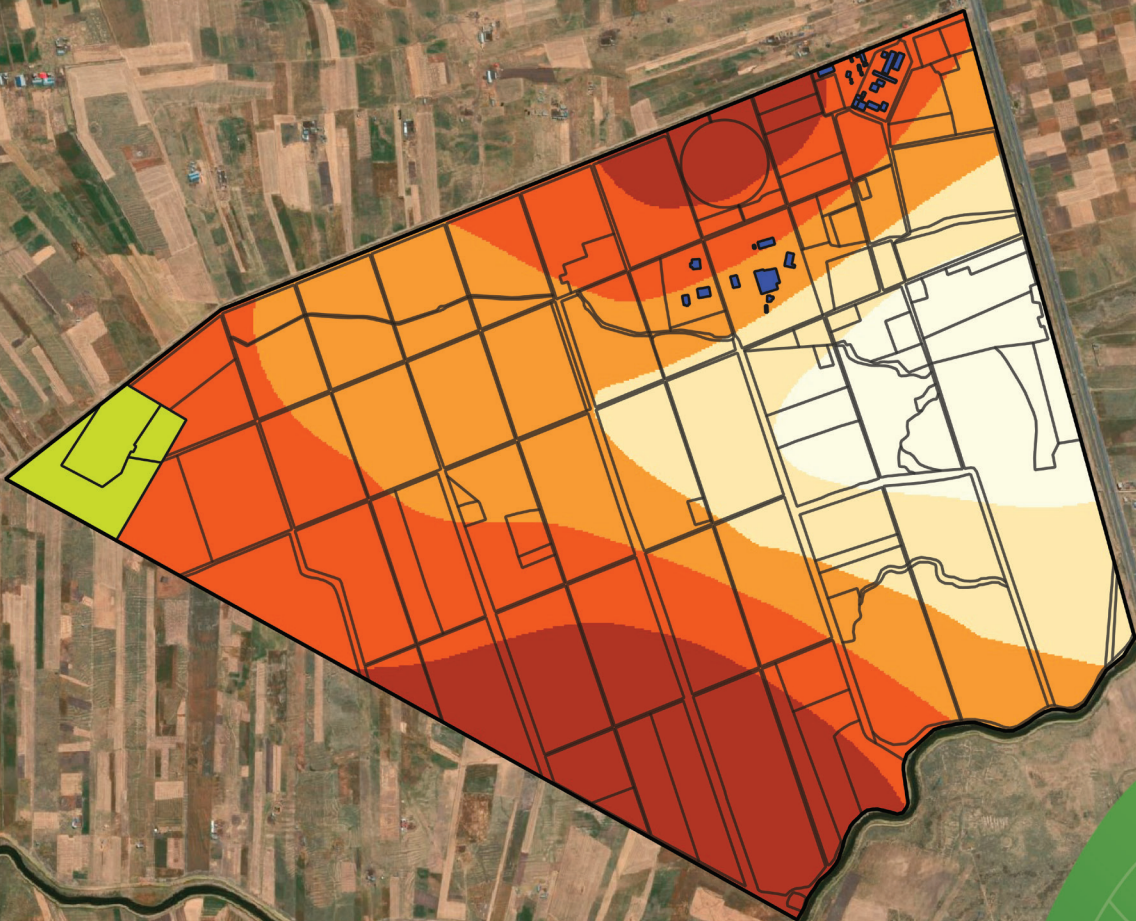


Variación espacial de la fertilidad del suelo en la EEA Illpa



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 Illpa



VARIACIÓN ESPACIAL DE LA FERTILIDAD DEL SUELO EN LA EEA ILLPA

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:

Mayo, 2026

Publicado:

Mayo, 2026

Disponible en:

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

ISBN:

978-9972-44-256-8

Editado por:

Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA)

Av. La Molina 1981, Lima-Perú

Teléf. (511) 240-2400

www.gob.pe/inia

Equipo Técnico de Edición y Publicaciones:

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

Todos los derechos reservados.

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

Hecho el Depósito Legal en la Biblioteca Nacional del Perú N° 2026-05581

Autores: Nestor E. Cuellar-Condori, Kenyi R. Quispe-Matos, Carlos M. Carbajal-Llosa, Sharon Y. Mejia-Maita, Albert E. Fernandez-Puquio, Edgar R. Carrazco-Ordoñez, Ruddy A. Ore-Valeriano, Rodolfo J. Chuchon-Remon, Elvis D. Ccosi-Mamani, Katherin H. Choquehuanca-Murillo, 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	13
2.1. Sistemas de interpretación del análisis de suelos	13
2.1.1. Índice de saturación de bases catiónicas	13
2.1.2. Sistema de suficiencia de nutrientes	16
2.1.3. El pH del suelo: modulador de la solubilidad de nutrientes	23
2.2. Análisis geoestadístico de las propiedades del suelo	25
3. Muestreo y análisis de suelos en la EEA Illpa	27
3.1. Ubicación	27
3.2. Muestreo estratificado del suelo	28
3.2.1. Determinación de los puntos de muestreo	29
3.2.2. Muestreo de suelos en los puntos identificados	30
3.3. Análisis de suelos	31
3.4. Resultados de los análisis de suelos	32
3.5. Geoestadística: metodología para el mapeo de las propiedades del suelo	34
3.6. Análisis de autocorrelación espacial: cómputo del índice de Moran	35
3.7. Interpolación <i>kriging</i> y validación cruzada con indicadores geoestadísticos	35
3.7.1. Generación y ajuste del variograma	35
3.7.2. Interpolación <i>kriging</i>	36
3.7.3. Validación cruzada	36
3.8. Resultados del análisis geoestadístico de las propiedades del suelo	37
3.9. Mapeo digital de las propiedades del suelo	39
4. Zonificación y recomendaciones de manejo de la fertilidad del suelo en la EEA Illpa	41
4.1. Manejo según las propiedades físicas del suelo	41
4.1.1. Textura y estructura	41
4.1.2. Materia orgánica	45
4.2. Manejo según la fertilidad química	47
4.2.1. Reactividad del suelo: pH	47
4.2.2. Macronutrientes	49
4.2.3. Salinidad y conductividad eléctrica	54
4.3. Manejo según balance catiónico	57
4.3.1. Capacidad de intercambio catiónico (CIC)	57
4.3.2. Balance calcio-magnesio	60
4.3.3. Potasio: concentración, disponibilidad y saturación	66
4.3.4. El sodio y el riesgo de sodificación	70
5. Referencias bibliográficas	75



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 CUI 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 en la región de Puno constituye uno de los principales factores que condicionan la productividad agrícola. Esta heterogeneidad influye directamente en el rendimiento de los cultivos, la eficiencia en el uso de fertilizantes y la sostenibilidad de los sistemas de producción. En este contexto, la aplicación de herramientas geoestadísticas y de Sistemas de Información Geográfica (SIG) permite caracterizar y modelar la distribución espacial de las propiedades edáficas, facilitando la implementación de estrategias de manejo sitio-específico propias de la agricultura de precisión. Bajo este enfoque, la Estación Experimental Agraria Illpa (EEA Illpa), situada en el departamento de Puno, representa un entorno estratégico para el desarrollo de investigaciones orientadas a la gestión eficiente de la fertilidad del suelo y su proyección como referente técnico-científico para futuros estudios en la región.

El presente documento, “Variación espacial de la fertilidad del suelo en la EEA Illpa”, integra el muestreo, análisis e interpretación de la distribución espacial de las propiedades del suelo. Asimismo, explica de forma clara la metodología de análisis geoespacial, la cual puede ser replicada y aplicada en otros sistemas agrícolas. También, proporciona un diagnóstico preciso del estado del suelo, para facilitar la toma de decisiones sobre la fertilización, el manejo del cultivo y el uso del terreno, favoreciendo una producción más eficiente y sostenible.

M. Sc. Jorge Ganoza Roncal

Presidente Ejecutivo

Instituto Nacional de Innovación Agraria



1. Introducción

El Altiplano constituye una amplia meseta altoandina situada entre 3800 y 4200 m s. n. m., que se extiende desde la vertiente oriental de la Cordillera Occidental hasta las estribaciones de la Cordillera Oriental, incluyendo la cuenca del Lago Titicaca. Presenta un relieve predominantemente plano a ligeramente ondulado, con extensas pampas parcialmente disectadas por valles y modeladas por procesos fluviales. En los sectores próximos al lago se observan terrazas lacustres que evidencian antiguos niveles más elevados, mientras que el drenaje superficial converge principalmente hacia el Lago Titicaca (Oficina Nacional de Evaluación de Recursos Naturales [ONERN] y Corporación de Desarrollo y Promoción Social y Económica del Departamento de Puno [CORPUNO], 1965b).

Desde el punto de vista edafológico, los suelos se desarrollan sobre materiales parentales de diversa génesis, identificándose cinco grupos principales según su origen: lacustres, aluviales recientes, aluviales subrecientes, coluvio-aluviales y residuales. Esta clasificación refleja la influencia combinada de procesos sedimentarios y geomorfológicos asociados a la dinámica del antiguo sistema lacustre altiplánico, que ha condicionado tanto las propiedades físicas y químicas del suelo como su aptitud para el uso agrícola y ganadero (ONERN y CORPUNO, 1965a).

En las últimas décadas, la región altoandina ha experimentado transformaciones sustanciales en el uso y cobertura del suelo, ocasionando una progresiva fragmentación del paisaje. La expansión de la agricultura convencional constituye uno de los principales impulsores de este proceso, con consecuencias asociadas a la degradación del suelo y la pérdida de hábitats naturales (Condori-Castillo, 2012). En el distrito de Cabana, provincia de San Román, departamento de Puno, se ha registrado una reducción aproximada del 17 % de asociaciones vegetales naturales, mientras que el área agrícola se incrementó en 38,6 %, ocupando superficies previamente cubiertas por vegetación natural. Asimismo, se reportó una disminución significativa de humedales (83 %) y un incremento de áreas urbanas y zonas degradadas (Loza, 2021). Estos cambios representan riesgos ambientales relevantes, considerando la alta vulnerabilidad ecológica de los ecosistemas altoandinos frente al cambio climático y la mayor frecuencia de eventos extremos.

Además, los suelos ubicados a gran altitud están expuestos a condiciones climáticas extremas, como alta variabilidad térmica, frecuentes heladas y regímenes irregulares de precipitación, factores que influyen significativamente en las propiedades fisicoquímicas del suelo (Charan et al., 2013). Estas condiciones generan una marcada heterogeneidad en los suelos andinos. Por ejemplo, nutrientes como el nitrógeno y el azufre suelen encontrarse en formas limitadas para la productividad agrícola debido a las bajas tasas de mineralización de la materia orgánica. Asimismo, en la mayoría de los suelos andinos se observa una disponibilidad restringida de fósforo, mientras que las deficiencias de potasio son relativamente poco frecuentes (Benzing, 2001).

El anexo o Centro Experimental Illpa de la EEA Illpa, ubicado en la zona circunlacustre del lago Titicaca, se desarrolla sobre depósitos aluviales y lacustres de edad cuaternaria, característicos del altiplano peruano. Estos materiales han dado lugar a un paisaje predominantemente plano, con pendientes suaves, que favorece el desarrollo de actividades agropecuarias. Actualmente, el uso del suelo se orienta principalmente a cultivos temporales y perennes, así como a pastizales naturales de manejo extensivo y cultivos andinos tradicionales (Sardon et al., 2024).

Los suelos del anexo Illpa presentan variabilidad en el contenido de bases cambiables, con valores de pH que oscilan entre ligeramente ácidos y neutros, reflejando procesos de lixiviación iónica asociados al régimen hídrico estacional característico del altiplano. Asimismo, se evidencia una incipiente acumulación

de sales en horizontes subsuperficiales, lo que sugiere limitada movilidad vertical de solutos y posibles fluctuaciones del nivel freático durante periodos húmedos. El contenido de materia orgánica se clasifica entre bajo y medio. En cuanto a la condición física, los terrenos con praderas naturales presentan altos valores de resistencia a la penetración ($PSI > 300$), lo que constituye una limitación para el desarrollo radicular y la infiltración del agua. En contraste, los terrenos cultivables muestran valores medios a bajos ($PSI < 300$), más favorables para el crecimiento de los cultivos y la aireación del suelo (Moya, 2024). Analizar estas variaciones resulta importante para identificar zonas con potencial productivo diferenciado y mejorar en el uso de insumos agrícolas (Reza et al., 2017).

En este contexto, el presente documento técnico tiene como objetivo caracterizar y cartografiar la variabilidad espacial de la fertilidad del suelo en la EEA Illpa, con el fin de identificar zonas homogéneas de manejo y orientar intervenciones específicas que contribuyan a reducir pérdidas por lixiviación y salinización, optimizar el uso de fertilizantes y fortalecer la resiliencia del sistema productivo bajo condiciones altoandinas.





2. Principios fundamentales del análisis de suelos

2.1. Sistemas de interpretación del análisis de suelos

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

2.1.1. Índice de saturación de bases catiónicas

a. Concepto

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

b. Origen y aplicabilidad del concepto

El concepto de BCSR tuvo su origen en las investigaciones de William Albrecht en la década de 1930, quien estudió la relación entre la proporción de cationes básicos intercambiables en la capacidad de intercambio catiónico (CIC) del suelo y la productividad de los cultivos (Culman et al., 2021). Albrecht, basado en estudios realizados en suelos agrícolas de Misuri, propuso que un balance adecuado entre calcio (Ca^{2+}), magnesio (Mg^{2+}) y potasio (K^+) mejora la estructura del suelo, la disponibilidad de nutrientes y el desarrollo radicular de las plantas (Chaganti y Culman, 2017). La hipótesis plantea que las desviaciones respecto a las proporciones óptimas de los cationes en la solución del suelo pueden limitar la absorción de nutrientes por parte de los cultivos. Esto se debe a que los desequilibrios iónicos afectan los mecanismos que regulan la reactividad y disponibilidad de los nutrientes. Estos mecanismos se ilustran en la Figura 1. Asimismo, se considera que solo una pequeña fracción de los nutrientes requeridos por las plantas se encuentra en la solución del suelo o en formas fácilmente disponibles. En este esquema, cada uno de estos mecanismos actúa como un reservorio iónico (Quispe-Matos et al., 2025).

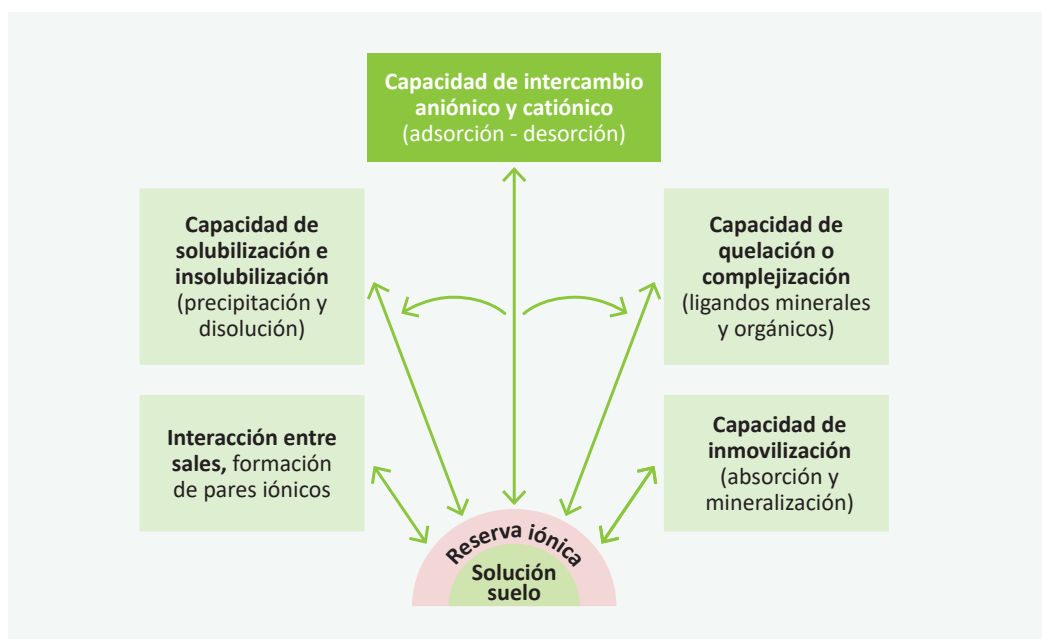


Figura 1. Mecanismos que mantienen en equilibrio los iones en la solución suelo (adaptado de McLean, 1977)

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

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

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

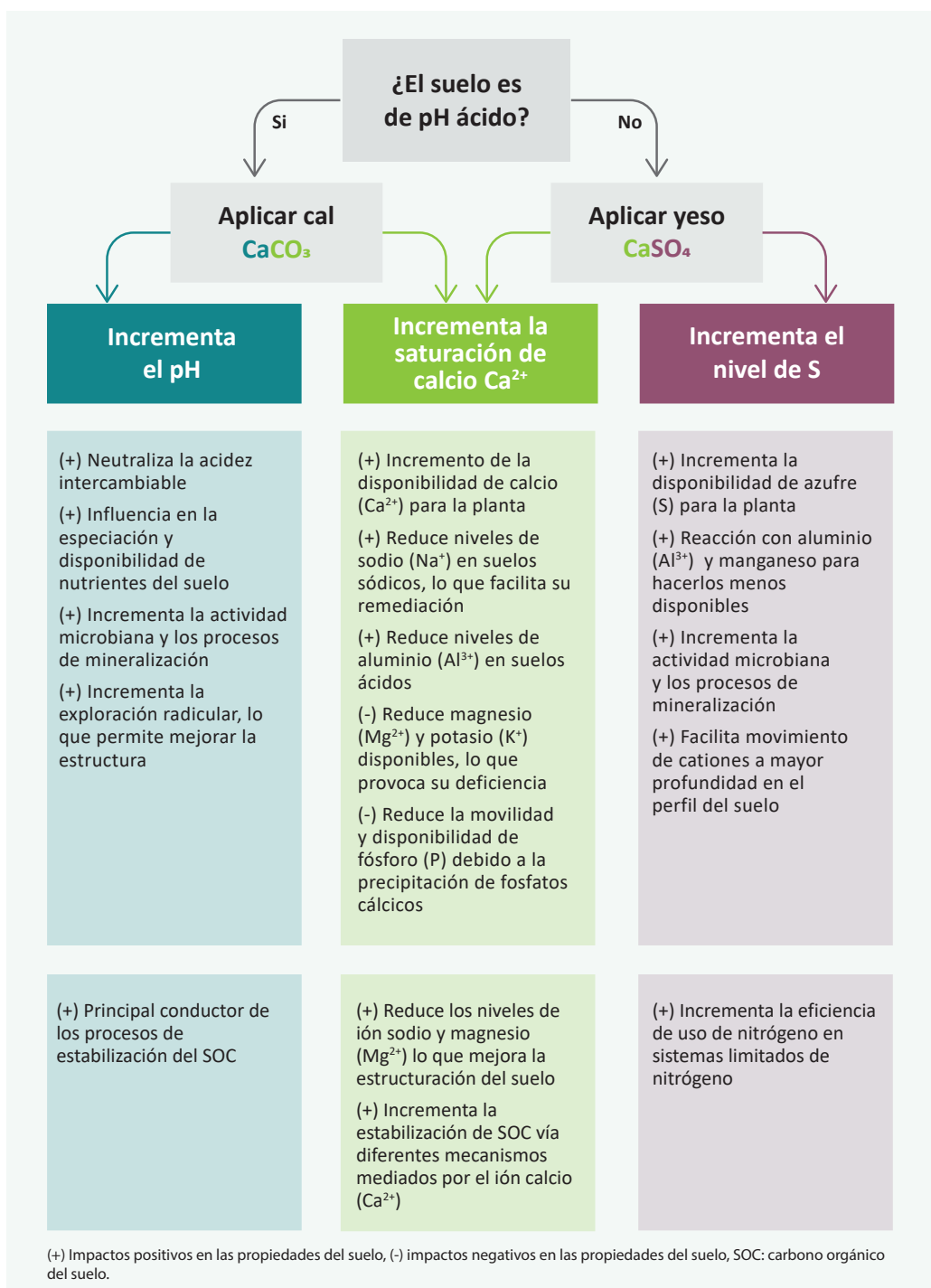


Figura 2. Criterios de uso de la cal y el yeso, y su respuesta en la relación de saturación de cationes básicos (adaptado de Culman et al., 2021)

2.1.2. Sistema de suficiencia de nutrientes

a. Concepto

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

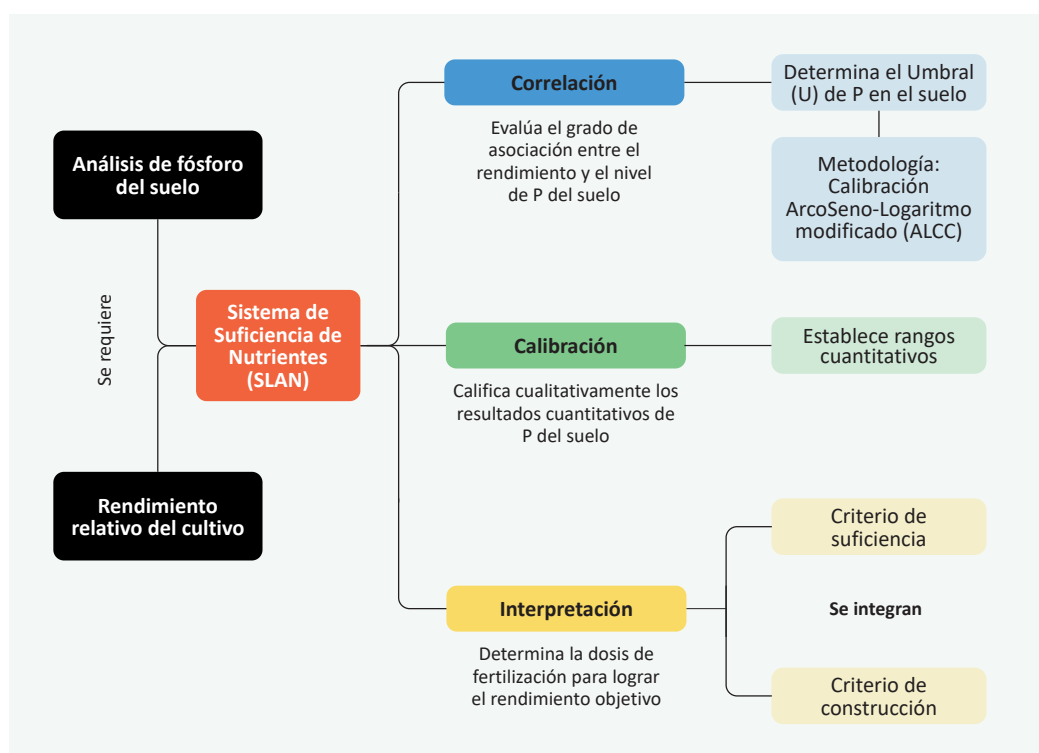


Figura 3. Esquema modelo para la implementación del sistema de suficiencia de nutrientes para el fósforo del suelo

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

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

b. Aplicación del criterio de suficiencia

El criterio de suficiencia se aplica cuando el análisis de suelos indica que el nutriente se encuentra en un nivel igual o superior al umbral crítico establecido mediante estudios de correlación y calibración. En estas condiciones, la fertilización se orienta únicamente a reponer la cantidad de nutriente extraída por el cultivo, dado que el suelo posee una disponibilidad adecuada para no limitar el rendimiento (García y Ciampitti, 2010).

Este enfoque se fundamenta en la relación entre el rendimiento relativo (RR) y el nivel del nutriente disponible en el suelo, derivada de ensayos experimentales de respuesta. El rendimiento relativo se calcula utilizando la Formula 1:

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

El valor de RR no se calcula directamente a partir del análisis químico del suelo, sino que se obtiene a partir de curvas de calibración que relacionan el contenido del nutriente disponible con la respuesta del cultivo. Estas curvas permiten identificar el umbral crítico, es decir, el nivel del nutriente en el suelo a partir del cual el rendimiento alcanza aproximadamente el 90-95 % del rendimiento potencial. Este principio se sustenta en la Ley del Mínimo de Liebig, según la cual el crecimiento del cultivo está limitado por el nutriente presente en menor proporción relativa (Bray, 1958).

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

Ejemplo práctico:

Se realizó un análisis de suelo en un cultivo de quinua y se obtuvo un contenido de 51,22 mg de P por kg de suelo utilizando el método de Olsen (P-Olsen).

Para este cultivo el umbral crítico, determinado mediante estudios de correlación y calibración, es de 20 mg de P-Olsen por kg de suelo. El rendimiento potencial bajo las condiciones agroecológicas del sitio es de 4 t ha⁻¹.

Según la curva de calibración suelo–respuesta desarrollada para quinua en condiciones similares, niveles de P-Olsen iguales o superiores a 20 mg kg⁻¹ permiten alcanzar un rendimiento relativo de 95 %.

Dado que el valor obtenido de P (51,22 mg kg⁻¹) es superior al umbral crítico, el rendimiento esperado se aproxima al potencial.

Primer paso: calcular el rendimiento alcanzado con 51,22 mg de P-Olsen por kg de suelo utilizando la Fórmula 2:

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

$$\text{Rendimiento alcanzado} = \frac{95 \times 4 \text{ t ha}^{-1}}{100} = 3,8 \text{ t ha}^{-1}$$

Este resultado indica que el nivel actual de P (51,22 mg kg⁻¹) es superior al umbral crítico (20 mg kg⁻¹), lo cual permite alcanzar un rendimiento de 3,8 t ha⁻¹, equivalente al 95 % del potencial productivo.

Segundo paso: calcular la biomasa total utilizando la Fórmula 3. Para este cálculo se considera que el índice de cosecha validado para condiciones andinas es de 42 %.

$$\text{Biomasa total} = \frac{\text{Rendimiento alcanzado}}{\text{índice de cosecha}} \quad \dots(3)$$

$$\text{Biomasa total} = \frac{3,8 \text{ t ha}^{-1}}{0,42} = 9,05 \text{ t ha}^{-1}$$

El cultivo genera una biomasa total de 9,05 t ha⁻¹, conformado por los granos y la biomasa residual de raíz, tallos y hojas, la cual debe ser considerada en el balance nutricional.

Tercer paso: calcular el requerimiento de P utilizando la Fórmula 4. Para este cálculo y con fines prácticos se considera una extracción de 2,2 kg de fósforo por tonelada de producción.

$$\text{Requerimiento de P} = \text{Extracción de P} \times \text{Biomasa total} \quad \dots(4)$$

$$\text{Requerimiento de P} = 2,20 \text{ kg de P t}^{-1} \times 9,05 \text{ t ha}^{-1} = 19,91 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

Como resultado se obtiene que el requerimiento de P es de 19,91 kg ha⁻¹, equivalente a 45,59 kg de P₂O₅ ha⁻¹, necesario para sostener un rendimiento cercano al potencial (4 t ha⁻¹) y mantener el equilibrio nutricional del sistema. Con esta fertilización no se busca incrementar el contenido de P en el suelo, sino únicamente reponer la cantidad extraída por el cultivo.

c. Aplicación de los criterios de mantenimiento y construcción

El criterio de mantenimiento se aplica cuando el análisis de suelo indica un contenido medio-bajo de nutrientes (por debajo del umbral crítico, pero no en nivel extremo). Además de reponer la cantidad de nutriente extraído por el cultivo, se realiza el ajuste por eficiencia de uso para compensar las pérdidas por fijación, adsorción e inmovilización (Buresh et al., 1997).

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

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

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

A continuación, se presentan ejemplos prácticos en el cultivo de quinua 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 quinua, y se obtuvo 10 mg de P 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 4 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 40 %.

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

$$\text{Rendimiento alcanzado} = \frac{40 \times 4 \text{ t ha}^{-1}}{100} = 1,60 \text{ t ha}^{-1}$$

Segundo paso: calcular la biomasa total utilizando la Fórmula 3. Para este cálculo se considera que el índice de cosecha validado para condiciones andinas es de 42 %.

$$\text{Rendimiento alcanzado} = \frac{1,60 \text{ t ha}^{-1}}{0,42} = 3,81 \text{ t ha}^{-1}$$

El cultivo genera una biomasa total de 3,81 t ha⁻¹, conformado por los granos y la biomasa residual de raíz, tallos y hojas, la cual debe ser considerada en el balance nutricional.

Tercer paso: calcular el requerimiento de P utilizando la Fórmula 4. Para este cálculo y con fines prácticos se considera una extracción de 2,20 kg de fósforo por tonelada de producción.

$$\text{Requerimiento de P} = 2,20 \text{ kg de P t}^{-1} \times 3,81 \text{ t ha}^{-1} = 8,38 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

Cuarto paso: finalmente, determinar el requerimiento de mantenimiento (RM), haciendo uso de la Fórmula 5. 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 %.

$$\text{RM de P} = \frac{\text{Requerimiento de P}}{\text{Eficiencia de uso del P}} \quad \dots(5)$$

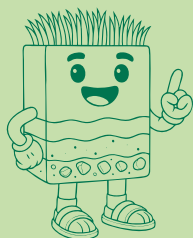
$$\text{RM de P} = \frac{8,38 \text{ kg de P ha}^{-1}}{0,20} = 41,90 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

Se obtiene que el requerimiento de mantenimiento de P es de 41,9 kg de P ha⁻¹, equivalente a 95,95 kg de P₂O₅ ha⁻¹, para mantener el nivel actual de fertilidad (10 mg kg⁻¹) y sostener un rendimiento de 1,6 t ha⁻¹.

Ejemplo práctico (criterio de mantenimiento y construcción)

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

Para este cultivo, el umbral crítico o nivel de suficiencia es de 20 mg de P-Olsen por kg de suelo y el rendimiento potencial es de 4 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.

$$\text{Rendimiento alcanzado} = \frac{30 \times 4 \text{ t ha}^{-1}}{100} = 1,20 \text{ t ha}^{-1}$$

Segundo paso: calcular la biomasa total utilizando la Fórmula 3. Para este cálculo se considera que el índice de cosecha validado para condiciones andinas es de 42 %.

$$\text{Biomasa total} = \frac{1,20 \text{ t ha}^{-1}}{0,42} = 2,86 \text{ t ha}^{-1}$$

El cultivo genera una biomasa total de 2,86 t ha⁻¹, conformado por los granos y la biomasa residual de raíz, tallos y hojas, la cual debe ser considerada en el balance nutricional.

Tercer paso: calcular el requerimiento de P utilizando la Fórmula 4. Para este cálculo y con fines prácticos se considera una extracción de 2,20 kg de fósforo por tonelada de producción.

$$\text{Requerimiento de P} = 2,20 \text{ kg de P t}^{-1} \times 2,86 \text{ t ha}^{-1} = 6,29 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

Cuarto paso: determinar el requerimiento de mantenimiento (RM), haciendo uso de la Fórmula 5. 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 %.

$$\text{RM de P} = \frac{6,29 \text{ kg de P ha}^{-1}}{0,20} = 31,45 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

Quinto paso: calcular el requerimiento de construcción anual (RC) usando la Fórmula 6. Para este cálculo y con fines prácticos se considera que es necesario fertilizar con 10 kg de P por hectárea para incrementar 1 ppm (mg kg^{-1}) de P-Olsen en los primeros 20 cm de suelo (este valor puede variar según densidad aparente, textura y capacidad tampón 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 2,0 mg de P por kg de suelo.

$$\text{RC} = \text{IAR} \times \text{NCF} \quad \dots(6)$$

$$\text{RC} = 2,0 \text{ mg de P kg}^{-1} \times \frac{10 \text{ kg de P ha}^{-1}}{1 \text{ mg de P kg}^{-1}} = 20,0 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

Entonces, el plan de fertilización para el primer año se estima mediante la Fórmula 7.

$$\text{Dosis de fertilización de P} = \text{RM} + \text{RC} \quad \dots(7)$$

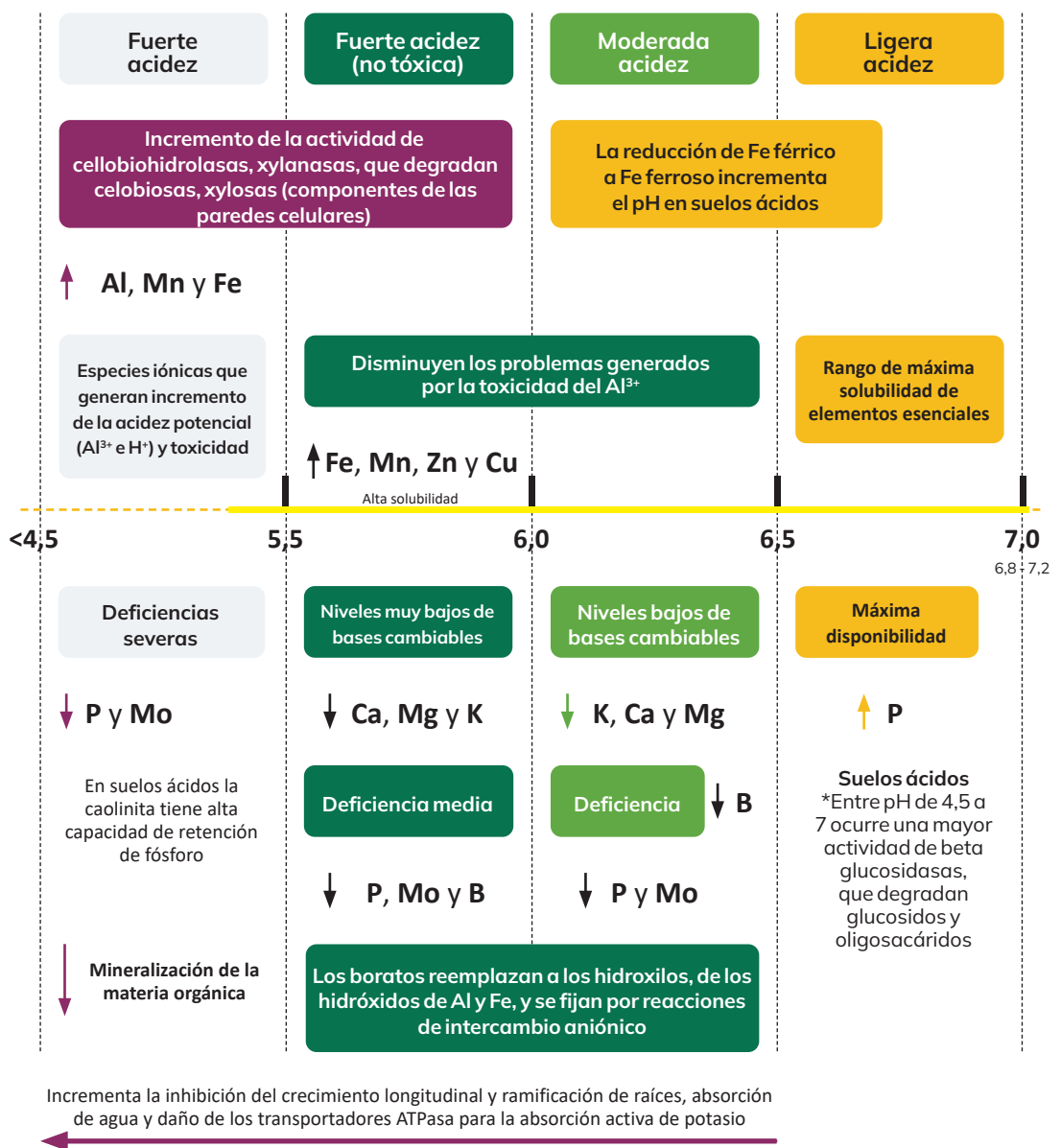
$$\text{Dosis de fertilización de P} = 31,45 \text{ kg de P ha}^{-1} + 20,0 \text{ kg de P ha}^{-1} = 51,45 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

De esta manera, el requerimiento de mantenimiento y construcción de fósforo en el cultivo de quinua es 51,45 kg de P por hectárea, equivalente a 117,82 kg de P_2O_5 ha^{-1} .

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

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

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



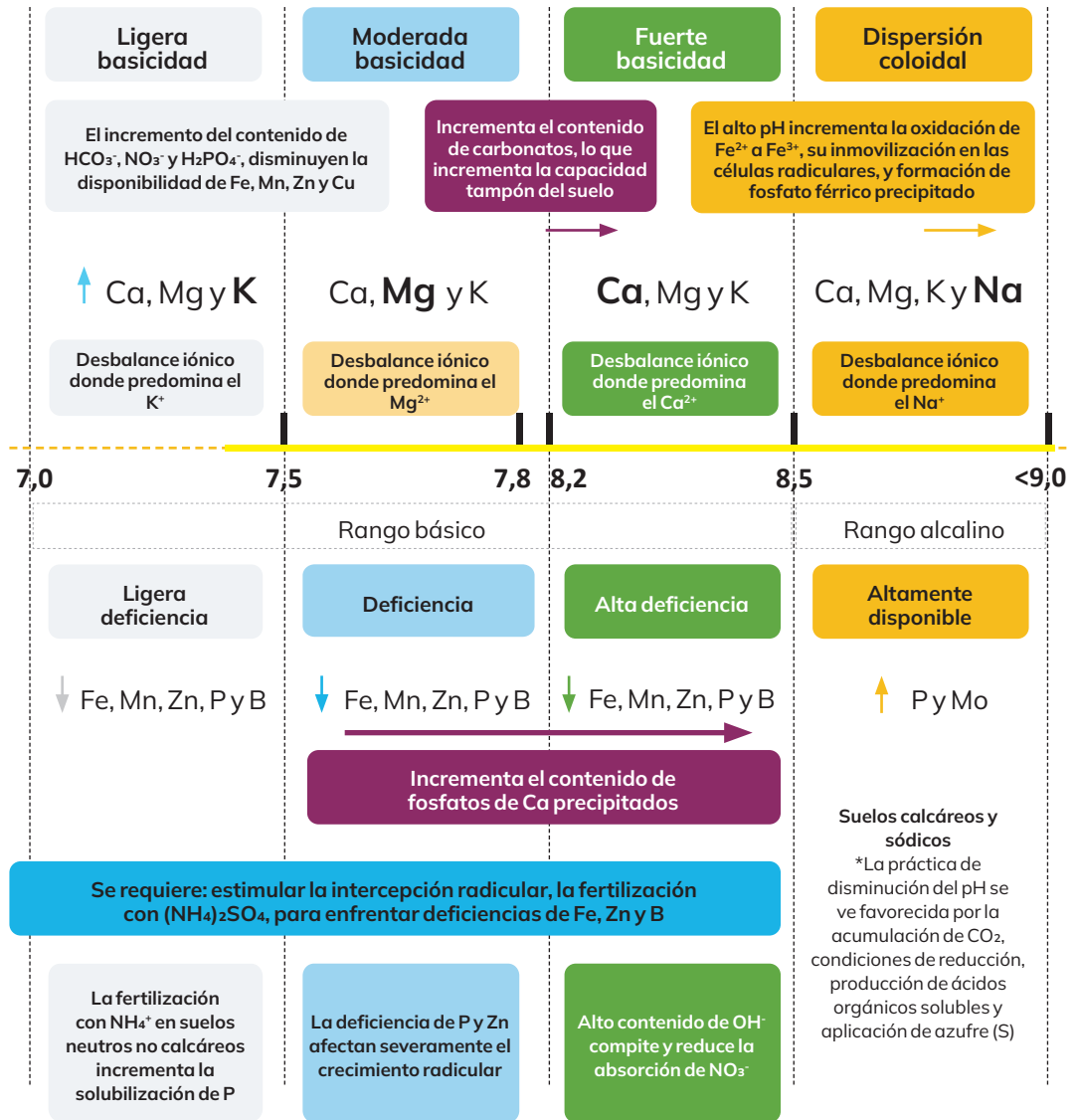


Figura 4. Diagnóstico de la fertilidad del suelo en función al pH

2.2. Análisis geoestadístico de las propiedades del suelo

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

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



3. Muestreo y análisis de suelos en la EEA Illpa

3.1. Ubicación

El muestreo se realizó específicamente en el Centro Experimental Illpa (CE Illpa), perteneciente a la EEA Illpa, ubicado en el distrito de Paucarcolla, provincia de Puno, departamento de Puno (Figura 5), con una extensión total de 400 ha. El área se sitúa a 3827 m s. n. m. con precipitaciones promedio anuales de hasta 638,77 mm y temperaturas medias anuales de 8,05 °C, y se localiza entre las coordenadas 15°41'14,12" latitud sur y 70°4'47,55" longitud oeste (SENAMHI,, 2025). Además, presenta suelos clasificados como Mollisol e Inceptisol, según el sistema Soil Taxonomy, desarrollados a partir de depósitos aluviales con pendiente de 0-2 % (Moya Sucari, 2024).

En la EEA Illpa se realizan trabajos de investigación, valoración, conservación, producción de material genético de plantas y animales, además de brindar asistencias técnicas y otros servicios a los agricultores de la región Puno. Los cultivos priorizados para estas actividades son: cañihua (*Chenopodium pallidicaule* Aellen), quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) y papa (*Solanum tuberosum* L.) (Cruz-Luis et al., 2025).

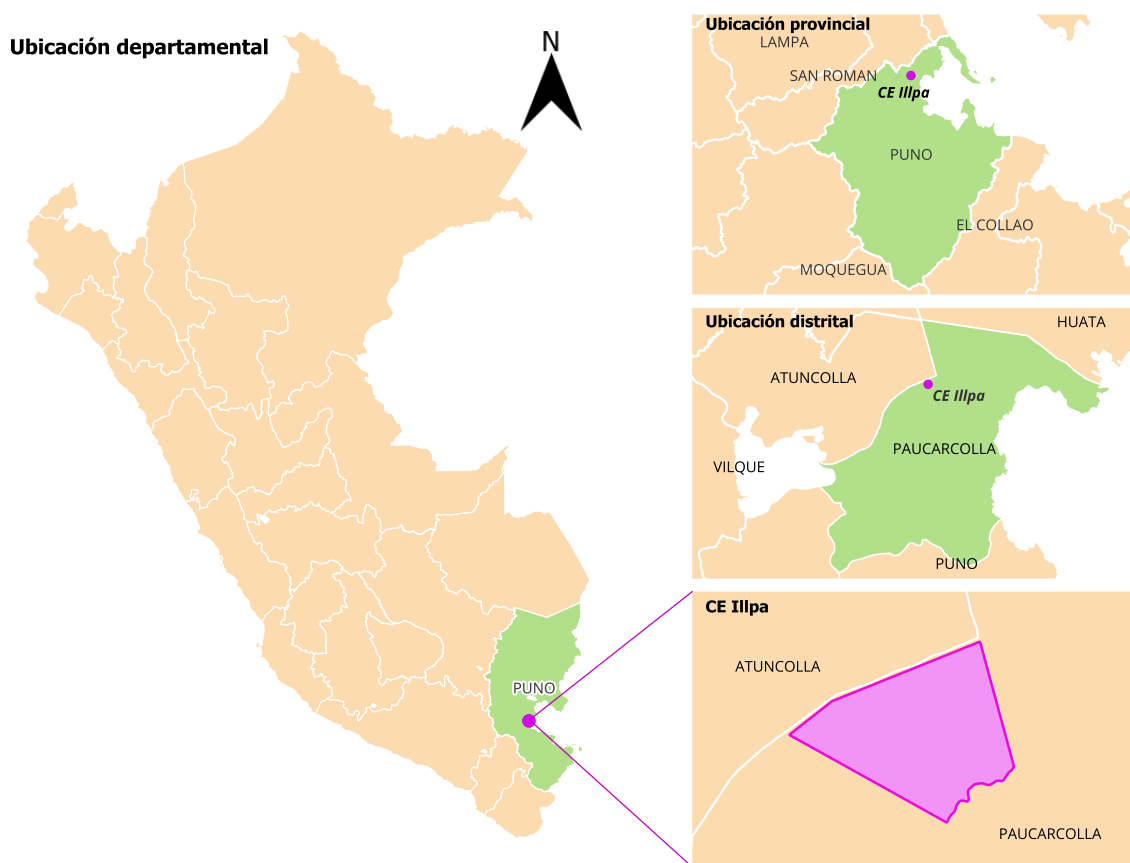


Figura 5. Ubicación del Centro Experimental Illpa

3.2. Muestreo estratificado del suelo

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

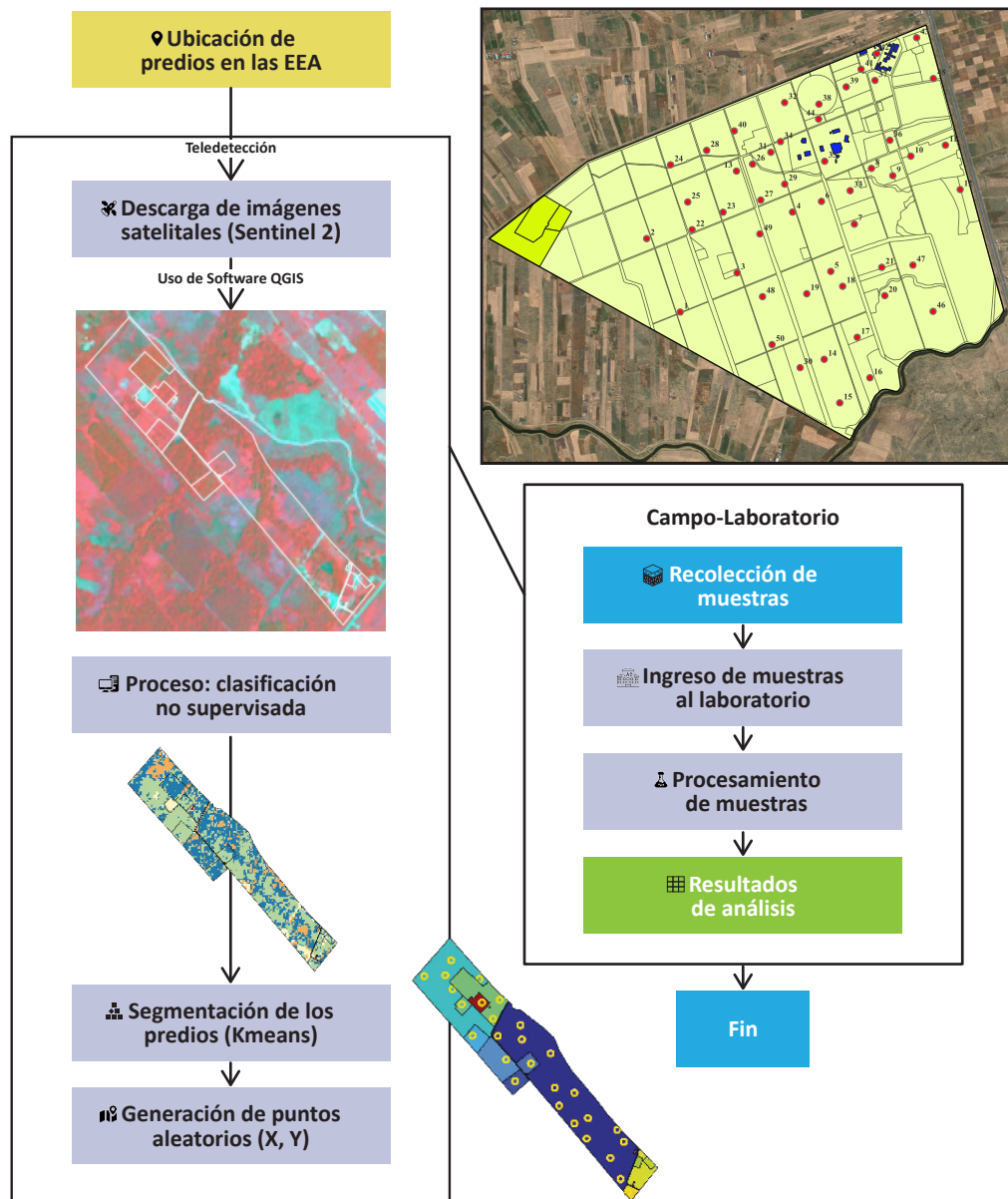


Figura 6. Flujo de trabajo para la determinación de los puntos de muestreo

3.2.1. Determinación de los puntos de muestreo

El primer paso para la determinación de los puntos de muestreo fue la descarga de las imágenes satelitales del servidor de Sentinel-2 para identificar las clases de cobertura, utilizando el algoritmo de clasificación no supervisada *K-means*. Luego, se usó el software R (R Core Team, 2018) para determinar los puntos de muestreo utilizando la función *spsample* del paquete *sp* (Pebesma y Bivand, 2005) (Figura 6). El *script* R generó las coordenadas de los puntos de muestreo según cada clase determinada, mediante el método de muestreo estratificado. Se identificaron en total 50 puntos de muestreo de suelos, como se observa en la Figura 7.

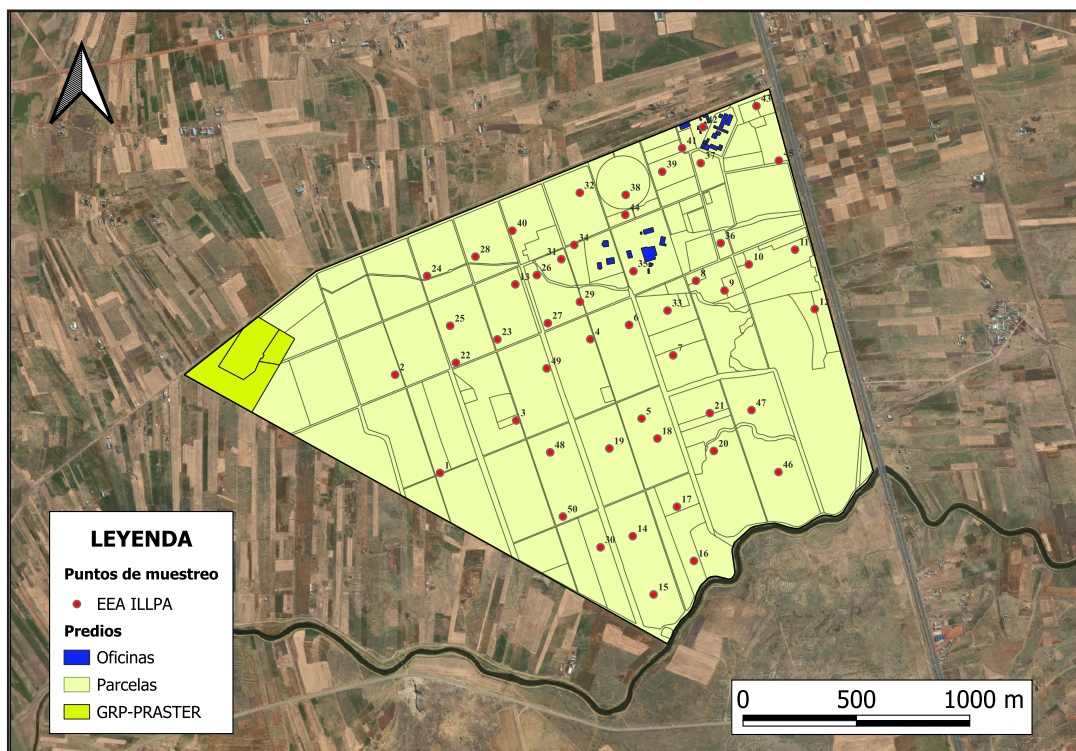


Figura 7. Puntos de muestreo de suelos en el Centro Experimental Illpa

3.2.2. Muestreo de suelos en los puntos identificados

Una vez identificadas las coordenadas de los 50 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 suelos, 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 de suelos, estas deben ser llevadas a un laboratorio de análisis de suelos, preferentemente que cuente con métodos acreditados. En este trabajo, las muestras fueron llevadas al Laboratorio de Suelos, Aguas y Foliare de la EEA Illpa, para su posterior 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	Referencia
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 Olsen	SEMARNAT (2002)
K disponible	Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000	SEMARNAT (2002)
Bases intercambiables	Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000. Extracción con acetato de amonio	SEMARNAT (2002)

3.4. Resultados de los análisis de suelos

Los resultados del análisis de suelos del Centro Experimental Illpa muestran que, en promedio, los suelos presentan una textura franco-limosa (25,15 % arena, 61,57 % limo y 13,27 % arcilla), con variabilidad baja a moderada en arena y limo (coeficiente de variación [CV] entre 19,6 y 28,1 %) y variabilidad media en arcilla (CV = 62,7 %). La distribución del limo es relativamente simétrica y sesgada hacia valores negativos (*Skewness* = -0,81), mientras que la arena y arcilla muestra una clara asimetría hacia valores positivos. Esta condición textural ofrece buena retención de humedad y nutrientes, sin embargo, es susceptible a compactación y erosión si no se maneja adecuadamente.

El pH es cercano a la neutralidad ($6,65 \pm 0,70$, CV = 10,6 %), con valores extremos que alcanzan hasta 8,10 y una leve asimetría positiva (*Skewness* = 0,40), indicando que las muestras son relativamente homogéneas en la mayoría de los sectores. En general, el suelo mantiene condiciones químicas adecuadas para la disponibilidad de la mayoría de los nutrientes.

La conductividad eléctrica promedio ($1,75 \pm 2,36$ dS m⁻¹, CV = 134,4 %) corresponde a suelos muy ligeramente salinos, por lo que este nivel no representa una limitante por estrés osmótico para la mayoría de los cultivos andinos, incluida la quinua (umbral de tolerancia: 8-10 dS m⁻¹). Sin embargo, el coeficiente de variación extremadamente alto (CV = 134,4 %) sugiere una heterogeneidad significativa en la distribución espacial de sales solubles, posiblemente asociada a microdepresiones con acumulación puntual o a la variabilidad en el muestreo. En condiciones actuales no se justifican prácticas correctivas como lavado de suelos o aplicación de enmiendas con yeso, las cuales están reservadas para suelos con CE > 4 dS m⁻¹.

El contenido promedio de materia orgánica ($2,09 \pm 0,70$, CV = 33,2 %) corresponde a un nivel medio según criterios de interpretación para suelos altoandinos. El elevado CV indica una alta variabilidad espacial, sugiriendo heterogeneidad en la distribución de la materia orgánica dentro del área evaluada. Esta variabilidad puede estar asociada a diferencias en el manejo de residuos orgánicos, intensidad de laboreo, procesos de erosión diferencial o redistribución de la fracción limo del suelo.

En el complejo de intercambio catiónico, el calcio intercambiable promedio ($15,48 \pm 5,35$ cmol kg⁻¹, CV = 34,5 %) corresponde a niveles altos para suelos franco-limosos altoandinos. Estos contenidos favorecen la estabilidad estructural. No obstante, el CV elevado indica variabilidad espacial importante, lo que sugiere diferencias en el material parental, redistribución de carbonatos o manejo diferencial del suelo.

El contenido promedio de magnesio intercambiable ($5,39 \pm 1,48$ cmol kg⁻¹, CV = 27,4 %) es moderado a alto, contribuyendo al equilibrio catiónico y al adecuado funcionamiento fisiológico del cultivo.

El sodio intercambiable ($0,77 \pm 0,37$ cmol kg⁻¹, CV = 48 %) presentó una moderada a alta heterogeneidad espacial. A pesar de esto, el porcentaje de sodio intercambiable (ESP-Na) promedio es de 3,91 %, valor muy por debajo del umbral crítico de 6-15 %, por lo que no existe riesgo de sodicidad ni de dispersión de arcillas en el área evaluada.

El potasio intercambiable registró un promedio ($1,59 \pm 0,66$ cmol kg⁻¹, CV = 41 %) medio a alto, según los criterios regionales para suelos andinos, lo cual es favorable. Por otro lado, el CV elevado sugiere monitorear la distribución del nutriente para ajustar la fertilización según el rendimiento objetivo.

Respecto a los nutrientes disponibles, el fósforo ($51,22 \pm 53,89 \text{ mg kg}^{-1}$, CV = 105,2 %) presenta variabilidad muy alta y una asimetría positiva fuertemente sesgada (*Skewness* = 4,66), con presencia de sectores enriquecidos por aplicaciones puntuales. El potasio disponible es extremadamente alto ($624,82 \text{ mg kg}^{-1}$), superando ampliamente los niveles considerados adecuados para la mayoría de los cultivos, y el CV (40,9 %) indica una variabilidad de media a alta en el muestreo, sugiriendo diferencias importantes en la distribución del potasio.

Los suelos del Centro Experimental Illpa presentan textura franco-limoso, con pH ligeramente ácido a cercano a la neutralidad y salinidad ligera a moderada. La materia orgánica se encuentra en niveles bajos a medios y muestra alta variabilidad espacial. En el complejo de intercambio catiónico predominan contenidos altos de calcio y niveles moderados de magnesio y potasio. La variabilidad significativa de varios nutrientes sugiere la necesidad de un manejo diferenciado, priorizando incorporación de materia orgánica, monitoreo de salinidad y fertilización basada en metas de rendimiento.

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

Variable	Unidad	Media	SD	CV	Mediana	Mínimo	Máximo	Skewness
Arena	%	25,15	7,06	0,28	23,85	12,9	43,6	0,46
Limo	%	61,57	12,05	0,2	64,95	34,2	80,5	-0,81
Arcilla	%	13,27	8,31	0,63	11,5	4,6	36,22	1,36
pH	Unidad	6,65	0,7	0,11	6,5	5,2	8,1	0,4
CEe	dS m ⁻¹	1,75	2,36	1,34	1	0,24	11,99	2,73
MO	%	2,09	0,7	0,33	2	1	4,2	0,92
N total	%	0,08	0,03	0,35	0,07	0,04	0,16	0,99
P disp.	mg kg ⁻¹	51,22	53,89	1,05	38,76	12,56	380,8	4,66
K disp.	mg kg ⁻¹	624,82	255,86	0,41	586,5	273,7	1642,2	1,79
Ca ²⁺	cmol kg ⁻¹	15,48	5,35	0,35	14,6	6,8	29,8	0,87
Mg ²⁺	cmol kg ⁻¹	5,39	1,48	0,27	5,25	2,5	8,6	0,46
K ⁺	cmol kg ⁻¹	1,59	0,66	0,41	1,55	0,7	4,2	1,8
Na ⁺	cmol kg ⁻¹	0,77	0,37	0,48	0,7	0,2	1,8	1,14
CICe	cmol kg ⁻¹	23,29	5,37	0,231	22,79	14,54	38,1	0,74
ECP-Ca	%	65,18	9,68	0,149	65,89	41,67	81,47	-0,4
EMP-Mg	%	27,48	7,54	0,274	26,79	12,76	43,88	0,46
EPP-K	%	8,11	3,35	0,413	7,91	3,57	21,43	1,8
ESP-Na	%	3,91	1,89	0,483	3,57	1,02	9,18	1,14

SD: desviación estándar, CV: coeficiente de variación, *Skewness*: coeficiente de asimetría, CEe: conductividad eléctrica en extracto de saturación, MO: materia orgánica, N total: nitrógeno total, P disp.: fósforo disponible, K disp.: potasio disponible, CICe: capacidad de intercambio catiónico efectiva, ECP-Ca: porcentaje de saturación de calcio, EMP-Mg: porcentaje de saturación de magnesio, EPP-K: porcentaje de saturación de potasio, ESP-Na: porcentaje de saturación de sodio.

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 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 de Mercator* (UTM), cuyas unidades son metros.

Procedimiento:

- a. **Preparación de los datos:** asegurar que los datos de entrada (formato CSV, *Shapefile* u otro) contengan las coordenadas (X, Y) y los valores de la variable de interés (ej. porcentaje de materia orgánica). Asimismo, verificar que no existan valores nulos o erróneos. Existe la opción de que el complemento detecte valores atípicos, los represente en una previsualización del ploteo de puntos y los elimine para el análisis. Esta herramienta es opcional.
- b. **Análisis exploratorio de los datos:** realizar un análisis exploratorio de los datos para obtener una visión general de las principales características del conjunto de datos. Para ello, calcular medidas de tendencia central, como la media y la mediana, y se 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 8) y el p-valor.

$$I = \sum_n \frac{1}{n} i \cdot j \quad \dots(8)$$

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 9).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [Z_1(X_i) - Z_2(X_i)]^2} \quad \dots(9)$$

Donde:

n: el número de muestras.

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

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

- b. **Coefficiente de determinación (R^2):** mide qué tan bien las predicciones del modelo explican la variabilidad de los datos (Fórmula 10). 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.

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

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.

3.8. Resultados del análisis geoestadístico de las propiedades del suelo

La modelación geoestadística realizada en el Centro Experimental Illpa evidenció una estructura espacial variable y, en general, de baja a moderada predictibilidad, con rangos de dependencia que oscilaron entre 228 y 1306 m (Tabla 3). Estos resultados indican que algunos atributos mantienen continuidad a escala de lote, mientras que otros presentan una variación dominante a distancias cortas. Los modelos ajustados fueron principalmente de tipo lineal (*linear*) y lineal al umbral (*linear to sill*), con un caso gaussiano (*gaussian*) para Mg^{2+} , lo que sugiere la presencia de gradientes progresivos más que patrones espaciales claramente definidos en parches.

Entre las propiedades químicas, los cationes intercambiables mostraron el comportamiento espacial más consistente. El sodio intercambiable ($R^2 = 0,36$; rango = 770 m) y el porcentaje de saturación de sodio ($R^2 = 0,37$) presentaron la mayor capacidad predictiva relativa, lo que sugiere que los procesos de acumulación y redistribución de sodio operan a escalas intermedias relativamente estables dentro del paisaje. El calcio intercambiable mostró una dependencia espacial moderada ($R^2 = 0,23$; rango = 547 m), coherente con su control por material parental y presencia de carbonatos; mientras que el magnesio intercambiable presentó una muy baja estructura espacial ($R^2 = 0,04$; rango = 229 m), indicando alta variabilidad local.

El pH ($R^2 = 0,09$; rango = 1306 m) y la conductividad eléctrica ($R^2 = 0,11$; rango = 1233 m) mostraron continuidad a gran escala, aunque con limitada capacidad predictiva, lo que evidencia gradientes regionales combinados con fuerte variabilidad microespacial asociada a acumulación irregular de sales y manejo histórico heterogéneo. La materia orgánica presentó dependencia espacial débil a moderada ($R^2 = 0,21$; rango = 757 m), reflejando influencia del manejo agrícola y redistribución superficial. En contraste, el fósforo disponible mostró prácticamente ausencia de estructura espacial definida ($R^2 = 0,01$; rango = 791 m), indicando heterogeneidad puntual y fuerte influencia de aplicaciones localizadas o procesos diferenciales de fijación. El potasio intercambiable ($R^2 = 0,14$; rango = 731 m) y el potasio disponible ($R^2 = 0,09$; rango = 881 m) evidenciaron también dependencia espacial débil.

Las fracciones texturales presentaron baja predictibilidad espacial, con valores de R^2 de 0,02 para arena, 0,07 para limo y 0,20 para arcilla, lo que sugiere que, aunque existe cierta continuidad textural, la variabilidad local domina el patrón espacial, probablemente asociada a procesos de erosión selectiva y redistribución coluvial.

En conjunto, los resultados muestran que las propiedades químicas presentan mayor continuidad espacial que las físicas; sin embargo, la capacidad predictiva global es limitada. Desde una perspectiva agronómica, esto implica que la zonificación puede ser relativamente más confiable para variables asociadas a sodicidad y bases intercambiables, mientras que nutrientes dinámicos como fósforo y potasio requieren mayor densidad de muestreo o enfoques multivariados para una gestión sitio-específica más precisa. Estos hallazgos confirman la necesidad de complementar la interpolación geoestadística univariada con información ambiental adicional y un diseño de muestreo optimizado para capturar la variabilidad microespacial dominante en sistemas altoandinos.

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

Variable	Modelo	Nugget (C ₀)	Sill (C ₀ +C)	Range (m)	Cross-validation	
					RMSE	R ²
Arena	<i>Linear to Sill</i>	33,07	47,59	378,69	7,84	0,02
Limo	<i>Linear to Sill</i>	103,25	159,84	664,75	11,78	0,07
Arcilla	<i>Linear to Sill</i>	17,87	52,49	591,65	6,43	0,20
pH	<i>Linear to Sill</i>	0,38	0,61	1306,60	0,68	0,09
CEe	<i>Linear to Sill</i>	0,94	3,09	1233,07	1,51	0,11
MO	<i>Linear</i>	0,29	0,38	756,73	0,56	0,21
N total	<i>Linear</i>	0,00	$1,4 \times 10^{-3}$	757,19	0,02	0,11
P disp.	<i>Linear</i>	526,62	684,39	790,88	27,74	0,01
K disp.	<i>Linear to Sill</i>	400,63	903,95	880,92	20,03	0,09
CICe	<i>Linear</i>	13,90	22,15	915,18	4,31	0,11
Ca ²⁺	<i>Linear</i>	14,70	18,90	546,58	4,06	0,23
Mg ²⁺	<i>Gaussian</i>	0,00	2,29	228,53	1,85	0,04
K ⁺	<i>Linear to Sill</i>	0,04	0,22	731,04	0,58	0,14
Na ⁺	<i>Linear</i>	0,04	0,09	770,63	0,25	0,36
ECP-Ca	<i>Linear to Sill</i>	63,01	100,26	644,40	8,97	0,42
EMP-Mg	<i>Linear to Sill</i>	51,19	60,14	512,30	8,17	0,02
ESP-Na	<i>Linear</i>	1,08	2,19	770,14	1,25	0,37
EPP-K	<i>Linear</i>	6,25	5,75	617,77	2,58	0,14

RMSE: raíz del error cuadrático medio, R²: coeficiente de determinación, CEe: conductividad eléctrica en extracto de saturación, MO: materia orgánica, N total: nitrógeno total, P disp.: fósforo disponible, K disp.: potasio disponible, CICe: capacidad de intercambio catiónico efectiva, ECP-Ca: porcentaje de saturación de calcio, EMP-Mg: porcentaje de saturación de magnesio, EPP-K: porcentaje de saturación de potasio, ESP-Na: porcentaje de saturación de sodio.

3.9. Mapeo digital de las propiedades del suelo

Los mapas generados para el Centro Experimental Illpa muestran una organización espacial heterogénea de las propiedades edáficas, con gradientes más consistentes en algunos componentes del complejo de intercambio catiónico y mayor variabilidad local en nutrientes disponibles y fracciones texturales. La zonificación resultante refleja tanto la influencia del material parental franco-limoso como los efectos acumulativos del manejo agrícola y los procesos de redistribución de sales en el paisaje.

Los patrones espaciales más definidos se observan en las variables asociadas a la sodicidad y a las bases intercambiables, particularmente sodio intercambiable, ESP y calcio. Estas variables permiten delimitar sectores con mayor influencia salina y diferenciación en la saturación de bases, constituyendo una base más confiable para establecer zonas de manejo diferenciado. En estos sectores, la planificación agronómica puede orientarse al monitoreo de salinidad, manejo del sodio y mantenimiento del equilibrio catiónico, especialmente en áreas con mayor riesgo de dispersión estructural.

El pH y la conductividad eléctrica presentan gradientes amplios a escala de fondo, lo que permite identificar tendencias generales de reacción del suelo y acumulación de sales. Sin embargo, su variabilidad local sugiere que las decisiones de manejo deben complementarse con verificación en campo, especialmente en zonas donde puedan generarse microambientes con distinta disponibilidad de nutrientes o condiciones de salinidad.

En contraste, nutrientes dinámicos como el fósforo y el potasio disponibles muestran patrones espaciales menos definidos, lo que limita la extrapolación directa para una fertilización sitio-específica basada únicamente en interpolación. En estos casos, los mapas deben interpretarse como herramientas orientativas y no prescriptivas, recomendándose ajustes basados en metas de rendimiento y validación local.

Las fracciones texturales evidencian predominio de suelos franco-limosos en la mayor parte del área, con variaciones graduales hacia sectores más finos o arenosos. Estas diferencias condicionan la retención de agua, la movilidad de nutrientes y la respuesta a la fertilización; pero su heterogeneidad local sugiere que la textura actúa más como factor modulador del manejo que como variable de zonificación primaria.

En conjunto, el mapeo digital confirma que la zonificación de la fertilidad en el Centro Experimental Illpa es técnicamente viable, aunque con mayor robustez en variables asociadas al complejo de intercambio catiónico que en nutrientes disponibles o textura superficial. La interpretación integrada de estos mapas permite orientar estrategias de manejo diferenciadas, priorizando control de salinidad, mantenimiento del equilibrio de bases e incorporación estratégica de materia orgánica, como paso hacia una gestión más eficiente y adaptada a la variabilidad espacial del suelo.



4. Zonificación y recomendaciones de manejo de la fertilidad del suelo en la EEA Illpa

4.1. Manejo según las propiedades físicas del suelo

4.1.1. Textura y estructura

a. Descripción de la variabilidad de la textura

Los suelos del Centro Experimental Illpa se han desarrollado sobre depósitos aluviales y lacustres del Altiplano, lo que define su comportamiento físico actual. El análisis de la variabilidad espacial, representado en los mapas de arena, limo y arcilla (Figuras 9, 10 y 11), confirma que la textura predominante es franco-limosa. Esto significa que la mayor parte del área está compuesta principalmente por partículas de limo (promedio 61,57 %), acompañadas de proporciones moderadas de arena (25,15 %) y contenidos bajos a moderados de arcilla (13,27 %).

Al observar los mapas, se identifica que el limo no se distribuye de manera uniforme; existen núcleos donde su concentración supera el 70 %, especialmente en zonas de acumulación sedimentaria, mientras que la arena muestra manchas dispersas sin un patrón regional definido. La arcilla, por su parte, presenta la mayor variabilidad relativa, con focos puntuales donde aumenta su contenido, lo cual es crucial porque incluso pequeños cambios en la cantidad de arcilla pueden modificar la capacidad del suelo para retener nutrientes y agua.

Es importante mencionar que, debido a la naturaleza heterogénea de estos depósitos lacustres, los modelos geoestadísticos indican una predictibilidad moderada para la textura. Esto implica que los mapas muestran tendencias generales muy útiles para la planificación, pero los límites entre zonas pueden ser difusos. Por ello, se recomienda usar esta información como una guía macroscópica y validar las decisiones de manejo con observaciones directas en el campo, como la sensación al tacto o pruebas de infiltración simples en cada lote.

b. Recomendaciones de manejo diferenciado

Para preservar la estructura y la productividad de estos suelos, se recomienda priorizar prácticas de labranza mínima o cero labranzas, evitando el volteo excesivo que degrada los agregados del suelo. Es fundamental incorporar sistemáticamente materia orgánica, como compost o residuos de cosecha, para mejorar la estabilidad estructural y reducir la susceptibilidad a la erosión y la compactación. En las zonas identificadas con mayor contenido de limo, se debe evitar el tránsito en condiciones de humedad y considerar el uso de coberturas vegetales o mulch para proteger la superficie. Por otro lado, en los sectores con mayor presencia de arena, conviene fraccionar el riego y la fertilización para evitar pérdidas de nutrientes. Finalmente, dado que los mapas muestran tendencias generales, se sugiere realizar calicatas de verificación en los lotes específicos para ajustar estas recomendaciones a la realidad local de cada parcela.

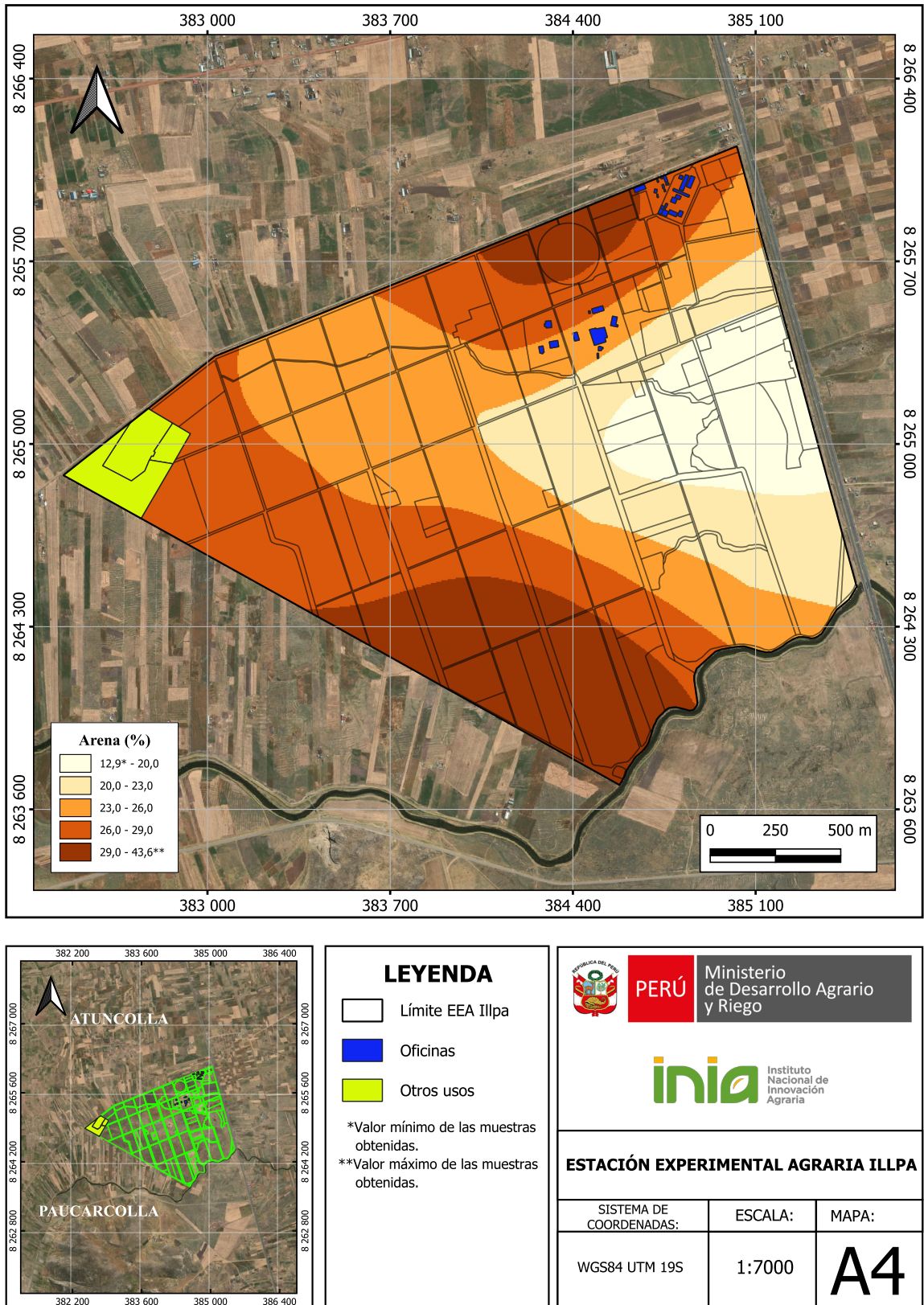
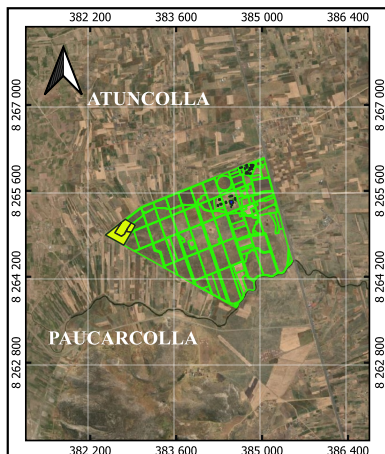
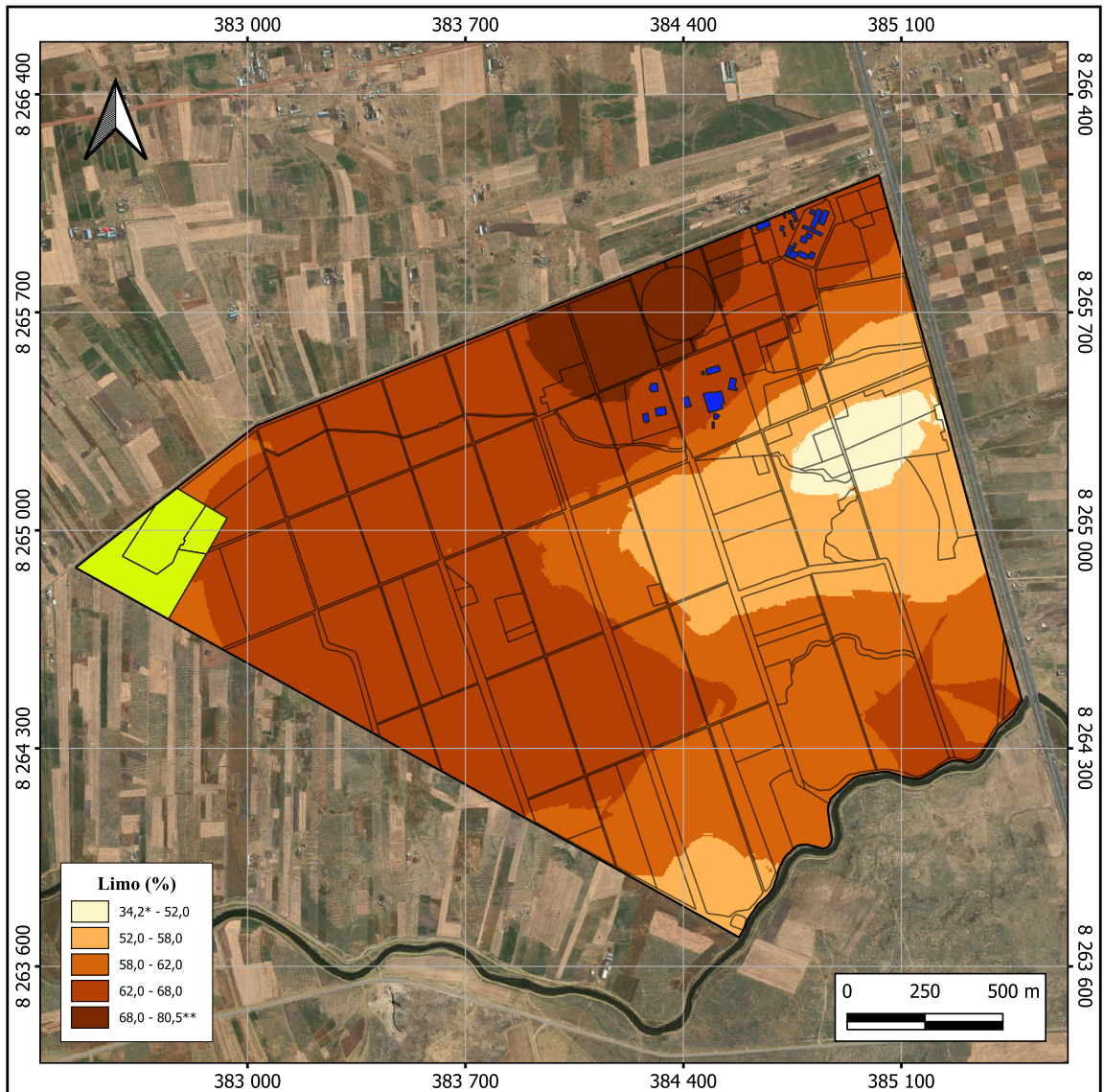


Figura 9. Mapa de variación espacial del porcentaje de arena



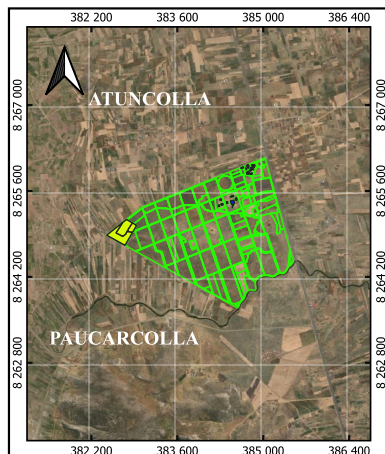
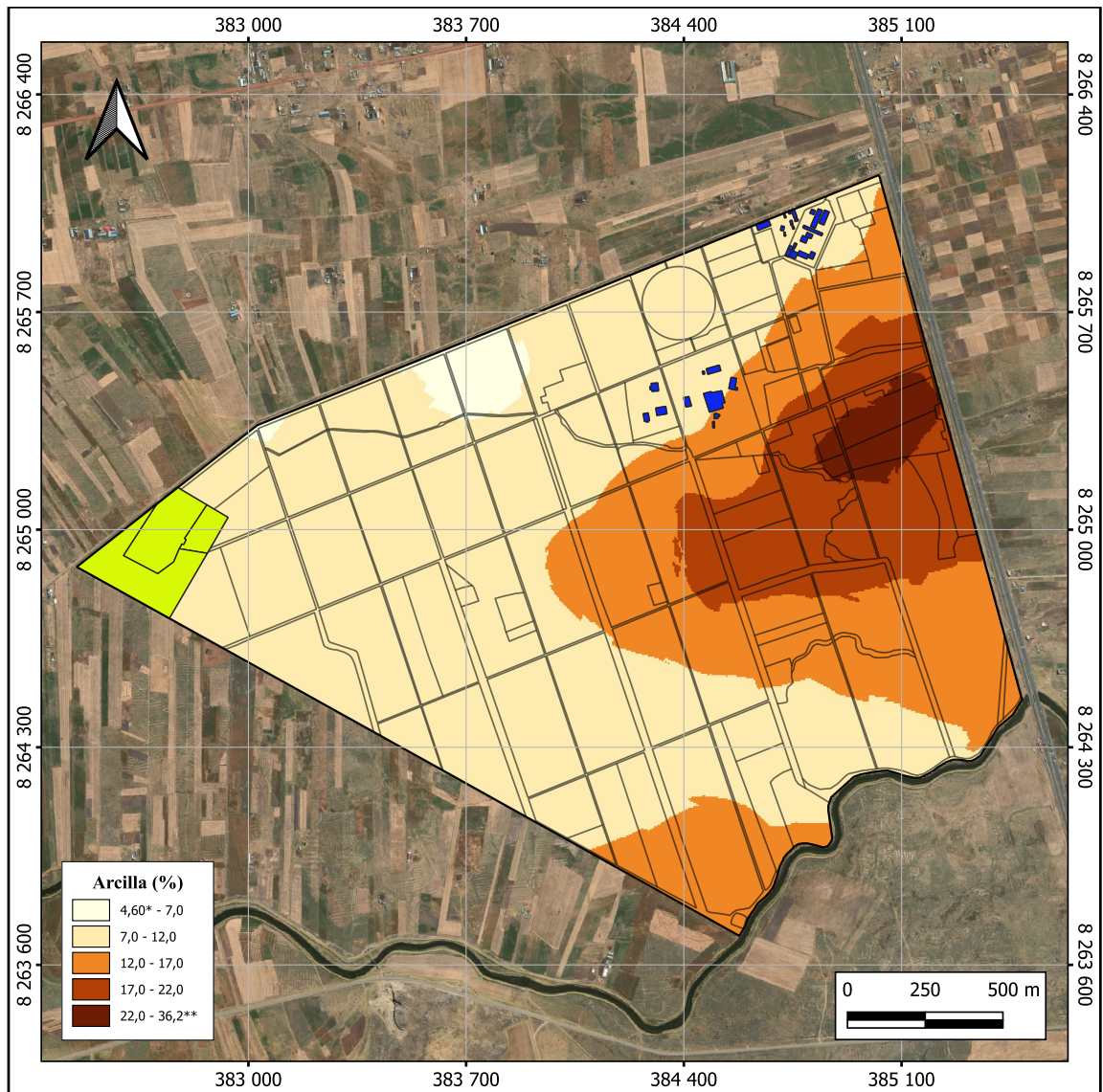
LEYENDA

- Límite EEA Illpa
- Oficinas
- Otros usos

*Valor mínimo de las muestras obtenidas.
**Valor máximo de las muestras obtenidas.

  Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego		
 inía Instituto Nacional de Innovación Agraria		
ESTACIÓN EXPERIMENTAL AGRARIA ILLPA		
SISTEMA DE COORDENADAS:	ESCALA:	MAPA:
WGS84 UTM 19S	1:7000	A4

Figura 10. Mapa de variación espacial del porcentaje de limo



LEYENDA

- Límite EEA Illpa
- Oficinas
- Otros usos

*Valor mínimo de las muestras obtenidas.
 **Valor máximo de las muestras obtenidas.

  Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego		
 inía Instituto Nacional de Innovación Agraria		
ESTACIÓN EXPERIMENTAL AGRARIA ILLPA		
SISTEMA DE COORDENADAS:	ESCALA:	MAPA:
WGS84 UTM 19S	1:7000	A4

Figura 11. Mapa de variación espacial del porcentaje de arcilla

4.1.2. Materia orgánica

a. Descripción de la variabilidad de la materia orgánica

El mapa de variación espacial del porcentaje de materia orgánica (Figura 12) muestra que los suelos del Centro Experimental Illpa presentan, en general, contenidos que oscilan entre niveles bajos y medios. La mayor parte del área registra valores cercanos al 2 %, lo cual es característico de suelos altoandinos sometidos a agricultura continua y pastoreo extensivo. Sin embargo, el mapa permite identificar zonas puntuales donde la materia orgánica se concentra ligeramente por encima de este promedio, generalmente asociadas a sectores con mayor cobertura vegetal, menor intervención agrícola o acumulación de residuos orgánicos. Por el contrario, existen áreas con valores cercanos al 1 %, que reflejan un desgaste más intenso del suelo, posiblemente por erosión, labranza frecuente o baja reposición de biomasa. Es importante recordar que, en el contexto del altiplano puneño, la descomposición de la materia orgánica es más lenta debido a las bajas temperaturas, lo que favorece su acumulación relativa, pero también hace que su recuperación, una vez perdida, sea un proceso gradual que requiere manejo constante.

b. Riesgos asociados a niveles bajos de materia orgánica

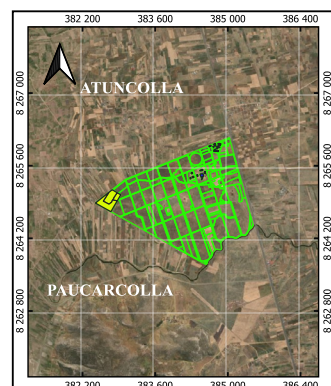
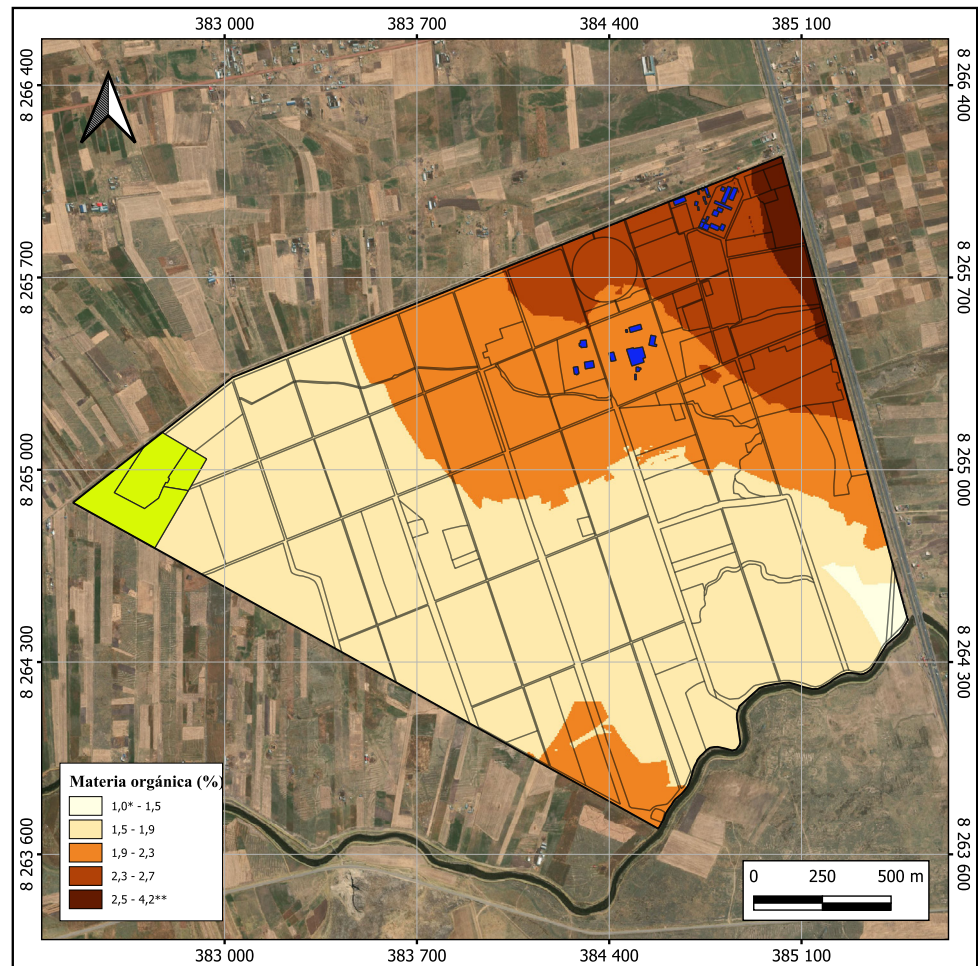
La materia orgánica es el "corazón" de la fertilidad del suelo: mejora la estructura, retiene agua y nutrientes, y alimenta a los microorganismos beneficiosos. Cuando sus niveles son bajos, como se observa en varios sectores del mapa, el suelo pierde capacidad para amortiguar cambios bruscos de humedad, se vuelve más susceptible a la compactación y a la erosión por viento y agua. Además, la baja materia orgánica limita la disponibilidad natural de nitrógeno y azufre, nutrientes esenciales para cultivos como la quinua, la cañihua y la papa. En condiciones de frío altoandino, la recuperación espontánea de la materia orgánica es lenta; por ello, sin intervención activa, los suelos con niveles bajos tienden a mantenerse o degradarse aún más, afectando la productividad a mediano plazo.

c. Recomendaciones de manejo diferenciado

Para mejorar y mantener los niveles de materia orgánica en la Centro Experimental Illpa, se recomienda un enfoque de manejo adaptado a la zonificación observada en el mapa:

- **Zonas con materia orgánica baja (valores cercanos al 1 %):** priorizar la incorporación sistemática de enmiendas orgánicas. Se sugiere aplicar compost maduro o estiércol de ovino/camélido descompuesto en dosis de 8 a 10 toneladas por hectárea, incorporado superficialmente (0-15 cm) antes de la siembra. Complementar con la práctica de dejar rastrojos de cosecha en el campo y, de ser posible, establecer rotaciones con leguminosas nativas o cultivadas que aporten biomasa y fijen nitrógeno atmosférico.
- **Zonas con materia orgánica media (valores entre el 2 y el 3 %):** mantener la fertilidad mediante aplicaciones de sostenimiento. Se recomienda dosis de 4 a 6 toneladas por hectárea de compost o estiércol, aplicadas cada dos ciclos de cultivo. Promover el uso de coberturas vegetales temporales (mulch con paja o residuos de quinua) para reducir la pérdida de materia orgánica por erosión y favorecer la actividad microbiana.

- **Prácticas transversales para toda el área:** evitar la quema de rastrojos, dado que destruye la materia orgánica y los microorganismos del suelo. Fomentar la labranza mínima para no acelerar la descomposición de la materia orgánica por exposición al aire. En lo posible, integrar la producción pecuaria con la agrícola, aprovechando el estiércol como recurso local de bajo costo.
- **Monitoreo sencillo para el agricultor:** además de los análisis de laboratorio, el productor puede evaluar visualmente la materia orgánica observando el color del suelo (más oscuro = más materia orgánica), la facilidad para formar “migajones” estables al apretar un puñado de suelo húmedo, y la presencia de raíces y fauna edáfica (lombrices, colémbolos). Estas observaciones ayudan a validar el mapa y ajustar las dosis de enmienda en cada lote.



LEYENDA

- Límite EEA Illpa
- Oficinas
- Otros usos

*Valor mínimo de las muestras obtenidas.
 **Valor máximo de las muestras obtenidas.



 Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego
 Instituto Nacional de Innovación Agraria

ESTACIÓN EXPERIMENTAL AGRARIA ILLPA

SISTEMA DE COORDENADAS:	ESCALA:	MAPA:
WGS84 UTM 19S	1:7000	A4

Figura 12. Mapa de variación espacial del porcentaje de materia orgánica

4.2. Manejo según la fertilidad química

4.2.1. Reactividad del suelo: pH

a. Descripción de la variabilidad del pH

El mapa de variación espacial del pH (Figura 13) muestra que los suelos del Centro Experimental Illpa presentan una reactividad que oscila desde condiciones ligeramente ácidas hasta moderadamente alcalinas, con un comportamiento general cercano a la neutralidad. Esta condición es favorable para la agricultura altoandina, dado que permite la disponibilidad de la mayoría de los nutrientes esenciales. Sin embargo, el mapa permite identificar tres zonas diferenciadas: con pH ácido (alrededor de 5,2), pH neutro (alrededor de 6,6) y con tendencia a la alcalinidad (hasta 8,1). Esta variabilidad no es aleatoria, responde a la interacción entre el material parental lacustre, el régimen hídrico estacional y las prácticas de manejo histórico. En el contexto del altiplano puneño, donde las lluvias son estacionales y la evapotranspiración es alta, el pH puede fluctuar ligeramente entre épocas húmedas y secas, por lo que se recomienda realizar el muestreo y la interpretación del mapa de variación espacial preferentemente al inicio de la campaña agrícola.

b. Recomendaciones de manejo diferenciado

Para optimizar la fertilidad del suelo en función del pH, se recomienda un enfoque de manejo adaptado a la zonificación observada en el mapa:

- **Zonas con pH ácido (5,2-6,0):** priorizar la aplicación de enmiendas calcáreas (cal agrícola, CaCO_3) para elevar el pH hacia la neutralidad y reducir la toxicidad por aluminio. La dosis debe calcularse en función del análisis de suelo y la capacidad buffer del suelo, pero como referencia general, se sugiere iniciar con aplicaciones moderadas ($1-2 \text{ t ha}^{-1}$) y monitorear la respuesta. Complementar con la incorporación de materia orgánica, que ayuda a amortiguar cambios bruscos de pH y mejora la disponibilidad de nutrientes.
- **Zonas con pH neutro (6,1-7,4):** mantener la condición actual mediante prácticas de conservación. Evitar el uso excesivo de fertilizantes acidificantes (como sulfato de amonio) sin un plan de corrección. Aprovechar este “punto dulce” para maximizar la eficiencia de la fertilización, aplicando nutrientes en dosis fraccionadas y sincronizadas con las etapas críticas del cultivo.
- **Zonas con pH alcalino (7,5-8,1):** considerar la aplicación de yeso agrícola ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) o azufre elemental para reducir gradualmente el pH y mejorar la disponibilidad de fósforo y micronutrientes. En estos sectores, se recomienda fertilizar con fuentes de fósforo más solubles (ej. superfosfato triple) y aplicar micronutrientes quelatados o vía foliar para superar las limitaciones de absorción radicular. Evitar el riego con aguas de alta alcalinidad que puedan incrementar el pH superficial.
- **Prácticas transversales para toda el área:** realizar monitoreo periódico del pH (cada 2-3 años) para detectar tendencias y ajustar las estrategias de enmienda. Integrar el manejo del pH con la fertilización potásica y fosfatada, dado que estos nutrientes interactúan directamente con la reactividad del suelo. En lo posible, realizar aplicaciones de enmiendas durante la siembra e incorporarlas superficialmente para maximizar su efecto.

- Validación sencilla para el agricultor:** además del análisis de laboratorio, el productor puede realizar pruebas rápidas de pH en campo usando kits portátiles o tiras reactivas. Observar el color del suelo (tonos rojizos pueden indicar acidez), la presencia de costras blancas (posible indicio de alcalinidad) y el comportamiento de los cultivos (clorosis, enanismo) ayuda a validar el mapa y ajustar las dosis de enmienda en cada lote.

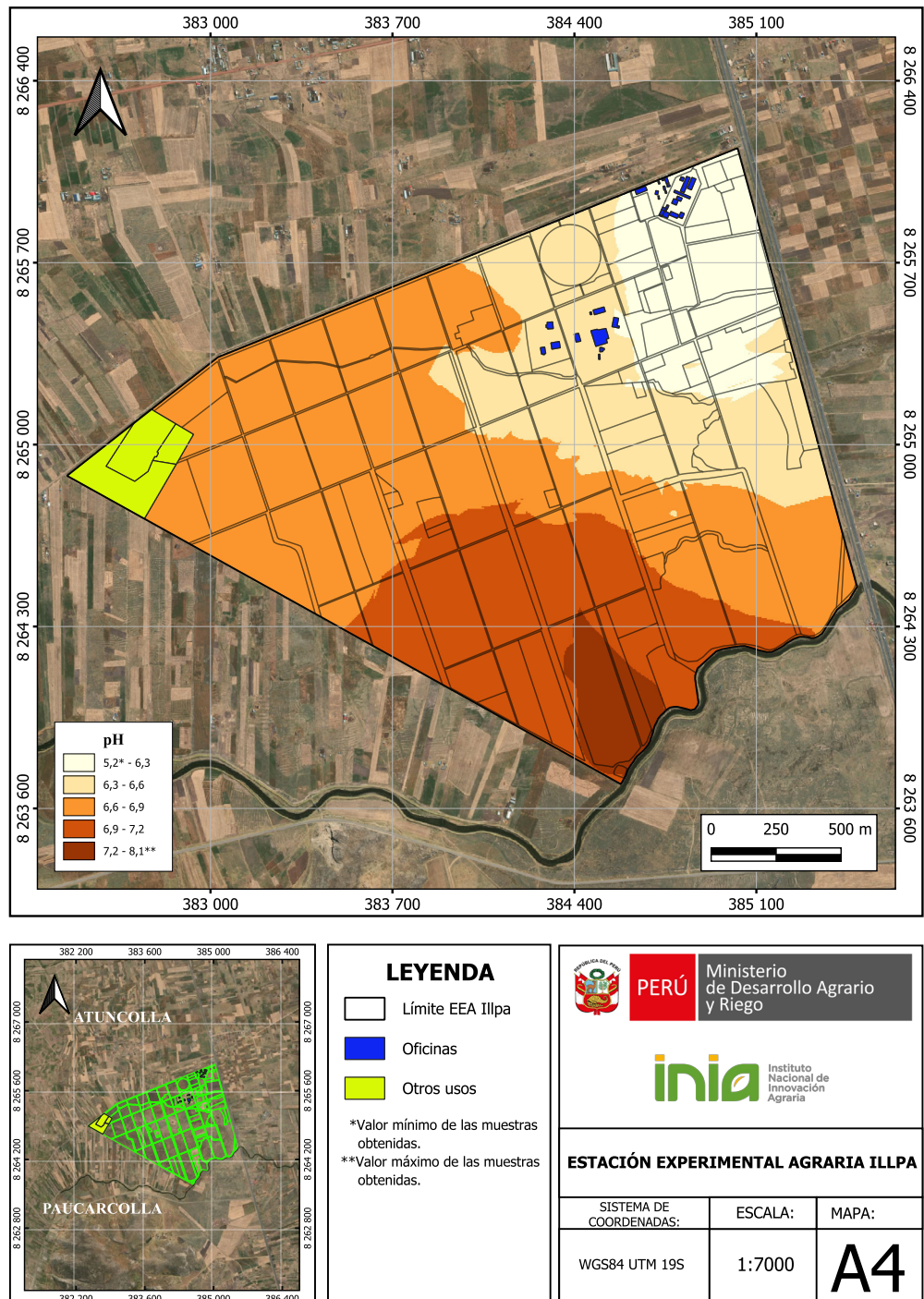


Figura 13. Mapa de variación espacial del pH

4.2.2. Macronutrientes

a. Descripción de la variabilidad de los macronutrientes

Los mapas de variación espacial del nitrógeno total, fósforo disponible (método Olsen) y potasio disponible (Figuras 14, 15 y 16) revelan un patrón de fertilidad química heterogéneo en el Centro Experimental Illpa, caracterizado por contrastes marcados entre sectores.

El nitrógeno total presenta valores que oscilan entre 0,04 % y 0,16 %, con un promedio de 0,08 %, lo cual es consistente con suelos altoandinos de contenido medio de materia orgánica. Su distribución espacial no muestra un patrón regional definido, reflejando la influencia del manejo histórico de residuos de cosecha y la incorporación de estiércol en lotes específicos.

El fósforo disponible exhibe la mayor variabilidad de todos los parámetros analizados, con valores que van desde 12,56 mg kg⁻¹ hasta 380,8 mg kg⁻¹ y un promedio de 51,22 mg kg⁻¹. Esta dispersión extrema indica que existen sectores del Centro Experimental con niveles críticos de fósforo (< 25 mg kg⁻¹, umbral de suficiencia para quinua y papa), mientras que otras áreas presentan concentraciones excepcionalmente altas, probablemente resultado de aplicaciones acumuladas de fertilizantes fosfatados o estiércol. El mapa permite identificar claramente estas zonas contrastantes, lo que es fundamental para evitar tanto la subfertilización como el desperdicio económico y ambiental por exceso.

El potasio disponible, por su parte, muestra niveles generalmente altos a muy altos en toda el área, con valores que oscilan entre 273,7 y 1642,2 mg kg⁻¹ (promedio 624,82 mg kg⁻¹). Esta condición es favorable para la agricultura andina, dado que el potasio es esencial para la resistencia al estrés hídrico y térmico, factores críticos en el altiplano. Sin embargo, la alta variabilidad espacial (CV = 40,9 %) sugiere que existen sectores donde el potasio podría estar en exceso, lo que podría generar desbalances con otros cationes como el calcio y el magnesio, afectando la absorción equilibrada de nutrientes.

b. Riesgos asociados a la deficiencia o exceso de macronutrientes

Nitrógeno: la deficiencia de nitrógeno en las plantas se manifiesta generalmente mediante clorosis o amarillamiento principalmente en las hojas más viejas, debido a la alta movilidad de este nutriente dentro de la planta. Asimismo, se observa una reducción general del crecimiento y del vigor vegetativo. Por otro lado, el exceso de nitrógeno puede incrementar la susceptibilidad de los cultivos a plagas y enfermedades, favorecer el acame en cereales y provocar la acumulación de compuestos potencialmente perjudiciales, como nitratos y nitritos en los tejidos vegetales. En los suelos, la mayor parte del nitrógeno se encuentra asociado a la materia orgánica, la cual constituye su principal reservorio (Benzing, 2001).

Fósforo: es un elemento esencial que forma parte de todos los organismos vivos, pero es escaso en la mayoría de los ecosistemas. Se pierde principalmente por erosión y puede quedar inmovilizado en el suelo en formas de difícil acceso para las plantas, siendo común su deficiencia en suelos andinos. Su disponibilidad depende en gran medida del pH, siendo óptimo entre 6 y 6,5, y el encalado puede contrarrestar su deficiencia en suelos ácidos. El fósforo orgánico tiene mayor disponibilidad que las formas inorgánicas, y los abonos orgánicos se aprovechan mejor que los fertilizantes minerales (Benzing, 2001).

Potasio: cumple funciones clave en la fisiología de la planta: regula la apertura de los estomas para el control hídrico y facilita el transporte de azúcares hacia los órganos de reserva, lo que favorece la acumulación de almidón en los tubérculos de papa. Un aspecto importante es que el cloro (Cl^-), presente en el cloruro de potasio (KCl), puede interferir con el transporte de asimilados, por lo que para el cultivo de papa se recomienda aplicar el potasio (K) en forma de sulfato de potasio (K_2SO_4). Además, un adecuado suministro de K mejora la resiliencia de los tubérculos frente a las heladas del altiplano. Afortunadamente, en las zonas andinas el potasio rara vez es deficiente, lo que facilita su manejo en los sistemas agrícolas de la región (Benzing, 2001).

c. Recomendaciones de manejo diferenciado

Para optimizar la fertilización con macronutrientes en el Centro Experimental Illpa, se recomienda un enfoque adaptado a la zonificación observada en los mapas, aplicando criterios prácticos de manejo:

- **Para fósforo:** en zonas con disponibilidad limitada, se sugiere aplicar fertilizantes fosfatados con el objetivo de construir progresivamente la reserva del suelo, incorporando el nutriente durante la siembra y complementando con materia orgánica para mejorar su eficiencia de uso. En sectores con niveles medios, se recomienda aplicar dosis de mantenimiento que repongan lo extraído por el cultivo, ajustando las cantidades según el rendimiento esperado. En áreas con exceso de fósforo, se sugiere suspender temporalmente la fertilización fosfatada y monitorear la disponibilidad de micronutrientes, aplicándolos vía foliar si se observan síntomas de deficiencia.
- **Para nitrógeno:** dada su alta movilidad en el suelo y la variabilidad espacial observada, se recomienda realizar análisis de suelos previo a cada campaña para ajustar las dosis. Como guía general, en suelos con niveles bajos de nitrógeno, se sugiere fraccionar la aplicación en dos momentos (siembra y macollamiento en cultivo de papa) para mejorar la eficiencia de uso. En suelos con niveles adecuados o altos, se recomienda reducir o suspender la fertilización nitrogenada según el comportamiento del cultivo.
- **Para potasio:** en la mayoría del área, los niveles son suficientes para cubrir los requerimientos de cultivos andinos. Solo en los sectores con disponibilidad reducida se recomienda aplicar fertilizantes potásicos. En zonas con niveles muy altos, se sugiere monitorear la relación entre cationes para evitar desbalances nutricionales.
- **Ejemplo práctico integrado (cultivo de quinua):**
 - » Lote con baja disponibilidad de fósforo y nitrógeno: priorizar la aplicación de fertilizantes fosfatados (criterio de construcción) y nitrogenados (criterio de mantenimiento), omitiendo la fertilización potásica si los niveles son adecuados.
 - » Lote con alta disponibilidad de fósforo y potasio: suspender la fertilización fosfatada, aplicar nitrógeno de mantenimiento según el rendimiento esperado y monitorear el potasio sin aplicar dosis adicionales.

d. Validación en campo para el agricultor

Además de los análisis de laboratorio, se recomienda observar indicadores visuales como el color de las hojas (el amarillamiento puede indicar deficiencia de nitrógeno o fósforo), el vigor vegetativo y la formación de granos o tubérculos. Realizar pequeñas parcelas de prueba con diferentes dosis de fertilizante permite ajustar las recomendaciones a las condiciones específicas de cada lote, optimizando recursos y mejorando la productividad.

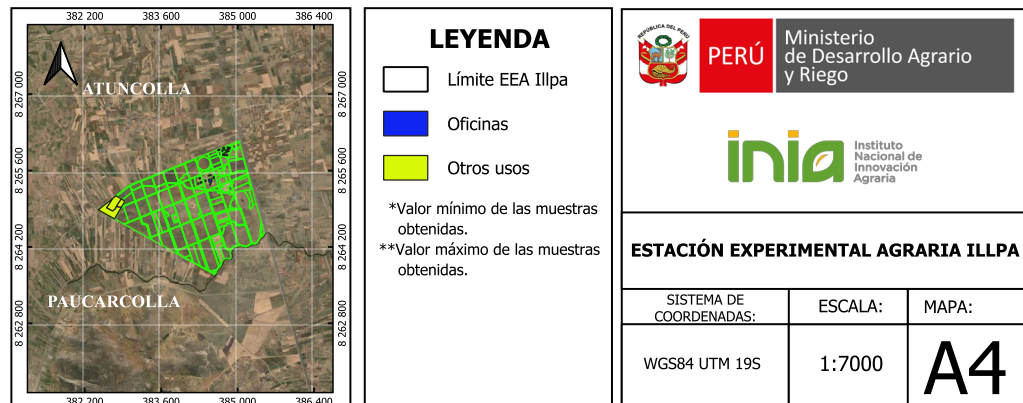
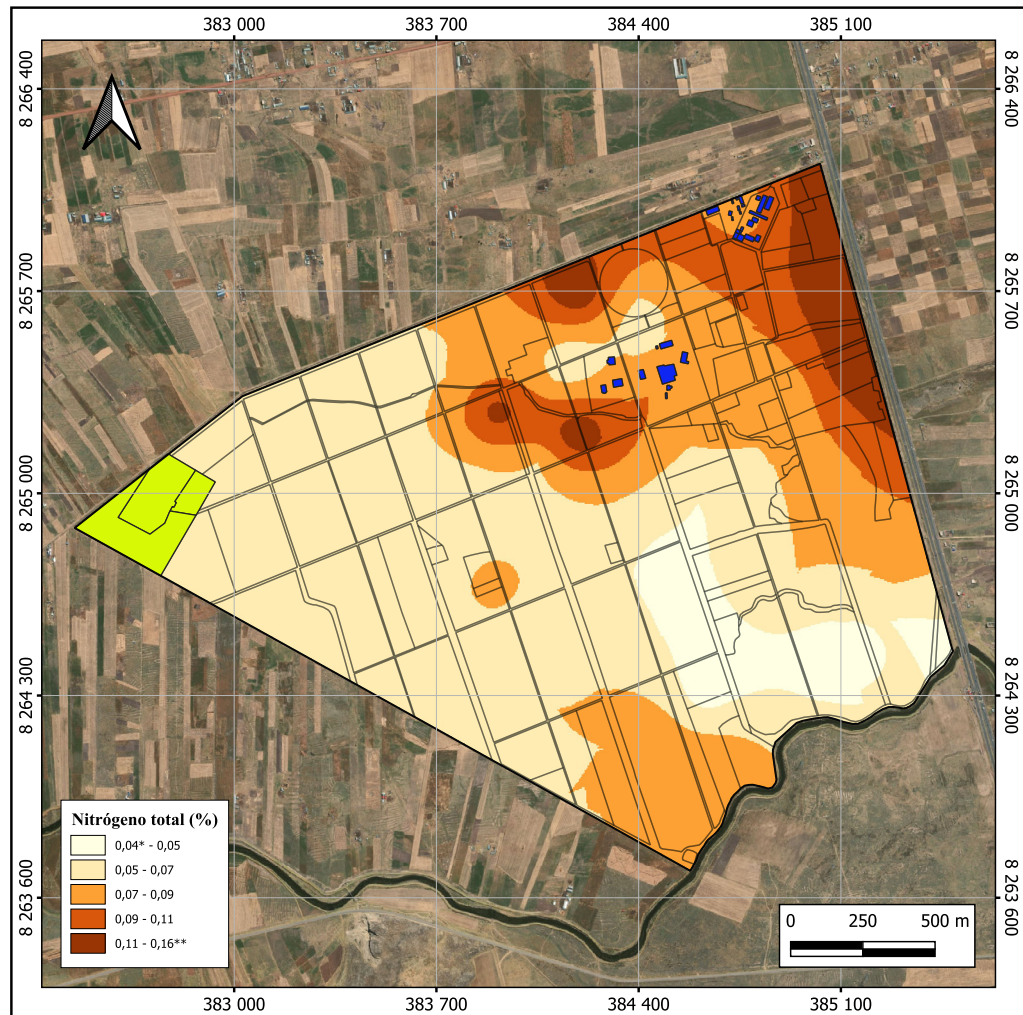


Figura 14. Mapa de variación espacial del porcentaje de nitrógeno total

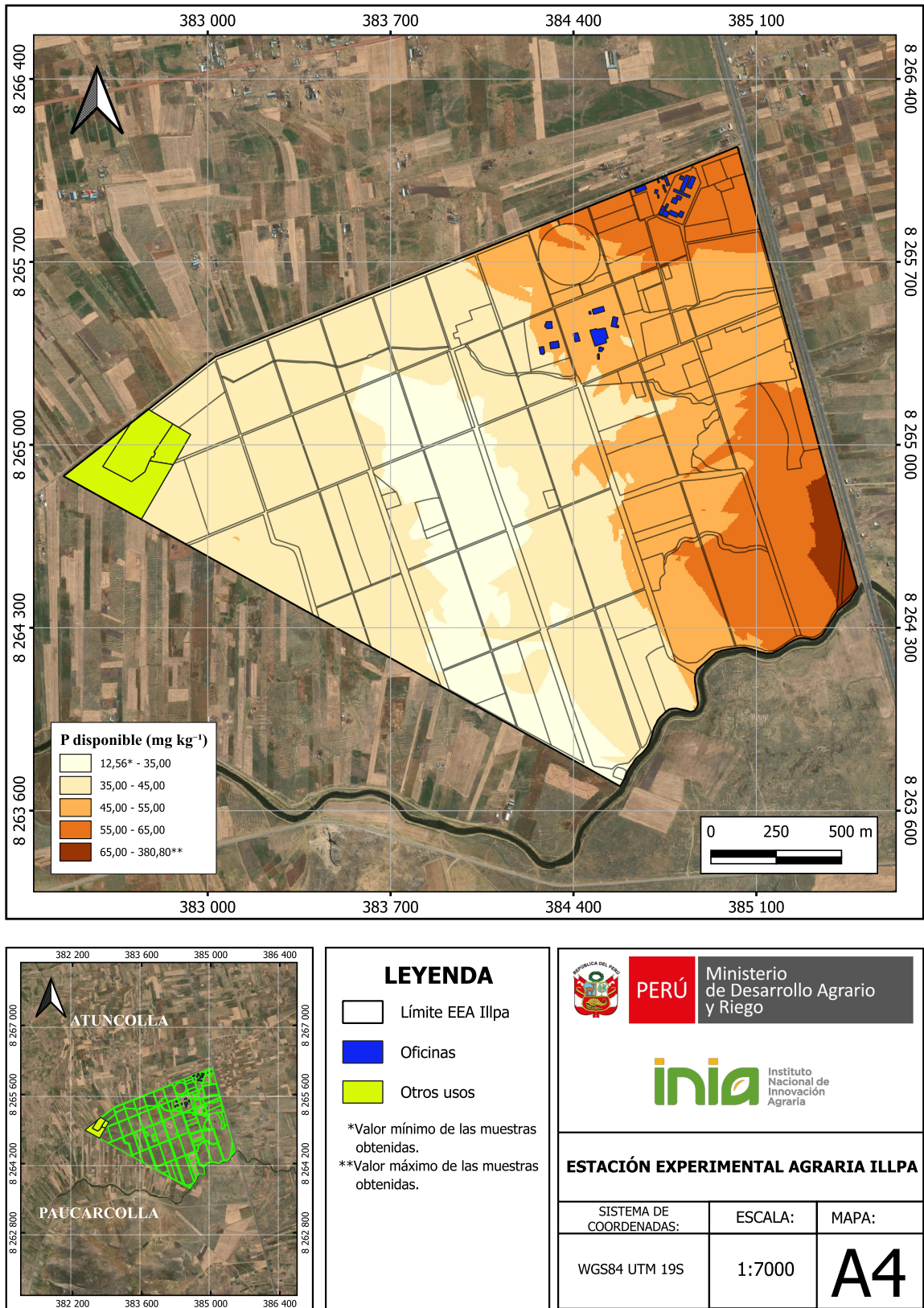
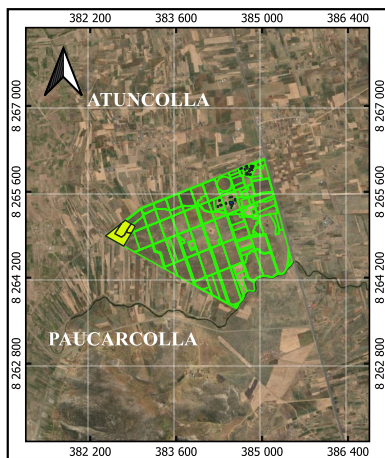
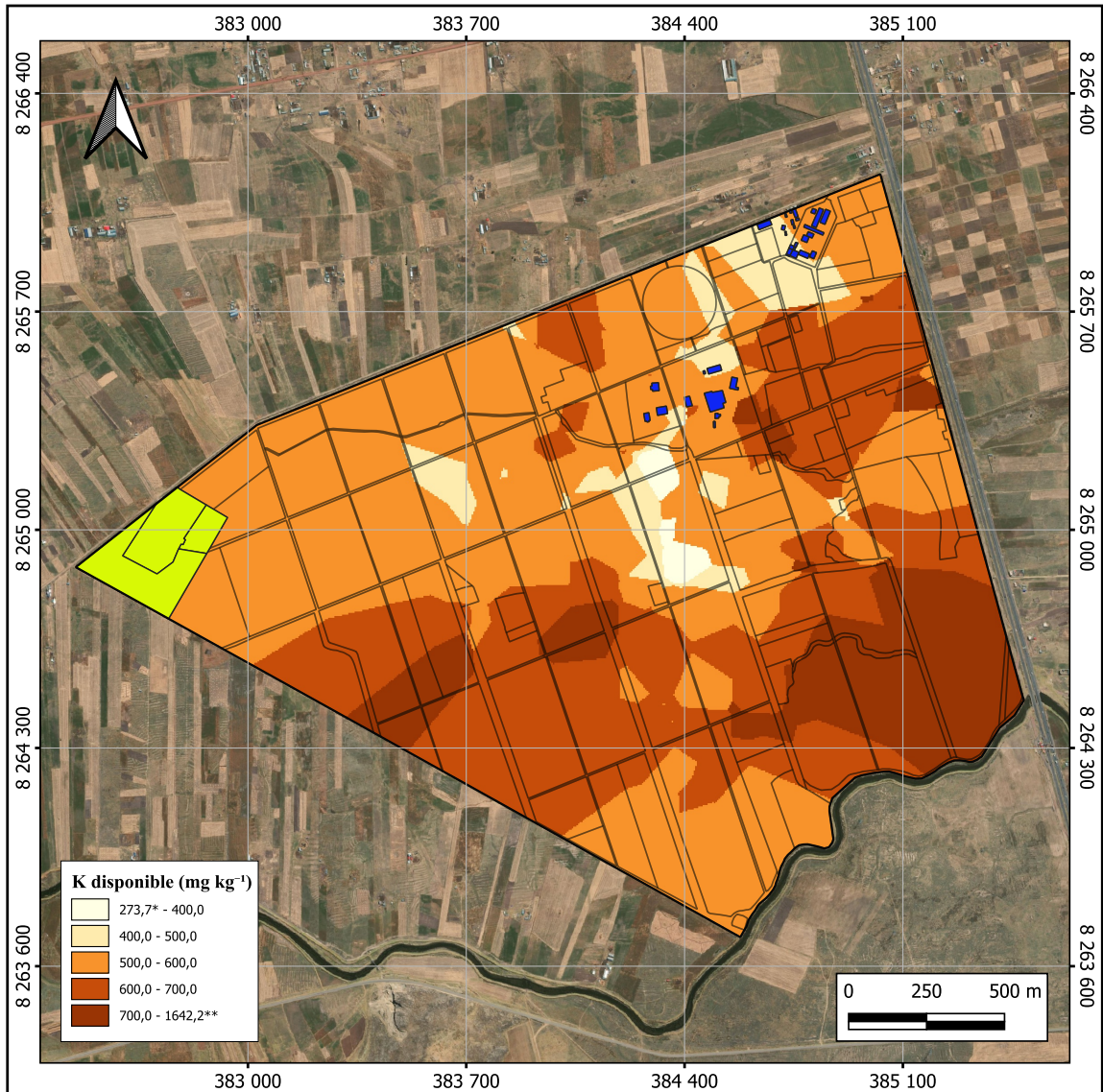


Figura 15. Mapa de variación espacial del fósforo disponible



LEYENDA

- Límite EEA Illpa
- Oficinas
- Otros usos

*Valor mínimo de las muestras obtenidas.
 **Valor máximo de las muestras obtenidas.

PERÚ

Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego

ESTACIÓN EXPERIMENTAL AGRARIA ILLPA

SISTEMA DE COORDENADAS:	ESCALA:	MAPA:
WGS84 UTM 19S	1:7000	A4

Figura 16. Mapa de variación espacial del potasio disponible

4.2.3. Salinidad y conductividad eléctrica

a. Descripción de la variabilidad de la salinidad

El mapa de variación espacial de la conductividad eléctrica en extracto de saturación (Figura 17) muestra que los suelos del Centro Experimental Illpa presentan en general niveles de salinidad bajos a moderados, con valores que en la mayoría del área se mantienen por debajo de 4 dS m^{-1} , condición favorable para el desarrollo de cultivos andinos: quinua, cañihua y papa. Sin embargo, el mapa permite identificar sectores puntuales donde la conductividad eléctrica alcanza valores más elevados, asociados principalmente a zonas de acumulación de sales solubles por escaso drenaje, riego con agua de mayor conductividad o evaporación intensa en épocas secas.

Esta distribución no es aleatoria, responde a la interacción entre el material parental lacustre, el régimen hídrico estacional del altiplano y las prácticas de manejo histórico. En el contexto de Puno, donde las lluvias son concentradas y la evapotranspiración es alta, las sales pueden migrar hacia la superficie del suelo en épocas secas, generando acumulaciones locales que el mapa permite visualizar. Es importante destacar que, aunque el promedio general de conductividad eléctrica es bajo ($1,75 \text{ dS m}^{-1}$), la alta variabilidad observada ($\text{CV} = 134 \%$) indica que existen diferencias significativas entre lotes, lo que hace indispensable un manejo diferenciado.

b. Riesgos asociados a niveles elevados de salinidad

La presencia de sales solubles en el suelo puede afectar el rendimiento de los cultivos a través de dos mecanismos principales: el estrés osmótico y la toxicidad iónica. Cuando la conductividad eléctrica es alta, las plantas deben ejercer mayor esfuerzo para absorber agua del suelo, lo que se traduce en menor crecimiento, hojas más pequeñas y reducción del rendimiento, incluso si hay humedad disponible. Este efecto es particularmente crítico en etapas sensibles como la germinación y la floración.

Adicionalmente, en suelos con acumulación de sodio, puede producirse dispersión de las partículas de arcilla, lo que deteriora la estructura del suelo, reduce la infiltración del agua y dificulta el desarrollo radicular. Esta condición se manifiesta visualmente como suelos pegajosos cuando están húmedos y excesivamente duros al secarse. En el altiplano, donde el margen de manejo es estrecho debido a las bajas temperaturas y la corta campaña agrícola, estos efectos pueden tener impactos significativos en la productividad.

c. Recomendaciones de manejo diferenciado

Para optimizar el manejo de la salinidad en el Centro Experimental Illpa, se recomienda un enfoque adaptado a la zonificación observada en el mapa:

- **Zonas con conductividad eléctrica baja ($< 2 \text{ dS m}^{-1}$):** manejo convencional, sin restricciones por salinidad. Priorizar prácticas de conservación del suelo (cobertura vegetal, incorporación de materia orgánica) para mantener esta condición favorable. Monitorear periódicamente la calidad del agua de riego para prevenir acumulaciones futuras.
- **Zonas con conductividad eléctrica moderada ($2\text{-}4 \text{ dS m}^{-1}$):** implementar riegos de lavado ocasionales con agua de baja conductividad para movilizar sales hacia capas más profundas del perfil. Evitar el riego por inundación prolongada en épocas de alta evaporación. Incorporar materia orgánica para mejorar la estructura y la capacidad tampón del suelo. Seleccionar variedades de cultivos con mayor tolerancia a salinidad (ej. quinua, cebada) en estos sectores.
- **Zonas con conductividad eléctrica alta ($> 4 \text{ dS m}^{-1}$):** priorizar la aplicación de yeso agrícola si se confirma presencia de sodio intercambiable elevado, dado que el calcio aportado por el yeso desplaza al sodio y favorece su lixiviación. Implementar sistemas de drenaje subsuperficial si es viable o realizar surcos elevados para mejorar el escurrimiento superficial. Fraccionar el riego en láminas pequeñas y frecuentes para evitar acumulación de sales en la zona radicular. Considerar la rotación con cultivos tolerantes o el descanso temporal del lote para recuperación.
- **Prácticas transversales para toda el área:** realizar monitoreo periódico de la conductividad eléctrica del suelo y del agua de riego (al menos una vez por campaña). Evitar la aplicación de fertilizantes con alto índice salino en zonas ya afectadas. Integrar el manejo de la salinidad con la corrección del pH y el balance catiónico, dado que estas variables interactúan directamente. Capacitar al personal técnico y a los agricultores en la interpretación básica de la conductividad y en la toma de decisiones asociadas.
- **Validación sencilla para el agricultor:** además de los análisis de laboratorio, el productor puede evaluar la salinidad observando la presencia de costras blancas en la superficie del suelo (indicativo de acumulación de sales), el comportamiento de las plantas (marchitez aparente a pesar de humedad disponible, bordes de hojas quemados) y la facilidad con que el agua se infiltra en el suelo. Realizar pequeñas parcelas de prueba con diferentes estrategias de riego y enmiendas ayuda a ajustar las recomendaciones a las condiciones específicas de cada lote.

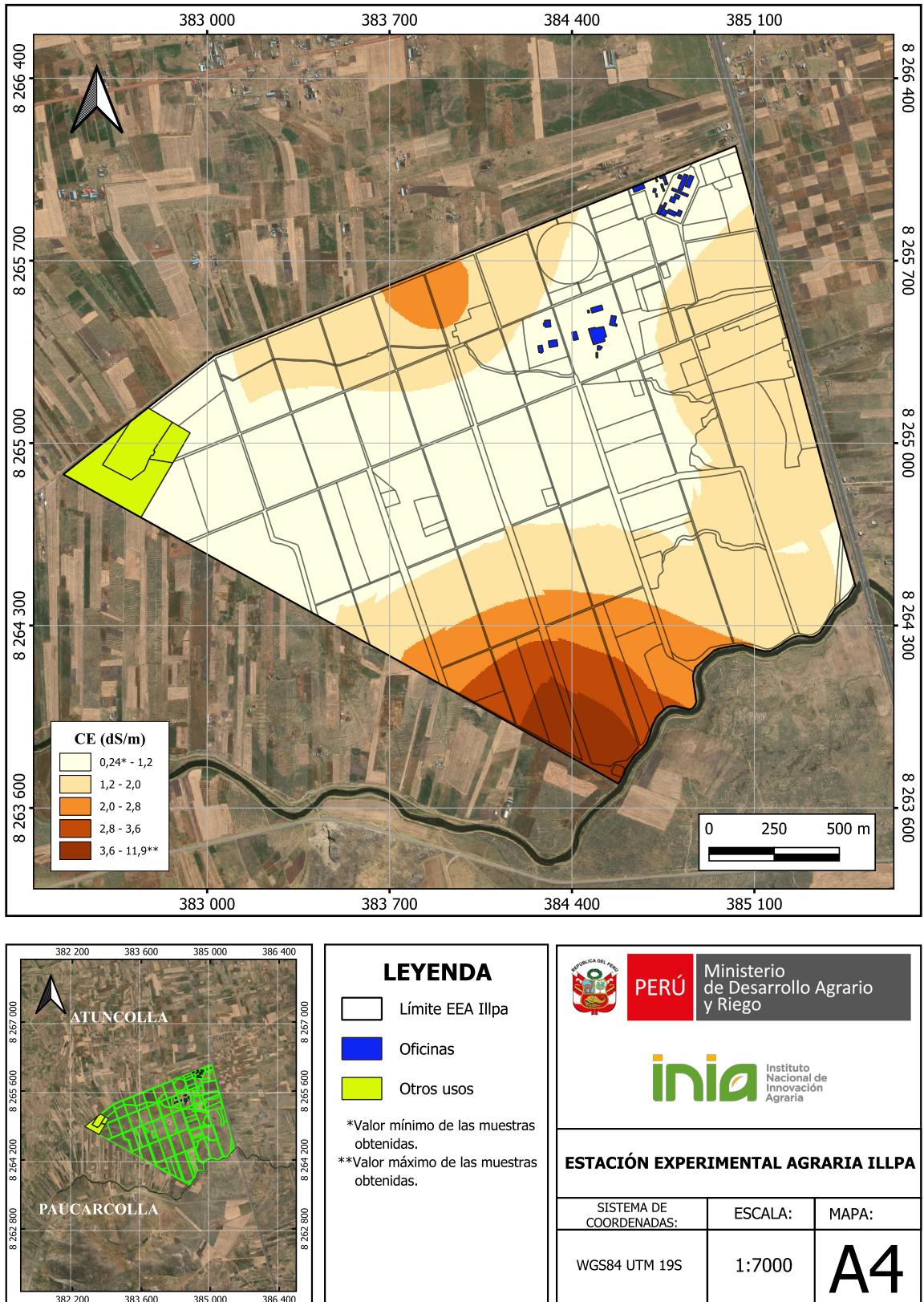


Figura 17. Mapa de variación espacial de la conductividad eléctrica

4.3. Manejo según balance catiónico

4.3.1. Capacidad de intercambio catiónico (CIC)

a. Descripción de la variabilidad de la CIC

El mapa de variación espacial de la Capacidad de Intercambio Catiónico efectiva (Figura 18) muestra que los suelos del Centro Experimental Illpa presentan una capacidad moderada para retener y liberar nutrientes esenciales para los cultivos. En términos generales, la mayoría del área registra valores que permiten un manejo agrícola viable, aunque se identifican sectores con diferencias significativas. Esta variabilidad responde principalmente a la combinación entre el contenido de arcilla, la materia orgánica y el pH del suelo, factores que determinan cuántos "espacios" tiene el suelo para almacenar cationes como calcio, magnesio, potasio y sodio.

Al observar el mapa, se distinguen zonas donde la CIC es más baja, generalmente asociadas a sectores con menor contenido de arcilla o materia orgánica, y áreas donde la CIC es más alta, vinculadas a suelos con mayor proporción de partículas finas o mayor acumulación de residuos orgánicos. Esta distribución no es aleatoria: refleja la historia de uso del suelo, las prácticas de manejo y las condiciones naturales del paisaje altoandino. Para el agricultor, comprender esta variabilidad es clave, porque un suelo con mayor CIC actúa como una "despensa" más grande de nutrientes, mientras que un suelo con CIC baja requiere un manejo más cuidadoso para evitar pérdidas por lixiviación.

b. Riesgos asociados a valores extremos de CIC

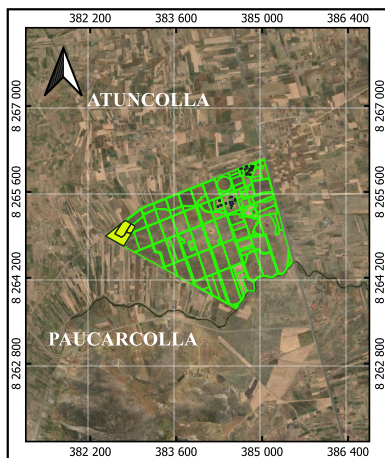
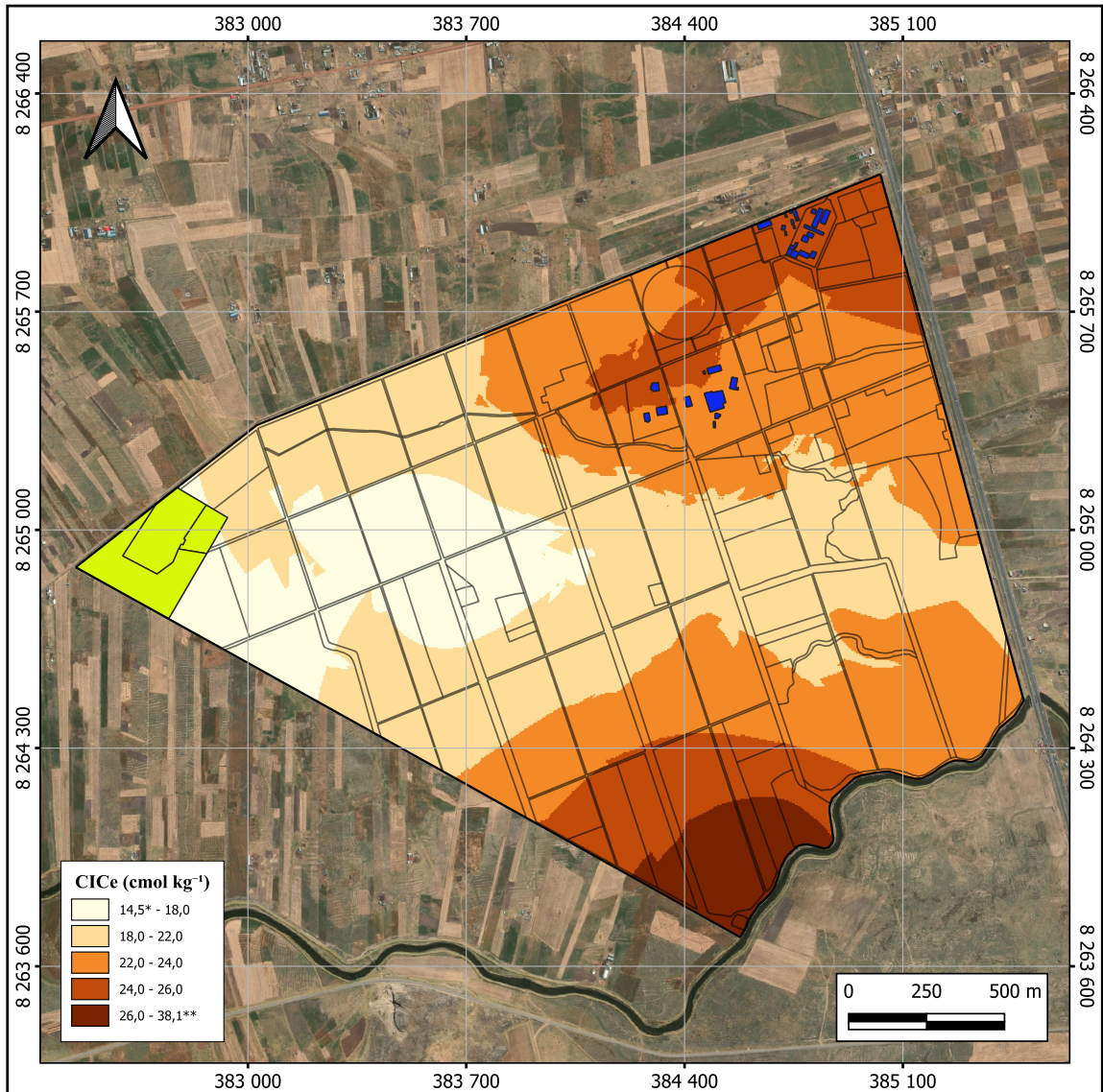
La capacidad de intercambio catiónico influye directamente en la eficiencia de la fertilización y en la estabilidad química del suelo. Cuando la CIC es baja, el suelo tiene menor capacidad para retener nutrientes cargados positivamente, lo que incrementa el riesgo de que estos se pierdan hacia capas profundas con el agua de riego o lluvia. Esta condición es particularmente crítica para nutrientes móviles como el nitrógeno y el potasio, cuya aplicación en dosis únicas puede resultar en baja eficiencia de uso y mayor costo para el productor.

Por otro lado, cuando la CIC es alta, el suelo puede retener mayores cantidades de nutrientes, lo que representa una ventaja para la fertilidad a largo plazo. Sin embargo, esta misma capacidad de retención puede volverse una limitante si predominan cationes no deseables, como el sodio o el aluminio, los cuales pueden afectar negativamente la estructura del suelo y la disponibilidad de nutrientes para las plantas. Además, en suelos con CIC alta y pH alcalino, existe mayor riesgo de que el fósforo forme compuestos insolubles con el calcio, reduciendo su disponibilidad para los cultivos.

c. Recomendaciones de manejo diferenciado

Para optimizar el manejo de la fertilidad en función de la CIC, se recomienda un enfoque adaptado a la zonificación observada en el mapa:

- **Zonas con CIC baja a moderada (< 15 cmol/kg):** priorizar la aplicación fraccionada de fertilizantes, especialmente aquellos con alta movilidad como el nitrógeno y el potasio. Incorporar materia orgánica de forma sistemática (compost, estiércol descompuesto, residuos de cosecha) para incrementar progresivamente la capacidad de retención de nutrientes. Evitar aplicaciones masivas de fertilizantes en una sola dosis, dado que una parte significativa podría perderse antes de ser aprovechada por el cultivo.
- **Zonas con CIC moderada a alta (> 15 cmol/kg):** aprovechar la mayor capacidad de retención para aplicar enmiendas y fertilizantes con objetivos de construcción de fertilidad a mediano plazo. En estos sectores, es posible realizar aplicaciones más concentradas de nutrientes, siempre que se monitoreen los niveles de saturación de bases para evitar desbalances. Complementar con prácticas de conservación de suelos que mantengan o incrementen el contenido de materia orgánica.
- **Prácticas transversales para toda el área:** realizar análisis de suelos periódicos (cada 2-3 años) para monitorear cambios en la CIC y ajustar las estrategias de fertilización. Integrar el manejo de la CIC con la corrección del pH y el balance catiónico, dado que estas variables interactúan directamente. Promover la rotación de cultivos con especies que aporten biomasa y mejoren la estructura del suelo.
- **Validación sencilla para el agricultor:** además de los análisis de laboratorio, el productor puede evaluar indirectamente la CIC observando la textura del suelo (suelos más arcillosos o con mayor materia orgánica suelen tener CIC más alta) y el comportamiento de los cultivos frente a la fertilización. Un suelo que responde rápidamente a dosis bajas de fertilizante puede indicar buena eficiencia de uso; uno que requiere dosis altas para mostrar respuesta puede sugerir baja CIC o problemas de disponibilidad.



LEYENDA

- Límite EEA Illpa
- Oficinas
- Otros usos

*Valor mínimo de las muestras obtenidas.
 **Valor máximo de las muestras obtenidas.



 Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego


 Instituto Nacional de Innovación Agraria

ESTACIÓN EXPERIMENTAL AGRARIA ILLPA

SISTEMA DE COORDENADAS:	ESCALA:	MAPA:
WGS84 UTM 19S	1:7000	A4

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

4.3.2. Balance calcio-magnesio

a. Descripción de la variabilidad integrada

Los mapas de concentración de calcio y magnesio intercambiables (Figuras 19 y 20) muestran que, en términos absolutos, el calcio es el catión predominante en la mayoría del área del Centro Experimental Illpa (CE Illpa), con valores que oscilan entre 6,8 y 29,8 cmol kg^{-1} , mientras que el magnesio presenta concentraciones moderadas, entre 2,5 y 8,6 cmol kg^{-1} . Esta condición general es favorable, dado que el calcio promueve la floculación de partículas y la estabilidad estructural del suelo.

Sin embargo, al analizar los mapas de saturación (Figuras 21 y 22), que expresan la proporción de cada catión respecto a la capacidad de intercambio catiónico total, se identifican patrones más relevantes para el manejo. En varios sectores, la saturación de calcio se encuentra por debajo del rango considerado óptimo (65-75 %), especialmente en zonas con menor CIC, lo que sugiere una proporción relativa insuficiente para mantener una estructura estable. Por otro lado, el magnesio alcanza saturaciones elevadas (> 20 %) en áreas puntuales, lo que puede generar efectos contraproducentes en suelos franco-limosos, favoreciendo la dispersión de arcillas.

Es fundamental entender que una concentración alta de calcio no garantiza un balance adecuado si su saturación relativa es baja. Del mismo modo, niveles moderados de concentración de magnesio pueden representar un exceso en términos de saturación si la CIC es baja. Por esta razón, las recomendaciones de corrección se basan prioritariamente en los porcentajes de saturación.

b. Recomendaciones de manejo diferenciado

Para optimizar el balance catiónico en el CE Illpa, se recomienda un enfoque adaptado a la zonificación observada en los mapas de saturación:

- **Zonas con saturación de calcio baja (< 65 %):** priorizar la aplicación de enmiendas calcáreas (cal agrícola) o yeso agrícola para elevar gradualmente la proporción de calcio en el complejo de intercambio. Estas enmiendas, además de aportar calcio, favorecen la floculación de partículas, mejorando la estructura, la infiltración y la aireación del suelo. Se recomienda incorporar las enmiendas superficialmente en presiembra y monitorear la respuesta mediante análisis periódicos.
- **Zonas con saturación de magnesio alta (> 15-20 %):** considerar la aplicación de yeso agrícola como estrategia para desplazar el magnesio del complejo de intercambio y favorecer su lixiviación controlada hacia capas más profundas. El calcio aportado por el yeso mejora la relación Ca/Mg, promoviendo la estabilidad de agregados y reduciendo problemas de dispersión. La dosis debe ajustarse según la severidad del desbalance y validarse con observaciones de campo, dada la baja predictibilidad espacial de esta variable.

- **Prácticas transversales para toda el área:** integrar el manejo del balance catiónico con la incorporación sistemática de materia orgánica, que actúa como amortiguador de cambios químicos y favorece la actividad microbiana. Evitar aplicaciones excesivas de fertilizantes que puedan alterar el equilibrio iónico sin diagnóstico previo. Realizar monitoreo periódico de la saturación de bases (cada 2-3 años) para detectar tendencias y ajustar las estrategias.
- **Validación sencilla para el agricultor:** además de los análisis de laboratorio, el productor puede evaluar visualmente el balance catiónico observando la estructura del suelo: si forma “migajones” estables al apretar un puñado de suelo húmedo, indica buena floculación (balance adecuado); si se dispersa fácilmente o forma una masa pegajosa, sugiere desbalance que requiere intervención. Asimismo, observar el comportamiento de los cultivos (desarrollo radicular, vigor vegetativo) ayuda a validar las recomendaciones en cada lote.

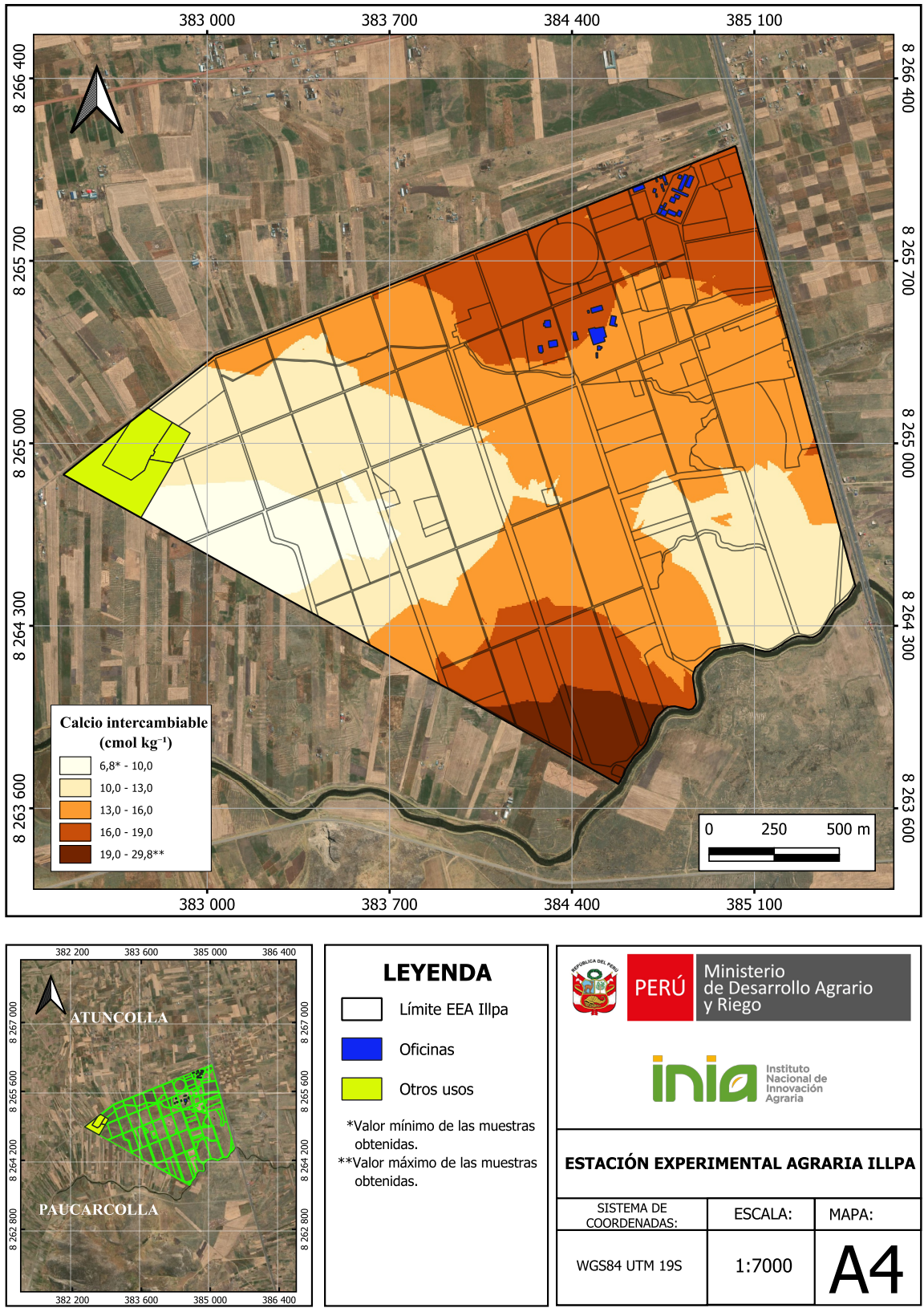


Figura 19. Mapa de variación espacial de la concentración de calcio (Ca²⁺) intercambiable

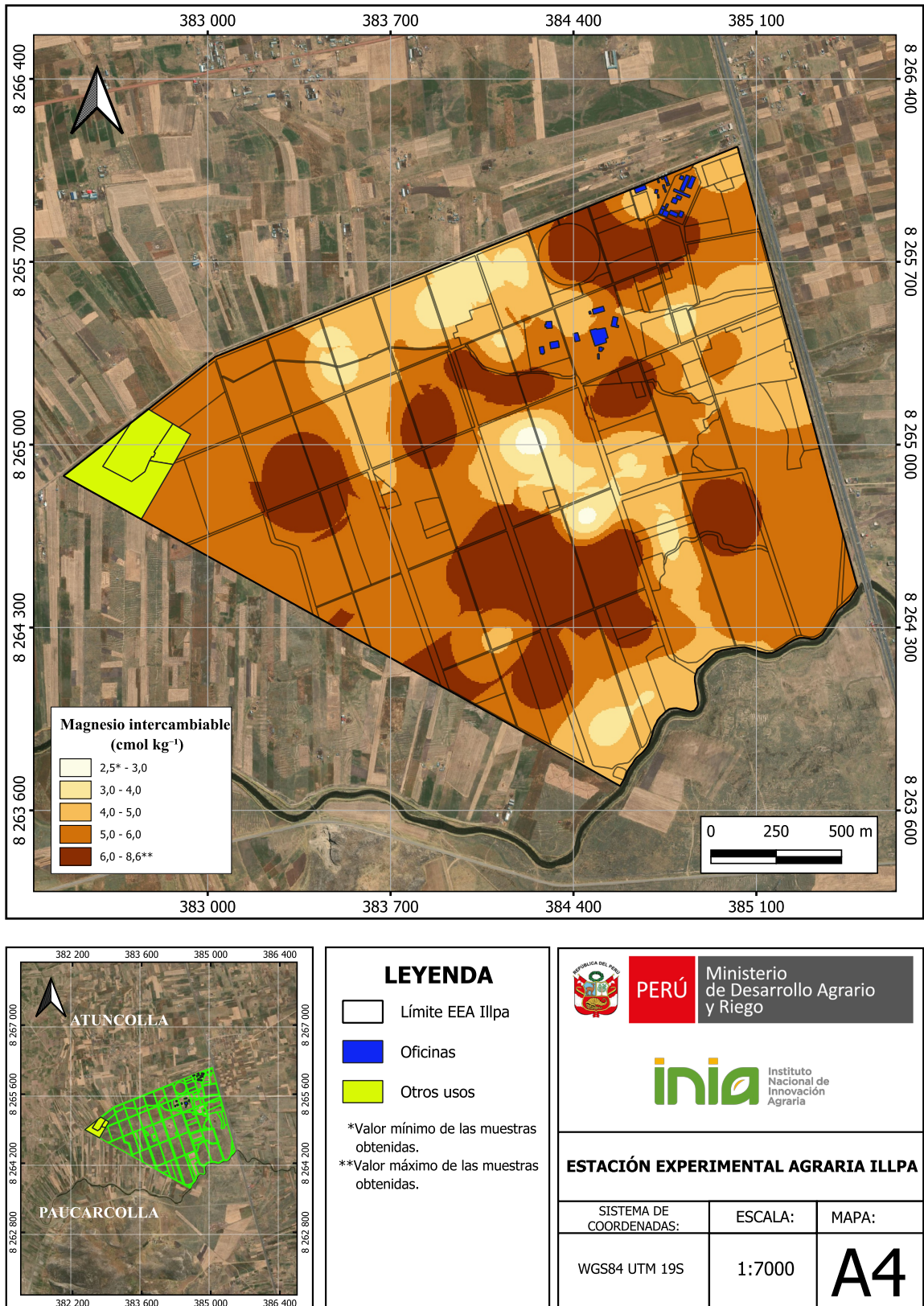


Figura 20. Mapa de variación espacial de la concentración de magnesio (Mg²⁺) intercambiable

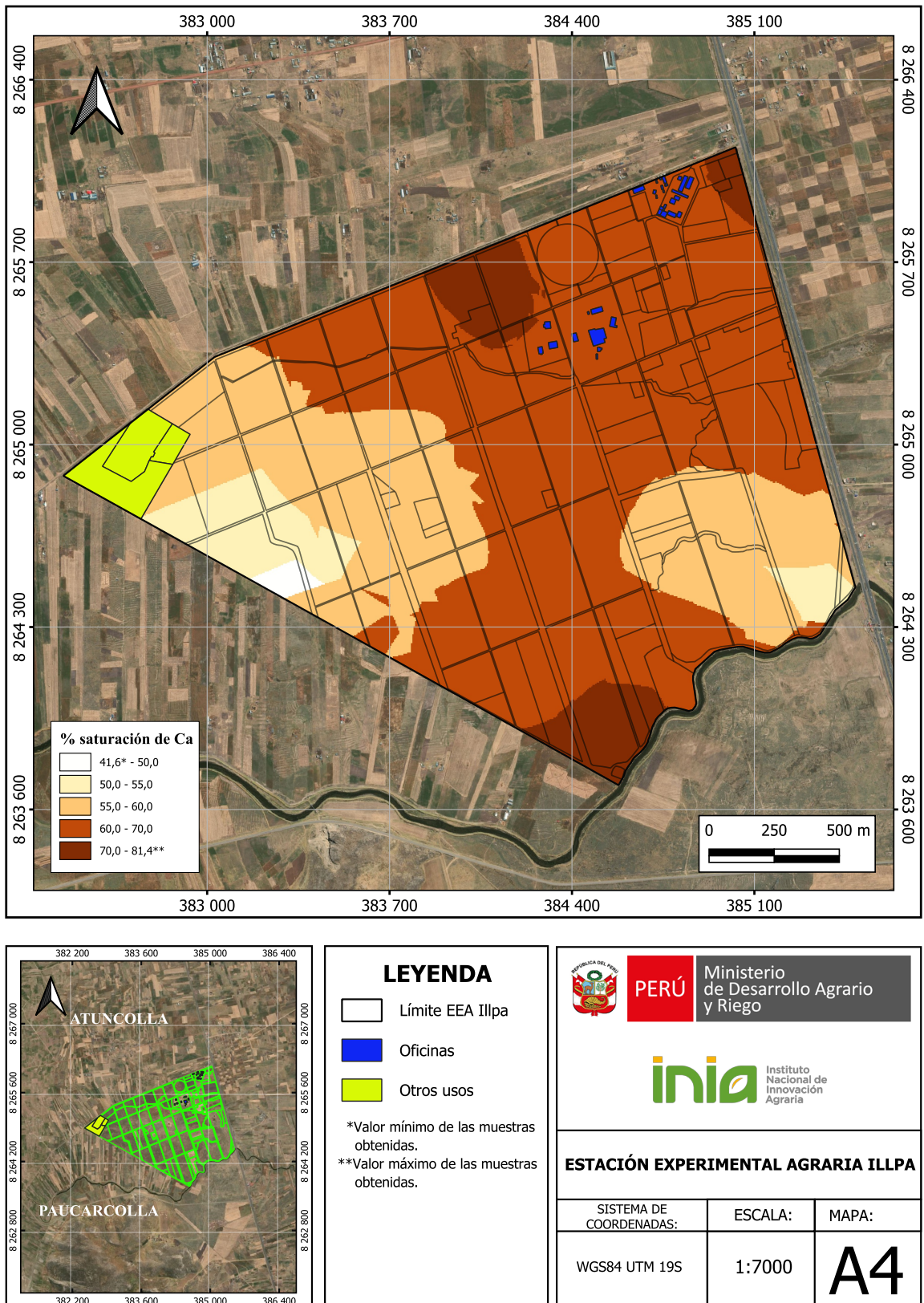
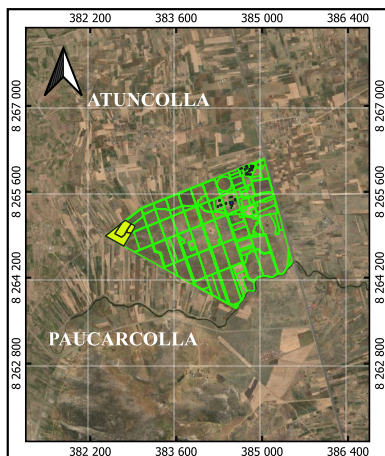
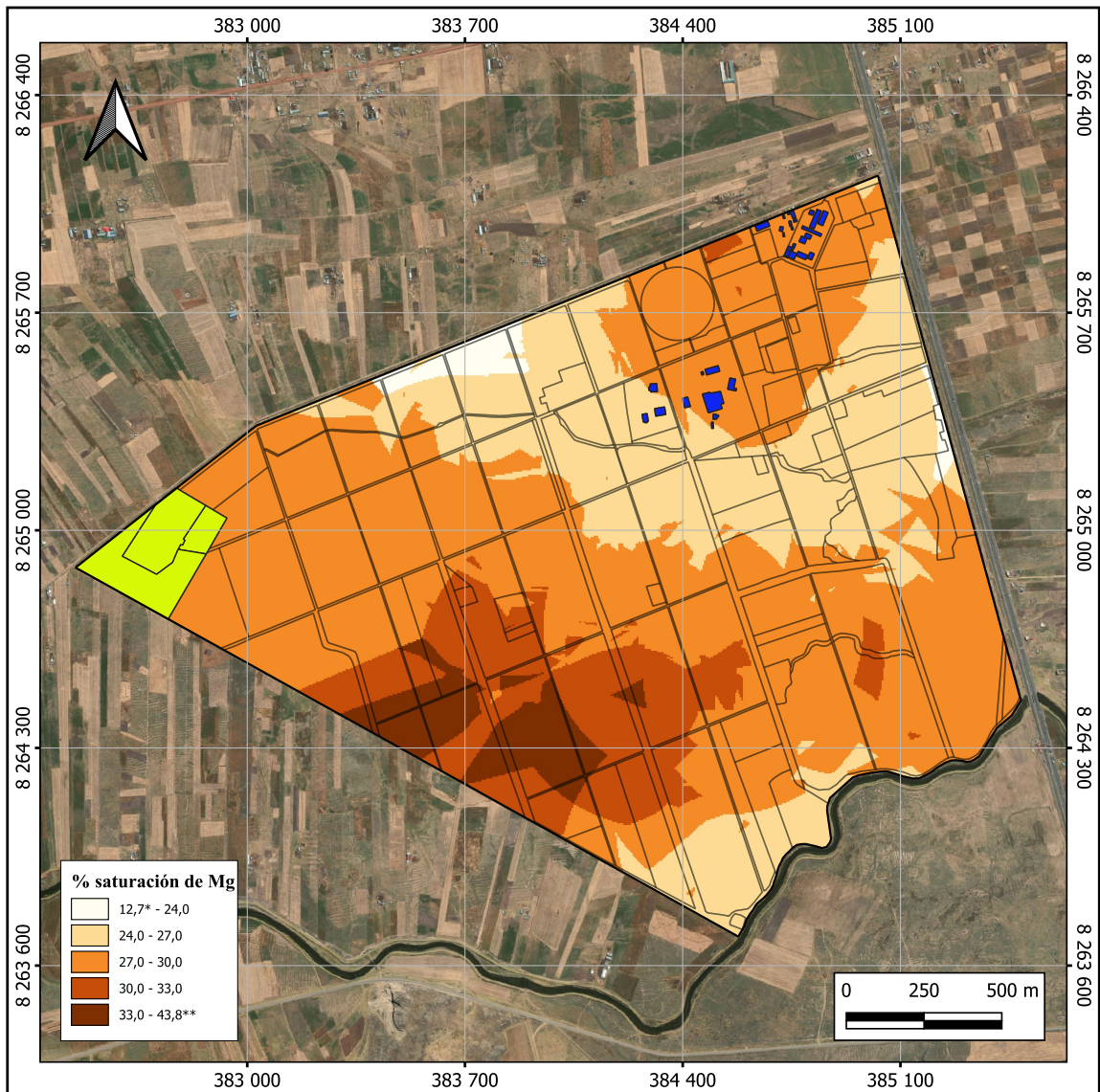


Figura 21. Mapa de variación espacial del porcentaje de saturación de calcio



LEYENDA

- Límite EEA Illpa
- Oficinas
- Otros usos

*Valor mínimo de las muestras obtenidas.
 **Valor máximo de las muestras obtenidas.

PERÚ Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego

inia Instituto Nacional de Innovación Agraria

ESTACIÓN EXPERIMENTAL AGRARIA ILLPA

SISTEMA DE COORDENADAS:	ESCALA:	MAPA:
WGS84 UTM 19S	1:7000	A4

Figura 22. Mapa de variación espacial del porcentaje de saturación de magnesio

4.3.3. Potasio: concentración, disponibilidad y saturación

a. Descripción de la variabilidad

Los mapas de potasio del CE Illpa muestran una situación generalmente favorable para la agricultura altoandina. La concentración de potasio intercambiable (Figura 23) presenta niveles moderados a altos en la mayor parte del área, lo que indica que el suelo cuenta con una reserva importante de este nutriente esencial. De manera complementaria, el mapa de potasio disponible (Figura 16) confirma que, en términos generales, las plantas pueden acceder a cantidades adecuadas para cubrir sus requerimientos durante el ciclo de cultivo.

Sin embargo, al analizar el porcentaje de saturación de potasio (Figura 24), que expresa la proporción de este catión respecto a la capacidad total de intercambio del suelo, se identifican sectores donde su participación relativa es elevada. Esta condición no necesariamente indica un problema, pero sí requiere atención: cuando el potasio ocupa una proporción muy alta del espacio de intercambio, puede dificultar la absorción equilibrada de otros cationes como el calcio y el magnesio.

Esta distribución heterogénea responde a la interacción entre la textura del suelo, el contenido de materia orgánica, el pH y, especialmente, al manejo histórico de fertilización y aplicación de estiércol en lotes específicos. Por ello, los mapas deben interpretarse de manera integrada: un valor alto de concentración no siempre implica exceso si la saturación relativa es adecuada, y viceversa.

b. Riesgos asociados

El manejo inadecuado del potasio puede generar limitaciones productivas. En sectores donde la saturación de potasio es elevada, puede presentarse antagonismo con la absorción de magnesio y calcio, afectando la estructura del suelo y la nutrición balanceada del cultivo. Este desbalance puede manifestarse visualmente en plantas con síntomas de deficiencia de magnesio (amarillamiento entre nervaduras en hojas viejas) o calcio (deformación de brotes), aun cuando estos nutrientes estén presentes en el suelo. Además, aplicar fertilizantes potásicos en zonas donde ya existe reserva suficiente representa un desperdicio económico y ambiental.

Por otro lado, en sectores menos frecuentes donde los niveles de potasio son moderados o bajos, puede observarse menor resistencia de los cultivos al estrés hídrico, a las heladas y a enfermedades, así como granos o tubérculos de menor tamaño y calidad comercial. En estos casos, la falta de reposición oportuna puede limitar el rendimiento potencial.

c. Recomendaciones de manejo diferenciado

Para optimizar el manejo del potasio en el CE Illpa, se recomienda un enfoque adaptado a la zonificación observada en los mapas de saturación:

- **Zonas con saturación de potasio elevada (> 5 %):** suspender temporalmente la fertilización potásica por 2-3 ciclos de cultivo. Monitorear la disponibilidad de magnesio y calcio mediante análisis de suelo y observación de síntomas foliares. Aprovechar la reserva existente para reducir costos sin afectar el rendimiento.
- **Zonas con saturación de potasio óptima (3-5 %):** aplicar el criterio de mantenimiento, reponiendo únicamente el potasio extraído por el cultivo. Para quinua o papa, esto equivale aproximadamente a 2,5 kg de K por tonelada de producción esperada. Fraccionar la aplicación si es posible, para mejorar la eficiencia de uso.
- **Zonas con saturación de potasio baja (< 3 %):** priorizar la fertilización potásica en presembrado o en etapas tempranas del cultivo. Usar fuentes de potasio de buena solubilidad e incorporar superficialmente para facilitar su disponibilidad. Complementar con materia orgánica para mejorar la retención del nutriente en la zona radicular.
- **Prácticas transversales:** integrar el manejo del potasio con la corrección del pH y el balance de cationes. Evitar aplicaciones masivas sin diagnóstico previo. Realizar monitoreo periódico de la saturación de bases para detectar tendencias y ajustar las estrategias.
- **Validación en campo:** el productor puede evaluar indirectamente la disponibilidad de potasio observando el vigor vegetativo, el color de las hojas y la calidad de granos o tubérculos. Plantas con tallos débiles o bordes de hojas quemados pueden indicar deficiencia; un crecimiento excesivamente vegetativo con poca formación de granos puede sugerir desbalance por exceso. Realizar parcelas de prueba con diferentes dosis ayuda a ajustar las recomendaciones a las condiciones de cada lote.

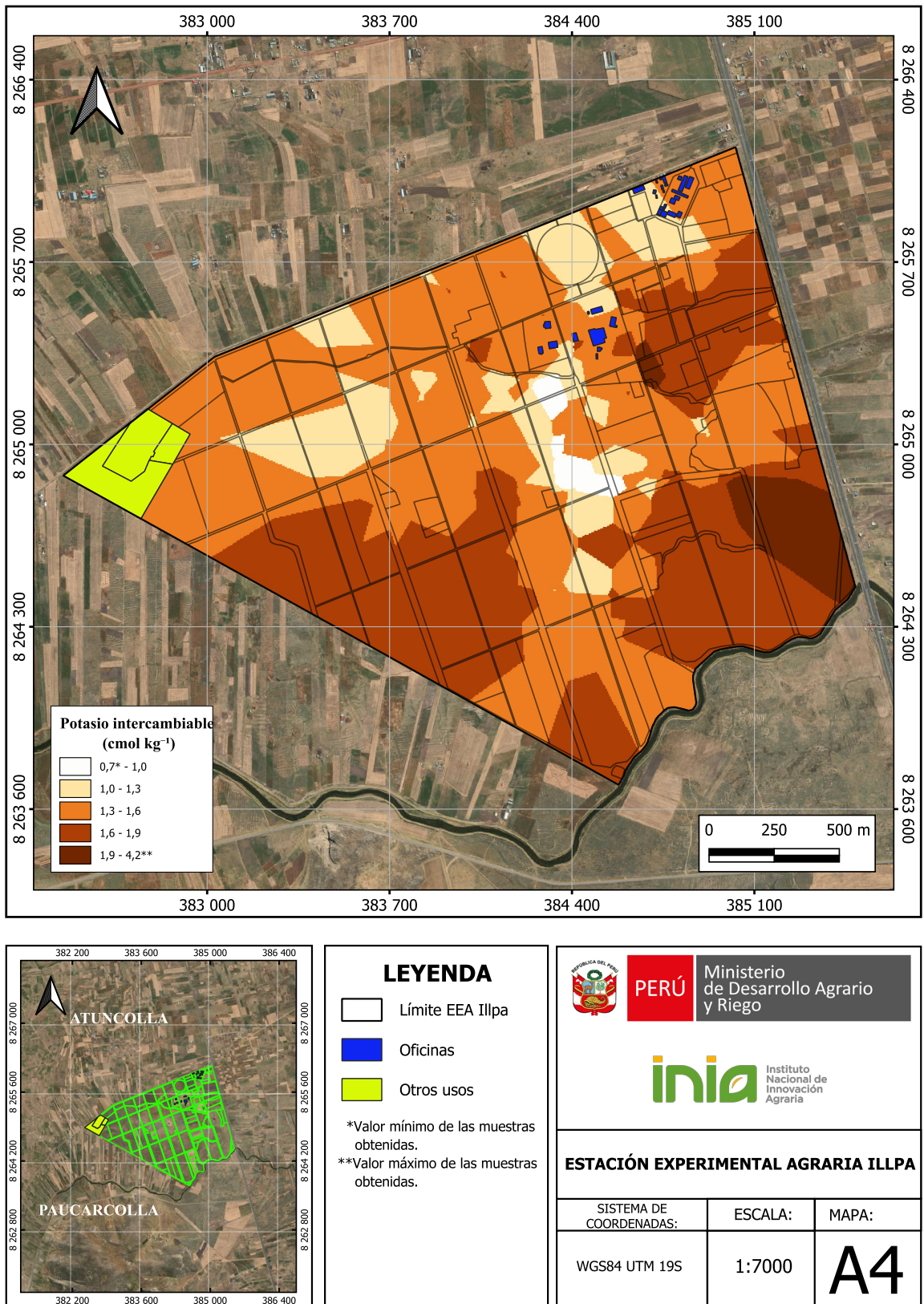
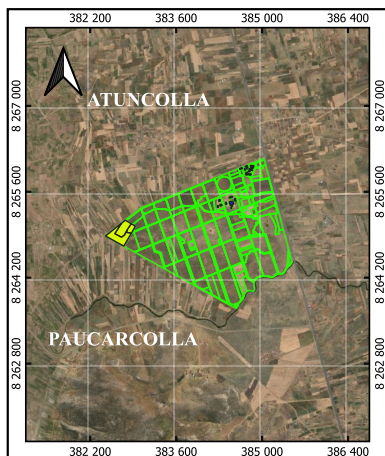
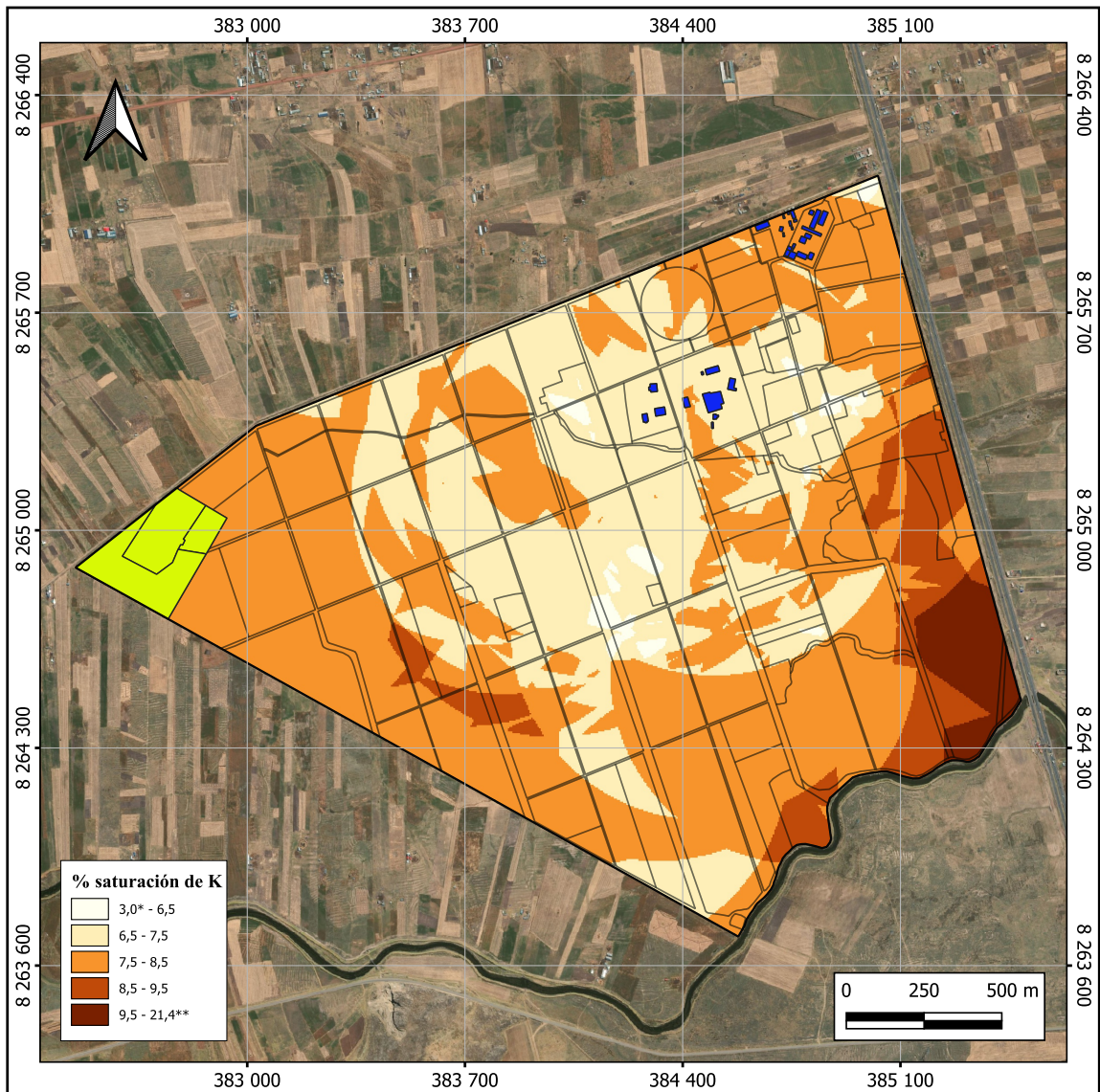


Figura 23. Mapa de variación espacial de la concentración de potasio intercambiable



LEYENDA

- Límite EEA Illpa
- Oficinas
- Otros usos

*Valor mínimo de las muestras obtenidas.
 **Valor máximo de las muestras obtenidas.

PERÚ

Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego

ESTACIÓN EXPERIMENTAL AGRARIA ILLPA

SISTEMA DE COORDENADAS:	ESCALA:	MAPA:
WGS84 UTM 19S	1:7000	A4

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

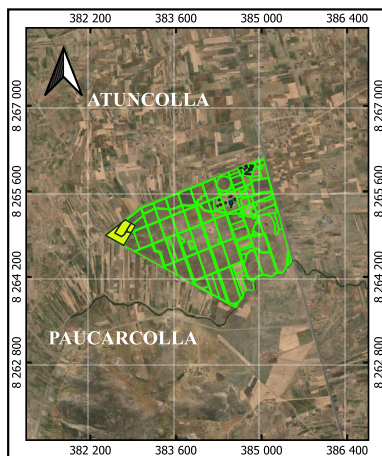
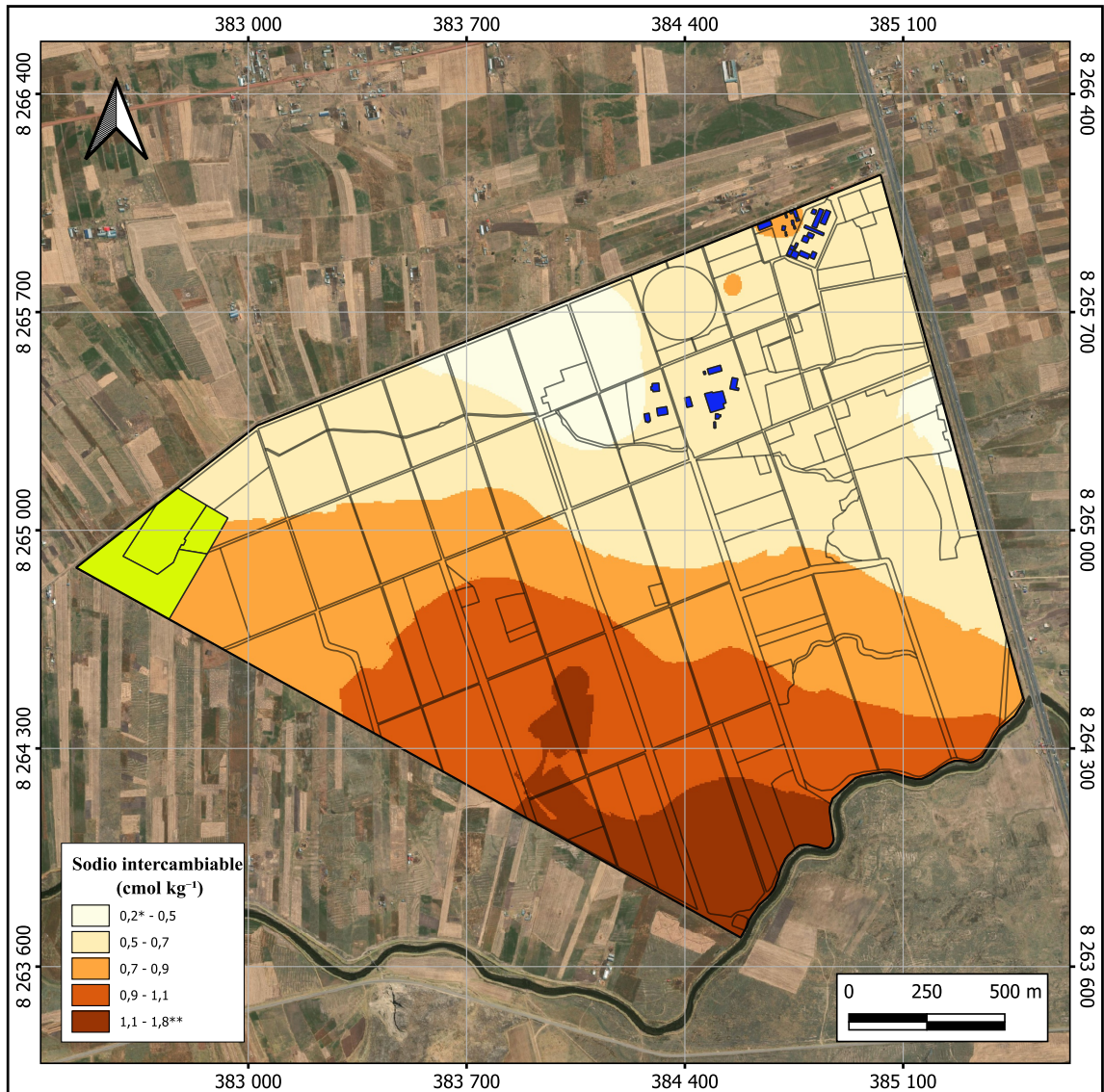
4.3.4. El sodio y el riesgo de sodificación

a. Descripción de la variabilidad integrada

Los mapas de concentración de sodio intercambiable (Figura 25) y porcentaje de saturación de sodio (Figura 26) muestran que, en general, los suelos del Centro Experimental Illpa presentan niveles bajos de este catión. La concentración de Na^+ intercambiable oscila entre valores moderados, mientras que el porcentaje de saturación de sodio (ESP) se mantiene predominantemente por debajo del 10 % en la mayor parte del área, muy por debajo del umbral crítico del 15 % que indica riesgo de sodificación.

Esta condición es favorable para la agricultura altoandina, dado que niveles bajos de sodio permiten mantener una buena estructura del suelo, facilitando la infiltración del agua, el desarrollo radicular y la actividad microbiana. Sin embargo, los mapas permiten identificar sectores puntuales donde el sodio muestra valores relativamente más elevados, generalmente asociados a zonas de acumulación de sales solubles, escaso drenaje o riego con agua de mayor conductividad.

Es importante destacar que, aunque el promedio general de saturación de sodio es bajo (3,91 %), la variabilidad observada ($\text{CV} \approx 48\%$) indica que existen diferencias locales que requieren monitoreo preventivo, especialmente en sectores con textura fina o manejo histórico de riego intensivo.



LEYENDA

- Límite EEA Illpa
- Oficinas
- Otros usos

*Valor mínimo de las muestras obtenidas.
**Valor máximo de las muestras obtenidas.

PERÚ

Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego

Instituto Nacional de Innovación Agraria

ESTACIÓN EXPERIMENTAL AGRARIA ILLPA

SISTEMA DE COORDENADAS:	ESCALA:	MAPA:
WGS84 UTM 19S	1:7000	A4

Figura 25. Mapa de variación espacial de la concentración de sodio intercambiable

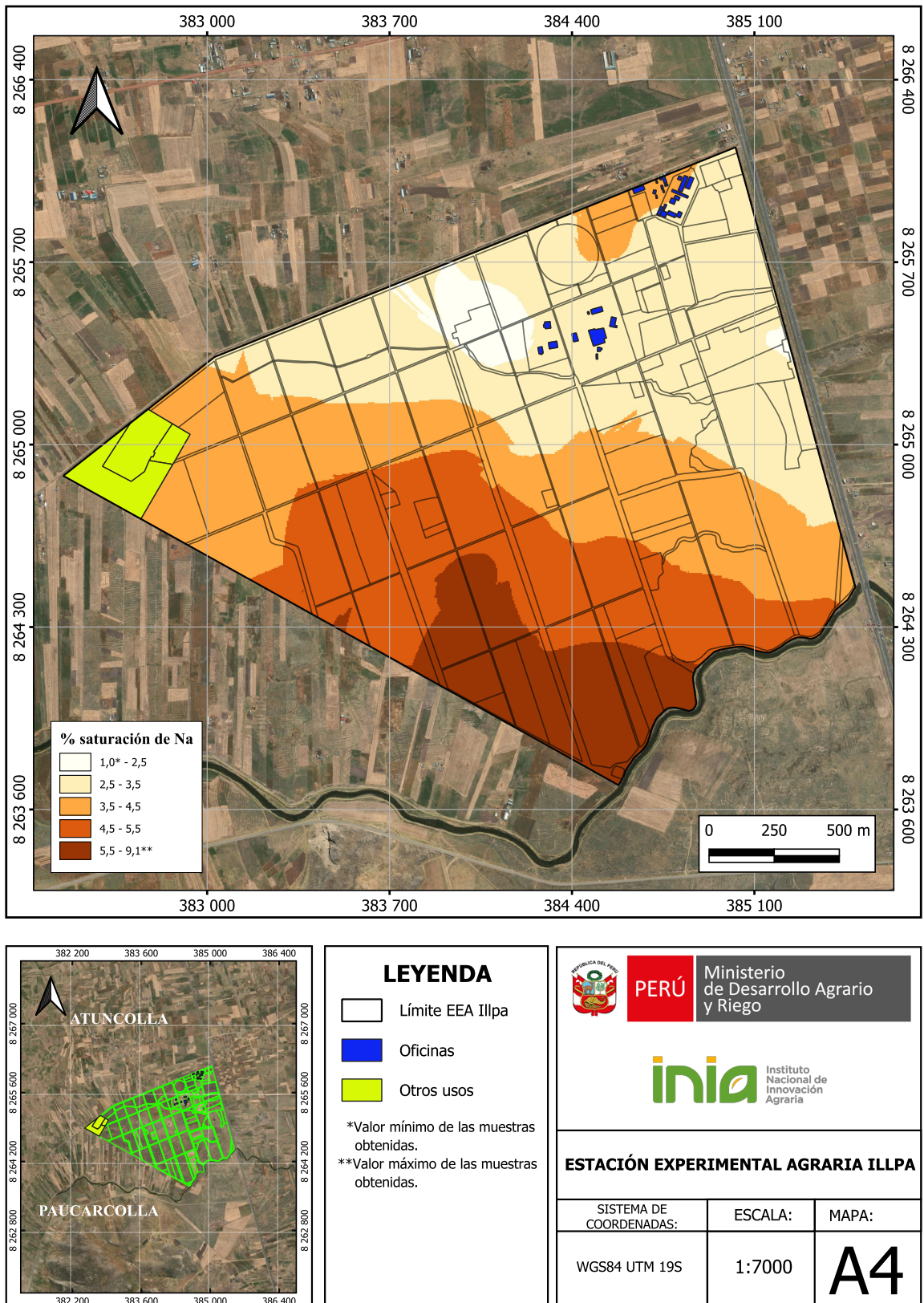


Figura 26. Mapa de variación espacial del porcentaje de saturación de sodio

b. Recomendaciones de manejo diferenciado

Para prevenir y manejar el riesgo de sodificación en la CE Illpa, se recomienda un enfoque adaptado a la zonificación observada en los mapas:

- **Zonas con saturación de sodio baja (< 5 %):** mantener prácticas de conservación del suelo (cobertura vegetal, incorporación de materia orgánica) y monitorear periódicamente la calidad del agua de riego para prevenir acumulaciones futuras. No se requieren intervenciones correctivas.
- **Zonas con saturación de sodio moderada (5-10 %):** implementar riegos de lavado ocasionales con agua de baja conductividad para movilizar sales hacia capas más profundas. Incorporar materia orgánica para mejorar la estructura y la capacidad tampón del suelo. Evitar el riego por inundación prolongada en épocas de alta evaporación.
- **Zonas con saturación de sodio cercana al límite crítico (10-15 %):** considerar la aplicación preventiva de yeso agrícola ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) para desplazar el sodio del complejo de intercambio y favorecer su lixiviación controlada. Fraccionar el riego en láminas pequeñas y frecuentes. Monitorear la conductividad eléctrica y el ESP cada campaña.
- **Prácticas transversales para toda el área:** realizar análisis periódicos de sodio intercambiable y saturación (cada 2-3 años). Integrar el manejo del sodio con la corrección del pH y el balance catiónico. Capacitar al personal técnico y a los agricultores en la identificación temprana de síntomas de sodificación.
- **Validación sencilla para el agricultor:** además de los análisis de laboratorio, el productor puede evaluar el riesgo de sodio observando:
 1. La facilidad con que el agua se infiltra en el suelo.
 2. La formación de costras blancas en superficie.
 3. La capacidad del suelo para formar “migajones” estables al apretar un puñado húmedo.

Si el suelo se dispersa fácilmente o forma una masa pegajosa, sugiere riesgo que requiere intervención.



LECO

Ministerio de Desarrollo Agropecuario, Rural y Pesquero

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.
- Bear, F. E., Prince, A. L., y Malcolm, J. L. (1945). *Potassium needs of New Jersey soils*. New Jersey Agricultural Experiment Station.
- Benzing, A. (2001). *Agricultura orgánica: Fundamentos para la región andina*. Neckar-Verlag.
- 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*, 1–10. <https://doi.org/10.1017/S1742170520000381>
- Buresh, R. J., Smithson, P. C., y Hellums, D. T. (1997). Building Soil Phosphorus Capital in Africa. En R. J. Buresh, P. A. Sanchez, y F. Calhoun (Eds.), *Replenishing Soil Fertility in Africa* (pp. 111-149). Soil Science Society of America, Inc; American Society of Agronomy, Inc. https://apps.worldagroforestry.org/Units/Library/Books/PDFs/91_Replenishing_soil_fertility_in_africa.pdf
- Chaganti, V., y Culman, S. (2017). Historical perspective of soil balancing theory and identifying knowledge gaps: A review. *Crop, Forage & Turfgrass Management*, 3(1), 1-7. <https://doi.org/10.2134/cftm2016.10.0072>
- Charan, G., Bharti, V. K., Jadhav, S. E., Kumar, S., Acharya, S., Kumar, P., Gogoi, D., y Srivastava, R. B. (2013). Altitudinal variations in soil physico-chemical properties at cold desert high altitude. *Journal of soil science and plant nutrition*, 13(2), 267-277. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-95162013005000023>
- 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/>
- Condori-Castillo, G. (2012). Influencia de la Fragmentación en la Diversidad de la Flora Silvestre y en los Cambios de Uso de Suelo y Cobertura Vegetal en Huerta Huaraya, Puno. *Ecosistemas*, 21(1-2), 230-234. <https://revistaecosistemas.net/index.php/ecosistemas/article/view/369>
- 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., 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/agj2.20995>
- 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 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>

- Loza, A. (2021). Multitemporal analysis of plant associations and land use changes in a high Andean locality, Puno-Peru. *Uniciencia*, 35, 1-19. <https://doi.org/10.15359/ru.35-2.3>
- 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>
- McBratney, A. B., Mendonça-Santos, M. L., y Minasny, B. (2003). On digital soil mapping. *Geoderma*, 117 (1-2), 3-52. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(03\)00223-4](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(03)00223-4)
- McLean, E. O. (1977). Contrasting concepts in soil test interpretation: Sufficiency levels of available nutrients versus basic cation saturation ratios. *Soil testing: correlating and interpreting the analytical results*, 29, 39-54. <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>
- Moya Sucari, R. P. (2024). *Clasificación y evaluación de la calidad de los suelos en la Estación Experimental Agraria Illpa—INIA, región Puno* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional del Altiplano]. Repositorio institucional de la Universidad Nacional del Altiplano. <https://repositorio.unap.edu.pe/handle/20.500.14082/21811>
- Niebla-Torres, R. E., Barrezueta-Unda, S., Luna-Romero, Á., y Chabla-Carrillo, J. (2021). Aplicación de modelos geoestadísticos para definir la variabilidad de un perfil del suelo. *Revista Metropolitana de Ciencias Aplicadas*, 4(1), 188-195. <https://doi.org/10.62452/zx01j782>
- Oficina Nacional de Evaluación de Recursos Naturales y Corporación de Desarrollo y Promoción Social y Económica del Departamento de Puno. (1965a). Compendio. En *Programa de inventario y evaluación de los recursos naturales del departamento de Puno: Sector de prioridad I* (Vol. 1, pp.1-152). <https://repositorio.ana.gob.pe/item/ddd68385-8fa1-45f5-b582-cc1f4a6fa0f9>
- Oficina Nacional de Evaluación de Recursos Naturales y Corporación de Desarrollo y Promoción Social y Económica del Departamento de Puno. (1965b). Climatología. En *Programa de inventario y evaluación de los recursos naturales del departamento de Puno: Sector de prioridad I* (Vol. 1, pp.153-202). <https://repositorio.ana.gob.pe/item/ddd68385-8fa1-45f5-b582-cc1f4a6fa0f9>
- Oficina Nacional de Evaluación de Recursos Naturales y Corporación de Desarrollo y Promoción Social y Económica del Departamento de Puno. (1965c). Suelos. En *Programa de inventario y evaluación de los recursos naturales del departamento de Puno: Sector de prioridad I* (Vol. 3, pp.1-93). <https://repositorio.ana.gob.pe/item/ddd68385-8fa1-45f5-b582-cc1f4a6fa0f9>
- Pebesma, E. J., y Bivand, R. S. (2005). Classes and methods for spatial data in R. *R News*, 5(2), 9–13. <http://cran.r-project.org/doc/Rnews/>
- Pierre, W. H., y Banwart, W. L. (1973). Excess-Base and Excess-Base/Nitrogen Ratio of Various Crop Species and Parts of Plants. *Agronomy Journal*, 65(1), 91-96. <https://doi.org/10.2134/agronj1973.00021962006500010028x>

- 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.
- Reza, S. K., Nayak, D. C., Mukhopadhyay, S., Chattopadhyay, T., y Singh, S. K. (2017). Characterizing spatial variability of soil properties in alluvial soils of India using geostatistics and geographical information system. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 63(11), 1489–1498. <https://doi.org/10.1080/03650340.2017.1296134>
- Sardon, S., Loaiza-Usuga, J. C., Varga, D., y Pari, Y. (2024). Characterization of the “Waru Waru” soils on the Peruvian high plateau. *Soil Science Annual*, 75, 1-11. <https://doi.org/10.37501/soilsa/184338>
- 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>
- Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú. (2025). Descarga de datos meteorológicos [Dataset]. <https://www.senamhi.gob.pe/site/descarga-datos/>
- Wang, C., y Kuzyakov, Y. (2024). Soil organic matter priming: The pH effects. *Global Change Biology*, 30(6), 1-21. <https://doi.org/10.1111/gcb.17349>
- Yang, M., Zhou, D., Hang, H., Chen, S., Liu, H., Su, J., y Zhao, G. (2024). Effects of balancing exchangeable cations Ca, Mg, and K on the growth of tomato seedlings (*Solanum lycopersicum* L.) based on increased soil cation exchange capacity. *Agronomy*, 14(3), 1-13. <https://doi.org/10.3390/agronomy14030629>
- Zhang, G. Q. (1999). *Effects of exchangeable soil calcium, magnesium and calcium/magnesium ratios on plant nutrition and growth of lettuce on an ultisol* [Thesis submitted to obtain the degree of Master of Science in Agronomy and Soil Science]. University of Hawai'i at Manoa. <https://scholarspace.manoa.hawaii.edu/items/8a99ab1e-dcd5-4822-9889-c99836d9526a>

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



Ver nuestro alcance
de acreditación



Ver nuestros servicios



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











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

ISBN: 978-9972-44-256-8



PERÚ

Ministerio
de Desarrollo Agrario
y Riego

inia

Instituto
Nacional de
Innovación
Agraria

      @INIAPeru