

Colque Fuentes, Oscar; Muriel Hernández, Beatriz

Working Paper

Análisis de fertilidad de suelos en parcelas de producción de quinua orgánica en comunidades del Altiplano Sur de Bolivia

Development Research Working Paper Series, No. 20/2024

Provided in Cooperation with:

Institute for Advanced Development Studies (INESAD), La Paz

Suggested Citation: Colque Fuentes, Oscar; Muriel Hernández, Beatriz (2024) : Análisis de fertilidad de suelos en parcelas de producción de quinua orgánica en comunidades del Altiplano Sur de Bolivia, Development Research Working Paper Series, No. 20/2024, Institute for Advanced Development Studies (INESAD), La Paz

This Version is available at:

<https://hdl.handle.net/10419/311561>

Standard-Nutzungsbedingungen:

Die Dokumente auf EconStor dürfen zu eigenen wissenschaftlichen Zwecken und zum Privatgebrauch gespeichert und kopiert werden.

Sie dürfen die Dokumente nicht für öffentliche oder kommerzielle Zwecke vervielfältigen, öffentlich ausstellen, öffentlich zugänglich machen, vertreiben oder anderweitig nutzen.

Sofern die Verfasser die Dokumente unter Open-Content-Lizenzen (insbesondere CC-Lizenzen) zur Verfügung gestellt haben sollten, gelten abweichend von diesen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Terms of use:

Documents in EconStor may be saved and copied for your personal and scholarly purposes.

You are not to copy documents for public or commercial purposes, to exhibit the documents publicly, to make them publicly available on the internet, or to distribute or otherwise use the documents in public.

If the documents have been made available under an Open Content Licence (especially Creative Commons Licences), you may exercise further usage rights as specified in the indicated licence.

**INSTITUTO DE ESTUDIOS AVANZADOS EN
DESARROLLO**



**ANÁLISIS DE FERTILIDAD DE SUELOS EN
PARCELAS DE PRODUCCIÓN DE QUINUA
ORGÁNICA EN COMUNIDADES DEL
ALTIPLANO SUR DE BOLIVIA**

Por:

Oscar Colque Fuentes

Beatriz Muriel Hernandez

Serie Documentos de Trabajo sobre Desarrollo

No. 20/2024

Noviembre, 2024

Las opiniones expresadas en este documento les pertenecen a sus autores y no necesariamente reflejan la posición oficial de las instituciones auspiciadoras ni de la Fundación INESAD (Instituto de Estudios Avanzados en Desarrollo). Los derechos de autor le pertenecen al autor y/o a las instituciones auspiciadoras, si las hubiere. El documento solamente puede ser descargado para uso personal.

ANÁLISIS DE FERTILIDAD DE SUELOS EN PARCELAS DE PRODUCCIÓN DE QUINUA ORGÁNICA EN COMUNIDADES DEL ALTIPLANO SUR DE BOLIVIA*

Oscar Colque Fuentes**

Beatriz Muriel Hernández***

Resumen

En el presente documento se realizó un análisis de la fertilidad de suelos para 75 parcelas cultivadas con quinua orgánica en comunidades del Altiplano Sur de Bolivia durante octubre de 2022 y mayo de 2023. Los principales resultados muestran que el 96% de los suelos presentaron texturas con alto contenido de arena, mayor proporción de suelos con pH muy alcalinos (83%) que reflejan una alta concentración de bases en el suelo, y valores de conductividad eléctrica no salina en la mayoría de las muestras analizadas (89%). La materia orgánica y el nitrógeno total presentaron valores muy bajos en el 97% de las muestras analizadas. También se estimó una relación de C/N categorizada como baja, lo que conlleva una pérdida acelerada de la materia orgánica, en particular en suelos arenosos y de baja fertilidad que predominan en el área de estudio. Se encontró déficit de los elementos siguientes: fósforo, hierro, cobre y zinc. Se cuantificaron valores desde moderados a muy altos para el potasio, el azufre, el calcio y el manganeso. El contenido de boro se cuantificó como muy alto. La capacidad de intercambio catiónico (CIC) presentó reportes variables, desde valores muy bajos hasta contenidos altos. En orden de importancia, los parámetros que obtuvieron mayor correlación y significancia fueron: materia orgánica, calcio, azufre, boro, arena y capacidad de intercambio catiónico. El 65,9% de la variabilidad de suelos se concentró en los primeros cuatro componentes principales. Los parámetros edáficos más relevantes relacionados con el primer componente fueron: materia orgánica, calcio, CIC, azufre, boro y arena. El contenido de arena se determinó como negativo en los componentes uno y dos. Este resultado explica claramente que los suelos con menor proporción de arena presentan mayor fertilidad. El 80% de las muestras analizadas se caracterizaron como suelos de baja fertilidad, donde el principal factor restrictivo corresponde a la falta de materia orgánica. Estos resultados explican, en buena medida, el bajo rendimiento reportado en las zonas de estudio. A mediano y largo plazo, se recomienda implementar una

* Proyecto *Creating Indigenous Women's Green Jobs Under Low-Carbon COVID-19 Responses and Recovery in the Bolivian Quinoa Sector*, que es auspiciado por el programa *Economías Inclusivas Sostenibles* del Centro Internacional de Investigaciones para el Desarrollo (IDRC) de Canadá, y que está siendo ejecutado bajo la coordinación de la Fundación INESAD.

** Asesor técnico en fertilidad de suelos y nutrición de cultivos, Investigador invitado en la Fundación INESAD

*** Directora ejecutiva de la Fundación INESAD. bmuriel@inesad.edu.bo

estrategia integral para regenerar los suelos con base en la restauración de cobertura nativa, con estrategias locales que permitan multiplicar especies nativas en viveros comunitarios, además de permitir implementar descansos mejorados del terreno con especies leguminosas, aplicar abonos orgánicos compostados localizados, difusión de conocimientos a través de parcelas demostrativas, capacitación y formación de recursos humanos en manejo sostenible del agua, así como en fertilidad y salud del suelo.

Palabras claves: Fertilidad de suelos, materia orgánica, quinua orgánica.

Códigos JEL: C19, C42, O13, Q15

I. INTRODUCCIÓN

La quinua (*Chenopodium quinoa* Wild) es una de las especies emblemáticas de la producción orgánica en la región del Altiplano Sur de Bolivia. También se cultiva en otros países de la región como Perú y Ecuador, bajo sistemas de producción convencional. La producción orgánica de la quinua y otras especies es fundamental para la sostenibilidad económica y ecológica de la agricultura (Haneklaus *et al.*, 2005), ya que promueve la vida del suelo y contribuye a mantener y mejorar la fertilidad edáfica.

La superficie cultivada con quinua –orgánica y convencional– en Bolivia se incrementó desde finales de la década de 1970, se aceleró alrededor de 2005 y experimentó un *boom* entre 2012 y 2015, incentivada principalmente por el aumento de los precios en el contexto internacional (Collao y Muriel, 2024).

En el año 2022, Bolivia registró la mayor superficie cultivada en comparación con los países andinos, con 121.119 has (FAOSTAT, 2023; INE). Sin embargo, el incremento de área estuvo asociado a una caída sistemática del rendimiento, mientras que en Perú y Ecuador ocurrió lo contrario. Durante 2018 y 2022 el nivel de rendimiento promedio fue de 517 kg/ha; mientras que en el mismo periodo, Perú y Ecuador reportaron niveles de 1.477 kg/ha y 1.083 kg/ha, respectivamente (FAOSTAT, 2023; Collao y Muriel, 2024).

En las comunidades del Altiplano Sur de Bolivia que trabajan bajo la Certificación de Comercio Justo, el rendimiento de la quinua orgánica osciló entre 411 kg/ha y 779 kg/ha en 2022, con un promedio de 595 kg/ha. Este valor reportado equivale al 56% de su potencial productivo, que ha sido cuantificado en 1.064 kg/ha (Red Quinoa, 2023).

En general, la menor productividad de los cultivos se relaciona con la pérdida de la fertilidad de los suelos, lo cual es originado por diferentes factores como el agotamiento de la materia orgánica y los nutrientes esenciales, la reducción de la biodiversidad del suelo y la erosión eólica o hídrica (Pennock y McKenzie, 2016). En este sentido, los suelos con alta fertilidad pueden suministrar nutrientes por un tiempo, pero cuando son bajos, es necesario reponer nutrientes a través del abonamiento para mantener los rendimientos.

En el caso del Altiplano Sur de Bolivia, el incremento de las áreas cultivadas con quinua está asociado a la pérdida de la fertilidad de los suelos, a la menor cobertura vegetal nativa, a la reducción de la población de camélidos y al deterioro del ecosistema.

La pérdida de la fertilidad de los suelos se puede medir a partir del cambio en las propiedades químicas, físicas y biológicas. También es factible evaluar el equilibrio de

los nutrientes y las relaciones catiónicas. Uno de los métodos más eficientes y confiables para realizar un diagnóstico correcto es el análisis de suelos (Méndez y Bertsch, 2012).

El análisis de suelos permite medir la disponibilidad de nutrientes en el suelo, identificar los factores edáficos restrictivos de la producción agrícola, cuantificar el déficit o suficiencia de los macro y micronutrientes, predecir la respuesta a diferentes prácticas de manejo y contribuir en la elaboración de recomendaciones de adición de enmiendas y nutrientes, tanto para sistemas convencionales como orgánicos. Todo comienza desde el muestreo de los suelos en el campo, pasa por el diagnóstico en laboratorio y finaliza en la interpretación correcta y rigurosa de los resultados.

El presente documento de trabajo se realizó con el objetivo de evaluar la fertilidad de los suelos en parcelas de producción de quinua orgánica en comunidades de la región del Altiplano Sur de Bolivia.

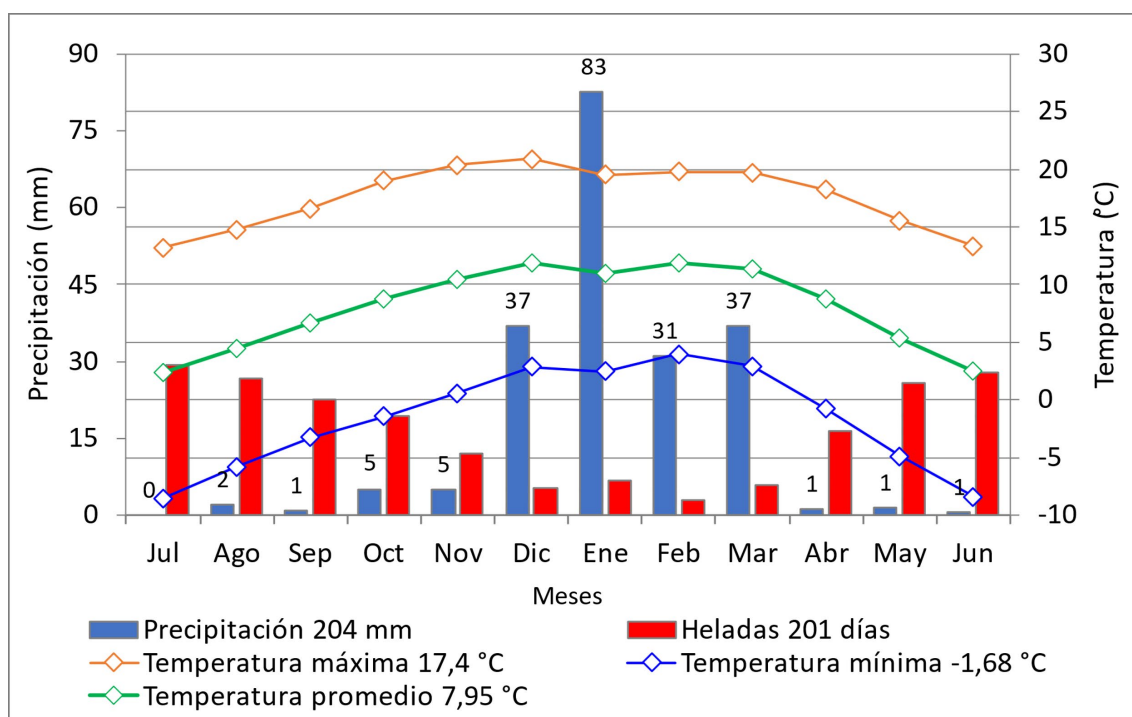
II. METODOLOGÍA

Ubicación geográfica y características climáticas y edáficas del área de estudio

El presente estudio se realizó en la región del Altiplano Sur de Bolivia, en comunidades de los municipios de Salinas de Garci Mendoza, Pampa Aullagas, Uruni y Colcha K de los departamentos de Oruro y Potosí. Esta región se encuentra aproximadamente a 3.700 metros sobre el nivel del mar, bajo condiciones de frío extremo, precipitación pluvial mínima e irregular, temperaturas bruscas durante el día y la noche, vientos fuertes y radiación intensa. El clima, según la clasificación climática de Thornthwaite, corresponde a un área de naturaleza desértica.

La Figura 1 presenta la precipitación pluvial y las temperaturas para el periodo 1947-2012, estimadas a partir de datos de Campero (2016). Las temperaturas máxima, mínima y media registraron promedios de 17,4 °C, -1,68 °C y 7,95 °C, respectivamente, con una frecuencia de 201 heladas por año.

Figura 1: Altiplano Sur de Bolivia: Precipitación, temperaturas y heladas, 1947-2012



Fuente: Elaboración propia a partir de datos de Campero (2016).

La precipitación acumulada por año se cuantificó en 204 mm. Además, el 92% se presentó durante el periodo de diciembre a marzo, con el pico en el mes de enero. En contraste, los meses con menores temperaturas y mayor frecuencia de heladas se

registran entre junio y agosto, aunque también existen heladas en los restantes meses del año.

Muestreo de suelos y variables edáficas bajo análisis

El trabajo de muestreo de suelos y análisis de las variables edáficas se inició en octubre de 2022 y finalizó en mayo de 2023. En la primera etapa se realizó la selección y ubicación de las parcelas; posteriormente se realizó el muestreo en campo y finalmente se enviaron las muestras al laboratorio. Una vez obtenidos los resultados, se procedió a la sistematización en una base de datos de variables edáficas para su respectiva interpretación y recomendación de los reportes analíticos, organizados por variables y áreas.

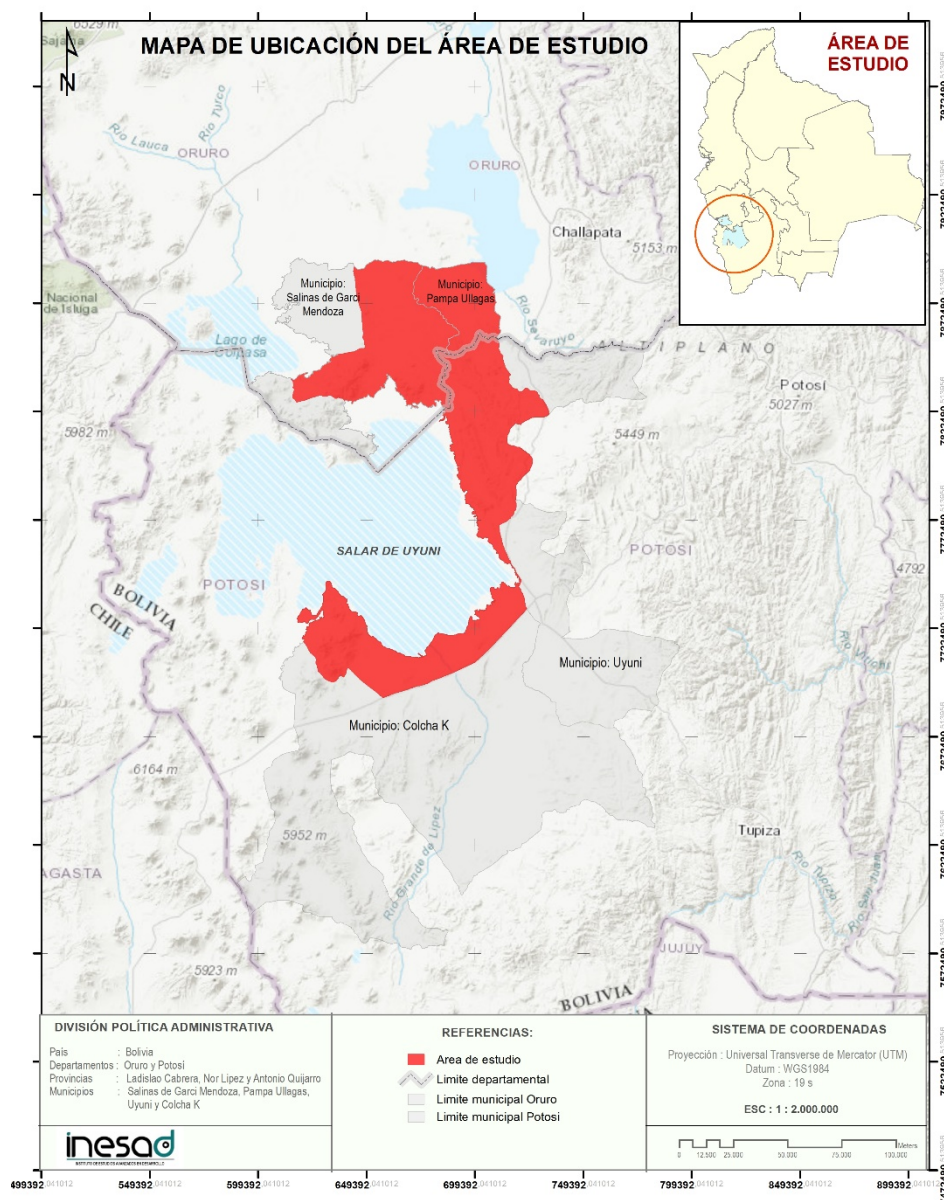
El trabajo con el equipo técnico y las comunidades productoras de quinua permitió seleccionar 75 parcelas para la obtención de muestras de suelo, las cuales son identificadas en la Tabla 1 y el Mapa 1.

Tabla 1. Ubicación de las parcelas para el muestreo de suelos

Departamento	Provincia	Municipio	Comunidad	Productores
Oruro	Ladislao Cabrera	Salinas de Garci Mendoza	Capura (Cap)	6
			Chalgua (Cha)	10
			Florida (Flo)	13
			Otuyo (Otu)	1
			Rodeo (Rod)	9
			Sigualaca (Sig)	2
			Tolamayu (Tol)	1
		Pampa Aullagas	Bengal Vinto (BVo)	7
	Cercado	Cercado	Santa Ana (SAn)	1
Potosí	Antonio Quijarro	Uyuni	Bella Vista (BVa)	13
			Tuzqui (Tuz)	1
			Vinto (Vin)	1
			Vintuta (Vin)	7
	Nor Lípez	Colcha K	Atulcha (Atu)	2
			Villa Candelaria (VCa)	1
Total	4	5	15	75

Fuente: Elaboración propia.

Mapa 1. Ubicación geográfica de las parcelas para el muestreo de suelos



Fuente: Elaboración propia.

Siguiendo el procedimiento para el muestreo de suelos, de cada parcela seleccionada se obtuvo una muestra compuesta de 20 submuestras. La profundidad y patrón de muestreo fue de 20 cm y en zigzag, respectivamente. En cada caso, una vez obtenida la muestra compuesta, esta fue homogeneizada por el método del cuarteo hasta contar con una cantidad de 500 g. Las muestras se acondicionaron en doble bolsa, donde se colocaron las etiquetas de identificación. Posteriormente se las enviaron al laboratorio CETABOL¹.

¹ Centro Tecnológico Agropecuario en Bolivia, ubicado en el municipio de Okinawa del departamento de Santa Cruz.

Se analizaron un total de 19 variables edáficas (Tabla 2), de los cuales 14 están relacionados a la fertilidad química, dos a la fertilidad biológica y tres a la fertilidad física.

Tabla 2. Variables edáficas y métodos utilizados en el análisis de laboratorio

Nro	Variables edáficas	Unidad	Método utilizado
1	PH	-	Potenciometría
2	Conductividad eléctrica	µmho/cm	Potenciometría
3	Arcilla (Y)	%	Densímetro de Bouyoucus
4	Limo (L)	%	Estequiometría
5	Arena (A)	%	Gravimetría
6	Materia orgánica (MO total)	%	Walkley Black
7	Nitrógeno total (N total)	%	Micro Kjeldahl – Volumetría
8	Fósforo (P)	mg/kg	Olsen-Colorimetría
9	Azufre (S)	mg/kg	Turbidimetría
10	Potasio intercambiable (K)	cmol/kg	Acetato de amonio-Espectrofotometría
11	Calcio intercambiable (Ca)	cmol/kg	Acetato de amonio-Espectrofotometría
12	Magnesio intercambiable (Ca)	cmol/kg	Acetato de amonio-Espectrofotometría
13	Sodio intercambiable (Na)	cmol/kg	Acetato de amonio-Espectrofotometría
14	Capacidad de intercambio catiónico	cmol/kg	Estequiometría
15	Hierro	mg/kg	Mehlich 1 – Espectrofotometría
16	Manganeso	mg/kg	Mehlich 1 – Espectrofotometría
17	Cobre	mg/kg	Mehlich 1 – Espectrofotometría
18	Zinc	mg/kg	Mehlich 1 – Espectrofotometría
19	Boro	mg/kg	Azometina-H – Colorimetría

Fuente: CETABOL (2023).

A partir de los reportes analíticos de laboratorio, se procedió a construir la base de datos de las variables edáficas y a interpretar los resultados de acuerdo a parámetros de referencia (CETABOL, 2023), como se observa en la Tabla 3. Para la interpretación a nivel de comunidades, se consideró un número de muestras o parcelas igual o mayor a seis; aunque en las figuras de los resultados –expuestas en la siguiente sección– se exponen todas las comunidades.

Tabla 3. Parámetros de referencia para la interpretación del análisis de suelos

pH		Conductividad eléctrica (µmho/cm)	
< 5,2	Fuertemente ácido	< 330	No salino
5,20 - 5,90	Moderadamente ácido	330 - 570	Débilmente salino
5,90 - 6,50	Suavemente ácido	570 - 1060	Moderadamente salino
6,50 - 7,0	Neutro	1.060 - 2.040	Fuertemente salino
7,0 - 7,50	Suavemente alcalino	> 2.040	Muy fuertemente salino
7,50 - 8,0	Moderadamente alcalino		
> 8,0	Fuertemente alcalino		

Variable edáfica	Unidad	Muy bajo	Bajo	Moderado	Alto	Muy alto
Materia orgánica (MO)	%	<1,2	1,2-2,4	2,4-4,2	4,2-6,0	>6,0
Nitrógeno total (N total)	%	<0,06	0,06-0,12	0,12-0,21	0,21-0,30	>0,30
Relación C/N	-	<6	6-10	10-12	12-15	>15
Fósforo (P)	mg/kg	<5	5-10	10-17	17-25	>25
Potasio (K)	cmol/kg	< 0,20	0,20-0,40	0,40-0,70	0,70-1,0	> 1,0
Calcio (Ca)	cmol/kg	< 2,40	2,40-4,80	4,80-8,40	8,40-12	> 12
Magnesio (Mg)	cmol/kg	< 0,40	0,40- 0,80	0,80-1,40	1,40-2,0	> 2,0
Sodio (Na)	cmol/kg	< 0,20	0,20-0,40	0,40-0,7	0,7-1,0	> 1,0
CIC	cmol/kg	< 6	6-12	12-25	25-40	> 40
Saturación de sodio	%	<7	7-15	15-20	20-30	> 30
Saturación de bases	%	< 20	20-40	40-60	60-80	> 80
Hierro	mg/kg	< 9	9-18	18-32	32-45	> 45
Manganeso	mg/kg	< 3	3-6	6-11	11-15	> 15
Cobre	mg/kg	< 0,6	0,6-1,2	1,2-2,1	2,1-3	> 3
Zinc	mg/kg	< 0,3	0,3-0,6	0,6-1,1	1,2-1,5	> 1,5
Boro	mg/kg	< 0,2	0,2-0,4	0,4-0,7	0,7-1,0	> 1,0

Fuente: CETABOL (2023) y Sánchez (2011).

Nota: CIC = Capacidad de Intercambio Catiónico.

Por último, se calculó el índice de fertilidad del suelo con base en la metodología propuesta por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC, 2014), a partir de las variables edáficas pH, materia orgánica, nitrógeno, fósforo, potasio, capacidad de intercambio catiónico efectivo (CIC) y saturación de potasio (ver Tabla 4). Este índice es un valor estimado que mide la capacidad que tiene un suelo determinado para proporcionar los nutrientes necesarios de modo que las plantas puedan crecer y obtener rendimientos de calidad comercial.

Tabla 4. Variables edáficas para estimar el índice de fertilidad de suelos

Variable edáfica	Unidad	Valor del índice				
		1	2	3	4	5
pH agua (1:1)		< 4,5	4,6 - 5,2	5,2 - 5,9	5,9 - 6,5	6,5 - 7,0
		> 8,5	8,0 - 8,5	7,5 - 8,0		
Materia orgánica	%	> 1,2	1,2 - 2,4	2,4 - 4,2	4,2 - 6,0	>6,0
Nitrógeno total	%	<0,06	0,06 -0,12	0,12-0,21	0,21-0,30	>0,30
Fósforo	mg/kg	<5	5 - 10	10 - 17	17 - 25	>25
Potasio	cmol/kg	< 0,20	0,20-0,40	0,40-0,70	0,70-1,0	> 1,0
Potasio	%	> 1	1 - 3	3 - 6	6 - 12	<12
CIC	cmol/kg	< 6	6 - 12	12 - 25	25 - 40	> 40

Fuente: Adaptado de IGAC (2014).

Mapas en Sistemas de Información Geográfica (SIG)

La base de datos de las variables edáficas de las 75 parcelas fue georreferenciada con el propósito de aplicar un proceso de validación a partir del análisis de interpolación de

las siguientes variables: pH, conductividad eléctrica, materia orgánica (%), nitrógeno total (%), fósforo (mg/kg), potasio (cmol/kg) e índice de fertilidad. Para estudiar la distribución espacial de las propiedades químicas, físicas y biológicas de los suelos bajo análisis, se utilizó el método de interpolación Kriging del software ArcGIS 10,8.

Análisis estadístico

Los 75 reportes de laboratorio fueron analizados con las siguientes herramientas: estadística descriptiva, coeficiente de correlación de Pearson y análisis de componentes principales (SAS, 2013). Para los dos últimos casos se tomaron en cuenta 70 análisis de suelos, debido a que cinco de ellos presentaron valores fuera de rango en algunos parámetros.

En el caso de la estadística descriptiva, se calcularon la media, la desviación estándar, los valores mínimo y máximo de las series de datos y el coeficiente de variación (Steel y Torrie, 1992). Las relaciones entre las variables edáficas fueron analizadas a través del coeficiente de correlación (r) de Pearson, que posibilita la estimación de la relación lineal entre dos variables continuas, medidas por intervalos o ratios (Hernández *et al.*, 2018; Balzarini *et al.*, 2012).

El coeficiente r de Pearson puede variar entre -1 y 1, donde:

- 1 indica una correlación positiva perfecta.
- Valores próximos a 1 indican una alta o fuerte correlación lineal positiva.
- -1 indica una correlación negativa perfecta.
- Valores próximos a -1 indican una alta o fuerte correlación lineal negativa.
- 0 indica una correlación lineal nula.
- Valores próximos a 0 indican una mínima o una débil correlación.

La Tabla 5 describe los rangos de interpretación para el coeficiente de correlación.

Tabla 5. Interpretación del coeficiente de correlación

Rango de correlación	Interpretación
0 – 0,2	Muy baja
0,2 – 0,4	Baja
0,40 – 0,60	Moderada
0,60 – 0,80	Alta
0,80 – 1,0	Muy alta

Fuente: Adaptado de Hernández *et al.* (2018).

Por último, el análisis de componentes principales es un método estadístico utilizado para reducir el número de los datos bajo análisis. Genera nuevas variables no correlacionadas –que se denominan componentes principales–, lo que permite simplificar la complejidad y, además, facilita el análisis estadístico y la visualización. Todo ello se realiza con base en la matriz de coeficientes de correlación de Pearson (Dagnino, 2014).

El primer componente principal es una variable derivada que corresponde a una combinación lineal de las variables edáficas originales, y busca explicar la mayor cantidad de variabilidad. El segundo componente principal explica la mayor variabilidad una vez que se ha eliminado el efecto del primer componente, y así sucesivamente. Para definir el número de componentes principales que permite realizar un análisis es importante la valoración del investigador. Si un número determinado de componentes explica con claridad la variabilidad y el objetivo en la visualización de los datos, se pueden escoger tres o cuatro componentes principales para facilitar la interpretación y su representación gráfica.

III. RESULTADOS

Variabilidad de los suelos analizados

La variabilidad de los suelos existentes en una región específica es producto de la interacción entre los factores climáticos, el origen del material parental, la población de microorganismos, el relieve y el tiempo (Jaramillo, 2002). Además, la variación de las propiedades del suelo bajo condiciones de manejo intensivo de cultivos es mayor en comparación con suelos en condición natural. En los suelos cultivados, las propiedades que son más afectadas por el tipo e intensidad de manejo son: el pH, la materia orgánica, la densidad aparente, la acidez, la salinidad, el déficit de calcio, el potasio y el fósforo.

La Tabla 6 describe el promedio, la desviación estándar, los valores mínimo y máximo y el coeficiente de variación de las principales variables edáficas que fueron determinadas en laboratorio. La variable edáfica *azufre del suelo* presentó el coeficiente de variación más alto (2,96), lo que muestra una amplia heterogeneidad de los suelos analizados. Este coeficiente también fue alto para la capacidad de intercambio catiónico (CIC) (2,91), el contenido de sodio (2,1) y la conductividad eléctrica (1,99) –los dos últimos relacionados con la salinidad de los suelos–, el zinc (1,48), el cobre (1,36) y el fósforo (1,31). Contrariamente, las variables que mostraron menor variabilidad fueron el pH (0,06), el contenido de limo (0,13), el índice de fertilidad de suelos (0,15) y la relación

carbono/nitrógeno (0,24). Las variables restantes presentaron coeficientes de variación entre 0,29 y 0,93.

Tabla 6. Estadística descriptiva de las variables edáficas de las muestras de suelo

Variables edáficas	N	Media	Desviación estándar	Máximo	Mínimo	Coeficiente de variación
pH	75	8,55	9,34	7,18	0,54	0,06
Conductividad eléctrica	75	219,77	2470,00	18,50	438,06	1,99
Arcilla (%)	75	73,88	90,19	40,57	9,71	0,13
Limo (%)	75	13,99	39,63	0,01	8,67	0,62
Arena (%)	75	12,13	22,30	8,20	3,46	0,29
Materia orgánica (%)	75	0,47	1,52	0,07	0,25	0,54
Nitrógeno total (%)	75	0,03	0,11	0,01	0,01	0,42
Relación C/N	75	7,88	12,57	3,06	1,86	0,24
Azufre (mg/kg)	75	33,63	737,10	2,00	99,62	2,96
Fósforo (mg/kg)	75	8,94	92,95	1,47	11,69	1,31
Potasio (cmol/kg)	75	0,90	3,74	0,28	0,59	0,66
Calcio (cmol/kg)	75	15,84	50,50	1,91	11,10	0,70
Magnesio (Mg)	75	1,05	2,54	0,39	0,49	0,47
Sodio (cmol/kg)	75	0,52	8,58	0,03	1,09	2,11
Saturación de sodio (%)	75	2,69	25,35	0,19	4,16	1,55
CIC (cmol/kg)	75	19,23	55,91	3,03	11,92	0,62
Hierro (mg/kg)	75	5,70	23,84	0,37	5,27	0,92
Manganeso (mg/kg)	75	12,88	36,99	0,25	7,54	0,59
Zinc (mg/kg)	75	0,89	7,50	0,07	1,31	1,48
Cobre (mg/kg)	75	0,43	5,08	0,11	0,58	1,36
Boro (mg/kg)	75	2,93	11,78	0,28	2,38	0,81
Índice de fertilidad	75	1,82	3,00	1,33	0,28	0,15

Fuente: Elaboración propia

Interpretación y características de las principales variables edáficas

Textura

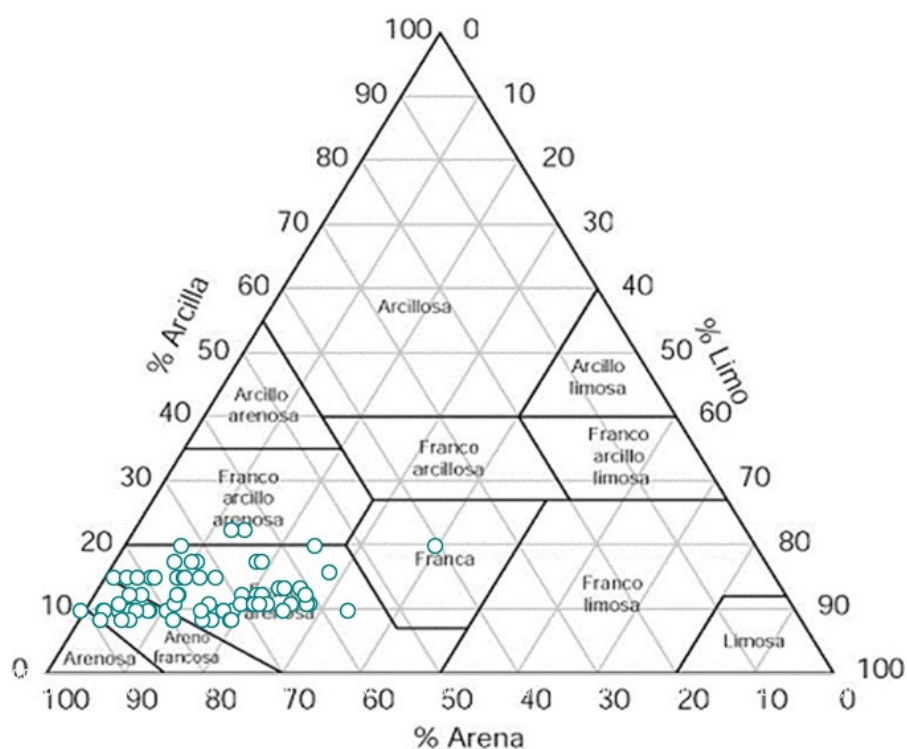
La textura es una propiedad física relacionada con la proporción relativa de arena, limo y arcilla presente en el suelo (Orsag y Ramos, 2011). En suelos arenosos predominan los poros gruesos que retienen poca agua y mayor proporción de aire. Contrariamente, en los suelos arcillosos existe un mayor porcentaje de poros finos que retienen más el agua y contienen menor cantidad de aire necesario para la respiración de las raíces de las plantas y los microorganismos (Orsag, 2010).

Los suelos franco arenosos, areno francosos y arenosos contienen más del 50% de arena y menos del 20% de arcillas. Estos tipos de suelos limitan la productividad agrícola –dado que facilitan la lixiviación y la volatilización del nitrógeno–, aceleran la descomposición de la materia orgánica, presentan una reducida capacidad de intercambio catiónico y tienen una aptitud condicionada para retener nutrientes y agua.

Todo ello afecta en forma negativa el crecimiento del volumen radicular de las plantas (INTAGRI, 2017b).

La Figura 2 muestra los valores de las texturas de suelos estimados a partir de un reporte de laboratorio. De las 75 muestras, la mayor proporción de los suelos presentó contenidos de arcilla entre un 8% y 17%, valores de limo entre un 1% y 29%, y arena entre un 65% y 89%. Así, las clases texturales predominantes fueron las texturas franco arenosas y areno francas, en proporciones de 68% y 27%, respectivamente. Una proporción menor de las muestras de suelos (5%) presentó texturas franco arcillo arenosas, francas y arenosas.

Figura 2: Clasificación textural de las 75 muestras de suelo

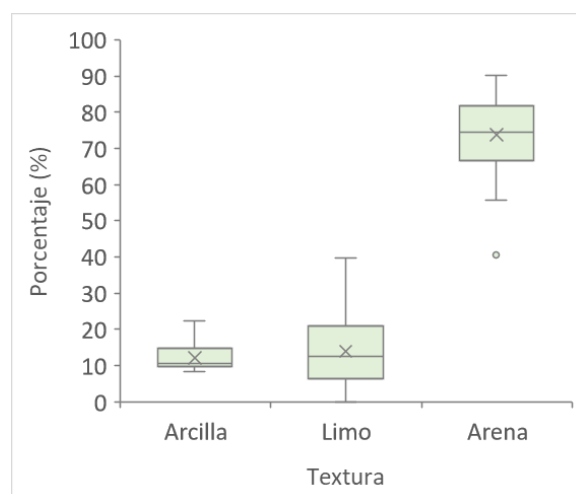


Fuente: Elaboración propia.

Una interpretación adicional y resumida de los contenidos de arcilla, limo y arena de las 75 muestras se presenta en los diagramas de caja y bigote² de la Figura 3.

² Esta caja está compuesta de cuatro segmentos conocidos como cuartiles. Cada cuartil equivale al 25%. Bajo esta lógica, la línea del medio muestra el valor de la mediana; el borde superior de la caja refleja el 75% de los datos analizados. También es posible encontrar datos atípicos en los reportes analíticos de laboratorio, los cuales se generan con mayor probabilidad de error durante el muestreo de suelos. También pueden ser producto de la variabilidad natural de los suelos y, en mínima proporción, de los procedimientos de laboratorio.

Figura 3: Contenido de arcilla, limo y arena



Fuente: Elaboración propia.

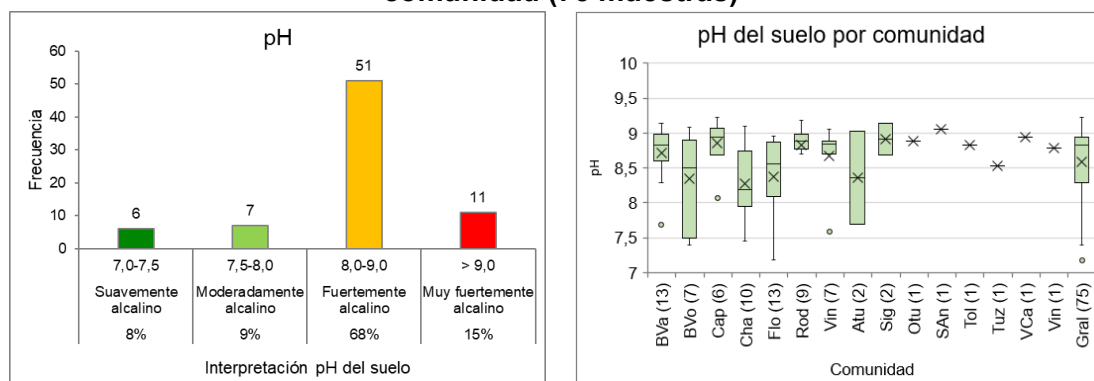
Los resultados de laboratorio validaron contenidos muy altos de arena en relación con los contenidos de limo y arcilla. Además, el contenido de arena presentó la menor variabilidad de las texturas analizadas (13%). Esto confirma que la mayoría de los suelos tiene una alta proporción de arena en su textura. Los valores de limo tienen la mayor variabilidad (62%) y la arcilla, una variabilidad media (29%). De manera general, se evidenció que los suelos estudiados presentaron proporciones altas de arena y bajas de arcilla y limo.

Potencial de hidrógeno del suelo

El potencial de hidrógeno del suelo (pH) es una variable sugerente del estado general del suelo. Permite medir la alcalinidad o acidez del suelo y es un indicador de sus diversas propiedades químicas, físicas y biológicas, que a su vez influyen directamente sobre la solubilidad, movilidad, disponibilidad de nutrientes y otros constituyentes inorgánicos (FAO, 2020; INTAGRI, 2018).

Los valores promedio, máximo, mínimo y coeficiente de variación del pH edáfico fueron de 8,5; 9,3; 7,2 y 0,06 respectivamente (ver Tabla 6). El 83% de las muestras de suelo se interpretaron como fuertemente (51 muestras) y muy fuertemente alcalinas (11 muestras). El 17% restante presentó una reacción moderadamente y suavemente alcalina (ver Figura 4).

Figura 4. Frecuencia de pH del suelo según rango de interpretación y comunidad (75 muestras)



Fuente: Elaboración propia.

Nota: Entre paréntesis se encuentra el número de muestras por comunidad según la Tabla 1.

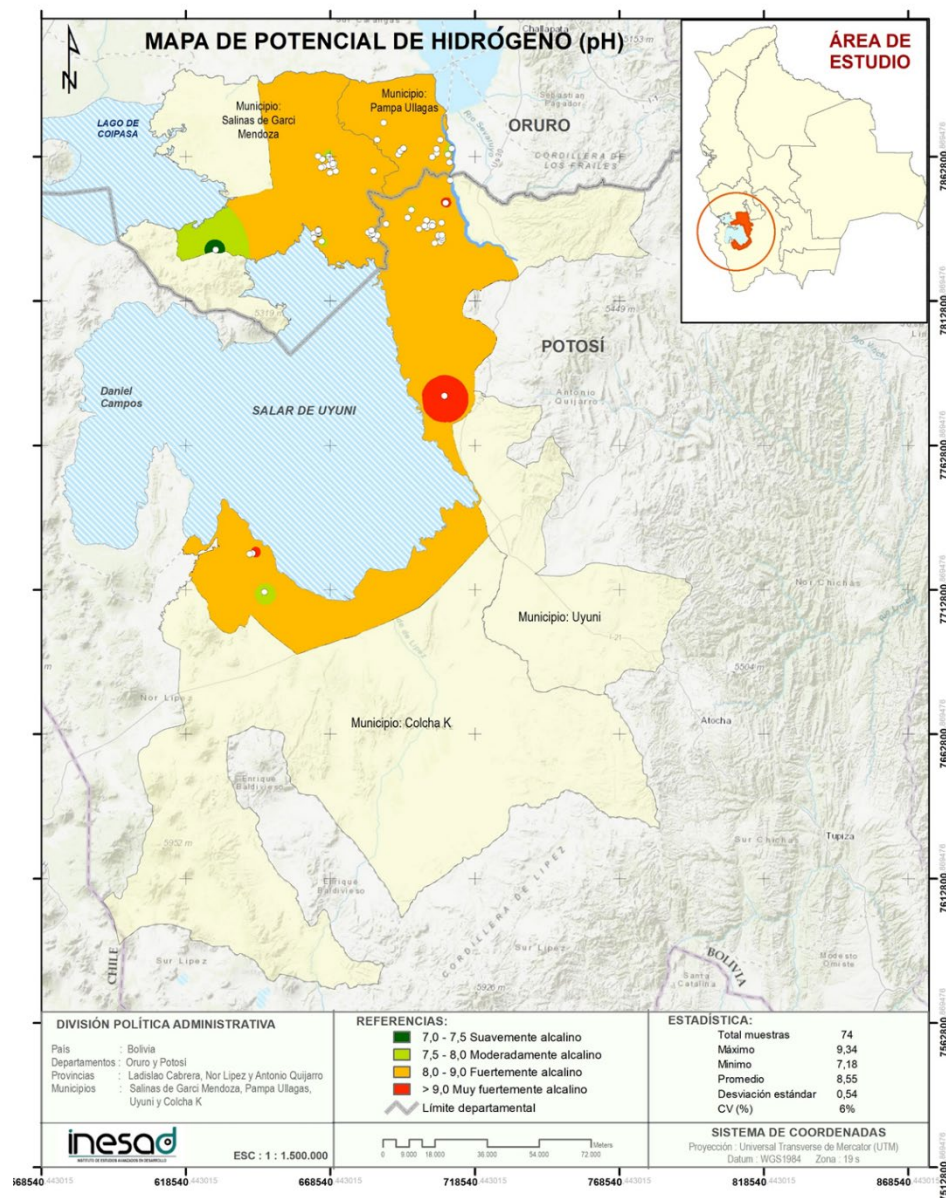
A nivel de comunidades, la Figura 4 muestra también que los promedios de pH menos alcalinos se ubicaron en las comunidades de Chalgua, Bengal Vinto y Florida. Contrariamente, los pH con mayor alcalinidad se encontraron en las comunidades de Vintuta, Bella Vista, Rodeo y Capura. Como ya se observó, el pH del suelo registró el menor coeficiente de variación de todos los parámetros analizados en laboratorio.

A partir de los datos de la Figura anterior se corrobora que la mayor parte de las muestras de suelo presentan un pH fuertemente alcalino (8,0 a 9,0). Cabe notar que la quinua prospera muy bien en suelos con pH entre 5,5 a 7,8. Fuera de estos rangos, la disponibilidad de nutrientes puede ser afectada, lo que origina una reducción en el crecimiento y el volumen de la cosecha del grano. En el estudio presente, el 88% de las muestras tienen un pH mayor a 7,8 y solo el 12% registran un pH en el rango adecuado.

La variabilidad espacial del pH se representa en el Mapa 2, que refleja visualmente las categorías de esta variable edáfica en el suelo. La mayor cantidad de muestras de suelo se categorizaron como fuertemente alcalinas (color naranja), entre los valores de 8,0 y 9,0.

Suelos con pH muy alcalino mayor a 8,0 inciden en la baja disponibilidad del fósforo y deficiencias marcadas de algunos micronutrientes como el hierro, el cobre y el zinc. (Osorio, 2012)

Mapa 2. pH del suelo por área de estudio



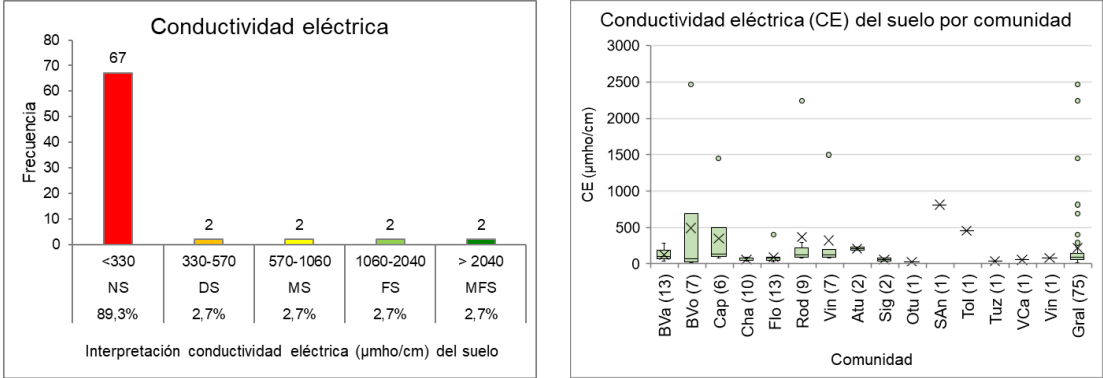
Fuente: Elaboración propia.

Conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica (CE) del suelo se refiere a su capacidad para conducir corriente eléctrica (INTAGRI, 2017a). Es una medida que indica la cantidad de sales disueltas en el suelo y su capacidad para transportar iones. Niveles elevados de CE pueden afectar la disponibilidad de agua y de nutrientes para las plantas. Niveles bajos de CE reflejan que las sales en el suelo se encuentran adsorbidas en coloides y en la solución del suelo. Según Fassbender y Bornemisza (1987), la acumulación de sales en el suelo se da en condiciones climáticas donde la precipitación anual es menor a 400 mm por año.

El valor promedio de la CE se cuantificó en 220 $\mu\text{mho/cm}$, con un coeficiente de variación que se sitúa entre los más altos (1,99) –como ya se mencionó–. El mínimo y el máximo llegaron a 18,5 y 2.470 $\mu\text{mho/cm}$, respectivamente. De acuerdo a la Figura 5, el 89,3% de las muestras de suelo son no salinas (67 muestras), el 2,7% son ligeramente salinas, y solo un 5,4% presentan valores de fuertemente a muy fuertemente salinas.

Figura 5. Frecuencia de conductividad eléctrica del suelo según rango de interpretación y comunidad (75 muestras)



Fuente: Elaboración propia.

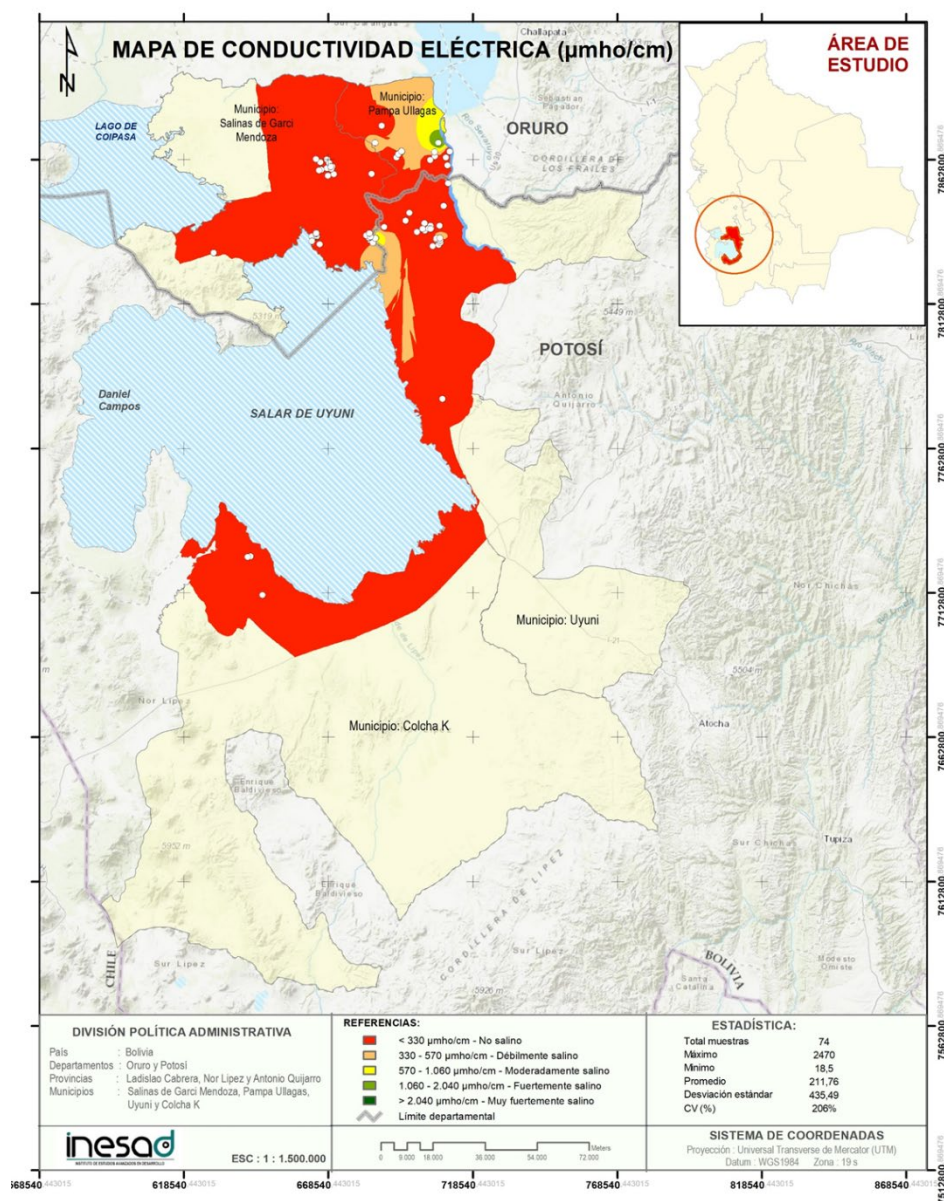
Nota: Entre paréntesis se encuentra el número de muestras por comunidad según la Tabla 1.

A nivel de las comunidades, la Figura 5 muestra también que los promedios de CE con menor salinidad se encontraron en las comunidades de Chalgua, Florida y Bella Vista. En contraste, los suelos con mayor CE se evaluaron en las comunidades de Bengal Vinto, Rodeo, Capura y Vintuta. Cabe señalar que estas últimas presentaron datos atípicos con valores elevados de salinidad. Además, las muestras en Rodeo, Bengal Vinto, Vintuta, Capura y Florida tuvieron una mayor variabilidad, mientras que las comunidades de Chalgua y Bella Vista registraron una menor variabilidad.

Por otro lado, el 89,3% de las muestras de suelo analizadas presentaron valores de conductividad eléctrica no salina menor a 330 $\mu\text{mho/cm}$. Este resultado concuerda con lo reportado por Cárdenas y Choque (2008), donde el 89,4% de los suelos de la zona intersalar de Oruro y Potosí se reportaron como no salinos y débilmente salinos.

La distribución geográfica de la conductividad eléctrica en el área de estudio se configuró en el Mapa 3.

Mapa 3. Conductividad eléctrica del suelo por área de estudio



Fuente: Elaboración propia.

La mayor cobertura de suelos no salinos está representada por el color rojo. En menor proporción, los valores de CE débilmente salinos y moderadamente salinos están definidos por los colores anaranjado y amarillo, en orden correlativo. También se registraron valores muy fuertemente y fuertemente salinos (color verde) en las comunidades de Bengal Vinto, Capura y Vintuta, de los municipios de Pampa Aullagas, Salinas de Garci Mendoza y Uyuni, respectivamente.

Materia orgánica

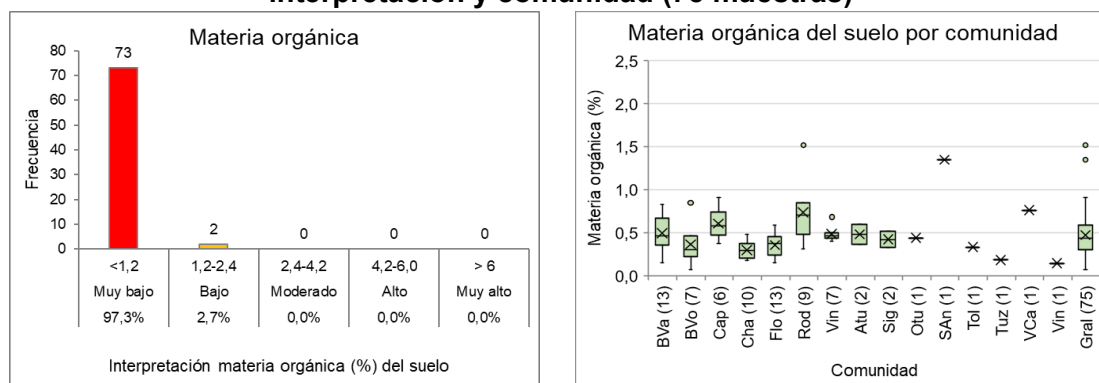
La materia orgánica suministra la mayor cantidad requerida de nutrientes como el nitrógeno, el azufre y un 50% de las necesidades de fósforo (Sánchez y Camacho, 1981), que son absorbidos por los cultivos no abonados. La materia orgánica también suministra carbono y energía para los microorganismos responsables de la actividad bioquímica del suelo (Weil y Brady, 2017). De hecho, sin la materia orgánica, esta actividad bioquímica, y además el funcionamiento de los ecosistemas, prácticamente se paraliza.

La materia orgánica tiene influencia directa en las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, contribuye directamente en la formación de la estructura del suelo y la retención de agua disponible para el crecimiento de las plantas, y además puede formar complejos con los micronutrientes para evitar su lixiviación –aunque no su agotamiento en el tiempo–.

Según Sánchez y Camacho (1981), la reposición y el mantenimiento de la materia orgánica en el suelo es esencial en la agricultura sin fertilizantes, pues evita los efectos adversos del rápido agotamiento de carbono orgánico en la capa arable.

En las 75 muestras de suelo analizadas se evidenció solo el 0,47% del contenido promedio de materia orgánica, con un coeficiente de variación del 0,54. Los valores mínimo y máximo registrados fueron de 0,07% y 1,52%, respectivamente (ver Tabla 6). El 97% de las muestras se clasificaron como suelos de muy bajo contenido de materia orgánica (73 muestras), y el 3% restante fue clasificado como bajo (ver Figura 6).

Figura 6. Frecuencia de materia orgánica del suelo según rango de interpretación y comunidad (75 muestras)



Fuente: Elaboración propia.

Nota: Entre paréntesis se encuentra el número de muestras por comunidad según la Tabla 1.

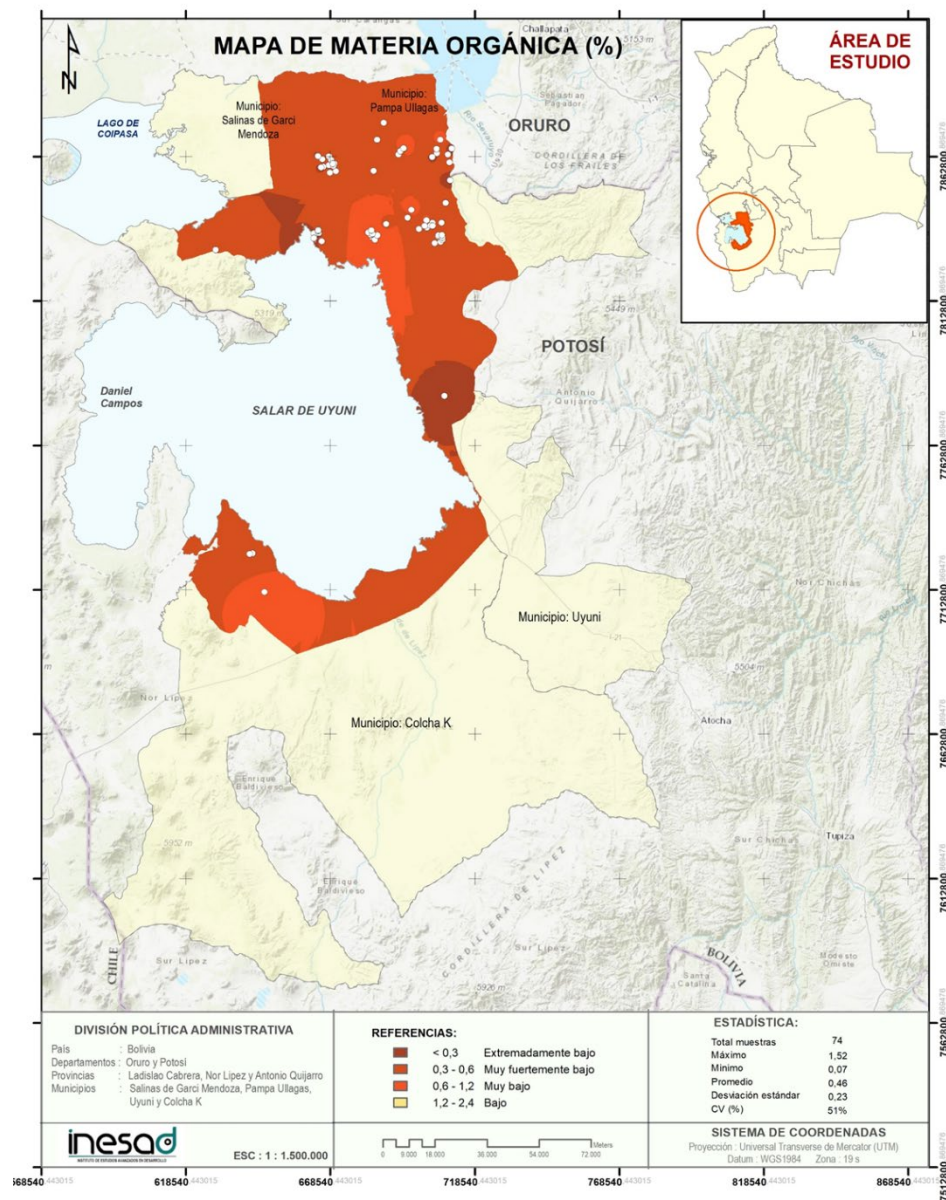
En la Figura 6 se presentan también los promedios de materia orgánica a nivel de las comunidades. Aquellas con menor contenido de MO fueron Chalgua, Florida y Bengal Vinto. Contrariamente, los suelos con mejores promedios de MO se evaluaron en las

comunidades de Rodeo, Capura, Bella Vista y Vintuta. La mayor variabilidad de las muestras se registró en Bengal Vinto, Rodeo, Bella Vista y Florida, mientras que las comunidades con menor variabilidad fueron Vintuta, Capura y Chalgua.

El déficit de MO (0,47%) evidenciado en el presente estudio se contrapone a los reportes de Cárdenas y Choque (2008) realizados para la región del Altiplano Sur. En dicho trabajo se reportó un valor promedio de 2,64%. Esto indica que hubo una pérdida evidente del 2,17%, equivalente a 65 t de MO por hectárea, entre los años 2008 a 2023.

La distribución geográfica de la materia orgánica en el área de estudio se configuró en el Mapa 4. La mayor cobertura corresponde al contenido muy bajo, representado en color rojo. Esto resalta que la materia orgánica existente en el suelo de las comunidades estudiadas en el Altiplano Sur es extremadamente deficitaria. Además, indica que se requiere una adición permanente con el fin de mantener y mejorar la fertilidad de los suelos donde se cultiva la quinua bajo un sistema orgánico.

Mapa 4. Materia orgánica por área de estudio



Fuente: Elaboración propia.

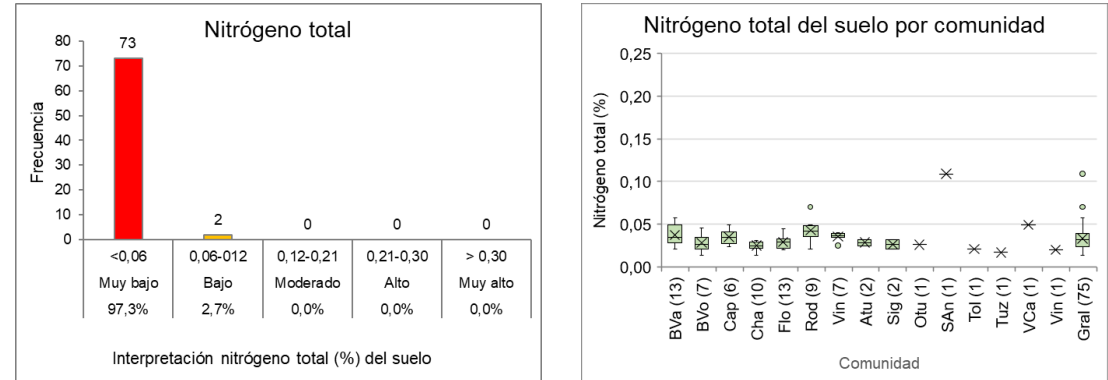
Nitrógeno total

El nitrógeno se encuentra en la materia orgánica de los abonos orgánicos bajo las siguientes formas: orgánica, amoniacal y nítrica (Da Silva, 2009). El 95% del nitrógeno total del suelo proviene de la materia orgánica.

Los registros promedio, mínimo, máximo y coeficiente de variación de las 75 muestras se cuantificaron en 0,03; 0,01; 0,11 y 0,42 respectivamente (ver Tabla 6). El 97,3% de las parcelas se concentraron en los rangos muy bajo (73 muestras) y bajo (2 muestras) (ver Figura 7).

Los promedios más bajos se evaluaron en las comunidades de Chalgua, Bengal Vinto y Florida. En contraste, los suelos con mayor contenido de nitrógeno total se evaluaron en las comunidades de Rodeo, Bella Vista, Vintuta y Capura. Por otro lado, la menor variabilidad se registró en las comunidades de Vintuta, Chalgua, Capura y Florida; mientras que Bengal Vinto, Bella Vista y Rodeo presentaron muestras con mayor variabilidad.

Figura 7. Frecuencia de nitrógeno total del suelo según rango de interpretación y comunidad (75 muestras)

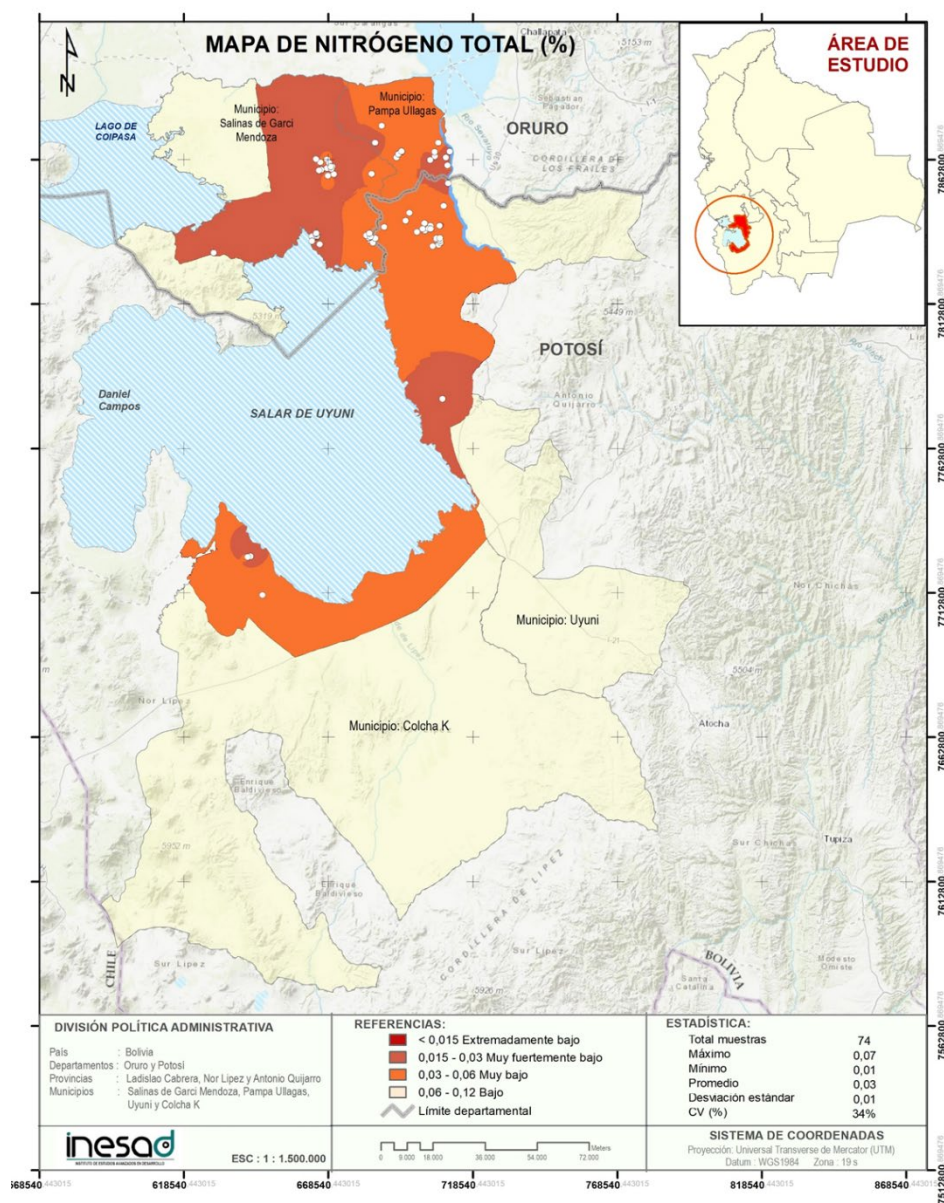


Fuente: Elaboración propia.

Nota: Entre paréntesis se encuentra el número de muestras por comunidad según la Tabla 1.

Por último, la distribución geográfica del nitrógeno total del área de estudio (ver Mapa 5) resalta un 97,3% de las muestras con valores muy bajos de nitrógeno (menores a 0,06%). Este déficit marcado llama a corregir semejante carencia en un corto plazo a través de la incorporación de enmiendas orgánicas compostadas con base en análisis de suelos. Además, se debe concretar un plan de manejo para la restauración de la fertilidad de los suelos y para la regeneración de la cobertura vegetal nativa.

Mapa 5. Nitrógeno total por área de estudio



Fuente: Elaboración propia.

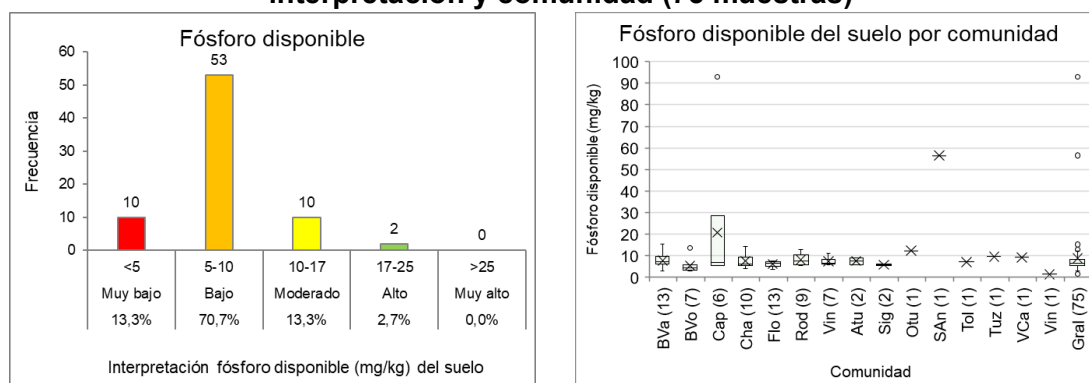
Fósforo

El fósforo es un nutriente indispensable para el crecimiento y desarrollo de las plantas. Su importancia en la agricultura es solo aventajada por la del nitrógeno en cuanto a la frecuencia de su aplicación y la magnitud de su deficiencia en el suelo (Alcantar *et al.*, 2016).

Según los reportes de laboratorio, el promedio de las 75 muestras analizadas fue de 12,61 mg/kg, con un coeficiente de variación de 1,31, una observación mínima de 1,47 mg/kg y una máxima de 92,95 mg/kg (ver Tabla 6).

La Figura 8 muestra que el 84% de las muestras analizadas se encuentran en las categorías muy bajo (10 muestras) y bajo (53 muestras). El 16% restante corresponde a las categorías moderado y alto.

Figura 8. Frecuencia de fósforo disponible del suelo según rango de interpretación y comunidad (75 muestras)



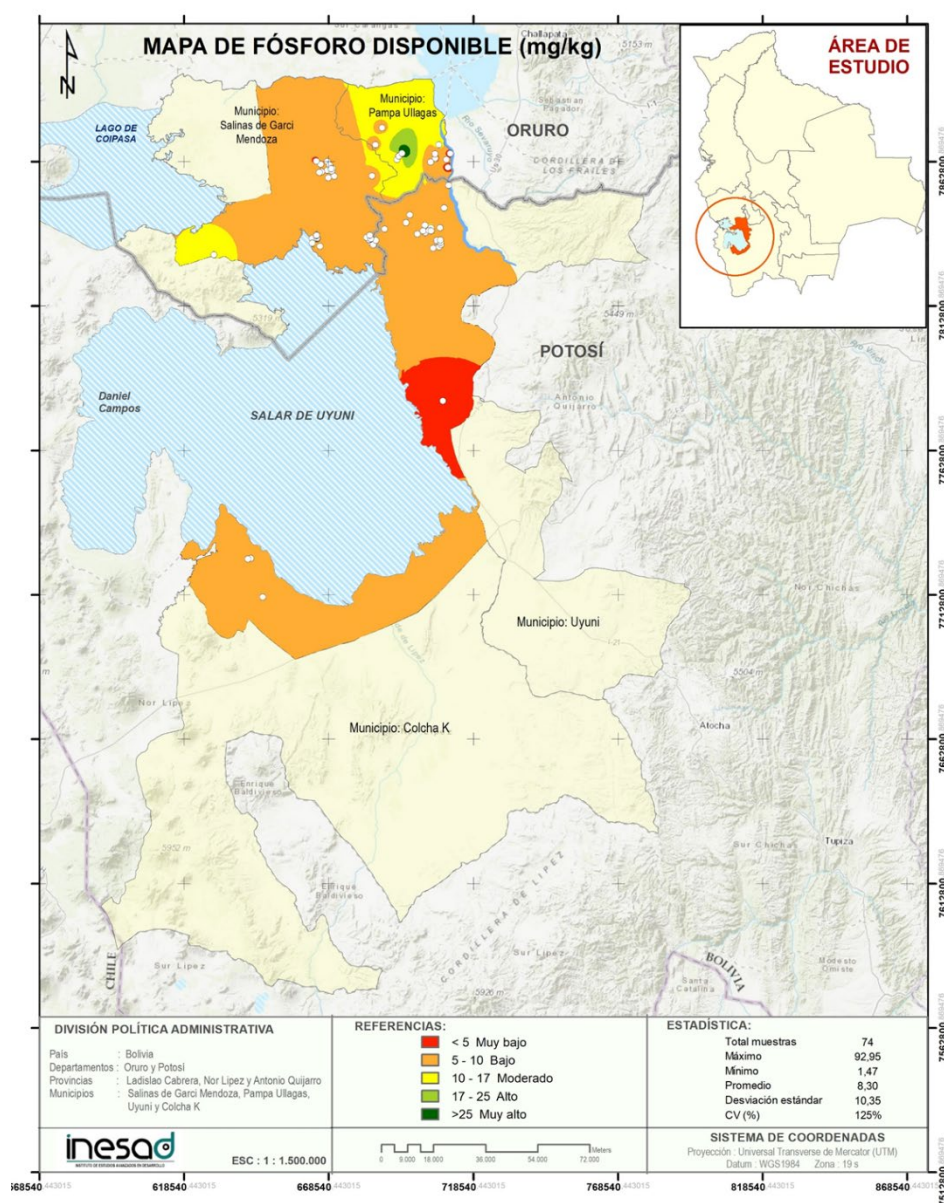
Fuente: Elaboración propia.

Nota: Entre paréntesis se encuentra el número de muestras por comunidad según la Tabla 1.

Los promedios con menor contenido de fósforo se encontraron en las comunidades de Bengal Vinto, Florida y Vintuta. En contraste, los suelos con mayor concentración de fósforo se evaluaron en las comunidades de Capura, Rodeo, Bella Vista y Chalgua. Por otro lado, la menor variabilidad de las muestras se registró en las comunidades de Florida, Vintura y Rodeo; la mayor variabilidad, en Bengal Vinto, Chalgua y Bella Vista. La comunidad de Capura resaltó por contar con una variabilidad alta y una observación atípica fuera de rango.

La distribución geográfica del fósforo disponible se presentó en el Mapa 6. En orden de relevancia, se evidencia una mayor proporción de contenidos bajos y muy bajos.

Mapa 6. Fósforo disponible por área de estudio



Fuente: Elaboración propia.

Potasio intercambiable

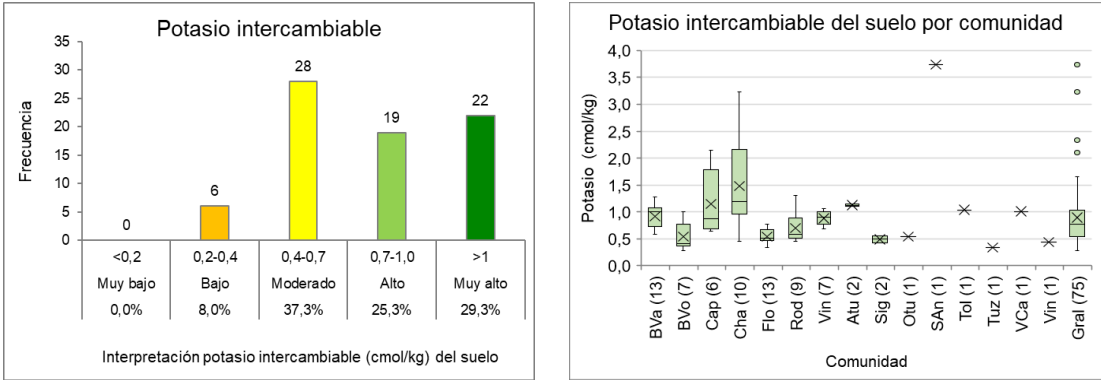
El potasio intercambiable es una forma disponible de este elemento en el suelo que se encuentra en la superficie de las partículas de arcilla y la materia orgánica. Puede ser absorbida fácilmente por las raíces de las plantas (Sela, 2020).

Los registros promedio, mínimo, máximo y coeficiente de variación del potasio intercambiable en las parcelas evaluadas se cuantificaron en 0,9; 0,28; 3,74 y 0,66 respectivamente (ver Tabla 6).

La Figura 9 muestra que el 92% de las parcelas se concentraron en los rangos moderado, alto y muy alto. El mayor porcentaje se ubicó en la categoría moderado, con 28 muestras, y después muy alto, con 22.

Las comunidades de Bengal Vinto, Rodeo y Florida tuvieron el menor contenido de potasio en promedio. Chalgua, Capura, Bella Vista y Vintuta registraron los suelos con más potasio en promedio. Por otro lado, la menor variabilidad se registró en las comunidades de Vintuta, Bella Vista y Florida, y la mayor variabilidad, en Chalgua, Capura y Rodeo.

Figura 9. Frecuencia de potasio intercambiable del suelo según rango de interpretación y comunidad (75 muestras)

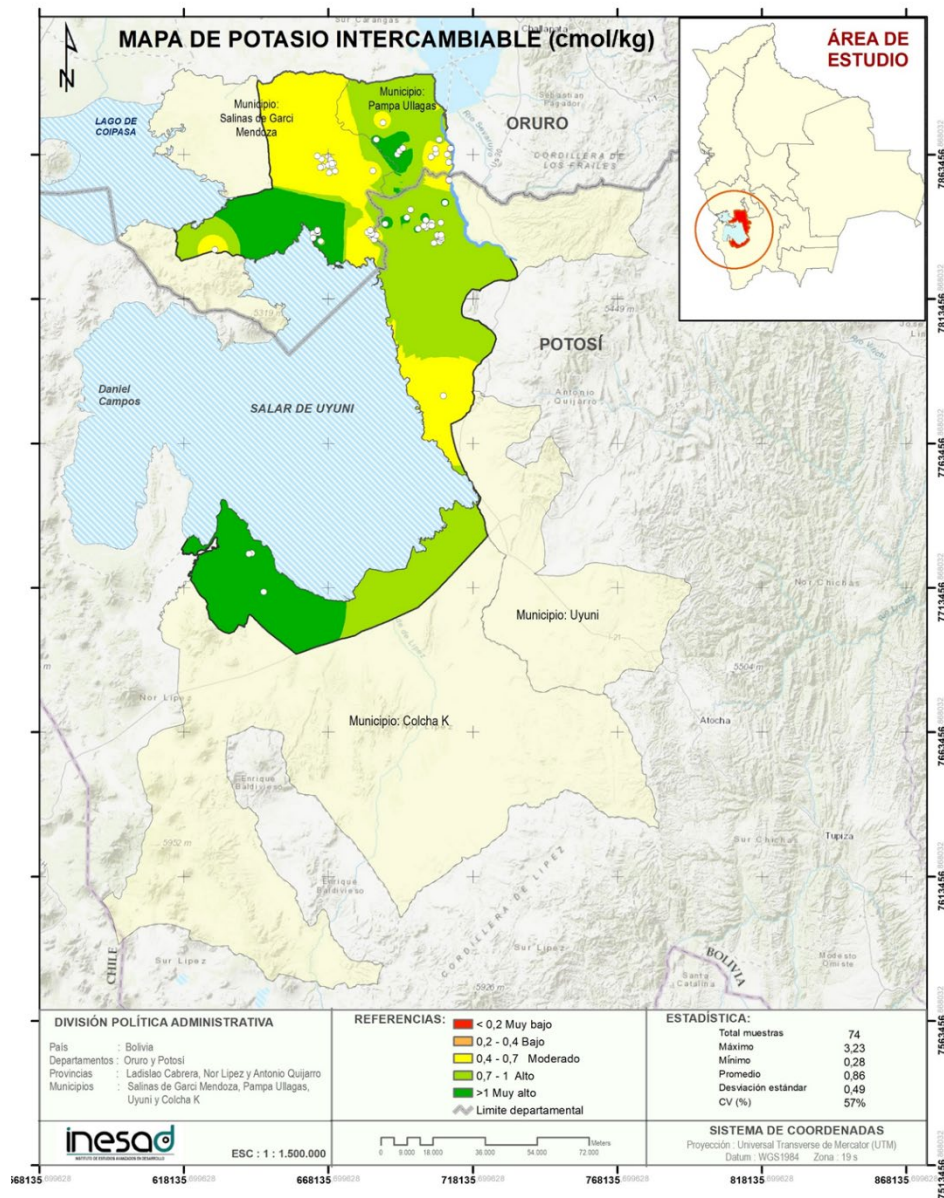


Fuente: Elaboración propia.

Nota: Entre paréntesis se encuentra el número de muestras por comunidad según la Tabla 1.

Los reportes de potasio intercambiable se plasmaron en el Mapa 7. Destaca la mayor superficie, con suelos de contenido moderado, muy alto y alto. Estos se representaron con los colores amarillo, verde claro y verde oscuro, en orden correlativo.

Mapa 7. Potasio intercambiable por área de estudio



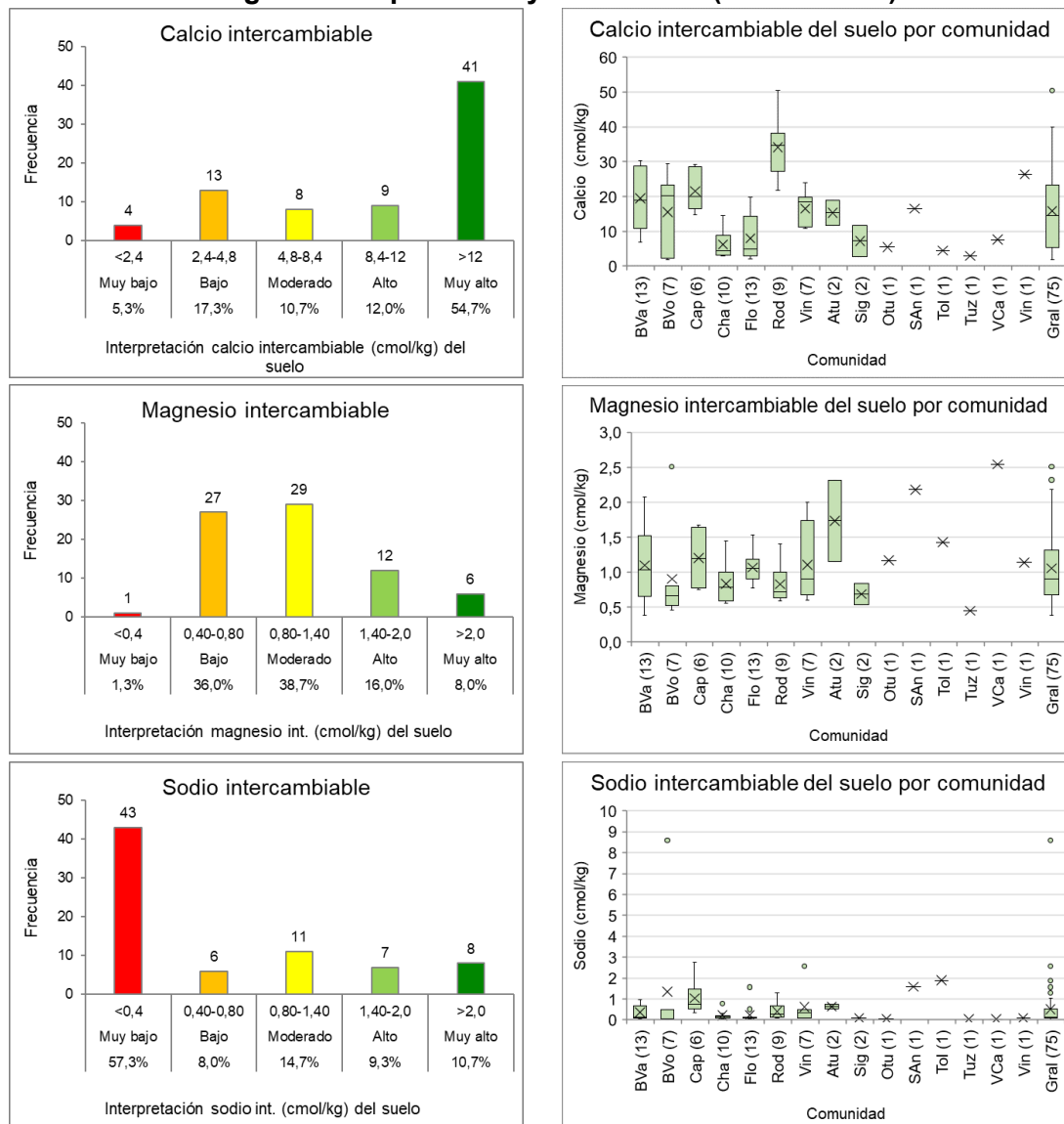
Fuente: Elaboración propia.

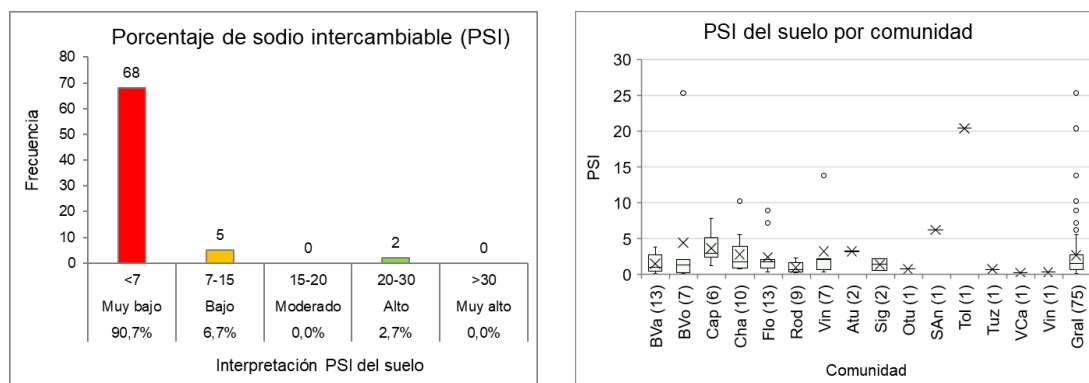
Calcio, magnesio y sodio intercambiable

En general, los elementos calcio, magnesio, potasio y sodio son cationes o iones con carga positiva y se conocen como *bases intercambiables*, ya que pueden ser intercambiados por otros cationes en la solución del suelo. Los tres primeros nutrientes se consideran esenciales para las plantas, y de ellos destaca el potasio como uno de los más requeridos para la producción de especies cultivadas. A continuación se aborda el contenido de calcio, magnesio y sodio en las 75 muestras analizadas, dado que ya se describieron las características del potasio.

De acuerdo con la Figura 10, el 66,7% de los reportes de calcio corresponde a las categorías de muy alto (41 muestras) y alto (9 muestras); el 74,7% de los reportes relativos al magnesio presentaron un predominio de valores bajos (27 muestras) y moderados (29 muestras); y el 65,3% de los análisis de sodio se reportaron como muy bajos (43 muestras) y bajos (6 muestras). En el caso del sodio, se observó también que un 17,3% queda en las categorías de muy alto y alto.

Figura 10. Frecuencias de calcio intercambiable, magnesio y sodio según rango de interpretación y comunidad (75 muestras)





Fuente: Elaboración propia.

Nota: Entre paréntesis se encuentra el número de muestras por comunidad según la Tabla 1.

En el caso del sodio, para contar con una información más precisa, se estimó el porcentaje de sodio intercambiable (PSI) en relación con la capacidad de intercambio catiónico. De esta manera, el 90,7% y 6,7% de las muestras se ha categorizado con PSI muy bajo (68 muestras) y bajo (5 muestras), respectivamente, y solo un 2,7% de los resultados presentaron un alto contenido de PSI.

A nivel de comunidades se observó que los contenidos de calcio son muy altos, a excepción de Chalgua y Florida, que presentan contenidos moderados (ver Figura 10). En orden de relevancia, las comunidades que presentaron un mayor contenido de calcio son: Rodeo, Capura, Bella Vista, Vintuta y Bengal Vinto. Además, las comunidades de Rodeo, Capura y Vintuta cuentan con la menor variabilidad; mientras que Florida, Bengal Vinto, Chalgua y Bella Vista tienen la mayor variabilidad.

En el caso de los contenidos de magnesio, en todas las comunidades evaluadas se observaron contenidos moderados. La variabilidad es más baja en las comunidades de Florida, Rodeo, Chalgua y Capura, y es más alta en Bengal Vinto, Vintuta y Bella Vista. El análisis de las principales relaciones catiónicas evidenció que un 73% de los resultados tienen deficiencia de magnesio con relación al calcio. También se determinaron una deficiencia y un bajo nivel de magnesio con relación al potasio en proporciones de 31% y 61%, respectivamente.

Por otro lado, un mayor número de comunidades tienen reportes muy bajos de sodio, seguidos de valores moderados y muy altos. En orden de relevancia, las comunidades que presentaron de menor a mayor concentración de sodio fueron: Chalgua, Florida, Bella Vista, Rodeo, Vintuta, Capura y Bengal Vinto. Además, la menor variabilidad de esta variable edáfica se registró en Capura, Bella Vista y Chalgua. La mayor variabilidad se registró en Bengal Vinto, Florida, Vintuta y Rodeo.

Por último, las comunidades con promedios de PSI más bajos son Rodeo, Bella Vista y Florida. En cambio, los suelos con mayor PSI se evaluaron en las comunidades de

Bengal Vinto, Capura, Vintuta y Chalgua. Se registró una menor variabilidad en las comunidades de Capura, Rodeo y Bella Vista. Contrariamente, las comunidades con mayor variabilidad fueron Bengal Vinto, Vintuta, Florida y Chalgua. El valor de PSI más alto se encontró en la comunidad de Bengal Vinto.

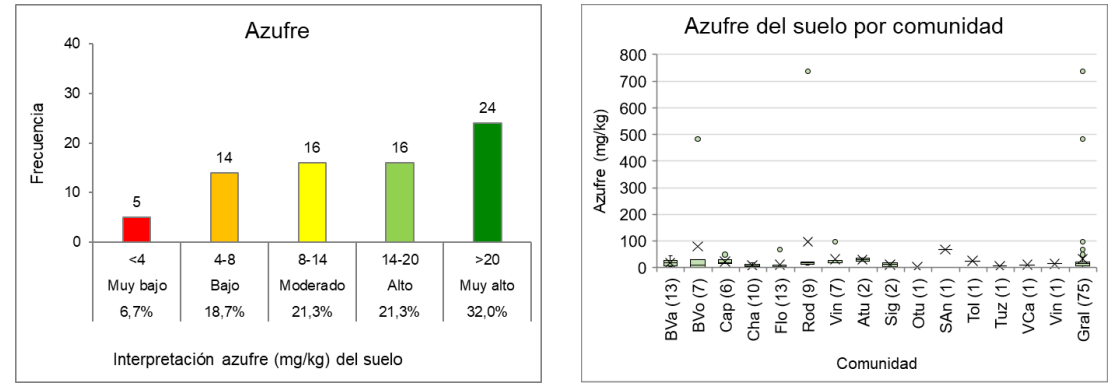
En la distribución geográfica del PSI se evidenció un predominio de valores muy bajos en el área estudiada. Los reportes más altos se evidenciaron en las comunidades de Bengal Vinto y Tolamayu, de los municipios de Pampa Aullagas y Salinas de Garci Mendoza, respectivamente (Anexo 1).

Azufre

El azufre es un nutriente esencial para el crecimiento de las plantas. Actualmente se considera el cuarto macronutriente más reconocido, junto con el nitrógeno, el fósforo y el potasio (Sela, 2020). En muchos cultivos, su absorción es similar a la del fósforo.

Según los reportes de laboratorio, el promedio de las 75 muestras analizadas fue de 33,6 mg/kg, con un coeficiente de variación de 2,96 y valores mínimo y máximo de 2 y 731,95 mg/kg, respectivamente (ver Tabla 6). Además, la moda y mediana se cuantificaron en 7,83 y 15,05 mg/kg, en forma correlativa. Cabe notar que en la serie de datos de esta variable edáfica se identificaron dos observaciones atípicas fuera de rango que influyeron en el valor promedio y el coeficiente de variación.

Figura 11. Frecuencia de azufre del suelo según rango de interpretación y comunidad (75 muestras)



Fuente: Elaboración propia

Nota: Entre paréntesis se encuentra el número de muestras por comunidad según la Tabla 1.

La Figura 11 muestra que el contenido de azufre en las parcelas evaluadas fue muy heterogéneo. Un 53,3% se categorizó como muy alto y alto, un 21,3% se interpretó dentro del rango moderado y un 25,4%, como bajo y muy bajo. La categoría muy alto concentró la mayor proporción, equivalente al 32% (24 muestras).

Los promedios con menor contenido de azufre se identificaron en las comunidades de Capura, Chalgua y Bella Vista, mientras que los suelos con mayor concentración de

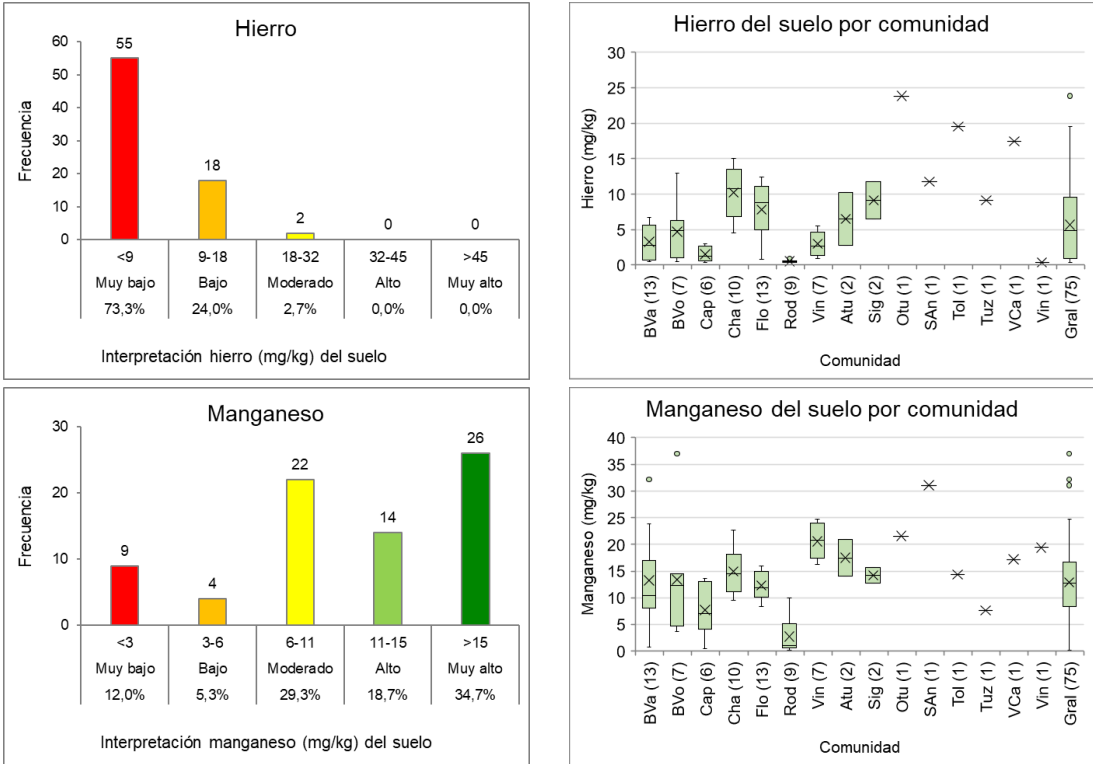
azufre se evaluaron en las comunidades de Rodeo, Bengal Vinto y Florida. La menor variabilidad se encontró en las comunidades de Chalgua, Florida y Bella Vista, y la mayor variabilidad, en Rodeo, Bengal Vinto, Vintura y Capura. En las comunidades de Bengal Vinto y Rodeo se identificaron observaciones atípicas fuera del rango normal.

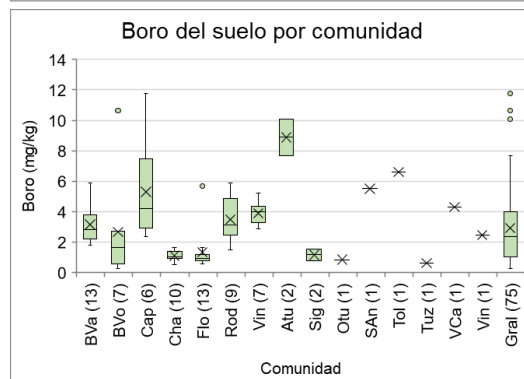
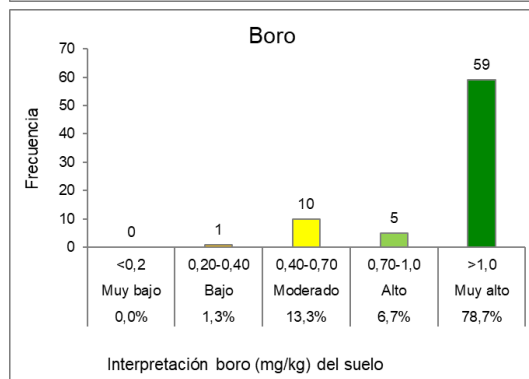
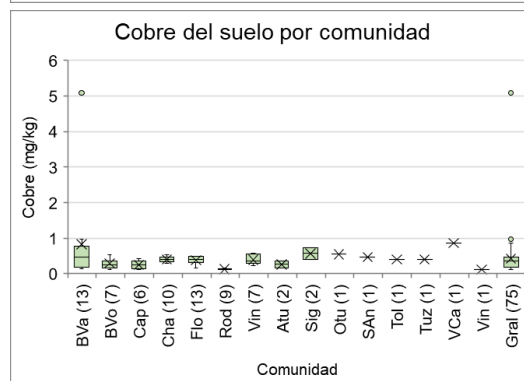
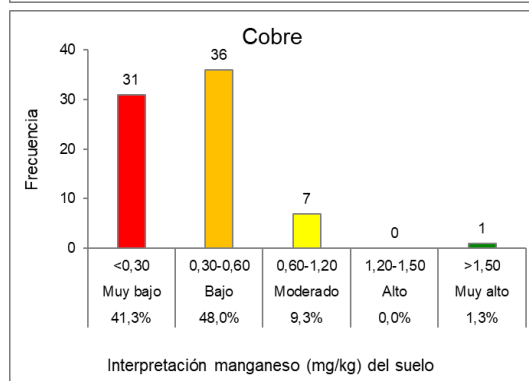
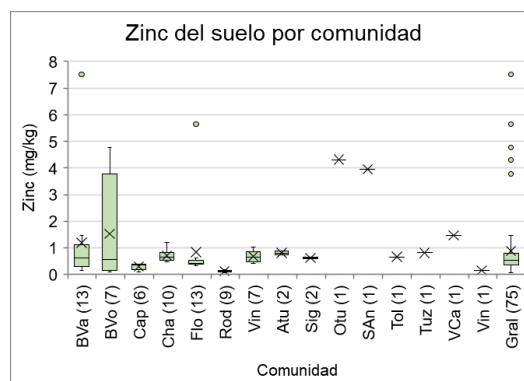
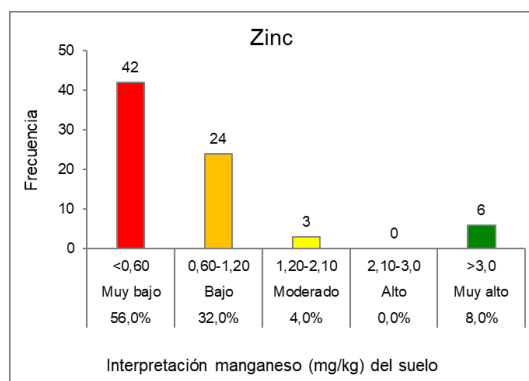
Micronutrientes

Los micronutrientes se requieren en cantidades pequeñas (Fassbender y Bornemisza, 1987) para formar parte de diversos procesos enzimáticos en las plantas (Vistoso y Martínez, 2019). Por otro lado, algunos factores importantes del crecimiento, como la velocidad de absorción de nutrientes y la movilidad de estos dentro de la planta, dependen de los micronutrientes (Soto, 2008).

Cinco micronutrientes esenciales fueron tomados en cuenta para las 75 parcelas con el propósito de evaluar su disponibilidad y carencia. Estos fueron: hierro (Fe), manganeso (Mn), zinc (Zn), cobre (Cu) y boro (B). La Figura 12 presenta los resultados de los análisis de acuerdo a los rangos de interpretación y a los promedios a nivel comunidad.

Figura 12. Interpretación del contenido de micronutrientes en el suelo según rango de interpretación y por comunidad (75 muestras)





Fuente: Elaboración propia.

Nota: Entre paréntesis se encuentra el número de muestras por comunidad según la Tabla 1.

El 97,3% de los reportes de hierro se contabilizó como muy bajo (55 muestras) y bajo (18 muestras). El zinc y el cobre presentan también una alta concentración en las categorías de muy bajo y bajo, con porcentajes de 88% y 89,3%, respectivamente. Con todo, el zinc concentró 42 muestras en el rango de muy bajo, mientras que el cobre fue cuantificado en el rango bajo con 36 muestras. En el caso del manganeso, las muestras están más dispersas y el 82,7% se ubicó en moderado, alto y muy alto. Por último, el boro presentó 59 muestras categorizadas como muy alto, equivalentes al 78,7%.

El déficit de hierro se encuentra en todas las comunidades evaluadas. En un orden de mayor a menor magnitud se tiene: Rodeo, Capura, Vintuta, Bella Vista, Bengal Vinto y Chalgua. La menor variabilidad se encontró en las muestras de Rodeo y Chalgua. Contrariamente, la mayor variabilidad se situó en Bengal Vinto, Bella Vista, Capura, Vintuta y Florida.

Por otro lado, en la mayoría de las comunidades evaluadas, los contenidos de manganeso fueron moderados, altos y muy altos. La excepción fue Rodeo, que registró contenidos muy bajos en gran parte de las parcelas estudiadas. Además, se evidenció una menor variabilidad en Vintuta, Chalgua y Florida, y una mayor variabilidad en Rodeo, Capura, Bengal Vinto y Bella Vista.

En relación al zinc, los valores muy bajos y bajos se presentaron en todas las comunidades evaluadas. En cuanto a los déficits, de mayor a menor, se tiene: Rodeo, Capura, Florida, Vintuta, Bengal Vinto, Bella Vista y Chalgua. La menor variabilidad se encontró en las comunidades de Chalgua, Rodeo, y Vintuta. La mayor variabilidad se observó en Bengal Vinto, Florida, Bella Vista y Capura.

De manera parecida al caso anterior, los valores bajos y muy bajos de cobre se identificaron en todas las comunidades evaluadas. Hubo una menor variabilidad en Rodeo, Chalgua Florida y Vintuta, y una mayor variabilidad en Bella Vista, Bengal Vinto y Capura.

Por último, los contenidos muy altos de boro se registraron en todas las comunidades evaluadas. En orden de relevancia, las comunidades con exceso de boro fueron: Capura, Vintuta, Rodeo, Bella Vista y Bengal Vinto. Las que registraron los menores promedios fueron Florida y Chalgua. Por otro lado, se constató una mayor variabilidad en las comunidades de Bengal Vinto, Florida y Capura. Contrariamente, las comunidades con menor variabilidad fueron Vintuta, Chalgua Bella Vista y Rodeo.

Anteriormente se vio que el 83% de los suelos tenían pH fuertemente ácidos y muy fuertemente ácidos. Con este tipo de pH se confirma la hipótesis de que se iban a encontrar déficits de hierro y zinc, así como un exceso de boro (Orsag, 2010).

Índice de fertilidad

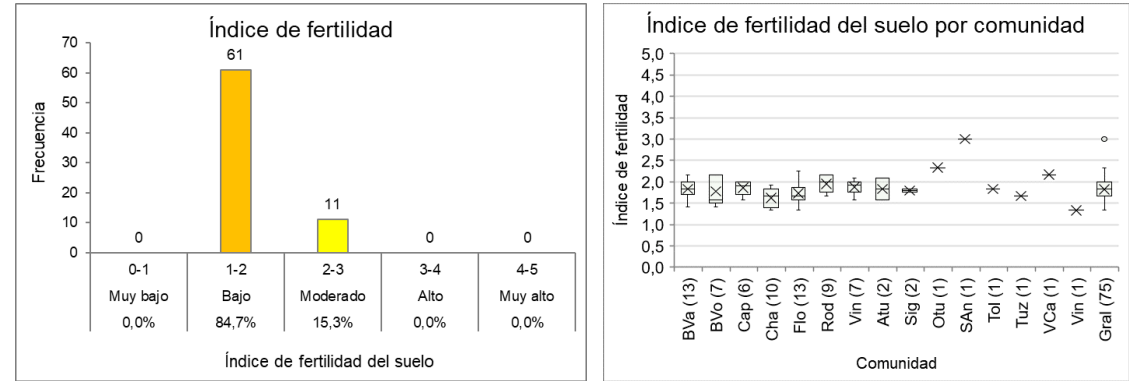
La fertilidad del suelo es la base necesaria para el crecimiento de las plantas. Sin embargo, esta no es necesariamente productiva, dada la existencia de factores que pueden limitar el rendimiento agrícola (Villarreal y Alfaro, 1997). Estos factores pueden ser de tipo físico –pérdida de la estructura del suelo, déficit de humedad, compactación y erosión de los suelos–, de tipo biológico –pérdida de materia orgánica y reducción de la población de microorganismos del suelo–, de tipo químico –exceso de sales, suficiencia o déficit de algún nutriente esencial–, o finalmente pueden surgir de la ausencia de prácticas de manejo –e.g. uso de semillas certificadas, tratamientos sanitarios o control de malezas, todos realizados en forma inoportuna–. Con todo, es posible estimar el potencial productivo de un suelo a partir de sus características

edáficas utilizando distintas metodologías que permitan generar un valor de referencia como el índice de fertilidad (IF). A partir de esta referencia, se pueden generar estrategias para mejorar la fertilidad.

Así, el índice de fertilidad del suelo (IF) es una medida que evalúa la capacidad del suelo para proporcionar los nutrientes que las plantas necesitan para crecer y obtener rendimientos de calidad comercial (IGAC, 2014). El IF corresponde a un valor promedio que se deriva de variables edáficas específicas que inciden en la fertilidad del suelo según una escala de valoración definida (ver Tabla 4). Este se sitúa entre 0 (0-1, muy baja fertilidad) y 4-5 (muy alta fertilidad). Se deriva de una adaptación al método de IGAC (2014).

Los registros promedio, mínimo, máximo y coeficiente de variación de las 75 parcelas se cuantificaron en 1,83; 1,33; 3,0 y 0,16 respectivamente. La Figura 13 muestra que el 80% de las parcelas (60 muestras) se concentraron en el rango de baja fertilidad, y que el restante 20% estuvo en el rango moderado. En ningún caso los valores correspondieron a una alta, muy alta o muy baja fertilidad.

Figura 13. Índice de fertilidad del suelo según rango de interpretación y comunidad



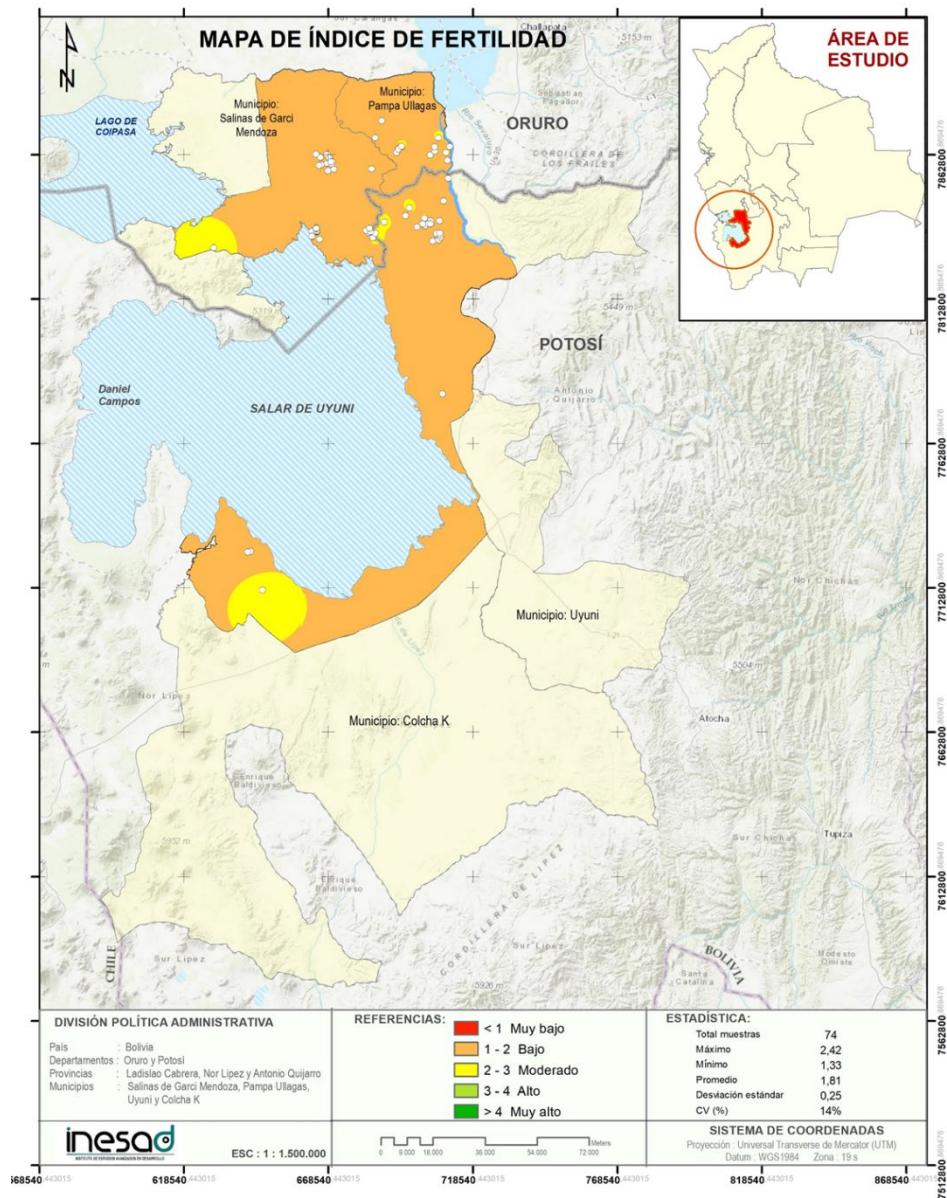
Fuente: Elaboración propia.

Nota: Entre paréntesis se encuentra el número de muestras por comunidad según la Tabla 1.

Los promedios con menor IF en los suelos se ubicaron en las comunidades de Chalgua, Florida y Bengal Vinto, y aquellos con mayor IF se observaron en Rodeo, Capura, Vintuta y Bella Vista. La menor variabilidad se encontró en Chalgua y Bella Vista; una mayor variabilidad se presentó en Rodeo, Bengal Vinto, Vintuta, Capura y Florida.

El IF plasmado en el Mapa 8 registró una mayor superficie con suelos de baja fertilidad y, en menor proporción, valores de moderada fertilidad. En ambos casos se representó el registro con los colores anaranjado y amarillo, en orden correlativo.

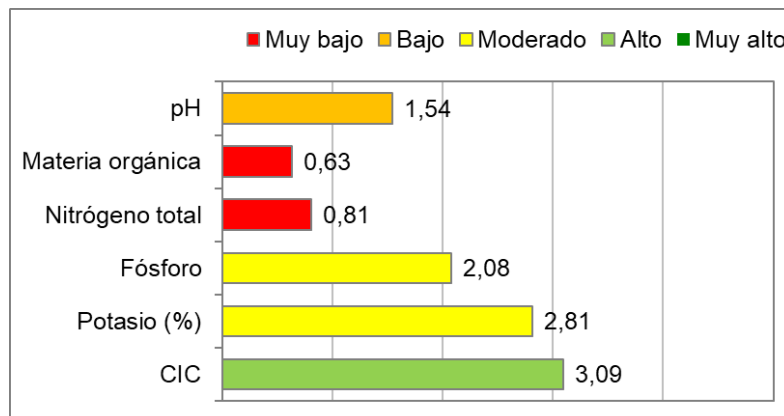
Mapa 8. Índice de fertilidad por área de estudio



Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, la Figura 14 presenta los niveles de las variables edáficas que han sido utilizadas para construir el IF: pH, materia orgánica, nitrógeno total, fósforo, saturación de potasio y capacidad de intercambio catiónico (CIC).

Figura 14. Promedios de las variables edáficas utilizadas para estimar el índice de fertilidad



Fuente: Elaboración propia.

En orden de importancia, las variables edáficas como la CIC, la saturación de potasio y el fósforo contribuyeron en mayor proporción a que se obtenga un 20% del índice de fertilidad moderada. En contraste, la proporción muy baja de materia orgánica y nitrógeno total, más el pH fuertemente alcalino, disminuyó el índice de fertilidad para el restante 80%.

IV. Análisis de correlación de Pearson de las variables edáficas

La Tabla 7 presenta el coeficiente de correlación de Pearson para las 21 variables edáficas y las 70 muestras analizadas en laboratorio.

Los coeficientes de correlación de mayor relevancia fueron obtenidos entre las siguientes variables: calcio intercambiable y CIC, arena y limo, calcio y hierro, conductividad eléctrica y sodio intercambiable, con valores respectivos iguales a 0,996; -0,9343; 0,8030; 0,8007. La primera correlación positiva muy alta muestra que, a mayor cantidad de calcio, se da un incremento en la CIC del suelo. En la segunda correlación se evidencia –con un valor negativo muy alto– que a mayor cantidad de arena en el suelo, disminuye la cantidad de limo, y viceversa.

Por otro lado, el 45% de las correlaciones fueron estadísticamente significativas, y el 55% fueron no significativas, según las probabilidades derivadas de la distribución *t* de Student. Del total de las correlaciones significativas, el 76% fueron altamente significativas, y un 24% fueron significativas. En orden de relevancia, las variables edáficas materia orgánica, calcio, boro, azufre, arena y CIC obtuvieron una mayor proporción de correlaciones significativas. Contrariamente, el potasio y el cobre fueron las variables que obtuvieron menos correlaciones con las otras variables edáficas.

Tabla 7. Análisis de correlación de Pearson de las variables edáficas analizadas en laboratorio

	pH	CE	Arcilla	Arena	Limo	MO	N total	C/N	S	P	K	Ca	Mg	Na	CIC	PSI	Fe	Mn	Zn	Cu	B
CE	0,0467																				
	0,7009																				
Arcilla	0,1688	0,3891																			
	0,1625	0,0009																			
Arena	-0,2338	-0,2274	-0,4664																		
	0,0515	0,0583	<,0001																		
Limo	0,1947	0,0984	0,1206	-0,9343																	
	0,1063	0,4175	0,3201	<,0001																	
MO	0,0510	0,3655	0,5974	-0,5666	0,3954																
	0,6752	0,0019	<,0001	<,0001	0,0007																
N total	-0,0456	0,0928	0,2124	-0,3146	0,2681	0,5315															
	0,7076	0,4451	0,0775	0,0080	0,0249	<,0001															
C/N	-0,0248	0,2923	0,5120	-0,2915	0,1208	0,7610	0,1960														
	0,8388	0,0141	<,0001	0,0144	0,3193	<,0001	0,1040														
S	0,4114	0,6602	0,2660	-0,3839	0,3240	0,3840	0,0535	0,2936													
	0,0004	<,0001	0,0260	0,0010	0,0062	0,0010	0,6602	0,0136													
P	-0,1047	0,0037	0,1315	-0,1489	0,1137	0,4099	0,1768	0,4005	0,0998												
	0,3886	0,9759	0,2780	0,2185	0,3486	0,0004	0,1431	0,0006	0,4110												
K	0,0641	0,0022	0,0978	-0,0514	0,0180	0,0650	0,0431	0,2039	0,0940	0,2747											
	0,5981	0,9854	0,4205	0,6726	0,8827	0,5929	0,7231	0,0904	0,4388	0,0214											
Ca	0,6477	0,2855	0,4830	-0,5391	0,4107	0,4619	0,1905	0,2424	0,4672	0,0427	-0,0574										
	<,0001	0,0166	<,0001	<,0001	0,0004	<,0001	0,1142	0,0432	<,0001	0,7256	0,6373										
Mg	-0,0586	0,2340	0,1970	-0,4704	0,4482	0,2984	0,0531	0,2734	0,2965	0,1424	0,1986	-0,0334									
	0,6297	0,0512	0,1021	<,0001	<,0001	0,0121	0,6622	0,0220	0,0127	0,2395	0,0994	0,7840									
Na	0,1601	0,8007	0,4117	-0,2876	0,1568	0,3190	-0,0010	0,3177	0,6655	-0,0290	0,1008	0,2597	0,4017								
	0,1854	<,0001	0,0004	0,0158	0,1948	0,0071	0,9936	0,0074	<,0001	0,8117	0,4063	0,0299	0,0006								
CIC	0,6486	0,3260	0,5079	-0,5669	0,4319	0,4855	0,1914	0,2741	0,5066	0,0600	0,0017	0,9960	0,0336	0,3204							
	<,0001	0,0059	<,0001	<,0001	0,0002	<,0001	0,1124	0,0217	<,0001	0,6219	0,9891	<,0001	0,7826	0,0069							
PSI	-0,1125	0,4244	0,1282	0,0051	-0,0570	0,0397	-0,0921	0,1752	0,2986	-0,0364	0,0587	-0,2033	0,3116	0,7257	-0,1542						
	0,3540	0,0003	0,2903	0,9667	0,6392	0,7441	0,4485	0,1469	0,0120	0,7650	0,6296	0,0914	0,0086	<,0001	0,2024						
Fe	-0,6516	-0,2036	-0,2887	0,4672	-0,4083	-0,2773	-0,1736	-0,0499	-0,3975	0,1321	0,0774	-0,8030	0,1622	-0,1469	-0,7892	0,3031					
	<,0001	0,0910	0,0154	<,0001	0,0005	0,0201	0,1507	0,6819	0,0007	0,2757	0,5241	<,0001	0,1798	0,2250	<,0001	0,0107					
Mn	-0,1710	-0,1461	-0,4464	0,0876	0,0811	-0,1612	-0,1159	0,0029	0,0343	0,1085	0,1833	-0,4857	0,1523	-0,1133	-0,4693	0,1029	0,3906				
	0,1571	0,2275	0,0001	0,4707	0,5046	0,1826	0,3395	0,9811	0,7780	0,3713	0,1288	<,0001	0,2082	0,3506	<,0001	0,3966	0,0008				
Zn	-0,3013	-0,0635	-0,1497	-0,0235	0,0866	0,0728	-0,0618	0,0460	-0,0079	0,3134	-0,0069	-0,2297	0,1534	-0,0520	-0,2240	0,1132	0,2986	0,2815			
	0,0113	0,6014	0,2161	0,8470	0,4758	0,5490	0,6111	0,7053	0,9481	0,0083	0,9547	0,0557	0,2049	0,6692	0,0623	0,3507	0,0120	0,0182			
Cu	-0,1504	-0,0272	-0,1267	-0,0638	0,1223	0,0682	-0,0190	0,0166	0,0155	0,3886	0,0498	-0,2370	0,2155	-0,0538	-0,2255	0,0255	0,1810	0,2064	0,6871		
	0,2141	0,8234	0,2959	0,5999	0,3131	0,5749	0,8761	0,8914	0,8984	0,0009	0,6822	0,0483	0,0733	0,6584	0,0606	0,8343	0,1338	0,0865	<,0001		
B	0,3376	0,6874	0,4174	-0,4384	0,3236	0,4827	0,1109	0,4390	0,7527	0,1193	0,1324	0,4589	0,4897	0,7669	0,5127	0,3835	-0,3040	-0,0582	-0,0808	-0,0487	
	0,0043	<,0001	0,0003	0,0001	0,0063	<,0001	0,3608	0,0001	<,0001	0,3252	0,2746	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001	0,0010	0,0105	0,6323	0,5063	0,6889	
IF	-0,3562	0,0905	0,3025	-0,4166	0,3455	0,5740	0,3098	0,4869	0,0750	0,4696	-0,0484	0,0671	0,3796	0,1005	0,0831	0,0808	0,1157	-0,0282	0,2679	0,1589	0,2106
	0,0025	0,4564	0,0109	0,0003	0,0034	<,0001	0,0090	<,0001	0,5374	<,0001	0,6910	0,5809	0,0012	0,4080	0,4940	0,5064	0,3402	0,8168	0,0249	0,1888	0,0801

Fuente: Elaboración propia.

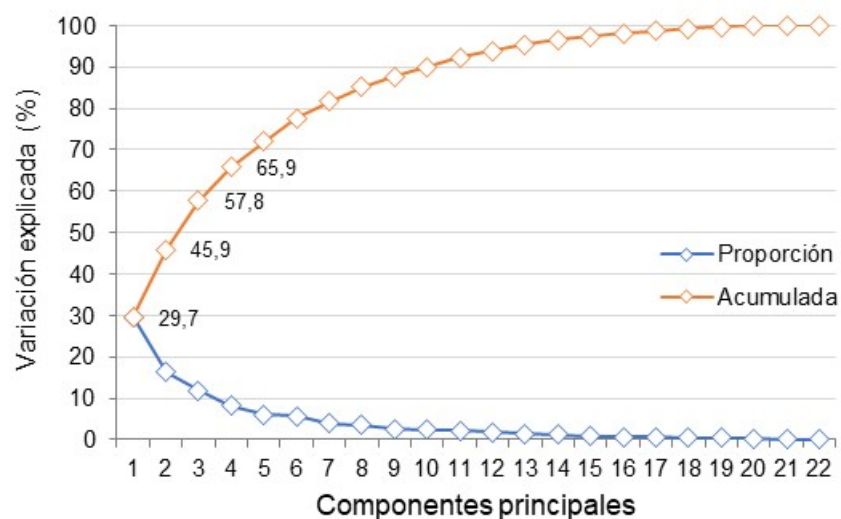
Una correlación significativa de una o más variables edáficas con otras significa que existe una relación con las propiedades físicas, químicas o biológicas del suelo. A nivel práctico, estas relaciones edáficas pueden ser utilizados para mejorar la comprensión de la dinámica del suelo, así como para optimizar las prácticas de manejo que contribuyan a mejorar la fertilidad y la salud del suelo.

V. Componentes principales de las variables edáficas

La técnica de componentes principales (CP) tiene como objetivo reducir la magnitud de un conjunto de datos. A su vez, procura mantener la mayor parte de la información original con el fin de facilitar su visualización, interpretación y análisis.

La Figura 15 y la Tabla 8 presentan los resultados del análisis de componentes principales. El primer componente logró explicar el 29,7% de la varianza; el segundo, el 16,2%; el tercero, el 11,9% y el cuarto, el 8,1%. Así se llegó a un total del 65,9%.

Figura 15. Variación explicada por componentes principales



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 8. Variación explicada por componentes principales (%) a nivel de las variables edáficas

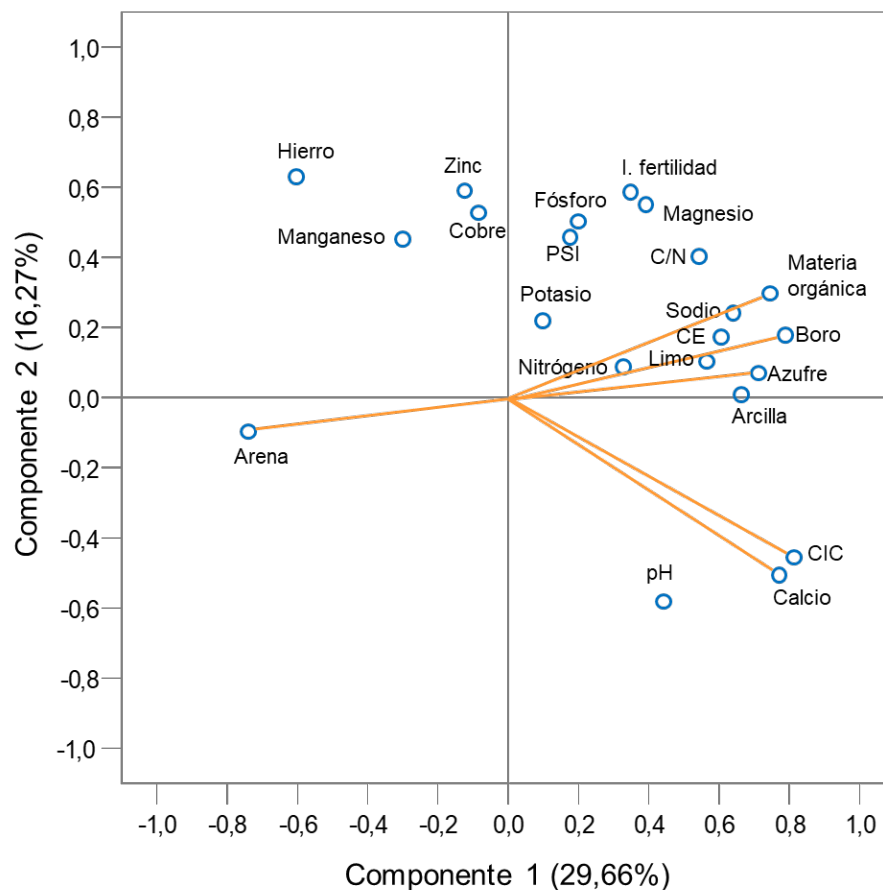
Variables edáficas	Variación explicada por componentes principales				
	1	2	3	4	Total
pH	19,66	34,60	0,80	12,46	67,52
CE	37,15	2,92	28,99	1,25	70,31
Arcilla	44,43	0,01	0,13	20,90	65,47
Limo	32,45	1,05	14,76	28,17	76,43
Arena	55,76	0,90	12,62	9,54	78,83
Materia orgánica total	55,52	8,91	11,47	9,36	85,26
Nitrógeno total	10,63	0,78	16,98	6,57	34,96
Relación C/N	30,10	16,05	1,41	16,38	63,95
Azufre (S)	51,23	0,51	14,06	7,57	73,37
Fósforo (P)	3,88	24,24	16,66	0,64	45,42
Potasio (K)	0,92	4,67	0,13	0,37	6,09
Calcio (Ca)	60,53	26,06	3,24	0,13	89,96
Magnesio (Mg)	15,27	30,49	0,73	6,78	53,27
Sodio (Na)	41,43	5,96	44,01	0,05	91,46
CIC	66,75	21,34	2,08	0,24	90,40
PSI (%)	3,10	20,91	45,32	0,39	69,72
Hierro (Fe)	36,71	39,60	2,81	3,73	82,84
Manganeso (Mn)	9,20	20,69	0,45	20,80	51,15
Zinc (Zn)	1,60	34,96	4,60	10,41	51,57
Cobre (Cu)	0,69	28,11	5,53	16,13	50,47
Boro (B)	63,09	3,15	14,89	0,81	81,94
Índice de fertilidad	12,45	32,07	18,41	6,51	69,44

Fuente: Elaboración propia.

En el primer componente, las variables edáficas que lograron explicar la mayor variabilidad fueron el CIC, el boro, el calcio, la arena, la materia orgánica y el azufre. La variabilidad del segundo componente se explicó principalmente con los datos del hierro, el zinc y el pH. En el tercer componente, la variabilidad se explicó con el PSI y el sodio. En el cuarto componente, con las variables edáficas relacionadas con el contenido de limo, arcilla y manganeso.

En la Figura 16 se sintetiza y explica en dos componentes principales la variación del 45,9% de las variables edáficas analizadas. Las variables edáficas positivas más alejadas de la intersección de los ejes X y Y corresponden a las de mayor aporte en cada componente. Como se señaló anteriormente, los principales datos relevantes para el primer componente fueron la materia orgánica, el calcio, la CIC, el boro, la arena, la materia orgánica y el azufre. El contenido de arena se determinó como negativo en los componentes 1 y 2, lo que significa que los suelos con mayor porcentaje de arena tienen una menor fertilidad, y viceversa.

Figura 16. Variación explicada por las variables edáficas en los dos primeros componentes principales

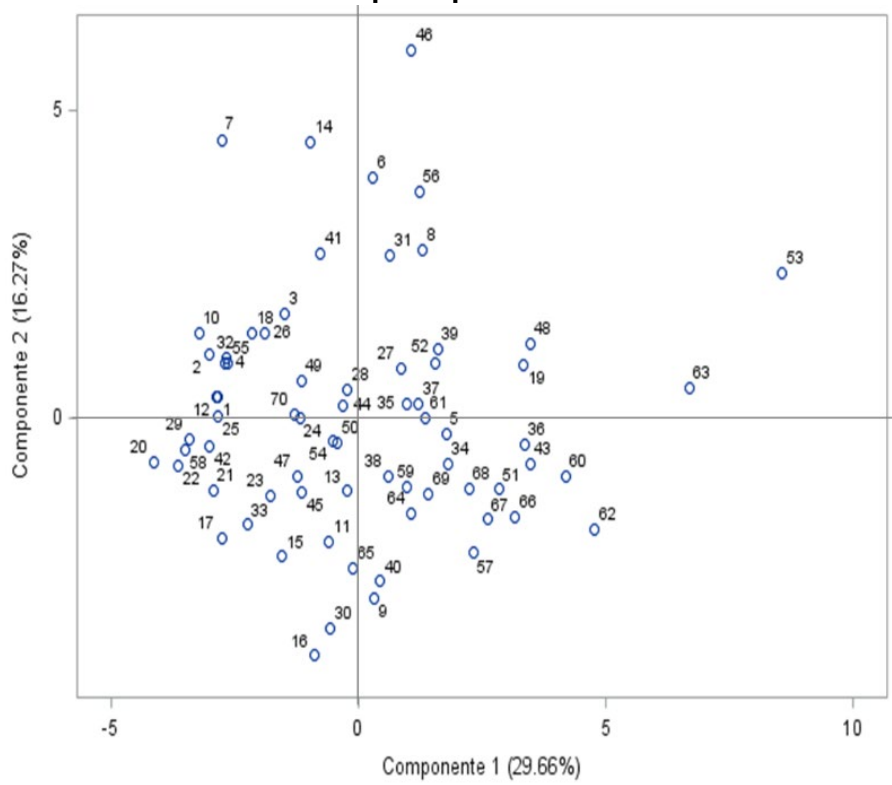


Fuente: Elaboración propia.

La Figura 17 refleja la variación de las parcelas en los dos primeros componentes principales. En el primero, las parcelas 53, 63, 48 y otras aledañas presentaron mayor CIC, boro, calcio, materia orgánica, azufre y arcilla, todos estos relacionados con suelos de mayor fertilidad. En el componente 2, las parcelas 17, 33, 15 y su entorno presentaron un mayor contenido de arena relacionada con suelos de menor fertilidad.

Las parcelas 53 y 48 se evaluaron en la comunidad de Bella Vista y la parcela 63, en la comunidad de Capura, todas asociadas a parcelas con mejor fertilidad. Contrariamente, las parcelas 17, 33 y 15 se evaluaron en las comunidades de Florida, Bengal Vinto y Bella Vista, respectivamente, relacionadas con suelos de menor fertilidad.

Figura 17. Variación de las parcelas explicada en los dos primeros componentes principales



Fuente: Elaboración propia.

VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El presente documento describe el análisis de suelos de 75 parcelas destinadas a la producción de quinua en las comunidades del Altiplano Sur de Bolivia durante el periodo comprendido entre octubre de 2022 y mayo de 2023. Los reportes de laboratorio permitieron realizar un análisis completo con 19 variables edáficas, de las cuales 14 están relacionadas con la fertilidad química, 2 con la fertilidad biológica y 3 con la fertilidad física. A continuación, se describen las principales características de las variables edáficas de los suelos:

- La mayoría de las parcelas presentaron suelos con pH fuertemente y muy fuertemente alcalinos (83%); texturas franco arenosas, areno francosas y arenosas (96%) y una conductividad eléctrica no salina (83%). Los suelos con pH muy alcalinos están relacionados con una baja disponibilidad de fósforo y una deficiencia de algunos micronutrientes como el hierro, el cobre y el zinc respectivamente. Las texturas arenosas son características de los suelos de baja fertilidad con bajo contenido de materia orgánica. La conductividad eléctrica no salina en el suelo explica una baja concentración de sales solubles que no afectan la absorción de agua y nutrientes por las plantas.
- Los suelos analizados presentaron muy bajos niveles de materia orgánica (0,47, en promedio) y nitrógeno total (0,03 en promedio). Asimismo, se cuantificó una baja relación de C/N, lo que evidencia una rápida descomposición y una pérdida de la materia orgánica del suelo. Un suelo con bajos contenidos de materia orgánica tiene una capacidad limitada de retener agua y nutrientes. El déficit de materia orgánica también impide el desarrollo de una estructura adecuada –en suelos arenosos–, aumenta la susceptibilidad a la erosión, reduce la actividad microbiana y limita el desarrollo radicular. El déficit de materia orgánica y nitrógeno total del suelo corresponden a los factores más restrictivos en esta área de estudio.
- Se evidenciaron deficiencias en los nutrientes fósforo, hierro, cobre y zinc dentro de la mayoría de las parcelas evaluadas. Todo aquello muestra que la disponibilidad de estos elementos en el suelo resultaría insuficiente para suministrar las necesidades nutricionales del cultivo de quinua y limita su desarrollo y rendimiento comercial. Según la ley de Liebig, el nutriente que se encuentre en menor cantidad es el que afectará el rendimiento comercial de un cultivo, por lo que es necesario corregir una deficiencia.
- Se registraron valores de moderados a muy altos para el potasio, el azufre y el manganeso. Esto muestra que tales nutrientes se encuentran en cantidades suficientes para suministrar el requerimiento de las plantas.

- Por último, los contenidos de boro y de calcio se cuantificaron como muy altos en la mayoría de las muestras analizadas. Esto permite deducir que las condiciones del suelo podrían tener algunas restricciones para el cultivo de quinua, debido a que un exceso de boro puede resultar tóxico e inhibir el desarrollo de la planta. Niveles muy altos de calcio podrían generar un desbalance con el magnesio y el potasio, y afectar así en la absorción de otros nutrientes esenciales.
- El índice de fertilidad confirmó que predominan suelos de baja (80%) y moderada fertilidad (20%). Esto significa que la mayoría de los suelos analizados tienen una capacidad limitada para proporcionar los nutrientes esenciales a las plantas. A nivel práctico se requerirán aplicar enmiendas orgánicas compostadas para mejorar el nivel de materia orgánica, aumentar su capacidad de retención de humedad y nutrientes, así como favorecer la actividad biológica y salud de los suelos.
- Las series de datos que obtuvieron una mayor correlación con otras variables edáficas y una mayor significancia fueron: materia orgánica, calcio, azufre, boro, arena y capacidad de intercambio catiónico. Una correlación significativa de una o más variables edáficas con otras implica que existe una relación con las propiedades físicas, químicas o biológicas del suelo. A nivel práctico, estas relaciones edáficas pueden ser utilizados para mejorar la comprensión de la dinámica del suelo, así como también para optimizar las prácticas de manejo que contribuyan a mejorar la fertilidad y la salud del suelo.
- El análisis de componentes principales demostró que los primeros cuatro componentes concentraron el 65,9% de la variabilidad de suelos. Las principales variables que influyeron en el primer componente fueron la materia orgánica, el calcio, la capacidad de intercambio catiónico (CIC), el azufre, el boro y la arena. El contenido de arena se determinó como negativo en los componentes 1 y 2, lo que significa que los suelos con menor proporción de arena tendrán una mayor fertilidad.

Bajo este contexto se plantea la necesidad de corregir de manera urgente el déficit de materia orgánica y nitrógeno, además de reponer el fósforo y los micronutrientes deficientes. Para esto cabe iniciar y optimizar los procesos de compostaje en la región según la época del año.

En un mediano y largo plazo, no será suficiente adicionar materia orgánica, ya que se deberá contar con una estrategia para la regeneración de suelos y la restauración de la cobertura nativa, lo que permitirá reconstituir el ecosistema. Para concretar lo referido se recomiendan las siguientes acciones: establecer viveros comunitarios para la producción y multiplicación de plántulas de especies nativas a fin de repoblar las barreras vivas, repoblar los campos de pastoreo e intercalar con el cultivo de quinua.

También se recomienda implementar descansos mejorados del terreno con especies leguminosas nativas; seleccionar y establecer parcelas demostrativas para validar el efecto de la materia orgánica compostada en el rendimiento comercial de la quinua orgánica a fin de avanzar en su perfeccionamiento; capacitar recursos humanos para la implementación de buenas prácticas de manejo de la fertilidad del suelo; promover la cosecha y el almacenamiento del agua de lluvia; y promover la apropiación por parte de los actores clave para avanzar en una estrategia hacia la recuperación de un ecosistema que sea sostenible y que, al mismo tiempo, genere mayores rendimientos.

BIBLIOGRAFÍA

Alcantar González, G., Trejo Téllez, L. I. y Gómez Merino, F. C. (2016). *Nutrición de cultivos*. Colegio de Posgraduados.

Balzarini, M., Di Rienzo, J., Tablada, M., Gonzalez, L., Bruno, C., Córdoba, M. y Casanoves, F. (2012). *Estadística y biometría. Ilustraciones del uso de Infostat en problemas de agronomía*. Universidad Nacional de Córdoba.

Campero, S. A. (2016). *Índices agrometeorológicos para 149 estaciones meteorológicas en Bolivia*. Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología -SENAMHI- y Food and Agriculture Organization of the United Nations -FAO-.

Cárdenas, J. y Choque, W. (2008). *Fertilidad, uso y manejo de suelos en la zona del intersalar: Departamentos de Oruro y Potosí*. FCAPV-UTO y FAUTAPO.

Centro Tecnológico Agropecuario de Bolivia -CETABOL- (2023). *Resultados de análisis de suelos*. Manuscrito no publicado. La Paz, Bolivia.

Collao, R. y Muriel, B. (2024). *Situación actual y perspectivas del sector quinuero en Bolivia*. Documento de Trabajo No. 06/2024. Development Research Working Paper Series. La Paz, Bolivia: Fundación INESAD.

Dagnino, J. (2014). Coeficiente de correlación lineal de Pearson. *Chil Anest*, 43 (1), 150-153.

Da Silva, F. C. (2009). *Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes*. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica; Rio de Janeiro: Embrapa Solos.

Fassbender, H. y Bornemisza, E. (1987). *Química de suelos con énfasis en suelos de América Latina*. San José, Costa Rica: Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA).

Food and Agriculture Organization of the United Nations -FAO- (2023). FAOSTAT: Statistical Database [base de datos]. <https://www.fao.org/faostat/en/>

Food and Agriculture Organization of the United Nations -FAO- (2020). *Soil Testing Methods Manual (Global Soil Doctors Programme: A Farmer-to-Farmer Training Programme)*. Roma. <https://doi.org/10.4060/ca2796en>

Haneklaus, S., Schnug, E., Paulsen, H. M. y Hagel, I. (2005). Soil Analysis for Organic Farming. *Communications In Soil Science and Plant Analysis*, 36(1-3), 65-79.

Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C. y Baptista Lucio, P. (2018). *Metodología de la investigación*, vol. 4, 310-386. México: McGraw-Hill Interamericana.

Instituto Geográfico Agustín Codazzi -IGAC- (2014). *Metodología para la clasificación de las tierras por su capacidad de uso*. Bogotá, Colombia.

Instituto para la Innovación Tecnológica en la Agricultura -INTAGRI- (2017a). *La conductividad eléctrica del suelo en el desarrollo de los cultivos*. Serie Suelos no. 26, p. 5. Artículos Técnicos de INTAGRI. México.

Instituto para la Innovación Tecnológica en la Agricultura -INTAGRI- (2017b). *Propiedades físicas del suelo y el crecimiento de las plantas*. Serie suelos no. 29, p. 5. Artículos Técnicos de INTAGRI. México.

Instituto para la Innovación Tecnológica en la Agricultura -INTAGRI- (2018). *Disponibilidad de nutrimentos y pH del suelo*. Serie Nutrición Vegetal no. 113, p. 4. Artículos Técnicos de INTAGRI. México.

Instituto Nacional de Estadística de Bolivia -INE- (2012). *Características de población y vivienda: Censo nacional de población y vivienda*.

Jacobsen, E. (2011). The Situation for Quinoa and Its Production in Southern Bolivia: From Economic Success to Environmental Disaster. *Journal of Agronomy and Crop Science* 197(5): 390-399.

Jaramillo, D. F. (2002). *Introducción a la ciencia del suelo*. Escuela de Geociencias y Medio Ambiente.

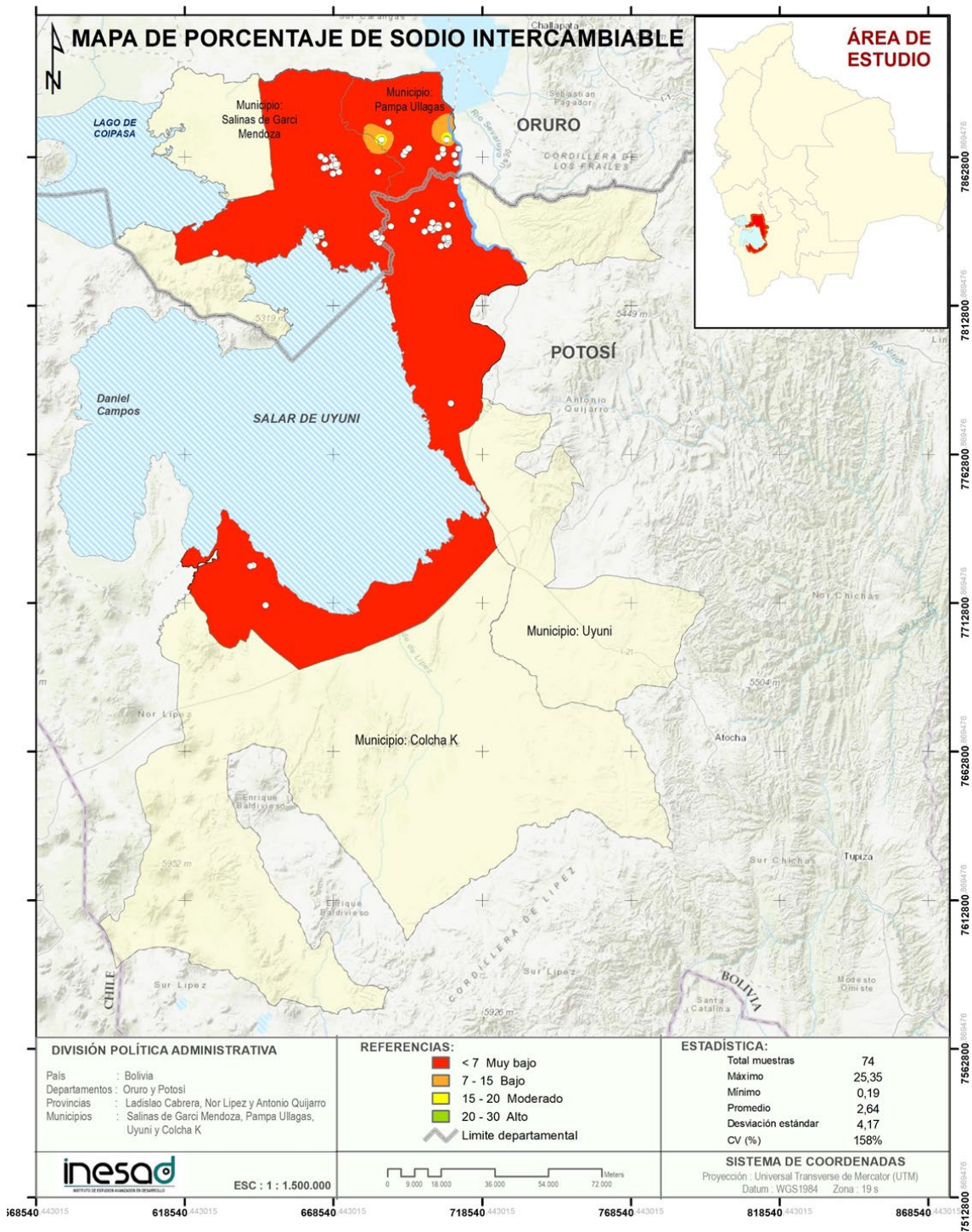
Méndez, J. C. y Bertsch, F (2012). *Guía para la interpretación de la fertilidad de los suelos de Costa Rica*. San José, Costa Rica: ACCS.

Orsag, V. y Ramos, E. C. (2011). *Evaluación de la fertilidad de los suelos en la zona intersalar: Producción sostenible de quinua (no. 10)*. PIEB.

- Orsag, V. (2010). *El recurso suelo: Principios para su manejo y conservación*. Foro Boliviano sobre Medio Ambiente y Desarrollo.
- Osorio, N. W. (2012). pH del suelo y disponibilidad de nutrientes. *Manejo integral del suelo y nutrición vegetal*, 1(4), 1-4.
- Pennock, D., & McKenzie, N. (2016). Estado mundial del recurso suelo.
- Red Quinoa (2023). *Rendimiento de la producción de quinua en las comunidades de la red*. Manuscrito no Publicado. La Paz, Bolivia.
- Roca, L. (2024). *Estimación de la huella de carbono en parcelas de quinua orgánica en el sur de Bolivia. Estudio de caso*. Documento de Trabajo No. 07/2024. Development Research Working Paper Series. La Paz, Bolivia: Fundación INESAD.
- Sánchez, P. A. y Camacho, E. (1981). *Suelos del trópico: Características y manejo* (no. 48). IICA Biblioteca Venezuela.
- Sánchez, P. (2011). Nutrición de la zarzamora. Colegio de Postgraduados en Ciencias Agrícolas. México.
- Sela, G. (2020). *Fertilization and Irrigation: Theory and Best Practices*. Cropaia Press.
- Soto, M. (2008). *Bananos: Técnicas de producción, manejo, poscosecha y comercialización*. 3era ed. San José Costa Rica.
- Statistical Analysis Systems -SAS- Institute Inc. (2013). SAS R 9.2 Help and documentation. www.sas.com
- Steel, R. y Torrie, J. (1992). *Bioestadística: Principios y procedimientos*. Ciudad de México: McGraw-Hill.
- Villarreal, G. y Alfaro, E. (1997). *Manual internacional de fertilidad de suelos*. Potash & Phosphate Institute.
- Vistoso, E. y Martínez-Lagos, J. (2021). *¿Cómo diagnosticar la fertilidad del suelo?* INIA Remehue.
- Weil, R. & Brady, N. (2017). The nature and properties of soils (Vol. 15). Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall.

ANEXO

Mapa A1. Sodio intercambiable (PSI) según área de estudio



Fuente: Elaboración propia.