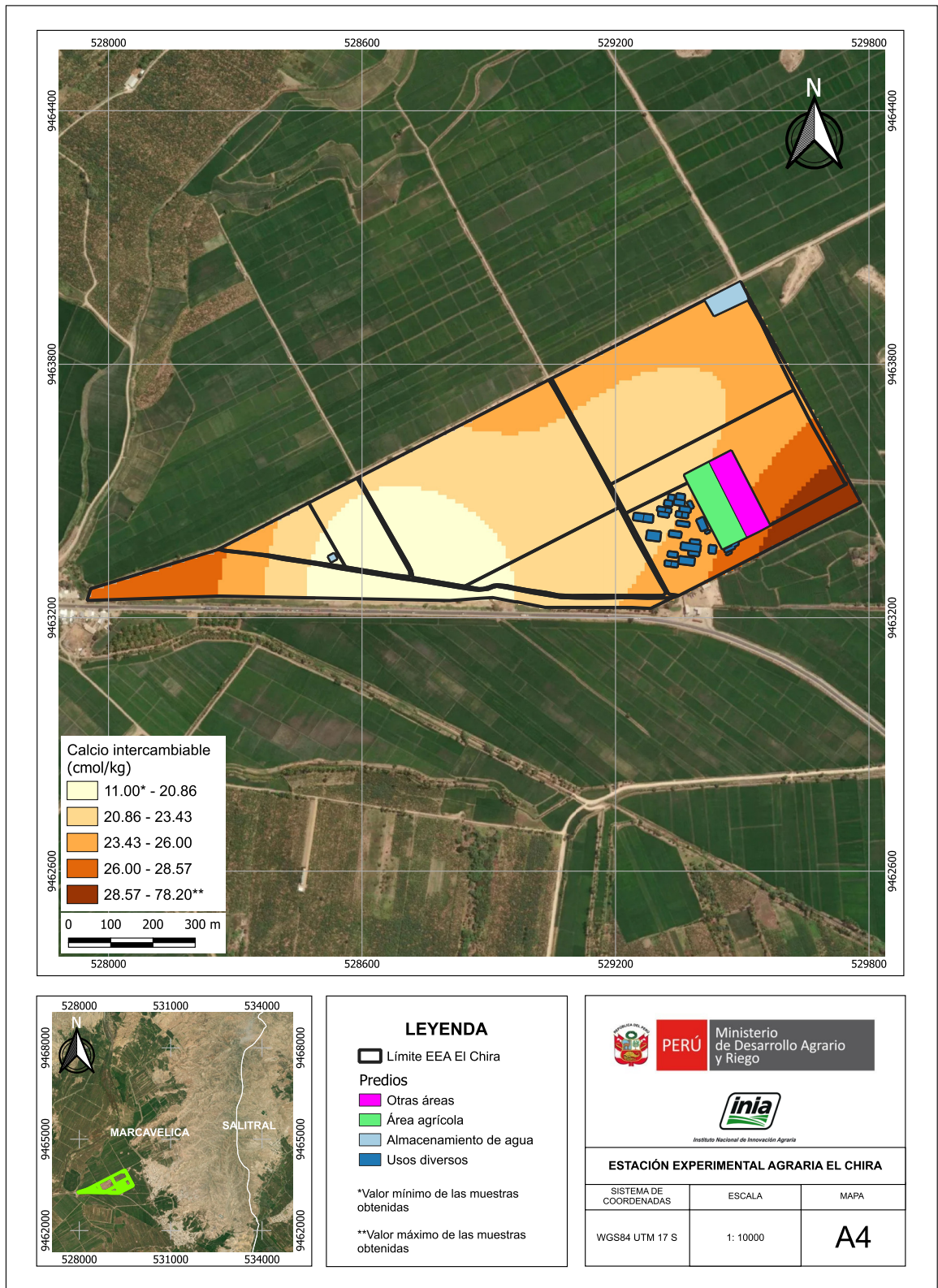


Figura 16. Mapa de variación espacial del calcio intercambiable

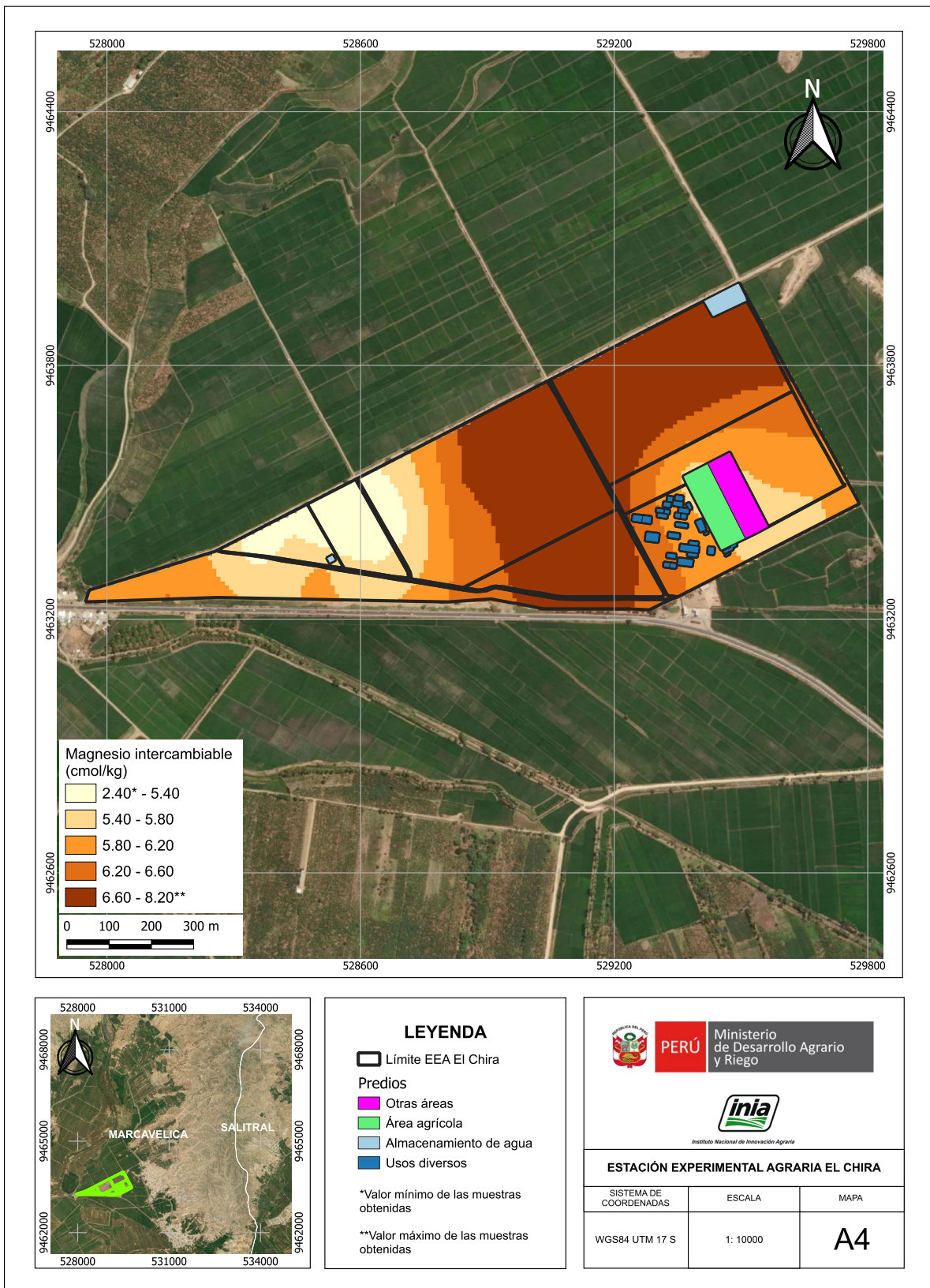


Figura 17. Mapa de variación espacial del magnesio intercambiable

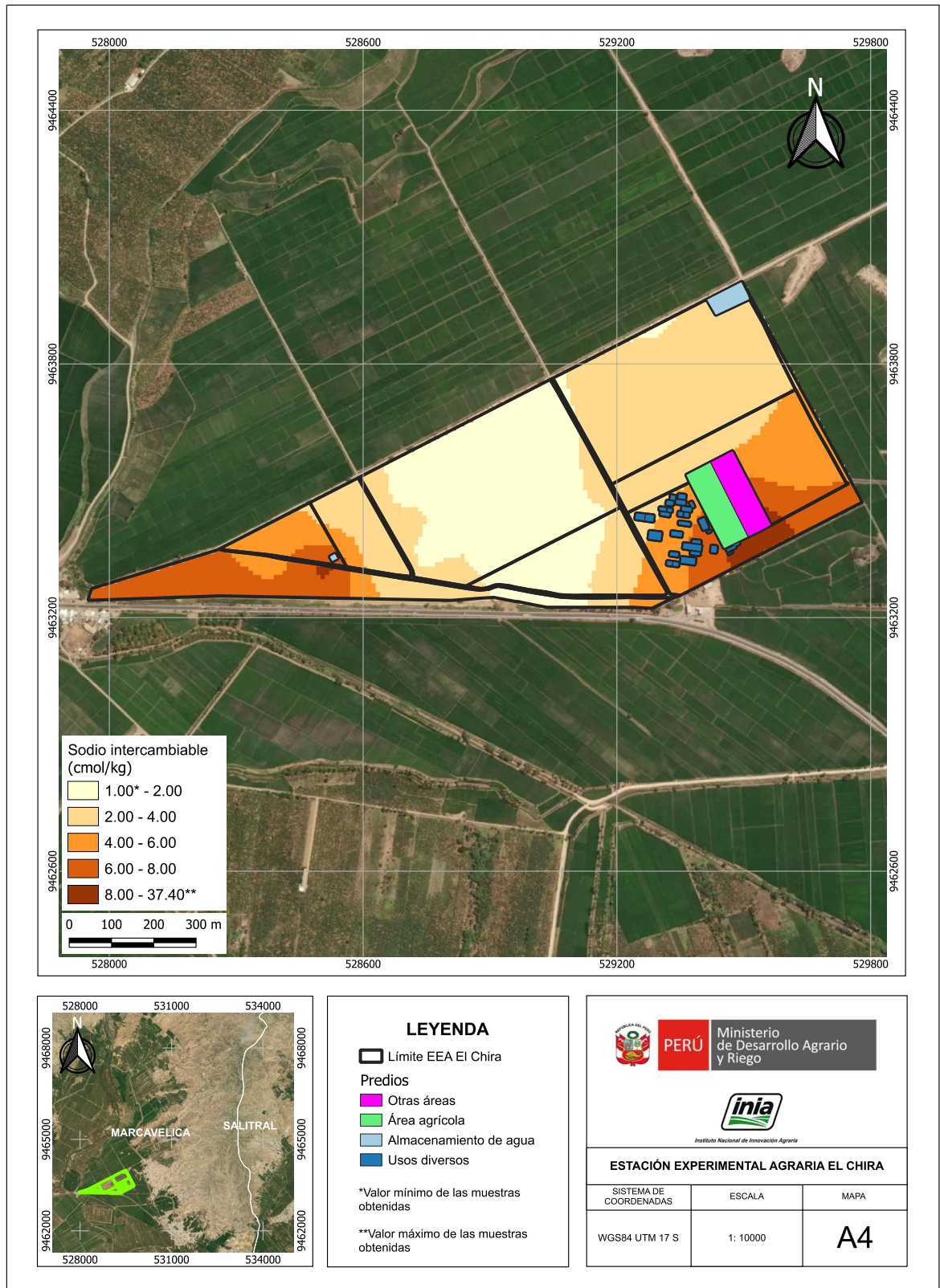


Figura 18. Mapa de variación espacial del sodio intercambiable

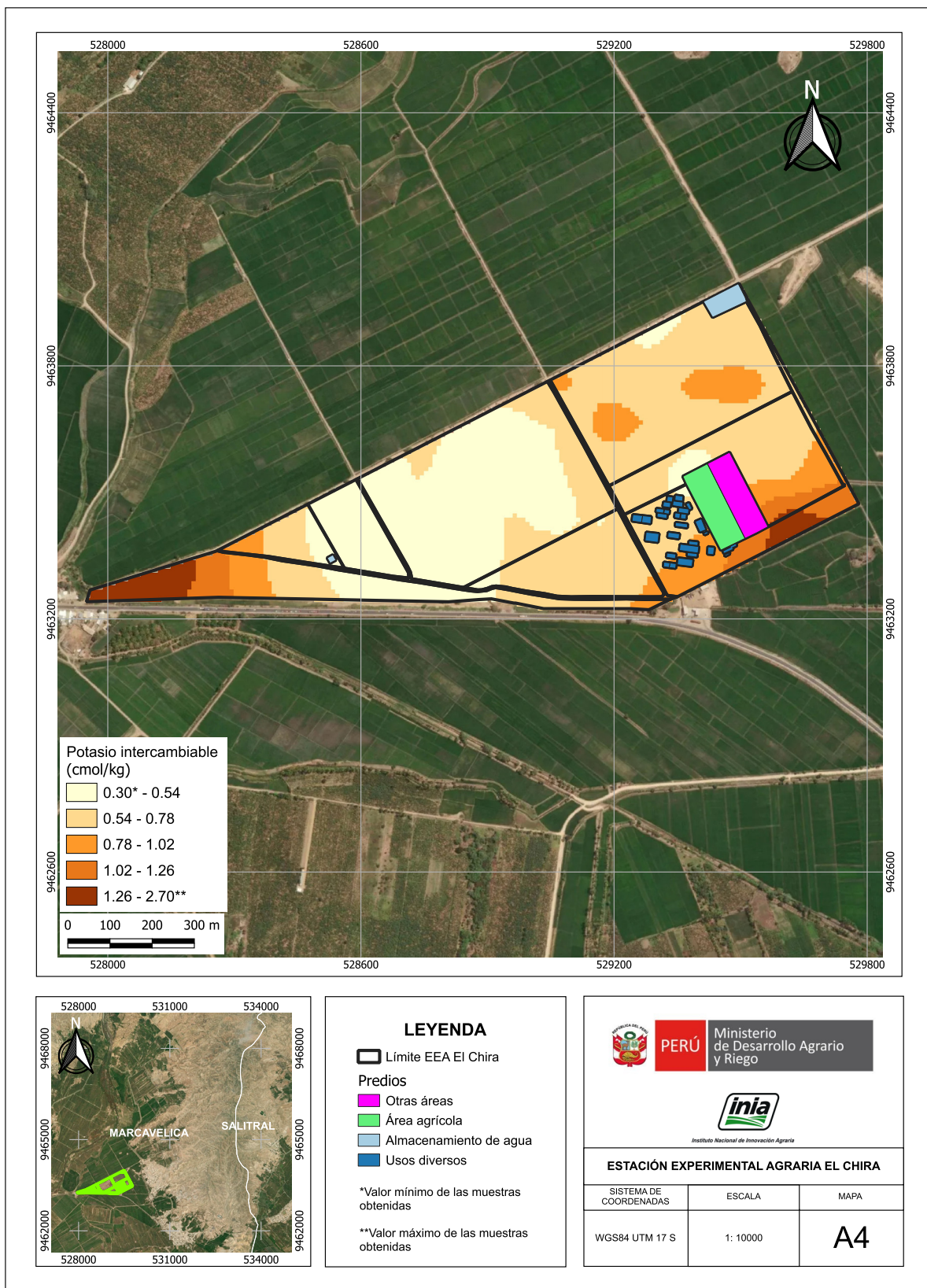


Figura 19. Mapa de variación espacial del potasio intercambiable

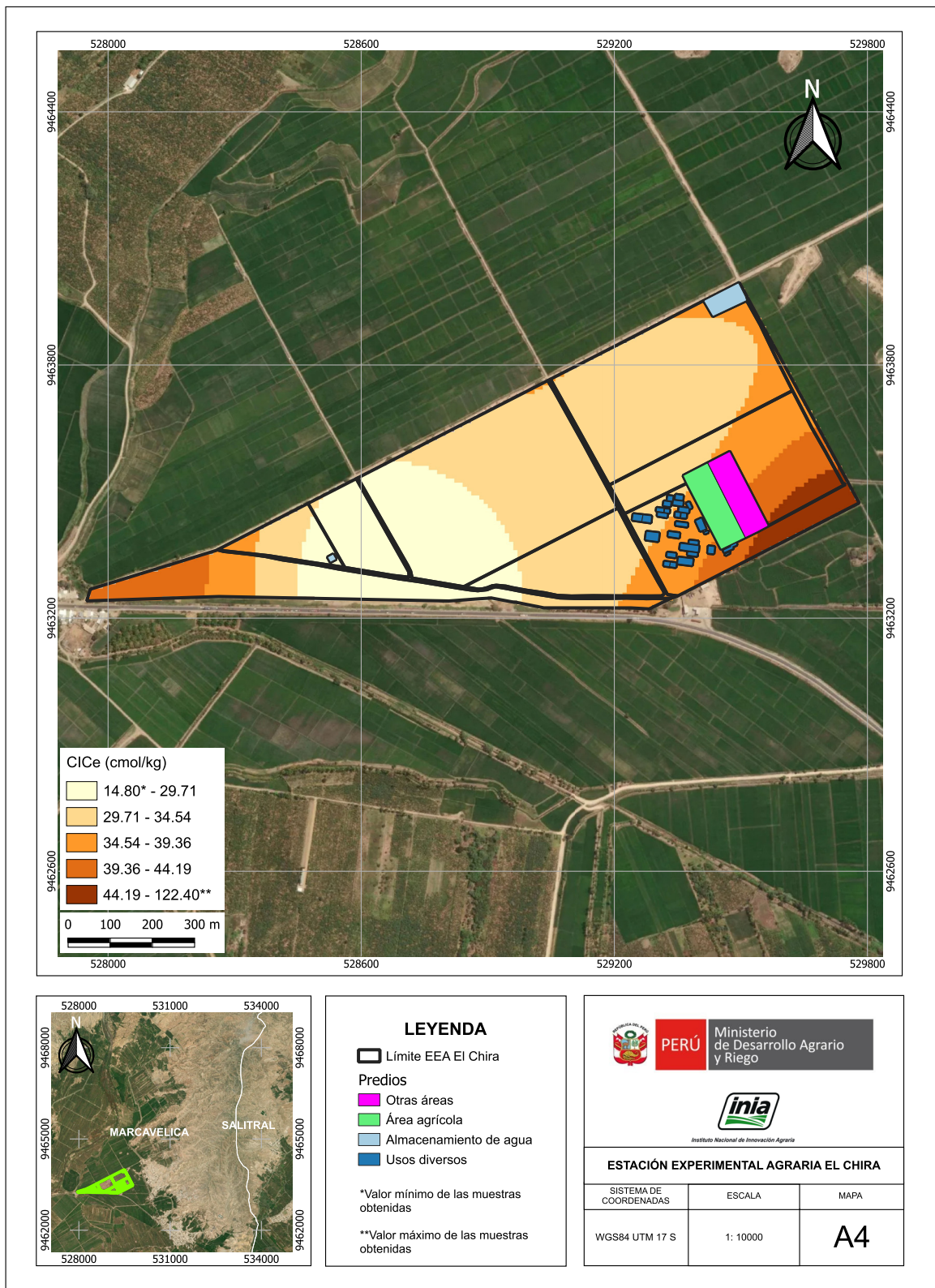


Figura 20. Mapa de variación espacial de la capacidad de intercambio catiónico efectiva (CICe)

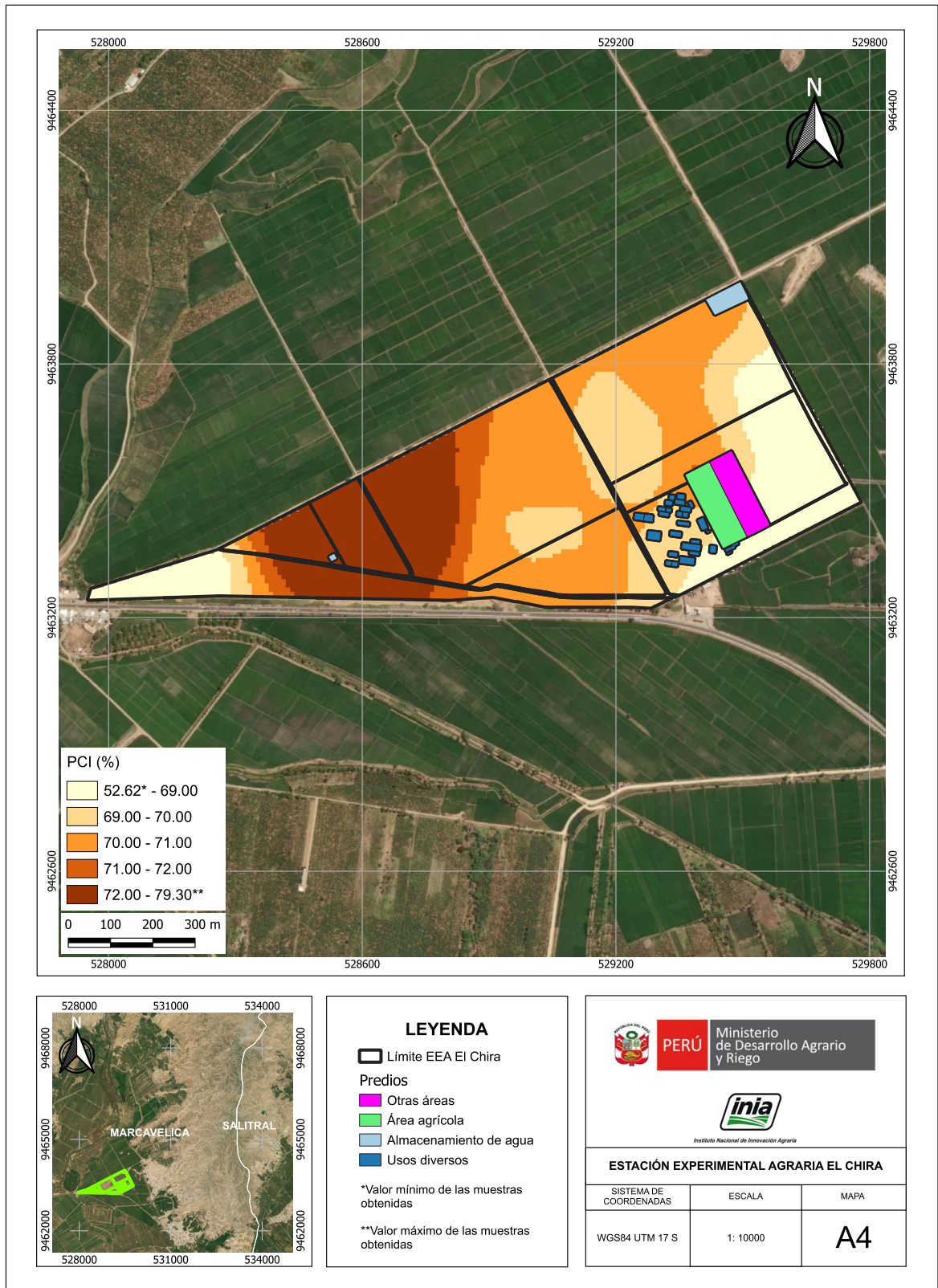


Figura 21. Mapa de variación espacial de porcentaje de calcio intercambiable (PCI)

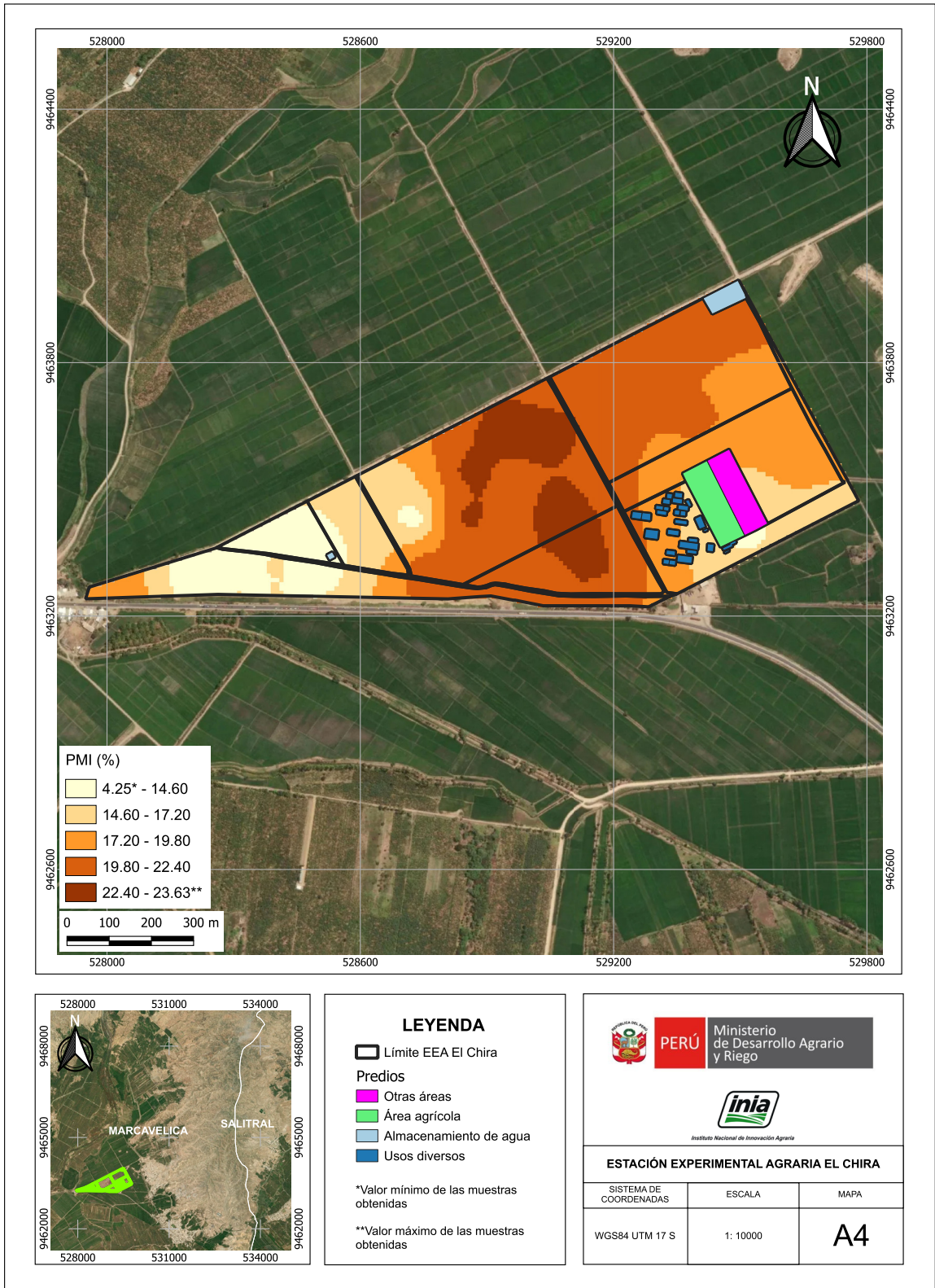


Figura 22. Mapa de variación espacial de porcentaje de magnesio intercambiable (PMI)

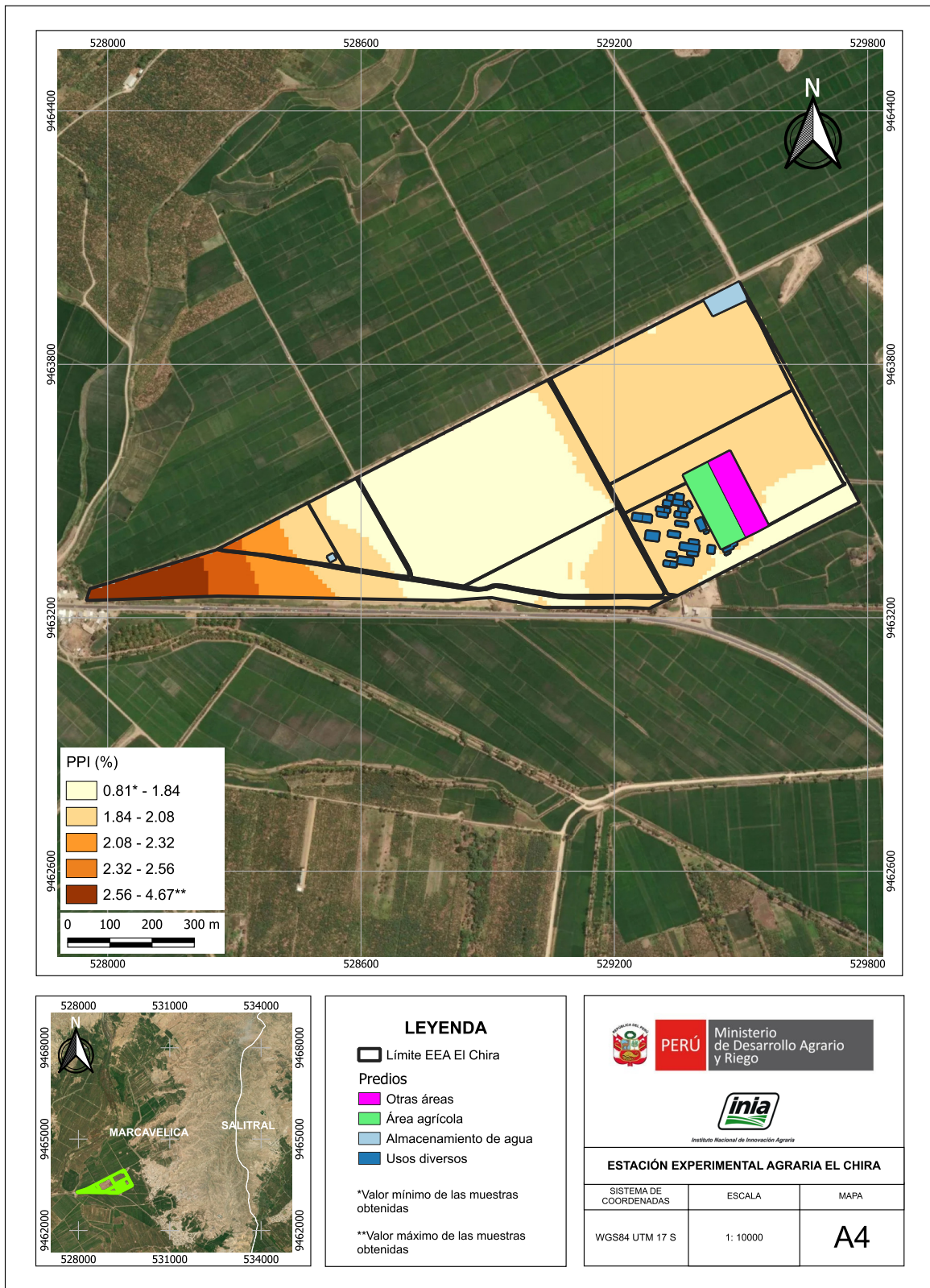


Figura 23. Mapa de variación espacial de porcentaje de potasio intercambiable (PPI)



4. Recomendaciones de manejo de la fertilidad del suelo en la EEA El Chira

4.1. Índice de saturación de bases catiónicas

4.1.1. Variación espacial de los desbalances iónicos con niveles deficitarios de K^+

Desde el enfoque edafológica del modelo BCSR, el equilibrio relativo de los cationes básicos en el complejo de cambio (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ y Na^+) constituye un determinante clave de la nutrición vegetal y de la fertilidad química del suelo. En este contexto, el diagnóstico de las relaciones catiónicas indica que el PCI ($69.86 \pm 4.54 \%$) y el PMI ($19.08 \pm 4.03 \%$) se encuentran, dentro de los rangos óptimos, lo que favorece la salud del suelo al mejorar la estabilidad estructural y la actividad biológica. No obstante, la elevada predictibilidad espacial de ambas variables ($R^2 = 0.97$ y 0.96 , respectivamente) permitió identificar zonas de manejo que requieren intervenciones específicas, dado que valores de PMI $> 19.20 \%$ y PCI $> 72 \%$ podrían provocar desbalances iónicos y generar niveles deficientes de K^+ intercambiable. Precisamente, aunque el PPI presenta una media de $1.95 \pm 0.66 \%$ ($CV = 0.34 \%$), ubicada dentro del rango considerado óptimo, se evidencia una alta variabilidad espacial y la presencia de zonas con niveles deficientes de potasio. Asimismo, el PPI mostró un elevado grado de ajuste entre los valores observados y los predichos a nivel espacial ($R^2 = 0.89$), lo que permitió identificar áreas con distintos grados de insuficiencia de K^+ intercambiable: zona 1 (1.26-2.70 %), zona 2 (1.02-1.26 %), zona 3 (0.78-1.02 %) y zona 4 (0.54-0.78 %), las cuales abarcan casi la totalidad de la superficie interpolada de la EEA El Chira.

En cultivos como banano y mango, predominantes en Piura, el potasio (K^+) cumple funciones críticas en la regulación osmótica, translocación de carbohidratos, calidad de frutos y resistencia al estrés biótico y abiótico. Dada la alta variabilidad espacial del PPI en la EEA El Chira, la estrategia de manejo debe enfocarse en ajustar dosis, fuente y forma de aplicación de fertilizantes potásicos según zonas de manejo identificadas.

4.1.2. Variación espacial de los desbalances iónicos con niveles elevados de Na^+

De acuerdo con las condiciones químicas analizadas, los suelos de la EEA El Chira son clasificados como neutro-sódicos según la clasificación de Rengasamy (2016). Gran parte de la superficie del suelo de la EEA presenta pH entre 6.4 y 7.8 (Figura 24), y PSI entre el 6 y el 9 % (Figura 25). Además, el PSI presentó un alto grado de ajuste de los valores observados con los predichos ($R^2 = 0.93$), lo que permitió identificar diferentes zonas con diferente grado de peligro de sodicidad: la zona 1 sin restricción (PSI=4.53-6.00%), la zona 2 con bajo peligro (PSI=6.00-7.00%), la zona 3 con moderado peligro (PSI=7.00-8.00%), la zona 4 con alto peligro (PSI=8.00-9.00%), y la zona 5 con muy alto peligro (PSI=9.00-31.66 %).

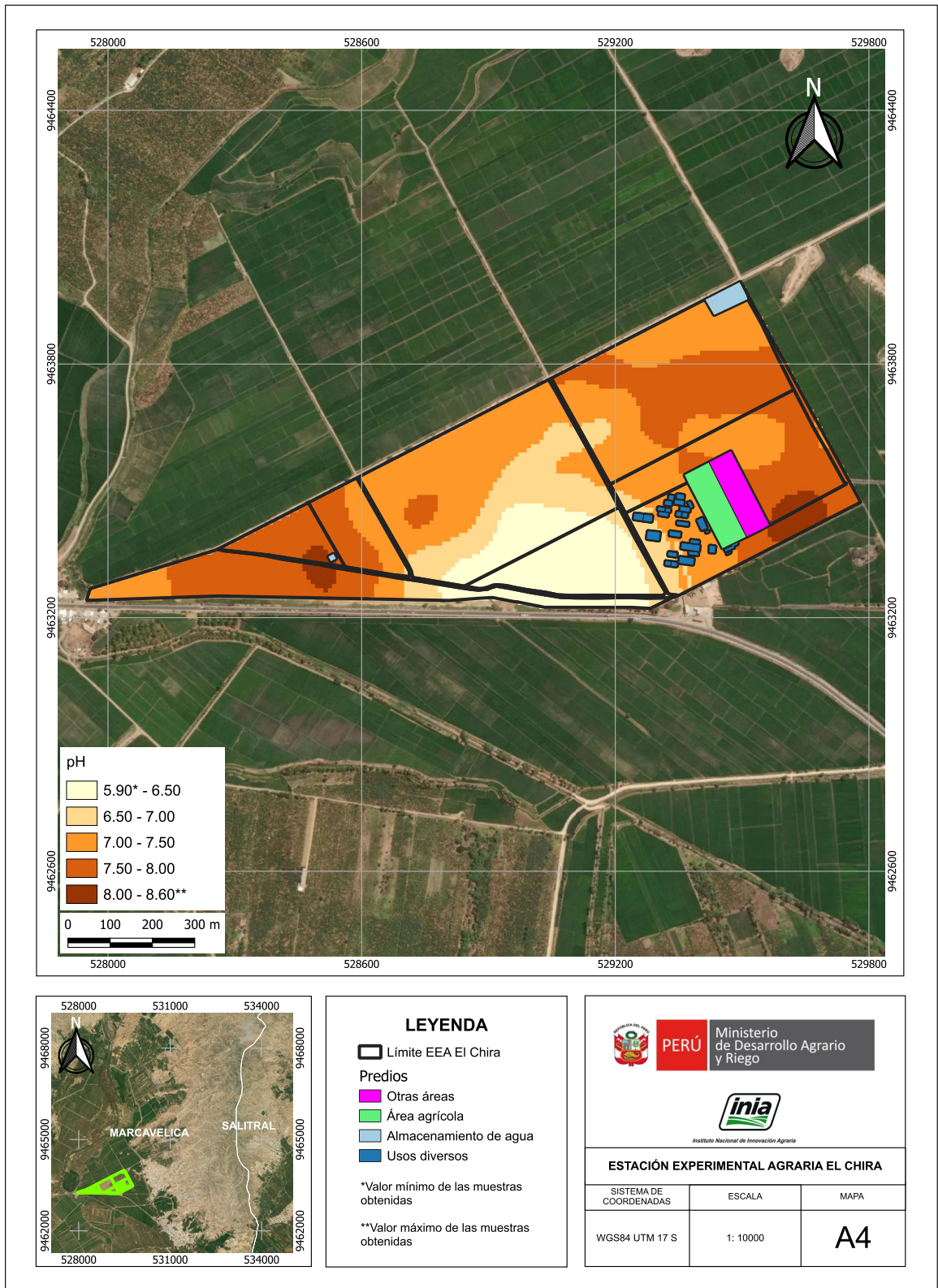


Figura 24. Mapa de variación espacial del pH

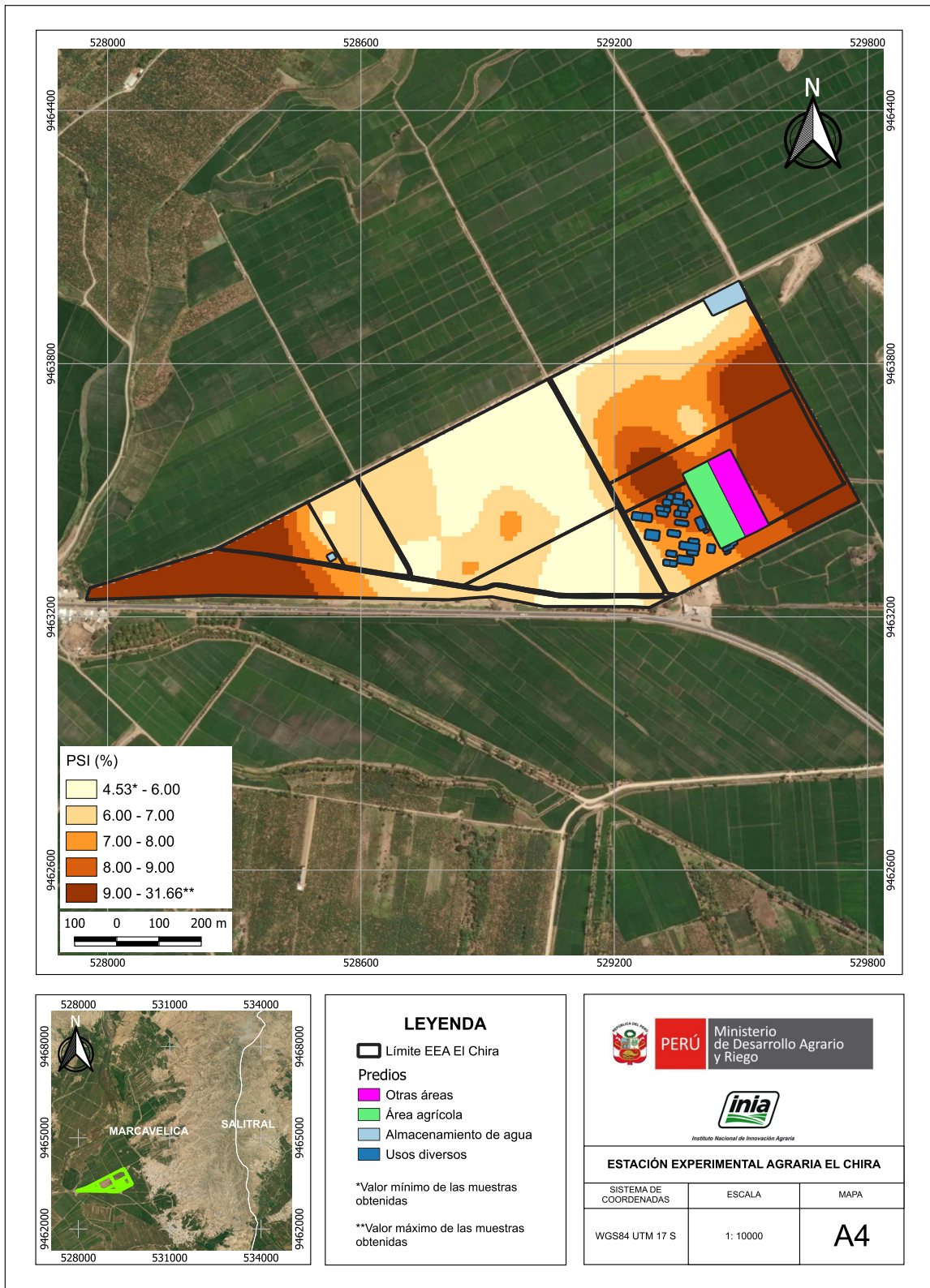


Figura 25. Mapa de variación espacial de porcentaje de sodio intercambiable

El peligro de sodicidad repercute en múltiples efectos en el suelo y en cultivos predominantes de la región, como el mango y banano, por lo que es importante analizar algunos aspectos edafológicos y fisiológicos derivados. En términos físicos, el exceso del ion sodio induce la dispersión de las partículas de arcilla, lo que deteriora la estructura del suelo, aumenta la formación de costras superficiales, reduce la porosidad y la infiltración de agua. Como resultado de estos procesos, se incrementa el encharcamiento superficial y se limita la percolación necesaria para el lavado del sodio, condiciones que perjudican el crecimiento radicular y la aireación del perfil (Stavi et al., 2021). Estas alteraciones en la estructura y en la dinámica hídrica han sido ampliamente documentadas en estudios de enmiendas y manejo de suelos sódicos, donde se observa mejora de la infiltración y reducción del PSI tras aplicaciones de yeso y materia orgánica (Bello et al., 2021).

Desde el punto de vista nutricional y fisiológico, el sodio compite con cationes esenciales por los sitios de intercambio del suelo y por los mecanismos de absorción en la planta, generando desequilibrios iónicos que se manifiestan como deficiencias relativas de potasio y calcio en los tejidos vegetales. En el banano, relaciones bajas de K/Na tanto en el suelo como en el tejido vegetal se asocian con la reducción del llenado de los racimos, menor peso del fruto y la aparición de signos de clorosis o necrosis foliar. Por ello, mantener una relación K/Na > 1 en el tejido foliar es importante para sostener la productividad del cultivo bajo condiciones salinas y sódicas (Jeyabaskaran, 2000; Sathiamoorthy y Jeyabaskaran, 2001).

En particular, el mango es considerado un cultivo sensible a la salinidad y a la sodicidad, especialmente durante las etapas tempranas de establecimiento. La acumulación de Na⁺ en la solución del suelo y su translocación hacia las hojas induce síntomas de clorosis marginal y necrosis, además de una reducción sostenida de la tasa fotosintética. Estos efectos fisiológicos se traducen en una menor brotación, reducción del diámetro del tronco y disminución tanto del rendimiento como de la calidad del fruto. Asimismo, estudios con enfoque espacial en áreas cultivadas con mango han documentado la asociación entre puntos con alta conductividad eléctrica y un menor desarrollo de las plantas, lo que subraya la necesidad de realizar diagnósticos zonificados, mediante mapas de salinidad y sodicidad, que permitan implementar intervenciones de manejo dirigidas (Damodaran et al., 2018).

Por otro lado, en el cultivo de banano la sodicidad puede agravar problemas fitosanitarios y puede condicionar la severidad de enfermedades del suelo, además del efecto directo sobre la reducción del sistema radicular profundo y mayor susceptibilidad al estrés hídrico. Trabajos en sistemas bananeros muestran que los suelos con alteraciones iónicas pueden favorecer la persistencia y el impacto de patógenos como *Fusarium oxysporum* f. *sp. cubense.*, incrementando riesgos productivos en plantaciones afectadas por sodicidad (Dominguez et al., 2003).

Con la finalidad de mitigar los efectos de la sodicidad identificados en los suelos de la EEA El Chira, se propone la aplicación de enmiendas químicas, siendo el yeso agrícola (CaSO₄ + 2H₂O) una de las más utilizadas por su capacidad de aportar calcio soluble y favorecer el desplazamiento de sodio de los complejos de intercambio. A continuación, se presenta un ejemplo de dosis de yeso agrícola para la zona 5 con muy alto peligro de sodicidad. Para el cálculo se utilizará la fórmula propuesta por Oster et al. (1999):

$$GR = 0.00086 \times BD \times D \times CECe \times (ESP_i - ESP_r) \quad \dots (12)$$

Donde:

GR: requerimiento de yeso agrícola ($t \text{ ha}^{-1}$).

BD: densidad aparente del suelo ($g \text{ cm}^{-3}$).

D: profundidad del suelo (cm).

CECe: capacidad de intercambio catiónico efectiva (cmol kg^{-1}), obtenido de la suma de las bases cambiables.

ESP_i: porcentaje de sodio intercambiable actual del suelo (%).

ESP_r: valor que se desea alcanzar (5 %) con la aplicación de yeso agrícola.

Al reemplazar los valores en la fórmula, se obtiene el siguiente resultado:

$$GR = 0.00086 \times 1.3 \times 30 \times 37 \times (9 - 5) = 4.96 \text{ t ha}^{-1}$$

En consecuencia, el requerimiento de yeso para la zona con mayor riesgo de sodicidad es de 4.96 t ha^{-1} .

4.2. Niveles de suficiencia de nutrientes disponibles

El comportamiento geoestadístico del fósforo disponible muestra una estructura espacial débil, con un modelo ajustado de tipo exponencial, pero con escasa continuidad espacial efectiva. El *nugget* (C_0) fue de 2.288 y el *sill* ($C_0 + C$) de 19.184, lo que implica que el 11.92 % de la variación total es atribuible al error no estructurado o a fuentes de variabilidad no explicadas por la distancia. Esto sugiere que el fósforo disponible varía fuertemente a pequeña escala, posiblemente asociado a factores locales como acumulación de residuos orgánicos, microambientes de humedad o diferencias en manejo previo de fertilización.

El rango de autocorrelación espacial (0.003 m) es muy baja, y su relevancia práctica es limitada debido a la baja capacidad predictiva del modelo ($R^2 = 0.04$) y un RMSE relativamente alto (7.684). Esta débil estructura espacial limita la confiabilidad de interpolaciones como *kriging* ordinario para generar mapas precisos de disponibilidad de fósforo. En consecuencia, la fertilización fosfatada debe ser diseñada con base a los análisis del suelo sitio-específicos, preferentemente a escala de lote o sublote, evitando extrapolaciones espaciales imprecisas.

Para los cálculos de fertilización fosforada en el cultivo de banano, se tomará como referencia un nivel crítico de 10 mg de P-Olsen por kg de suelo y un rendimiento potencial de 50 t ha^{-1} de banano con fertilización convencional y manejo de alta tecnología. De esta manera, el nivel de fósforo ($18.12 \pm 5.22 \text{ mg kg}^{-1}$) 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 de la siguiente manera:

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 kg ha⁻¹ de fosfato monoamónico (52 % de P₂O₅). Con esta dosis anual de fertilizante, se logra reponer el P extraído por el rendimiento producido en el sistema productivo de banano convencional de alta tecnología en la EEA El Chira. 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.

4.3. El pH del suelo

En la EEA El Chira, los suelos presentan un pH medio de 7.28 ± 0.60 (rango 5.90-8.60) y un coeficiente de variación relativamente bajo (CV = 6.46 %), lo que indica dispersión reducida a escala de muestreo pese a la presencia de cierta heterogeneidad. De hecho, el 75 % de las muestras registra pH > 7.10, resultado coherente con la presencia generalizada de carbonato de calcio (CaCO₃), donde el 75 % de los datos supera el 2.34 % (Figura 26). Estas condiciones alcalinas disminuyen la solubilidad de micronutrientes (Fe, Zn, Mn) y limitan la disponibilidad de fósforo.

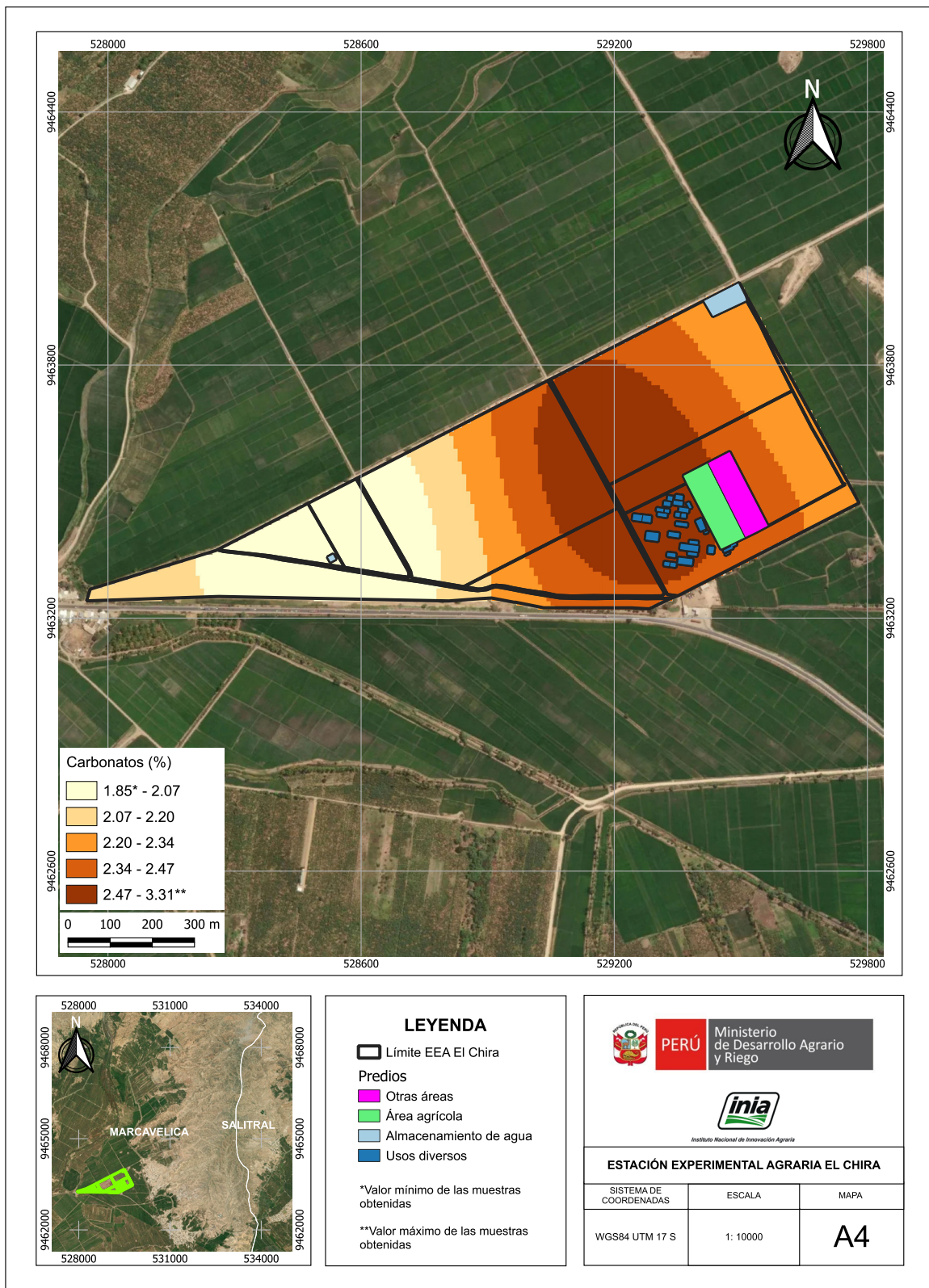


Figura 26. Mapa de variación espacial del porcentaje de carbonatos

El análisis geoestadístico (Tabla 3) confirma y cuantifica esta estructura espacial del pH. El *nugget* ($C_0 = 0.027$) sugiere ausencia de variabilidad microscópica atribuible al error de muestreo detectable. Asimismo, el *sill* ($C_0 + C = 0.50$) refleja una varianza global moderada y el alcance de autocorrelación espacial (464 m) indica que la correlación espacial del pH se mantiene a distancias más amplias. El modelo *linear to sill* presentó un ajuste con $RMSE = 0.016$ y $R^2 = 0.877$, lo que implica alta precisión local y que el modelo explica el 87.7 % de la variabilidad espacial del pH (Figura 24). En conjunto, estos resultados avalan la confiabilidad de los mapas de pH para la zonificación del área de estudio.

Entre las variables que condicionan el pH destacan la materia orgánica (MO) y el $CaCO_3$, aunque con comportamientos muy distintos. La MO mostró una media de 1.57 ± 0.43 % (rango 0.90-2.30 %) y un 27.39 %, indicando alta heterogeneidad espacial y menor capacidad predictiva. Por su parte, el $CaCO_3$ presentó una media de 2.33 ± 0.33 % (rango 1.85-3.31 %) y $CV = 15.02$ %, es decir, menor variabilidad relativa y, según el análisis geoestadístico, mejor precisión local y mayor capacidad predictiva global que la MO (Tabla 3).

Desde la perspectiva funcional, el pH emerge como un determinante central de la comunidad microbiana y de los procesos de descomposición y ciclado de nutrientes: regula la respiración microbiana, la eficiencia en el uso de carbono y la producción de biomasa (Neina, 2019; Wang et al., 2019). Estudios recientes muestran que el pH y el contenido de arcilla influyen positivamente sobre la tasa de descomposición del carbono orgánico. En los suelos analizados de la EEA El Chira, un pH promedio superior a 7 puede favorecer la actividad metabólica microbiana, aunque la descomposición de la MO suele ser óptima alrededor de $pH = 6.5$ y tiende a disminuir notablemente por debajo de 4.5 o por encima de 7 (Liang et al., 2024; Wang y Kuzyakov, 2024).

La MO también modula los procesos abióticos y bióticos que condicionan la disponibilidad del fósforo y sus mecanismos de retención y liberación (Jindo et al., 2023). En suelos con $pH > 8$ el fósforo tiende a precipitar como fosfato de calcio, reduciendo su disponibilidad y, de forma análoga, varios micronutrientes pueden precipitar o adsorberse, generando deficiencias nutricionales (von Tucher et al., 2018).

La robustez espacial del pH ($R^2 = 0.877$) y la distribución relativamente homogénea del $CaCO_3$ permiten emplearlos como variables de base para la delimitación de unidades de manejo. En contraste, la alta heterogeneidad de la MO aconseja estrategias de muestreo más intensas y medidas de manejo que incrementen y homogeneicen el contenido orgánico (compostaje, abonos verdes y mulch), dado su papel en la disponibilidad de P y en la regulación de la actividad microbiana.





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://doi.org/10.18359/rcin.5396>
- Atkins, P. W., De Paula, J., y Keeler, J. (2023). *Atkins' physical chemistry*. Oxford university press.
- Barber, S. A. (1995). *Soil nutrient bioavailability: a mechanistic approach*. John Wiley y Sons.
- Bear, F. E., Prince, A. L., y Malcolm, J. L. (1945). *Potassium needs of New Jersey soils*. New Jersey Agricultural Experiment Station
- Bhamini, K., Kumar, A., Magrey, A. H., Jafri, S. K. F., Najmusaqib, S., Raising, P., Ravi, y Jan, I. (2025). The role of GIS and GPS in precision fertilization: Optimizing nutrient management for sustainable cropping. *International Journal of Research in Agronomy*, 8(2), 260-267. <https://doi.org/10.33545/2618060X.2025.v8.i2d.2574>
- Bello, S. K., Alayafi, A. H., AL-Solaimani, S. G., y Abo-Elyousr, K. (2021). *Mitigating soil salinity stress with gypsum and bio-organic amendments: A review*. *Agronomy*, 11(9), 1735. doi.org/10.3390/agronomy11091735
- Bhamini, K., Kumar, A., Magrey, A. H., Jafri, S. K. F., Najmusaqib, S., Raising, P., Ravi, y Jan, I. (2025). The role of GIS and GPS in precision fertilization: Optimizing nutrient management for sustainable cropping. *International Journal of Research in Agronomy*, 8(2), 260-267. <https://doi.org/10.33545/2618060X.2025.v8.i2d.2574>
- Bray, R. H. (1958). The correlation of a phosphorus soil test with the response of wheat through a modified Mitscherlich equation. *Soil Science Society of America Journal*, 22(4), 314-317. <https://doi.org/10.2136/sssaj1958.03615995002200040013x>
- Brock, C., Jackson-Smith, D., Kumarappan, S., Culman, S., Doohan, D., y Herms, C. (2021). The prevalence and practice of soil balancing among organic corn farmers. *Renewable Agriculture and Food Systems*, 36(4), 1–10. <https://doi.org/10.1017/S1742170520000381>
- Buresh, R.J., Smithson, P.C., y Hellums, D.T. (1997). Building Soil Phosphorus Capital in Africa. En R. J. Buresh, P. A. Sanchez, y F. Calhoun (Eds.), *Replenishing Soil Fertility in Africa* (pp. 111-149). Soil Science Society of America, Inc; American Society of Agronomy, Inc. <https://doi.org/10.2136/sssaspepub51.c6>
- Chaganti, V., y Culman, S. (2017). Historical perspective of soil balancing theory and identifying knowledge gaps: A review. *Crop, Forage 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/>
- Coaguila, L., Mataix-Solera, J., Nina, S., García-Carmona, M., y Salazar, E. T. (2025). Soil Degradation Evidence Following a Wildfire in Arequipa's Andean Region, Peru. *Spanish Journal of Soil Science*, 15, 1–13. <https://doi.org/10.3389/sjss.2025.13983>
- Correa, S. W., Mello, C. R., Chou, S. C., Curi, N., y Norton, L. D. (2016). Soil erosion risk associated with climate change at Mantaro River basin, Peruvian Andes. *Catena*, 147, 110–124. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.07.003>

- 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>
- 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/20.500.12955/2763>
- Damodaran, T., Rajan, S., Jha, S. K., Misra, V. K., y Sahu, A. (2018). Screening polyembryonic mango accessions for salt tolerance and assessing dynamics of sodium (Na⁺), potassium (K⁺), and antioxidants. *Fruits*, 73(4), 228-235. <https://doi.org/10.17660/th2018/73.4.4>
- de Valença, A. W., Vanek, S. J., Meza, K., Ccanto, R., Olivera, E., Scurrah, M., Lantinga, E. A., y Fonte, S. J. (2017). Land use as a driver of soil fertility and biodiversity across an agricultural landscape in the Central Peruvian Andes. *Ecological Applications*, 27(4), 1138–1154. <https://doi.org/10.1002/>
- Dominguez, J., Negrin, M. A., y Rodriguez, C. M. (2003). Evaluating soil sodium indices in soils of volcanic nature conducive or suppressive to *Fusarium* wilt of banana. *Soil Biology and Biochemistry*, 35(4), 565-575. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(03\)00017-8](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(03)00017-8)
- Environmental Protection Agency. (2004). *Method 9045D: Soil and Waste pH, part of Test Methods for Evaluating Solid Waste, Physical/Chemical Methods*. <https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-12/documents/9045d.pdf>
- Espinosa, J., y Molina, E. (1999). *Acidez y encalado de los suelos* (1.ª ed.). International Plant Nutrition Institute. <https://doi.org/10.13140/2.1.3888.9281>
- Garbanzo-León, G., Alemán-Montes, B., Alvarado-Hernández, A., y Henríquez-Henríquez, C. (2017). Validación de modelos geoestadísticos y convencionales en la determinación de la variación espacial de la fertilidad de suelos del Pacífico Sur de Costa Rica. *Investigaciones Geográficas*, (93), 20-41. <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.
- Ge, Y., Thomasson, J. A., y Sui, R. (2011). Remote sensing of soil properties in precision agriculture: A review. *Frontiers of Earth Science*, 5, 229-238. <https://doi.org/10.1007/s11707-011-0175-0>
- Graham, E. R. (1959). *An explanation of theory and methods of soil testing*. University of Missouri, Agricultural Experiment Station. <https://mdh.contentdm.oclc.org/digital/collection/agexptstn/id/25261/>
- 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*.
- Jeyabaskaran, K. J. (2000). Studies on fixing critical limits of K, Na and K/Na ratio for bananas in saline sodic soil conditions. *InfoMusa*, 9(1), 34.
- Jindo, K., Audette, Y., Olivares, F. L., Canellas, L. P., Smith, D. S., y Paul Voroney, R. (2023). Biotic and abiotic effects of soil organic matter on the phytoavailable phosphorus in soils: A review. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 10(1). <https://doi.org/10.1186/s40538-023-00401-y>
- 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>
- Liang, Y., Rillig, M. C., Chen, H. Y., Shan, R., y Ma, Z. (2024). Soil pH drives the relationship between the vertical distribution of soil microbial biomass and soil organic carbon across terrestrial ecosystems: A global synthesis. *Catena*, 238. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2024.107873>
- Mamabolo, E., Mashala, M. J., Mugari, E., Mogale, T. E., Mathebula, N., Mabitsetla, K., y Ayisi, K. K. (2025). Application of precision agriculture technologies for crop protection and soil health. *Smart Agricultural Technology*, 12, 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2025.101270>
- Marino, M. A., y Echeverría, H. E. (2018). Umbral de requerimiento de fósforo en suelos Argiudoles y guía para la fertilización de alfalfa (*Medicago sativa* L.). *Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica*, 31, 7-18. <https://fertilizar.org.ar/wp-content/uploads/2021/09/Art-2.pdf>
- McLean, E. O. (1977). Contrasting concepts in soil test interpretation: Sufficiency levels of available nutrients versus basic cation saturation ratios. En T. R. Peck, J. T. Cope Jr., y D. A. Whitney (Eds.), *Soil testing: correlating and interpreting the analytical results* (pp. 39-54). ASA Special Publications. <https://doi.org/10.2134/asaspecpub29.c3>
- Moral-García, F. J. (2004). Aplicación de la geoestadística en las ciencias ambientales. *Ecosistemas*, 1(11), 78-86. <https://www.revistaecosistemas.net/index.php/ecosistemas/article/view/582>
- Neina, D. (2019). The role of soil pH in plant nutrition and soil remediation. *Applied and environmental soil science*. <https://doi.org/10.1155/2019/5794869>
- 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>
- Oster, J. D., Shainberg, I., y Abrol, I. P. (1999). Reclamation of salt-affected soils. En R. W. Skaggs y J. Van Schilfhaarde (Eds.), *Agricultural Drainage* (pp. 659-691). American Society of Agronomy. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr38.c19>
- 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 1. *Agronomy Journal*, 65(1), 91-96. <https://doi.org/10.2134/agronj1973.00021962006500010028x>
- Quispe-Matos, K. R., Carbajal-Llosa, C. M., Mejía-Maita, S. Y., Llerena-Arroyo, R. A., Solórzano-Acosta, R. A., y Cruz-Luis, J. A. (2025). *Variación espacial de la fertilidad del suelo en la EEA Canaán*. Instituto Nacional de Innovación Agraria. <http://hdl.handle.net/20.500.12955/2852>
- R Core Team. (2018). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing.

- Rengasamy, P. (2016). Soil Chemistry Factors Confounding Crop Salinity Tolerance—A Review. *Agronomy*, 6(4). <https://doi.org/10.3390/agronomy6040053>
- Sathiamoorthy, S., y Jeyabaskaran, K. J. (2001). Potassium management of banana. En *IPI/NARCTT regional workshop* (Eds.), *Potassium and water management in West Asia and North Africa, Amman (JOR)* (pp. 499-516).
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2002). Norma Oficial Mexicana NOM-021-REC-NAT-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>
- Sistema Integrado de Estadística Agraria (2025). *Perfil productivo de los principales cultivos*. Recuperado el 1 de octubre de 2025 de: <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrljoiYjYwYTk5MDgtM2M-0MS00NDMyLTgzNDEtMjNhNjEzYWQyOTNliiwidCI6IjdmMDg0NjI3LTdmNDAtNDg3OS04OTE3L-Tk0Yjg2ZmQzNWYzZiJ9>
- Stavi, I., Thevs, N. y Priori, S. (2021). *Soil Salinity and Sodicity in Drylands: A Review of Causes, Effects, Monitoring, and Restoration Measures*. *Frontiers in Environmental Science*, 9. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.712831>
- von Tucher, S., Hörndl, D., y Schmidhalter, U. (2018). Interaction of soil pH and phosphorus efficacy: Long-term effects of P fertilizer and lime applications on wheat, barley, and sugar beet. *Ambio*, 47, 41-49. <https://doi.org/10.1007/s13280-017-0970-2>
- Wang, C. Y., Zhou, X., Guo, D., Zhao, J. H., Yan, L., Feng, G. Z., y Zhao, L. P. (2019). Soil pH is the primary factor driving the distribution and function of microorganisms in farmland soils in northeastern China. *Annals of Microbiology*, 69(13), 1461-1473. <https://doi.org/10.1007/s13213-019-01529-9>
- Wang, C., y Kuzyakov, Y. (2024). Soil organic matter priming: The pH effects. *Global Change Biology*, 30(6). <https://doi.org/10.1111/gcb.17349>
- Yang, M., Zhou, D., Hang, H., Chen, S., Liu, H., Su, J., Lv, H., y Zhao, G. (2024). Effects of balancing exchangeable cations Ca, Mg, and K on the growth of tomato seedlings (*Solanum lycopersicum* L.) based on increased soil cation exchange capacity. *Agronomy*, 14(3), 629. <https://doi.org/10.3390/agronomy14030629>
- Zhang, G. Q. (1999). *Effects of exchangeable soil calcium, magnesium and calcium/magnesium ratios on plant nutrition and growth of lettuce on an ultisol* [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>

CONDUCTÍMETRO
LARSAT
SEA D CHN



Ministerio de Agricultura

HNO₃
34

58 J

58 J

NS 12/21
ISO 1042



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



Ver nuestro alcance de acreditación



Ver nuestros servicios



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



Instituto Nacional de Innovación Agraria







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

ISBN: 978-9972-44-244-5



PERÚ

Ministerio
de Desarrollo Agrario
y Riego



Instituto Nacional de Innovación Agraria

 @INIAPeru