

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINAS Y  
METALÚRGICA**

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA**



**TESIS**

**INFLUENCIA LITOLÓGICA EN LOS SUELOS PARA EL  
CULTIVO DE QUINUA (*Chenopodium Quinoa* Willd):  
UN ANÁLISIS QUÍMICO DEL SISTEMA ROCA-SUELO-PLANTA  
EN EL ÁREA DE CABANA, PUNO**

**PRESENTADO POR:**

Br. WILSON HUANCA CALLA

**PARA OPTAR AL TÍTULO PROFESIONAL DE  
INGENIERO GEÓLOGO**

**ASESOR:**

Mg. JOSE DIONICIO CARDENAS ROQUE

**CUSCO – PERÚ**

**2024**

# INFORME DE ORIGINALIDAD

(Aprobado por Resolución Nro.CU-303-2020-UNSAAC)

El que suscribe, Asesor del trabajo de investigación/tesis titulada: INFLUENCIA LITOLÓGICA EN LOS SUELOS PARA EL CULTIVO QUINUA (Chenopodium Quinoa Willd): UN ANÁLISIS QUÍMICO DEL SISTEMA ROCA - SUELO - PLANTA EN EL ÁREA DE CABANA, PUNO

presentado por: WILSON HUANCA CALLA con DNI Nro.: 73894218 presentado por: ..... con DNI Nro.: ..... para optar el título profesional/grado académico de INGENIERO GEÓLOGO

Informo que el trabajo de investigación ha sido sometido a revisión por 02 veces, mediante el Software Antiplagio, conforme al Art. 6° del **Reglamento para Uso de Sistema Antiplagio de la UNSAAC** y de la evaluación de originalidad se tiene un porcentaje de 5 %.

Evaluación y acciones del reporte de coincidencia para trabajos de investigación conducentes a grado académico o título profesional, tesis

Porcentaje	Evaluación y Acciones	Marque con una (X)
Del 1 al 10%	No se considera plagio.	X
Del 11 al 30 %	Devolver al usuario para las correcciones.	
Mayor a 31%	El responsable de la revisión del documento emite un informe al inmediato jerárquico, quien a su vez eleva el informe a la autoridad académica para que tome las acciones correspondientes. Sin perjuicio de las sanciones administrativas que correspondan de acuerdo a Ley.	

Por tanto, en mi condición de asesor, firmo el presente informe en señal de conformidad y adjunto la primera página del reporte del Sistema Antiplagio.

Cusco, 25 de enero de 2025



Firma

Post firma JOSE DIONICIO CARDENAS ROQUE

Nro. de DNI 23873595

ORCID del Asesor 0000-0002-5261-419X

Se adjunta:

1. Reporte generado por el Sistema Antiplagio.
2. Enlace del Reporte Generado por el Sistema Antiplagio: oid: 27259:423466868

# Wilson Huanca

## INFLUENCIA LITOLÓGICA EN LOS SUELOS PARA EL CULTIVO DE QUINUA.pdf

 Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco

### Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::27259:423466868

Fecha de entrega

25 ene 2025, 9:27 a.m. GMT-5

Fecha de descarga

25 ene 2025, 7:52 p.m. GMT-5

Nombre de archivo

INFLUENCIA LITOLÓGICA EN LOS SUELOS PARA EL CULTIVO DE QUINUA.pdf

Tamaño de archivo

16.3 MB

234 Páginas

87,174 Palabras

421,556 Caracteres

# 5% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

## Filtrado desde el informe




- Bibliografía
- Texto citado
- Texto mencionado
- Coincidencias menores (menos de 8 palabras)

## Exclusiones

- N.º de coincidencias excluidas

---


## Fuentes principales

- 4%  Fuentes de Internet
- 1%  Publicaciones
- 3%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

---

## Marcas de integridad

### N.º de alerta de integridad para revisión

-  **Caracteres reemplazados**  
129 caracteres sospechosos en N.º de páginas  
Las letras son intercambiadas por caracteres similares de otro alfabeto.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

---

## RESUMEN

El cultivo de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) es de gran relevancia en el área de Cabana, Puno, tanto por su alto valor nutricional como por su importancia social y económica, a nivel de las comunidades locales y regionales. Sin embargo, la producción de estos granos andinos está influenciada por diversos factores, entre los cuales destaca la composición química de los suelos, que a su vez está condicionada por la litología de las rocas de las cuales derivan. Esto resalta la necesidad de analizar químicamente la influencia de la litología en los suelos utilizados para el cultivo de quinua, integrando un enfoque que relacione los sistemas roca-suelo-planta en esta región.

La presente investigación tuvo como objetivo principal analizar la influencia litológica en los suelos para el cultivo quinua mediante un análisis químico del sistema roca-suelo-planta en el área de Cabana, Puno. Para ello se estructuró en torno a objetivos específicos, que incluyeron la caracterización litológica del material parental, el análisis químico multivariado entre las rocas y suelos, y la distribución de elementos minerales esenciales en los sistemas roca-suelo-planta.

Para llevar a cabo esta investigación, se realizó un muestreo representativo con un total de 78 muestras. De estos, en las rocas, se realizó un muestreo de 36 muestras en las litologías representativas de las unidades litoestratigráficas. En suelos, se recolectaron 39 muestras, distribuidas en 20 calicatas (19 en horizontes profundos y 20 superficiales). Finalmente, en las plantas, se obtuvieron 3 muestras de granos de quinua en madurez fisiológica. El estudio combinó métodos geológicos, geomorfológicos, geoquímicos y estadísticos multivariados. Entre estas técnicas empleadas destacan el análisis de datos composicionales, el análisis de componentes principales robusto (*RPCA*), el análisis de componentes principales (*PCA*) y el análisis de clúster jerárquico, los cuales permitieron identificar relaciones significativas en el sistema.

El área de Cabana desde una perspectiva regional y local, el análisis geomorfológico identificó que el área se encuentra dentro de la Cordillera de Andes Centrales, en el Altiplano del sur del Perú. En este entorno, las geoformas predominantes como altiplanicies y planicies, compuestas por facies de sedimentos no consolidados, proporcionan condiciones para el cultivo de quinua. El análisis geológico, reveló que los arcos magmáticos de Cenozoico, desarrollados predominantemente a lo largo de la Cordillera Occidental, generaron materiales volcánicos transportados hacia las cuencas del Altiplano. Estos sedimentos, conformando por

gravas, arenas y limos, presentan una alta proporción de clastos volcánicos, predominantemente de origen efusivo (45.75 %) y explosivo (41.00 %), además de menores cantidades de clastos sedimentarios e intrusivos. Estas características litológicas favorecieron su acumulación en geoformas como altiplanicies y planicies. En conjunto influyen en la formación de sedimentos y suelos destinados al cultivo de quinua.

Continuando, los análisis estadísticos multivariados cuantificaron las relaciones entre las características litológicas y los suelos, con datos químicos representativos y discriminantes. Se determinó que las rocas ígneas extrusivas, como las shoshonitas y traquiandesitas, influyen significativamente en la composición química de los suelos, tanto superficiales como profundos, destinado al cultivo de quinua. Cuantificados mediante las distancias los centroides roca-suelo, con valores de 5.02 entre las rocas y los suelos profundos, 5.79 entre las rocas y los suelos superficiales, y 1.2 entre los horizontes profundos y superficiales. Además, de cumplir con las similares características químicas.

Finalmente, se evaluó la distribución de elementos minerales esenciales en el sistema roca-suelo-planta. Los granos de quinua presentaron concentraciones significativas de macronutrientes, como potasio (K: 4,900 ppm), fósforo (P: 5,240 ppm), calcio (Ca: 1,000 ppm), magnesio (Mg: 1,720 ppm) y azufre (S: 500 ppm), así como de micronutrientes, como manganeso (Mn: 29.5 ppm), hierro (Fe: 59.7 ppm), zinc (Zn: 35.7 ppm), cobre (Cu: 1.3 ppm) y molibdeno (Mo: 0.4 ppm). Estas concentraciones reflejan la eficiencia del sistema en la transferencia de nutrientes esenciales desde las rocas parentales hacia las plantas. Las rocas ígneas extrusivas del Cenozoico actúan como la principal fuente litológica de nutrientes en el sistema. Durante los procesos de meteorización y erosión, estos nutrientes son liberados hacia los suelos. Los suelos profundos, con altas capacidades de retención, funcionan como reservorios temporales de los nutrientes esenciales. Por otro lado, los suelos superficiales, al presentar concentraciones más accesibles.

El análisis confirmó que la litología influye significativamente en la composición química de los suelos destinados al cultivo de quinua en Cabana, Puno. La interacción entre las rocas ígneas extrusivas, los suelos y las plantas garantiza la transferencia eficiente de nutrientes esenciales, fortaleciendo los suelos y el valor nutricional del grano de quinua. Estos hallazgos proporcionan una base científica sólida para optimizar la gestión agrícola en el Altiplano peruano, promoviendo la sostenibilidad del cultivo y favoreciendo el progreso tanto económico como social de la zona.

**Palabras clave:** Influencia litológica, cultivo de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.), análisis multivariante, análisis de componentes principales (PCA), Altiplano

## **DEDICATORIA**

*Dedico esta investigación a mis padres,  
Sotero e Irene, a mi hermana Tania, y a  
mi sobrinita Ariana con profundo cariño  
y gratitud.*

## **AGRADECIMIENTOS**

Inicialmente, deseo expresar mi gratitud al Ing. Inés Trinidad, quien ha desempeñado un papel esencial en la orientación de todas las fases de esta investigación. Le agradezco por depositar su confianza en mí.

Adicionalmente, deseo expresar mi gratitud hacia los Ing. (s) Elvis Sánchez, Rildo Rodríguez, Fredy Jaimes, Dante Soberón, Walter Ccallo, Ulises Román, Dennis Guevara, Cleber Huachaca, Adriel Sencia, Luisa Gonzalez y entre otros, quienes aportaron valiosas sugerencias, discusiones y opiniones, así como aprendizajes, para el avance de la presente investigación. Además, deseo expresar mi gratitud hacia la Dra. Miriam Mamani, quien promueve con ideas innovadoras para nuevas investigaciones.

No puedo dejar de expresar mi gratitud a todos los docentes y funcionarios de mi estimada Escuela Profesional de Ingeniería Geológica, a quienes les debo una parte importante de mi formación profesional y personal. En especial, al Mg. Ing. José Cárdenas, por sus valiosos consejos para la geología y para la vida, y por su constante apoyo y disposición a ayudarme en muchas ocasiones.

No tengo palabras suficientes para agradecer a mi familia, quienes nunca han dejado de creer en mí y han apoyado en todas mis ideas a lo largo de mi existencia. Quiero agradecer mi madre, Irene, a mi padre Sotero, y a mi hermana, Tania. Este trabajo está dedicado con mucho amor a ustedes.

Finalmente, quiero agradecer a Carmen, mi compañera de vida, por todo el amor y apoyo incondicional.



## ÍNDICE DE CONTENIDO

<b>RESUMEN.....</b>	<b>1</b>
<b>DEDICATORIA .....</b>	<b>3</b>
<b>AGRADECIMIENTOS .....</b>	<b>4</b>
<b>ÍNDICE DE CONTENIDO .....</b>	<b>5</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS.....</b>	<b>13</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS.....</b>	<b>18</b>
<b>LISTA DE ABREVIATURAS .....</b>	<b>19</b>
<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
<b>CAPÍTULO 1. GENERALIDADES DE LA INVESTIGACIÓN.....</b>	<b>4</b>
1.1 DELIMITACIÓN ESPACIAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN .....	4
1.2 ACCESIBILIDAD AL ÁREA DE ESTUDIO.....	5
1.3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN .....	6
1.3.1 PROBLEMA GENERAL .....	7
1.3.2 PROBLEMAS ESPECÍFICOS.....	7
1.4 SISTEMA DE OBJETIVOS .....	7
1.4.1 OBJETIVO GENERAL.....	7
1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	7
1.1 HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN .....	8
1.4.3 HIPÓTESIS GENERAL.....	8
1.4.4 HIPÓTESIS ESPECIFICAS.....	8
1.5 JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN.....	8
<b>CAPÍTULO 2. DISEÑO Y METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN .....</b>	<b>10</b>
2.1 ENFOQUE DEL DISEÑO INVESTIGATIVO .....	10
2.2 METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN .....	11
2.3 POBLACIÓN Y LA MUESTRA OBJETO DE ESTUDIO .....	11
2.3.1 DEFINICIÓN DE LA POBLACIÓN DE ESTUDIO .....	11
2.3.2 MARCO MUESTRAL .....	11
2.3.2.1 ELEMENTOS DEL MARCO MUESTRAL.....	11
2.3.2.2 TAMAÑO DE MUESTRA.....	12

2.4 RECOLECCIÓN DE DATOS .....	13
2.4.1 MUESTREO DE ROCAS, SUELOS Y PLANTAS .....	13
2.4.1.1 MUESTREO DE ROCAS.....	13
2.4.1.2 MUESTREO DE SUELOS.....	13
2.4.1.3 MUESTREO DE LOS GRANOS DE LA PLANTA QUINUA.....	14
2.5 PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS.....	16
2.5.1 PROCEDIMIENTO ANALÍTICO.....	16
2.5.2 CONTROL DE CALIDAD DE ANÁLISIS QUÍMICOS.....	18
2.5.3 ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE DATOS.....	21
2.5.3.1 ANÁLISIS DE DATOS COMPOSICIONALES .....	21
2.5.3.2 ANÁLISIS MULTIVARIADO DE DATOS.....	21
2.5.3.3 ÍNDICES GEOQUÍMICOS .....	23
2.5.3.4 REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE DATOS .....	24
2.5.3.5 SOFTWARES UTILIZADOS .....	25
<b>CAPÍTULO 3. MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>26</b>
3.1 INVESTIGACIONES PREVIAS .....	26
3.2 BASES TEÓRICAS Y GEO CIENTÍFICAS .....	27
3.2.1 INTERACCIÓN ENTRE LA LITOSFERA, SUELO Y PLANTA.....	27
3.2.2 CICLO DE LAS ROCAS: RELACIÓN CON LOS SUELOS.....	28
3.2.2.1 ROCAS ÍGNEAS.....	28
3.2.2.2 ROCAS SEDIMENTARIAS .....	29
3.2.2.3 ROCAS METAMÓRFICAS.....	29
3.2.2.4 FORMACIÓN DEL SUELO .....	30
3.2.3 GEOMORFOLOGÍA .....	31
3.1.1.1 CLASIFICACIÓN DE GEOFORMAS .....	32
3.2.4 TRANSFORMACIÓN DE ROCA A SUELO .....	33
3.2.5 ELEMENTOS MINERALES ESENCIALES PARA LAS PLANTAS .....	34
3.2.6 CULTIVO DE LA PLANTA QUINUA.....	36
3.2.6.1 TAXONOMÍA DE LA QUINUA.....	36
3.2.6.2 CARACTERÍSTICAS GEOGRÁFICAS .....	36
3.2.6.3 DESCRIPCIÓN MORFOLÓGICA .....	37
3.3 DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS .....	39
3.3.1 LITOLOGÍA / FACIES .....	39
3.1.1.2 LITOLOGÍA: .....	39
3.1.1.3 FACIES:.....	39

3.3.2 MATERIAL PARENTAL.....	40
3.3.3 ELEMENTO MINERAL ESENCIAL .....	40
3.3.4 SUELOS .....	41
3.3.5 LITO GEOQUÍMICA .....	41
3.3.6 QUÍMICA DEL SUELO .....	41
3.3.7 QUINUA.....	41
<b>CAPÍTULO 4. GEOMORFOLOGÍA Y GEOLOGÍA DEL ÁREA DE CABANA.....</b>	<b>42</b>
4.1 PREÁMBULO .....	42
4.2 MARCO GEOGRÁFICO .....	42
4.2.1 CLIMA .....	42
4.2.2 INTENSIDAD DE LA METEORIZACIÓN.....	43
4.2.3 VEGETACIÓN.....	43
4.3 MARCO GEOMORFOLÓGICO.....	45
4.3.1 GEO ESTRUCTURA.....	46
4.3.2 AMBIENTE MORFOGÉNICO .....	46
4.3.3 PAISAJE GEOMORFOLÓGICO .....	48
4.4 MARCO GEOLÓGICO .....	51
4.4.1 GEOLOGÍA REGIONAL .....	51
4.4.2 GEOLOGÍA LOCAL .....	56
4.1.1.1 UNIDADES LITOESTRATIGRÁFICAS DEL ÁREA DE CABANA ....	56
4.1.1.2 SEDIMENTOS NO CONSOLIDADOS PARA EL CULTIVO QUINUA	61
4.1.2 LITOLÓGÍAS REPRESENTATIVAS DE ÁREA DE CABANA .....	64
<b>CAPÍTULO 5. INFLUENCIA LITOLÓGICA EN LA QUÍMICA DE SUELOS MEDIANTE EL ANÁLISIS MULTIVARIANTE GEOQUÍMICO.....</b>	<b>65</b>
5.1 PREÁMBULO .....	65
5.2 ANÁLISIS QUÍMICO EXPLORATORIO DE ELEMENTOS PRINCIPALES EN ROCAS.....	67
5.2.1 ASOCIACIÓN DE MUESTRAS DE ROCA MEDIANTE ANÁLISIS ESTADÍSTICO MULTIVARIADO .....	70
5.2.1.1 ANÁLISIS DE DATOS COMPOSICIONALES (CODA) POR LA TRANSFORMACIÓN LOGARÍTMICA CENTRADA (CLR) EN ROCAS.....	70
5.2.1.2 ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES ROBUSTO (RPCA) EN ROCAS .....	71
5.2.1.3 ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES (PCA) EN LA MATRIZ L EN ROCAS .....	72
5.2.1.4 ANÁLISIS DE CLÚSTERING JERÁRQUICO EN ROCAS.....	77

5.3 ANÁLISIS QUÍMICO EXPLORATORIO DE ELEMENTOS PRINCIPALES EN SUELOS.....	81
5.3.1 ASOCIACIÓN DE MUESTRAS DE SUELO MEDIANTE ANÁLISIS ESTADÍSTICO MULTIVARIADO .....	84
5.3.1.1 ANÁLISIS DE DATOS COMPOSICIONALES (CODA) POR LA TRANSFORMACIÓN LOGARÍTMICA CENTRADA (CLR) EN SUELOS .....	84
5.3.2 ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES ROBUSTO (RPCA) EN SUELOS PROFUNDOS .....	85
5.3.2.1 COMPONENTES DE BAJO RANGO (L) Y DISPERSOS (S) EN SUELOS PROFUNDOS .....	85
5.3.2.2 ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES (PCA) EN LA MATRIZ L DE SUELOS PROFUNDOS.....	86
5.3.2.3 ANÁLISIS DE CLÚSTERING JERÁRQUICO EN SUELOS PROFUNDOS .....	89
5.3.3 ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES ROBUSTO (RPCA) EN SUELOS SUPERFICIALES .....	93
5.3.3.1 COMPONENTES DE BAJO RANGO (L) Y DISPERSOS (S) EN SUELOS SUPERFICIALES.....	93
5.3.3.2 ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES (PCA) EN LA MATRIZ L DE SUELOS SUPERFICIALES.....	93
5.3.3.3 ANÁLISIS DE CLÚSTERING JERÁRQUICO EN SUELOS SUPERFICIALES.....	98
5.4 VALIDACIÓN DE LA ASOCIACIÓN EN ROCAS PARENTALES: PATRONES DE ELEMENTOS DE TIERRAS RARAS (REE).....	101
5.4.1 CLÚSTER R1: PATRONES RRE EN ROCAS VOLCÁNICAS .....	102
5.4.2 CLÚSTER R2: PATRONES RRE EN ROCAS PLUTÓNICAS.....	103
5.4.3 CLÚSTER R3: PATRONES REE EN ROCAS SEDIMENTARIAS SILICICLÁSTICAS .....	104
5.4.4 CLÚSTER R4: PATRONES RRE EN ROCAS SEDIMENTARIAS CALCÁREAS.....	106
5.4.5 CLÚSTER R5: PATRONES REE EN ROCAS CARBONATADAS .....	107
5.4.6 RESUMEN DE VALIDACIÓN DE CLÚSTERES EN ROCAS .....	109
5.5 VALIDACIÓN DE LA ASOCIACIÓN EN SUELOS PROFUNDOS: PATRONES DE ELEMENTOS DE TIERRAS RARAS (REE).....	113
5.5.1 CLÚSTER Sp1: PATRONES REE EN SUELOS PROFUNDOS DERIVADOS DE FACIES NO CONSOLIDADAS E INTRUSIVA .....	114
5.5.2 CLÚSTER Sp2: PATRONES REE EN SUELOS PROFUNDOS DERIVADOS DE ROCAS VOLCÁNICAS Y QUÍMICAS .....	115
5.5.3 CLÚSTER Sp3: PATRONES REE EN SUELOS PROFUNDOS DERIVADOS ROCAS SEDIMENTARIAS.....	117

5.5.4 RESUMEN DE VALIDACIÓN DE CLÚSTERES EN SUELOS PROFUNDOS .....	118
5.6 VALIDACIÓN DE LA ASOCIACIÓN EN SUELOS SUPERFICIALES: PATRONES DE ELEMENTOS DE TIERRAS RARAS (REE) .....	121
5.6.1 CLÚSTER S <sub>s1</sub> : PATRONES REE EN SUELOS SUPERFICIALES DERIVADOS DE FACIES NO CONSOLIDADAS .....	121
5.6.2 CLÚSTER S <sub>s2</sub> Y S <sub>s3</sub> : PATRONES REE EN SUELOS SUPERFICIALES DERIVADOS ROCAS SEDIMENTARIAS.....	122
5.6.3 CLÚSTER S <sub>s4</sub> Y S <sub>s5</sub> : PATRONES REE EN SUELOS SUPERFICIALES DERIVADOS DE ROCAS ÍGNEAS Y QUÍMICAS .....	123
5.6.4 CLÚSTER S <sub>s6</sub> : PATRONES REE EN SUELOS SUPERFICIALES DERIVADOS MATERIALES QUÍMICAS .....	125
5.6.5 RESUMEN DE VALIDACIÓN DE CLÚSTERES EN SUELOS SUPERFICIALES .....	126
5.7 ANÁLISIS COMPARATIVO CONJUNTO DE DATOS ENTRE LA ROCA Y SUELO .....	129
5.7.1 RELACIÓN GEOQUÍMICA ENTRE LAS AGRUPACIONES DE ROCAS PARENTALES Y LOS SUELOS PARA EL CULTIVO QUINUA .....	132
5.7.1.1 RELACIÓN ENTRE LAS ROCAS PARENTALES Y LOS SUELOS PROFUNDOS .....	132
5.7.1.2 RELACIÓN ENTRE LAS ROCAS PARENTALES Y LOS SUELOS SUPERFICIALES.....	133
5.7.1.3 RELACIÓN ENTRE LOS SUELOS PROFUNDOS Y SUPERFICIALES	134
<b>CAPÍTULO 6. ELEMENTOS MINERALES ESENCIALES PARA EL CULTIVO DE QUINUA EN EL SISTEMA ROCA-SUELO-PLANTA .....</b>	<b>135</b>
6.1 PREÁMBULO .....	135
6.2 ELEMENTOS MINERALES ESENCIALES EN LOS GRANOS DE QUINUA.....	136
6.2.1 COMPOSICIÓN MINERAL DE LOS GRANOS DE QUINUA .....	136
6.3 ELEMENTOS MINERALES ESENCIALES EN LAS LITOLOGÍAS.....	139
6.3.1 DISTRIBUCIÓN DE MACRONUTRIENTES EN ROCAS PARENTALES ...	139
6.3.1.1 POTASIO (K) .....	140
6.3.1.2 FOSFORO (P):.....	141
6.3.1.3 CALCIO (CA).....	142
6.3.1.4 MAGNESIO (MG).....	142
6.3.1.5 AZUFRE (S) .....	143
6.3.2 DISTRIBUCIÓN DE MICRONUTRIENTES EN ROCAS PARENTALES ....	144
6.3.2.1 MANGANESO (MN) .....	145
6.3.2.2 HIERRO (FE).....	145

---

6.3.2.3 ZINC (ZN) .....	146
6.3.2.4 COBRE (CU) .....	146
6.3.2.5 MOLIBDENO (MO).....	147
6.3.2.6 NÍQUEL (NI) .....	147
6.3.3 COMPARACIÓN DE MACRONUTRIENTES Y MICRONUTRIENTES EN ROCAS PARENTALES .....	148
6.4 ELEMENTOS MINERALES ESENCIALES EN SUELOS PROFUNDOS .....	151
6.4.1 DISTRIBUCIÓN DE MACRONUTRIENTES EN SUELOS PROFUNDOS ...	151
6.4.1.1 POTASIO (K) .....	152
6.4.1.2 FOSFORO (P) .....	153
6.4.1.3 CALCIO (CA).....	154
6.4.1.4 MAGNESIO (MG).....	154
6.4.1.5 AZUFRE (S) .....	155
6.4.2 DISTRIBUCIÓN DE MICRONUTRIENTES EN SUELOS PROFUNDOS ....	156
6.4.2.1 MANGANESO (MN): .....	157
6.4.2.2 HIERRO (FE).....	157
6.4.2.3 ZINC (ZN) .....	158
6.4.2.4 COBRE (CU): .....	158
6.4.2.5 MOLIBDENO (MO).....	159
6.4.2.6 NÍQUEL (NI) .....	159
6.4.3 COMPARACIÓN DE MICRONUTRIENTES Y MICRONUTRIENTES EN SUELOS PROFUNDOS .....	160
6.5 ELEMENTOS MINERALES ESENCIALES EN SUELOS SUPERFICIALES .....	163
6.5.1 DISTRIBUCIÓN DE MACRONUTRIENTES EN SUELOS SUPERFICIALES .....	163
6.5.1.1 POTASIO (K) .....	164
6.5.1.2 FOSFORO (P) .....	165
6.5.1.3 CALCIO (CA).....	165
6.5.1.4 MAGNESIO (MG).....	166
6.5.1.5 AZUFRE (S) .....	166
6.5.2 DISTRIBUCIÓN DE MICRONUTRIENTES EN SUELOS SUPERFICIALES .....	167
6.5.2.1 MANGANESO (MN) .....	168
6.5.2.2 HIERRO (FE).....	168
6.5.2.3 ZINC (ZN) .....	169
6.5.2.4 COBRE (CU) .....	169

6.5.2.5 MOLIBDENO (MO).....	170
6.5.2.6 NÍQUEL (NI).....	170
6.5.3 COMPARACIÓN DE MACRONUTRIENTES Y MICRONUTRIENTES EN SUELOS SUPERFICIALES .....	172
6.6 INTEGRACIÓN DE ELEMENTOS MINERALES ESENCIALES EN EL SISTEMA ROCA-SUELO-PLANTA PARA EL CULTIVO QUINUA.....	175
<b>CAPÍTULO 7. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....</b>	<b>178</b>
7.1 PREÁMBULO .....	178
7.2 CONSIDERACIONES GEOMORFOLÓGICAS Y GEOLÓGICAS EN LA FORMACIÓN DE SUELOS PARA EL ÁREA DE CABANA.....	178
7.2.1 GEOFORMAS: PERSPECTIVA GEOMORFOLÓGICA.....	178
7.2.1.1 PERSPECTIVA NACIONAL .....	178
7.2.1.2 PERSPECTIVA REGIONAL.....	179
7.2.1.3 PERSPECTIVA LOCAL.....	179
7.2.2 LITOLOGÍA: UN ENFOQUE GEOLÓGICO REGIONAL Y LOCAL .....	180
7.2.2.1 ENFOQUE GEOLÓGICO REGIONAL .....	180
7.2.2.2 ENFOQUE GEOLÓGICO LOCAL .....	181
7.3 CONSIDERACIONES QUÍMICAS PARA DETERMINAR LA INFLUENCIA LITOLÓGICA EN LOS SUELOS.....	182
7.3.1 INFLUENCIA LITOLÓGICA EN LOS SUELOS: UN ENFOQUE MULTIVARIADO .....	182
7.3.1.1 RELACIÓN ENTRE ROCAS PARENTALES Y SUELOS PROFUNDOS	183
7.3.1.2 RELACIÓN ENTRE SUELOS PROFUNDOS Y SUELOS SUPERFICIALES.....	183
7.3.1.3 RELACIÓN ENTRE ROCAS PARENTALES Y SUELOS SUPERFICIALES PARA EL CULTIVO DE QUINUA.....	183
7.4 CONEXIÓN ENTRE LOS SISTEMAS ROCA-SUELO-PLANTA.....	184
7.4.1 RELACIÓN QUÍMICA ENTRE LOS SISTEMAS ROCA-SUELO-PLANTA	184
7.4.1.1 FUENTE PRIMARIA: ROCAS ÍGNEAS EXTRUSIVAS.....	184
7.4.1.2 INTERMEDIARIO: TRANSFERENCIA A TRAVÉS DEL SUELO .....	185
7.4.1.3 RECEPTORES: ABSORCIÓN POR LA PLANTA QUINUA.....	186
<b>CAPÍTULO 8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>187</b>
8.1 CONCLUSIONES .....	187
8.1.1 CONCLUSIÓN GENERAL.....	187
8.1.2 CONCLUSIONES ESPECIFICAS .....	188
8.2 RECOMENDACIONES .....	190

**REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA .....191**  
**ANEXOS .....199**



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 <i>Ubicación geográfica del área de Cabana y/o estudio, situada al noreste del Lago Titicaca, en la región de Puno (ver la Tabla 1.1).</i> .....	4
Figura 1.2 <i>Mapa de la ruta de acceso desde la Ciudad de Lima hasta el área de estudio, tanto por las vías aéreas y terrestres.</i> .....	5
Figura 2.1 (a) <i>Gráfico de interacción entre el sistema Roca-Suelo-Planta, análisis químico y análisis multivariante. (b) Esquema de muestras en campo.</i> .....	10
Figura 2.2 <i>Mapa de ubicación de muestras representativas de rocas, suelos (en calicatas) y plantas (en granos de quinua) en el área de estudio</i> .....	12
Figura 2.3 <i>Toma de datos de rocas y suelo en campo. (a) Muestreo de rocas en afloramiento y (b) muestreo de suelos en calicata</i> .....	14
Figura 2.4 (a) <i>Parcelas con cultivos de la planta quinua orgánica de la variedad blanca, que alcanzaron la madurez fisiológica, y (b) las muestras de los granos de quinua</i> .....	15
Figura 2.5 <i>Ubicación de muestras de los granos de la planta quinua</i> .....	15
Figura 3.1 <i>El ciclo de las rocas, productos y condiciones importantes y su relación con la formación de suelos</i> .....	28
Figura 3.2 <i>Esquema del proceso de formación de suelos por la acción ambiental en las rocas. (1) Roca madre; (2) Física; (3) Química; (4) Biológica; Conjunta física-química-biológica.</i> .....	30
Figura 3.3 <i>Formación de suelos</i> .....	31
Figura 3.4 <i>Representación gráfica de la morfología de la planta quinua (Chenopodium quinoa Willd.)</i> .....	37
Figura 4.1 <i>Variación de la meteorización con el clima, según el diagrama de Peltier.</i> .....	43
Figura 4.2 <i>Escala de percepción de geoformas, de lo general a lo detallado, para el área de estudio. (a y b) geoforma nacional y regional, y (c, d, e, f) geoformas locales</i> .....	45
Figura 4.3 <i>Gradiente altitudinal de la Cuenca Hidrográfica del Titicaca Peruana. El área de estudio está ubicado noroeste del Lago Titicaca (indicado con líneas entrecortadas de color rojo)</i> .....	47
Figura 4.4 <i>Mapa de las unidades de Paisaje Geomorfológico al noreste del Lago Titicaca. La línea de color rojo indica el área de estudio</i> .....	48
Figura 4.5 <i>Esquema del paisaje geomorfológico del área de Cabana, con vista hacia el oeste. Presenta diferentes tipos tales como: altiplanicie, planicie, lomerío, valle, piedemonte y montaña.</i> .....	49
Figura 4.6 <i>Vista panorámica de las zonas de cultivo de quinua, de las altiplanicies, con vista hacia las montañas de Mañazo.</i> .....	49
Figura 4.7 <i>Mapa geológico a escala regional para el área de estudio.</i> .....	52
Figura 4.8 <i>Esquemas paleogeográficos correspondientes al área de estudio, que van desde el borde este de la Cordillera Occidental hasta el oeste del Altiplano. a) Jurásico, b) Cretácico inferior, c) Cretácico superior, d) Cretácico superior – Paleógeno (Eoceno), e) Paleógeno (Oligoceno), f) Mioceno – Plioceno y g) Pleistoceno.</i> .....	53

Figura 4.9 Mapa geológico a escala local correspondiente al área de Cabana. ....	56
Figura 4.10 Valle fluvio-aluvial del río Cabanillas con vista hacia el oeste, donde las laderas de montañas con afloramientos del Grupo Cabanillas, y hacia el fondo estarían las unidades volcánicas del Cenozoico. ....	57
Figura 4.11 Discordancia angular de las formaciones Chupa y Sipín (Mesozoico) sobreyaciendo al Grupo Cabanillas (Paleozoico), en la hacienda Huertas con vista hacia el este. ....	58
Figura 4.12 Unidades del Cretácico (formaciones Huancané y Ayabacas) en una discordancia angular que se encuentra encima de las unidades del Paleozoico (Grupo Cabanillas). ....	59
Figura 4.13 Formación Vilquechico que subyace a la Formación Umayo. ....	59
Figura 4.14 (a) y (b) Vistas panorámicas del Grupo Puno en el Cerro Queallata, específicamente de la Formación Chucuito, constituido por conglomerados polimícticos de matriz limosa de color rojiza. ....	60
Figura 4.15 (a) y (b) Columnas estratigráficas de la Formación Azángaro, y la representación de suelos utilizados para el cultivo de quinua. ....	62
Figura 4.16 (a) y (b) Afloramiento de la Formación Azángaro, constituida por gravas y arenas principalmente. ....	63
Figura 5.1 Diagrama de barras apiladas horizontalmente, con los elementos mayores y perdida por ignición, al 100 %, de muestras de roca agrupadas en unidades litoestratigráficas del área de Cabana. ....	68
Figura 5.2 Gráfico de calor resultante del análisis RPCA de los datos de rocas: (a) Matriz de Bajo Rango L (RSVD) y (b) matriz Esparza S (RSVD). ....	71
Figura 5.3 (a) Gráfico de sedimentación con criterio de Kaiser y (b) gráfico de barras y líneas de la varianza explicada de los primeros componentes, ambos obtenidos de la matriz L de los datos de rocas. ....	73
Figura 5.4 Gráficos en espacios bidimensionales del PCA, definidos por la combinación de pares de componentes principales (PC) seleccionados para muestras de roca. ....	76
Figura 5.5 Dendrograma del clústering jerárquico para las muestras de rocas, utilizando el Método de Ward con los primeros 4 componentes principales. ....	77
Figura 5.6 Proyección de los cinco clústeres obtenidos del análisis jerárquico en rocas, en el espacio bidimensional de los primeros componentes (PC1 y PC2). ....	79
Figura 5.7 Diagrama de barras apiladas horizontalmente con los elementos mayores y perdida por ignición al 100 %, de muestras de suelo agrupadas por su origen o material parental del cual derivan (litología/ facies). (a) Suelos superficiales y (b) suelos profundos. ....	83
Figura 5.8 Gráfico de calor resultante del análisis RPCA de los datos de suelos profundos: (a) Matriz de Bajo Rango L (RSVD) y (b) Matriz Esparza S (RSVD). ....	85
Figura 5.9 (a) Gráfico de sedimentación con criterio de Kaiser y (b) gráfico de barras y líneas de la varianza explicada de los primeros componentes, ambos obtenidos de la matriz L de los datos de suelos profundos. ....	86

Figura 5.10 Gráficos en espacios bidimensionales del PCA, definidos por la combinación de pares de componentes principales (CP) seleccionados para muestras de suelos profundos.....	88
Figura 5.11 Dendrograma del clústering jerárquico para las muestras de suelos de horizontes profundos, utilizando el método de Ward con los primeros 3 componentes principales. ....	90
Figura 5.12 Proyección de los cinco clústeres obtenidos del análisis jerárquico en suelos profundos, en el espacio bidimensional de los primeros componentes (PC1 y PC2)..	91
Figura 5.13 Gráfico de calor resultante del análisis RPCA de los datos de suelos superficiales: (a) Matriz de Bajo Rango L (RSVD) y (b) Matriz Esparza S (RSVD)..	93
Figura 5.14 (a) Gráfico de sedimentación con criterio de Kaiser y (b) gráfico de barras y líneas de la varianza explicada de los primeros componentes, ambos obtenidos de la matriz L de los datos de suelos superficiales. ....	94
Figura 5.15 Gráficos en espacios bidimensionales del PCA, definidos por la combinación de pares de componentes principales (CP) seleccionados para muestras de suelos superficiales.....	97
Figura 5.16 Dendrograma del Clústering Jerárquico para las muestras de suelos de horizontes superficiales, utilizando el Método de Ward con los primeros cuatro componentes principales. ....	98
Figura 5.17 Proyección de los seis clústeres obtenidos del análisis jerárquico en suelos superficiales, en el espacio bidimensional de los primeros componentes (PC1 y PC2). ....	100
Figura 5.18 Gráficos multielemento de los patrones REE en rocas volcánicas correspondientes al clúster R1, normalizados a los valores de la condrita. ....	102
Figura 5.19 Gráficos multielemento de los patrones REE en rocas plutónicas correspondientes al clúster R2, normalizados a valores de la condrita. ....	103
Figura 5.20 Gráficos multielemento de los patrones REE en rocas de origen sedimentario siliciclásticas correspondientes al clúster R3, normalizados a los valores de la condrita. ....	104
Figura 5.21 Gráficos multielemento de los patrones REE en rocas de origen sedimentario calcáreo correspondientes al clúster R4, normalizados a los valores de la condrita. ....	107
Figura 5.22 Gráficos multielemento de los patrones REE en rocas de origen sedimentario carbonatado correspondientes al clúster R5, normalizados a los valores de la condrita. ....	108
Figura 5.23 Diagrama bidimensional de componente principales CP1 y CP2, mostrando las agrupaciones confirmandas de las rocas. ....	110
Figura 5.24 Gráficos multielemento de los patrones REE en suelos profundos derivados de facies no consolidadas e intrusivas correspondientes al clúster Sp1, normalizados a los valores del promedio global de suelos. ....	114
Figura 5.25 Gráficos multielemento de los patrones REE en suelos profundos correspondientes al clúster Sp2, normalizados a los valores del promedio global de suelos. ....	116

Figura 5.26 Gráficos multielemento de los patrones REE en suelos profundos correspondientes al clúster Sp3, normalizados a los valores del promedio global de suelos.....	117
Figura 5.27 Diagrama bidimensional del componente CP1 y CP2, agrupadas y validadas en suelos profundos.....	119
Figura 5.28 Gráficos multielemento de los patrones REE en suelos superficiales correspondientes al clúster Ss1, normalizados a los valores del promedio global de suelos.....	122
Figura 5.29 Gráficos multielemento de los patrones REE en suelos superficiales correspondiente a los clústeres Ss2 (a) y Ss3 (b), normalizados al promedio global de suelos.....	123
Figura 5.30 Gráficos multielemento de los patrones REE en suelos superficiales correspondientes a los clústeres Ss4 y Ss5, normalizados a los valores del Promedio global de suelos.....	124
Figura 5.31 Gráficos multielemento de los patrones REE de los suelos superficiales del clúster Ss6, normalizados a los valores del Promedio global de suelos.....	125
Figura 5.32 Diagrama bidimensional del componente CP1 y CP2, agrupadas y validadas en suelos superficiales.....	127
Figura 5.33 Mapa de calor de distancias euclidianas entre los centroides, de los primeros cinco componentes seleccionados.....	130
Figura 5.34 Diagrama bidimensional de las componentes PC1-PC2, de muestras de roca, suelos en horizontes superficiales y profundos con sus centroides de cada clúster. .	131
Figura 6.1 Diagrama de concentración de macronutrientes y micronutrientes en los granos de la planta quinua de Cabana.....	137
Figura 6.2 Comparación de la distribución de las concentraciones elementos minerales esenciales por agrupaciones litológicas, específicamente para los macronutrientes.....	140
Figura 6.3 Comparación de la distribución de las concentraciones de micronutrientes por agrupaciones litológicas.....	144
Figura 6.4 Comparación de las medianas de las agrupaciones litológicas de (a) macronutrientes y (b) micronutrientes, mediante gráficos de radar.....	148
Figura 6.5 Comparación de la distribución de las concentraciones elementos minerales esenciales por agrupaciones de suelos profundos, específicamente para los macronutrientes.....	152
Figura 6.6 Comparación de la distribución de las concentraciones de elementos minerales esenciales por agrupaciones de suelos profundos, específicamente para los micronutrientes.....	156
Figura 6.7 Comparación de las medianas de las agrupaciones de suelos profundos de (a) macronutrientes y (b) micronutrientes, mediante gráficos de radar.....	160
Figura 6.8 Comparación de la distribución de las concentraciones elementos minerales esenciales por agrupaciones de suelos superficiales, específicamente para los macronutrientes.....	164

---

Figura 6.9 <i>Comparación de la distribución de las concentraciones elementos minerales esenciales por agrupaciones de suelos superficiales, específicamente para los micronutrientes.</i> .....	167
Figura 6.10 <i>Comparación de las medianas de las agrupaciones de suelos superficiales de (a) macronutrientes y (b) micronutrientes, mediante gráficos de radar.</i> .....	172
Figura 6.11 <i>Integración del sistema roca-suelo-planta, mediante los elementos minerales esenciales para el cultivo de quinua.</i> .....	176
Figura 7.1 <i>Relación cuantitativa entre grupos de centroides Roca-Suelo</i> .....	182
Figura 7.2 <i>Gráfico de calor del Sistema Roca Roca-Suelo-Planta, con valores centrales de Elementos Minerales Esenciales de cada grupo</i> .....	185

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 <i>Las coordenadas UTM correspondientes a los vértices del área de Cabana.</i> .....	4
Tabla 1.2 <i>Vías de acceso al área de estudio con distancia de recorrido y el tiempo</i> .....	5
Tabla 2.1 <i>Coordenadas UTM (zona 19S) de las muestras de los granos de la planta de quinua</i> .....	15
Tabla 2.2 <i>Lista de contenidos de elementos y/o compuestos (analitos) analizados por el laboratorio ALS Perú, indicando los métodos aplicados con su límite inferior de detección</i> .....	16
Tabla 2.3 <i>Lista de elementos esenciales analizados en los granos de la planta quinua, con su límite inferior de detección, analizados por el laboratorio AGQ Perú.</i> .....	17
Tabla 2.4 <i>Lista de elementos a estudiar para el área de estudio</i> .....	18
Tabla 3.1 <i>Clasificación de geoformas</i> .....	32
Tabla 3.2 <i>Elementos minerales esenciales, y no esenciales, para las plantas</i> .....	35
Tabla 3.3 <i>Elementos minerales esenciales (Símbolo químico) y solutos de los elementos químicos comúnmente absorbidas por plantas terrestres en los suelos</i> .....	35
Tabla 3.4 <i>Ejemplos de Litología / Facies, con su respectiva clasificación y descripción.</i> .....	40
Tabla 4.1 <i>Tabla resumen de litología/facies representativas de cada unidad estratigráfica</i> ..	64
Tabla 5.1 <i>Muestras litológicas recolectadas en el área de Cabana, su clasificación litológica, litologías y unidades litoestratigráficas.</i> .....	67
Tabla 5.2 <i>Resumen preliminar de cinco clústeres agrupados según el análisis jerárquico, con su asociación litológica de las muestras de roca.</i> .....	78
Tabla 5.3 <i>Muestras de suelos recolectadas en el área de Cabana, con sus características relacionadas con el material parental, es decir, sus litologías o facies.</i> .....	82
Tabla 5.4 <i>Resumen preliminar de tres clústeres agrupados según el análisis jerárquico de las muestras de suelos profundos</i> .....	90
Tabla 5.5 <i>Resumen preliminar de seis clústeres agrupados según el análisis jerárquico, de las muestras de suelos superficiales</i> .....	99
Tabla 5.6 <i>Tabla resumen de las agrupaciones validadas para las rocas.</i> .....	109
Tabla 5.7 <i>Tabla resumen de las agrupaciones validadas para los suelos profundos</i> .....	118
Tabla 5.8 <i>Tabla resumen de las agrupaciones validadas para los suelos superficiales.</i> .....	126
Tabla 6.1 <i>Cuadro de elementos minerales esenciales en macronutrientes (%) y micronutrientes (mg/kg) de los granos de quinua de Cabana.</i> .....	137

---

## LISTA DE ABREVIATURAS

EMN	:	Nutriente mineral esencial ( <i>Essential Mineral Nutrient</i> )
GEOCATMIN:		Sistema de Información Geológico y Catastral Minero
HREE	:	Elemento de tierras raras pesado ( <i>Heavy Rare Earth Element</i> )
ICP-OES	:	Espectrometría de Emisión Óptica con Plasma Acoplado Inductivamente
INGEMMET	:	Instituto Geológico Minero y Metalúrgico
IUGS	:	Unión Internacional de Ciencias Geológicas ( <i>International Union of Geological Sciences</i> )
LOI	:	Perdida por Ignición ( <i>Loss On Ignition</i> )
LREE	:	Elemento de tierras raras ligero ( <i>Light Rare Earth Element</i> )
Ma	:	Millones de años ( <i>Million years</i> )
m s. n. m.	:	Metros sobre el nivel del mar
mg/kg	:	Miligramos por kilogramo
MREE	:	Elemento de tierras raras intermedio ( <i>Middle Rare Earth Element</i> )
ONU	:	Organización de las Naciones Unidas
PCA	:	Análisis de Componentes Principales ( <i>Principal Component Analysis</i> )
ppm	:	partes por millón (1 en 10 <sup>6</sup> )
REE	:	Elementos de tierras raras ( <i>Rare earth element</i> )
TAS	:	Diagrama de álcalis totales y sílice ( <i>Total Alkalis Silica diagram</i> )
UTM	:	Sistema de coordenadas Universal Transversal de Mercator ( <i>Universal Transverse Mercator</i> )
WGS 84	:	Sistema geodésico de coordenadas geográficas ( <i>World Geodetic System 1984</i> )

## INTRODUCCIÓN

El conocimiento del suelo y su relación con el material parental y el cultivo de la quinua es fundamental para comprender cómo los elementos minerales esenciales influyen en la productividad agrícola. Las unidades litoestratigráficas no responden de la misma manera a las condiciones de formación de suelos debido a diferencias en su estructura, origen, composición y antecedentes geológicos.

El presente estudio se centra en el cultivo de la quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) y busca responder a la pregunta: ¿Cómo influye la litología en los suelos destinados al cultivo de quinua, según el análisis químico del sistema roca-suelo-planta en el área de Cabana, Puno? Este análisis facilitará comprender la relación entre las características litológicas y los suelos en el contexto del cultivo de quinua.

El objetivo principal de la investigación es analizar la influencia de la litología en los suelos mediante un análisis químico del sistema roca-suelo-planta en el área de Cabana. Este aporte no solo contribuirá al conocimiento científico en las áreas de geología y agricultura, sino que también proporcionará información útil para la gestión agrícola de la región, en particular en lo referente al cultivo de la quinua.

Se plantea que cada unidad litológica posee una composición química específica que, al descomponerse por procesos de meteorización y erosión, forma suelos con una composición química similar a la roca parental. Estos suelos, al desarrollarse y ser transportados, aportan los elementos esenciales necesarios para el cultivo de la quinua en el área de Cabana.

Este estudio utiliza un enfoque mixto, integrando métodos cualitativos y cuantitativos, basado en la propuesta de Hernández-Sampieri y Mendoza (2018). El enfoque cualitativo se utiliza para definir el contexto geológico y geomorfológico del área de estudio, mientras que el enfoque cuantitativo permite estructurar la investigación mediante un análisis geoquímico multivariado con las muestras recolectadas. En total, se recolectaron 78 muestras: 36 de rocas, 39 de suelos y 3 de granos de quinua.



La tesis está estructurada en ocho capítulos que describen el proceso de investigación, la metodología utilizada y los resultados obtenidos, como se detalla a continuación:

1. **Generalidades de la investigación:** Este capítulo presenta la delimitación espacial del estudio, la accesibilidad al área de Cabana, la argumentación del problema de investigación, los objetivos, las hipótesis y justificación. Además, establece el contexto del área y explica la relevancia de investigar la relación entre la litología, los suelos y el cultivo de quinua.
2. **Diseño y metodología de la investigación:** Se describe el diseño del estudio y la metodología empleada. Se define la población y la muestra, se detalla el marco muestral y el tamaño de la muestra, y se explican los procedimientos de recolección de datos, que incluyen el muestreo de rocas, suelos y plantas. También se aborda el análisis y procesamiento de datos, el control de calidad de los análisis químicos y la interpretación de los resultados.
3. **Marco teórico:** Este capítulo revisa investigaciones previas y establece las bases teóricas relacionadas con la interacción entre la litosfera, el suelo y las plantas. Asimismo, se definen los términos básicos empleados en la presente investigación, con el fin de garantizar una comprensión clara, coherente y precisa.
4. **Geomorfología y geología del área de estudio:** Se analiza el marco geomorfológico y geológico del área de Cabana, describiendo desde el aspecto regional y local. Este capítulo proporciona una base sólida para comprender las características litológicas y geoformas que influyen en la composición del suelo.
5. **Influencia litológica en la química de suelos mediante análisis multivariado geoquímico:** Este capítulo aborda el análisis químico, a partir de elementos representativos y discriminantes en rocas y suelos, utilizando métodos estadísticos multivariados para asociar las muestras y suelos con características similares, para luego validarlo, se determinará cuantitativamente la correlación, es decir la influencia de las rocas a los suelos.

6. **Elementos minerales esenciales para el cultivo de quinua en el sistema roca-suelo-planta:** Se analiza la distribución de elementos minerales esenciales en los granos de quinua, las rocas y los suelos profundos y superficiales. Este capítulo examina la relación entre la composición química de la litología y los nutrientes disponibles en los suelos para el cultivo, proporcionando una visión integral del sistema roca-suelo-planta y su impacto en la productividad agrícola.
  
7. **Discusión de resultados:** En este capítulo se realiza un análisis crítico de los resultados obtenidos. Se evalúa cómo los hallazgos responden a las preguntas de investigación.
  
8. **Conclusiones y recomendaciones:** Finalmente, se presentan las conclusiones del estudio y las recomendaciones basadas en los hallazgos, incluyendo estrategias para mejorar la gestión del suelo y sugerencias para futuras investigaciones.

# CAPÍTULO 1. GENERALIDADES DE LA INVESTIGACIÓN

## 1.1 DELIMITACIÓN ESPACIAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

Políticamente, el área de estudio se localiza al noreste del Lago Titicaca, en el departamento de Puno, abarcando parte de las provincias de San Román (distritos de Cabana y Cabanillas), Lampa (distrito de Cabanilla) y Puno (distritos de Mañazo, Vilque y Atuncolla). Se estudiará con mayor detalle el distrito de Cabana, al cual se denominará área de Cabana.

Geográficamente, el área de Cabana se encuentra enmarcada dentro de los paralelos  $15^{\circ} 33'$  y  $15^{\circ} 45'$  de latitud sur, y los meridianos  $70^{\circ} 12'$  y  $70^{\circ} 29'$  de longitud oeste de Greenwich. Los vértices del área de estudio (ver [Figura 1.1](#) y [Tabla 1.1](#)) están proyectados en coordenadas UTM (*Universal Transverse Mercator*). La extensión territorial del área es de  $626.7 \text{ km}^2$ .

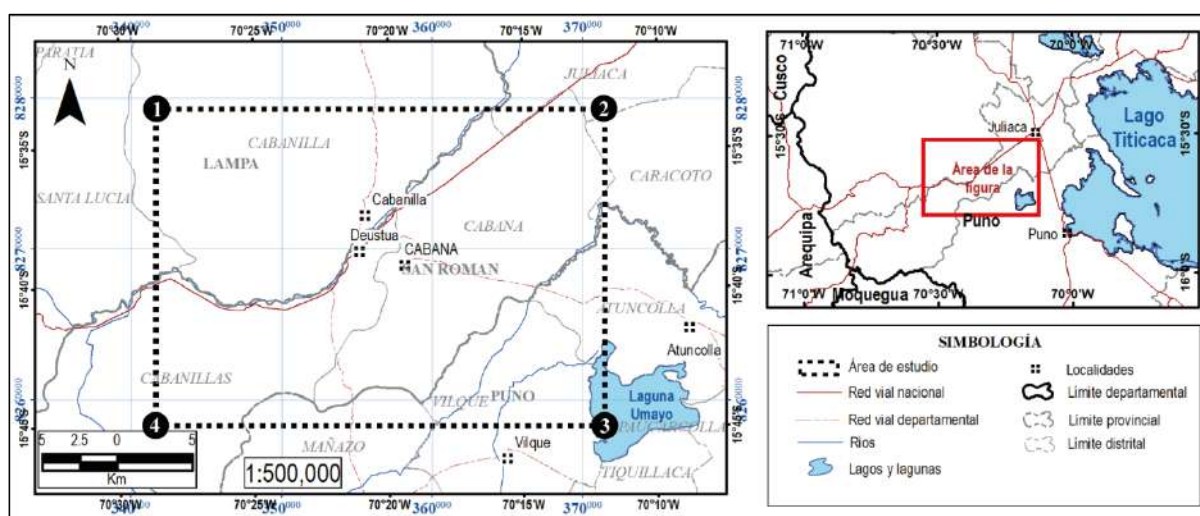
**Tabla 1.1**

*Las coordenadas UTM correspondientes a los vértices del área de Cabana.*

Vértices	Coordenadas UTM		
	Zonas	N (norte)	E (este)
1	19 S	8 279 291	341 648
2	19 S	8 279 291	371 500
3	19 S	8 258 296	371 500
4	19 S	8 258 296	341 648

**Figura 1.1**

*Ubicación geográfica del área de Cabana y/o estudio, situada al noreste del Lago Titicaca, en la región de Puno (ver la [Tabla 1.1](#)).*



Fuente: IGN (2024)

## 1.2 ACCESIBILIDAD AL ÁREA DE ESTUDIO

Es posible acceder al área de estudio tanto por vía aérea como terrestre. La ruta aérea comienza en Lima y llega a Juliaca. A partir de Juliaca, se puede llegar al distrito de Cabana por vía terrestre. Desde Lima se puede llegar por carretera asfaltada a Arequipa, Juliaca y Cabana por vía terrestre (ver [Figura 1.2](#) y [Tabla 1.2](#)).

**Figura 1.2**

Mapa de la ruta de acceso desde la Ciudad de Lima hasta el área de estudio, tanto por las vías aéreas y terrestres.



Fuente: Bing Maps (2022)

**Tabla 1.2**

Vías de acceso al área de estudio con distancia de recorrido y el tiempo

Tipo de vía	Tramo	Distancia (Km)	Tiempo (h)
Aérea	Lima – Juliaca	839 km	1 h 39 min
Terrestre	Lima –Arequipa - Juliaca	1277 km	21 h
Terrestre	Juliaca – Cabana	30 km	38 min

### **1.3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN**

La quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) es un cultivo esencial en la región de Cabana, Puno, por su alto valor nutricional, resistencia a las condiciones climáticas adversas, así como lo económico. Sin embargo, el rendimiento y la calidad de la quinua puede verse afectado significativamente dependiendo de las características del suelo y la litología en el área de Cabana.

A pesar de la importancia del cultivo de Quinua, existe una falta de investigación detallada sobre como las características litológicas y químicas del material parental influyen en las propiedades de los suelos utilizados para el cultivo de quinua, además de conocer los elementos minerales esenciales en la roca, suelo y planta. Esta brecha en el conocimiento representa un problema significativo, ya que limita a los agricultores para optimizar sus prácticas en el cultivo y maximizar los rendimientos de quinua.

El objetivo de esta investigación fue analizar la influencia de la litología y su composición química en los suelos para el cultivo de quinua en el área de Cabana, Puno. A través de un análisis químico detallado del sistema roca-suelo-planta, esta investigación buscará proporcionar información valiosa que pueda ayudar a los agricultores a mejorar sus prácticas de cultivo y aumentar los rendimientos de la quinua.

Realizar este estudio representó un gran desafío, dado que los estudios geológicos y geoquímicos aplicados a suelos han sido escasos. Sin embargo, es importante mencionar que se encontraron estudios en otros lugares del mundo que fueron tomados como referencia.

Por lo que, el problema de investigación que este estudio busca abordar es de gran relevancia tanto para la comunidad agrícola local, así como para la gestión sostenible de los recursos del suelo y la innovación de la industria en el cultivo de quinua en la región de Cabana, Puno. Esta investigación tiene el potencial de hacer una contribución significativa a estos campos al proporcionar una mayor comprensión de manera general entre la geología y la agricultura.

### **1.3.1 PROBLEMA GENERAL**

¿Cómo influye la litología en los suelos para el cultivo de quinua, según el análisis químico del sistema roca-suelo-plantas en el área de Cabana, Puno?

### **1.3.2 PROBLEMAS ESPECÍFICOS**

- a) ¿Cómo influyen las características litológicas del material parental en la formación de suelos utilizados para el cultivo de quinua, así como en relación con las geoformas en el área de Cabana, Puno?
- b) ¿Cuál es la influencia relativa de las rocas parentales en la composición química del suelo para el cultivo de quinua, según el análisis químico multivariado del sistema roca-suelo en el área de Cabana, Puno?
- c) ¿Cómo se distribuyen los Elementos Minerales Esenciales en las rocas parentales, suelos y plantas destinadas al cultivo de quinua en el área de Cabana, Puno?

## **1.4 SISTEMA DE OBJETIVOS**

### **1.4.1 OBJETIVO GENERAL**

Analizar la influencia litológica en los suelos para el cultivo de quinua, mediante un análisis químico del sistema roca-suelo-plantas en el área de Cabana, Puno.

### **1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- a) Identificar las características litológicas del material parental que influyen en la formación de suelos utilizados para el cultivo de Quinua, así como analizar las geoformas en el área de Cabana, Puno.
- b) Determinar la influencia relativa de las rocas parentales en la composición química del suelo utilizado para el cultivo de quinua, mediante el análisis químico multivariado del sistema roca-suelo en el área de Cabana, Puno.
- c) Comparar las distribuciones de elementos minerales esenciales en rocas, suelos y plantas destinado al cultivo de quinua en el área de Cabana, Puno.

## 1.1 HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN

### 1.4.3 HIPÓTESIS GENERAL

La litología de las rocas parentales podría tener una influencia significativa en la composición química de los suelos utilizados para el cultivo quinua en el área de Cabana, Puno. Se espera que el análisis químico del sistema roca-suelo-planta revele una correlación directa entre las características litológicas de las rocas y las propiedades químicas de los suelos, que a su vez influyen el crecimiento y desarrollo de la quinua.

### 1.4.4 HIPÓTESIS ESPECIFICAS

- a) Las características litológicas del material parental influyen significativamente en la formación de suelos utilizados para el cultivo de Quinua, así como en relación con las geoformas en el área de Cabana, Puno.
- b) La composición química de los suelos utilizados para el cultivo de quinua en el área de Cabana, Puno, estarían significativamente influenciada por las rocas parentales. Mediante el análisis químico multivariado del sistema roca-suelo, se espera encontrar una correlación directa entre las características geoquímicas de las rocas parentales y las propiedades químicas de suelos.
- c) La distribución de Elementos Minerales Esenciales en las rocas, suelos, y los granos de la planta Quinua tendrían una relación directa significativa en los cultivos de quinua en el área de Cabana, Puno.

## 1.5 JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

### Relevancia social

Esta investigación es crucial para resaltar el valor del suelo como recurso natural fundamental para el desarrollo sostenible de la región de Cabana, Puno. La región de Cabana se caracteriza por su actividad agrícola centrada en el cultivo de la quinua, un alimento de alto valor nutritivo para las generaciones presentes y futuras.

### Conveniencia

La investigación es oportuna porque permite obtener un conocimiento claro de la composición química de las unidades litológicas que afloran en la región, así como de los suelos derivados de estas. Este conocimiento es esencial para comprender la influencia litológica en los suelos, un aspecto poco explorado pero vital para la optimización de prácticas agrícolas.

### **Valor Teórico**

Desde un punto de vista teórico, esta investigación contribuye a ampliar el entendimiento sobre la relación entre litología y suelo, un área de estudio que ha sido poco abordada en la región. Al analizar cómo la composición química de las rocas parentales influye en las características del suelo y, en consecuencia, en el cultivo de la quinua, este estudio aporta un nuevo enfoque al campo de la geología y la agricultura, permitiendo el desarrollo de modelos y teorías aplicables a otras regiones con características similares.

### **Implicancia Práctica**

Finalmente, al proporcionar un análisis detallado de la relación entre la roca y el suelo, se desarrollan estrategias agrícolas más efectivas que optimizan la producción de quinua. Además, según las cifras del último censo del 2017, aproximadamente 100,000 familias rurales en la región dependen de la quinua para sobrevivir, lo que contribuye indirectamente a la economía local (Mamani, 2019). Este estudio también fortalece las capacidades de la Cooperativa Agro Industrial Cabana Ltda. [COPAIN CABANA], uno de los mayores exportadores de quinua, promoviendo una producción agrícola más competitiva y sostenible.



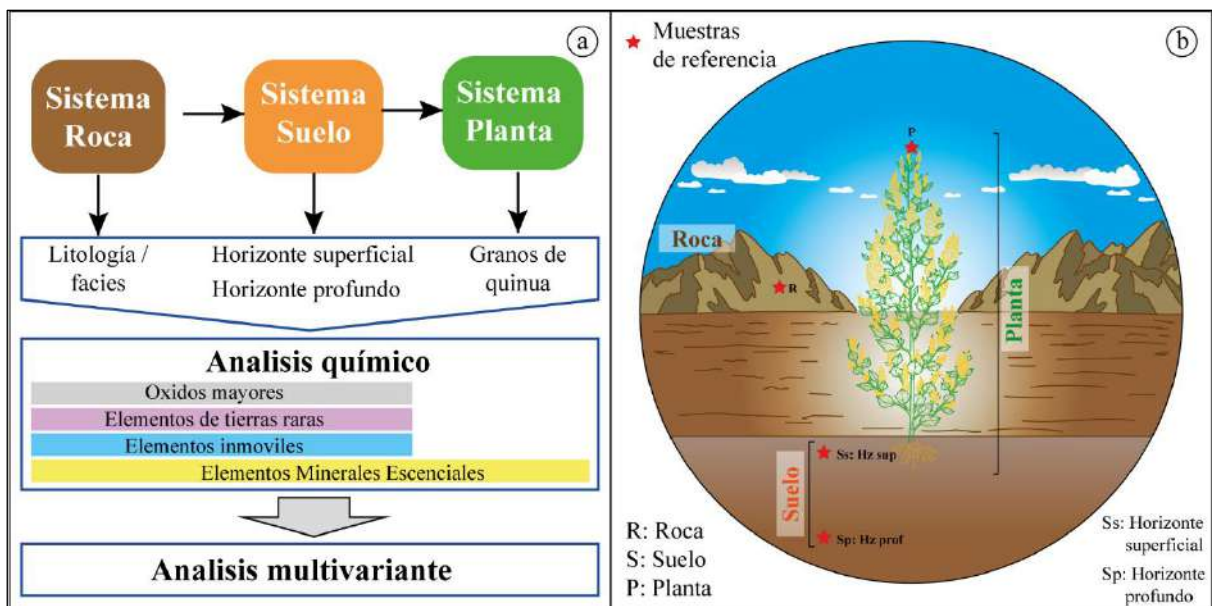
## CAPÍTULO 2. DISEÑO Y METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN

### 2.1 ENFOQUE DEL DISEÑO INVESTIGATIVO

Para encontrar respuestas a las preguntas de investigación, se plantea evaluar el problema de manera general describiendo las características del sistema roca-suelo-planta, considerando sus factores característicos de cada sistema. De forma específica, se correlacionará mediante el análisis químico del sistema mencionado anteriormente, con el análisis multivariante (ver [Figura 2.1a](#)). Para el diseño muestreo en rocas, se realizará en las diferentes litologías/facies (unidades litoestratigráficas); en suelos, se realizará en horizontes superficiales y profundos; y en plantas, se realizará en los granos de quinua (ver [Figura 2.1b](#)).

**Figura 2.1**

(a) Gráfico de interacción entre el sistema Roca-Suelo-Planta, análisis químico y análisis multivariante. (b) Esquema de muestras en campo.



Por lo que, según [Arias & Covinos \(2021\)](#) el diseño pertenece de manera genérica al *no experimental*, ya que las rocas, los suelos y las plantas (variables en estudio) se presentan en su contexto natural, sin alterar ninguna situación. Y puntualmente son de tipo *transversal*, por la medición única en el momento de recolectar los datos de campo, es decir en un solo momento y solo una vez.

## 2.2 METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN

Para esta investigación, según [Hernández-Sampieri & Mendoza \(2018\)](#), se presenta un enfoque *mixto* (cuantitativo y cualitativo). El enfoque cualitativo es relevante por ser parte de la definición inicial, como la geología, geomorfología, entre otros, que pone en contexto el estudio. Este enfoque permite que el proceso sea inductivo a partir de la observación en campo y facilita la realización de interpretaciones. Por otro lado; el enfoque cuantitativo precisará y estructurará la idea de investigación.

## 2.3 POBLACIÓN Y LA MUESTRA OBJETO DE ESTUDIO

### 2.3.1 DEFINICIÓN DE LA POBLACIÓN DE ESTUDIO

La población de estudio del presente trabajo de investigación está enmarcada dentro área de Cabana (ver [Figura 1.1](#)), y está constituida por todas las parcelas de cultivo de quinua, suelos y rocas. Estas parcelas abarcan una diversidad de suelos, los cuales son derivados de distintas litologías/facies. La definición de esta población es crucial para entender cómo las características litológicas influyen en las propiedades químicas del suelo y, estos a su vez, en el cultivo de quinua.

### 2.3.2 MARCO MUESTRAL

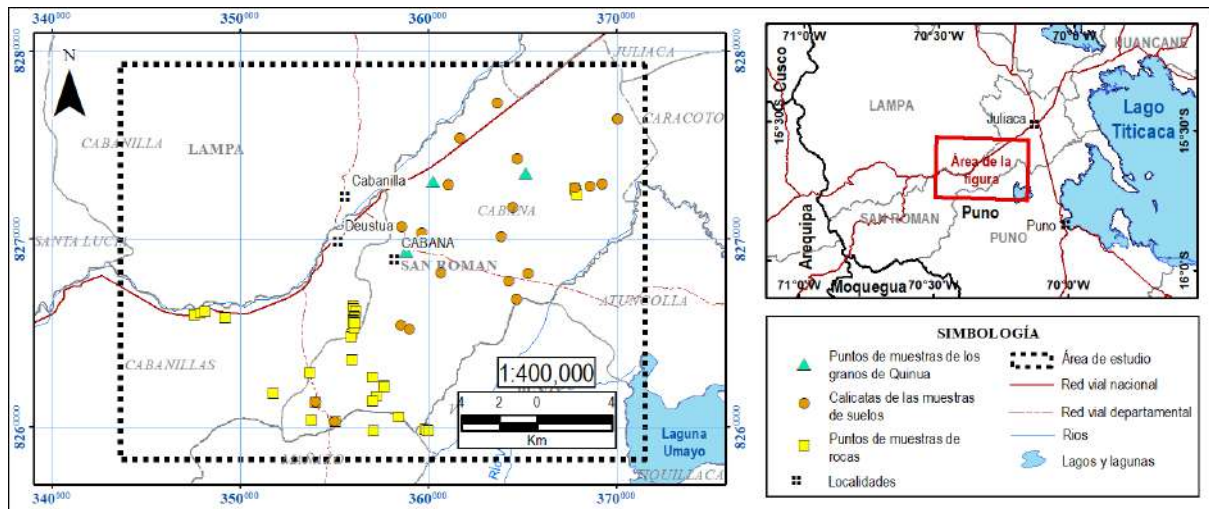
#### 2.3.2.1 Elementos del marco muestral

A continuación, se describen los elementos específicos del marco muestral para el estudio (ver [Figura 2.1b](#)):

- **Muestras de rocas:** Todas las muestras de rocas representativas de las diferentes unidades litoestratigráficas que influyen a los sedimentos y/o suelos donde se cultivan la planta Quinua.
- **Muestras de suelos:** Todas las muestras de suelos que influyen a la planta Quinua, en horizontes superficiales (capa superficial del suelo) y profundos (capa profunda del suelo) realizadas en calicatas.
- **Muestras de planta (granos de quinua):** Todas las muestras de los granos de la planta Quinua. Tomadas en parcelas representativas.

**Figura 2.2**

Mapa de ubicación de muestras representativas de rocas, suelos (en calicatas) y plantas (en granos de quinua) en el área de estudio



Fuente: IGN (2024)

### 2.3.2.2 Tamaño de muestra

Para esta investigación, se tuvo en cuenta la representatividad de la población, para lo cual se seleccionaron un total de 78 muestras de rocas, suelos y plantas (ver Figura 2.2). Para las muestras representativas de rocas, se obtuvieron 36 muestras de distintas litologías presentes en el área de Cabana. Para las muestras representativas de suelos, se obtuvieron 39 muestras en 20 calicatas, recolectadas de los horizontes superficiales y profundos. En cuanto a las muestras de plantas, se obtuvieron 3 muestras de los granos de la planta quinua.

Cabe mencionar que los metadatos de las muestras de roca y suelo están disponibles públicamente según la Ley 30035 (2013), donde menciona que la información digital es de acceso libre y abierto, como es el caso GeoPortal GEOCATMIN (INGEMMET, 2023). Esta disponibilidad de datos asegura la transparencia y facilita la replicación del estudio.

El tamaño de muestra asegura la representatividad estadística y la validez de los resultados. Las 20 calicatas fueron seleccionadas para cubrir una amplia gama de variabilidad del suelo derivado de diferentes litologías. Las 36 muestras de roca permiten un análisis detallado de la composición litológica. Las 3 muestras de plantas de quinua se consideran suficientes para el análisis específico de los nutrientes y del cultivo en relación con las características del suelo.

## 2.4 RECOLECCIÓN DE DATOS

Estos son los procedimientos y métodos utilizados para recopilar datos:

### 2.4.1 MUESTREO DE ROCAS, SUELOS Y PLANTAS

Para el proceso de muestreo se realizará con criterio, y de acuerdo con [Canahuire et al. \(2015\)](#) el muestreo de rocas y suelos pertenece a los métodos probabilísticos de tipo estratificado aleatorio. En el caso de la planta de quinua, se utilizará el muestreo no probabilístico por conveniencia.

#### 2.4.1.1 Muestreo de rocas

Se colectaron muestras representativas de las diferentes unidades litoestratigráficas, teniendo en cuenta el tipo de litología. Se extrajeron un total de 36 muestras de rocas, cada una con un peso estimado entre 1 y 2 kilogramos.

El procedimiento de recolección de la muestra de roca consiste: (a) identificar un afloramiento de rocas más representativos de cada unidad litoestratigráficas, utilizando mapas geológicos y estudios previos; (b) extraer fragmentos de roca fresca, sin evidencia de alteración en lo posible, empleando la picota o martillo geológico, y colocar las muestras en bolsas, etiquetándola con un código; y (c) además de realizar la toma de datos en campo mediante fichas de campo, registrando la ubicación, características geológicas y otros datos relevantes, mediante la técnica de observación (ver [Figura 2.3a](#)).

#### 2.4.1.2 Muestreo de suelos

Los puntos de muestreo se seleccionaron de acuerdo a la litología/facies del cual deriva el suelo, asegurando que las muestras sean lo más representativas posible. Este criterio permite capturar la variabilidad de suelos.

Se realizaron 20 calicatas con profundidades que varían entre de 0.6 a 1.20 metros. En cada calicata se extrajo de dos horizontes distintos. En el horizonte superficial, mayoritariamente correspondiente al horizonte A, el cual es rico en nutrientes y materia orgánica; y en el horizonte profundo, que varía entre horizontes C, CR o R, que proporciona las características edafológicas y geológicas en su estado natural, es decir, sin la alteración antrópica.

El procedimiento de recolección de la muestra de suelo consiste: (a) identificar suelos representativos en parcelas donde se realiza el cultivo de quinua, además de suelos

desarrollados *in situ*, realizando calicatas con una profundidad de 1.2 metros o hasta encontrar la roca madre, empleando palas, barrenos u otros; (b) luego se extrae suelo de los horizontes superficial y profundo, colocando la muestras en bolsas con un peso de 1 kilogramo por muestra, etiquetándolas correctamente; y (c) además de realizar la toma de datos en fichas de campo de las características edafológicas, ubicación y otros datos relevantes, mediante la técnica de observación (ver [Figura 2.3b](#)).

### Figura 2.3

*Toma de datos de rocas y suelo en campo. (a) Muestreo de rocas en afloramiento y (b) muestreo de suelos en calicata*



#### 2.4.1.3 Muestreo de los granos de la planta quinua

En el área de Cabana se toma 3 muestras representativas de granos de la planta quinua ([Figura 2.5](#) y [Tabla 2.1](#)). Cada muestra tiene un peso aproximado de 1 Kg ([Figura 2.4](#)).

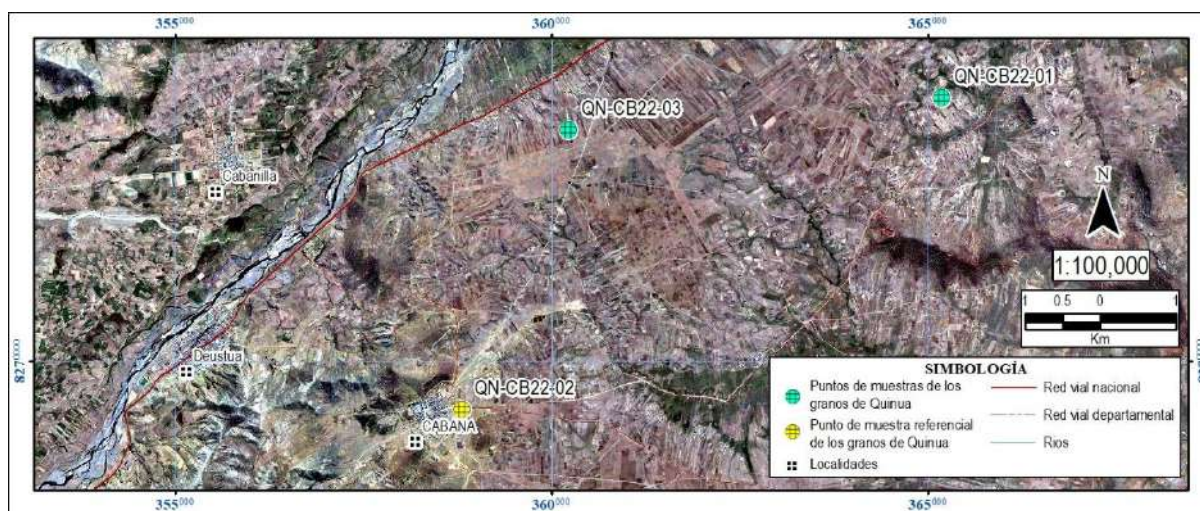
El muestreo de los granos consiste en identificar parcelas con cultivos de la planta quinua. La planta quinua representativa debe haber alcanzado una madurez fisiológica. Es decir, la planta y los granos pierden humedad, lo cual ocurre en épocas de cosecha, indicando que están listo para realizar el muestreo. Los granos de quinua están cubiertos por saponina, su característica es de sabor amargo, el cual no es apetecible para el consumo humano. Sin embargo, para evitar la contaminación del agua al momento del lavado de la saponina, por ende, las muestras contienen saponinas. Cabe mencionar que también se extrajo una muestra destinada para el consumo humano (muestra QN-CB22-02), y este es lavada para la comercialización para evitar el amargor y ser más apetecible. El cual es distribuido en la localidad de Cabana, precisamente en su local comercial Cooperativa Agro Industrial Cabana Ltda (COPAIN CABANA).

**Figura 2.4**

(a) Parcelas con cultivos de la planta quinua orgánica de la variedad blanca, que alcanzaron la madurez fisiológica, y (b) las muestras de los granos de quinua

**Figura 2.5**

Ubicación de muestras de los granos de la planta quinua



Nota. La muestra QN-CB22-02 es una muestra referencial.

**Tabla 2.1**

Coordenadas UTM (zona 19S) de las muestras de los granos de la planta de quinua

Etiqueta de muestra	Coordenadas UTM norte	Coordenadas UTM este	Observación
QN-CB22-01	8273494	365180	Muestra de parcela
QN-CB22-02	8269352	358807	Referencial COOPAIN CABANA S.A.C.
QN-CB22-03	8273065	360225	Muestra de parcela

## 2.5 PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS

### 2.5.1 PROCEDIMIENTO ANALÍTICO

Una vez culminado el muestreo, se llevaron a cabo las determinaciones analíticas de óxidos mayores, elementos traza en rocas parentales, sedimentos y suelos. Además, se analizaron los macronutrientes y micronutrientes presentes en los granos de la planta quinua.

Para la preparación de muestras y proceso analítico, en rocas y suelos son enviadas al laboratorio químico certificado ALS Perú (Corporación de Laboratorios Ambientales del Perú S.A.C.). Allí se inició con la preparación de las muestras (ALS, 2018), que incluyó la trituration fina de la muestra hasta que un 70% pasara los 2 milímetros (<2mm). Este proceso continuó con la división de la muestra en porciones iguales utilizando un divisor de riffle, y finalmente se pulverizó una muestra dividida de 250 g hasta que un 85% pasara las 75 micras (<75 $\mu$ m).

**Tabla 2.2**

*Lista de contenidos de elementos y/o compuestos (analitos) analizados por el laboratorio ALS Perú, indicando los métodos aplicados con su límite inferior de detección*

Metodos	Analitos y Limite Inferior de Detección							
ICP-MS	Ag	0.01 (ppm)	Ge	0.05 (ppm)	Re	0.002 (ppm)	Y	0.1 (ppm)
	Al	0.01 (%)	Hf	0.1 (ppm)	S	0.01 (%)	Zn	2 (ppm)
	As	0.2 (ppm)	In	0.005 (ppm)	Sb	0.05 (ppm)	Zr	0.5 (ppm)
	Ba	10 (ppm)	K	0.01 (%)	Sc	0.1 (ppm)	Dy	0.05 (ppm)
	Be	0.05 (ppm)	La	0.5 (ppm)	Se	1 (ppm)	Er	0.03 (ppm)
	Bi	0.01 (ppm)	Li	0.2 (ppm)	Sn	0.2 (ppm)	Eu	0.03 (ppm)
	Ca	0.01 (%)	Mg	0.01 (%)	Sr	0.2 (ppm)	Gd	0.05 (ppm)
	Cd	0.02 (ppm)	Mn	5 (ppm)	Ta	0.05 (ppm)	Ho	0.01 (ppm)
	Ce	0.01 (ppm)	Mo	0.05 (ppm)	Te	0.05 (ppm)	Lu	0.01 (ppm)
	Co	0.1 (ppm)	Na	0.01 (%)	Th	0.01 (ppm)	Nd	0.1 (ppm)
	Cr	1 (ppm)	Nb	0.1 (ppm)	Ti	0.005 (%)	Pr	0.03 (ppm)
	Cs	0.05 (ppm)	Ni	0.2 (ppm)	Tl	0.02 (ppm)	Sm	0.03 (ppm)
	Cu	0.2 (ppm)	P	10 (ppm)	U	0.1 (ppm)	Tb	0.01 (ppm)
	Fe	0.01 (%)	Pb	0.5 (ppm)	V	1 (ppm)	Tm	0.01 (ppm)
	Ga	0.05 (ppm)	Rb	0.1 (ppm)	W	0.1 (ppm)	Yb	0.03 (ppm)
	XRF	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.01 (%)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.01 (%)	Na <sub>2</sub> O	0.01 (%)	SrO
BaO		0.01 (%)	K <sub>2</sub> O	0.01 (%)	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.01 (%)	TiO <sub>2</sub>	0.01 (%)
CaO		0.01 (%)	MgO	0.01 (%)	SO <sub>3</sub>	0.01 (%)	LOI 1000	0.01 (%)
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		0.01 (%)	MnO	0.01 (%)	SiO <sub>2</sub>	0.01 (%)		

Fuente: ALS (2018)

Para el proceso analítico (ALS, 2018), la muestra preparada se somete a altas temperaturas (1 g de muestra) para medir el contenido que se pierde en forma de gases (LOI) con el instrumento TGA (*Thermogravimetric Analyser*, TGA). Luego, se realiza la digestión de cuatro ácidos en 0.25 g de muestra preparada para el análisis multielemento con el instrumento ICP-MS, que incluye elementos de tierras raras y elementos menores y traza. Para el análisis óxidos mayores, se toma 2 g de muestra preparada y se utiliza el instrumento de fluorescencia de Rayos X (XRF).

Los datos analíticos de rocas y suelos se tiene un cuadro resumen (Tabla 2.2) de todos los elementos y/o compuestos analizados con su respectivo límite de detección inferior y métodos.

**Tabla 2.3**

*Lista de elementos esenciales analizados en los granos de la planta quinua, con su límite inferior de detección, analizados por el laboratorio AGQ Perú.*

Metodo	Analitos y Límite Inferior de Detección	
ICP-OES	Cloruros	250 mg/kg Elementos fitotóxicos
	Sodio	250 mg/kg Elementos fitotóxicos
	Azufre	0.03 % Macronutrientes
	Calcio	0.025 % Macronutrientes
	Fósforo	0.02 % Macronutrientes
	Magnesio	0.038 % Macronutrientes
	Nitrógeno total	0.5 % Macronutrientes
	Potasio	0.02 % Macronutrientes
	Boro	5 mg/kg Micronutrientes
	Cobre	2 mg/kg Micronutrientes
	Hierro	5 mg/kg Micronutrientes
	Manganeso	5 mg/kg Micronutrientes
	Molibdeno	0.1 mg/kg Micronutrientes
	Zinc	5 mg/kg Micronutrientes

Fuente: AGQ Labs (2022)

Las muestras de granos de la planta quinua son analizadas en los laboratorios de AGQ Perú S.A.C. mediante la técnica analítica de espectrometría de emisión óptica con plasma acoplado inductivamente (ICP-OES, siglas en inglés, *Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry*). Esta técnica se utiliza para el análisis de elementos esenciales presentes en los granos de la planta quinua, tal como se muestra en la Tabla 2.3.



## 2.5.2 CONTROL DE CALIDAD DE ANÁLISIS QUÍMICOS

Antes de realizar el control de calidad, es importante tener en cuenta que las muestras analizadas en rocas, suelos y plantas cuenten con muestras duplicadas de campo, muestras duplicadas analíticas, y estándares analíticos. Cabe mencionar que las muestras de plantas no cuentan con dichos controles, por lo que el control de calidad se realizará únicamente en rocas y suelos. Además, las plantas solo contienen los elementos minerales esenciales (ver Tabla 2.4).

Se hará una selección de elementos de acuerdo con el objetivo de estudio, los cuales incluyen los elementos de óxidos mayores, tierras raras y elementos esenciales en rocas y suelos (ver Tabla 2.4). Además, se tomarán en cuenta los elementos inmóviles.

**Tabla 2.4**

*Lista de elementos a estudiar para el área de estudio*

Analitos				Objetivos		Variables
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	SrO	Elementos de óxidos mayores		Roca y suelo
BaO	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	TiO <sub>2</sub>			
CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	LOI 1000			
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	SiO <sub>2</sub>				
La	Gd	Nd	Tb	Elementos de tierras raras		Roca y suelo
Er	Ho	Pr	Tm			
Eu	Ce	Sm	Yb			
Dy	Lu					
K	Ca	Mg	S	Elementos minerales esenciales	Macronutrientes	Roca, suelo y planta
P					Micronutrientes	
Mn	Zn	Mo	Fe	Elementos inmóviles		Roca y suelo
Cu	Ni					
Ti	Y	Nb	V			
Zr	P					

Se realiza una selección de analitos (elementos y/o compuestos) que posean más del 50% de sus respuestas analíticas fuera del rango de detección, es decir, sus valores estén bajo el límite inferior de detección. Los analitos que contengan más del 50% de sus respuestas analíticas dentro del límite de detección serán modificados. Los valores menores al límite de detección serán reemplazados con un valor positivo equivalente al 65 % del Límite Inferior de Detección (LID); por ejemplo, si el límite de detección es <0.05 ppm, se reemplazará por 0.0325 ppm. En este estudio, el uso del 65% del LID permite mejorar la confiabilidad de los datos reportados, debido a la proximidad al límite de detección, y asegurando una mayor consistencia en la interpretación de los resultados.

En el marco del control de calidad (QA/QC), se evaluarán las variables que abarcan más del 50 % de los datos con respuesta analítica. El porcentaje de coeficiente de variación (CV%) obtenido a partir de un par de duplicados será calculado para determinar el error relativo analítico. Para lograrlo, utilizaremos la [formula \(1.1\)](#) proporcionada por [Stanley y Lawie \(2007\)](#), utilizando muestras de duplicados de terreno y duplicados de laboratorio, de las matrices de rocas y suelos. Es importante señalar que, en el caso particular de las muestras de rocas y suelos, se cuenta con pocos duplicados de terreno, por lo que estas muestras se considerarán como parte de duplicados analíticos. Siendo así que se solo se realizara el cálculo de error analítico ( $E_A$ ).

$$\overline{CV} \% = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( 2 \frac{(x_{1i} - x_{2i})^2}{(x_{1i} + x_{2i})^2} \right)} \times 100 \quad (1.1)$$

Donde,  $n$  corresponde al número de pares duplicados ( $x_1$ : muestra original y  $x_2$ : duplicado).

Además, para el cálculo del porcentaje del coeficiente de variación (CV%) en muestras estándares analíticos, de las matrices de rocas y suelos, aplicaremos la [formula \(1.2\)](#) descrita por [Isaaks y Srivastava \(1989\)](#).

$$\overline{CV} \% = \frac{\sigma}{\bar{x}} \times 100 \quad (1.2)$$

En este caso,  $\sigma$  representa la desviación estándar y  $\bar{x}$  representa la media aritmética o promedio.

Finalmente, el error analítico ( $E_A$ ) se estima como el promedio de la suma cuadrática del CV de los duplicados y el CV de los estándares, utilizando la [fórmula 1.3](#):

$$E_A = \sqrt{\frac{CV_{Dup}^2 + CV_{St}^2}{2}} \quad (1.3)$$

Para este estudio en particular, se establece que las variables que presenten un error analítico menor al 10% son consideradas analíticamente confiables. Las variables con error entre 10% y el 20% se consideran moderadamente confiables, mientras que aquellas con valores superiores al 20% se considerarán no aptas y serán eliminadas.

En los casos en que el error analítico sea moderadamente confiable, se evaluará si uno de los promedios de CV% de los duplicados analíticos o de los estándares analíticos es bajo y el otro es moderado. En tales casos, se considerará aceptables (ver [Tabla B.3, Anexo B](#)).

**Tabla 2.5**

*Resumen de datos aceptables para el estudio, desde confiables a moderadamente confiables, según el control de calidad en rocas y suelos.*

Elementos químicos		Datos confiables a moderadamente confiables							
		Rocas				Suelos			
Elementos de óxidos mayores		Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	SiO <sub>2</sub>		Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	TiO <sub>2</sub>
		CaO	MnO	SrO		BaO	MgO	SO <sub>3</sub>	LOI 1000
		Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	*Na <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>		CaO	MnO	SiO <sub>2</sub>	
		K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	LOI 1000		Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	SrO	
Elementos de tierras raras		Dy	Gd	Nd	Tb	Dy	Gd	Nd	Tb
		Er	Ho	Pr	*Tm	Er	Ho	Pr	Tm
		Eu	Lu	Sm	Yb	Eu	Lu	Sm	Yb
Elementos minerales esenciales	Macronutrientes	K	Ca	Mg	P	K	Ca	Mg	S
	Micronutrientes	Mn	Zn	Mo	Fe	Mn	Zn	Mo	Fe
Elementos inmóviles		Ti	Y	Nb	V	Ti	Y	Nb	V
		Zr	P			Zr	P		

*Nota.* \*Los analitos en rocas de óxido de sodio (Na<sub>2</sub>O) y Tulio (Tm) con moderada confiabilidad son considerados aceptables.

A partir de los resultados, se observa que todos los datos muestran respuestas analíticas en al menos el 50%, con la excepción del compuesto Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> en suelos, que representa un 64.10% sin respuesta analítica. Para la selección de elementos aceptables para el estudio, se obtuvieron errores analíticos mayoritariamente menores al 10 % en elementos mayores, tierras raras y nutrientes minerales esenciales e inmóviles en rocas y suelos (ver [Tabla B.3, Anexo B](#)), además de los datos aceptables con moderada confiabilidad, mostrados en la [Tabla 2.5](#).

Según los resultados de error analítico (E<sub>A</sub>), los datos no confiables corresponden al óxido de bario (BaO) en rocas, con un valor de 33.07 %. Para los datos de moderada confiabilidad en rocas, se encuentran el óxido de cromo (Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), óxido de sodio (Na<sub>2</sub>O), óxido de azufre (SO<sub>3</sub>), tulio (Tm) y azufre (S), con valores de 15%, 11.3%, 15.76%, 12.43% y 15.02%, respectivamente. De estos, el Na<sub>2</sub>O y el Tm son consideradas aceptables. En cuanto a suelos, el óxido de azufre con moderada confiabilidad tiene un valor de 19.84%, el cual es considerada no aceptable (ver [Tabla B.3, Anexo B](#)).

### 2.5.3 ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE DATOS

Para llevar a cabo el análisis de datos, se utilizarán herramientas informáticas como Microsoft Excel (Microsoft, 2021), R (R Core Team, 2024) y RStudio (Posit Software, 2024), las cuales facilitarán su interpretación y procesamiento de información. Los datos serán representados en diagramas multielemento y gráficos para el análisis geoquímico de rocas y suelos. Además, para la edición de figuras se utilizará el software Adobe Illustrator (Adobe, 2018).

Con los datos representados y clasificados mediante diagramas, se llevarán a cabo interpretaciones apoyadas en la bibliografía consultada, así como en observaciones de campo que puedan sustentar y complementar el análisis. A continuación, se describen los pasos y métodos que se emplearán para este propósito:

#### 2.5.3.1 *Análisis de datos composicionales*

Antes del análisis, los datos fueron sometidos a una serie de etapas para garantizar su calidad y consistencia:

- **Normalización:** Se utilizó el software CoDaPack (Thió-Henestrosa & Martín-Fernández, 2005) para aplicar la transformación logarítmica centrada (CLR), una técnica fundamental para eliminar los efectos de cierre presentes en los datos composicionales y preparar las matrices para análisis posteriores.

#### 2.5.3.2 *Análisis multivariado de datos*

El análisis multivariado fue fundamental para identificar patrones subyacentes en la composición geoquímica de las muestras y reducir la complejidad de los datos. Este enfoque permitió explorar relaciones entre las variables analizadas y caracterizar las muestras de rocas y suelos en función de su origen y procesos de alteración. Seguidamente, se detallan las principales técnicas empleadas:

- **Análisis de Componentes Principales Robustos (RPCA):** El RPCA se empleó para manejar matrices de datos de alta dimensionalidad y reducir el impacto de valores atípicos. Esta técnica se implementó mediante el software R y el entorno de desarrollo RStudio, utilizando la Descomposición en Valores Singulares Aleatoria (RSVD).

- **Análisis de Componentes Principales (PCA):** El PCA fue aplicado para disminuir la dimensionalidad de los datos y revelar agrupaciones en las muestras analizadas. Esta técnica permitió explicar la mayor proporción posible de la varianza en los datos, facilitando: la representación de la distribución de las muestras en función de sus primeras componentes principales. E identificar relaciones entre las variables.
- **Análisis de clústering y cálculo de centroides:** El análisis de clústering y el cálculo de centroides desempeñaron un papel fundamental en la agrupación y validación de las muestras de rocas, suelos profundos y superficiales. Este enfoque permitió identificar grupos naturales basados en similitudes geoquímicas y facilitó la interpretación de las relaciones entre los diferentes conjuntos de datos.

Para medir la similitud o diferencia entre estos grupos, se utilizó la distancia euclidiana ordinaria entre los centroides. Este cálculo se basa en el teorema de Pitágoras, adaptado a espacios de múltiples dimensiones, y se define mediante la [Fórmula 1.4](#).

$$d(C_1, C_2) = \sqrt{(C_1^{(1)} - C_2^{(1)})^2 + (C_1^{(2)} - C_2^{(2)})^2 + \dots + (C_1^{(n)} - C_2^{(n)})^2} \quad (1.4)$$

Donde:  $C_1$  y  $C_2$  son los **centroides** de dos clústeres diferentes;  $C_1^{(i)}$  es la coordenada del centroide  $C_1$  en la dimensión  $i$ ; y  $n$  es el número de variables o dimensiones

Esta distancia euclidiana proporcionó una medida cuantitativa para evaluar la proximidad entre los clústeres definidos, permitiendo determinar qué grupos eran más similares o diferentes entre sí en el espacio multidimensional.

### 2.5.3.3 Índices geoquímicos

Los índices geoquímicos desempeñaron un papel clave en la interpretación de los patrones de distribución de los elementos de tierras raras (REE) en rocas y suelos. Estos índices se centraron en los grupos LREE (tierras raras ligeras: La a Nd), MREE (tierras raras intermedias: Pr a Ho) y HREE (tierras raras pesadas: Dy a Lu), diferenciados según su número atómico. Los índices permitieron evaluar el enriquecimiento o empobrecimiento relativo entre estos grupos de REE, así como identificar anomalías geoquímicas asociadas a procesos de formación, alteración o meteorización. A continuación, se presentan los índices principales calculados:

- **Relación entre tierras raras ligeras y pesadas:** La relación entre tierras raras ligeras (LREE) y pesadas (HREE) es un índice ampliamente utilizado en geoquímica para evaluar el fraccionamiento entre estos grupos de elementos. Según la metodología propuesta por Ma (2011), el índice se calcula mediante la [Formula 1.5](#):

$$[LREE/HREE]_N = La_N / Lu_N \quad (1.5)$$

La normalización ( $N$ ) se realiza respecto a un valor de referencia, como las condritas (Taylor & McLennan, 1985) o el promedio global de suelos (Kabata-Pendias, 2010).

- **Índice de Enriquecimiento Intermedio:** El índice de enriquecimiento intermedio permite evaluar el fraccionamiento relativo de las tierras raras intermedias (MREE). Este índice utiliza la concentración de gadolinio ( $Gd$ ) normalizado con respecto al material parental y la media geométrica de las concentraciones normalizadas de lantano ( $La$ ) y lutecio ( $Lu$ ), como se establece en la ecuación ([Formula 1.6](#)):

$$MREE^* \text{ o } [Gd/Gd^*]_N = Gd_N / \sqrt{La_N \times Lu_N} \quad (1.6)$$

- **Anomalías de europio y cerio:** Para cuantificar las anomalías de europio ( $Eu^*$ ) y cerio ( $Ce^*$ ) en los suelos, se emplearon las ecuaciones propuestas por Taylor y McLennan (1985). Estas anomalías son expresadas mediante los términos de las siguientes fórmulas (Formulas 1.7 y 1.8):

$$Eu^* \text{ o } [Eu/Eu^*]_N = Eu_N / \sqrt{Sm_N \times Gd_N} \quad (1.7)$$

$$Ce^* \text{ o } [Ce/Ce^*]_N = Ce_N / \sqrt{La_N \times Pr_N} \quad (1.8)$$

Donde las anomalías con un valor superior a 1,0 indican una anomalía positiva y un valor inferior a 1,0 es una anomalía negativa, y para que se considere significativa deben ser inferiores a 0,95 o superiores a 1,05

- **Suma total de tierras raras:** La suma total de tierras raras ( $\sum REE$ ) proporciona una medida absoluta del contenido de REE en las muestras analizadas. Este índice es útil para comparar la abundancia general de REE entre diferentes litologías o suelos.

#### 2.5.3.4 Representación gráfica de datos

La representación gráfica de los datos recolectados y procesados fue fundamental para identificar patrones geoquímicos, analizar distribuciones y realizar comparaciones entre las muestras de suelos y rocas. Se emplearon diversas técnicas de visualización que facilitaron la interpretación clara de los resultados, las cuales se detallan a continuación:

- **Gráficos multielemento:** Los gráficos multielemento se utilizaron para representar las concentraciones normalizadas de elementos de tierras raras (REE) en rocas y suelos. Estas representaciones permitieron identificar: Patrones de distribución, anomalías geoquímicas e índices.
- **Diagramas bidimensionales de PCA:** Se generaron diagramas bidimensionales mediante el Análisis de Componentes Principales (PCA), proyectando las dos primeras componentes principales (PC1 y PC2). Estas componentes explicaron un porcentaje significativo de la varianza total de los datos.
- **Mapas de Calor:** Los mapas de calor se emplearon para visualizar distancias euclidianas entre los centroides de los clústeres formados por las muestras analizadas.
- **Diagramas de cajas y bigotes:** Se emplearon diagramas de cajas y bigotes para observar la dispersión y distribución de los elementos esenciales en rocas, suelos superficiales y profundos.

- **Gráficos radar:** Los gráficos de radar fueron empleados para comparar los niveles relativos de macronutrientes y micronutrientes en las distintas agrupaciones de suelos, litologías y plantas.
- **Gráficos de barras apiladas:** Se emplearon gráficos de barras apiladas para representar la proporción de óxidos mayores y la pérdida por ignición (LOI) en rocas y suelos.

#### 2.5.3.5 Softwares utilizados

El análisis de datos y la interpretación de resultados se realizaron empleando diversos programas informáticos especializados, los cuales facilitaron tanto el procesamiento estadístico como la representación gráfica y la edición final de los resultados. A continuación, se detalla el uso de cada uno:

- **CoDaPack:** Para normalizar los datos composicionales, se utilizó CoDaPack ([Thió-Henestrosa & Martín-Fernández, 2005](#)), aplicando la transformación logarítmica centrada (*CLR*). Esta técnica permitió eliminar los efectos de cierre en los datos, haciendo posible un análisis estadístico más robusto y confiable.
- **R y RStudio:** Los análisis estadísticos avanzados, como el Análisis de Componentes Principales Robustos (RPCA) y el Análisis de Componentes Principales (PCA), se implementaron utilizando R ([R Core Team, 2024](#)) en combinación con RStudio ([Posit Software, 2024](#)) como entorno de desarrollo. Estas herramientas permitieron procesar grandes volúmenes de datos y aplicar técnicas estadísticas complejas de manera eficiente. Estas herramientas permitieron manejar grandes volúmenes de datos y generar gráficos avanzados, como mapas de calor y diagramas ternarios, utilizando paquetes como `ggplot2`, `rsvd`, `factoextra` y `FactoMineR`.
- **Microsoft Excel:** Microsoft Excel ([Microsoft, 2021](#)) se empleó para la organización inicial de datos, así como para la creación de gráficos básicos, como diagramas de barras apiladas. Estos gráficos mostraron, por ejemplo, la normalización al 100% de óxidos mayores, facilitando la comparación visual entre las diferentes muestras.
- **Adobe Illustrator:** Para la edición y presentación de figuras y gráficos, se utilizó Adobe Illustrator ([Adobe, 2018](#)), asegurando un acabado de alta calidad.



## CAPÍTULO 3. MARCO TEÓRICO

### 3.1 INVESTIGACIONES PREVIAS

La geología del área de Cabana es desarrollada regionalmente por [Palacios et al. \(1993\)](#) quien realiza la “Geología de la Cordillera Occidental y Altiplano al oeste del Lago Titicaca” a escala 1:100 000. En cuanto a la geología local es obtenida del Cuadrángulo de Puno (32v) a escala 1:50 000 realizado por [Rodríguez, R. et al., 2020](#), quienes describen a detalle las unidades geológicas, aportando así con las características de las litologías presentes en el área de estudio, principalmente de las unidades de los arcos volcánicos.

En el distrito de Cabana se realizó estudios de Micro Zonificación Ecológica y Económica con el fin de identificar suelos potenciales para el cultivo de la quinua ([informe realizado por el MINAM](#)), quienes determinan a los suelos franco-arenosos como beneficiosos para el cultivo.

A nivel nacional se tiene el estudio realizado por [Cereceda, C. et al \(2019\)](#) la “Geología del pisco, valle de Ica”, ofrece una perspectiva diferente sobre la geología y ayuda a comprender las características y sus implicancias entre geología, relieve, suelo, mineralogía y química. En el valle de Ica los suelos son de tipo regosols y cambisols, y que los elementos que intervienen en el desarrollo de la uva son el Ca, Fe, Mn, Sr, Ba, Pb, Zn y Cu.

A nivel internacional se tienen estudios realizados en 4 viñeros en Chile central, siendo el estudio integrador por [Castillo, P. \(2019\)](#) que estudia la influencia del material parental en la química del suelo y cultivos de la vid como parte del sistema roca-suelo-planta, quien determina al comparar la composición de las bayas de las distintas viñas, reconoce como elementos mayoritarios en la fruta a los elementos químicos de K, N, P, Ca, S, Mg, Cl y Na. Sin embargo, se encuentran varios estudios relacionados con la geología con diferentes cultivos como la “Geología del tequila” en México realizado por [Amezcuca \(2017\)](#), quien determina que las rocas volcánicas son los que aportan a los suelos de agave tequilero como la riolita, toba riolítica y dacita, el “De la Geología al café” en Colombia por el [Servicio Geológico Colombiano \(2018\)](#), y entre otras investigaciones en diversas partes del mundo.

## 3.2 BASES TEÓRICAS Y GEO CIENTÍFICAS

### 3.2.1 INTERACCIÓN ENTRE LA LITOSFERA, SUELO Y PLANTA

En el entorno terrestre, *las plantas* impulsan la reacción química mediante la fotosíntesis, aprovechando la energía radiante del sol. Este *proceso bioquímico* permite la producción de materia orgánica en su entorno natural, y, en términos geológicos, se remonta desde el periodo Pre-Cámbrico Temprano hasta la actualidad. A lo largo del tiempo, millones de organismos han evolucionado y se han adaptado, ajustándose a la química de sus ambientes en largos periodos de tiempo.

La mayoría de los *nutrientes minerales esenciales* para la vida terrestre se obtienen principalmente del suelo que recubre la litosfera superficial. Además, la *atmosfera* actúa como una fuente de ciertos nutrientes esenciales como el nitrógeno (N<sub>2</sub>), el oxígeno (O<sub>2</sub>) y el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Por otro lado, en la hidrosfera, la principal fuente es el agua. En cantidades grandes están los *macronutrientes*, y en cantidades más pequeñas los *micronutrientes*, así como los nutrientes *no esenciales*. Todos estos son esenciales y beneficiosos para el crecimiento, desarrollo y salud de la planta.

Las plantas tienen una capacidad natural para seleccionar elementos químicos, ya que estos dependen en gran medida de la *geoquímica* de su entorno natural o inducidas por el hombre.

Cada elemento esencial tiene su ciclo biogeoquímico, donde se trasporta de un ambiente de intercambio (fase móvil de un elemento) a un ambiente de depósito (fase inmóvil de un elemento). Un ambiente de depósito está relacionado a una fase sedimentaria, e incluyen suelos debido a sus similitudes.

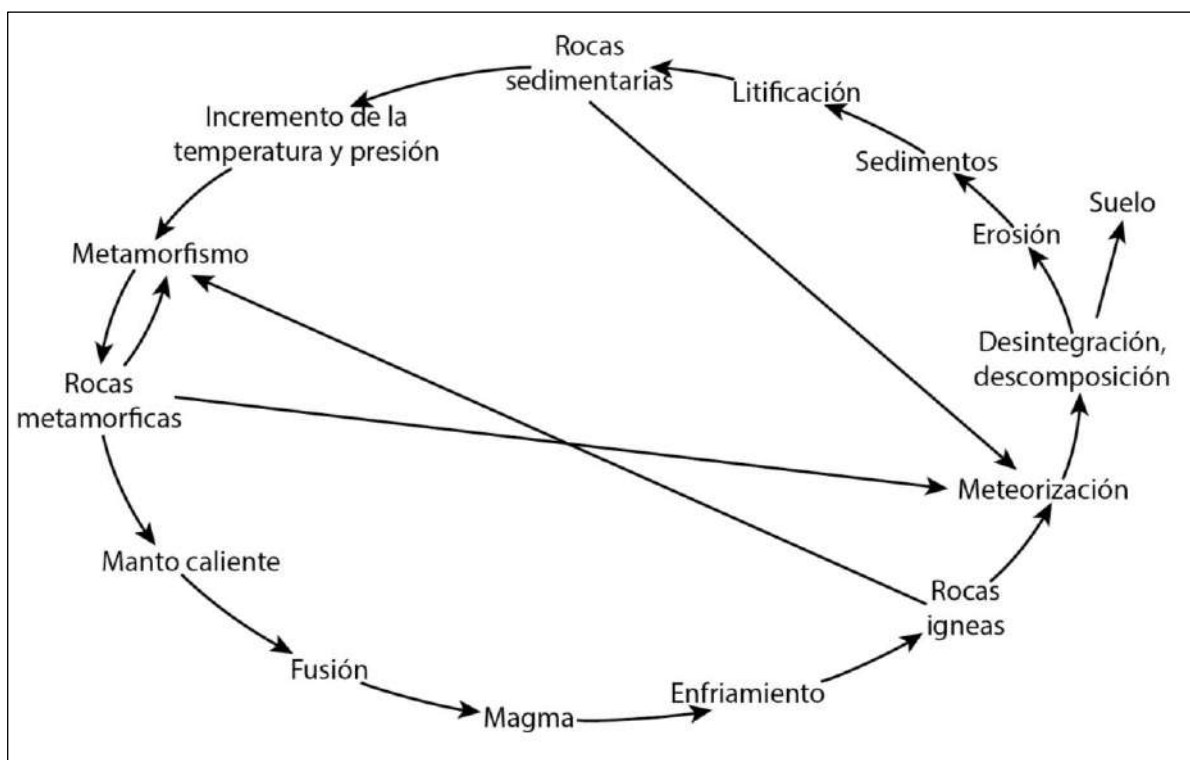
Finalmente, se analiza la geología como un ciclo que abarca desde las rocas hasta la formación de suelos, proceso influido por factores como la geomorfología, el clima y la vegetación, entre otros.

### 3.2.2 CICLO DE LAS ROCAS: RELACIÓN CON LOS SUELOS

El ciclo de las rocas muestra las relaciones entre el magma, las rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas, además del suelo (Siegel, 2002; ver Figura 3.1).

#### Figura 3.1

*El ciclo de las rocas, productos y condiciones importantes y su relación con la formación de suelos*



Fuente: Adaptado de Siegel, 2002.

#### 3.2.2.1 Rocas ígneas

Las rocas ígneas son rocas primarias que se forman a partir del enfriamiento y solidificación del magma, el cual es un material de roca fundida que contiene todos los elementos químicos necesarios para su formación (Siegel, 2002). Este proceso puede ocurrir tanto en la superficie como bajo la corteza terrestre, dando lugar a dos tipos principales:

- **Rocas ígneas extrusivas o volcánicas:** Surgen debido al enfriamiento acelerado del magma sobre la superficie terrestre. Este proceso rápido genera cristales extremadamente pequeños que únicamente son visibles utilizando un microscopio petrográfico, según Tarbuck et al., 2005.

- **Rocas ígneas intrusivas o plutónicas:** Estas formaciones rocosas se originan cuando el magma se endurece de manera lenta debajo de la corteza terrestre. Como resultado de este proceso prolongado, exhiben cristales de mayor tamaño que son visibles sin necesidad de instrumentos, según [Tarbuck et al., 2005](#).

Las rocas ígneas contienen una gran variedad de minerales y composiciones químicas que se forman durante el proceso de enfriamiento y cristalización del magma. Este enfriamiento puede ocurrir en diferentes etapas, lo que influye en la textura y estructura final de las rocas, determinando así su clasificación y características distintivas.

### 3.2.2.2 *Rocas sedimentarias*

Las rocas sedimentarias se forman a partir de materiales provenientes de la desintegración y meteorización de rocas preexistentes, como sedimentos que se acumulan en capas sobre la superficie terrestre. Estos sedimentos pueden incluir partículas desintegradas y suelos que, bajo procesos de compactación y cementación, se convierten en roca sólida ([Siegel, 2002; Tarbuck et al., 2005](#)).

### 3.2.2.3 *Rocas metamórficas*

Las rocas metamórficas se derivan de rocas preexistentes (ígneas, sedimentarias o metamórficas) que han sido sometidas a condiciones de alta temperatura y presión, las cuales superan los límites bajo los que se formaron originalmente. Estas condiciones provocan cambios mineralógicos, texturales y químicos en las rocas, sin que lleguen a fundirse completamente ([Siegel, 2002; Tarbuck et al., 2005](#)).

De acuerdo con [Siegel \(2002\)](#), la química de las rocas metamórficas puede reflejar la composición de las rocas originales, aunque las nuevas condiciones pueden dar lugar a la formación de minerales únicos.

Las rocas metamórficas pueden clasificarse en dos tipos principales:

- **Rocas metamórficas foliadas:** Presentan una textura laminada debido al alineamiento de los minerales bajo alta presión. Ejemplos de estas rocas incluyen el esquisto y la pizarra.
- **Rocas metamórficas no foliadas:** Carecen de laminación, ya que sus minerales no muestran orientación preferencial. Ejemplos comunes son el mármol y la cuarcita.

Este proceso metamórfico es fundamental para entender los ciclos geológicos, ya que permite la transformación de rocas y su reintegración en el ciclo de las rocas.

### 3.2.2.4 Formación del suelo

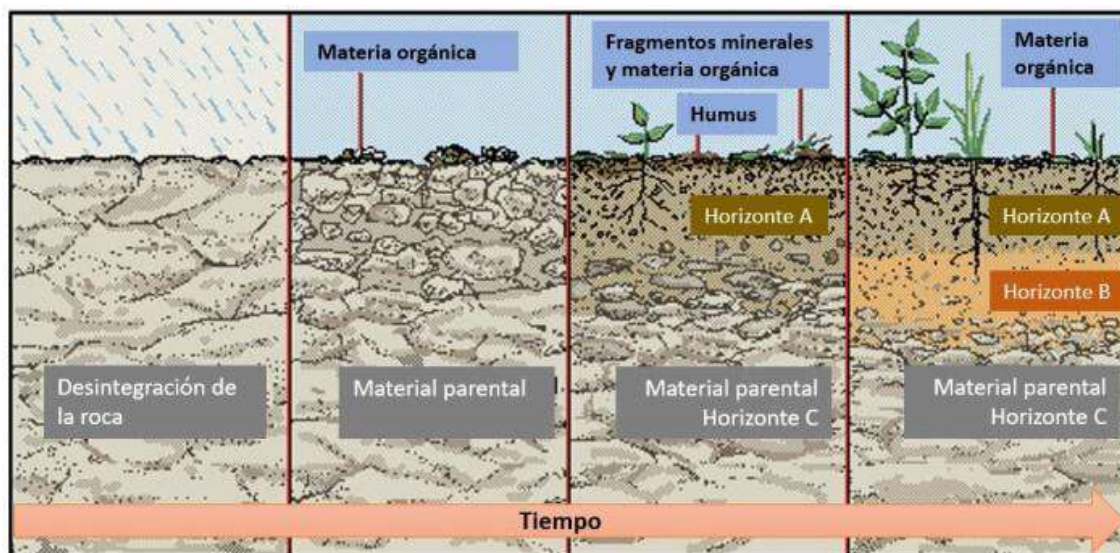
Los suelos se desarrollan a partir de la meteorización de cualquier tipo de roca (ígneas, sedimentaria o metamórfica). La combinación de nuevos minerales y partículas sólidas del proceso de desintegración forma suelos (Siegel, 2002).

La meteorización es el proceso que causa la desintegración y descomposición de la roca preexistente cuando interactúa con el aire, el agua y los organismos (por ejemplo, bacterias) en la superficie de la tierra (Siegel, 2002), siendo sometidas a la acción ambiental (Figura 3.2) tanto física, química y biológica, lo que genera el perfil de meteorización (González de Vallejo et al., 2004). Cada horizonte contiene diferentes tipos o proporciones de materiales terrestres.

Cuando el suelo permanece *in situ*, es decir, sin haber sido transportado, se le denomina suelo residual. En cambio, si ha sido desplazado por procesos naturales, formando depósitos como coluviales, aluviales, entre otros, se le conoce como suelo transportado (González de Vallejo et al., 2004; ver Figura 3.3).

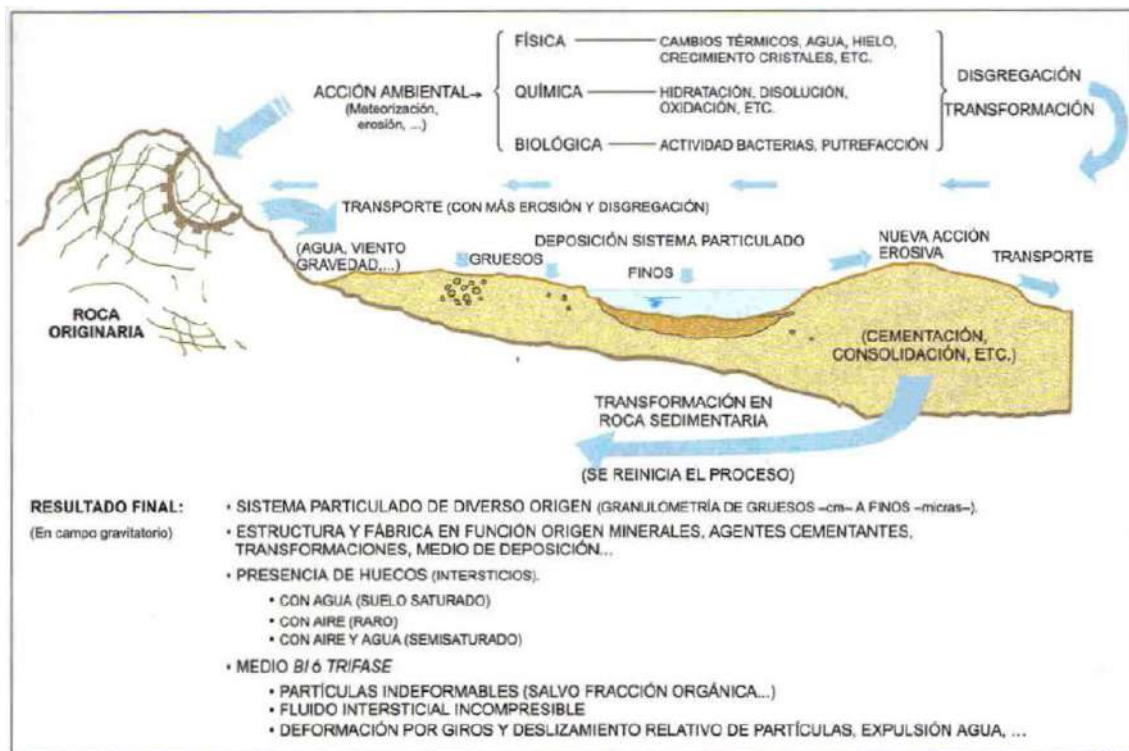
#### Figura 3.2

Esquema del proceso de formación de suelos por la acción ambiental en las rocas. (1) Roca madre; (2) Física; (3) Química; (4) Biológica; Conjunta física-química-biológica.



Fuente: Intagri S.C. (2017)

**Figura 3.3**  
Formación de suelos



Fuente: Gonzáles de Vallejo et al., 2004.

### 3.2.3 GEOMORFOLOGÍA

La geomorfología se enfoca en el estudio de las geoformas o formas del terreno, entendidas en un sentido amplio (sensu lato), integrando conceptos de geología y geografía que actúan como pilares en la configuración física de los suelos. Estas dinámicas se expresan mediante el relieve, los procesos morfodinámicos en la superficie, las condiciones morfoclimáticas, los materiales alterados o no consolidados que funcionan como base para los suelos, y la influencia del tiempo (Zinck, 2012).

Las geoformas desempeñan un papel fundamental en la variabilidad de los suelos, especialmente en las diferencias sistemáticas observadas en sus patrones (Zinck, 2012).

Por su parte, las geoformas y los suelos constituyen elementos esenciales de la capa superficial de la Tierra, conocida como epidermis. Ambos interactúan en la interfaz que conecta la litosfera, hidrosfera, biosfera y atmósfera, dentro del concepto de la noosfera. En este contexto, los suelos se consideran recursos estratégicos que influyen en las decisiones humanas sobre su uso (Tricart, 1972; Zinck, 2010).

### 3.1.1.1 Clasificación de geoformas

**Tabla 3.1**

*Clasificación de geoformas.*

Nivel	Categoría	Clasificación
1	Orden	Geoestructura
2	Suborden	Ambiente morfogénico
3	Grupo	Paisaje geomorfológico
4	Subgrupo	Relieve/modelado
5	Familia	Litología/facies
6	Subfamilia	Forma de terreno

Fuente: [Zinck \(2010\)](#).

- **Geoestructura:** Hace referencia a una extensa porción continental que, desde un punto de vista geológico, está relacionada con la tectónica de placas (por ejemplo, la Cordillera de los Andes).
- **Ambiente morfogenético:** Se origina y es controlado por procesos de geodinámica interna y/o externa (por ejemplo, estructural, deposicional, entre otros).
- **Paisaje geomorfológico:** Amplia extensión de terreno caracterizada por su expresión fisiográfica. Corresponde a una repetición de tipos de relieve similares. [Zinck \(2010\)](#) identifica siete tipos principales: (1) valle, (2) planicie, (3) peneplanicie, (4) altiplanicie, (5) piedemonte, (6) lomerío, y (7) montaña.
- **Relieve y/o modelado:** Geoformas que se distinguen por su geodinámica. El relieve está controlado por la geodinámica interna (por ejemplo, horts, anticlinales, entre otros), mientras que el modelado está influido por la geodinámica externa (por ejemplo, deltas, llanuras de inundación, entre otros).
- **Litología y/o facies:** Proporciona información sobre la naturaleza petrográfica de las rocas (por ejemplo, caliza, andesita, entre otras), que actúan como sustrato para las geoformas. En el caso de las facies, se refiere a formaciones o depósitos no consolidados (por ejemplo, aluvial, glacial, entre otros). Cabe señalar que tanto la litología como las facies constituyen parte del material parental de los suelos.
- **Forma de terreno:** Se trata de un tipo básico de geoforma que se caracteriza por su geometría, dinámica e historia (por ejemplo, abanico aluvial, morrena lateral, entre otros).

### 3.2.4 TRANSFORMACIÓN DE ROCA A SUELO

El comienzo de una transformación ocurre con la *meteorización*, químicamente el conjunto de minerales de una roca es inestable, por lo que se reajustará a química de la superficie produciendo nuevos minerales más pequeños, bajo condiciones de oxidación.

Los procesos de alteración química que ocurre en la naturaleza son:

- **Zona de interacción agua-roca.** Comienza con una desagregación gradual de las rocas a través de procesos de alteración o fragmentación física y el desarrollo de nuevos minerales hídricos a baja temperatura.

La interacción ocurre en grietas y fisuras de la roca por fuerza geológicas. El tiempo de residencia de este fluido acuoso en contacto con la roca es variable que depende del tamaño de fractura. El agua disuelve integralmente los minerales en los bordes de su paso y los ensancha para aumentar el flujo de agua. La mayoría de los minerales en las rocas tienen un fuerte coeficiente de expansión térmica anisotrópica siguiendo las diferentes direcciones cristalográficas del cristal. Creando fuertes contrastes en los límites de los granos, lo que hace que se formen grietas entre las fases por el agua puede pasar y alterar los granos minerales adyacentes. La zona de interacción roca-agua produce minerales que no están todos en equilibrio termodinámico químico entre sí.

El resultado de la alteración química entonces es que en las etapas iniciales la roca se transforma a lo largo de grietas y fisuras, debilitándola y permitiéndole perder parte de su estructura inicial por dislocación y pérdida de material. Esto produce lo que se llama saprock. Con una pérdida completa de la capacidad física, el colapso de las zonas disueltas y el desplazamiento de las arcillas, el material se vuelve incoherente y se denomina saprolita.

- **Zona de interacción planta-suelo.** Donde ocurre la interacción biológica con los minerales de alterita.

Las plantas también mueven elementos menores, por lo tanto, cambian la química de los elementos mayores y menores en la zona del suelo en comparación con la zona de alterita.

Las plantas necesitan minerales arcillosos para su desarrollo biológico. Las arcillas son depósitos de elementos minerales, que pueden ser extraídos e intercambiados a voluntad.



### 3.2.5 ELEMENTOS MINERALES ESENCIALES PARA LAS PLANTAS

Para comprender el término de *elementos minerales esenciales* (o nutrientes minerales esenciales), nos remitimos primero a las definiciones realizadas por O'Dell & Sunde, (1997) de los términos *elemento mineral* y *elemento esencial* de forma separada. Donde el término *nutriente mineral* (o elemento mineral) se refiere cuando los elementos químicos que normalmente no se volatilizan, cuando su matriz orgánica es calcinada para eliminar el material carbonoso. Y para el término *elemento esencial*, cuando todos los nutrientes son óptimos para apoyar el crecimiento, reproducción y salud adecuadas a lo largo del ciclo de vida. Por lo que en conjunto, el término *nutriente mineral esencial* se referiría a los *elementos minerales* que son vitales como nutrientes esenciales para el crecimiento y desarrollo de las plantas, y así completar su ciclo de vida. Es importante mencionar que, para considerar *elemento esencial*, debe cumplir con tres criterios según Arnon & Stout (1939). Estos criterios son: (1) cuando la planta absorbe la cantidad necesaria de elementos químicos, debe ser capaz de completar su ciclo de vida, (2) cuando la función del elemento químico en la planta, no puede ser reemplazada por ningún otro elemento, y (3) cuando el elemento químico debe estar directamente involucrado en la nutrición de la planta (ej. Castillo P. I., 2019; Kirkby, 2012; Arnon & Stout, 1939).

Las plantas adquieren los *elementos nutritivos esenciales* del suelo a través de las raíces, para completar su ciclo de vida (O'Dell & Sunde, 1997), de los cuales lo dividen en dos grupos en base a la cantidad y son en *Macronutrientes* y *Micronutrientes*. Los *macronutrientes* son esenciales (Tabla 3.3), que incluyen al nitrógeno (N), azufre (S), fósforo (P), magnesio (Mg), calcio (Ca) y potasio (K), son requeridos por las plantas en concentraciones relativamente altas (Kirkby, 2012), y su función se relaciona con el metabolismo y crecimiento de las plantas (Hawkesford y otros, 2012). Los *micronutrientes*, que incluyen según (Broadley y otros, 2012b) hierro (Fe), manganeso (Mn), cobre (Cu), zinc (Zn), níquel (Ni), molibdeno (Mo), boro (B) y cloro (Cl), son igualmente esenciales (Tabla 3.3), pero se encuentran en concentraciones mucho más bajas. Son constituyentes de moléculas de enzimas y están principalmente relacionadas con su actividad enzimática (Kirkby, 2012).

Cabe mencionar que existen otros elementos, considerados *no esenciales* (Tabla 3.3), que se denominan *elementos beneficiosos* porque estimulan el crecimiento de las plantas. Entre estos se encuentran el sodio (Na), silicio (Si), cobalto (Co), selenio (Se), aluminio (Al) y entre otros (Broadley y otros, 2012a).

**Tabla 3.2**

*Elementos minerales esenciales, y no esenciales, para las plantas.*

Tipo de nutrientes	Elementos minerales
<b>Macronutrientes</b> ( <i>esenciales</i> )	Nitrógeno (N), Potasio (K), Fósforo (P), Magnesio (Mg), Calcio (Ca) y Azufre (S)
<b>Micronutrientes</b> ( <i>esenciales</i> )	Hierro (Fe), Manganeso (Mn), Cobre (Cu), Zinc (Zn), Níquel (Ni), Molibdeno (Mo), Boro (B) y Cloro (Cl)
<b>Elementos beneficiosos</b> ( <i>no esenciales</i> )	Sodio (Na), Silicio (Si), Cobalto (Co), Selenio (Se), Aluminio (Al) y otros.

Fuente: [Kirkby \(2023\)](#).

También es importante mencionar que las plantas terrestres se absorben en forma de *solutos*. Según la *tabla periódica de los elementos y sus iones* propuesta por [Railsback, \(2003\)](#), podemos identificar las características biogeoquímicas de estos elementos absorbidos. Estos elementos están organizados de acuerdo con los estados de oxidación posibles en la naturaleza, es decir, de acuerdo con sus iones. Por lo tanto, estos solutos, de acuerdo con esta tabla periódica, se muestran en la [Tabla 3.4](#).

**Tabla 3.3**

*Elementos minerales esenciales (Símbolo químico) y solutos de los elementos químicos comúnmente absorbidos por plantas terrestres en los suelos*

Elementos esenciales	Formas comúnmente adsorbidas por las plantas
<b>Macronutrientes</b>	
Nitrógeno (N)	Ión nitrato ( $\text{NO}_3^-$ )
Potasio (K)	Ión potasio ( $\text{K}^+$ )
Fosforo (P)	Fósforo en fosfato ( $\text{PO}_4^{3-}$ o $\text{HPO}_4^{2-}$ )
Calcio (Ca)	Ión calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ )
Magnesio (Mg)	Ión magnesio ( $\text{Mg}^{2+}$ )
Azufre (S)	Azufre en sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ )
<b>Micronutrientes</b>	
Manganeso (Mn)	Ión manganeso ( $\text{Mn}^{2+}$ )
Hierro (Fe)	Ión ferroso ( $\text{Fe}^{2+}$ )
Boro (B)	Ión Boro ( $\text{B}^{3+}$ )
Zinc (Zn)	Ión zinc ( $\text{Zn}^{2+}$ )
Cobre (Cu)	Ión cúprico ( $\text{Cu}^{2+}$ )
Molibdeno (Mo)	Molibdeno en molibdatos ( $\text{Mo}^{6+}$ )
Cloro (Cl)	Ión cloruro ( $\text{Cl}^-$ )
Níquel (Ni)	Ión níqueloso ( $\text{Ni}^{2+}$ )

Fuente: [Railsback, L.B., 2003](#).

### 3.2.6 CULTIVO DE LA PLANTA QUINUA

El cultivo de la planta quinua se realiza a lo largo de todos los Andes, y destacando Perú y Bolivia (Mujica & Jacobsen, 2006).

En el Perú las distribuciones geográficas del cultivo de quinua se destacan en el altiplano, las zonas de Puno, Cusco y entre otros (Rojas y otros, 2010). Sin embargo, Puno destaca por ser uno de los mayores productores de los granos de Quinua, que liderando con el 39.9 % de la producción a nivel nacional (Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego [MIDAGRI], 2023). Esta producción en la región de Puno es de gran importancia económica y social para la población de dicha región, ya que es el sustento de 100 mil familias rurales (Laurente & Mamani, 2020).

#### 3.2.6.1 Taxonomía de la quinua

La especie de la planta quinua (*Chenopodium quinoa*) fue descrita por **Carl Ludwing Willdenow**, y publicada en el libro titulado “Species plantarum” (Wikipedia, 2022). Esta especie se clasifica de la siguiente manera según su posición taxonómica (Apaza y otros, 2013):

Reino	: Plantae
División	: Fanerogamas
Clase	: Dicotiledoneas
Sub clase	: Angiospermas
Orden	: Centrospermales
Familia	: Chenopodiaceae
Género	: <i>Chenopodium</i>
Sección	: Chenopodia
Subsección	: Cellulata
Especie	: <i>Chenopodium quinoa</i> Willdenow

#### 3.2.6.2 Características geográficas

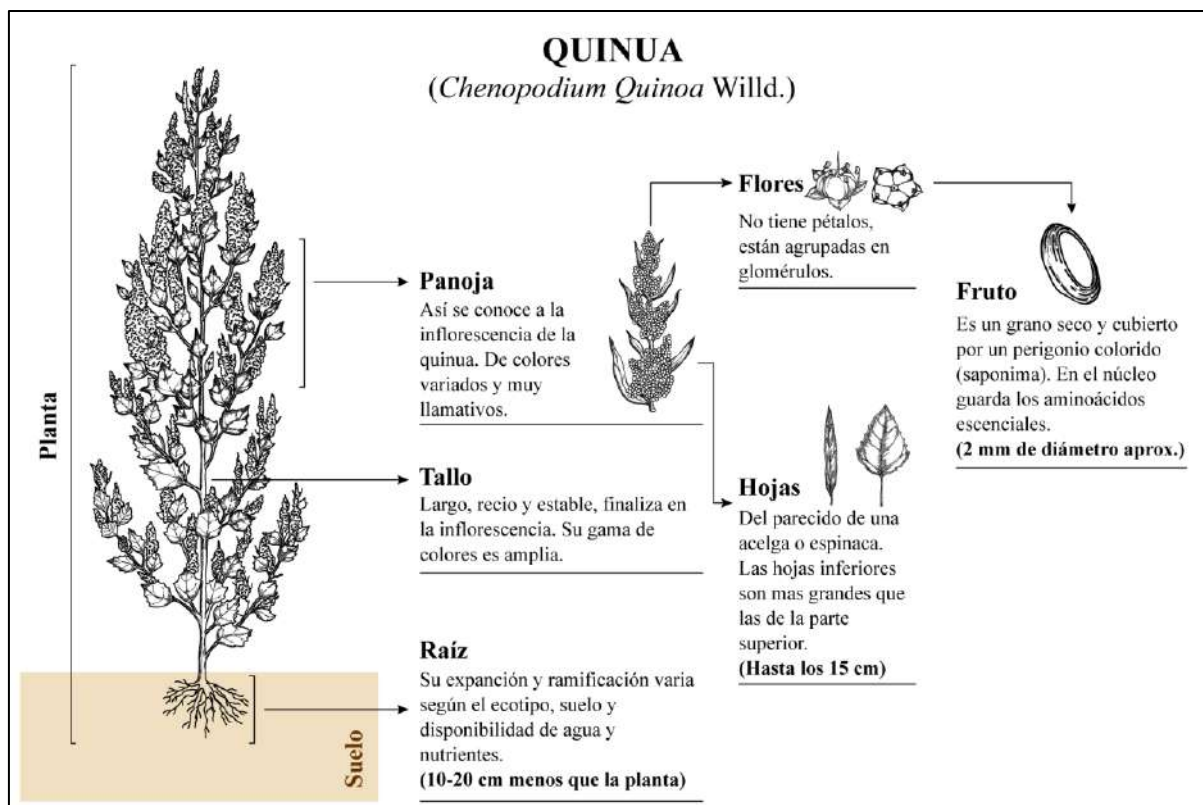
La mejor producción para el cultivo de quinua, según Mujica & Jacobsen (2006), se sitúa a una altitud dentro del intervalo de 2.500 a 3.800 metros sobre el nivel del mar, con precipitación pluvial anual que oscilan entre 250 y 500 mm, y temperaturas medias que fluctúan entre los 5 y los 14 °C.

### 3.2.6.3 Descripción morfológica

La quinua es una planta herbácea anual que presenta una notable variabilidad morfológica, reflejada en la diversidad de sus formas, tamaños y colores.

#### Figura 3.4

Representación gráfica de la morfología de la planta quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.)



Fuente: Ilustración y textos adaptados de [Repo-Carrasco & Solórzano \(2020\)](#).

Para describir su morfología de manera general, se utiliza lo planteado por [Gómez y Aguilar \(2016\)](#). Según se observa en la [Figura 3.4](#), la raíz de la planta es pequeña en comparación con el tallo y consta de una raíz principal que está lateralmente muy ramificada. A continuación, se identifica la unión del cuello de la raíz con el tallo, el cual tiene una forma cilíndrica. La altura de la planta, desde la base hasta el ápice, varía entre 0.5 m y más de 3 m, dependiendo de diversos factores, como la disponibilidad de nutrientes minerales, entre otros.

Las ramas están compuestas por panojas y se encuentran distribuidas alrededor del tallo, extendiéndose hacia el ápice. Estas ramas tienen una longitud variable, que puede

superar los 15 cm, y contienen grupos de flores (glomérulos). En cuanto a las hojas, estas constan de dos partes: el pecíolo y la lámina. La longitud del pecíolo es mayor en las hojas que se originan en el tallo y más corta en las hojas que se desarrollan en las ramas.

El fruto de la quinua presenta formas lenticulares, elipsoidales, cónicas o esferoidales, y está cubierto por envolturas florales (perigonio sépaloide), las cuales se desprenden fácilmente cuando el fruto madura. El diámetro del fruto oscila entre 1.5 mm y 3 mm.

Además, la planta quinua como sistema tiene una interacción mediante sus raíces con el sistema suelo ([Figura 3.4](#)).

### 3.3 DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS

Esta sección tiene como propósito explicar los términos clave empleados en la presente investigación, con el fin de garantizar una comprensión clara, coherente y precisa de los conceptos esenciales utilizados.

#### 3.3.1 LITOLOGÍA / FACIES

##### 3.1.1.2 *Litología:*

Según [Zinck \(2012\)](#), desde el punto de vista geomorfológico, la litología se define como el sustrato de las geoformas, refiriéndose a la información de naturaleza petrográfica de las rocas.

Por lo tanto, en términos geológicos, la litología se refiere a la clasificación y descripción de las rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas, basándose en sus características físicas, tales como la composición mineralógica, la textura, el color, y la estructura (ver ejemplos en la [Tabla 3.5](#)).

##### 3.1.1.3 *Facies:*

La definición de facies según [Zinck \(2012\)](#), desde un punto de vista geomorfológico, refiere al componente interno de las geoformas, es decir, a los materiales no consolidados de cobertura.

Geológicamente, el término facies al que se hace referencia, se aplica a depósitos no consolidados, es decir, a sedimentos que no han sido compactados ni cementados. Estos depósitos están compuestos generalmente por sedimentos como gravas, arenas, limo y arcillas, que se encuentran en un estado suelto o parcialmente consolidado y que forman la cobertura superficial de rocas. Estas facies reflejan los procesos sedimentarios actuales o recientes (ver ejemplos en la [Tabla 3.4](#)).

**Tabla 3.4**

*Ejemplos de Litología / Facies, con su respectiva clasificación y descripción.*

Tipo de Roca / Depósito	Ejemplos de litología / Facies	Clasificación	Descripción
Rocas Ígneas	Granito	Ígnea intrusiva	Compuesta principalmente de cuarzo, feldespato y mica. Tiene textura fanerítica (granos visibles), y su color varía de blanco a rosado o gris.
	Basalto	Ígnea extrusiva	Rica en piroxeno, olivino y plagioclasa. Tiene textura afanítica (granos no visibles), y es de color oscuro (negro a verde oscuro).
Rocas Sedimentarias	Arenisca	Sedimentaria clástica	Formada por granos de arena, principalmente de cuarzo. Posee una textura clástica y su color puede ser blanco, rojizo, entre otros.
	Caliza	Sedimentaria química o bioquímica	Compuesta principalmente de carbonato de calcio (calcita). Puede presentar fósiles, con una textura densa y un color que varía de blanco a gris claro.
Rocas Metamórfica	Marmol	Metamórfica no foliada	Formada por la recristalización de la caliza. Presenta una textura granoblástica (cristales del mismo tamaño), y su color es predominantemente blanco o gris, con posibles vetas de otros colores.
	Esquisto	Metamórfica foliada	Rica en mica, con textura laminada que facilita su divisibilidad. Su color es gris oscuro a negro y tiene un brillo característico.
Depósitos no consolidados	Facies Aluviales	Depósitos de ambientes fluviales	Compuestas por gravas, arenas y limos, con estructuras como laminación cruzada, reflejando procesos fluviales.
	Facies Eólicas	Depósitos de ambientes desérticos	Compuestas principalmente por arenas finas, formando dunas y otras estructuras características del transporte eólico.

Fuente: Adaptado de [Zinck \(2012\)](#).

### 3.3.2 MATERIAL PARENTAL

El material parental es el material geológico original a partir del cual se forman los suelos. Este material puede ser roca madre (rocas ígneas, sedimentarias o metamórficas) o depósitos no consolidados (como aluviones, loess, o tillitas) que han sido transportados por procesos naturales como el viento, el agua o el hielo.

### 3.3.3 ELEMENTO MINERAL ESENCIAL

El término *nutriente mineral esencial* (en inglés, Essential mineral nutrient), también llamado elemento mineral esencial, [O'Dell & Sunde, \(1997\)](#) se refiere de manera separada a los términos *nutriente mineral*, o elemento mineral, cuando los elementos químicos que normalmente no se volatilizan cuando su matriz orgánica se calcina para eliminar el material carbonoso, donde considera al otro término *elemento esencial*, cuando todos los nutrientes son óptimos para apoyar el crecimiento, reproducción y salud adecuadas a lo largo del ciclo de vida. Por lo que en conjunto el término nutriente mineral esencial se refiere cuando un elemento químico es necesario para que un organismo realice las funciones vitales, completando su ciclo de vida ([O'Dell & Sunde, 1997](#)).

### 3.3.4 SUELOS

Según el [IUSS Working Group WRB \(2015\)](#), el suelo se describe como un cuerpo natural que posee tres dimensiones espaciales y una dimensión temporal. Sus principales características incluyen la presencia de *constituyentes minerales y orgánicos*, organizados en *estructuras* específicas y sujetos a una *evolución constante*.

### 3.3.5 LITO GEOQUÍMICA

Según [Alexandre, P. \(2021\)](#) es el estudio de la composición química completa de roca total, considerando los elementos principales y traza, así como los isotopos.

### 3.3.6 QUÍMICA DEL SUELO

La química del suelo se enfoca en analizar las propiedades químicas que lo caracterizan. Esta se ve influenciada por diversos factores, como la composición mineral, la presencia de materia orgánica y las condiciones ambientales que lo rodean ([Wikipedia, 2021](#)).

### 3.3.7 QUINUA

De acuerdo con la [FAO \(2011\)](#), la quinua es un grano que se caracteriza por presentar propiedades intrínsecas como su variabilidad genética, capacidad para adaptarse a diferentes condiciones de suelo y clima, alto valor nutritivo, diversidad en formas de uso tradicional y un bajo costo de producción. Por esta razón, la quinua se identifica como un grano perteneciente a la especie *Chenopodium quinoa* de la familia Chenopodiaceae ([Norma Técnica Peruana \[NTP\], 2009](#)).



## CAPÍTULO 4. GEOMORFOLOGÍA Y GEOLOGÍA DEL ÁREA DE CABANA

### 4.1 PREÁMBULO

Este capítulo se centrará en la geomorfología y la geología del área de Cabana, en relación a la formación de suelos, que servirá como información base.

El *objetivo* de este capítulo es identificar las características litológicas del material parental que influyen en la formación de suelos utilizados para el cultivo de quinua, así como las geoformas presentes en el área de Cabana, Puno.

En la sección de geomorfología se observará la distribución espacial que caracterizan al espacio geográfico actual, así como su influencia en la formación de suelos a través de las geoformas. En la sección de geología, se identificará la influencia litológica de las diferentes unidades litoestratigráficas y/o litodémicas en la formación de material parental o sedimentos, y como estos contribuyen a su vez en la formación de suelos *insitu* y/o transportado. Adicionalmente, presentaremos el aspecto geográfico, que consiste en dar a conocer el aspecto físico actual del área de estudio. Toda esta información se utilizará como base para el desarrollo de esta tesis.

### 4.2 MARCO GEOGRÁFICO

El área de Cabana se ubica espacialmente dentro de la zona del Altiplano Peruano, particularmente en la región de Puno, que se encuentra a una altitud de alrededor de 3810 ms.n.m.

#### 4.2.1 CLIMA

El clima del área en estudio es principalmente semiseco con otoño e invierno secos/frios, mientras que, en menor área, el clima es lluvioso con otoño e invierno secos/frío (SENAMHI, 2020). Las precipitaciones medias anuales entre los años 1981-2016, en general para la cuenca hidrográfica del Titicaca del Altiplano Peruano varía de 526.95 a 840.30 mm concentradas con periodos húmedos en los meses de setiembre a abril y periodos secos en los meses de mayo a agosto (Mamani E. L., 2019).

En lo específico para el área de trabajo se toma como referencia los datos del distrito de Cabana (Gobierno Regional de Puno y EUROECOTRADE, 2017) que muestran una

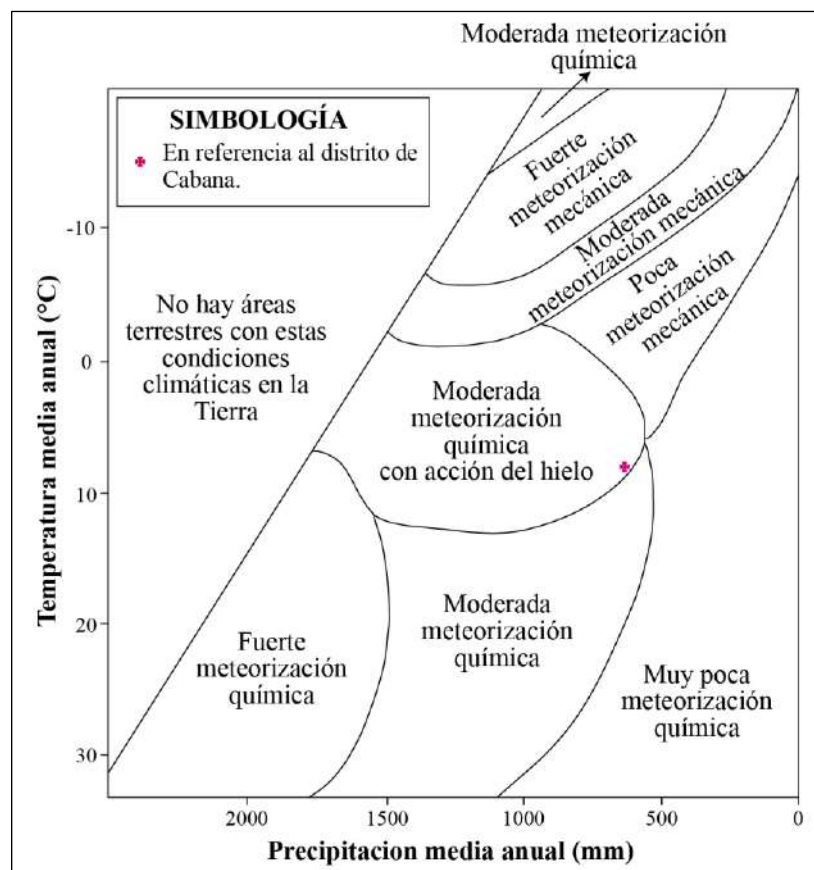
precipitación media anual es de 655 mm y varía de 629 a 755 mm, y la temperatura media anual varía de 5 a 10 °C. Finalmente, pertenece a la región andina con ecosistemas de pajonal de puna seca y bosque relicto meso andino, así como zonas agrícolas (MINAM, 2019).

#### 4.2.2 INTENSIDAD DE LA METEORIZACIÓN

El control de meteorización se da por el clima. Según el diagrama de Peltier muestra cómo la meteorización química y mecánica se relaciona con precipitación y la temperatura. Según al diagrama (Figura 4.1), cabría esperar efectos de **moderada meteorización química con acción del hielo** en las superficies minerales y de las rocas.

**Figura 4.1**

*Variación de la meteorización con el clima, según el diagrama de Peltier.*



*Nota.* El distrito de Cabana registra una temperatura media anual que oscila entre 5 a 10 °C, así como una precipitación media anual de 629 a 755 mm (Gobierno Regional de Puno y EUROECOTRADE, 2017), por lo que se esperaría una moderada meteorización química con acción del hielo. Adaptado de Marquez (2013).

#### 4.2.3 VEGETACIÓN

El lago Titicaca tiene un impacto significativo en la fluctuación de la humedad y la temperatura de la región del Altiplano Peruano.

La flora se caracteriza por ser esteparia, por tener plantas con hojas de superficie reducida que evitan la pérdida excesiva de agua.

En el ámbito de la agricultura, se cultivan productos tales como la quinua, papa, cebada, avena, entre otros.

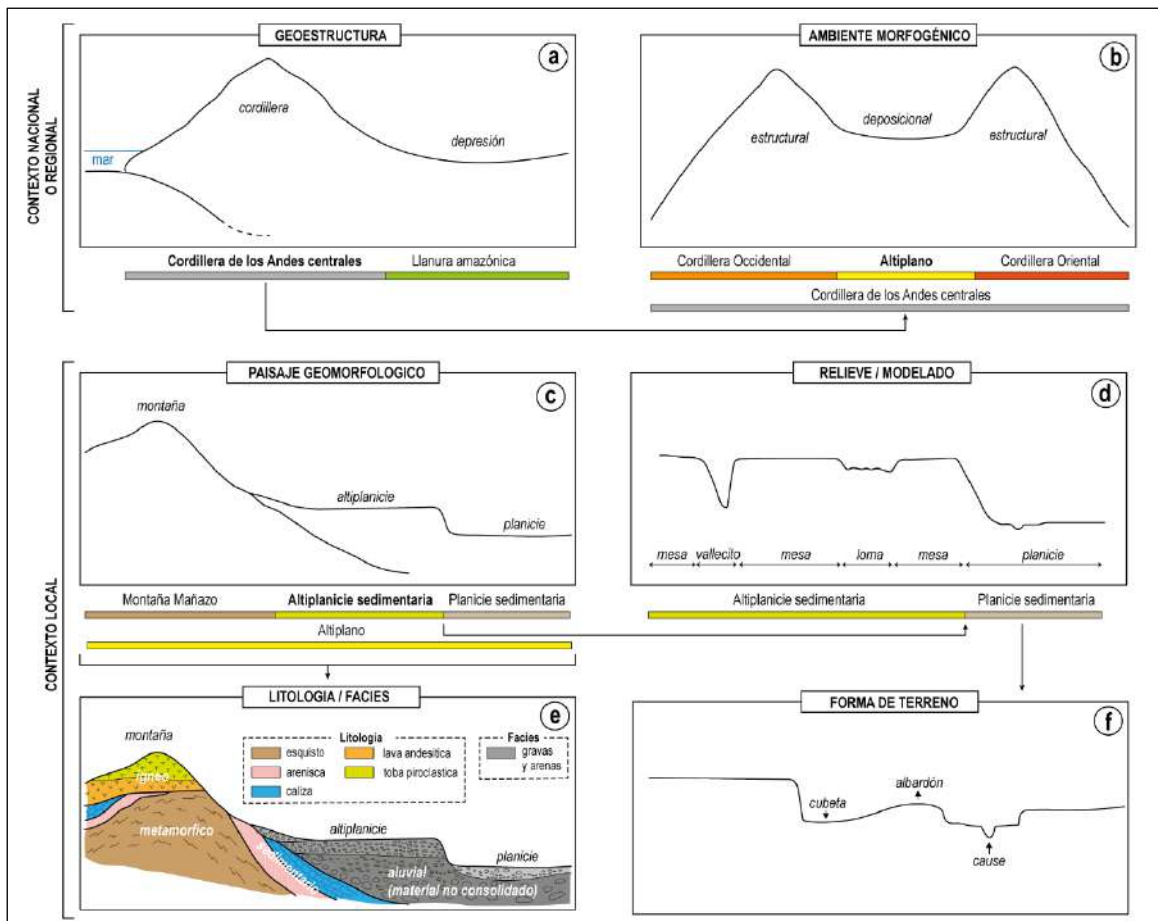
### 4.3 MARCO GEOMORFOLÓGICO

La geomorfología es uno de los factores con mayor contribución en la formación de sedimentos y/o suelos a través de las geoformas.

A continuación, se observará el área de estudio, además de describir el aspecto externo, en el cual se ilustrará el efecto de la escala de percepción (Figura 4.2), de lo general a lo detallado. Para lo cual la geomorfología, se elaboró con la metodología y terminología propuesta por Zinck (2012), ya que relaciona las geoformas con los suelos.

#### Figura 4.2

Escala de percepción de geoformas, de lo general a lo detallado, para el área de estudio. (a y b) geoforma nacional y regional, y (c, d, e, f) geoformas locales



Fuente: Adaptado de Zinck (2012)

Desde la perspectiva del contexto nacional o regional, se observan las geoformas de Geoestructura y Ambiente morfogénico en las Figuras 4.2.a y 4.2.b, respectivamente. En cuanto al contexto local, tenemos al Paisaje geomorfológico y Litología/facies. Cabe mencionar que solo se realizará hasta el nivel de Paisaje geomorfológico, y parte conjunta de Litología/facies. Este último se tratará como parte del siguiente acápite denominado “Marco geológico”. A continuación, describiremos cada geoforma con respecto al área de estudio, comenzando con la Geoestructura y terminando con el Paisaje geomorfológico.

#### 4.3.1 GEO ESTRUCTURA

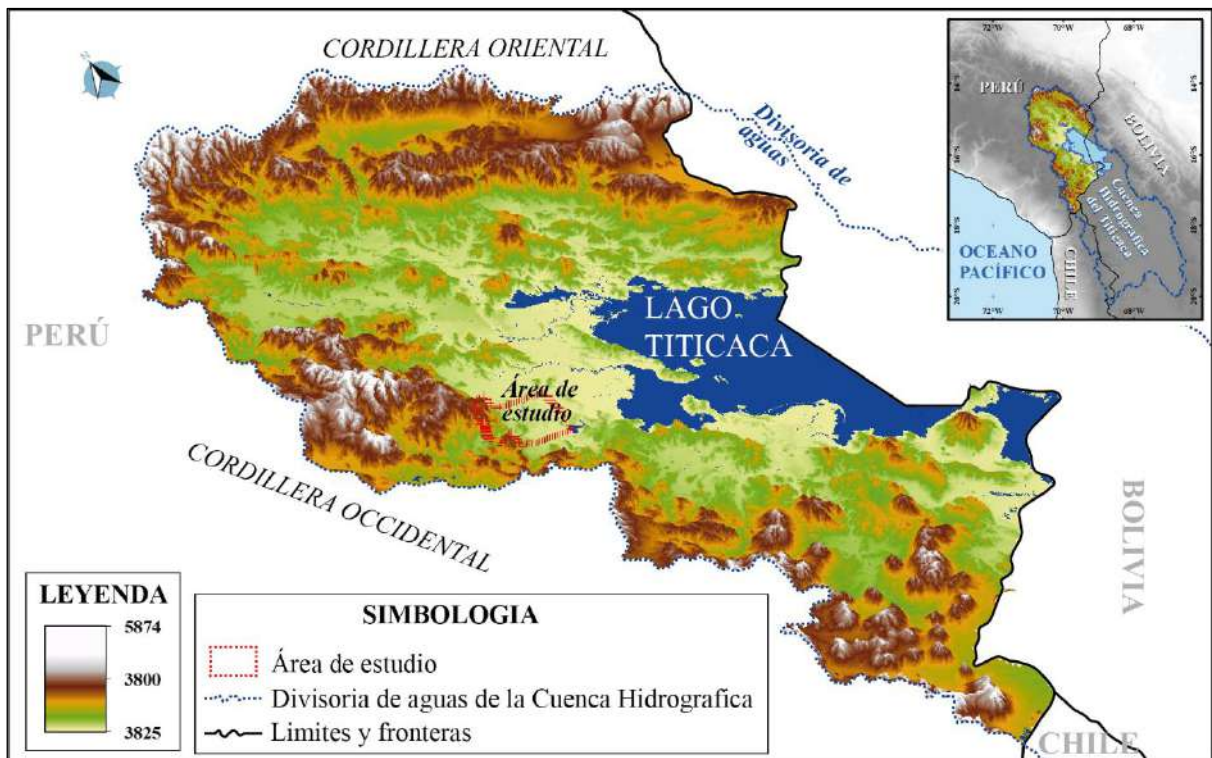
En referencia al área de estudio, está se encuentra dentro de una macro-unidad de relieve, caracterizada por una cadena montañosa de rumbo andino con orientación NO – SE (ver Figura 4.2.a). Esta unidad corresponde la Cordillera de los Andes Centrales, localizada en el sur del Perú. El origen de esta cordillera se relaciona con el engrosamiento y elevación de la corteza continental debido a la subducción de la placa tectónica oceánica, conocida como placa de Nazca, que se desplaza por debajo del límite occidental del continente sudamericano (Seyfried et al., 1998). Además, los procesos tectónicos generan diferentes geoformas debido a una mayor convergencia entre las latitudes 0.5°S-16°S (Martined, 2010).

#### 4.3.2 AMBIENTE MORFOGÉNICO

El ambiente morfogénico tiene un contexto regional (ver Figura 4.2.b), en el cual observamos que el área de estudio se encuentra ubicada en el *Altiplano* sur del Perú, dentro de un ambiente predominantemente *deposicional*. Este se caracteriza por ser una cuenca lacustre asociada al Lago Titicaca, con una depresión intra-montañosa longitudinal, situada entre los orógenos de ambos lados: la Cordillera Occidental y la Cordillera Oriental (ver Figura 4.3). Ambas cordilleras presentan un ambiente *estructural* y, en parte, *erosional*.

**Figura 4.3**

Gradiente altitudinal de la Cuenca Hidrográfica del Titicaca Peruana. El área de estudio está ubicado noroeste del Lago Titicaca (indicado con líneas entrecortadas de color rojo)



Fuente: Creada con datos del [IGN \(2024\)](#).

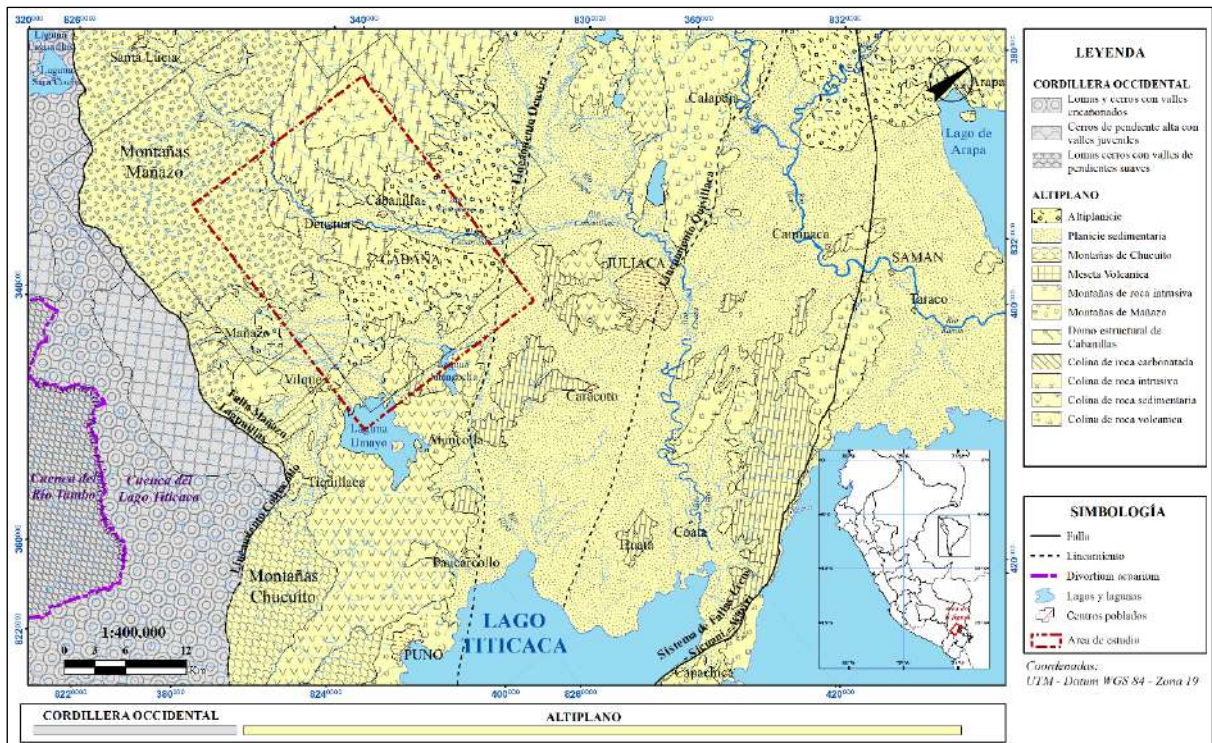
- Altiplano:** Presenta geformas de origen *estructural*, influenciadas geológicamente por la tectónica. Además, existe una influencia litológica en la generación del material parental que da origen a los sedimentos; estos, a su vez, contribuyen a la formación de suelos en un ambiente deposicional en ambos márgenes del Altiplano (Cordillera Occidental y Cordillera Oriental). El Altiplano está compuesto por *planicies*, *altiplanicies*, *lomas* y *cerros aislados*, que se encuentran entre los 3800 y 4200 ms.n.m.. En esta geforma, también se forman ríos en meandros, lagunas, bofedales y pequeños salares.

### 4.3.3 PAISAJE GEOMORFOLÓGICO

El área de estudio, para el paisaje geomorfológico (ver Figuras 4.2.c, 4.4 y 4.5), se caracteriza principalmente por presentar altiplanicies, además de planicies, mesetas, montañas y colinas, entre otros elementos que se encuentran en los alrededores.

#### Figura 4.4

Mapa de las unidades de Paisaje Geomorfológico al noreste del Lago Titicaca. La línea de color rojo indica el área de estudio



Fuente: Adaptado y modificado de Rodríguez, R. et al (2020).

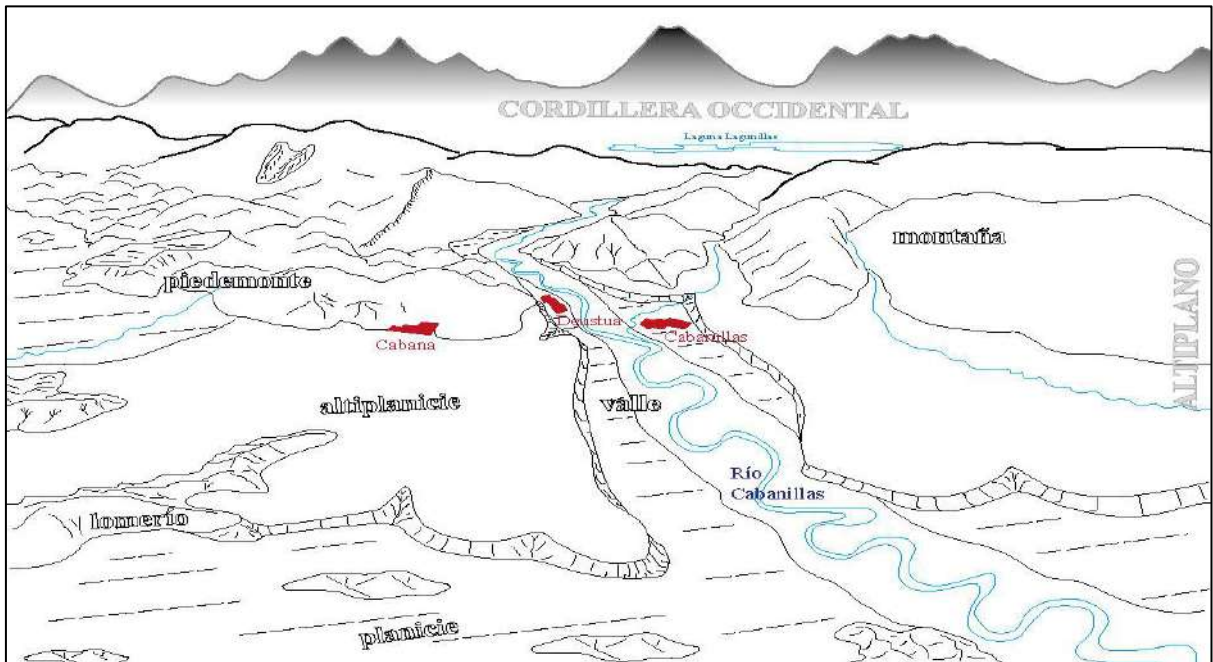
A continuación, se describen los paisajes geomorfológicos correspondientes al área de estudio (ver Figura 4.5):

- **Altiplanicie:** Este paisaje exhibe una topografía de cumbre plana y una posición elevada en comparación con terrenos más bajos (ver Figura 4.6). Se distingue por la presencia de escarpes en sus márgenes, que podría ser a causa de la incisión fluvial. Estos están principalmente caracterizados por sedimentos aluviales-fluviales antiguos, que son aportados por las montañas, desde la cordillera Occidental (Figura 4.5).

- **Planicie:** Es un terreno extenso, plano de posición baja, con poca energía. Se caracteriza por presentar ríos en meandros, lagos estancados. Estas corrientes confluyen al Lago Titicaca. Además, son depósitos de sedimentos que rellenan la cuenca del Lago Titicaca (ver Figura 4.5).

**Figura 4.5**

Esquema del paisaje geomorfológico del área de Cabana, con vista hacia el oeste. Presenta diferentes tipos tales como: altiplanicie, planicie, lomerío, valle, piedemonte y montaña.



**Figura 4.6**

Vista panorámica de las zonas de cultivo de quinua, de las altiplanicies, con vista hacia las montañas de Mañazo.





- **Piedemonte:** Estas unidades están presentes al pie de las montañas de Mañazo y Chucuito, y están constituidas por lomas y colinas.
- **Lomeríos:** Porciones de terreno que destacan por la presencia de colinas y lomas que sobresalen en una planicie y altiplanicie, características del Altiplano (ver [Figura 4.5](#)).
- **Valle:** Es una geoforma que se caracteriza por presentar llanuras de inundación y terrazas. Se encuentra a lo largo del río Cabanillas, que parte de la Laguna Lagunillas, con incisión de montañas, piedemonte, y altiplanicies. (ver [Figura 4.5](#)).
- **Montañas:** Dentro de las montañas se tiene a la Montaña de Mañazo y Chucuito, denominados por [Rodríguez, et al., \(2020\)](#) (ver [Figuras 4.4 y 4.6](#)). Además, que hacia el fondo a escala regional se puede observar montañas de la Cordillera Occidental (ver [Figura 4.5](#)).

## 4.4 MARCO GEOLÓGICO

La geología, a través del material parental, es uno de los factores fundamentales para la formación de suelos. El material parental se refiere a la roca o sedimento original que se descompone y luego se transforma en suelo *in situ* y/o transportado. La composición del material parental puede tener un impacto significativo en las propiedades del suelo resultante, influenciando en el contenido de elementos minerales esenciales. Es importante mencionar que la roca se meteoriza física, química y biológicamente para la formación de suelos.

Para el área de estudio, se observarán tanto a nivel regional como local. Desde el punto de vista regional, se describirán las unidades tectono-estratigráficas, además de observar de manera somera el sistema de fallas que controlan las cuencas y arcos magmáticos. Desde el punto de vista local, se dará un realce al ítem de Litología/ Facies mencionado en el anterior capítulo de las geoformas, por ser parte del material parental y/o sedimentos. Describiendo las litologías que predominan las unidades geológicas. Como base de información geológica base, se utilizarán boletines, artículos científicos, mapas geológicos, y portal GEOCATMIN, entre otros.

### 4.4.1 GEOLOGÍA REGIONAL

Esta sección está relacionada con el ambiente morfogénico desde el punto de vista de las geoformas, descrito en la sección de geomorfología. Por lo tanto, nos enfocaremos en geología desde un contexto regional (ver [Figura 4.7](#)).

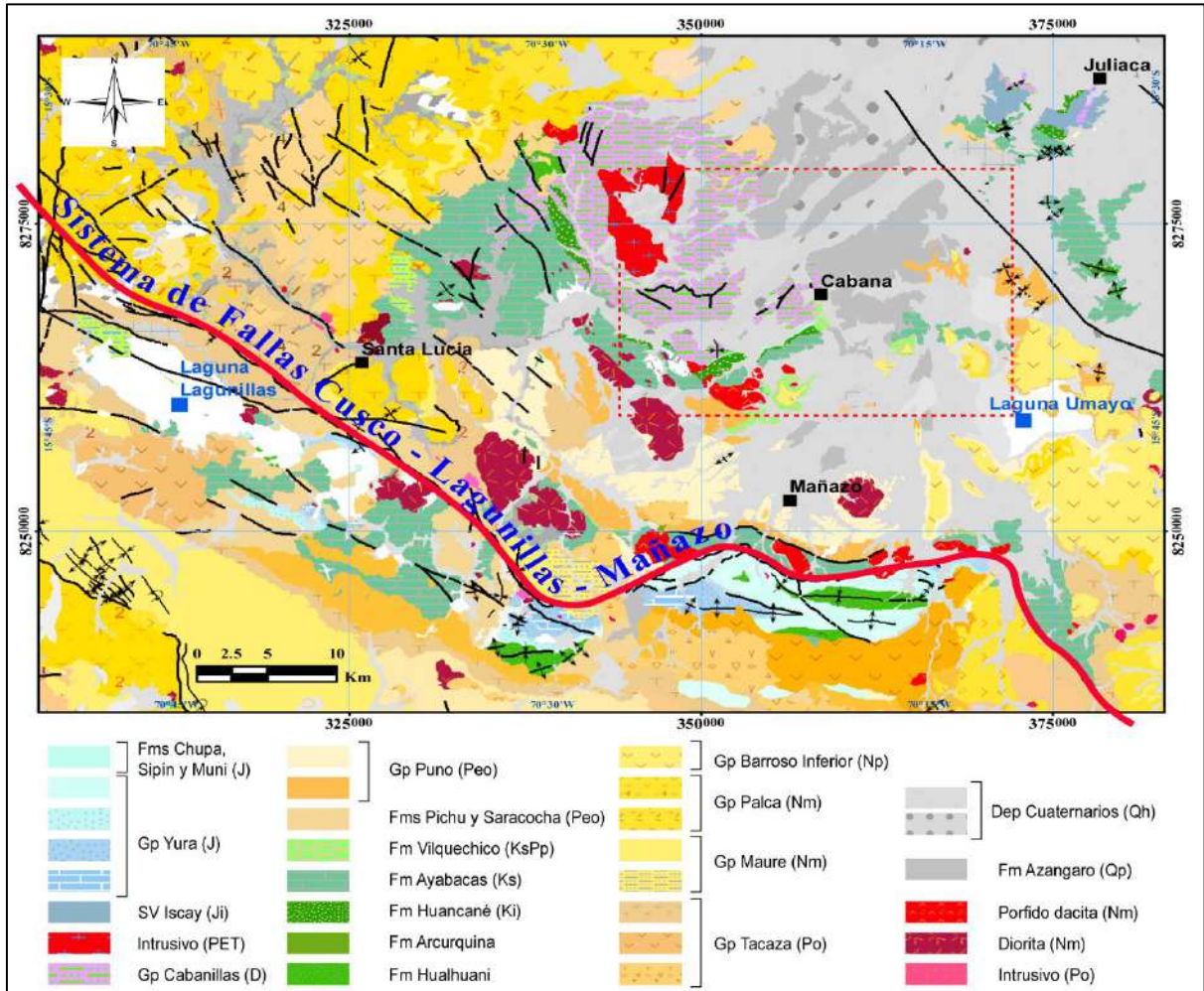
Comenzaremos con el aspecto estructural, que divide morfoestructuralmente la Cordillera Occidental y el Altiplano, a través del sistema de fallas Cusco – Lagunillas – Mañazo (ver [Figura 4.4](#)). Este sistema de fallas controla la sedimentación de cuencas en diferentes épocas geológicas, que se describirán a continuación desde las unidades más antiguas hasta las más recientes, enfocado en el Altiplano. Esto repercute en el conocimiento de la composición **litológica** de los suelos para el área de estudio.

- **Paleozoico**

El análisis del área de estudio comienza en el Paleozoico, representado por el Grupo Cabanillas, que aflora al noroeste de la localidad de Cabana (ver [Figura 4.8](#)). Este afloramiento, conocido como el Domo estructural de Cabanillas, está constituido por rocas metamórficas de bajo grado de metamorfismo y forma parte del umbral Cusco–Puno. Este alto estructural tiene una influencia relativa en el control de la sedimentación en diversas cuencas sedimentarias.

Figura 4.7

Mapa geológico a escala regional para el área de estudio.



*Nota.* Área de Cabana, enmarcado con un cuadro con líneas entrecortadas de color rojo, y el Sistema de Fallas Cusco – Lagunillas – Mañazo representada con una línea continua roja.

Fuente: Tomado del portal GEOCATMIN (INGEMMET, 2023).

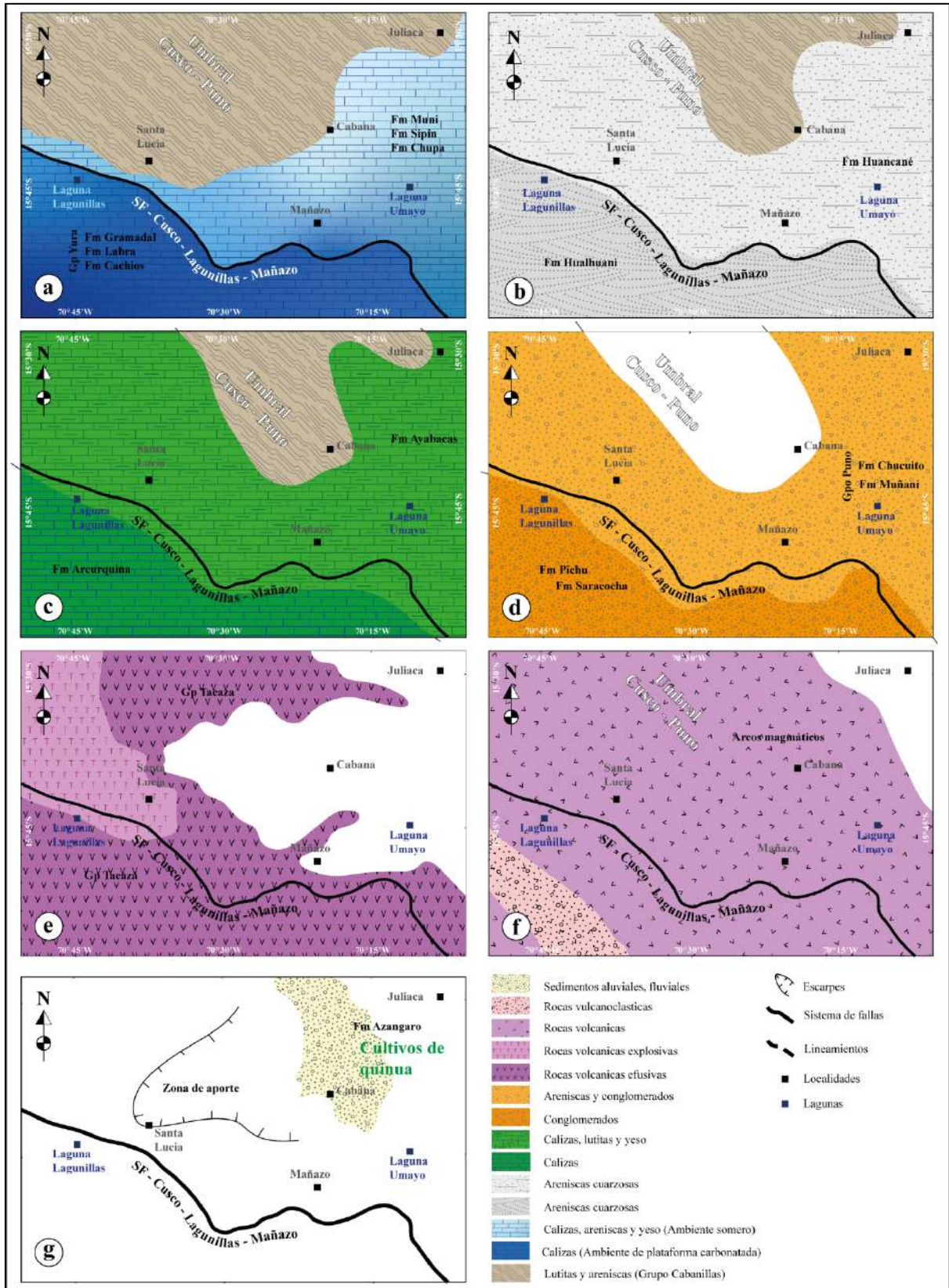
#### • Jurásico

En el Jurásico (ver Figura 4.8a), el periodo está asociado a un régimen extensional, en el cual el sistema de fallas Cusco–Lagunillas–Mañazo controla la sedimentación y está vinculado a eventos transgresivos (Carlotto et al., 2023; Chávez, 2019). Este régimen dio lugar a la sedimentación de secuencias carbonatadas y siliciclásticas, denominadas como la Cuenca de Arequipa.

En el Altiplano, las secuencias presentan un menor espesor en comparación con las unidades litoestratigráficas de la Cordillera Occidental (Grupo Yura). Estas secuencias están representadas por las formaciones Chupa, Sipín y Muni, caracterizadas por su contenido de evaporitas.

**Figura 4.8**

Esquemas paleogeográficos correspondientes al área de estudio, que van desde el borde este de la Cordillera Occidental hasta el oeste del Altiplano. a) Jurásico, b) Cretácico inferior, c) Cretácico superior, d) Cretácico superior – Paleógeno ( Eoceno), e) Paleógeno (Oligoceno), f) Mioceno – Plioceno y g) Pleistoceno.



- **Cretácico**

Para el Cretácico Inferior (ver [Figura 4.8b](#)), en el Altiplano se registró la sedimentación de depósitos siliciclásticos en ambientes deltaicos a playeros con acción eólica y espesores delgados, representados por la Formación Huancané. En contraste, en la Cordillera Occidental, el Cretácico Inferior está caracterizado por areniscas cuarzosas intercaladas con delgados estratos de lutitas negras, que constituyen la Formación Hualhuani.

Para el Cretácico superior (ver [Figura 4.8c](#)), se produjeron períodos de transgresión marina, que dieron lugar a la formación de depósitos representados por las Formaciones Arcurquina y Ayabacas. En el Altiplano, estos depósitos están compuestos por limolitas calcáreas rojizas, intercaladas con estratos delgados de calizas y evaporitas, que presentan un menor espesor en comparación con los afloramientos de la Cordillera Occidental, los cuales están constituidos principalmente por estratos gruesos de calizas.

- **Cretácico Superior – Paleógeno (Eoceno)**

En el Cretácico Superior–Paleoceno, se evidencia el inicio de una inversión tectónica incipiente, marcada por la transición de un ambiente marino a uno continental. Durante este período, se produjo la sedimentación de depósitos de trasarco en un sistema de cuenca de antepaís, representados por las Formaciones Vilquechico y Ausangate (ver [Figura 4.8d](#)).

En el Eoceno, la tectónica compresiva se intensificó, caracterizándose por múltiples eventos de erosión. Este período estuvo asociado con la formación de los Andes, acompañada de procesos como el diapirismo y la aparición de discordancias progresivas. Las unidades representativas de este período incluyen el Grupo Puno, específicamente las Formaciones Saracocha y Pichu.

- **Paleógeno (Oligoceno)**

En el Oligoceno (ver [Figura 4.8e](#)), se registra el inicio de un magmatismo conocido como el Arco magmático de Tacaza ([Mamani et al., 2013](#)). Este periodo se caracteriza por un vulcanismo predominantemente efusivo, con composiciones que varían de alcalinas a calcoalcalinas, representadas por el Grupo Tacaza.

- **Mioceno - Plioceno**

Durante el Mioceno (ver [Figura 4.8f](#)), se caracteriza la sedimentación en cuencas de intraarco, marcadas por depósitos vulcanoclásticos. De manera simultánea, se desarrolló el Arco magmático de Huaylillas, caracterizado por un vulcanismo explosivo, con unidades representativas como el Grupo Palca.

En el Plioceno (ver [Figura 4.8f](#)), se establece el Arco magmático del Barroso Inferior, representado por el Grupo Barroso.

- **Pleistoceno**

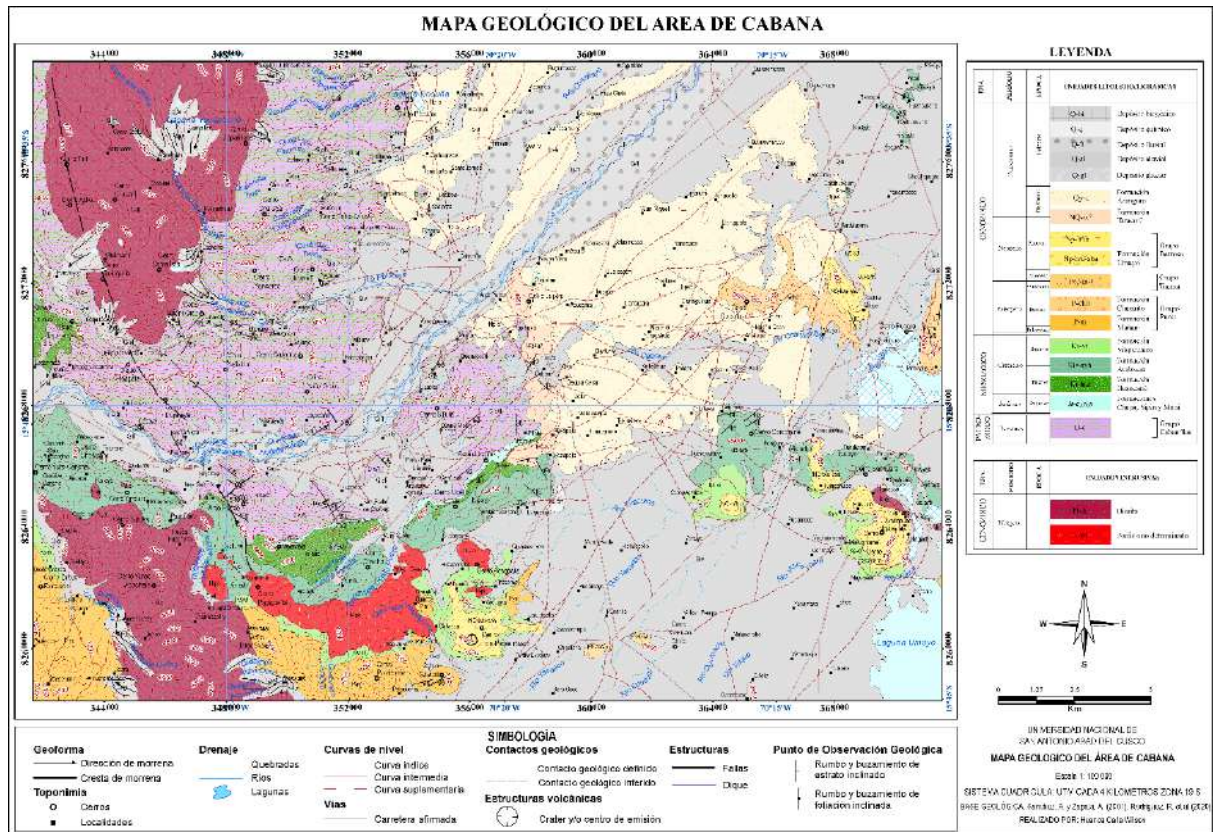
En el Pleistoceno (ver [Figura 4.8g](#)), se destaca la Formación Azángaro, compuesta por depósitos no consolidados de intra-montaña en el Altiplano. Estos depósitos se formaron como resultado de la erosión de unidades litoestratigráficas del Cenozoico, particularmente de las unidades volcánicas asociadas a los arcos magmáticos, que van desde Oligoceno al Plioceno (Arcos magmáticos del Cenozoico).

En términos generales, el marco geológico regional descrito no solo proporciona una visión detallada de la evolución tectónica y sedimentaria del área, sino que también establece la base para comprender cómo estos procesos influyen en la formación y composición de los suelos actuales.

### 4.4.2 GEOLOGÍA LOCAL

Esta sección desde el punto de vista de las geoformas está relacionada con Litología / Facies. Por lo que esta sección nos enfocaremos en una escala local, es decir en la geología se describirá la estratigrafía del área de influencia litológica que está conformada por unidades litoestratigráficas (Figura 4.9).

**Figura 4.9**  
 Mapa geológico a escala local correspondiente al área de Cabana.



Fuente: Modificado de Rodríguez *et al.* (2020).

#### 4.1.1.1 Unidades litoestratigráficas del área de Cabana

Las unidades litoestratigráficas forman parte del material parental que influye en los suelos. Se desarrollará por periodos de tiempo, caracterizando su litología para rocas y facies para sedimentos. Culminando con un cuadro resumen al finalizar la descripción.

- **Paleozoico**

Durante el Paleozoico, el Grupo Cabanillas fue definido inicialmente por [Newell \(1949\)](#) en el Cerro Surapata. Posteriormente, [Laubacher \(1978\)](#) al suroeste de Cabanillas en Tayataya, levantó una columna estratigráfica, donde determinó la parte inferior que corresponde al Silúrico inferior (Llandoveniano) y la parte superior que alcanza el Devónico medio. [Valencia y Rosell \(2003\)](#), separaron en cuatro subunidades. [Rodríguez et. al. \(2020\)](#) diferencia seis miembros.

Para el área de estudio, el Grupo Cabanillas aflora principalmente en los flancos a lo largo del Río Cabanillas, y conforma parte del valle ([Figura 4.10](#)). Esta unidad litoestratigráfica está constituida principalmente por rocas metamórficas siliciclásticas de bajo grado de metamorfismo, compuesta en su mayoría por litologías de meta-cuarzoarenitas de color gris verdosos, intercaladas con niveles de meta-lutitas y meta-grauwacas de tonos grises.

#### Figura 4.10

*Valle fluvio-aluvial del río Cabanillas con vista hacia el oeste, donde las laderas de montañas con afloramientos del Grupo Cabanillas, y hacia el fondo estarían las unidades volcánicas del Cenozoico.*



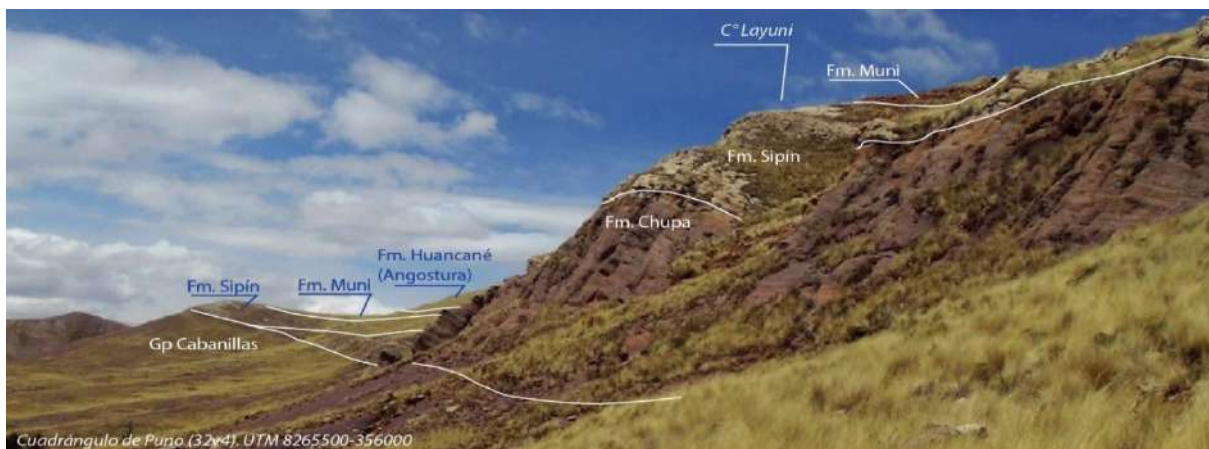


- **Jurásico**

Para el Mesozoico paso, en discordancia angular a las formaciones Chupa, Sipín y Muni, que son del Jurásico; el cual [Rodríguez et al., \(2020\)](#), en la hacienda huerta (Cerro Layune), recomienda juntarlas como un Grupo ([Figura 4.11](#)). En esta hacienda también menciona [Rodríguez et al., \(2020\)](#) que los contactos entre las formaciones Chupa, Sipín y Muni son progresivos. La Formación Chupa, inicialmente fue definida como un Miembro de la Formación Muni ([Klinck et al., 1986](#)), sin embargo, [Jaillard y Santander \(1992\)](#) lo sube a rango de formación. Esta formación está compuesta por conglomerados intercalados por areniscas arcósicas, los clastos son de areniscas rojas y algunos intrusivos. En contacto con la Formación Sipín que es transicional y concordante, y está compuesto mayormente por dolomías en estratos medianos con niveles evaporíticos. Y hacia el techo se tiene a la Formación Muni, con niveles detríticos de color rojizo, intercalados de areniscas calcáreas rojizas y conglomerados.

**Figura 4.11**

*Discordancia angular de las formaciones Chupa y Sipín (Mesozoico) sobreyaciendo al Grupo Cabanillas (Paleozoico), en la hacienda Huertas con vista hacia el este.*



Fuente: Tomado de [Rodríguez et al., \(2020\)](#).

- **Cretácico**

Continuando con el Cretácico inferior con la Formación Huancané, definida por [Newell \(1949\)](#), esta unidad subyace a la Formación Muni en contacto transicional. En la hacienda Huertas está compuesta por areniscas cuarzosas con laminación cruzada e intercalaciones de conglomerados con clastos de cuarcitas ([Rodríguez et al. 2020](#)). Luego pasando al Cretácico superior con la Formación Ayabacas, estudiada por primera vez, por [Cabrera y Petersen \(1936\)](#) como una secuencia de calizas y capas rojas.

**Figura 4.12**

Unidades del Cretácico (formaciones Huancané y Ayabacas) en una discordancia angular que se encuentra encima de las unidades del Paleozoico (Grupo Cabanillas).

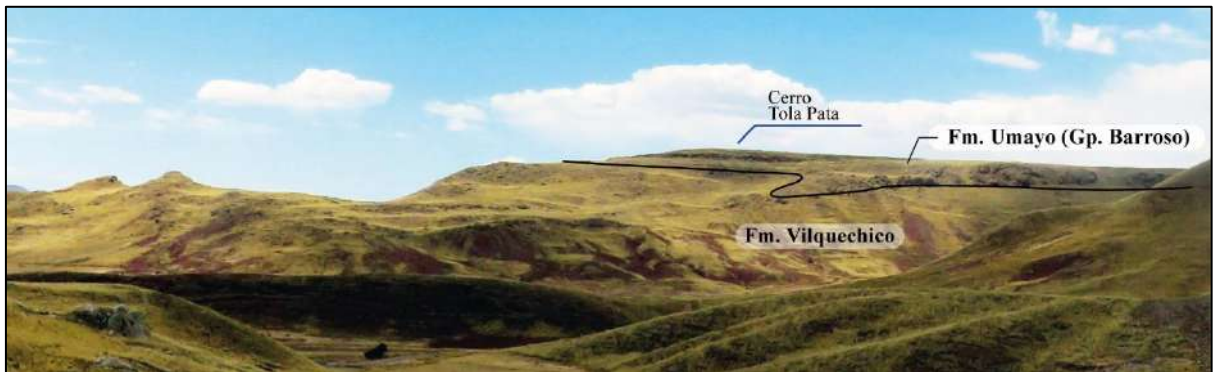


En el Cerro Arco Punco (ver [Figura 4.12](#)), la Formación Huancané sobreyace en discordancia angular al Grupo Cabanillas, y que la Formación Ayabacas sobreyacen a la Formación Huancané.

Según [Rodríguez et al., \(2020\)](#), para el área de estudio, la Formación Huancané constituido litológicamente por areniscas cuarzosas de colores blanquecinas, y la Formación Ayabacas constituida por calizas replegadas en una masa caótica de lutitas rojas y evaporitas.

**Figura 4.13**

Formación Vilquechico que subyace a la Formación Umayo.



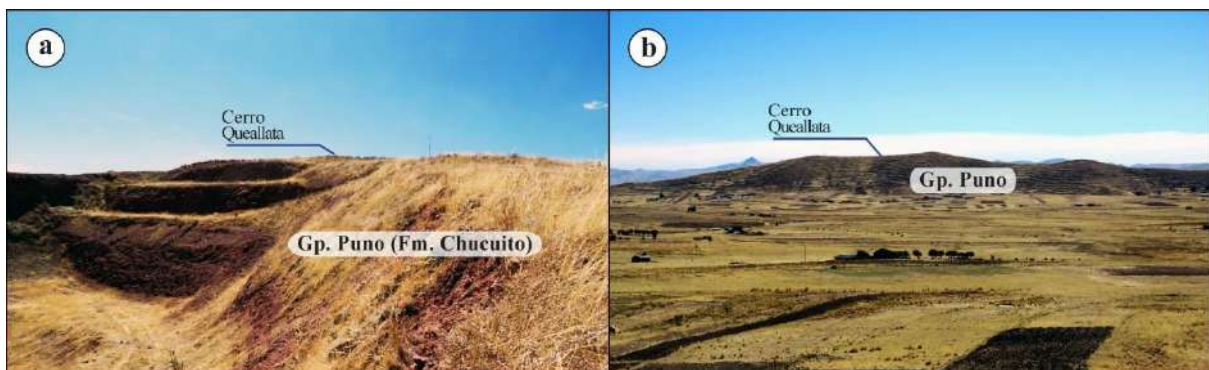
Y entre el Cretácico superior y el inicio del Paleoceno, la Formación Vilquechico ([Figura 4.13](#)), esta caracterizado por litologías de lutitas y limolitas calcáreas de colores rojizos, con niveles esporádicos de carbonatos. Que conforma parte del inicio de la formación de la cordillera de los andes, y forma parte de los depósitos de tipo antepaís.

- **Paleoceno – Eoceno**

Litológicamente esta caracterizado por sedimentos de cuenca de tipo antepaís, es decir por rocas sedimentarias de color rojiza, areniscas, conglomerados, y limolitas. La unidad litoestratigráfica que caracteriza es el Grupo Puno compuesta por rocas sedimentarias de color rojizo, grauwacas, areniscas feldespáticas, conglomerados. El Grupo Puno [Rodríguez et al. \(2020\)](#) lo divide en dos formaciones, las formaciones Muñani y Chucuito. La Formación Muñani compuesta principalmente de areniscas rojas, y la Formación Chucuito ([Figura 4.14](#)), está constituida por conglomerados y areniscas rojizas. Cabe mencionar que la Formación Auzangate sobreyace a la Formación Vilquechico, y subyace a la base del Grupo Puno, caracterizada por su rojo intenso y está constituido por lutitas, limolitas y areniscas esporádicas.

**Figura 4.14**

(a) y (b) Vistas panorámicas del Grupo Puno en el Cerro Queallata, específicamente de la Formación Chucuito, constituido por conglomerados polimícticos de matriz limosa de color rojiza.



- **Oligoceno - Plioceno**

Para estas épocas que van desde el Oligoceno al Plioceno están caracterizadas por presentar arcos magmáticos que inician por el Arco Tacaza (30-24 Ma), Huaylillas (24-10 Ma), y Barroso (10-1 Ma), que en conjunto se le denominará como arcos volcánicos del Cenozoico, con fines didácticos.

Para el área de estudio en el Mioceno se tiene al Grupo Barroso, descrita por [Portugal \(1974\)](#) inicialmente como “Basaltos Umayo” en la laguna Umayo. Posteriormente definida por [Klinck et al. \(1993\)](#), como Formación Umayo.

La Formación Umayo aflora en el cerro Tola Pata Cabana (ver Figuras 4.13) del distrito de, que esta caracterizado por presentar flujos traquiandesíticos de color gris violáceo oscuro ligeramente vesicular de grano muy fino, sobreyaciendo en discordancia angular a la Formación Vilquechico.

- **Cuaternario**

La Formación Azángaro, definida por Newell (1949) como “depósitos lacustres del río Azángaro”, fue elevada al rango de formación por Palacios *et al.* (1993) y atribuye una edad correspondiente al Plioceno- Pleistoceno. Esta formación aflora como parte de la geoforma de Altiplanicies, en ambas márgenes del río Cabanillas. Está compuesta por gravas y arenas no consolidadas, con presencia de laminaciones oblicuas y horizontales. Según Rodríguez *et al.* (2020), el ambiente sedimentario de esta formación corresponde a un ambiente continental, que varía entre lacustre cerca al lago Titicaca, fluviales en los valles de Cabanillas y abanicos aluviales.

Finalmente, en los depósitos cuaternarios, de la cuenca del Titicaca, se identificaron facies aluviales, coluviales, fluviales, biogénicas, y químicas.

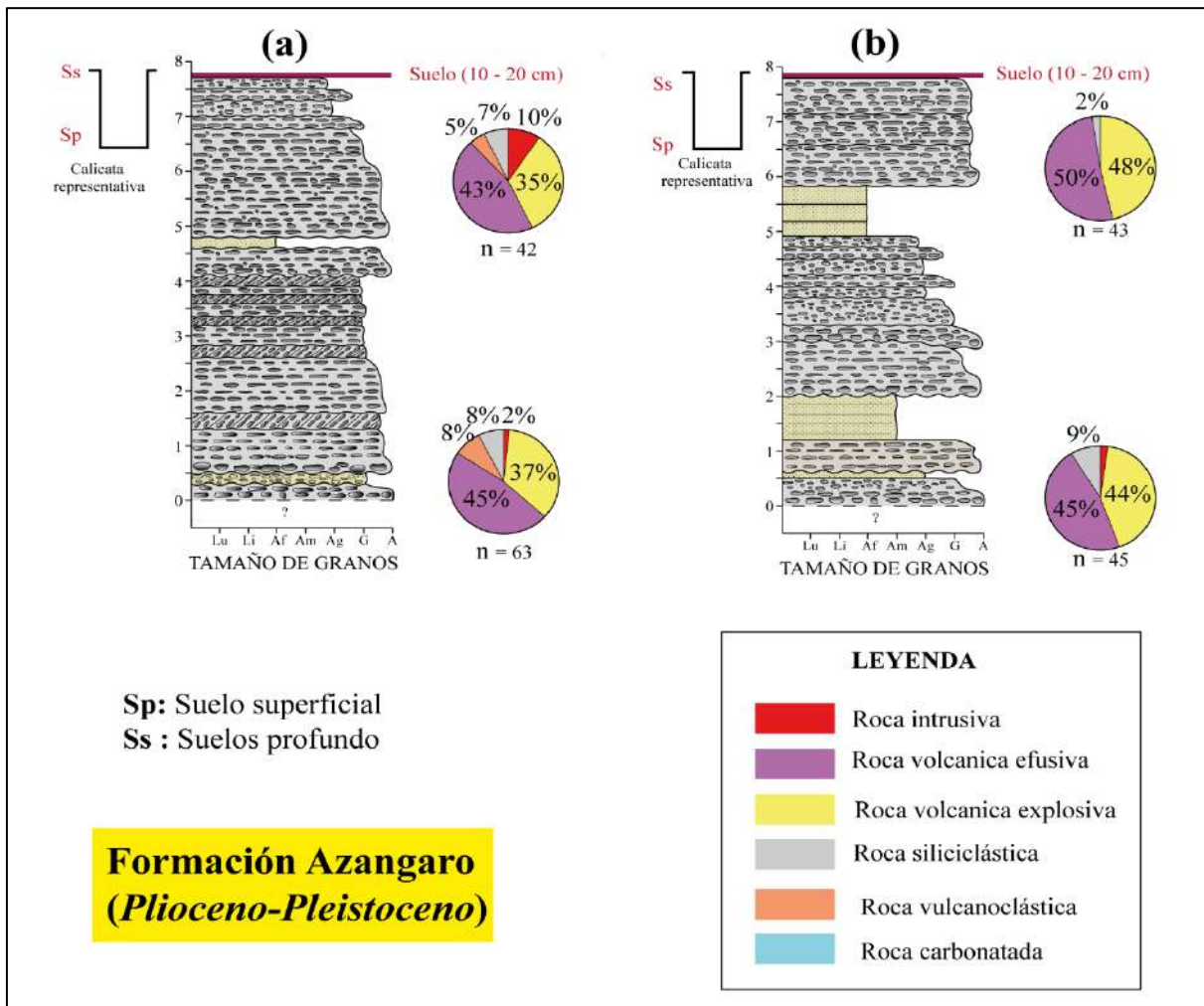
#### 4.1.1.2 Sedimentos no consolidados para el Cultivo quinua

Sabiendo que en la geoforma de Altiplanicie (ver Figuras 4.5 y 4.6) es donde se cultiva principalmente la planta de quinua, compuesta por depósitos no consolidados de facies fluvio-aluviales, integrados por gravas, arenas y esporádicos limos, los cuales se denominan litoestratigráficamente como la Formación Azángaro. Para identificar las características litológicas del material de las cuales fueron derivados, para formar estos sedimentos, se realizó 2 pequeñas columnas estratigráficas (ver Figura 4.15) con el fin de describir las características de los clastos y, de esta manera, identificar la procedencia aparente del material parental de estos sedimentos.

Las dos columnas estratigráficas (ver Figuras 4.15 y 4.16) fueron realizadas en los bordes extremos de las altiplanicies, con las siguientes coordenadas UTM (zona 19S): (a) Figuras 4.15a y 4.16a: base E 365989; N 8 278115 y techo E 365984; N 8 278085; y (b) Figuras 4.15b y 4.16b: base E 357900; N 8 272539 y techo E 357 892; N 8 272538

**Figura 4.15**

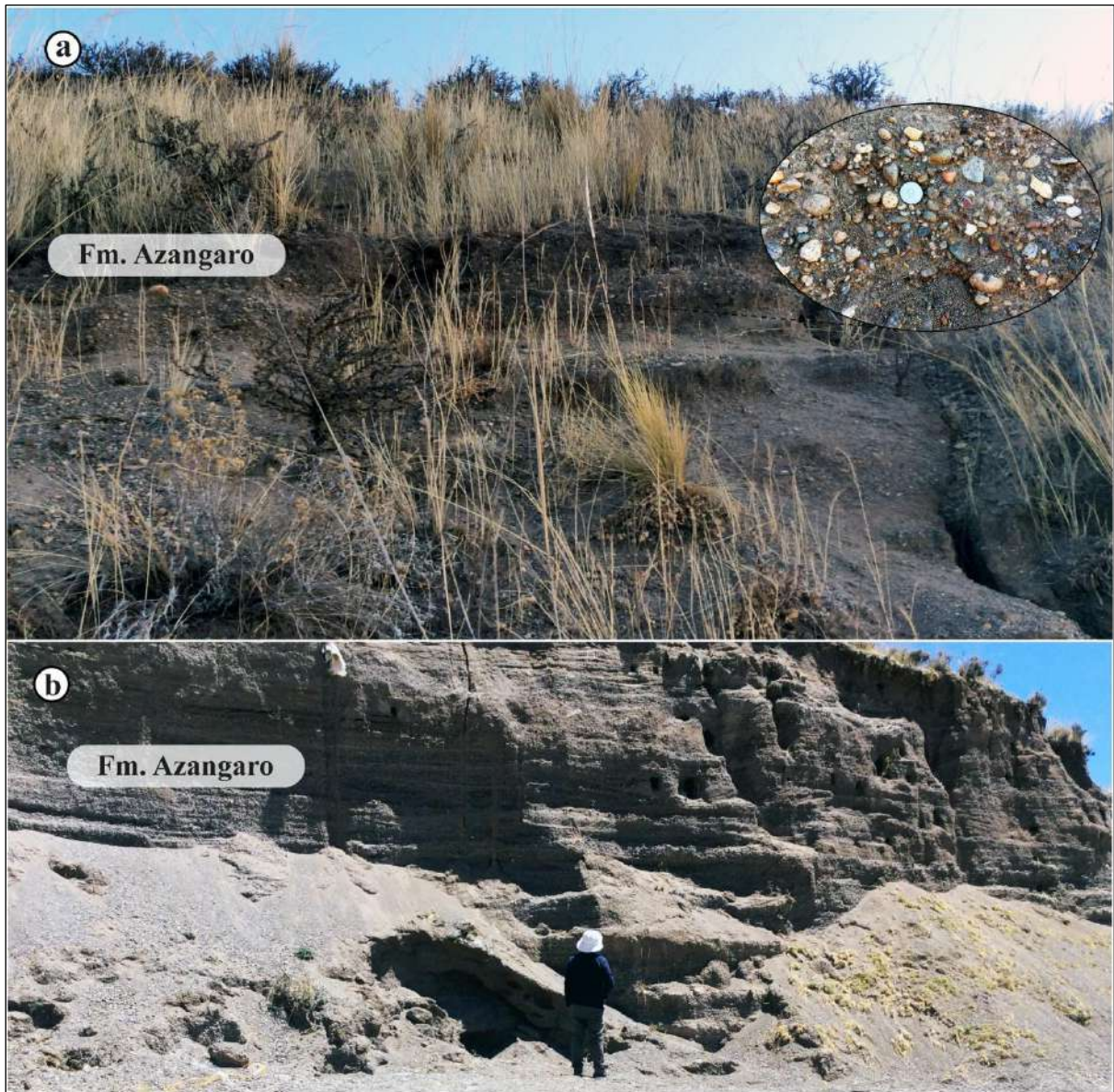
(a) y (b) Columnas estratigráficas de la Formación Azángaro, y la representación de suelos utilizados para el cultivo de quinua.



En estas columnas se observaron capas de gravas y arenas de color gris, y en menor cantidad, limos y arenas de grano fino de color beige. Las gravas presentan formas sub redondeadas a sub angulosas, con tamaños de 3.0 cm en promedio (0.5 a 5.0 cm), y estos depósitos están compuestos principalmente por clastos de rocas volcánicas efusivas (**45.75 % en promedio**) y explosivas (**41.00 % en promedio**), según el conteo de clastos observados en diagramas de tortas (ver Figura 4.15). Los clastos de rocas volcánicas efusivas son principalmente de lavas andesíticas basálticas, lavas andesíticas, andesitas en general de color gris violáceo oscuro y esporádicos de color gris verdoso. Por otro lado, los clastos de rocas volcánicas explosivas consisten en tobas líticas, tobas de ceniza y en menor cantidad de riolita de colores grises blanquecinos. También se observó en menores proporción, rocas siliciclásticas (areniscas cuarzosas) de color gris verdoso, seguido de rocas vulcanoclásticas.

**Figura 4.16**

(a) y (b) Afloramiento de la Formación Azángaro, constituida por gravas y arenas principalmente.



La procedencia de facies de depósitos no consolidados corresponde principalmente a rocas volcánicas del Cenozoico, es decir, del arco volcánico del lado occidental. En menor medida, se observaron materiales provenientes de secuencias del Paleozoico, Jurásico y Cretácico, que han sido acareados por corrientes fluviales del Río Cabanillas. Estos depósitos han influido en la formación de suelos de 10 – 20 cm de espesor, aptos para el cultivo quinua.

#### 4.1.2 LITOLOGÍAS REPRESENTATIVAS DE ÁREA DE CABANA

En tanto, para la Litología / Facies, es decir se refiere a la roca como litología y a los sedimentos como Facies. A continuación, se muestra la [Tabla 4.1](#) que muestra resumen de litología/ facies, en la litología se encuentra unidades más representativas de cada unidad litoestratigráfica.

**Tabla 4.1**

*Tabla resumen de litología/facies representativas de cada unidad estratigráfica*

<b>Unidades litoestratigráficas</b>	<b>Litología</b>	<b>Facies</b>
Depósitos cuaternarios	-	Gravas, arenas y limos
Formación Azángaro	-	Gravas y arenas
Plutón Cabana	Granitoides	
Grupo Barroso	Lavas andesíticas	-
Grupo Tacaza	Lavas y tobas	
Grupo Puno	Areniscas y conglomerados	-
Formación Vilquechico	Limolitas, lutitas calcáreas	
Formación Ayabacas	Calizas, lutitas calcáreas y yesos	-
Formación Huancané	Areniscas cuarzosas	-
Formación Muni	Limolitas calcáreas	
Formación Sipín	Areniscas calcáreas y calizas	
Formación Chupa	Conglomerados y brechas	
Grupo Cabanillas	Meta-areniscas, meta-lutitas	

# CAPÍTULO 5. INFLUENCIA LITOLÓGICA EN LA QUÍMICA DE SUELOS MEDIANTE EL ANÁLISIS MULTIVARIANTE GEOQUÍMICO

## 5.1 PREÁMBULO

En este capítulo se presentan los resultados de los análisis químicos obtenidos a partir del muestreo de rocas y suelos en campo. Se discute la geoquímica total de roca y suelo, abarcando las diferentes litologías y facies presentes, tomando en cuenta la información base del capítulo geomorfología y geología. En particular, nos enfocaremos en el sistema roca-suelo, que proporciona información valiosa sobre su composición química. Cabe mencionar que los grupos de elementos químicos de rocas y suelos, se clasifican en: elementos mayores y elementos traza. Los elementos mayores son los principales constituyentes, con concentraciones superiores al 0.1 % en peso; los elementos traza, aquellos con concentraciones inferiores al 0.1 % en peso, son constituyentes presentes en traza de rocas, suelos y minerales, expresados en partes por millón (*part per part percent*, ppm).

El *objetivo* de este capítulo es determinar la influencia relativa de las rocas parentales en la composición química de los suelos utilizados para el cultivo de quinua, mediante el análisis químico multivariado del sistema roca-suelo. Para ello se utilizará los elementos mayores, incluyendo la pérdida de material volátil (LOI), y elementos traza, específicamente las tierras raras (REE) y los elementos inmóviles.

Comenzaremos con el análisis geoquímico multivariado de las rocas parentales, que se expondrá de manera comparativa para asociar las diferentes características litológicas a partir del cual se podrían formar los suelos. Continuando con la asociación a partir de la química de suelo total, se realizará el análisis de los horizontes superficiales y profundos, según las características de los materiales parentales que los compone.

Esta asociación inicial de muestras de roca y suelos, que tienen características químicas similares, se realizará mediante pruebas estadísticas multivariantes, utilizando la técnica exploratoria de Análisis de Componentes Principales (*Principal Component Analysis*, PCA), que reduce la dimensionalidad de los datos.



Posteriormente, con estos datos, se procederá a agrupar mediante la técnica de análisis de clústering jerárquico, utilizando el método de Ward, para obtener una asociación preliminar, que luego será validada.

Para la validación de las asociaciones de litologías/ facies y de suelos, se utilizará los elementos de tierras raras en rocas parentales y suelos, además de la información base estudiada en el capítulo anterior (Capítulo 4).

Finalmente, con la asociación validada de rocas y suelos, se determinará cuantitativamente la correlación, es decir la influencia de las rocas a los suelos.

## 5.2 ANÁLISIS QUÍMICO EXPLORATORIO DE ELEMENTOS PRINCIPALES EN ROCAS

El análisis químico exploratorio de las muestras de litologías y facies del área de Cabana, se analizará mediante pruebas estadísticas, con el objetivo de *identificar* y *caracterizar* de manera general y específica de las diferencias en la composición química de las distintas litologías / facies características presentes. Para este análisis se tomará en cuenta las características litoestratigráficas mencionadas en el capítulo anterior (Capítulo 4), lo cual permitirá una comprensión más *detallada* de la *distribución* geoquímica.

**Tabla 5.1**

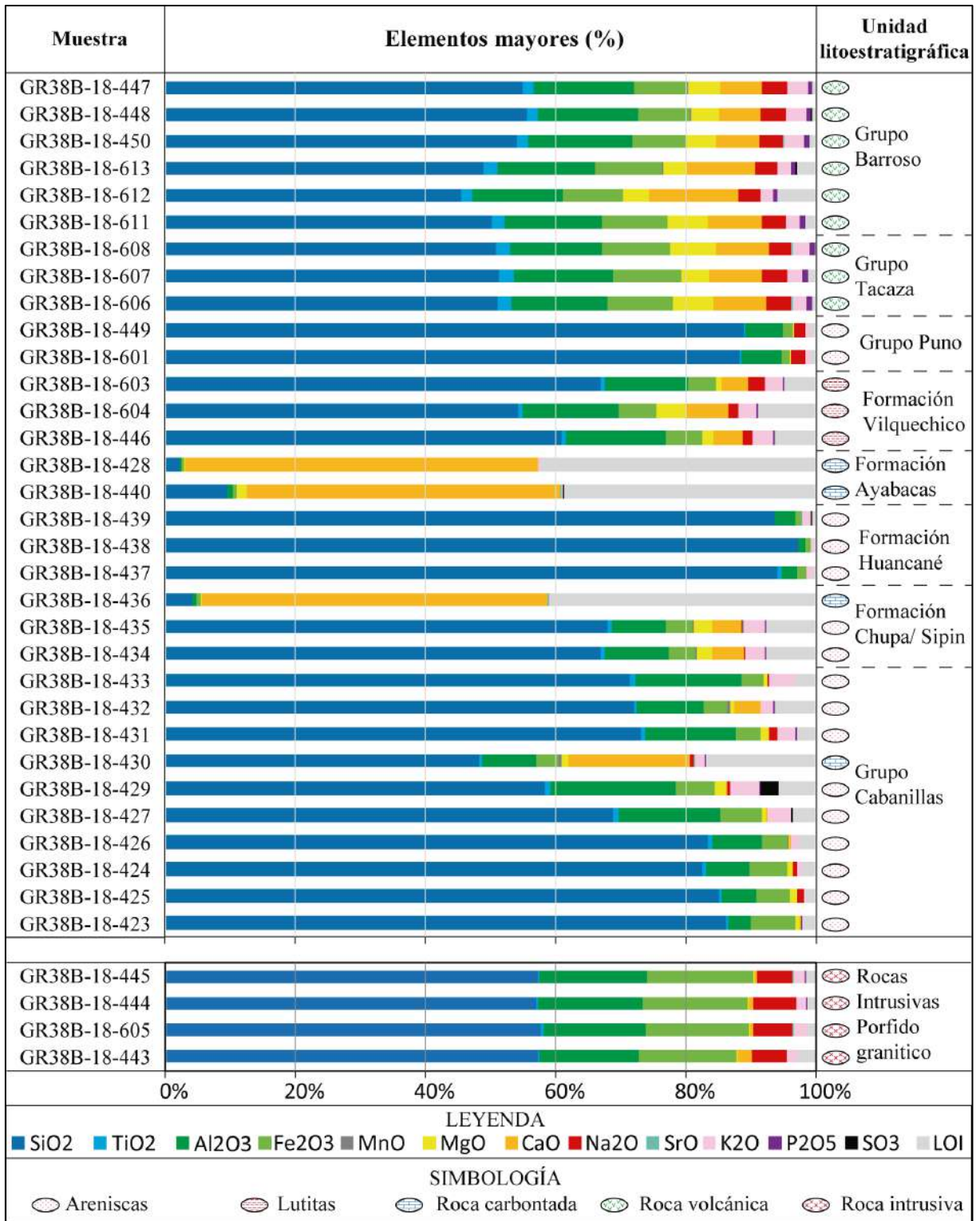
*Muestras litológicas recolectadas en el área de Cabana, su clasificación litológica, litologías y unidades litoestratigráficas.*

Etiqueta de muestras	Etiqueta simplificada	Clasificación litológica general	Litología	Unidad Litoestratigráfica
GR38B-18-447	R447	Rocas ígneas extrusivas	Traquiandesita basáltica (Shoshonita)	Grupo Barroso - Fm. Umayo
GR38B-18-448	R448	Rocas ígneas extrusivas	Traquiandesita basáltica (Shoshonita)	Grupo Barroso - Fm. Umayo
GR38B-18-450	R450	Rocas ígneas extrusivas	Traquiandesita basáltica (Shoshonita)	Grupo Barroso - Fm. Umayo
GR38B-18-613	R613	Rocas ígneas extrusivas	Traquibasalto (Traquibasalto potásico)	Grupo Barroso
GR38B-18-612	R612	Rocas ígneas extrusivas	Traquibasalto (Traquibasalto potásico)	Grupo Barroso
GR38B-18-611	R611	Rocas ígneas extrusivas	Traquibasalto (Traquibasalto potásico)	Grupo Barroso
GR38B-18-608	R608	Rocas ígneas extrusivas	Traquibasalto (Traquibasalto potásico)	Grupo Tacaza
GR38B-18-607	R607	Rocas ígneas extrusivas	Traquiandesita basáltica (Shoshonita)	Grupo Tacaza
GR38B-18-606	R606	Rocas ígneas extrusivas	Traquiandesita basáltica (Shoshonita)	Grupo Tacaza
GR38B-18-449	R449	Rocas sedimentarias clásticas	Sublitoarenita	Formación Auzangate
GR38B-18-601	R601	Rocas sedimentarias clásticas	Sublitoarenita	Formación Auzangate
GR38B-18-603	R603	Rocas sedimentarias clásticas	Grauwaca	Formación Vilquechico
GR38B-18-604	R604	Rocas sedimentarias clásticas	Lutita	Formación Vilquechico
GR38B-18-446	R446	Rocas sedimentarias clásticas	Lutita	Formación Vilquechico
GR38B-18-428	R428	Rocas sedimentarias carbonatadas	Caliza packstone	Formación Ayabacas
GR38B-18-440	R440	Rocas sedimentarias carbonatadas	Caliza mudstone	Formación Ayabacas
GR38B-18-439	R439	Rocas sedimentarias siliciclásticas	Subarcosa	Formación Huancané
GR38B-18-438	R438	Rocas sedimentarias siliciclásticas	Cuarzoarenita	Formación Huancané
GR38B-18-437	R437	Rocas sedimentarias siliciclásticas	Sublitoarenita	Formación Huancané
GR38B-18-436	R436	Rocas sedimentarias carbonatadas	Caliza wackestone	Formación Chupa/Sipín
GR38B-18-435	R435	Rocas sedimentarias clásticas	Litoarenita	Formación Chupa/Sipín
GR38B-18-434	R434	Rocas sedimentarias clásticas	Litoarenita	Formación Chupa/Sipín
GR38B-18-433	R433	Rocas metamórficas	Meta-grauvaca	Grupo Cabanillas
GR38B-18-432	R432	Rocas metamórficas	Meta-litoarenita	Grupo Cabanillas
GR38B-18-431	R431	Rocas metamórficas	Meta-grauvaca	Grupo Cabanillas
GR38B-18-430	R430	Rocas sedimentarias carbonatadas	Caliza packstone	Grupo Cabanillas
GR38B-18-429	R429	Rocas metamórficas	Meta-lutita	Grupo Cabanillas
GR38B-18-427	R427	Rocas metamórficas	Meta-grauvaca	Grupo Cabanillas
GR38B-18-426	R426	Rocas metamórficas	Meta-litoarenita	Grupo Cabanillas
GR38B-18-424	R424	Rocas metamórficas	Meta-cuarzoarenita ferruginosa	Grupo Cabanillas
GR38B-18-425	R425	Rocas metamórficas	Meta-cuarzoarenita ferruginosa	Grupo Cabanillas
GR38B-18-423	R423	Rocas metamórficas	Meta-cuarzoarenita ferruginosa	Grupo Cabanillas
GR38B-18-445	R445	Rocas ígneas intrusivas	Granito alcalino	Roca Intrusiva
GR38B-18-444	R444	Rocas ígneas intrusivas	Cuarzosienita	Roca Intrusiva
GR38B-18-605	R605	Rocas ígneas intrusivas	Cuarzosienita	Roca Intrusiva
GR38B-18-443	R443	Rocas ígneas intrusivas	Monzogranito	Roca Intrusiva

*Nota.* Las litologías son clasificadas con la data geoquímica (Anexo A, ver Tablas A3, A4 y A5)

**Figura 5.1**

Diagrama de barras apiladas horizontalmente, con los elementos mayores y perdida por ignición, al 100 %, de muestras de roca agrupadas en unidades litoestratigráficas del área de Cabana.



Primero, de manera general, se clasificarán geoquímicamente las diferentes muestras litológicas (ver [Tabla 5.1](#)) agrupadas por unidades litoestratigráficas, ordenadas por su edad, para el área de estudio.

Mediante un diagrama de barras apiladas horizontalmente (ver [Figura 5.1](#)), el cual permitirá una comparación visual de las concentraciones de los elementos mayores, incluyendo la cantidad de volátiles (*LOI*, perdida por ignición), normalizadas al 100 %, en las distintas litologías. Esto tiene como fin de *comparar e identificar las variaciones en concentraciones* de los componentes de manera general en diferentes muestras de roca.

De la [Figura 5.1](#), se obtiene una visión clara de la composición química de los elementos mayores en muestras de roca, incluyendo los volátiles, al 100 %, en un gráfico de barras apiladas horizontalmente. Además, se muestra en función de las unidades litoestratigráficas, lo cual permite identificar las variaciones litológicas características de manera general.

*Visualmente*, se destacan las mayores concentraciones de elementos mayores se destacan el dióxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ , barras de color azul) en la mayoría de muestras litológicas, el cual indicaría que estas rocas tienen un alto contenido de silicio. Se observan también concentraciones significativas de óxido de aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ , barras de color verde oscuro) y el óxido férrico ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , barras de color verde claro), indicando la presencia de minerales aluminosos y ferrosos. También se observa variaciones considerables en óxido de magnesio ( $\text{MgO}$ , barra de color amarillo) y óxido de calcio ( $\text{CaO}$ , barra de color anaranjado), sugiriendo diferencias en las condiciones de formación de las rocas. Por último, se destaca la concentración en *LOI* (perdida por ignición, barra de color gris), que indicaría los diferentes niveles de material volátil.

Además, visualmente según las unidades litoestratigráficas, con mayor diversidad en *proporciones de elementos mayores* presentan las unidades volcánicas del Cenozoico (Grupo Tacaza y Grupo Barroso), seguidas de las unidades intrusivas (Plutón Cabana). Las unidades que presentan menor o muy poca diversidad de estos elementos son las litologías carbonatadas (por ejemplo, la Formación Ayabacas y Formación Chupa/ Sipín), así como las litologías clásticas compuestas mayormente de granos de cuarzo (por ejemplo, la Formación Huancané).

### 5.2.1 ASOCIACIÓN DE MUESTRAS DE ROCA MEDIANTE ANÁLISIS ESTADÍSTICO MULTIVARIADO

Luego de observar las muestras en diagramas de barras, se procederá a *asociar* litologías a partir de datos geoquímicos. Se agruparán las muestras de roca con características químicas similares mediante pruebas estadísticas multivariantes. Para ello, se utilizarán datos *representativos* y *discriminantes* de las rocas, es decir, las concentraciones de los compuestos de óxidos mayores y elementos traza. Los elementos traza estarán representados por tierras raras (*REE*) y elementos inmóviles.

Los óxidos mayores en las rocas proporcionan información fundamental sobre la composición química básica de las muestras, crucial para su *caracterización* y *clasificación*. Por otro lado, los elementos traza son *discriminantes*, donde las tierras raras (*REE*) revelan procesos geológicos específicos y de fraccionamiento, y los elementos inmóviles son relativamente estables y de baja movilidad bajo condiciones de alteración, meteorización y metamorfismo hasta grado medio (Rollinson y Pease, 2021).

#### 5.2.1.1 Análisis de datos composicionales (CoDA) por la transformación logarítmica centrada (*clr*) en rocas

Con los datos químicos confiables a moderadamente confiables para el estudio (ver Tabla 2.5), se realiza la normalización, ya que son datos de naturaleza cerrada. Es decir, están definidos en un espacio cerrado donde las componentes suman a una constante, comúnmente a cien por ciento (ej. los datos geoquímicos). Para manejar adecuadamente estos datos, se realiza la transformación logarítmica centrada (*Centered Log-Ratio, CLR*). Esta técnica *normaliza* los datos para evitar el efecto cierre y los convierte a un espacio euclidiano, utilizando la media geométrica de todos los componentes como referencia. Este método ha sido utilizado por autores como Hajnajafi *et al* (2020) y Nils *et al* (2022) para variables de entrada del análisis multivariado. Para realizar esta normalización de los datos (Anexo C, Tabla C.1), se utilizará el software (Thió-Henestrosa & Martín-Fernández, 2005), disponible de forma gratuita.

### 5.2.1.2 Análisis de Componentes Principales Robusto (RPCA) en rocas

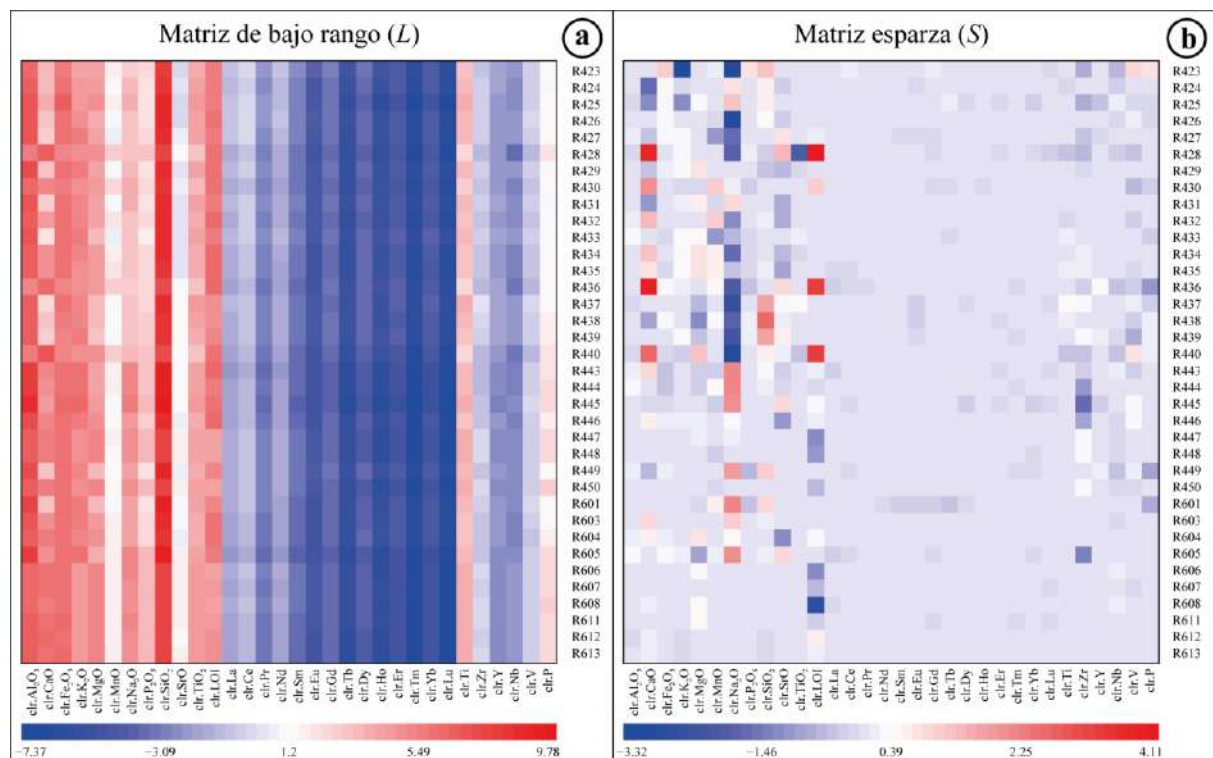
A continuación, con los datos normalizados (Anexo C, Tabla C.1), se aplica el Análisis de Componentes Principales Robustos (RPCA) a un conjunto de datos geoquímicos de rocas, normalizados mediante CLR. El conjunto de datos consta de 36 muestras (número de casos) y con 32 analitos (número de variables). El análisis se realizó con los softwares R y Rstudio y, para optimizar el proceso de descomposición y manejo de matrices con alta dimensionalidad sin comprometer la precisión del análisis, se empleó la descomposición en Valores Singulares Aleatoria (RSVD).

#### 5.2.1.2.1 Componentes de Bajo Rango ( $L$ ) y Dispersos ( $S$ ) en rocas

Luego de haber realizado el RPCA, se obtuvieron valores que fueron descompuestos en las matrices  $L$  y  $S$ , mostrados en los gráficos de calor (ver Figura 5.2). La matriz  $L$  captura datos de la estructura de bajo rango, mientras que la matriz  $S$  refleja datos de los valores dispersos o atípicos.

#### Figura 5.2

Gráfico de calor resultante del análisis RPCA de los datos de rocas: (a) Matriz de Bajo Rango  $L$  (RSVD) y (b) matriz Esparza  $S$  (RSVD).



Ambos gráficos (ver Figura 5.2) representan en el eje horizontal los elementos químicos como los óxidos mayores, tierras raras y elementos inmóviles (32 variables), y en el eje vertical las muestras de rocas (36 casos).

En la [Figura 5.2a](#), se observa que el gráfico de la derecha muestra la estructura de bajo rango ( $L$ ), donde los colores rojos indican valores positivos altos, es decir, una alta abundancia de las variables en sus respectivas muestras. Los colores azules representan valores negativos bajos, indicando menor abundancia. Se observa que los óxidos mayores presentan tonos más rojizos, mientras que los elementos de tierras raras tienen a colores más azules, lo que indicaría que los óxidos mayores tienen mayor abundancia en las muestras que las compone.

En la [Figura 5.2b](#), la matriz esparza ( $S$ ) refleja anomalías o valores atípicos en los datos. A diferencia del gráfico anterior, los cuadros con colores más oscuros, tanto rojos como azules, destacan los valores atípicos o ruido en los datos, lo que puede deberse a fenómenos geológicos inusuales o posibles errores de muestreo. Los óxidos mayores presentan más “ruido” aparente, mientras que los elementos de tierras raras ( $REE$ ) no presentan anomalías, lo que indica que pueden ser usados para la validación de datos posterior.

Comparando ambas matrices, se puede observar que la matriz  $L$  captura la mayoría de la estructura sistemática en los datos, mientras que en la matriz  $S$  destaca los puntos de datos que se desvían de esta estructura.

### **5.2.1.3 Análisis de Componentes Principales (PCA) en la Matriz $L$ en rocas**

Una vez obtenida la matriz de bajo rango ( $L$ ) mediante el  $RPCA$ , se procedió a realizar un Análisis de Componentes Principales ( $PCA$ ) en la matriz  $L$ , para reducir la dimensionalidad de los datos y facilitar la interpretación de los patrones subyacentes en las muestras de roca.

El análisis  $PCA$  aplicado a la matriz  $L$  permite identificar los componentes principales más relevantes que explican la mayor parte de la varianza en los datos, eliminando el ruido previamente capturado en la matriz esparza ( $S$ ). Este enfoque asegura que el análisis se centre únicamente en las tendencias sistemáticas y estructurales de los datos geoquímicos.

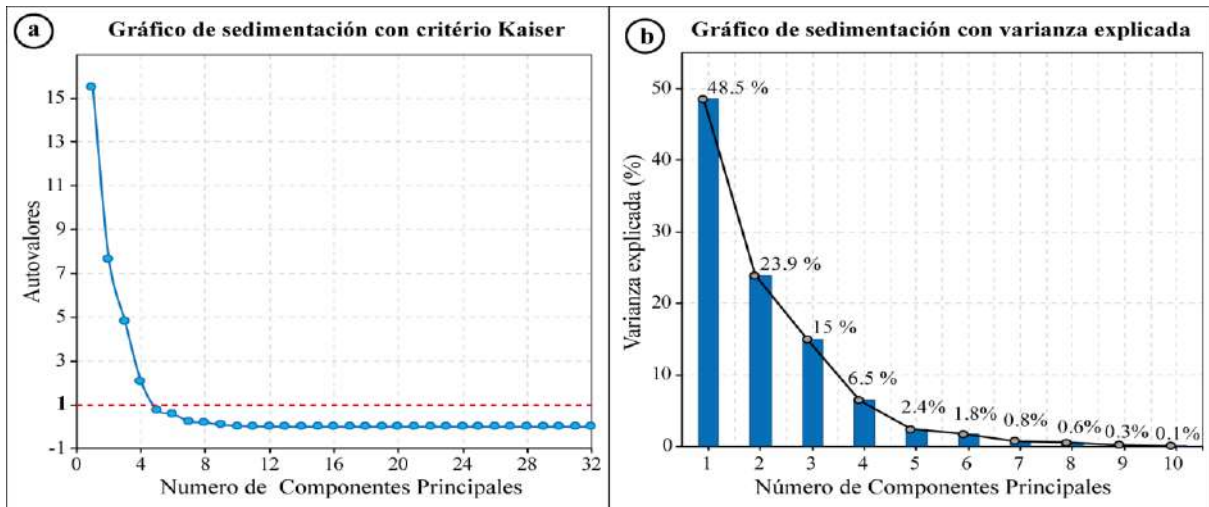
#### **5.2.1.3.1 Componentes principales de la Matriz $L$ en rocas**

Para determinar el número óptimo de componentes principales, se aplicaron el criterio de Kaiser y la varianza acumulada. El gráfico mostrado a continuación ([Figuras 5.3a y 5.3b](#)) presenta la distribución de autovalores y varianzas obtenidos a partir del análisis  $PCA$  en la Matriz  $L$ .

En la [Figura 5.3a](#), se muestran los autovalores de los componentes principales. Según el criterio de Kaiser, los componentes con valores propios mayores que 1 (representados por línea entrecortada de color rojo) se consideran relevantes. Al aplicar este criterio a la matriz L, se identificaron los cuatro primeros componentes con autovalores mayores que 1, lo que indica que son significativos para el análisis.

### Figura 5.3

(a) Gráfico de sedimentación con criterio de Kaiser y (b) gráfico de barras y líneas de la varianza explicada de los primeros componentes, ambos obtenidos de la matriz L de los datos de rocas.



En la [Figura 5.3b](#), se presenta la distribución de la varianza explicada de los primeros componentes. El primer componente explica el 48.5% de la varianza total, seguido por el segundo con un 23.9 %, el tercer componente con un 15 % y el cuarto 6.5%. En conjunto, los cuatro primeros componentes explican una gran parte de la varianza acumulada total (93.94 %). Por lo tanto, para la selección de componentes, se justifica la retención de los cuatro primeros componentes principales, debido a su alta varianza explicada.

El componente principal 1 (PC1), explica el 48.52 % de la varianza, que refleja una distinción química entre las muestras litológicas analizadas. Los valores propios más altos en PC1 están fuertemente asociados con los elementos de tierras raras (La a Lu) y el itrio (Y), que tienen contribuciones elevadas en esta componente (vectores propios  $>0.5$ , llegando hasta 0.95). Estos puntos corresponden principalmente a muestras de rocas metamórficas siliciclásticas y sedimentarias siliciclásticas, caracterizadas por su alto contenido de tierras raras. Por otro lado, los valores propios más bajos en PC1 están relacionados con altas contribuciones negativas ( $<-0.5$ ) de óxidos mayores como mayores  $N_2O$ ,  $P_2O_5$ ,  $SrO$ ,  $CaO$ ,  $MgO$  y el fósforo inmóvil (P). Estos puntos representan muestras de rocas ígneas, tanto



intrusivas como extrusivas, donde la composición química está dominada por estos óxidos y el elemento inmóvil. En general, PC1 captura la variabilidad entre muestras ricas en tierras raras frente a aquellos dominadas por óxidos mayores y fosforo, permitiendo diferenciar estas litologías mencionadas anteriormente.

El componente principal 2 (PC2), que explica el 23.90 % de la varianza, separa principalmente las rocas sedimentarias carbonatadas de las litologías siliciclásticas, tanto en rocas sedimentarias y metamórficas. Los valores propios bajos en PC2 están asociados con contribuciones negativas altas ( $> -5.0$ , llegando hasta  $-0.79$ ) de MnO, CaO y LOI, características de rocas sedimentarias carbonatadas (e.g., calizas). También se observan contribuciones negativas moderadas (vectores propios  $> -0.1$ ) de MnO, CaO, LOI, MgO, y tierras raras pesadas como Ho, Tb, Dy, Er, Tm, además del elemento inmóvil Y, que caracterizan principalmente a rocas sedimentarias calcáreas (e.g., litoarenitas calcáreas) que muestran bajos contenidos de carbonatos y pérdida por ignición con respecto a las rocas carbonatadas. En contraste, los valores propios altos en PC2 están asociados con contribuciones positivas ( $> 0.5$ , llegando hasta  $0.92$ ) que corresponden a litologías siliciclásticas de grano grueso (e.g., cuarzoarenita) y metamórficas (e.g., meta-cuarzoarenitas).

El componente principal 3 (PC3), explica el 15.03 % de la varianza, refleja una separación clara entre rocas ígneas intrusivas y extrusivas. Los valores propios más altos en PC3 están relacionados con contribuciones positivas (vectores propios  $> 0.1$ , llegando hasta  $0.6$ ) de óxidos mayores como MgO, CaO, MnO, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> y SrO, tierras raras ligeras (Eu, Gd, Nd, Ce, Pr, La, Sm, Tb) y elementos inmóviles como Zr, P y Nb, característicos principalmente de las rocas ígneas extrusivas. Por otro lado, los valores propios más bajos están asociados con contribuciones negativas ( $> -5.0$ ) de las variables K<sub>2</sub>O, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y LOI, que son rasgos distintivos de las rocas ígneas intrusivas. En general, discrimina entre litologías de rocas ígneas intrusivas (e.g., granitos) y extrusivas (e.g., traquibasaltos).

El componente principal 4 (PC4), explica el 6.49 % de la varianza, discrimina entre rocas metamórficas ferruginosas y sedimentarias siliciclásticas. Las contribuciones positivas de PC4 están asociados con rocas sedimentarias siliciclásticas, particularmente las de la Formación Huancané. Por otro lado, las contribuciones negativas de PC4 se relacionan con metamórficas, caracterizadas por su mayor contenido de óxidos férricos, reflejando su naturaleza ferruginosa del Grupo Cabanillas.

### 5.2.1.3.2 *Proyección de los datos en el espacio de Componentes Principales en rocas*

Una vez seleccionados y descritos los componentes principales más relevantes, se procedió a proyectar los datos de las muestras de roca en el espacio definido por dichos componentes. Esta proyección permite visualizar cómo se agrupan las muestras de roca en función de sus características geoquímica más representativas y discriminantes.

En este caso, se utilizaron los primeros cuatro componentes principales, que en conjunto explican el 93.94 % de la varianza total. La proyección de los datos se muestra en la [Figura 5.4](#), donde se presentan gráficos bidimensionales que combinan diferentes pares de componentes principales, previamente seleccionados.

En estos gráficos (ver [Figura 5.4](#)), se proyecta los datos de la Matriz L en el espacio de los componentes principales (PC1, PC2, PC3 y PC4) en el plano bidimensional, con el objetivo de identificar agrupamientos.

La proyección en el espacio bidimensional de los componentes PC1 y PC2 (ver [Figura 5.4a](#)) explica el 72.42% de la varianza total y muestra una clara separación entre las principales litologías. Las rocas metamórficas y sedimentarias siliciclásticas se agrupan en valores positivos de PC1, debido a sus altos contenidos de tierras raras (La a Lu) y Y. Por otro lado, las rocas ígneas, tanto intrusivas como extrusivas, se concentran en valores negativos de PC1, relacionados con altas contribuciones de óxidos mayores (N<sub>2</sub>O, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, SrO, CaO, MgO) y el fósforo inmóvil (P). Las rocas sedimentarias carbonatadas y calcáreas se caracterizan por valores negativos en PC2, asociados con contribuciones elevadas de CaO, MnO y pérdida por ignición.

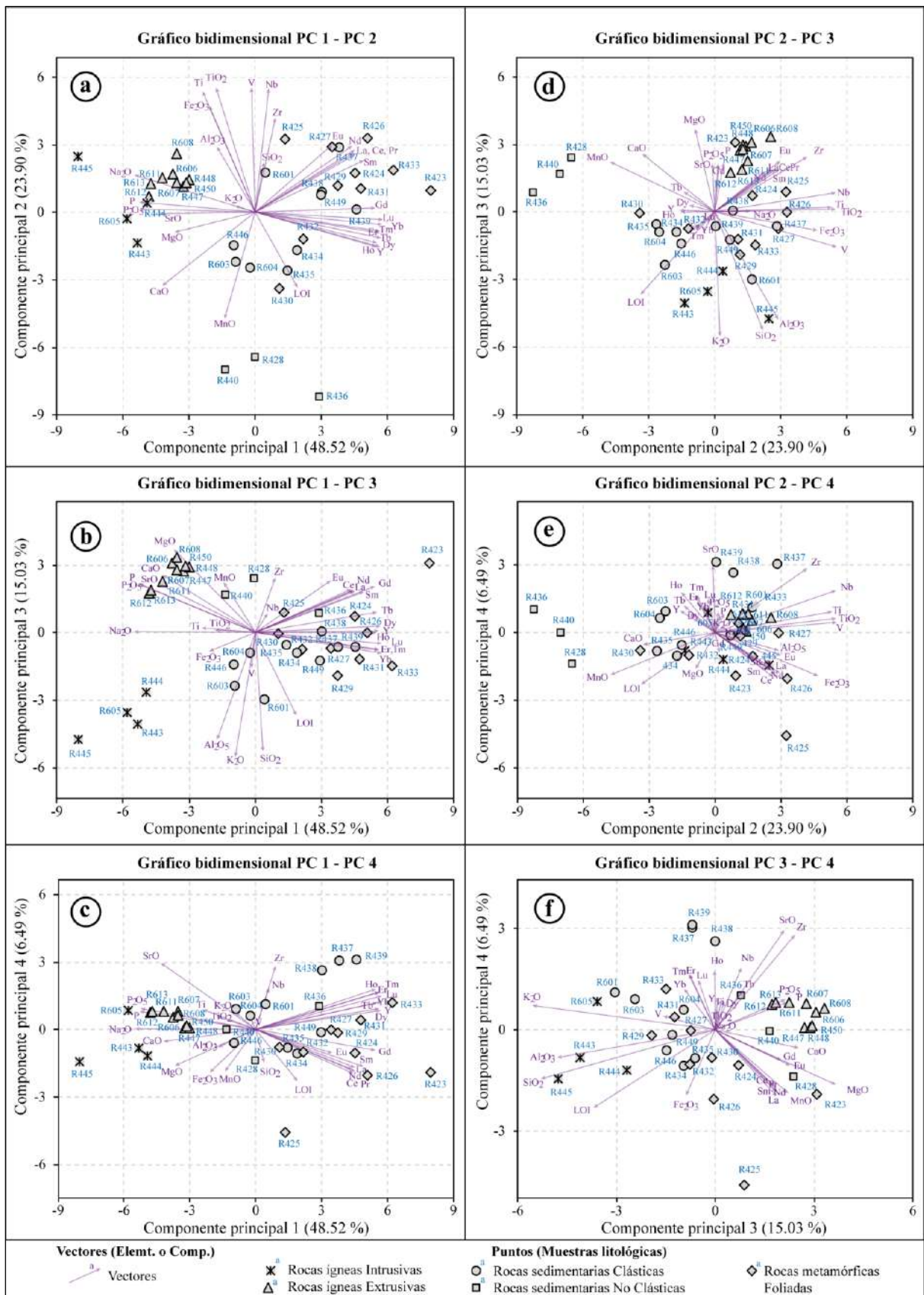
La proyección de los componentes PC1 y PC3 (ver [Figura 5.4b](#)) explica el 63.55 % de la varianza total, en el cual muestra una diferenciación entre las rocas ígneas intrusivas (valores negativos de PC3 y PC1) y las rocas extrusivas (valores positivos de PC3 y negativos de PC1).

La proyección de los componentes PC1 y PC4 (ver [Figura 5.4c](#)) explica el 55.01 % de la varianza total y muestra agrupaciones claras entre rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias.

En cuanto a los componentes PC2 y PC3 (ver [Figura 5.4d](#)) y PC2 y PC 3 (ver [Figura 5.4e](#)), se observan agrupaciones claras que resaltan a las rocas sedimentarias carbonatadas.

**Figura 5.4**

Gráficos en espacios bidimensionales del PCA, definidos por la combinación de pares de componentes principales (PC) seleccionados para muestras de roca



Finalmente, en el gráfico de los componentes PC3 y PC4 (ver [Figura 5.4f](#)), se diferencian litologías de rocas sedimentarias siliciclásticas de la Formación Huancané, así como las rocas ígneas intrusivas de las extrusivas.

#### 5.2.1.4 Análisis de Clústering Jerárquico en rocas

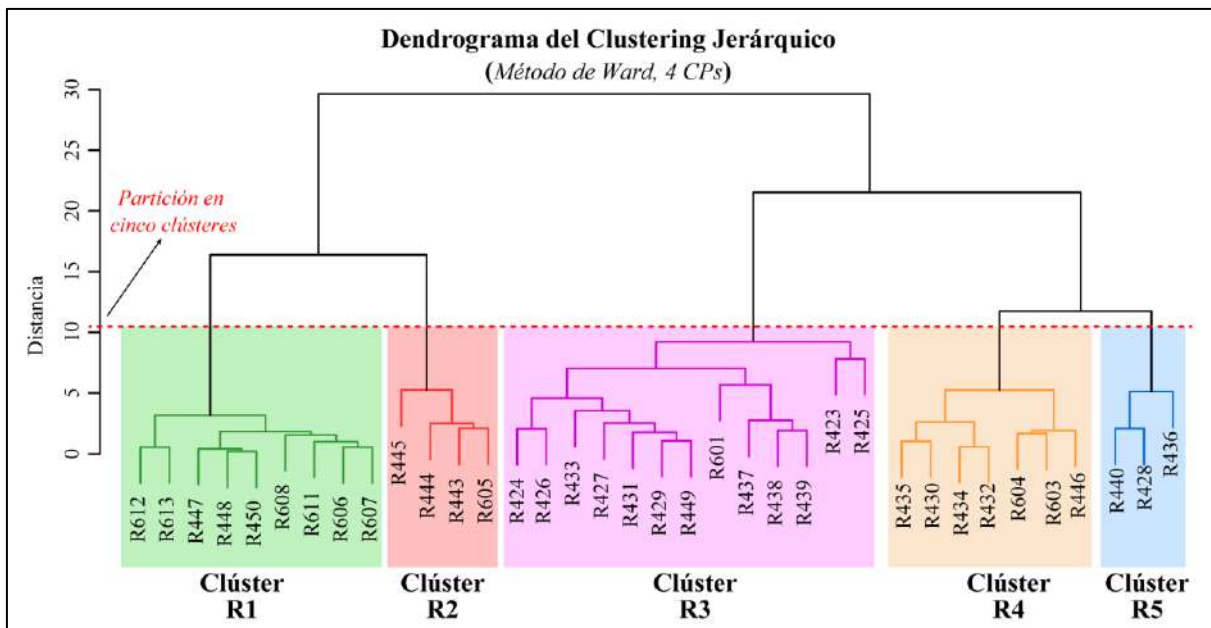
Continuando con el análisis en rocas, se aplicó el clústering jerárquico sobre los componentes seleccionados previamente, es decir, los primeros cuatro componentes principales que explican la mayor parte de la varianza en los datos.

El método de agrupamiento jerárquico se basa en la similitud entre las muestras, organizando los datos en una estructura jerárquica donde los grupos se forman de manera secuencial. Para ello, se utilizó la *distancia euclidiana* como medida de proximidad entre las muestras y el método de *enlace de Ward*, que minimiza la varianza dentro de cada grupo y asegura que los clústeres resultantes sean los más homogéneos posibles en términos de sus características geoquímicas.

El análisis de Clústering Jerárquico se representa gráficamente mediante un dendrograma, que permite visualizar las relaciones entre las muestras de rocas. En la [Figura 5.5](#), se muestra el dendrograma obtenido utilizando el método Ward aplicado a los primeros cuatro componentes principales.

#### Figura 5.5

*Dendrograma del clústering jerárquico para las muestras de rocas, utilizando el Método de Ward con los primeros 4 componentes principales.*



En la [Figura 5.5](#), se observa un dendrograma que representa el resultado del clustering jerárquico aplicado a las muestras de roca, donde la línea entrecortada de color rojo horizontal indica el punto de corte que divide las muestras en cinco clústeres. Este dendrograma muestra la partición de las muestras en cinco clústeres bien diferenciados, donde las muestras se agrupan en función de sus similitudes en características geoquímicas (ver [Tabla 5.2](#)).

**Tabla 5.2**

*Resumen preliminar de cinco clústeres agrupados según el análisis jerárquico, con su asociación litológica de las muestras de roca.*

Clústeres preliminares	Etiqueta simplificada	Etiqueta de muestra original		
Clúster R1	R612, R613, R447	GR38B-18-612	GR38B-18-613	GR38B-18-447
	R448, R450, R608	GR38B-18-448	GR38B-18-450	GR38B-18-608
	R611, R606, R607	GR38B-18-611	GR38B-18-606	GR38B-18-607
Clúster R2	R445, R444, R443	GR38B-18-445	GR38B-18-444	GR38B-18-443
	R605	GR38B-18-605		
Clúster R3	R424, R426, R433	GR38B-18-424	GR38B-18-426	GR38B-18-433
	R427, R431, R429	GR38B-18-427	GR38B-18-431	GR38B-18-429
	R449, R601, R437	GR38B-18-449	GR38B-18-601	GR38B-18-437
	R438, R439, R423	GR38B-18-438	GR38B-18-439	GR38B-18-423
	R425	GR38B-18-425		
Clúster R4	R435, R430, R434	GR38B-18-435	GR38B-18-430	GR38B-18-434
	R432, R604, R603	GR38B-18-432	GR38B-18-604	GR38B-18-603
	R446	GR38B-18-446		
Clúster R5	R440, R428, R436	GR38B-18-440	GR38B-18-428	GR38B-18-436

Posteriormente, se presenta la proyección de los datos en el espacio bidimensional de los dos primeros componentes principales (PC1 y PC2) (ver [Figura 5.6](#)), y se describe cada clúster en función de sus características geoquímicas comunes que comparten.

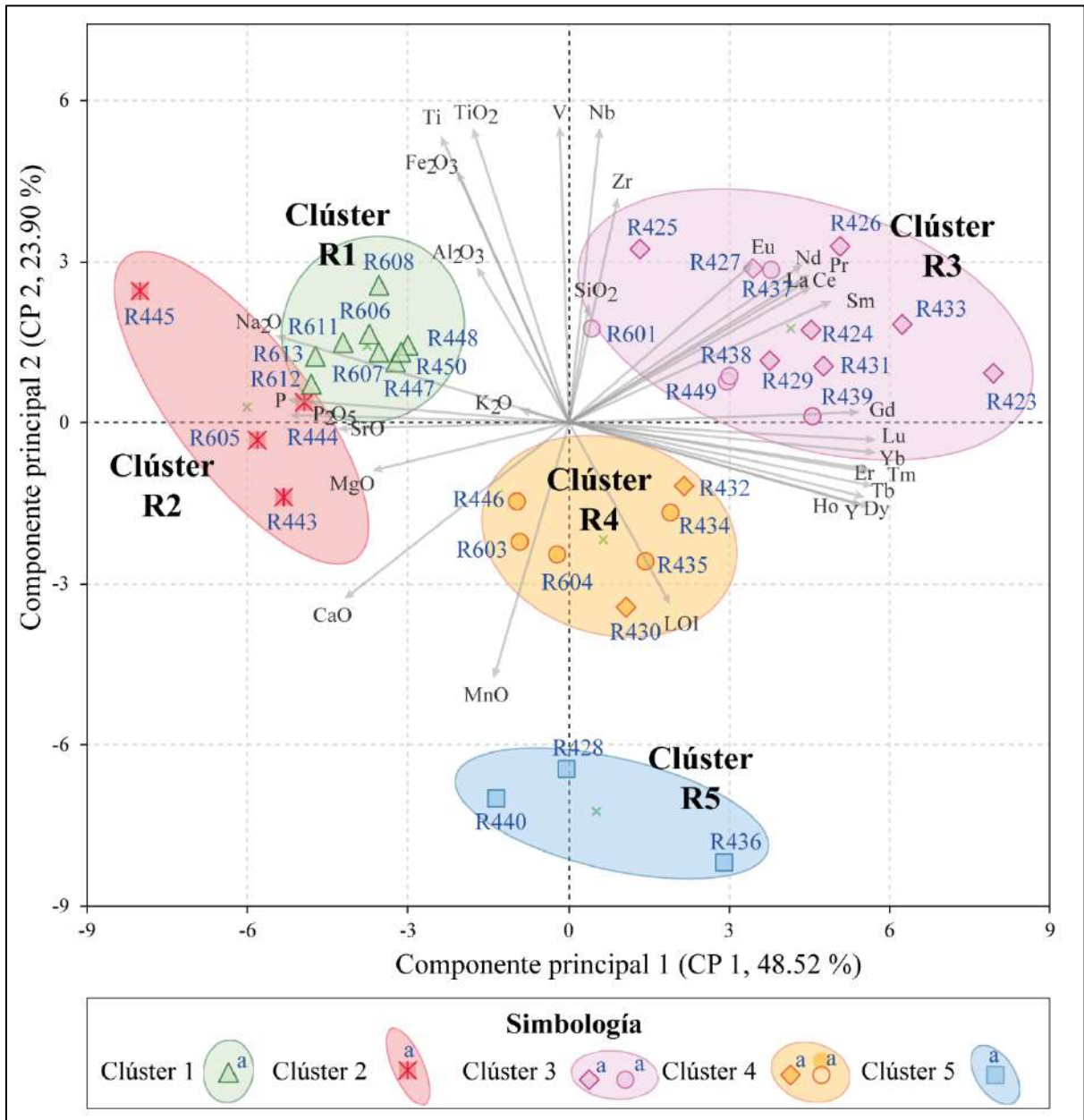
A continuación, se describen las características de cada clúster graficados en las [Figuras 5.5 y 5.6](#):

- **Clúster R1 (Rocas ígneas extrusivas):**

Este clúster agrupa las muestras R612, R613, R447, R448, R450, R608, R611, R606 y R607, que representan una alta proximidad entre sí, indicando que comparten características geoquímicas muy similares. Estas muestras están relacionadas con litologías de rocas ígneas extrusivas, reflejando las unidades asociadas a los arcos volcánicos cenozoicos, como el Grupo Tacaza y el Grupo Barroso. Litológicamente, estas muestras corresponden a Shoshonitas y Traquibasaltos potásicos, característicos de eventos magmáticos en arcos volcánicos asociados con zonas de subducción.

**Figura 5.6**

Proyección de los cinco clústeres obtenidos del análisis jerárquico en rocas, en el espacio bidimensional de los primeros componentes (PC1 y PC2).



- **Clúster R2 (Rocas ígneas intrusivas):**

Este clúster agrupa las muestras R445, R444, R443 y R605, relacionadas con rocas ígneas intrusivas. Las litologías incluyen granitos alcalinos, cuarzosienitas y monzogranitos, asociados con el Plutón de Cabana. Estas intrusiones representan magmatismo diferenciado y alcalino.

- **Clúster R3 (Rocas sedimentarias y metamórficas siliciclásticas):**

Este Clúster agrupa muestras R424, R426, R433, R427, R431, R429, R449, R601, R437, R438, R439, R423 y R425, las cuales corresponden principalmente a rocas sedimentarias siliciclásticas como cuarzoarenitas, subarcosas y sublitoarenitas, provenientes de las formaciones Huancané y Auzangate. Sin embargo, también incluye rocas metamórficas con protolito sedimentario, como meta-grauwacas, meta-litoarenitas y meta-cuarzoarenitas ferruginosas, pertenecientes al Grupo Cabanillas, lo que refleja un proceso metamórfico sobre sedimentos siliciclásticos.

- **Clúster R4 (Rocas sedimentarias calcáreas):**

Este clúster agrupa las muestras R435, R430, R434, R432, R604, R603 y R446, relacionadas con litologías sedimentarias calcáreas, como litoarenitas calcáreas, lutitas calcáreas, provenientes de las formaciones Chupa/Sipín, Ayabacas y Vilquechico. Algunas de estas muestras corresponden a rocas metamórficas de protolito sedimentario de grano fino, como las meta-lutitas del Grupo Cabanillas, que mantienen características químicas propias de rocas calcáreas originales.

- **Clúster R5 (Rocas sedimentarias carbonatadas):**

Este clúster agrupa las muestras R440, R428, R436, asociadas con litologías de rocas sedimentarias carbonatadas, como calizas. Estas rocas pertenecen a las formaciones Ayabacas y Chupa/Sipín, típicas de ambientes sedimentarios marinos someros, dominados por la acumulación de carbonatos.

En síntesis, la clasificación preliminar de los clústeres refleja una excelente correspondencia entre las litologías, sus características geoquímicas y las unidades litoestratigráficas. Esto destaca la utilidad del análisis jerárquico combinado con PCA para diferenciar y agrupar muestras según su origen y evolución geológica.

### 5.3 ANÁLISIS QUÍMICO EXPLORATORIO DE ELEMENTOS PRINCIPALES EN SUELOS

Antes de proceder con el análisis de datos de elementos principales en suelos, se realiza una tabla resumen, con sus características relacionados con su material parental. Esto implica que cada muestra de suelo está asociada con sus litologías o facies parentales. Para ello, en cada sitio de muestreo se identifican y describen las unidades litoestratigráficas presentes, tomando en cuenta sus características de los materiales parentales de los suelos, la información litológica (tipo de roca; ígnea, sedimentaria y metamórfica) y de facies (depósitos no consolidados). Además, se utilizan mapas geológicos basados en los mapas elaborados por el INGEMMET.

Según la [Tabla 5.3](#), se muestra sus características relacionadas con el material parental, tanto de los horizontes superficiales y profundos de cada calicata, así como las unidades litoestratigráficas parentales y el paisaje geomorfológico.

Para proceder con el análisis de datos de los elementos mayores, se realiza de la misma forma en el que se analizaron las rocas. Iniciando de manera general, *visualizando*, con base en la concentración de los elementos mayores e incluyendo la cantidad de volátiles, normalizadas al 100 %, en un diagrama de barras apiladas horizontalmente (ver [Figuras 5.7a](#) y [5.7b](#)) en dos gráficas, por su nivel de profundidad, es decir en horizontes superficiales y profundos.

Para el diagrama de barras en suelos ([Figuras 5.7a](#) y [5.7b](#)), se recolectan y organizan los datos de las concentraciones de los óxidos mayores ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{BaO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{SrO}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$  y  $\text{SO}_3$ ), incluyendo la pérdida por ignición (LOI), separados en orden de los suelos con horizontes superficiales y profundos. Luego se normalizan los datos de cada muestra en porcentajes que sumen el 100%, y finalmente generar la gráfica de barras apiladas horizontalmente con las herramientas del software Microsoft Excel. Además, se agrega en la parte derecha de la gráfica información adicional sobre el material parental de los suelos (litología/ facies) y la unidad litoestratigráfica parental de cada muestra, para posteriores comparaciones visuales e interpretaciones de este estudio.



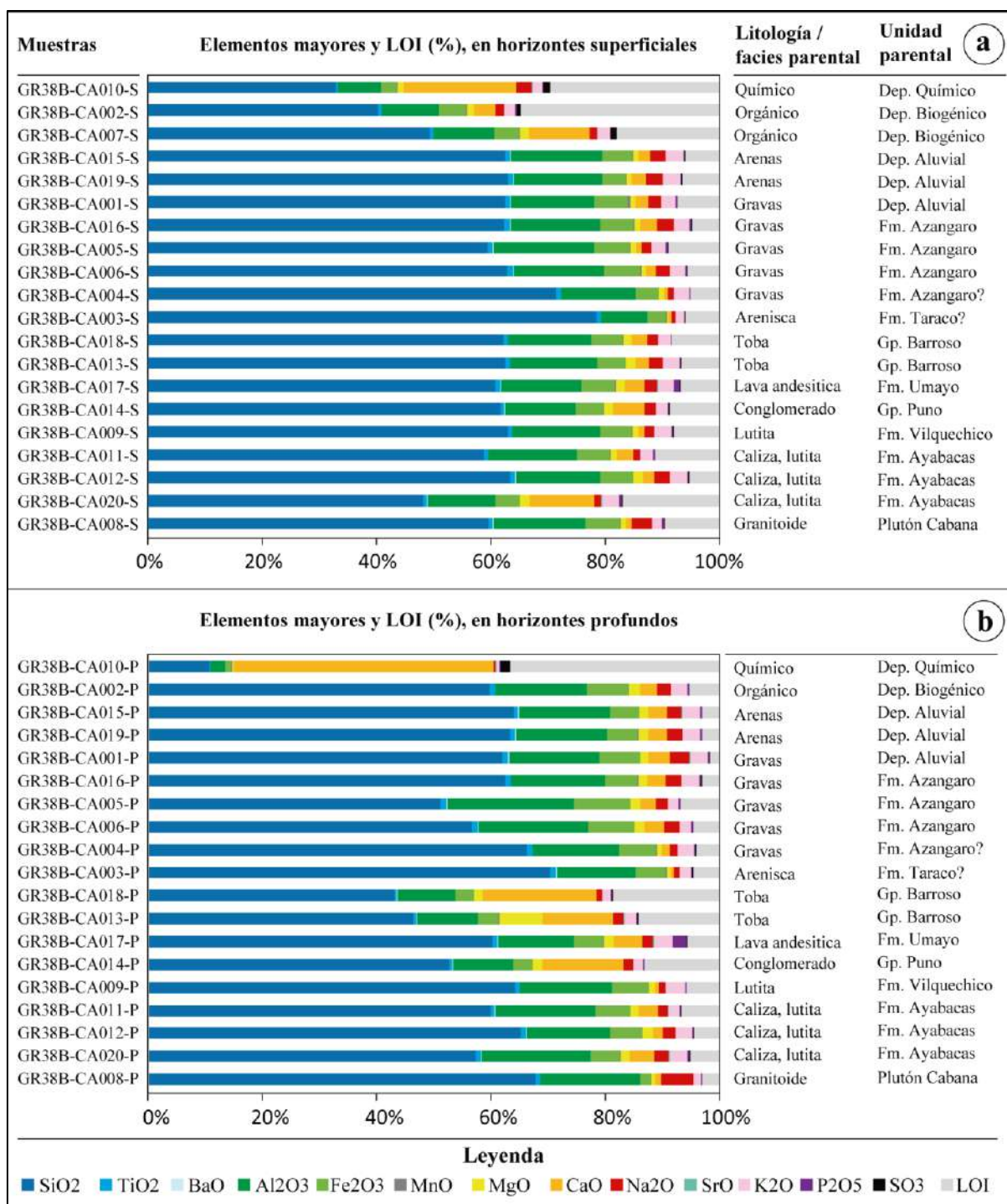
**Tabla 5.3**

Muestras de suelos recolectadas en el área de Cabana, con sus características relacionadas con el material parental, es decir, sus litologías o facies.

Calicata	Nivel de profundidad del horizonte	Etiqueta de la muestra	Etiqueta simplificada	Material parental inferido		Unidad litoestratigráfica parental	Paisaje geomorfológico (Zinck)
				Litologías	Facies		
CA001	Superficial	GR38B-CA001-S	Ss01		Gravas	Dep. Aluvial	Planicie
	Profundo	GR38B-CA001-P	Sp01		Gravas	Dep. Aluvial	Planicie
CA002	Superficial	GR38B-CA002-S	Ss02		Orgánico	Dep. Biogénico	Valle
	Profundo	GR38B-CA002-P	Sp02		Orgánico	Dep. Biogénico	Valle
CA003	Superficial	GR38B-CA003-S	Ss03	Arenisca		Fm. Taraco?	Piedemonte
	Profundo	GR38B-CA003-P	Sp03	Arenisca		Fm. Taraco?	Piedemonte
CA004	Superficial	GR38B-CA004-S	Ss04		Gravas	Fm. Azangaro	Altiplanicie
	Profundo	GR38B-CA004-P	Sp04		Gravas	Fm. Azangaro	Altiplanicie
CA005	Superficial	GR38B-CA005-S	Ss05		Gravas	Fm. Azangaro	Altiplanicie
	Profundo	GR38B-CA005-P	Sp05		Gravas	Fm. Azangaro	Altiplanicie
CA006	Superficial	GR38B-CA006-S	Ss06		Gravas	Fm. Azangaro	Altiplanicie
	Profundo	GR38B-CA006-P	Sp06		Gravas	Fm. Azangaro	Altiplanicie
CA007	Superficial	GR38B-CA007-S	Ss07		Orgánico	Dep. Biogénico	Planicie
CA008	Superficial	GR38B-CA008-S	Ss08	Granitoide		Plutón Cabana	Piedemonte
	Profundo	GR38B-CA008-P	Sp08	Granitoide		Plutón Cabana	Piedemonte
CA009	Superficial	GR38B-CA009-S	Ss09	Lutita		Fm. Vilquechico	Piedemonte
	Profundo	GR38B-CA009-P	Sp09	Lutita		Fm. Vilquechico	Piedemonte
CA010	Superficial	GR38B-CA010-S	Ss10		Químico	Dep. Químico	Planicie
	Profundo	GR38B-CA010-P	Sp10		Químico	Dep. Químico	Planicie
CA011	Superficial	GR38B-CA011-S	Ss11	Caliza, lutita		Fm. Ayabacas	Piedemonte
	Profundo	GR38B-CA011-P	Sp11	Caliza, lutita		Fm. Ayabacas	Piedemonte
CA012	Superficial	GR38B-CA012-S	Ss12	Caliza, lutita		Fm. Ayabacas	Lomerío
	Profundo	GR38B-CA012-P	Sp12	Caliza, lutita		Fm. Ayabacas	Lomerío
CA013	Superficial	GR38B-CA013-S	Ss13	Toba		Gp. Barroso	Planicie
	Profundo	GR38B-CA013-P	Sp13	Toba		Gp. Barroso	Planicie
CA014	Superficial	GR38B-CA014-S	Ss14	Conglomerado		Gp. Puno	Lomada
	Profundo	GR38B-CA014-P	Sp14	Conglomerado		Gp. Puno	Lomada
CA015	Superficial	GR38B-CA015-S	Ss15		Arenas	Dep. Aluvial	Planicie
	Profundo	GR38B-CA015-P	Sp15		Arenas	Dep. Aluvial	Planicie
CA016	Superficial	GR38B-CA016-S	Ss16		Gravas	Fm. Azangaro	Altiplanicie
	Profundo	GR38B-CA016-P	Sp16		Gravas	Fm. Azangaro	Altiplanicie
CA017	Superficial	GR38B-CA017-S	Ss17	Lava andesítica		Fm. Umayo	Lomada
	Profundo	GR38B-CA017-P	Sp17	Lava andesítica		Fm. Umayo	Lomada
CA018	Superficial	GR38B-CA018-S	Ss18	Toba		Gp. Barroso	Lomada
	Profundo	GR38B-CA018-P	Sp18	Toba		Gp. Barroso	Lomada
CA019	Superficial	GR38B-CA019-S	Ss19		Arenas	Dep. Aluvial	Planicie
	Profundo	GR38B-CA019-P	Sp19		Arenas	Dep. Aluvial	Planicie
CA020	Superficial	GR38B-CA020-S	Ss20	Caliza		Fm. Ayabacas	Lomerío
	Profundo	GR38B-CA020-P	Sp20	Caliza		Fm. Ayabacas	Lomerío

**Figura 5.7**

Diagrama de barras apiladas horizontalmente con los elementos mayores y perdida por ignición al 100 %, de muestras de suelo agrupadas por su origen o material parental del cual derivan (litología/ facies). (a) Suelos superficiales y (b) suelos profundos



De las gráficas (Figuras 5.7a y 5.7b), visualmente varían significativamente las muestras de horizontes superficiales y profundos por las diferentes proporciones de cada elemento.

Para los horizontes superficiales, el componente más abundante es el dióxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ), seguido por el óxido de aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) con concentraciones relativamente altas, también con variabilidad significativa para los compuestos de óxidos de hierro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) y óxido de calcio ( $\text{CaO}$ ), y con una variabilidad notable para la pérdida de materiales volátiles (LOI). Para los horizontes profundos, el  $\text{SiO}_2$  tiende a ser más alto en comparación con los superficiales, los compuestos  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$  y LOI muestra variabilidad significativa y similar a los horizontes superficiales. En cuanto a los otros elementos, no se evidencia un patrón claro de variación entre horizontes debido a sus concentraciones relativamente bajas.

### **5.3.1 ASOCIACIÓN DE MUESTRAS DE SUELO MEDIANTE ANÁLISIS ESTADÍSTICO MULTIVARIADO**

De forma similar, la asociación de las muestras de suelo siguió los mismos procedimientos que se emplearon para las rocas.

Los datos representativos y discriminantes de los suelos, serán los mismos que el de las rocas: los óxidos mayores, los elementos de tierras raras (*REE*) y los elementos inmóviles, ya que son *representativos* y *discriminantes* de las muestras.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos el cual se comenzará con los horizontes profundos y luego con los superficiales.

Sin embargo, antes de comenzar con el análisis, será dividir los datos según el nivel profundidad: en horizontes superficiales y profundos, y luego aplicaremos las pruebas estadísticas correspondientes.

#### ***5.3.1.1 Análisis de datos composicionales (CoDA) por la transformación logarítmica centrada (clr) en suelos***

Luego de dividir los datos, se procederá a la normalización de los datos de suelos con el método de transformación logarítmica centrada (*CLR*) (Anexo C, Tablas C.2 y C.3), utilizando el software CoDaPack ([Thió-Henestrosa & Martín-Fernández, 2005](#)), disponible de forma gratuita. Para los suelos, se seleccionaron 19 muestras de suelos profundos (número de casos) y 20 muestras de suelos superficiales (número de casos), y en ambos casos se consideró la misma cantidad de variables que en las rocas, es decir, 32 variables cada conjunto.

### 5.3.2 ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES ROBUSTO (RPCA) EN SUELOS PROFUNDOS

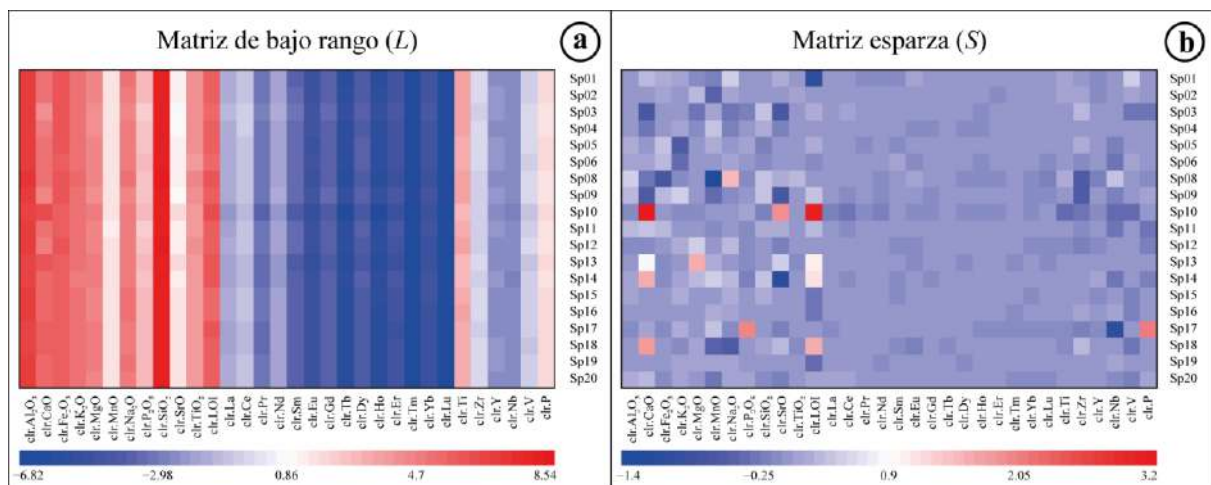
El conjunto de datos normalizados, incluye 19 muestras de horizontes profundos (también llamado casos) con 32 variables. El análisis se realizó utilizando los softwares R y Rstudio. Para optimizar el proceso de descomposición y manejo de matrices con alta dimensionalidad, sin comprometer la precisión del análisis, se empleó la descomposición en Valores Singulares Aleatoria (*RSVD*), de forma similar a lo aplicado en rocas.

#### 5.3.2.1 Componentes de Bajo Rango (*L*) y Dispersos (*S*) en suelos profundos

Luego, aplicando el *RPCA* a los suelos profundos, los datos fueron descompuestos en dos matrices: la matriz de bajo rango (*L*) y la matriz esparza (*S*) (ver [Figura 5.8](#)). Esta descomposición separa la estructura principal de los datos de las posibles anomalías o “ruidos”.

#### Figura 5.8

Gráfico de calor resultante del análisis *RPCA* de los datos de suelos profundos: (a) Matriz de Bajo Rango *L* (*RSVD*) y (b) Matriz Esparza *S* (*RSVD*).



En ambos gráficos (ver [Figuras 5.8a y 5.8b](#)), en el eje vertical se encuentran las muestras de suelos profundos (Sp01 a Sp20, exceptuando Sp07), mientras que en el eje horizontal se encuentran las 32 variables geoquímicas, tales como óxidos mayores (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> a TiO<sub>2</sub>, incluyendo LOI), elementos de tierras raras (La a Lu) y elementos inmóviles (Ti a P).

La matriz *L* ([Figura 5.8a](#)) captura la estructura principal de los datos. En esta matriz, los valores más altos indican que ciertas variables, como los óxidos mayores y elementos traza, tienen influencia significativa en las muestras de suelos. Los colores rojos y azules del

grafico representan la magnitud de abundancia en su composición química, con el color rojo representa valores con una alta abundancia y el azul una baja abundancia.

Por otro lado, la matriz S (Figura 5.8b) captura las anomalías presentes en los datos. Los colores más intensos en esta matriz reflejan las muestras y variables que se desvían de lo esperado, lo que podría deberse a fenómenos geológicos recientes o errores en el proceso de muestreo.

### 5.3.2.2 Análisis de Componentes Principales (PCA) en la Matriz L de suelos profundos

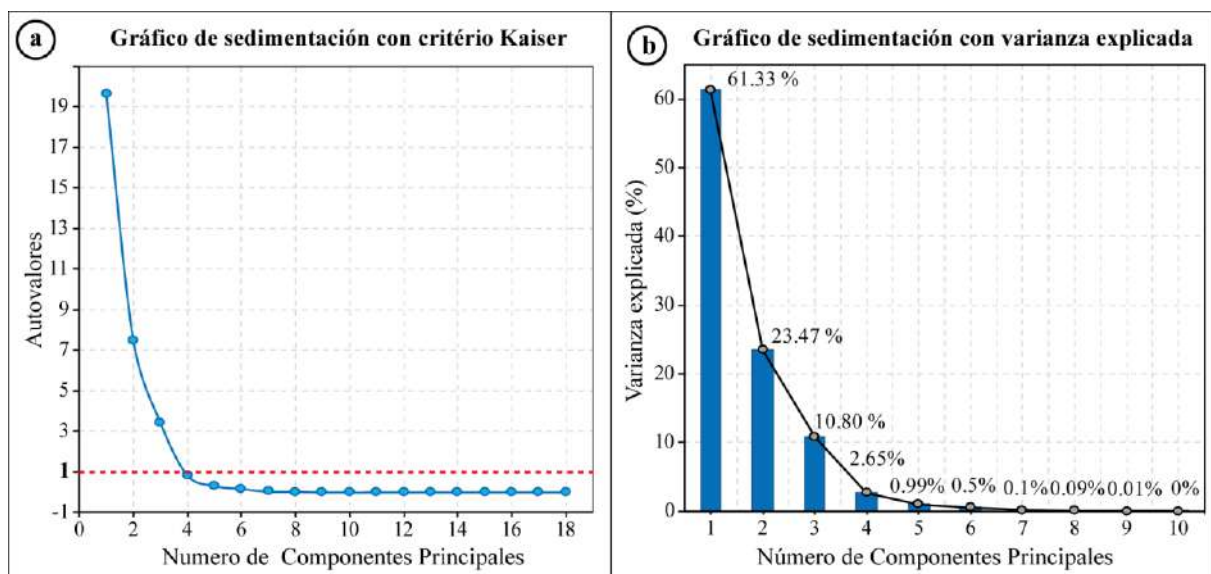
Al igual que los datos de rocas, una vez obtenida la matriz de bajo rango (L) mediante el *RPCA* en los suelos profundos, se procedió a realizar en dicha matriz, el análisis de componentes principales (*PCA*). El propósito de este análisis es reducir la dimensionalidad de los datos y facilitar la interpretación de los patrones subyacentes en las muestras de suelos profundos.

#### 5.3.2.2.1 Componentes principales de la Matriz L de suelos profundos

Para seleccionar los componentes principales a retener, se utilizó el criterio de Kaiser junto con la proporción de varianza explicada (ver Figuras 5.9a y 5.9b).

#### Figura 5.9

(a) Gráfico de sedimentación con criterio de Kaiser y (b) gráfico de barras y líneas de la varianza explicada de los primeros componentes, ambos obtenidos de la matriz L de los datos de suelos profundos.



En la [Figura 5.9a](#), según el criterio de Kaiser, los componentes con autovalores por encima la línea entrecortada roja (umbral de autovalor = 1) se consideran relevantes. En este caso, se seleccionaron los tres primeros componentes, ya que tienen autovalores mayores a 1, lo que los hace significativos.

En la [Figura 5.9b](#), los tres primeros componentes explican la mayor parte de la varianza. El primer componente explica el 61.33 % de la varianza total, seguido por el segundo componente con un 23.47 % y el tercer componente con un 10.80 %. Los siguientes componentes explican porcentajes mucho menores de la varianza, lo que indica que los tres primeros componentes explican el 95.60 % de la varianza total acumulada, justificando su selección para el análisis.

En tanto, el primer componente principal (PC1), que explica el 61.33 % de la varianza total, refleja la mayor variabilidad en los datos de los suelos profundos. Los valores positivos altos de PC1 están asociados con las variables positivas ( $>0.5$ , llegando hasta 0.98) de tierras raras (La a Lu) y elementos inmóviles como V, Y, Ti, Nb, característicos de suelos provenientes de rocas sedimentarias calcáreas, y parte de los sedimentos no consolidados de la Formación Azángaro. Por otro lado, los valores más bajos PC1 están fuertemente relacionados con altas contribuciones negativas ( $< -0.5$ , llegando hasta -0.98) de óxidos mayores como CaO, SrO, MgO, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, LOI, Na<sub>2</sub>O, MnO, y el fósforo inmóvil (P), lo que es indicativo de suelos formados a partir de depósitos químicos (e.g., Sp10) y, en menor medida, de suelos derivados de rocas volcánicas (e.g., Sp18, Sp17 y Sp13).

El segundo componente principal (PC2), que explica el 23.47 % de la varianza, refleja una diferenciación significativa entre los suelos profundos en función de su composición química. Los valores positivos altos de PC2 están asociados con las variables positivas ( $> 0.5$ , llegando a 0.96), principalmente de óxidos mayores como K<sub>2</sub>O, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Na<sub>2</sub>O y TiO<sub>2</sub>, así como elementos inmóviles Ti, Nb, Zr. Estas asociaciones están relacionadas con procesos de intemperismo que derivan de rocas ígneas intrusivas, como granitoides (e.g., Sp08) y depósitos arenosos de la Formación Azángaro.

Por otro lado, los valores negativos de PC2 están relacionados con variables negativas, características de suelos derivados de rocas sedimentarias, como los conglomerados del Grupo Puno (e.g., Sp14).

El tercer componente principal (PC3), que explica el 10.80 % de la varianza, captura una diferenciación más específica en las características químicas de los suelos profundos. Las

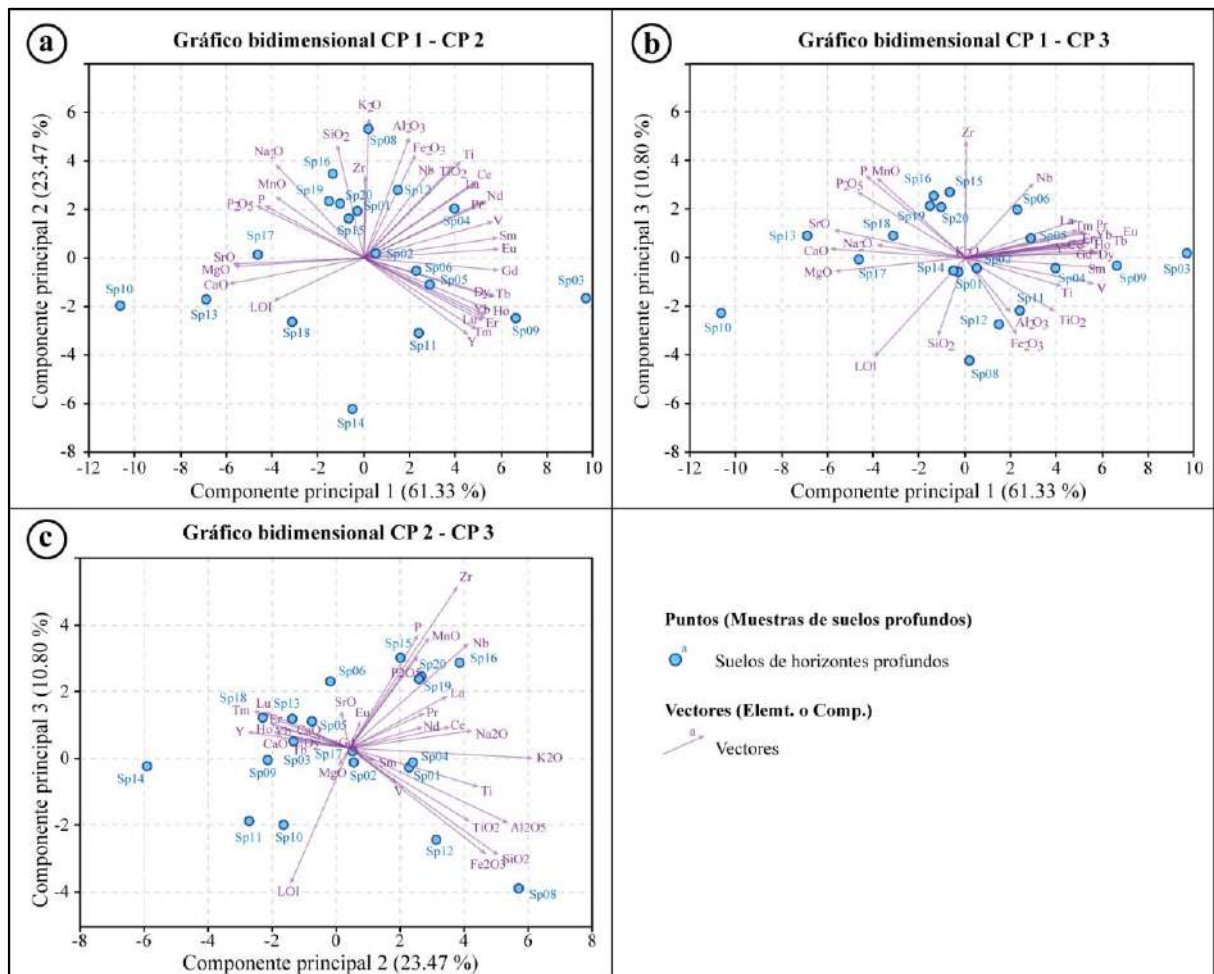
muestras con valores positivos altos están relacionadas con cargas positivas ( $> 0.5$ ) de elementos inmóviles como Zr, P, Nb y óxidos como MnO y  $P_2O_5$ , lo cual es indicativo de sedimentos no consolidados. Por otro lado, las muestras con valores negativos bajos están relacionadas con cargas negativas ( $< -0.5$ ) de variables como LOI,  $SiO_2$  y  $Fe_2O_3$ . Estas muestras corresponden a suelos derivados a rocas ígneas intrusivas (e.g., Sp08).

### 5.3.2.2.2 Proyección de los datos en el espacio de Componentes Principales en suelos profundos

Tras la selección y descripción de los componentes principales más relevantes, se realizó la proyección de los datos correspondientes a las muestras de suelos de horizontes profundos en el espacio definido por dichos componentes. Esta representación gráfica facilita la visualización de cómo se agrupan las muestras en función de sus características geoquímicas más representativas.

**Figura 5.10**

Gráficos en espacios bidimensionales del PCA, definidos por la combinación de pares de componentes principales (CP) seleccionados para muestras de suelos profundos.



En este caso, se utilizaron los primeros tres componentes principales, que explican conjuntamente el 95.60 % de la varianza total. La proyección de los datos se presenta en la [Figura 5.10](#), donde se muestran gráficos bidimensionales que combinan diferentes pares de componentes principales previamente seleccionados.

En estos gráficos (ver [Figura 5.10](#)), se proyectan los datos en el espacio de los componentes principales (PC1, PC2 y PC3), representados en planos bidimensionales para identificar patrones y agrupamientos.

Proyección en el espacio bidimensional de los componentes PC1 y PC2 (ver [Figura 5.10a](#)), que explica el 84.80 % de la varianza total, que muestra diferenciación con valores positivos de PC1 y PC2, relacionados con suelos derivados de materiales sedimentarios, así como con suelos derivados de granitoides. Por otro lado, los valores negativos altos en PC1 y negativos moderados en PC2, se relacionan con depósitos químicos y de materiales volcánicos.

La proyección de los componentes PC1 y PC3 (ver [Figura 5.10b](#)) explican el 72.13 % de la varianza total. La distribución en el espacio PC1 es consistente con lo observado anteriormente. En el espacio PC3, los valores negativos reflejan suelos derivados de granitoides (e.g., muestra Sp08), mientras que los valores positivos corresponden a suelos derivados de sedimentos arenosos.

La proyección de los componentes PC2 y PC3 (ver [Figura 5.10c](#)) explican 34.27 % de la varianza total. Se destacan muestras de suelos derivados de conglomerados del Grupo Puno, los cuales presentan valores altos negativos en PC2 (e.g., muestra Sp14). Además, los suelos derivados de granitoides (e.g., muestra Sp08) exhiben valores positivos en PC2 y negativos en PC3.

### ***5.3.2.3 Análisis de Clustering Jerárquico en suelos profundos***

Después de realizar el Análisis de Componentes Principales (PCA) en la matriz  $L$  de los suelos profundos, se aplicó el clustering jerárquico para agrupar las muestras en función de sus características geoquímicas más representativas.

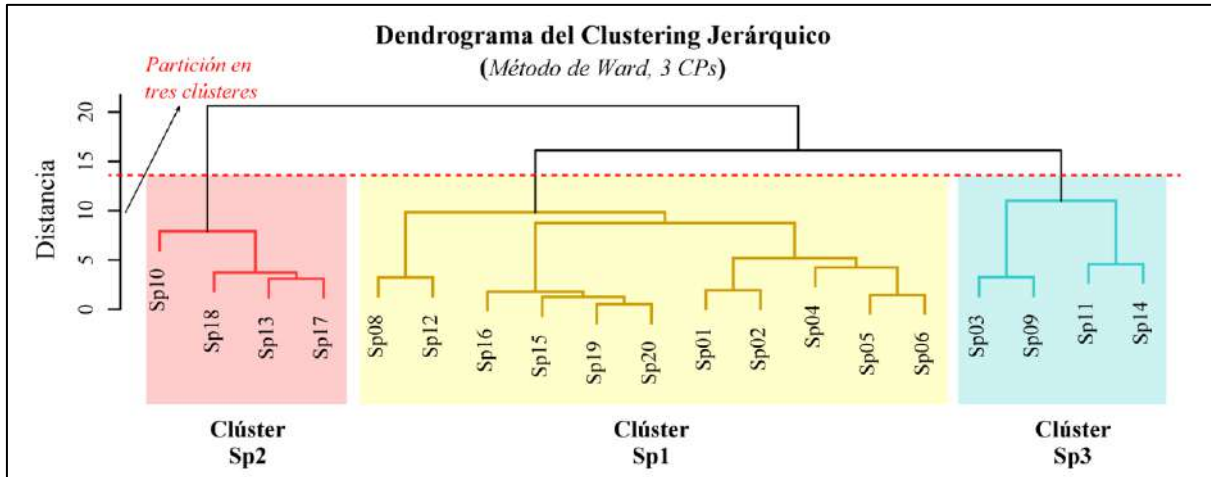
Al igual que en el análisis en rocas, se utilizó la distancia euclidiana como medida de proximidad entre las muestras y el método de enlace de Ward, que minimiza la varianza dentro de cada grupo, asegurando que los clústeres resultantes sean lo más homogéneos posible en términos de sus propiedades geoquímicas.



El dendrograma obtenido del análisis de clústering jerárquico se presenta en la [Figura 5.11](#), donde se visualiza la estructura jerárquica de las relaciones entre las muestras de suelos profundos.

**Figura 5.11**

*Dendrograma del clústering jerárquico para las muestras de suelos de horizontes profundos, utilizando el método de Ward con los primeros 3 componentes principales.*



En la [Figura 5.11](#), la línea entrecortada de color rojo horizontal marca el punto de corte que divide las muestras en tres clústeres diferenciados. Cada clúster agrupa muestras que comparten similitudes geoquímicas, lo que proporciona una base para su interpretación (ver [Tabla 5.4](#))

**Tabla 5.4**

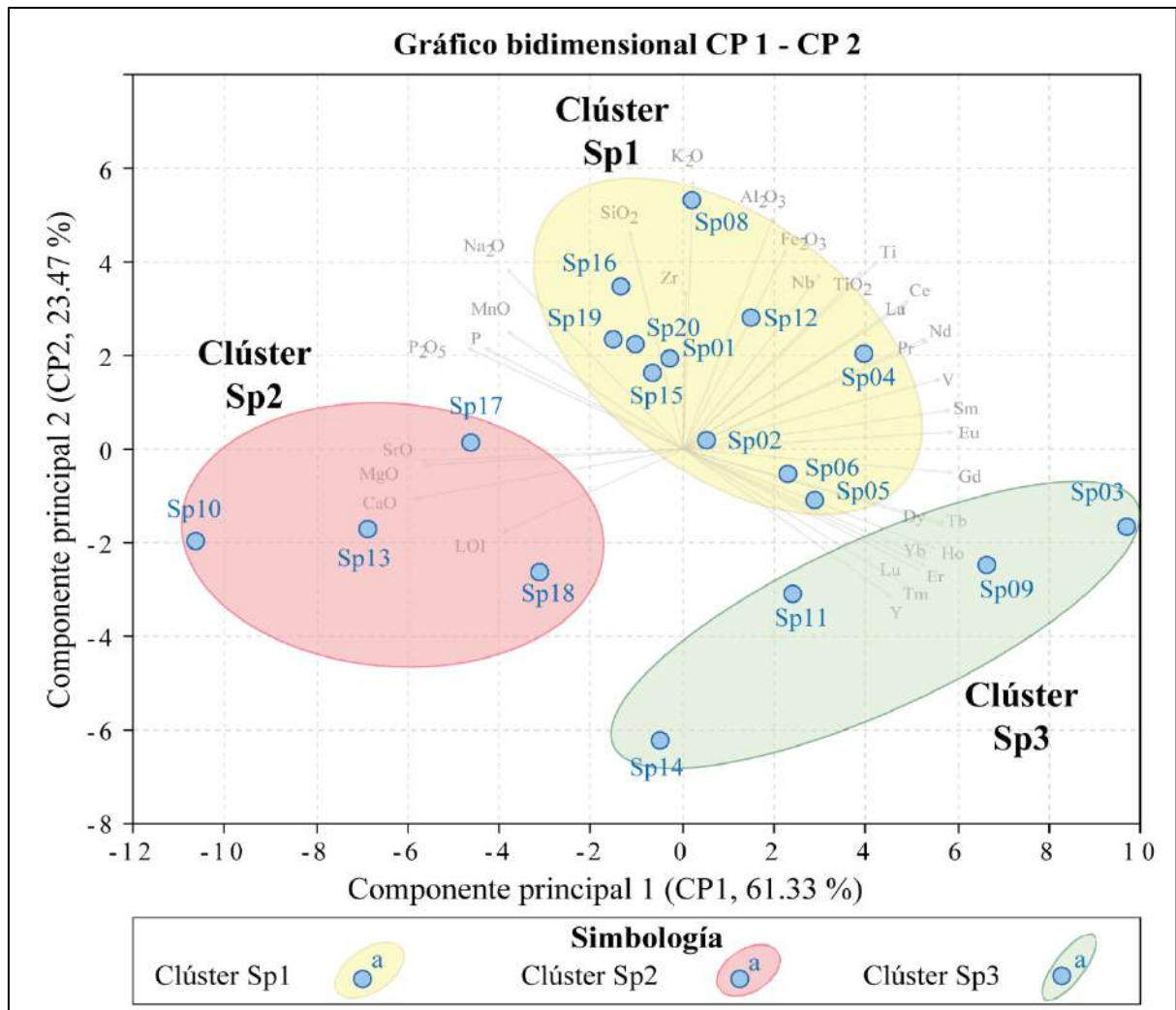
*Resumen preliminar de tres clústeres agrupados según el análisis jerárquico de las muestras de suelos profundos.*

Clústeres preliminares	Etiqueta simplificada	Etiqueta de la muestra	Nivel de profundidad	Material parental inferido	
				Litologías	Facies
Clúster Sp1	Sp08	GR38B-CA008-P	Horizonte Profundo	Granitoide	
	Sp12	GR38B-CA012-P	Horizonte Profundo	Caliza, lutita	
	Sp16	GR38B-CA016-P	Horizonte Profundo		Gravas
	Sp15	GR38B-CA015-P	Horizonte Profundo		Arenas
	Sp19	GR38B-CA019-P	Horizonte Profundo		Arenas
	Sp20	GR38B-CA020-P	Horizonte Profundo	Caliza	
	Sp01	GR38B-CA001-P	Horizonte Profundo		Gravas
	Sp02	GR38B-CA002-P	Horizonte Profundo		Orgánico
	Sp04	GR38B-CA004-P	Horizonte Profundo		Gravas
	Sp05	GR38B-CA005-P	Horizonte Profundo		Gravas
	Sp06	GR38B-CA006-P	Horizonte Profundo		Gravas
Clúster Sp2	Sp10	GR38B-CA010-P	Horizonte Profundo		Químico
	Sp18	GR38B-CA018-P	Horizonte Profundo	Toba	
	Sp13	GR38B-CA013-P	Horizonte Profundo	Toba	
	Sp17	GR38B-CA017-P	Horizonte Profundo	Lava andesítica	
Clúster Sp3	Sp03	GR38B-CA003-P	Horizonte Profundo	Arenisca	
	Sp09	GR38B-CA009-P	Horizonte Profundo	Lutita	
	Sp11	GR38B-CA011-P	Horizonte Profundo	Caliza, lutita	
	Sp14	GR38B-CA014-P	Horizonte Profundo	Conglomerado	

Teniendo en cuenta las proyecciones de los datos en el espacio de componentes principales seleccionados (Figura 5.10) y la agrupación en clústeres según el análisis jerárquico (Figura 5.11), proyecta en los dos primeros componentes principales (Figura 5.12), ya que tienen el mayor porcentaje en cuanto a la varianza total.

**Figura 5.12**

Proyección de los cinco clústeres obtenidos del análisis jerárquico en suelos profundos, en el espacio bidimensional de los primeros componentes (PC1 y PC2).



Por lo que a continuación, se describen cada uno de los clústeres agrupados (ver Figuras 5.11 y 5.12, y Tabla 5.4):

- **Clúster Sp1 (suelos profundos para el cultivo quinua):**

Este clúster agrupa muestras relacionadas con suelos derivados de sedimentos arenosos de la Formación Azángaro (e.g., Sp16, Sp19, Sp12, Sp04, Sp05 y otros), así como de granitoides (e.g., Sp08).

- **Clúster Sp2:**

Este clúster agrupa muestras asociadas a las rocas volcánicas (e.g., Sp13, Sp18 y Sp17), sin embargo, una muestra está relativamente separada del grupo, el cual esta muestra está relacionada a depósitos químicos (e.g. Sp10).

- **Clúster Sp3:**

Agrupar a muestras asociadas a suelos derivados de rocas sedimentarias calcáreas (e.g., Sp09, Sp11, Sp03, Sp14).

Cabe destacar, que los suelos de horizontes profundos, específicamente los depósitos no consolidados están relacionados con los cultivos de la planta quinua, están representados por el Clúster Sp1.

### 5.3.3 ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES ROBUSTO (RPCA) EN SUELOS SUPERFICIALES

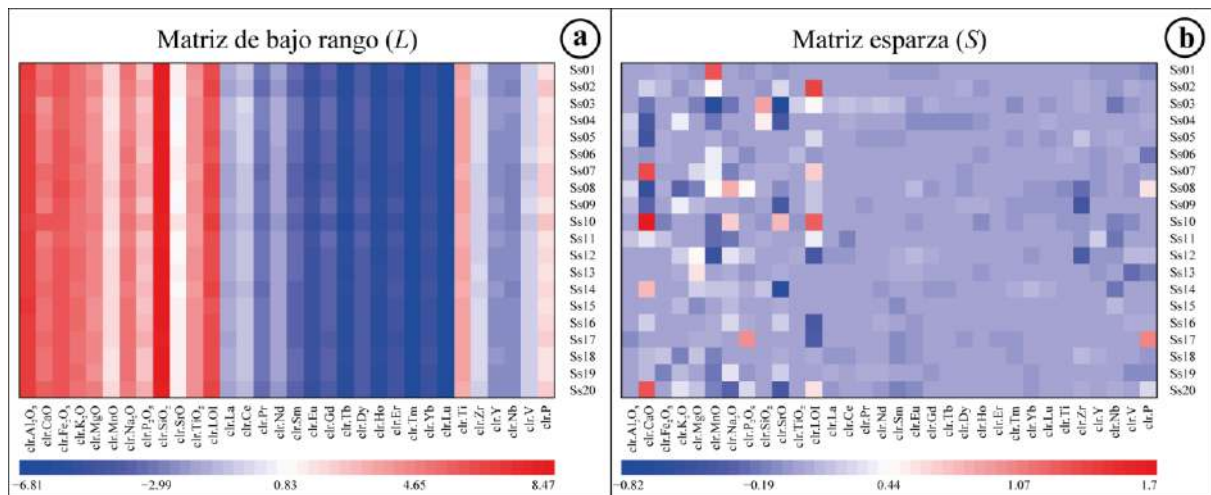
El análisis de los suelos superficiales siguió un proceso similar al de las rocas y suelos profundos. Se aplicó el Análisis de Componentes Principales Robusto (*RPCA*) a un conjunto de datos que contiene 20 muestras superficiales, con 32 variables. El análisis también se realizó con los softwares R y Rstudio, utilizando la Descomposición en Valores Singulares Aleatoria (*RSVD*) para garantizar una descomposición eficiente y precisa en matrices de alta dimensionalidad.

#### 5.3.3.1 Componentes de Bajo Rango (*L*) y Dispersos (*S*) en suelos superficiales

De manera similar al análisis realizado en las muestras de rocas y suelos profundos, el *RPCA* aplicado a los suelos superficiales descompuso los datos en dos matrices (ver Figuras 5.13a y 5.13b): la matriz de bajo rango (*L*) y la matriz esparza (*S*). Esta descomposición permite observar la estructura de los datos, separando las tendencias generales de las anomalías o ruido.

**Figura 5.13**

Gráfico de calor resultante del análisis *RPCA* de los datos de suelos superficiales: (a) Matriz de Bajo Rango *L* (*RSVD*) y (b) Matriz Esparza *S* (*RSVD*).



#### 5.3.3.2 Análisis de Componentes Principales (PCA) en la Matriz *L* de suelos superficiales

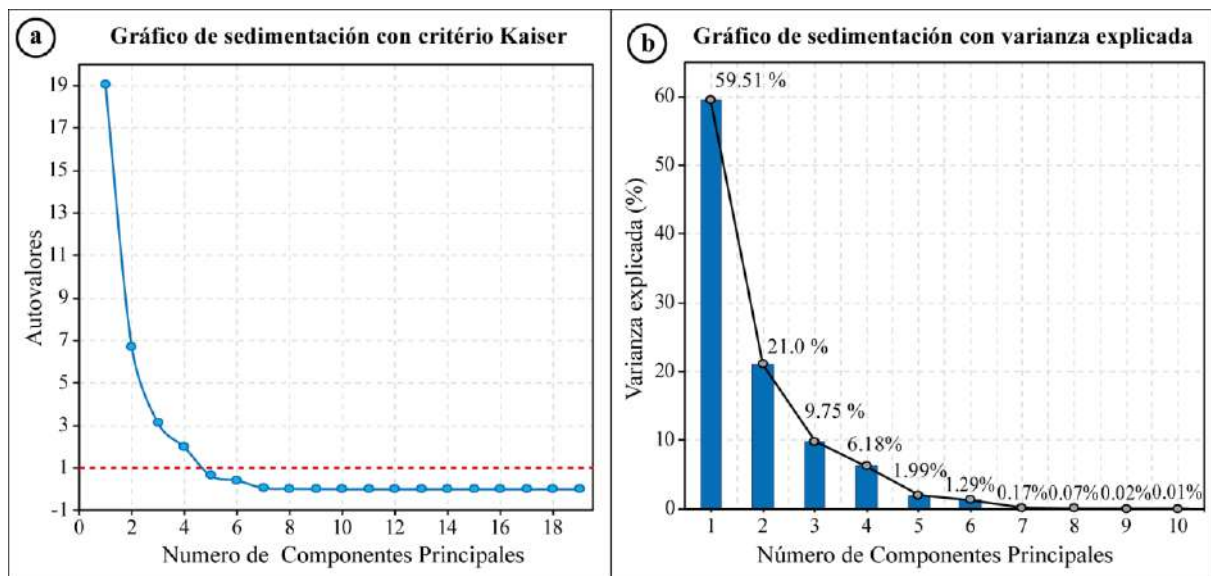
En el análisis de los suelos superficiales, se siguió el mismo enfoque aplicado previamente a las rocas y suelos profundos. El Análisis de Componentes Principales (*PCA*) se aplicó a la matriz de bajo rango (*L*), obtenida del *RPCA*, con el objetivo de reducir la dimensionalidad de datos y permitir una interpretación clara de las características geoquímicas más importantes de los suelos superficiales.

### 5.3.3.2.1 Componentes principales de la Matriz $L$ en suelos superficiales

Para la selección de los componentes principales en la Matriz  $L$  de los suelos superficiales, se utilizó el criterio de Kaiser junto con la proporción de varianza explicada. Estos métodos permitieron identificar los componentes más relevantes, que explican la mayor parte de la variabilidad en los datos, descartando aquellos que contribuyen de manera insignificante.

#### Figura 5.14

(a) Gráfico de sedimentación con criterio de Kaiser y (b) gráfico de barras y líneas de la varianza explicada de los primeros componentes, ambos obtenidos de la matriz  $L$  de los datos de suelos superficiales.



La Figura 5.14 presenta dos gráficos clave para la selección de los componentes principales, donde en la Figura 5.14a se presenta el gráfico de sedimentación basado en el criterio de Kaiser, donde se observa que los componentes con autovalores mayores a 1 (por encima de la línea roja entrecortada) son significativos. En tanto en la Figura 5.14b, se presenta el gráfico de barras y líneas que muestra la proporción de varianza explicada por cada componente.

En este análisis, los primeros cuatro componentes principales cumplen con el criterio de relevancia al tener autovalores mayores a 1, justificando su retención para el análisis. Estos componentes en conjunto explican el 96.44 % de la varianza total, lo que evidencia su importancia para describir las características químicas de los suelos superficiales. Los componentes restantes explican porcentajes muy pequeños de la varianza, lo que refuerza la decisión de no incluirlos en el análisis.

El componente principal 1 (PC1), que explica el 59.51 % de varianza total, captura la mayor parte de la información presente en los datos, reflejando diferencias composicionales significativas en los suelos superficiales. Los valores propios positivos están asociados variables (relacionados con vectores propios  $>0.5$ , llegando hasta 0.98) como las tierras raras (La a Lu) y otros elementos inmóviles (Y, V, Nb, Ti y Zr), relacionados con muestras derivadas principalmente de rocas sedimentarias (e.g., Ss03, Ss04, Ss11, Ss09, y otros) y sedimentos arenosos (e.g., Ss06, Ss05, y otros). Por otro lado, los valores propios negativos altos están vinculados con las variables de óxidos mayores y LOI, característicos de depósitos químicos (e.g., Ss10), depósitos biogénicos (e.g., Ss02, Ss07 y otros) y suelos formados a partir de rocas ígneas intrusivas (e.g., Ss08).

El componente principal 2 (PC2), que explica el 21.0 % de varianza total, refleja diferencias en las propiedades químicas de los suelos superficiales. Las cargas positivas altas (vectores propios  $>0.5$ , llegando hasta 0.83) están asociadas con variables como  $K_2O$ ,  $Al_2O_3$ ,  $TiO_2$ ,  $SiO_2$ ,  $N_2O$ ,  $Fe_2O_3$  y elementos inmóviles Ti, Zr y Nb, indicando su relación con suelos destinados al cultivo quinua (e.g., Ss15, Ss19, Ss16 y otros). Además, este componente también refleja también influencias de rocas ígneas en la formación de algunos suelos (e.g., Ss08), evidenciando una asociación con materiales parentales ricos en silicatos y elementos inmóviles.

El componente principal 3 (PC3), que explica el 9.75 % de varianza total. Las cargas positivas altas (vectores propios  $>0.5$ ) incluyen variables como  $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$  y  $Fe_2O_3$ , vinculados a suelos derivados de rocas sedimentarias calcáreas (e.g., Ss09) y conglomerados (e.g., Ss14). Por otro lado, las cargas negativas se resaltan a suelos formados por rocas sedimentarias siliciclásticas (e.g., Ss03), en los que destaca los elementos inmóviles como Nb y Zr.

El componente principal 4 (PC4), que explica el 6.18 % de varianza. Las cargas positivas altas se destacan específicamente a suelos derivados de rocas ígneas intrusivas (e.g., Ss08). Y en cuanto a las cargas negativas se destaca a suelos derivados de rocas volcánicas (e.g., Ss13 y Ss18) y sedimentos arenosos (e.g., Ss19).

### 5.3.3.2.2 *Proyección de los datos en el espacio de Componentes Principales en suelos superficiales*

Tras seleccionar los componentes principales más relevantes, se procedió a proyectar los datos de las muestras de suelos superficiales en el espacio definido por estos componentes. Esta proyección de las muestras permite visualizar como se agrupan las muestras de suelo superficial en función de sus características geoquímicas.

Para este análisis, se utilizaron los primeros cuatro componentes principales, que explican un 94.4% de la varianza total. Se presentan la proyección de los datos en la [Figura 5.15](#), donde los gráficos bidimensionales combinando diferentes pares de componentes seleccionados.

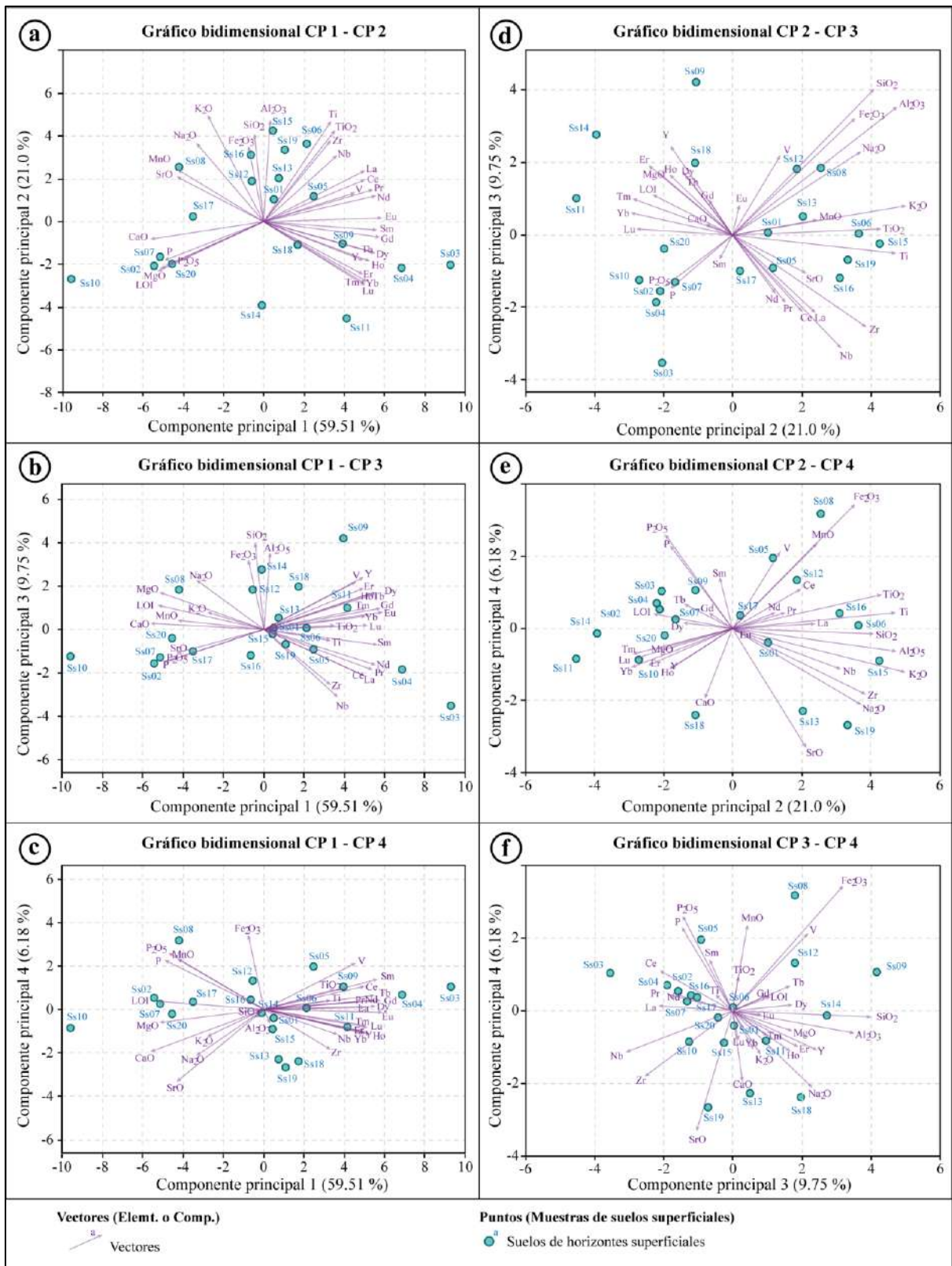
Los primeros componentes proyectados en el espacio bidimensional de PC1 y PC2 ([Figura 5.15a](#)) explican el 80.51 % de la varianza total, lo que representa la mayor proporción de información capturada. En esta gráfica se observan diferencias significativas entre suelos con altas contribuciones de óxidos mayores y elementos inmóviles (PC2 positivo), representando suelos arenosos y gravosos destinados al cultivo de quinua, así como suelos derivados de rocas intrusivas (e.g., Ss08). En el PC1 negativo, se diferencian los suelos de depósitos químicos (e.g., Ss10) y depósitos biogénicos (e.g., Ss02, Ss07), que presentan características composicionales distintas.

Similares tendencias se observan en las gráficas de los componentes PC1 y PC3 ([Figura 5.15b](#)) y PC1 y PC4 ([Figura 5.15c](#)), donde el eje PC1 conserva características relacionadas con la separación de suelos ricos en tierras raras frente a aquellos dominados por óxidos mayores.

En los componentes PC2 y PC3 ([Figura 5.15d](#)) y PC2 y PC4 ([Figura 5.15e](#)), el eje positivo de PC2 agrupa las muestras relacionadas con suelos destinados al cultivo de quinua, indicando una fuerte influencia de óxidos mayores. Por su parte, en el espacio bidimensional de PC3 y PC4 ([Figura 5.15f](#)), se destacan variaciones químicas más específicas. En particular, la muestra Ss08, derivada de rocas intrusivas, presenta valores altos en Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, evidenciando la relevancia de estos componentes para identificar diferencias puntuales en la composición geoquímica de los suelos superficiales.

**Figura 5.15**

Gráficos en espacios bidimensionales del PCA, definidos por la combinación de pares de componentes principales (CP) seleccionados para muestras de suelos superficiales.





### 5.3.3.3 Análisis de Clústering Jerárquico en suelos superficiales

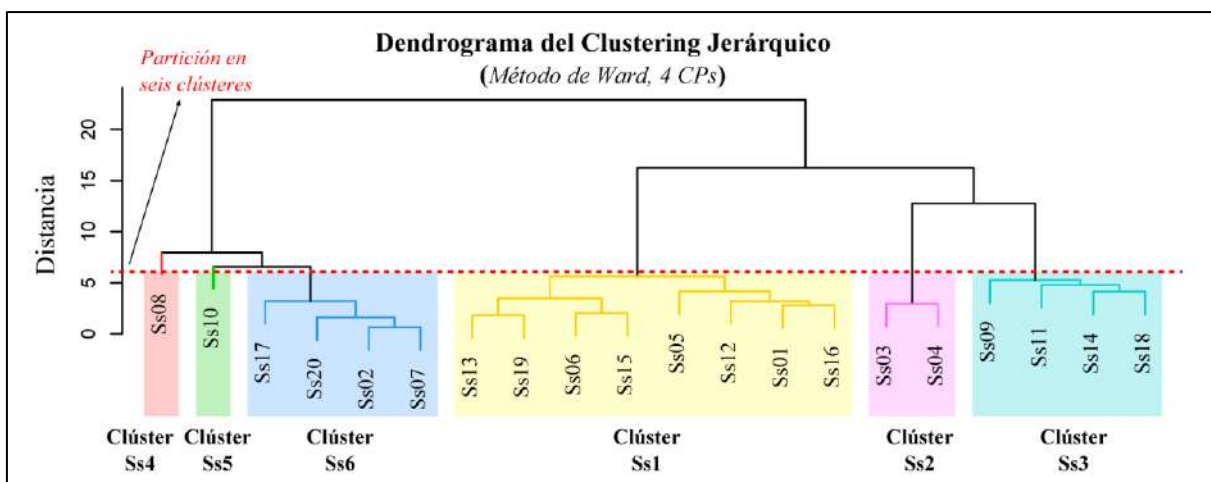
Al igual que los análisis de rocas y suelos profundos, se aplicó el clústering jerárquico a los suelos superficiales después de realizar el Análisis de Componentes Principales (PCA) en la matriz  $L$ . El objetivo fue identificar grupos de muestras con características geoquímicas similares.

Se utilizó la distancia euclidiana como medida de proximidad entre las muestras, y el método de enlace de Ward para formar clústeres que minimicen la variación dentro de cada grupo, asegurando así que los clústeres sean lo más homogéneos posible en términos de composición geoquímica. Esto permitió identificar agrupaciones naturales entre las muestras de suelos superficiales, facilitando su interpretación desde punto de vista de su material parental.

El dendrograma que muestra los resultados del clústering jerárquico se presenta en la [Figura 5.16](#), donde se visualiza cómo las muestras de suelos superficiales se agrupan en función de sus similitudes.

#### Figura 5.16

*Dendrograma del Clústering Jerárquico para las muestras de suelos de horizontes superficiales, utilizando el Método de Ward con los primeros cuatro componentes principales.*



En la [Figura 5.16](#), la línea roja entrecortada indica el punto de corte que divide las muestras en seis clústeres bien definidos. Estos clústeres agrupan muestras que comparten similitudes geoquímicas, como se muestra en la [Tabla 5.5](#).

**Tabla 5.5**

Resumen preliminar de seis clústeres agrupados según el análisis jerárquico, de las muestras de suelos superficiales.

Clústeres preliminares	Etiqueta simplificada	Etiqueta de la muestra	Nivel de profundidad	Material parental inferido	
				Litologías	Facies
Clúster Ss1	Ss13	GR38B-CA013-S	Horizonte Superficial	Toba	
	Ss19	GR38B-CA019-S	Horizonte Superficial		Arenas
	Ss06	GR38B-CA006-S	Horizonte Superficial		Gravas
	Ss15	GR38B-CA015-S	Horizonte Superficial		Arenas
	Ss05	GR38B-CA005-S	Horizonte Superficial		Gravas
	Ss12	GR38B-CA012-S	Horizonte Superficial	Caliza, lutita	
	Ss01	GR38B-CA001-S	Horizonte Superficial		Gravas
	Ss16	GR38B-CA016-S	Horizonte Superficial		Gravas
Clúster Ss2	Ss03	GR38B-CA003-S	Horizonte Superficial	Arenisca	
	Ss04	GR38B-CA004-S	Horizonte Superficial		Gravas
Clúster Ss3	Ss09	GR38B-CA009-S	Horizonte Superficial	Lutita	
	Ss11	GR38B-CA011-S	Horizonte Superficial	Caliza, lutita	
	Ss14	GR38B-CA014-S	Horizonte Superficial	Conglomerado	
	Ss18	GR38B-CA018-S	Horizonte Superficial	Toba	
Clúster Ss4	Ss08	GR38B-CA008-S	Horizonte Superficial	Granitoide	
Clúster Ss5	Ss10	GR38B-CA010-S	Horizonte Superficial		Químico
Clúster Ss6	Ss17	GR38B-CA017-S	Horizonte Superficial	Lava andesítica	
	Ss20	GR38B-CA020-S	Horizonte Superficial	Caliza	
	Ss02	GR38B-CA002-S	Horizonte Superficial		Orgánico
	Ss07	GR38B-CA007-S	Horizonte Superficial		Orgánico

Luego, de que los datos agrupados en clústeres, mediante el análisis PCA (Figura 5.15) y análisis jerárquico (Figura 5.16), con estos datos se proyecta en los dos primeros componentes (Figura 5.17).

A continuación, se describen los cinco clústeres obtenidos (ver Figuras 5.16, y Tabla 5.5):

- **Clúster Ss1 (suelos superficiales para el cultivo quinua):**

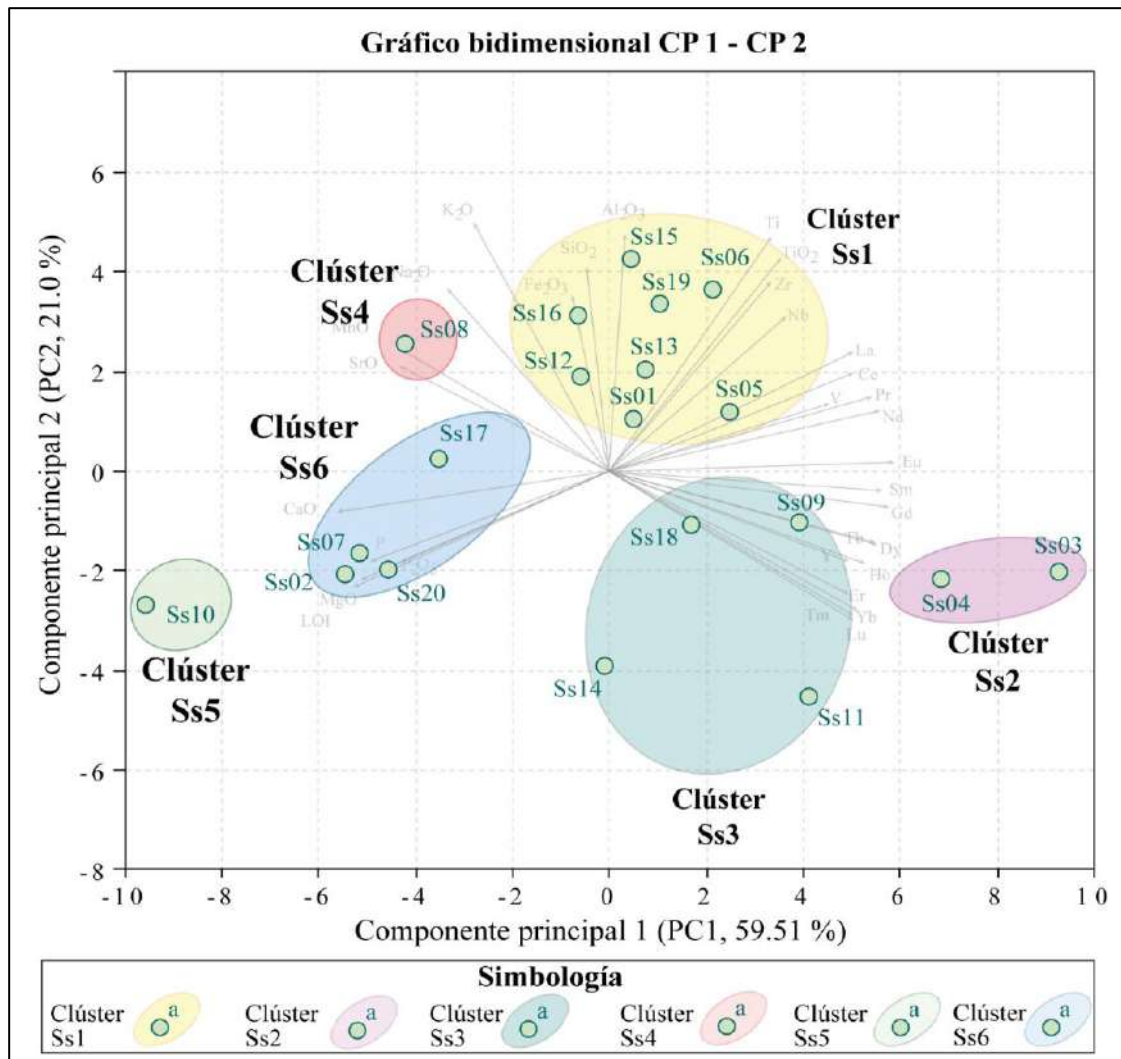
Agrupar muestras de suelos superficiales formados a partir de sedimentos no consolidados como arenas y gravas, destinados al cultivo de quinua.

- **Clúster Ss2:**

Agrupar suelos superficiales asociados a material sedimentario de composición calcáreo.

**Figura 5.17**

Proyección de los seis clústeres obtenidos del análisis jerárquico en suelos superficiales, en el espacio bidimensional de los primeros componentes (PC1 y PC2).



- **Clúster Ss3:**  
Similar al clúster Ss2, pero con suelos asociados a rocas sedimentarias calcáreas.
- **Clúster Ss4:**  
Este clúster está representado por una única muestra asociado a rocas ígneas plutónicas.
- **Clúster Ss5**  
Única muestra relacionado a suelos derivados de depósitos químicos.
- **Clúster Ss6:**  
Agrupa muestras relacionadas a rocas volcánicas y depósitos biogénicos.

Este análisis ha permitido identificar cómo los suelos superficiales se agrupan en función de su material parental y su composición geoquímica.

## 5.4 VALIDACIÓN DE LA ASOCIACIÓN EN ROCAS PARENTALES: PATRONES DE ELEMENTOS DE TIERRAS RARAS (REE)

Los elementos de tierras raras (*REE*, por sus siglas en inglés) son fundamentales para la validación de asociaciones litológicas, ya que proporcionan información crucial sobre los procesos geoquímicos que afectan a las rocas a lo largo del tiempo geológico.

Los *REE* comparten un estado de oxidación 3+, a excepción del cerio ( $\text{Ce}^{4+}$ ) y europio ( $\text{Eu}^{2+}$ ). Esto los convierte en “iones duros” que corresponden a un grupo de 14 elementos: La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb y Lu, diferenciados principalmente por su radio iónico. Estas diferencias implican que su compatibilidad aumenta desde los LREE (tierras raras ligeras, de La a Nd), que son relativamente incompatibles, hasta los HREE (tierras raras pesadas, de Dy a Lu), que son relativamente compatibles.

En este apartado, se emplean los patrones de REE para validar las asociaciones obtenidas previamente mediante el Análisis de Componentes Principales (*PCA*) y el clústering jerárquico. Los patrones REE permiten identificar aquellas rocas con un origen común o que han experimentado procesos similares de diferenciación, alteración o formación (Castillo, P. 2019).

Para el análisis, se consideran factores como la edad, la litología (tipo de roca y clasificación) y las asociaciones geoquímicas similares descritas en apartados anteriores. Los patrones de distribución *REE* se analizan dentro de los clústeres previamente definidos mediante *PCA* y clústering jerárquico, considerando similitudes litológicas.

Para la representación gráfica, se emplean gráficos multielemento que muestran concentraciones de REE en las rocas parentales. Estas concentraciones se normalizadas a la **condrita** (Taylor y McLennan, 1985) para identificar patrones geoquímicos característicos. Adicionalmente, se calcula la suma total de *REE* ( $\Sigma\text{REE}$ ), lo cual permite observar la concentración global de estos elementos característica de cada litología o facie.

Finalmente, los patrones *REE* se comparan con el patrón *REE* de la corteza superior (Rudnick y Gao, 2014). Además, de utilizar índices como  $[\text{LREE}/\text{HREE}]_N$ ,  $\text{MREE}^*$ ,  $\text{Eu}^*$  y  $\text{Ce}^*$  para analizar el enriquecimiento o empobrecimiento de los elementos de tierras raras, así como posibles anomalías de oxidación – reducción (ver Anexo C, Tabla C.4). Las concentraciones de *REE* en las rocas se presentan en la Tabla B.1 (ver Anexo B).

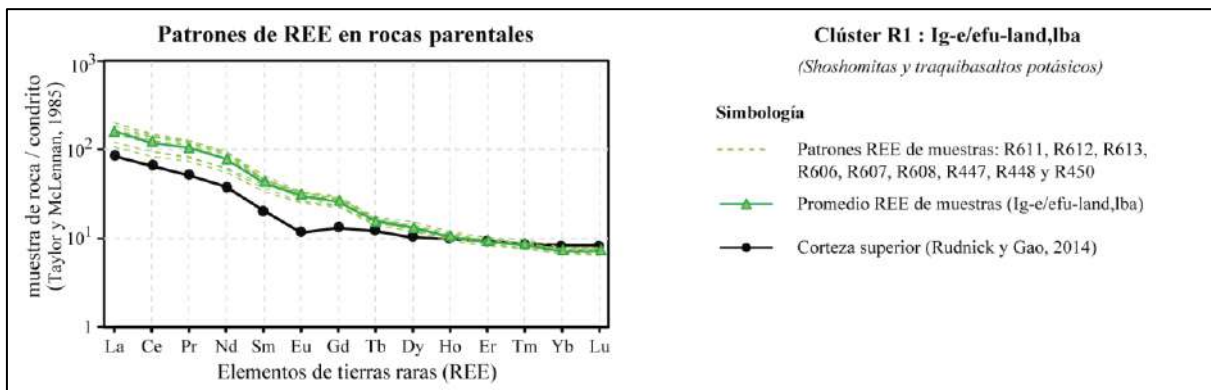
Este enfoque busca fortalecer los clústeres como validados que confirmen la asociación geoquímica de las muestras, fortaleciendo la relación del análisis robusto y técnicamente fundamentado. A continuación, se presentan los resultados y se analizan para los clústeres identificados preliminarmente:

#### 5.4.1 CLÚSTER R1: PATRONES RRE EN ROCAS VOLCÁNICAS

El clúster R1 agrupa principalmente muestras de rocas volcánicas del Cenozoico, que presentan un patrón característico en los elementos de tierras raras (*REE*) (ver [Figura 5.18](#) y [Tabla 5.6](#)). Estas muestras provienen de tres localidades: Chijullane, Jatun Huayco y el cerro Tola Pata, con tres muestras cada zona, sumando un total de nueve muestras.

#### Figura 5.18

Gráficos multielemento de los patrones *REE* en rocas volcánicas correspondientes al clúster R1, normalizados a los valores de la condrita.



Fuente: Taylor, S.R. y McLennan, S.M. (1985) para los valores de la condrita.

Al observar los promedios de los patrones *REE* de rocas volcánicas ([Figuras 5.18](#)), normalizado respecto a la condrita ([Taylor y McLennan, 1985](#)), se puede notar lo siguiente:

- Cerro Tola Pata :  $\sum REE=312.11-337.38$  ppm, con un promedio de  $\bar{X}_{\sum REE}=325.59$  ppm.
- Chijullane :  $\sum REE=269.9-313.31$  ppm, con un promedio de  $\bar{X}_{\sum REE}=290.79$  ppm.
- Jatun Huayco :  $\sum REE=198.07-220.7$  ppm, con un promedio de  $\bar{X}_{\sum REE}=212.88$  ppm.

En general, estos patrones son relativamente similares, mostrando enriquecimiento en los elementos ligeros de tierras raras (*LREE*, de La a Nd) que disminuye progresivamente hacia los elementos pesados de tierras raras (*HREE*, de Dy a Lu). Entre las localidades, el cerro Tola Pata y Chijullane son similares, y ambos presentan un mayor enriquecimiento

promedio en REE (asociado al Grupo Barroso), que Jatun Huayco presenta el menor enriquecimiento (asociado al Grupo Tacaza). El promedio total del patrón REE en el clúster R1 es de  $\bar{X}_{\Sigma REE} = 276.42$  ppm.

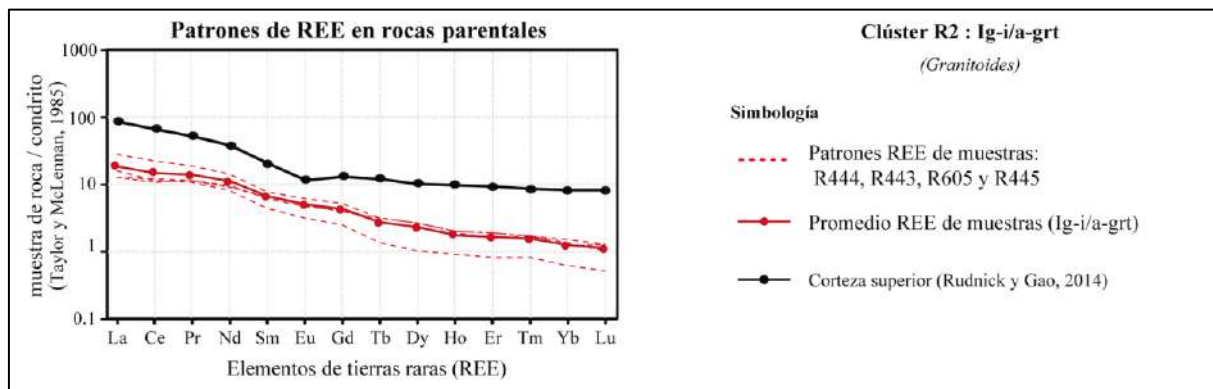
Los índices promedio normalizados respecto a la condrita,  $[LREE/HREE]_N$  muestra un fuerte a extremo enriquecimiento de LREE, con valores que oscilan entre 16.36 y 28.11 ( $LREE/HREE=21.92$ ). Los valores de  $MREE^*$  varían entre 0.69 y 0.86 ( $MREE^*=0.78$ ) indicando un leve empobrecimiento. La anomalía negativa leve de  $Eu^*$  oscila entre 0.86 y 0.97 ( $Eu^*=0.91$ ), mientras la anomalía de  $Ce^*$  es mínima, con valores que están entre 0.92 a 0.95 ( $Ce^*=0.94$ ; ver Tabla C.4, Anexos).

#### 5.4.2 CLÚSTER R2: PATRONES RRE EN ROCAS PLUTÓNICAS

El clúster R2 agrupa principalmente muestras de rocas ígneas plutónicas del Cenozoico pertenecientes al Plutón Cabana. Este clúster incluye un total de cuatro muestras, litológicamente compuesta por granitoides de grano grueso, predominando el cuarzo, la plagioclasa y el feldespato alcalino. Estas muestras exhiben un patrón característico en los elementos de tierras raras (REE) (ver Figura 5.19 y Tabla 5.6).

#### Figura 5.19

Gráficos multielemento de los patrones REE en rocas plutónicas correspondientes al clúster R2, normalizados a valores de la condrita.



Fuente: Taylor, S.R. y McLennan, S.M. (1985) para los valores de la condrita.

En las Figuras 5.19, se observa que las muestras de rocas intrusivas ácidas fueron normalizadas tanto al condrito (Taylor y McLennan, 1985). En general, los gráficos muestran que los patrones de REE de las rocas intrusivas son relativamente homogéneos; sin embargo, estos patrones están por debajo de los valores de la corteza superior (Rudnick y Gao, 2014).

Los índices promedio normalizado con respecto al condrito,  $[LREE/HREE]_N$  muestra valores que oscilan entre 9.97 y 30.11 ( $LREE/HREE=18.69$ ), lo que refleja leve enriquecimiento en LREE frente a HREE. Los valores de  $MREE^*$ , que varían entre 0.85 y 1.13 ( $MREE^*=0.96$ ) son cercanos a 1, elementos medios de tierras raras (MREE). Las anomalías de  $Eu^*$  también son cercanos a 1, con valores entre 0.85 y 0.99 ( $Eu^*=0.96$ ), mientras que las anomalías de  $Ce^*$  también son leves, con valores que van de 0.88 a 1.01 ( $Ce^*=0.93$ ; ver Tabla C.4, Anexos).

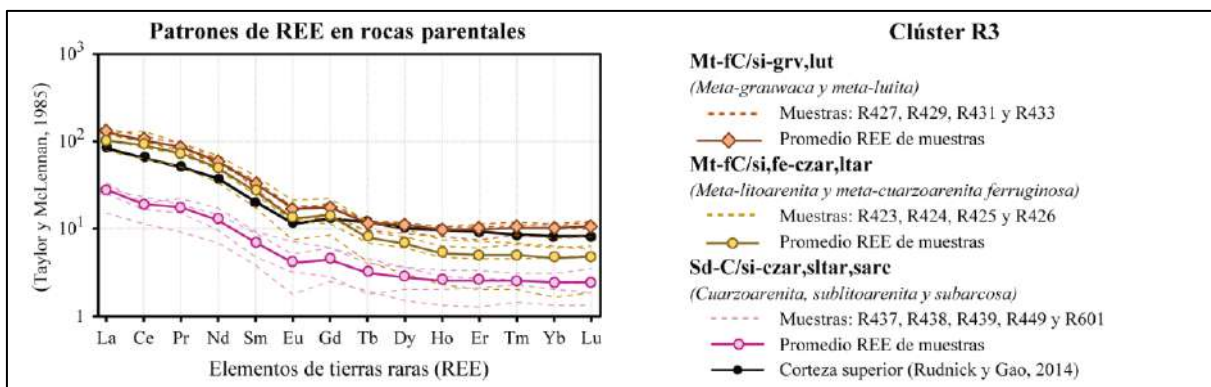
### 5.4.3 CLÚSTER R3: PATRONES REE EN ROCAS SEDIMENTARIAS SILICICLÁSTICAS

El clúster R3 agrupa principalmente muestras de rocas de origen sedimentario siliciclástico, caracterizadas por su alto contenido en minerales como el cuarzo. Este clúster incluye tanto rocas sedimentarias como rocas metamórficas de bajo grado, como meta-cuarzoarenitas, meta-sublitoarenitas y meta-subarcosas, pertenecientes al Grupo Cabanillas. También están presentes rocas sedimentarias de la Formación Huancané, compuesta principalmente por cuarzoarenitas, y de la Formación Auzangate, cuya parte basal incluye sublitoarenitas. En total, el clúster incluye ocho muestras de rocas metamórficas y cinco muestras de rocas sedimentarias.

Los patrones de elementos de tierras raras (*REE*) de las muestras de este clúster (ver Figura 5.20) revelan diferencias marcadas entre los tipos de roca, reflejando los distintos procesos geoquímicos que afectaron a cada grupo.

#### Figura 5.20

Gráficos multielemento de los patrones REE en rocas de origen sedimentario siliciclásticas correspondientes al clúster R3, normalizados a los valores de la condrita.



Fuente: Taylor, S.R. y McLennan, S.M. (1985) para los valores de la condrita.

En la Figura 5.20, los patrones de REE para las rocas metamórficas y sedimentarias, normalizados al condrito, muestran que las rocas metamórficas del Grupo Cabanillas tienen

un mayor enriquecimiento de REE en comparación con las rocas sedimentarias de las formaciones Huancané y Auzangate.

Las rocas metamórficas presentan un enriquecimiento notable de *LREE* (La a Nd) que disminuye progresivamente hacia los *HREE*, mientras que las rocas sedimentarias exhiben patrones más planos y menos enriquecidos, están por debajo de los valores la corteza superior.

El patrón promedio de REE en rocas metamórficas, con muestras de meta-grauwacas y meta-lutitas (muestras: R427, R429, R431 y R433), muestran concentraciones promedio de  $\bar{X}_{\Sigma REE} = 225.31$  ppm ( $\Sigma REE = 214.07-238.93$  ppm). Estas muestras presentan un ligero enriquecimiento en comparación con las muestras de meta-cuarzoarenitas (muestras: R423, R424, R425 y R426), que tienen un promedio de  $\bar{X}_{\Sigma REE} = 187.66$  ppm ( $\Sigma REE = 129.70-256.37$  ppm).

Por otro lado, las rocas sedimentarias presentan patrones más homogéneos, con un promedio de  $\bar{X}_{\Sigma REE} = 45.17$  ppm (rango:  $\Sigma REE = 25.36-57.11$  ppm) para la Formación Huancané (muestras: R437, R438 y R439), y un promedio de  $\bar{X}_{\Sigma REE} = 46.00$  ppm (rango:  $\Sigma REE = 37.97-54.02$  ppm) para las muestras pertenecientes a la Formación Auzangate (muestras: R449 y R601). En promedio, las rocas sedimentarias presentan un valor total de  $\bar{X}_{\Sigma REE} = 45.5$  ppm.

En este clúster R3, se agrupa en tres subgrupos que difieren en el tipo de roca, pero que comparten una composición química relativamente similar, además de estar condicionadas por su edad geológica y procesos de formación.

Con estos tres subgrupos definidos, se comenzará analizando las rocas metamórficas y, posteriormente, las rocas sedimentarias.

Los índices promedio en rocas metamórficas se tienen para las litologías meta-grauwacas y meta-lutitas (Mt-fC/si-grv,lut), los índices promedio como  $[LREE/HREE]_N$ , normalizados con respecto al condrito, para este subgrupo oscilan entre 10.25 y 18.24 ( $LREE/HREE=12.94$ ), lo que indica un enriquecimiento de LREE frente a HREE. Los valores de  $MREE^*$  varían entre 0.38 y 0.57 ( $MREE^*=0.47$ ), indicando un empobrecimiento significativo en los elementos medios de tierras raras (MREE), y en las anomalías de europio ( $Eu^*$ ) son moderadamente negativas, con valores que oscilan entre 0.66 y 0.75 ( $Eu^*=0.70$ ),



mientras que las anomalías de cerio ( $Ce^*=0.99$ ) presentan tienden a la unidad, con valores entre 0.093 y 1.04.

Para el subgrupo de meta-cuarzoarenitas y meta-litoarenitas ferruginosas y siliciclasticas “Mt-fC/si,fe-czar,ltar” los índices promedio como  $[LREE/HREE]_N$ , oscilan entre 16.52 a 42.27 ( $LREE/HREE = 25.39$ ) que indica un enriquecimiento significativo de LREE con respecto a HREE, y en cuanto a los elementos medios (MREE) son moderadamente empobrecidos con valores que oscilan entre 0.52 a 0.82 ( $MREE^*=0.65$ ) y en cuanto a las anomalías de europio ( $Eu^*=0.65$ ) y cerio ( $Ce^*=0.67$ ) son moderadamente negativas.

Por otro lado, para el subgrupo de las rocas sedimentarias que incluye cuarzoarenitas, sublitoarenitas y subarcosas “Sd-C/si-czar,slta,sarc”, presentan índices de  $[LREE/HREE]_N$  también están enriquecidos, pero en menor proporción, con valores que oscilan entre 8.31 y 14.30 ( $LREE/HREE=11.92$ ). Los valores de  $MREE^*$  varían entre 0.41 y 0.67 ( $MREE^*=0.54$ ), lo que indica un empobrecimiento en estos elementos en comparación con los LREE y HREE. Las anomalías de  $Eu^*$  son moderadamente negativas, con valores que oscilan entre 0.54 y 0.96 ( $Eu^*=0.73$ ), mientras que las anomalías de  $Ce^*$  presentan una mayor variabilidad, con valores que oscilan entre 0.71 y 0.98 ( $Ce^*=0.88$ ).

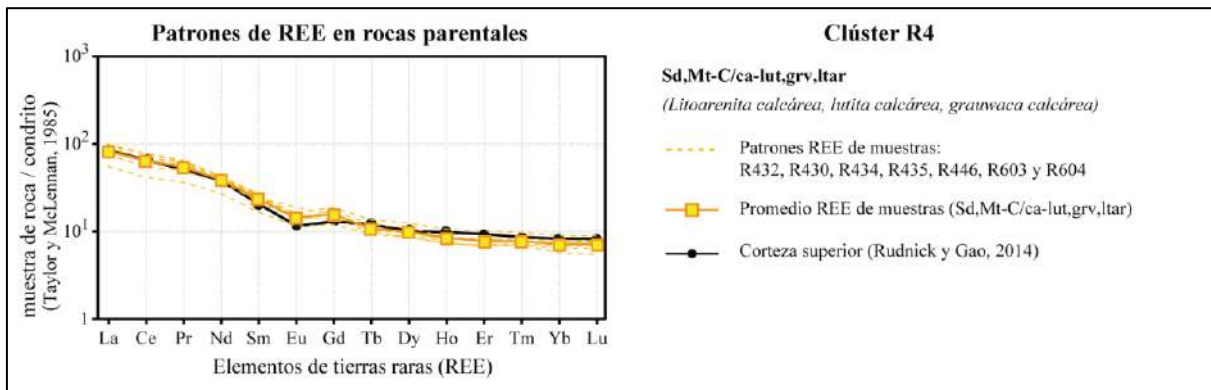
#### **5.4.4 CLÚSTER R4: PATRONES RRE EN ROCAS SEDIMENTARIAS CALCÁREAS**

El clúster R4 agrupa principalmente muestras de roca sedimentarias calcáreas, caracterizados por contener en su composición más del 4 % de óxido de calcio (CaO). Este tipo de rocas está relacionado con ambientes de deposición marina somera o continental, lo que permite su diferenciación geoquímica.

Al identificar los materiales parentales agrupados con composición calcárea en el clúster R4, se tiene al Grupo Cabanillas (muestras: R432 y R430) del Paleozoico, Formación Chupa/Sipín (muestras: R434 y R435,) del periodo Jurásico, y la Formación Vilquechico (muestras: R446, R603 y R604), para el Cretácico superior – Paleoceno.

**Figura 5.21**

Gráficos multielemento de los patrones REE en rocas de origen sedimentario calcáreo correspondientes al clúster R4, normalizados a los valores de la condrita.



Fuente: Taylor, S.R. y McLennan, S.M. (1985) para los valores de la condrita.

Por lo que al comparar los patrones REE (ver figuras 5.21), en general, se tiene que al comparar existe similitudes. De las cuales los patrones de REE de las muestras de litoarenitas calcárea de la Formación Chupa/Sipín y muestras de lutita calcárea de la Formación Vilquechico son relativamente similares. Donde los patrones de REE de las litoarenitas calcáreas ( $\sum REE=153.94-171.97$  ppm;  $\bar{X}_{\sum REE}=162.96$  ppm) y lutitas ( $\sum REE=100.33-150.38$  ppm;  $\bar{X}_{\sum REE}=127.43$  ppm) de las formaciones Chupa/Sipín y Vilquechico respectivamente, son contrastantes con los valores del promedio de la corteza terrestre (ver Figura 5.21a).

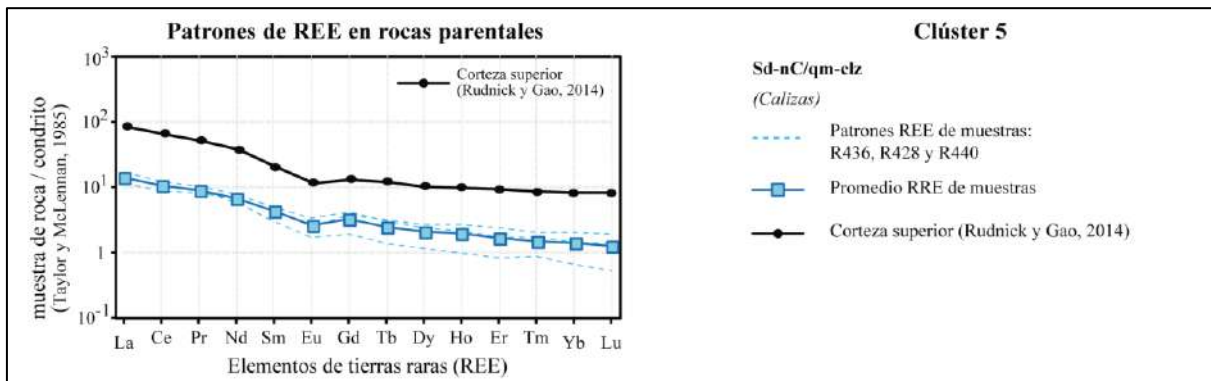
Los índices promedio al condrito, como  $[LREE/HREE]_N$  que oscilan con valores que oscilan de 8.78 a 13.96 ( $LREE/HREE=11.73$ ), indica un ligero enriquecimiento,  $MREE^*$  que oscilan distribuidos entre 0.56 a 0.80 ( $MREE^*=0.65$ ), y las anomalías de europio ( $Eu^*=0.76$ ) son moderadamente negativos, y las anomalías de cerio ( $Ce^*=0.96$ ) son cercanos a la unidad no presentan anomalías.

#### 5.4.5 CLÚSTER R5: PATRONES REE EN ROCAS CARBONATADAS

El clúster R5 agrupa muestras de rocas sedimentarias carbonatadas, cuya composición principal está dominada por carbonatos, tales como calcita. Estas rocas se originan en ambientes netamente marinos, pero presentan diferencias importantes en su composición geoquímica con las rocas calcáreas del clúster R4, lo que justifica su agrupación separada. Este clúster incluye tres muestras, que corresponden a calizas de la era del Mesozoico, específicamente de la Formación Chupa/Sipín y de la Formación Ayabacas, este último caracterizada por la presencia de calizas en forma de olistolitos.

**Figura 5.22**

Gráficos multielemento de los patrones REE en rocas de origen sedimentario carbonatado correspondientes al clúster R5, normalizados a los valores de la condrita.



Fuente: Taylor, S.R. y McLennan, S.M. (1985) para los valores de la condrita.

En las Figuras 5.22, se observan los patrones de REE de tres muestras: R436 de la Formación Chupa /Sipín, y las muestras R428 y R440 de la Formación Ayabacas, que difieren en edad. El patrón REE de la Formación Ayabacas (Cretácico;  $\Sigma\text{REE}=22.89\text{-}29.29$  ppm,  $\bar{X}_{\Sigma\text{REE}}=26.09$  ppm) es similar a la Formación Chupa/Sipín (Jurásico superior;  $\Sigma\text{REE}=22.82$  ppm), mostrando un empobrecimiento considerable con respecto a los valores de la corteza superior (Rudnick y Gao, 2014).

En conjunto, estas muestras presentan concentraciones promedio muy bajas de REE, con un valor de  $\bar{X}_{\Sigma\text{REE}} = 25.00$  ppm. Los índices promedio con datos normalizados al condrito,  $[\text{LREE}/\text{HREE}]_N$  que oscilan con valores dispersos entre 6.08 a 27.51 ( $\text{LREE}/\text{HREE}=15.42$ ) enriquecidos,  $\text{MREE}^*$  que oscila 0.68 a 0.86 ( $\text{MREE}^*=0.79$ ) muestra un empobrecimiento de estos elementos medios, y las anomalías de europio ( $\text{Eu}^*=0.70$ ) son negativas moderadas, y sus anomalías de cerio ( $\text{Ce}^*=0.91$ ) tienden a la unidad.

### 5.4.6 RESUMEN DE VALIDACIÓN DE CLÚSTERES EN ROCAS

La validación de los clústeres en las muestras de roca estudiadas, utilizando patrones de tierras raras (REE), han sido esencial para confirmar las asociaciones litológicas y geoquímicas previamente establecidas mediante el Análisis de Componentes Principales (PCA) y el clústering jerárquico. A continuación, se presenta las agrupaciones confirmadas, que serán reasignadas con etiquetas que describen las características principales, como la litología predominante, valores promedio de REE y los índices geoquímicos (ver Tabla 5.6).

**Tabla 5.6**

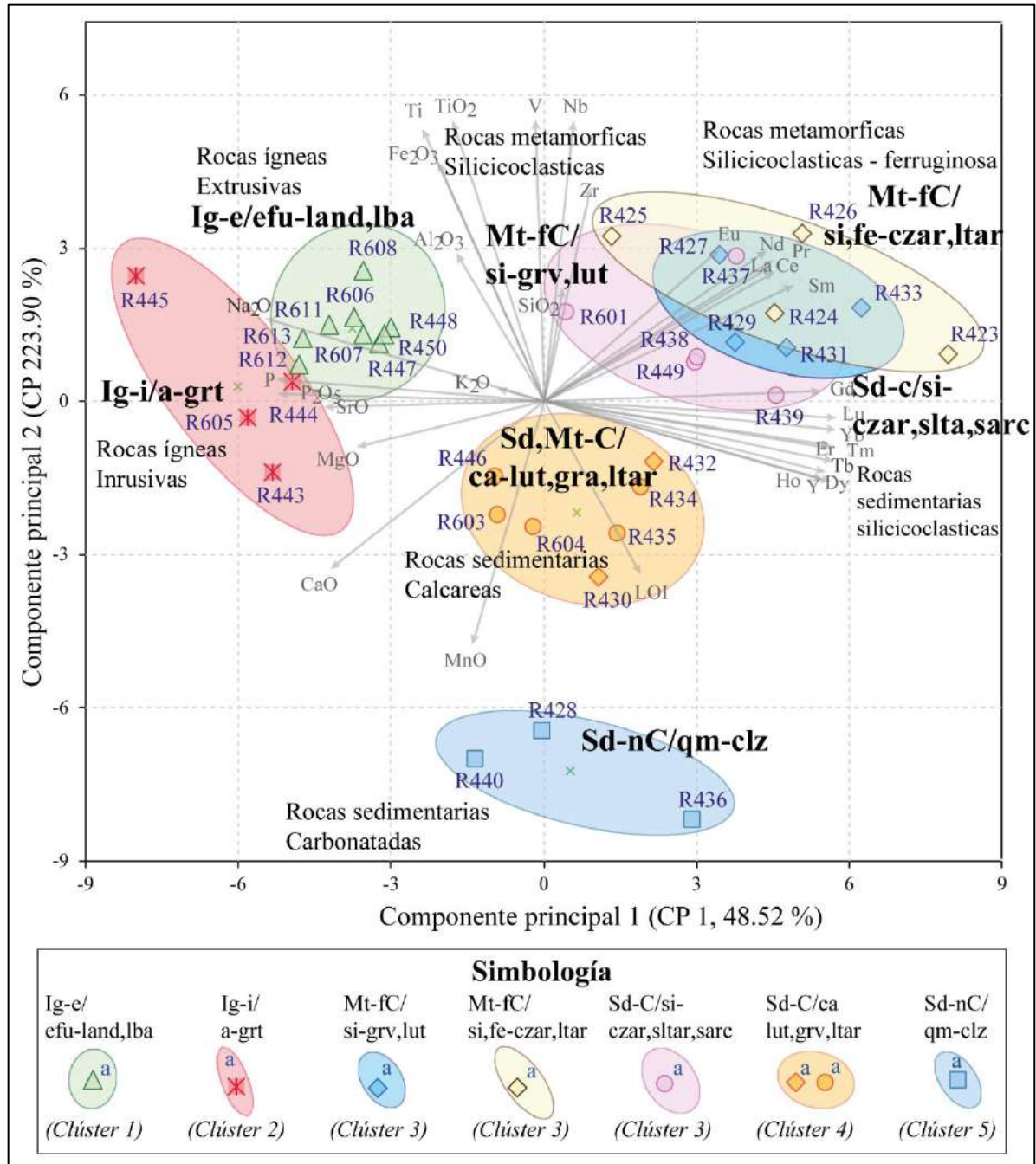
Tabla resumen de las agrupaciones validadas para las rocas.

Clústeres	Etiqueta simplificada	Litología	REE	Litología agrupada y validada (Etiqueta)	$\bar{X}_{\Sigma REE}$	Normalizado al condrito (Taylor y McLennan, 1985)									
						[LREE/HRREE]N	MREE*	Eu*	Ce*						
Clúster R1	R611	Traquibasalto potásico	220.70	Shoshonitas y traquibasaltos potásicos (Ig-e/efu-land,lba)	276.42	21.92	0.78	0.91	0.94						
	R612	Traquibasalto potásico	198.07												
	R613	Traquibasalto potásico	219.87												
	R606	Shoshonita	289.15												
	R607	Shoshonita	269.90												
	R608	Traquibasalto potásico	313.31												
	R447	Shoshonita	312.11												
	R448	Shoshonita	327.29												
Clúster R2	R450	Shoshonita	337.38	Granitoides (Ig-i/a-grt)	34.47	18.69	0.96	0.96	0.93						
	R444	Cuarzosienita	51.39												
	R443	Monzogranito	30.32												
	R605	Cuarzosienita	28.82												
Clúster R3	R445	Granito alcalino	27.34	Meta-grauvacas y meta-lutitas (Mt-fC/si-grv,lut)	225.31	12.94	0.47	0.70	0.99						
	R429	Meta-lutita	224.69												
	R431	Meta-grauwaca	214.07												
	R433	Meta-grauwaca	223.54												
	R427	Meta-grauwaca	238.93												
	R423	Meta-cuarzoarenita Fe +	256.37							Meta-cuarzoarenita feruginosa y meta-litoarenita (Mt-fC/si,fe-czar,ltar)	187.66	25.39	0.65	0.67	1.06
	R426	Meta-litoarenita	182.8												
	R424	Meta-cuarzoarenita Fe	181.78												
	R425	Meta-cuarzoarenita Fe	129.7												
	R437	Sublitoarenita	57.11												
	Clúster R4	R438	Cuarzoarenita							25.36	Cuarzoarenita, sublitoarenita y subarcosa (Sd-C/si-czar,slta,sarc)	45.5	11.92	0.54	0.73
R439		Subarcosa	53.04												
R449		Sublitoarenita	54.02												
R601		Sublitoarenita	37.97												
R432		Litoarenita calcárea	165.56	Litoarenita calcárea, lutita calcárea, grauwaca calcárea (Sd,Mt-C/ca-lut,grv,ltar)	147.55	11.73	0.65	0.76	0.96						
R430		Caliza	159.09												
R434		Litoarenita calcárea	171.97												
R435	Litoarenita calcárea	153.94													
R446	Lutita calcárea	131.57													
R603	Grauwaca calcárea	100.33													
R604	Lutita calcárea	150.38													
Clúster R5	R436	Caliza	22.82	Calizas (Sd-nC/qm-clz)	25.00	15.42	0.79	0.70	0.91						
	R428	Caliza	22.89												
	R440	Caliza	29.29												

Estas agrupaciones también se representar gráficamente mediante la proyección bidimensional de los componentes principales (PC1 y PC2) (ver Figura 5.23).

**Figura 5.23**

Diagrama bidimensional de componente principales CP1 y CP2, mostrando las agrupaciones confirmadas de las rocas.



En la Figura 5.23, se observan las agrupaciones validadas y descritas según su clasificación litológica. Las representan la separación entre diferentes tipos de rocas, asignando etiquetas específicas que reflejan las características principales de cada agrupación:

### Sub grupos del Clúster R1

- **Sub grupo : Ig-e/efu-land,lba**

Corresponde al clúster R1, que describe a las rocas ígneas (Ig), clasificadas como extrusivas (e), de tipo efusivo (efu), constituidas por litologías características de rocas volcánicas efusivas de lavas andesíticas, andesitas basálticas, andesitas y lavas basálticas (land, lba).

### Sub grupos del Clúster R2

- **Sub grupo : Ig-i/a-grt**

Para el clúster R2, que describe también a rocas ígneas (Ig), pero clasificadas como intrusivas (i), de tipo ácido (a), compuestas por litologías de granitoides (grt), como cuarzosienitas, granitos alcalinos y monzogranitos.

### Sub grupos del Clúster R3

- **Sub grupo : Mt-fC/si-grv,lut**

Se refiere al primer subgrupo del clúster R3, que describe a las rocas metamórficas de bajo grado (Mt), clasificadas como foliadas de protolito clástico (fC), compuesta principalmente por sílice (si) por litologías que incluyen meta-lutitas, meta-grauwacas.

- **Sub grupo : Mt-fC/si,fe-czar,ltar**

Describe al segundo subgrupo del clúster R3, que abarca rocas metamórficas de bajo grado (Mt), clasificadas como foliadas de origen clástico (fC), compuesta por sílice y ferruginosa (si,fe) y con litologías de meta-cuarzoarenitas y meta-litoarenitas (czar, ltar).

- **Sub grupo : Sd-C/si-czar,slta,sarc**

Describe al tercer subgrupo del clúster R3, que abarca netamente de rocas sedimentarias (Sd) clásticas (C), compuesta principalmente de sílice (si) de litologías como cuarzoarenitas, sublitoarenitas y subarcosas (czar,slta,sarc).

#### **Sub grupos del Clúster R4**

- **Sub grupo : Sd,Mt-C/ca-lut,grv,ltar**

Corresponde al clúster R4, que describe a rocas sedimentarias y metamórficas (Sd,Mt), clasificadas como clásticas (C), con una matriz calcárea (ca) y compuesta por lutitas, grauwas y litoarenitas (lut,grav,ltar).

#### **Sub grupos del Clúster R5**

- **Sub grupo : Sd-nC/qm-clz**

Describe a rocas sedimentarias (Sd) clasificadas como no clásticas (nC), de tipo químico (qm), litológicamente compuesta por calizas (clz).

En síntesis, la validación mediante los patrones de REE han demostrado ser una herramienta eficaz para confirmar las siete agrupaciones en rocas establecidas mediante el análisis multivariante.

## 5.5 VALIDACIÓN DE LA ASOCIACIÓN EN SUELOS PROFUNDOS: PATRONES DE ELEMENTOS DE TIERRAS RARAS (REE)

Los elementos de tierras raras (*REE*, por sus siglas en inglés) son esenciales para la validación geoquímica en suelos profundos, ya que permiten identificar las influencias litológicas y los procesos de meteorización que han afectado a los suelos a lo largo del tiempo. Al igual que en el análisis de rocas, los patrones *REE* son fundamentales para detectar suelos que comparten un origen similar o que han atravesado procesos similares de formación, alteración o diferenciación (Avilés, I. A. 2024; Castillo, P. 2019). Los *REE* son una herramienta valiosa en geoquímica debido a su comportamiento relativamente coherente durante procesos geológicos, lo que los convierte en indicadores confiables de las condiciones químicas del medio.

En este apartado, se emplean los patrones *REE* para validar las asociaciones obtenidas previamente mediante el análisis jerárquico. Estos patrones permiten identificar la continuidad de los procesos geoquímicos desde la roca parental hasta los horizontes profundos del suelo, validando así la asociación de los clústeres previamente establecidos. Además, los suelos profundos proporcionan información geoquímica más estable y menos alterada por condiciones superficiales y procesos como la bioturbación, lo que los convierte en un registro confiable de las influencias litológicas originales.

Los patrones de *REE* en suelos profundos pueden utilizarse para inferir la influencia geoquímica de las rocas parentales. Para visualizar y analizar estos patrones, se emplearán gráficos multielemento que representen concentraciones *REE* en los suelos profundos. Las concentraciones serán normalizadas al promedio global de suelos (Kabata-Pendias, 2010), lo que permitirá *caracterizar y comparar* los patrones *REE* de los suelos, destacando cualquier enriquecimiento o empobrecimiento de los elementos ligeros (LREE), medios (MREE) o pesados (HREE) de tierras raras. Asimismo, se analizarán las anomalías de cerio (Ce\*) y europio (Eu\*) para evaluar posibles procesos de oxidación-reducción.

Los contenidos de *REE*, calculados en diferentes suelos profundos, se presentan en la [Tabla D.2](#) (ver [Anexo D](#)). Este análisis no solo permitirá validar los clústeres de suelos profundos obtenidos previamente, sino que también se establecerá una base cuantitativa para comparar las asociaciones geoquímicas de suelos profundos con las litológicas validadas en los apartados anteriores.



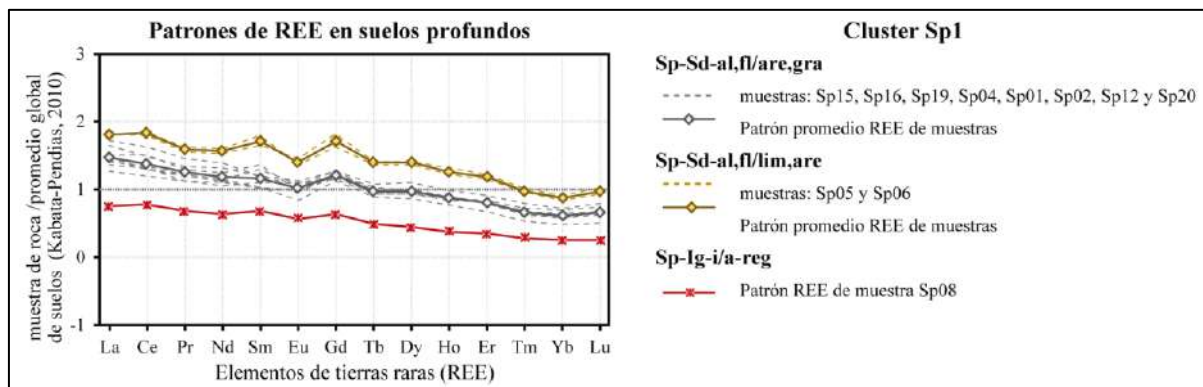
### 5.5.1 CLÚSTER Sp1: PATRONES REE EN SUELOS PROFUNDOS DERIVADOS DE FACIES NO CONSOLIDADAS E INTRUSIVA

El clúster Sp1 agrupa suelos profundos originados a partir de facies sedimentarias no consolidadas, principalmente asociadas con los depósitos de la Formación Azángaro y depósitos aluviales. Estos sedimentos están compuestos predominantemente por gravas, arenas, y en menor proporción, limos, lo que refleja un ambiente sedimentario aluvial y fluvial de intramontaña.

Los clastos que conforman estos sedimentos están constituidos principalmente por rocas volcánicas efusivas, seguidas por rocas volcánicas explosivas, lo que evidencia la influencia de procesos volcánicos en el origen de los materiales parentales. Además, el clúster incluye una muestra representativa derivada de rocas ígneas intrusivas, presente en forma de regolito (e.g., Sp08), lo que sugiere una contribución puntual de este tipo de litología al clúster.

#### Figura 5.24

Gráficos multielemento de los patrones REE en suelos profundos derivados de facies no consolidadas e intrusivas correspondientes al clúster Sp1, normalizados a los valores del promedio global de suelos.



Fuente: Kabata-Pendias (2010) para los valores del promedio global de suelos.

En la Figura 5.24, se diferencian tres patrones REE. En el cual los suelos profundos derivados de las facies de la Formación Azángaro y depósitos aluviales muestran un mayor enriquecimiento en comparación con los patrones de suelos derivados de rocas ígneas. El mayor enriquecimiento en REE se observa en las muestras Sp05 y Sp06 (sub grupo: **Sp-Sd-al,fl/lim,are**), con concentraciones promedio de  $\bar{X}_{\Sigma REE}=232.28$  ppm, asociadas con horizontes de limos, gravas y arena. Estas muestras, presentan índices promedio normalizados al promedio global de suelos como  $[LREE/HREE]_N = 1.86$ ,  $MREE^*=1.29$ ,  $Eu^*=0.83$ ,  $Ce^*=1.08$ , lo que indica un enriquecimiento moderado de las tierras raras ligeras

(*LREE*) con respecto a las pesadas (*HREE*), un ligero enriquecimiento en tierras raras medias (*MREE*) y una anomalía negativa de europio.

En contraste, las muestras Sp15, Sp16, Sp19, Sp04, Sp01, Sp02, Sp12 y Sp20 (sub grupo: **Sp-Sd-al,fl/are,grv**), también derivadas de facies no consolidadas, muestran menores concentraciones con un promedio de  $\bar{X}_{\Sigma REE}=177.06$  ppm, representando horizontes arenosos y gravosos. Los índices asociados para este grupo  $[LREE/HREE]_N=2.26$ ,  $MREE^*=1.23$ ,  $Eu^*=0.86$ ,  $Ce^*=1.02$ , lo que denota un enriquecimiento marcado de las tierras raras ligeras (*LREE*) en comparación con las pesadas (*HREE*), ligero enriquecimiento en tierras raras medias (*MREE*), una anomalía negativa de europio, y anomalía de cerio prácticamente neutra.

Finalmente, los suelos derivados de rocas ígneas intrusivas, representado por la muestra Sp08 (sub grupo: **Sp-Ig-i/a-reg**), presenta las menores concentraciones de REE con un valor de  $\Sigma REE=94.59$  ppm. Los índices asociados para esta muestra son  $[LREE/HREE]_N=3.06$ ,  $MREE^*=1.45$ ,  $Eu^*=0.87$ ,  $Ce^*=1.09$ , lo que denota un fuerte enriquecimiento en LREE, un ligero enriquecimiento en MREE y una anomalía de europio.

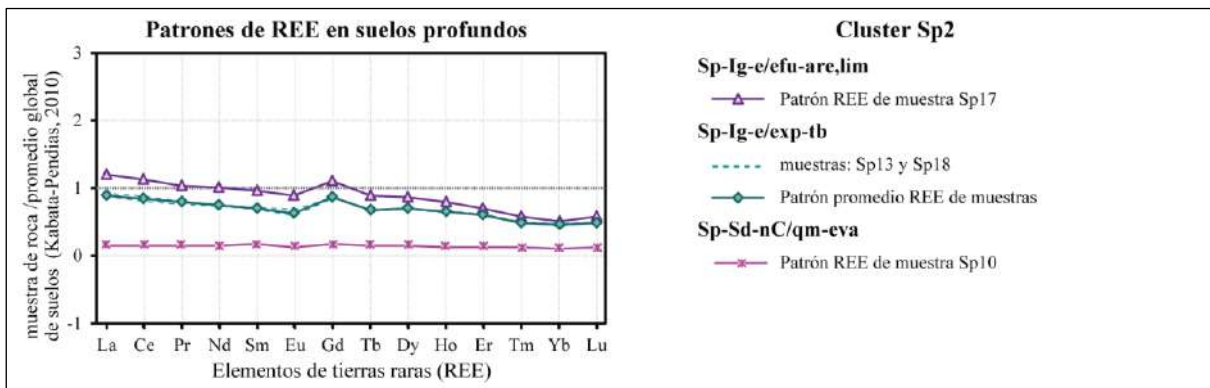
En síntesis, los patrones REE en los suelos del clúster Sp1 se diferencian en tres subgrupos según su concentración de REE y los índices normalizados asociados.

### 5.5.2 CLÚSTER Sp2: PATRONES REE EN SUELOS PROFUNDOS DERIVADOS DE ROCAS VOLCÁNICAS Y QUÍMICAS

El clúster Sp2 agrupa suelos profundos originados principalmente a partir de rocas volcánicas efusivas y explosivas, así como suelos derivados de depósitos químicos. El subgrupo Sp-Ig-e/efu-are,lim está representado por la muestra Sp17, asociada a suelos profundos desarrollados a partir de materiales volcánicos efusivos, característicos de un horizonte limo arenoso. Por su parte, el subgrupo Sp-Ig-e/exp-tb, conformado por las muestras Sp13 y Sp18, incluye suelos derivados de materiales volcánicos explosivos, relacionados con horizontes CR (capa regolítica), que corresponden a litologías piroclásticas como las tobas. Finalmente, el subgrupo Sp-Sd-nC/qm-eva, representado por la muestra Sp10, está asociado a depósitos químicos, predominantemente compuestos por evaporitas, posiblemente originados por el ascenso de fluidos salinos mediante procesos diapíricos.

**Figura 5.25**

Gráficos multielemento de los patrones REE en suelos profundos correspondientes al clúster Sp2, normalizados a los valores del promedio global de suelos.



Fuente: Kabata-Pendias (2010) para los valores del promedio global de suelos.

De la Figura 5.25, se observan claras diferencias entre los patrones REE de los subgrupos. Los suelos profundos derivados de rocas volcánicas efusivas (**Sp-Ig-e/efu-are,lim**) presentan las mayores concentraciones de REE, con un valor de  $\Sigma\text{REE} = 146.73$  ppm. En comparación, las muestras pertenecientes al subgrupo **Sp-Ig-e/exp-tb**, derivadas de rocas volcánicas explosivas, muestran un menor enriquecimiento que las efusivas con una concentración promedio de  $\bar{X}_{\Sigma\text{REE}} = 110.24$  ppm. Por otro lado, el subgrupo **Sp-Sd-nC/qm-eva**, correspondiente a depósitos químicos, tiene las concentraciones más bajas de REE, con un valor de  $\Sigma\text{REE} = 19.46$  ppm, evidenciando una marcada diferenciación geoquímica respecto a los subgrupos volcánicos.

En cuanto a los índices promedio, los suelos profundos derivados de rocas volcánicas muestran patrones distintivos. El subgrupo **Sp-Ig-e/efu-are,lim** evidencian mayores concentraciones relativas de LREE respecto a HREE, reflejando en un valor de  $[\text{LREE}/\text{HREE}]_N = 2.10$ , en comparación con el sub grupo **Sp-Ig-e/exp-tb**, que tiene un valor de  $[\text{LREE}/\text{HREE}]_N = 1.84$ . Ambos subgrupos presentan anomalías negativas de europio, ( $\text{Eu}^* = 0.87$  y  $\text{Eu}^* = 0.82$  respectivamente) y una relación neutra en cerio ( $\text{Ce} \approx 1$ ).

En contraste, el subgrupo **Sp-Sd-nC/qm-eva** muestra un comportamiento direnciado, con un valor de  $[\text{LREE}/\text{HREE}]_N = 1.4$ , indicando un menor enriquecimiento relativo de LREE en comparación con los subgrupos volcánicos. Además, exhibe un leve enriquecimiento en MREE, reflejando en un valor de  $\text{MREE}^* = 1.28$ , y una anomalía negativa de europio más pronunciada ( $\text{Eu}^* = 0.81$ ).

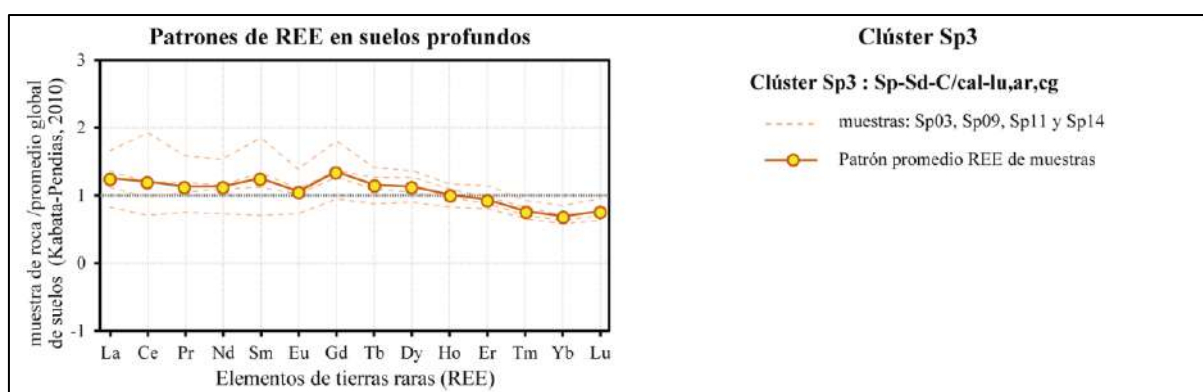
En resumen, los patrones REE en suelos profundos permiten diferenciar claramente entre los tres subgrupos: suelos derivados de rocas volcánicas efusivas, explosivas y depósitos químicos, cada uno con características geoquímicas distintivas.

### 5.5.3 CLÚSTER Sp3: PATRONES REE EN SUELOS PROFUNDOS DERIVADOS ROCAS SEDIMENTARIAS

El clúster Sp3 agrupa suelos profundos derivados principalmente de rocas sedimentarias, cuya composición geoquímica refleja la influencia directa de su litología parental. Estas muestras corresponden a suelos menos alterados, asociados a rocas sedimentarias calcáreas. Dentro de este clúster, se incluyen las muestras provenientes de rocas clásticas finas calcáreas pertenecientes a la Formación Ayabacas (Sp11) y la Formación Vilquechico (Sp09). Además, se cuenta con una muestra derivada de areniscas calcáreas de la Formación Taraco? (Sp03) y otra proveniente del Grupo Puno (Sp14), caracterizada litológicamente por conglomerados. En total, este clúster asocia cuatro muestras.

#### Figura 5.26

Gráficos multielemento de los patrones REE en suelos profundos correspondientes al clúster Sp3, normalizados a los valores del promedio global de suelos.



Fuente: Kabata-Pendias (2010) para los valores del promedio global de suelos.

De la Figura 5.26 se observa patrones de REE relativamente similares, donde la muestra Sp03 tiene mayores concentraciones de REE ( $\Sigma\text{REE}=233.07$  ppm) y la muestra Sp14 presenta la menor concentración la ( $\Sigma\text{REE}=146.73$  ppm). Por otro lado, las muestras asociadas a suelos que derivan de rocas sedimentarias calcáreas (Sp11 y Sp09) tienen una concentración REE en promedio de  $\bar{X}_{\Sigma\text{REE}}=110.235$  ppm. En general, promedio total de concentraciones REE es de  $\bar{X}_{\Sigma\text{REE}}=160.40$  ppm.

Para este Clúster, los índices donde presentan un enriquecimiento moderado en LREE en comparación con HREE, ligero enriquecimiento en MREE, junto con la anomalía negativa de europio, y la usencia significativa de cerio refuerza la influencia de procesos sedimentarios.

#### 5.5.4 RESUMEN DE VALIDACIÓN DE CLÚSTERES EN SUELOS PROFUNDOS

Por lo cual, los suelos profundos luego de ser agrupados por la técnica exploratoria de Análisis de Componentes Principales (PCA) y clústering jerárquico, se validó utilizando las tierras raras (REE) y así confirmar las agrupaciones de los suelos profundos, al igual que se incorporó en las rocas, teniendo en cuenta la litología del cual deriva, además de considerar las composiciones químicas similares. A continuación, se muestra la nueva agrupación:

**Tabla 5.7**

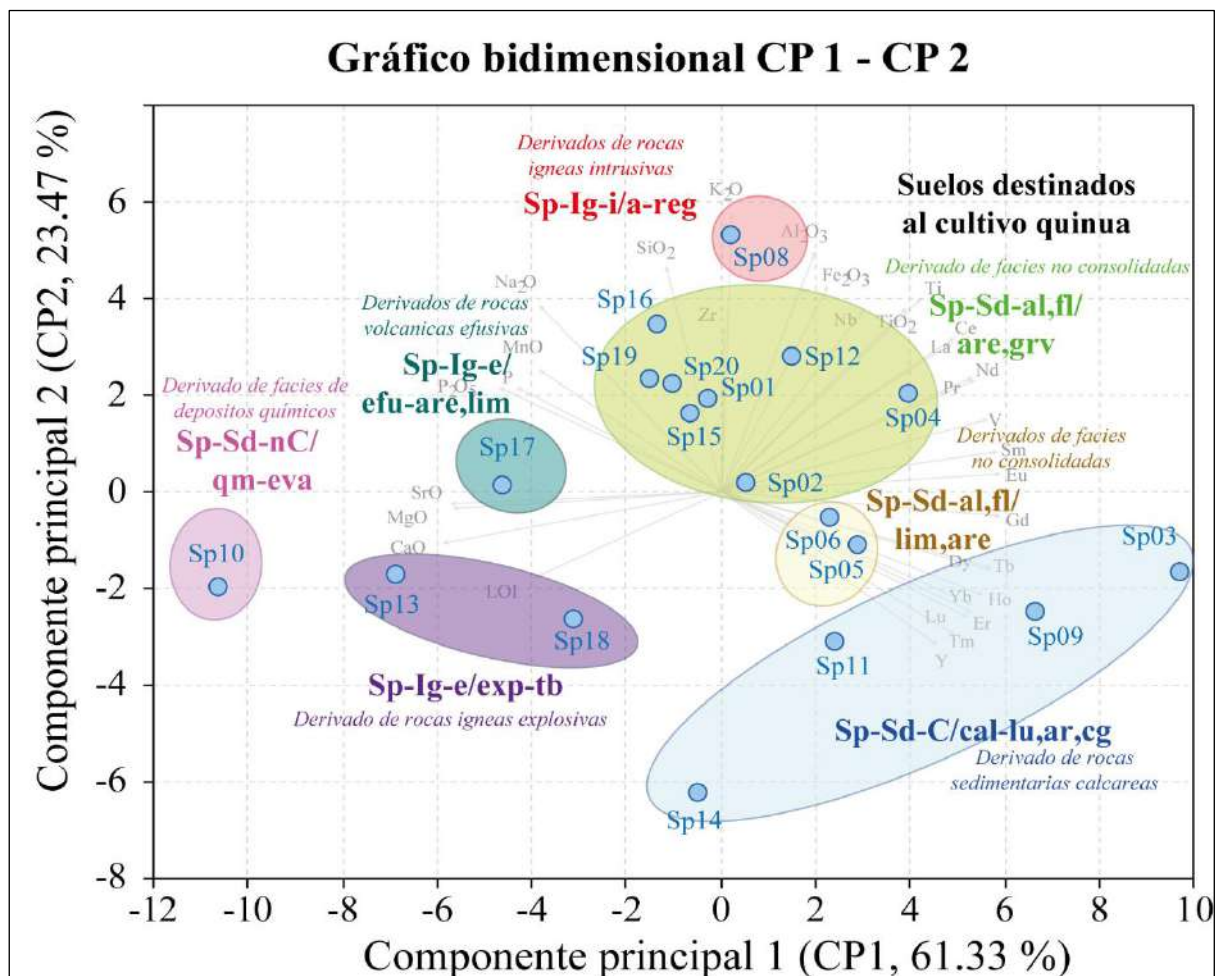
*Tabla resumen de las agrupaciones validadas para los suelos profundos.*

Clústeres	Etiqueta simplificada	Material parental aparente	REE	Facies agrupadas y validadas (Etiqueta)	Normalizado al promedio global de suelos (Kabata-Pendias, 2010)				
					$\bar{X}_{\Sigma REE}$	[LREE/HREE]N	MREE*	Eu*	Ce*
Clúster Sp1	Sp05	Formación Azángaro	230.25	Sp-Sd-al,fl/lim,are	232.28	1.86	1.29	0.83	1.08
	Sp06	Formación Azángaro	234.30						
	Sp15	Formación Azángaro	170.0						
	Sp16	Formación Azángaro	191.57	Sp-Sd-al,fl/are,grv	177.06	2.26	1.23	0.86	1.02
	Sp19	Formación Azángaro	167.75						
	Sp04	Deposito Aluvial	188.08						
	Sp01	Deposito Aluvial	165.79						
	Sp02	Deposito Aluvial	174.25						
	Sp12	Deposito Aluvial	154.97						
	Sp20	Deposito Aluvial	204.07						
Sp08	Intrusivo del Cenozoico	94.59	Sp-Ig-i/a-reg	94.59	3.06	1.45	0.87	1.09	
Clúster Sp2	Sp17	Volcánico efusivo	146.73	Sp-Ig-e/efu-are,lim	146.73	2.10	1.32	0.87	1.02
	Sp13	Volcánico explosivo	113.38	Sp-Ig-e/exp-tb	110.235	1.84	1.29	0.82	1.01
	Sp18	Volcánico explosivo	107.09						
	Sp10	Deposito Químico	19.46	Sp-Sd-nC/qm-eva	19.46	1.40	1.28	0.81	0.97
Clúster Sp3	Sp09	Formación Ayabacas	165.07	Sp-Sd-C/cal-lu,ar,cg	160.40	1.62	1.38	0.82	0.97
	Sp11	Formación Ayabacas	141.92						
	Sp14	Grupo Puno	101.54						
	Sp03	Formación Taraco?	233.07						

Al igual que las agrupaciones validadas en las rocas, se representa gráficamente estas agrupaciones de suelos profundos mediante la proyección bidimensional de los componentes principales (PC1 y PC2) (ver [Figura 5.27](#)).

**Figura 5.27**

Diagrama bidimensional del componente CP1 y CP2, agrupadas y validadas en suelos profundos.



De la Figura 5.27, se observa las nuevas agrupaciones de suelos profundos, las cuales se tiene principalmente a las facies del Cuaternario, que incluye a la Formación Azángaro, estas facies cuentan con la mayor cantidad de muestras. Luego se observa suelos derivados de rocas sedimentarias, ígneas intrusivas y extrusivas. Y por último se tiene un depósitos químicos y biogénicos.

#### Sub grupos del Clúster Sp1

- **Sub grupo** : Sp-Sd-al,fl/lim,are

Corresponde al primer subgrupo del Clúster Sp1, que describe suelos profundos (Sp) derivados principalmente de materiales sedimentarios no consolidados (Sd) provenientes de ambientes aluviales – fluviales (al,fl). Estos suelos están compuestos por limolitas, arenas y gravas de color beige.

- **Sub grupo : Sp-Sd-al,fl/are,grv**

Es el segundo subgrupo del Clúster Sp1, similar al anterior, que describe suelos profundos (Sp) originados a partir de materiales sedimentarios no consolidados (Sd) provenientes de medios aluviales - fluviales (al,fl). Estos suelos están compuestos por arenas y gravas de color gris (are,grv).

- **Sub grupo : Sp-Ig-i/a-reg**

El tercer sub grupo del Clúster Sp1 corresponde a suelos profundos (Sp), derivados de rocas ígneas (Ig) intrusivas (i) de composición acida (a). Este subgrupo se compone principalmente de regolita proveniente de granitoides (reg).

### Sub grupos del Clúster Sp2

- **Sub grupo : Sp-Ig-e/efu-are,lim**

Es el primer sub grupo de Clúster Sp2, que describe suelos profundos (Sp), derivados de rocas ígneas (Ig) extrusivas (e) de carácter volcánico efusivo (efu). Estos suelos están compuestos por materiales como arenas y limos (are,lim).

- **Sub grupo : Sp-Ig-e/exp-tb**

Corresponde al segundo sub grupo del Clúster Sp2, que agrupa suelos profundos (Sp) originados a partir de materiales de rocas ígneas (Ig) extrusivas (e) de carácter volcánico explosivo (exp). Estos suelos están conformados por regolita proveniente de tobas (tb).

- **Sub grupo : Sp-Sd-nC/qm-eva**

El tercer sub grupo del Clúster Sp2 se refiere a suelos profundos (Sp) derivados de materiales sedimentarios (Sd) no clásticos (nC) de origen químico (qm). Estos suelos están compuestos principalmente por evaporitas (eva) como limolitas.

### Sub grupos del Clúster Sp3

- **Sub grupo : Sp-Sd-C/cal-lu,ar,cg**

Este sub grupo del Clúster Sp3 describe suelos profundos (Sp) derivados de materiales sedimentarios (Sd) clásticos (C) con una matriz calcárea (cal). Está compuesto estos suelos por litologías como lutitas calcáreas, areniscas calcáreas y conglomerados (lu,ar,cg).

## 5.6 VALIDACIÓN DE LA ASOCIACIÓN EN SUELOS SUPERFICIALES: PATRONES DE ELEMENTOS DE TIERRAS RARAS (REE)

Los patrones de Elementos de Tierras Raras (*REE*, por sus siglas en inglés) en suelos superficiales proporcionan información valiosa sobre la historia geoquímica y los procesos pedogenéticos recientes, la influencia litológica que han afectado a estos suelos. A diferencia de los suelos profundos, los suelos superficiales están más expuestos a factores externos como la actividad biológica, la erosión, la deposición de material aéreo y la interacción con la atmósfera y la hidrosfera.

Para la validación de las asociaciones en suelos superficiales, se utilizó los patrones REE. Estas concentraciones de REE también fueron normalizadas al promedio global de suelos (Kabata-Pendias, 2010) al igual que los suelos profundos, permitiendo la comparación de los valores relativos entre diferentes tipos de suelos agrupados. Los datos fueron evaluados mediante índices geoquímicos como  $[LREE/HREE]_N$ ,  $MREE^*$ ,  $Eu^*$  y  $Ce^*$ , que permiten interpretar el enriquecimiento o empobrecimiento de los elementos ligeros (LREE), medios (MREE) y pesados (HREE), así como las anomalías de europio y cerio.

En este apartado, se observaron diferencias significativas entre los patrones de suelos superficiales asociados a rocas ígneas, sedimentarias y químicas, confirmando la correspondencia con los clústeres previamente definidos.

### 5.6.1 CLÚSTER Ss1: PATRONES REE EN SUELOS SUPERFICIALES DERIVADOS DE FACIES NO CONSOLIDADAS

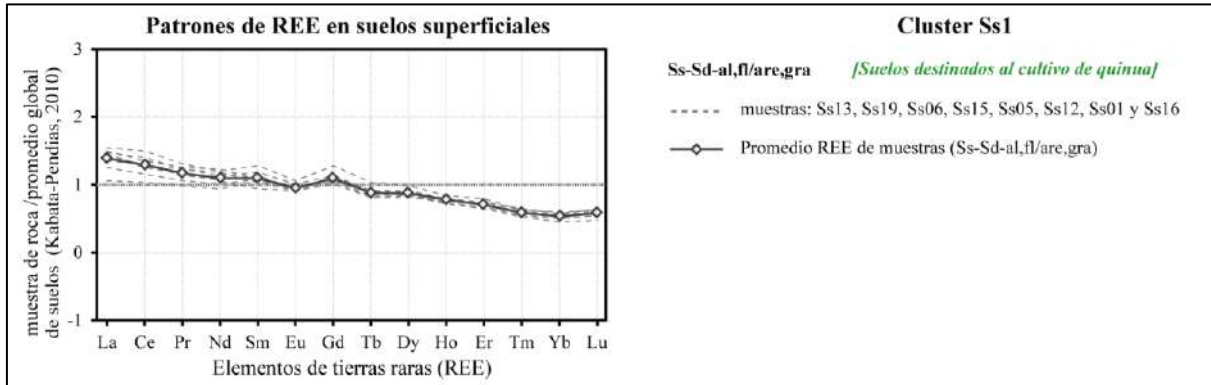
El clúster Ss1 agrupa suelos superficiales derivados de depósitos no consolidados, los cuales reflejan una influencia significativa de procesos aluviales y fluviales recientes. Estos suelos están constituidos predominantemente por arenas, gravas y limos con tonalidades grisáceas a beige, que interactúan con los cultivos de la planta quinua.

En la [Figura 5.28](#) se muestran los patrones REE correspondientes al clúster Ss1 (subgrupo: Ss-Sd-al,fl/are,grv), representado por las muestras de Ss13, Ss19, Ss06, Ss15, Ss05, Ss12, Ss01 y Ss16. Estas concentraciones fueron normalizados al promedio global de suelos (Kabata-Pendias, 2010). Los patrones REE son relativamente homogéneos, con un valor promedio de  $\bar{X}_{\Sigma REE} = 165.76$  ppm (rango:  $\Sigma REE = 189.20-136.37$  ppm).



**Figura 5.28**

Gráficos multielemento de los patrones REE en suelos superficiales correspondientes al clúster Ss1, normalizados a los valores del promedio global de suelos.



Fuente: Kabata-Pendias (2010) para los valores del promedio global de suelos.

Estas muestras presentan índices promedios normalizados de  $[LREE/HREE]_N = 2.42$ ,  $MREE^* = 1.25$ ,  $Eu^* = 0.87$ ,  $Ce^* = 1.01$ . Estos valores indican un alto enriquecimiento de tierras raras ligeras (LREE) en comparación con las pesadas (HREE), un ligero enriquecimiento en tierras raras medias (MREE), anomalías negativas de europio y anomalías neutras de cerio ( $Ce \approx 1$ ).

### 5.6.2 CLÚSTER Ss2 Y Ss3: PATRONES REE EN SUELOS SUPERFICIALES DERIVADOS ROCAS SEDIMENTARIAS

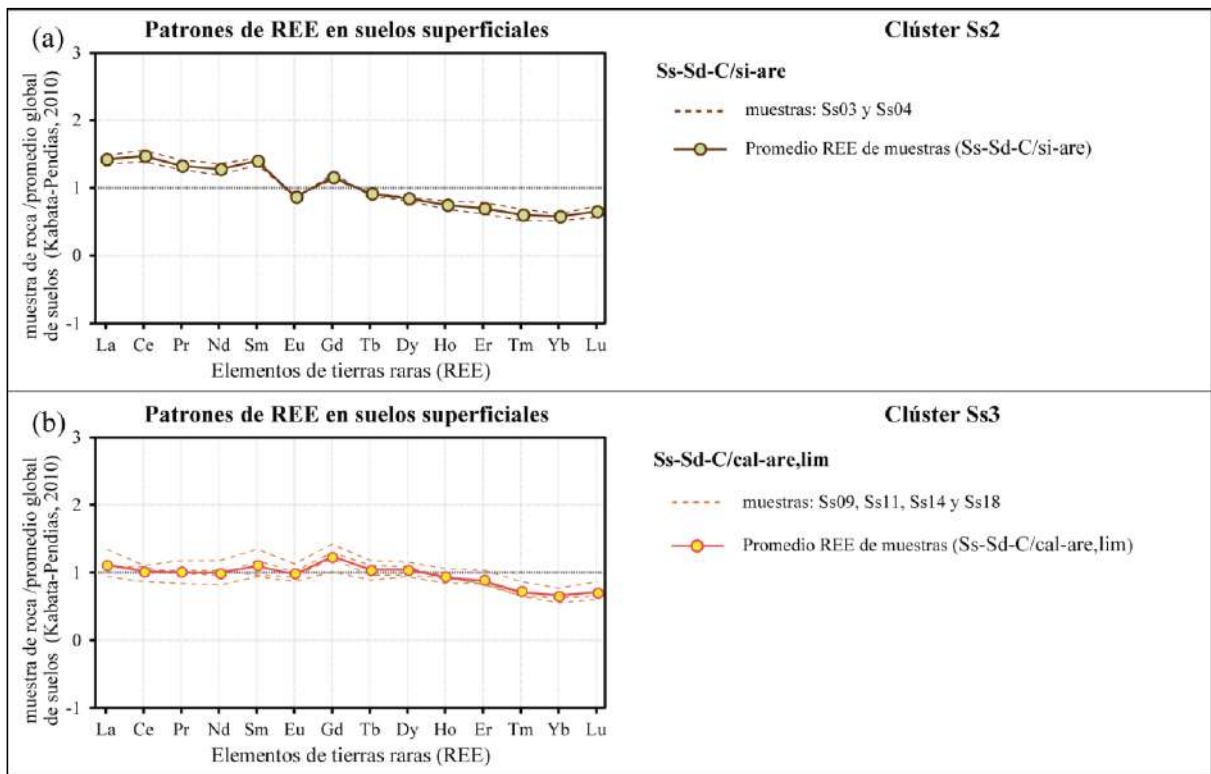
El clúster Ss2 y Ss3 agrupa suelos superficiales que derivan principalmente de rocas sedimentarias, tanto clásticas como calcáreas.

#### Clúster Ss2: Suelos derivados de materiales sedimentarios clásticos

Los suelos superficiales de este clúster corresponden a las muestras Ss3 y Ss4 (subgrupo: Ss-Sd-C/si-are), influenciados sedimentos siliciclásticas que conforman suelos arenosos y limosos. En la Figura 5.29a, se presentan los patrones REE normalizados al promedio global de suelos (Kabata-Pendias, 2010), mostrando una gran similitud entre los patrones observados. El promedio de concentración total de tierras raras es de  $\bar{X}_{\Sigma REE} = 184.17$  ppm, con índices promedios normalizados de  $[LREE/HREE]_N = 2.24$ ,  $MREE^* = 1.23$ ,  $Eu^* = 0.67$ ,  $Ce^* = 1.06$ . Estos valores indican un enriquecimiento de tierras raras ligeras (LREE) respecto a las pesadas (HREE), anomalías negativas significativas de europio, y anomalías neutras de cerio ( $Ce \approx 1$ ).

**Figura 5.29**

Gráficos multielemento de los patrones REE en suelos superficiales correspondiente a los clústeres Ss2 (a) y Ss3 (b), normalizados al promedio global de suelos



Fuente: Kabata-Pendias (2010) para los valores del promedio global de suelos.

### Clúster Ss3: Suelos derivados de materiales sedimentarios clásticos calcáreos

Este clúster, representado por el subgrupo Ss-Sd-C/cal-arc,lim, agrupa las muestras Ss09, Ss11, Ss14 y Ss18. Estas muestras tienen un promedio de concentración total de REE de  $\bar{X}_{\Sigma REE} = 141.53$  ppm. Los patrones REE de estas muestras, graficados en la Figura 5.29b, son consistentes y similares entre sí. Los índices promedio asociados son  $[LREE/HREE]_N = 1.61$ ,  $MREE^* = 1.39$ ,  $Eu^* = 0.85$ ,  $Ce^* = 0.97$ , lo que refleja un enriquecimiento moderado de tierras raras ligeras (LREE), ligeras anomalías negativas de europio, y una anomalía neutra de cerio ( $Ce \approx 1$ ).

### 5.6.3 CLÚSTER Ss4 Y Ss5: PATRONES REE EN SUELOS SUPERFICIALES DERIVADOS DE ROCAS ÍGNEAS Y QUÍMICAS

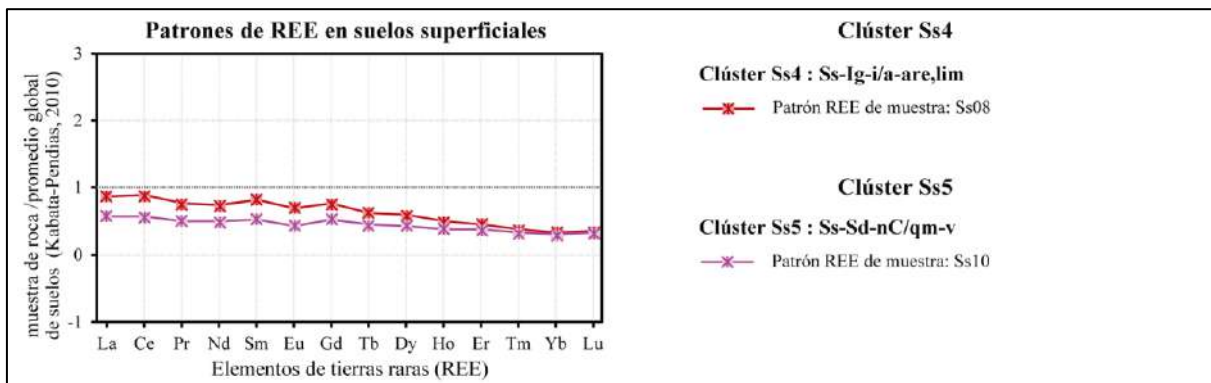
El análisis de los patrones de elementos de tierras raras (REE) en los suelos superficiales de los clústeres Ss4 y Ss5 permite evaluar las influencias litológicas y los procesos geoquímicos asociados a materiales parentales de origen ígneo y químico.

### Clúster Ss4: Suelos derivados de rocas ígneas intrusivas

Los suelos del subgrupo Ss-Ig-i/a-are,lim están asociados a materiales parentales ígneos intrusivos de composición ácida, como granitoides. Los patrones de REE (líneas de color rojo) se presenta en la [Figura 5.30](#), normalizados al promedio global de suelos ([Kabata-Pendias, 2010](#)). Estos suelos muestran una concentración promedio de tierras raras  $\bar{X}_{\Sigma REE} = 111.43$  ppm, con un enriquecimiento moderado en tierras raras ligeras (LREE), reflejando en el índice  $[LREE/HREE]_N = 2.49$ . Además, el índice  $MREE^* = 1.38$  indica un ligero enriquecimiento de las tierras raras intermedias (MREE), mientras que la anomalía de europio ( $Eu^* = 0.88$ ) sugiere la influencia de procesos de meteorización parcial. Por su parte, las anomalías de cerio ( $Ce^* = 1.09$ ) reflejan condiciones redox relativamente estables y un entorno geoquímico poco alterado.

#### Figura 5.30

Gráficos multielemento de los patrones REE en suelos superficiales correspondientes a los clústeres Ss4 y Ss5, normalizados a los valores del Promedio global de suelos.



Fuente: [Kabata-Pendias \(2010\)](#) para los valores del promedio global de suelos.

### Clúster Ss5: Suelos derivados de materiales sedimentarios evaporíticos

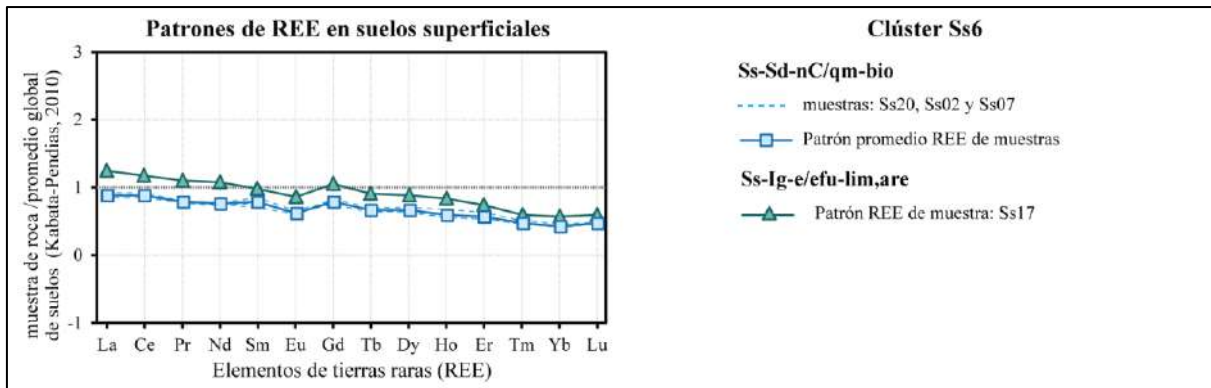
El subgrupo Ss-Sd-nC/qm-eva corresponde a los suelos compuestos predominantemente por evaporitas. Estos suelos presentan concentraciones bajas de REE, con un promedio de  $\bar{X}_{\Sigma REE} = 73.33$  ppm. Los patrones de REE (línea de color violeta) observados en [Figura 5.30](#) están por debajo del patrón del anterior subgrupo. El índice  $[LREE/HREE]_N = 1.79$  sugiere un ligero enriquecimiento en tierras raras ligeras, mientras que el valor  $MREE^* = 1.23$  refleja un ligero enriquecimiento relativo en tierras raras intermedias. Las anomalías de europio ( $Eu^* = 0.82$ ) y cerio ( $Ce^* = 1.04$ ) corroboran la influencia de procesos de evaporación y precipitación en condiciones redox fluctuantes.

#### 5.6.4 CLÚSTER Ss6: PATRONES REE EN SUELOS SUPERFICIALES DERIVADOS MATERIALES QUÍMICAS

Las muestras de suelos asociados al clúster Ss6 corresponden a depósitos biogénicos (Ss02 y Ss07) y volcánicos (Ss17).

##### Figura 5.31

Gráficos multielemento de los patrones REE de los suelos superficiales del clúster Ss6, normalizados a los valores del Promedio global de suelos.



Fuente: Kabata-Pendias (2010) para los valores del promedio global de suelos.

#### Clúster Ss6: Suelos derivados de materiales volcánicos efusivos

El subgrupo Ss-Ig-e/efu-lim,are presentan concentraciones moderadas de REE ( $\bar{X}_{\Sigma REE} = 132.85$  ppm) y un enriquecimiento destacado en tierras raras ligeras (LREE), reflejado en el índice  $[LREE/HREE]N = 2.25$ . El índice  $MREE^* = 1.32$  sugiere un enriquecimiento relativo en tierras raras intermedias, mientras las anomalías negativas de europio ( $Eu^* = 0.86$ ) apuntan a procesos de meteorización selectiva, mientras que las anomalías de cerio ( $Ce^* = 1.05$ ) indican condiciones redox moderadamente oxidantes.

#### Clúster Ss6: Suelos derivados de materiales sedimentarios no clásticos biogénicos

Por otro lado, el subgrupo Ss-Sd-nC/qm-bio, compuesto por suelos biogénicos, muestra concentraciones bajas de REE, con promedio de  $\bar{X}_{\Sigma REE} = 75.34$  ppm. Este grupo muestra un índice  $[LREE/HREE]N = 1.38$ , que indica distribución más equilibradas entre tierras raras ligeras y pesadas. Las anomalías negativas de europio ( $Eu^* = 0.83$ ) y las de cerio ( $Ce^* = 1.04$ ) confirman la influencia de procesos biogénicos, con acumulación de materia orgánica.

### 5.6.5 RESUMEN DE VALIDACIÓN DE CLÚSTERES EN SUELOS SUPERFICIALES

En resumen, los suelos superficiales luego de ser agrupados por medio del Análisis de Componentes Principales (PCA) y clustering jerárquico, se prosiguió con la validación, similar con lo aplicado a las rocas y suelos profundos. Estas nuevas agrupaciones fueron validadas con herramientas teóricas como los elementos de tierras raras. A continuación, se muestra la nueva agrupación:

**Tabla 5.8**

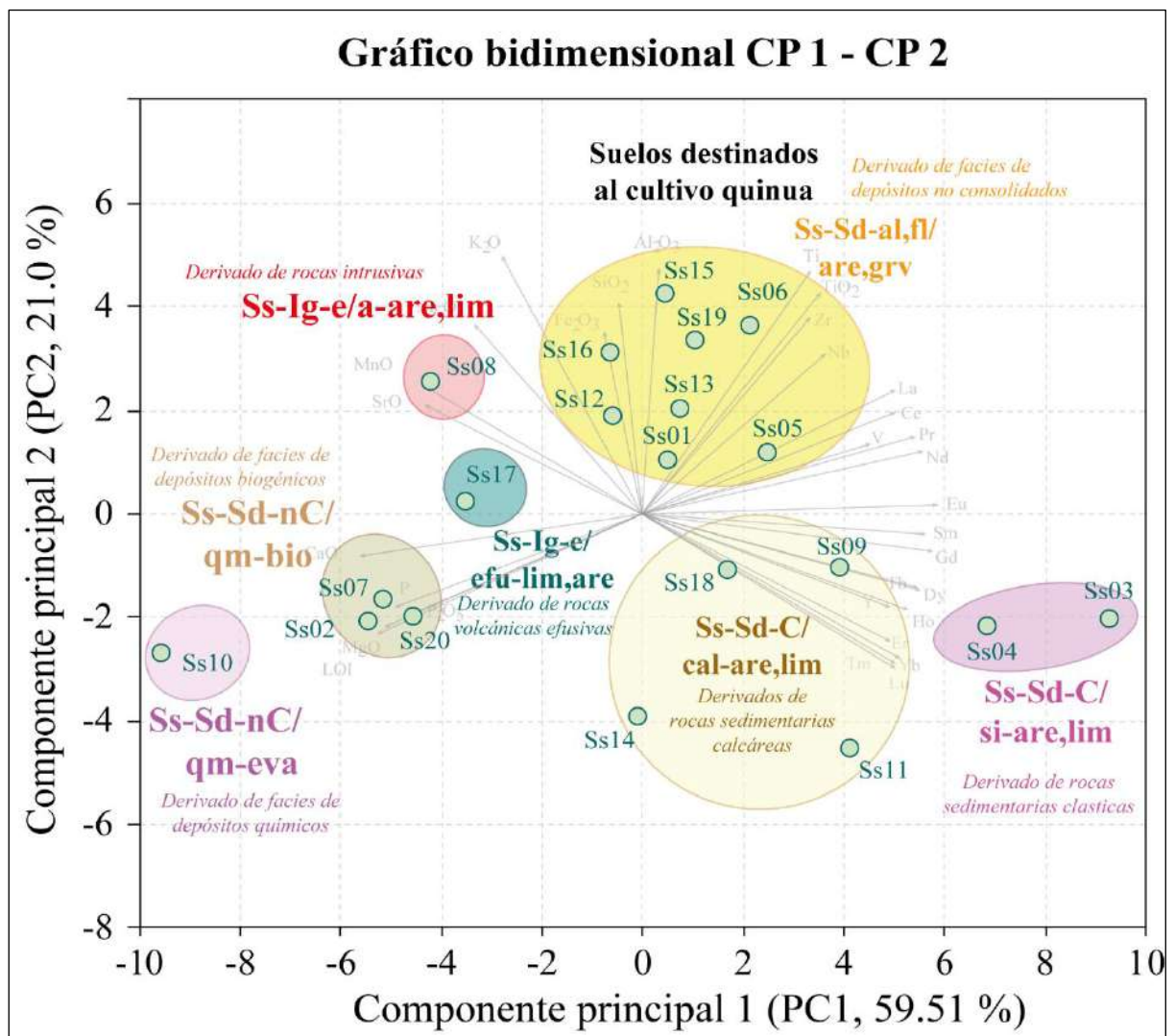
*Tabla resumen de las agrupaciones validadas para los suelos superficiales.*

Clústeres	Etiqueta simplificada	Material parental aparente	REE	Facies agrupadas y validadas (Etiqueta)	Normalizado al promedio global de suelos (Kabata-Pendias, 2010)				
					$\bar{X}_{\Sigma REE}$	[LREE/HREE]N	MREE*	Eu*	Ce*
Clúster Ss1	Ss06	Formación Azángaro	189.20	Ss-Sd-al,fl/are,grv	165.76	2.42	1.25	0.87	1.01
	Ss05	Formación Azángaro	176.55						
	Ss15	Formación Azángaro	161.94						
	Ss16	Formación Azángaro	176.55						
	Ss01	Deposito Aluvial	166.05						
	Ss19	Deposito Aluvial	168.09						
	Ss12	Deposito Aluvial	136.37						
Clúster Ss2	Ss03	Formación Taraco?	192.93	Ss-Sd-C/si-are,lim	184.17	2.24	1.23	0.67	1.06
	Ss04	Formación Taraco?	175.40						
Clúster Ss3	Ss09	Formación Vilquechico	143.70	Ss-Sd-C/cal-lu,ar,cg	141.53	1.61	1.39	0.85	0.97
	Ss11	Formación Vilquechico	161.44						
	Ss14	Grupo Puno	119.63						
	Ss18	Volcánico explosivo del Cenozoico	141.35						
Clúster Ss4	Ss08	Intrusivo del Cenozoico	111.43	Ss-Ig-i/a-are,lim	111.43	2.49	1.38	0.88	1.09
Clúster Ss5	Ss10	Deposito Químico	73.33	Ss-Sd-nC/qm-eva	73.33	1.79	1.23	0.82	1.04
Clúster Ss6	Ss07	Deposito Biogénico	117.56	Ss-Sd-nC/qm-bio	113.44	1.90	1.23	0.80	1.07
	Ss02	Deposito Biogénico	112.16						
	Ss20	Formación Ayabacas?	110.59						
	Ss17	Volcánico efusivo del Cenozoico	154.58	Ss-Ig-e/efu-lim,are	154.58	2.12	1.22	0.84	1.01

Estas agrupaciones validadas de suelos superficiales se representan gráficamente mediante la proyección bidimensional en los primeros componentes principales (PC1 y PC2) (ver [Figura 5.32](#)).

**Figura 5.32**

Diagrama bidimensional del componente CP1 y CP2, agrupadas y validadas en suelos superficiales.



De la [Figura 5.32](#), se tiene, suelos superficiales con mayor cantidad de muestras en los depósitos no consolidados, que incluye los suelos derivados de la Formación Azángaro, además de suelos que derivan de rocas sedimentarias, intrusivas y extrusivas. Y por último se tiene a las muestras que derivan de un origen biogénico y químico.

### Sub grupos del Clúster Ss1

- **Sub grupo : Ss-Sd-al,fl/are,grv**

Corresponde al subgrupo del Clúster Ss1, que describe suelos de horizontes superficiales (Ss) originados a partir de materiales sedimentarios no consolidados (Sd) provenientes de medios aluviales - fluviales (al,fl). Estos suelos están compuestos por arenas y gravas de color gris (are,grv).

### Sub grupos del Clúster Ss2

- **Sub grupo : Ss-Sd-C/si-are,lim**

Este subgrupo del Clúster Ss2 se refiere a suelos superficiales (Ss) derivados de materiales parentales sedimentarios (Sd) clástico (C) con una matriz silícea (si). Estos suelos están compuestos por arenas y limos (are,lim).

### Sub grupos del Clúster Ss3

- **Sub grupo : Ss-Sd-C/cal-are,lim**

Subgrupo del clúster Ss3, que agrupa suelos superficiales (Ss) originados a partir de rocas sedimentarias (Sd) clásticas (C) con contenido de matriz calcárea (cal). Estos suelos están compuestos por arenas y limos (are,lim).

### Sub grupos del Clúster Ss4

- **Sub grupo : Ss-Ig-i/a-are,lim**

Subgrupo del Clúster Ss4, caracterizado por suelos superficiales (Ss) derivados de materiales de rocas ígneas (Ig) intrusivas (i) de composición acida (a). Estos suelos están conformado por arenas y limos (are,lim).

### Sub grupos del Clúster Ss5

- **Sub grupo : Ss-Sd-nC/qm-eva**

Sub grupo del Clúster Ss5, que agrupa suelos superficiales (Ss) derivado de materiales sedimentarios (Sd) no clásticos (nC) de origen químico (qm). Estos suelos están constituidos por evaporitas (eva) compuesta principalmente por limos.

### Sub grupos del Clúster Ss6

- **Sub grupo : Ss-Sd-nC/qm-bio**

Primer subgrupo del Clúster Ss6, que describe suelos superficiales (Ss) derivados de materiales sedimentarios (Sd) no clásticos (nC) de origen químico (qm). Estos suelos están compuestos por materiales orgánicos de origen biogénico (bio).

- **Sub grupo : Ss-Ig-e/efu-lim,are**

Segundo subgrupo del Clúster Ss6, que describe suelos superficiales (Ss) originados a partir de materiales ígneos (Ig) extrusivos (e) de carácter volcánico efusivo (efu). Estos suelos están compuestos por limos y arenas (lim,are).

## 5.7 ANÁLISIS COMPARATIVO CONJUNTO DE DATOS ENTRE LA ROCA Y SUELO

Antes de realizar una comparación entre los datos de rocas y suelos, es esencial validar las agrupaciones basadas en sus características químicas distintivas. Las cuales las muestras han sido previamente agrupadas y validadas. Para llevar a cabo este análisis, se emplearon las matrices  $L$  de las rocas, suelos profundos y superficiales. Luego, se realizó un Análisis de Componentes Principales ( $PCA$ ) sobre los datos concatenados, con el objetivo de calcular las distancias entre los centroides de agrupaciones previamente formadas.

Los pasos seguidos para este análisis fueron los siguientes:

### a. Concatenación de matrices $L$ (Rocas, suelos profundos y suelos superficiales)

La concatenación de las matrices  $L$  fue realizada para mantener la estructura de los tres grupos de datos, dado que estas matrices representan transformaciones similares derivadas del Análisis Robusto de Componentes Principales ( $RPCA$ ) aplicado a los datos originales. Estas matrices  $L$  tienen las siguientes estructuras:

- Matriz  $L$  de rocas : 36 casos y 32 variables
- Matriz  $L$  de suelos profundos : 19 casos y 32 variables
- Matriz  $L$  de suelos superficiales : 20 casos y 32 variables

Estas matrices fueron concatenadas ya que se encuentran en un formato reducido de bajo rango, y comparten las mismas variables originales (32 variables) presentes en todos los conjuntos de datos, lo que permite un análisis conjunto coherente.

### b. Aplicación de $PCA$ sobre matrices $L$ unificada

Después de la concatenación, se aplicó el  $PCA$  sobre la matriz  $L$  unificada. Este análisis permitió estudiar las relaciones entre las rocas, suelos profundos y suelos superficiales dentro de un mismo espacio en común. Para seleccionar las componentes principales más relevantes, se utilizó el criterio de autovalores de Kaiser, reteniendo los componentes con autovalores mayores a 1, reteniendo los primeros 5 componentes principales, que representan el 92.84 % de la varianza total acumulada.

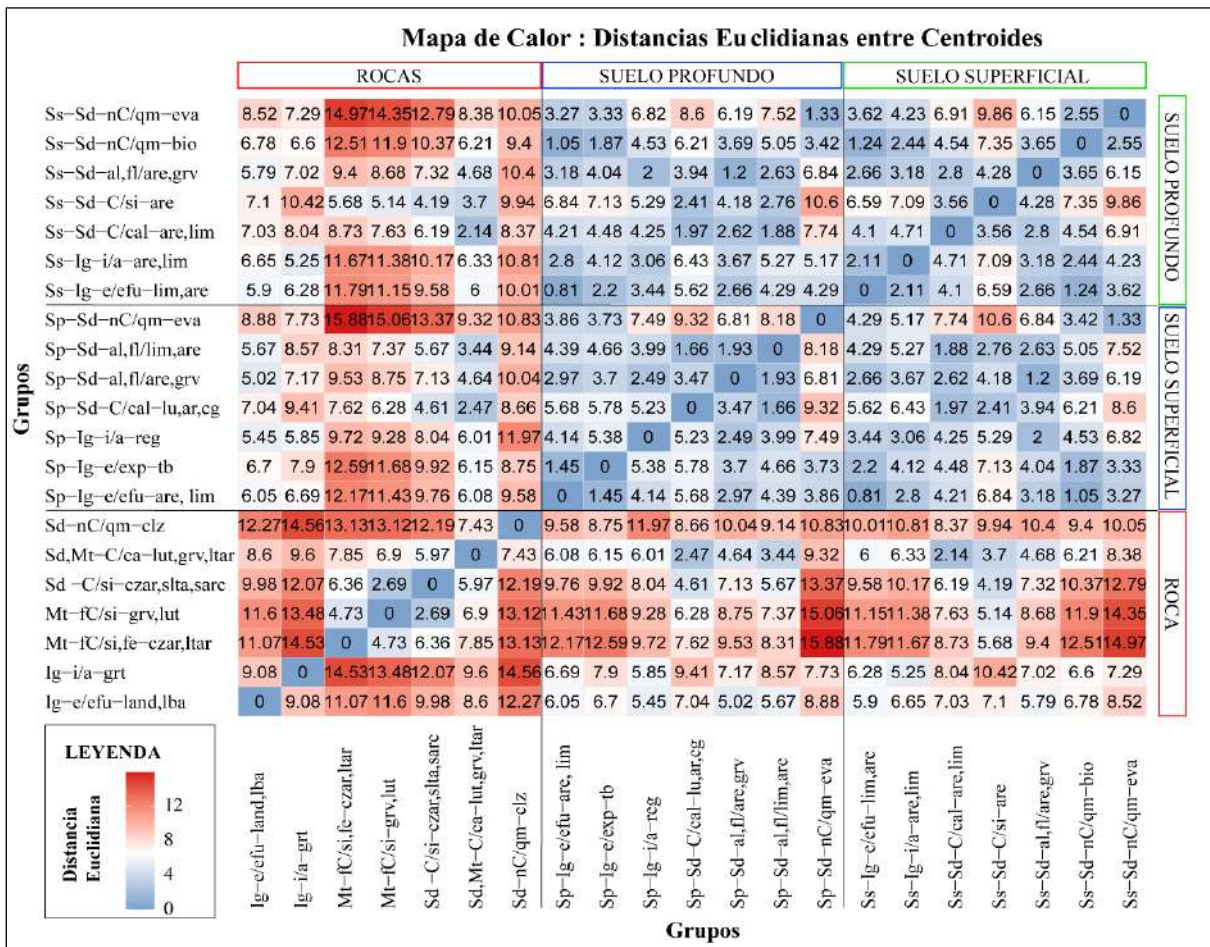


**c. Cálculo de distancias entre centroides**

Una vez obtenidos los clústeres o grupos validados de las muestras de rocas, suelos profundos y superficiales, y tras seleccionar los componentes principales más relevantes derivadas del PCA, se procedió a calcular las distancias entre cada par de los centroides de los clústeres formados por los tres tipos de muestras. Se utilizó el método de distancias euclidianas (ej. centroide roca - centroide suelo) para los 5 primeros componentes principales, lo que permitirá cuantificar y comprender que tan similares o diferentes son los grupos de rocas, suelos profundos y superficiales en un mismo espacio de datos en común.

Con las distancias se tabulará y visualizará los pares de centroides más cercanos y más lejanos (ver Figura 5.33).

**Figura 5.33**  
 Mapa de calor de distancias euclidianas entre los centroides, de los primeros cinco componentes seleccionados.



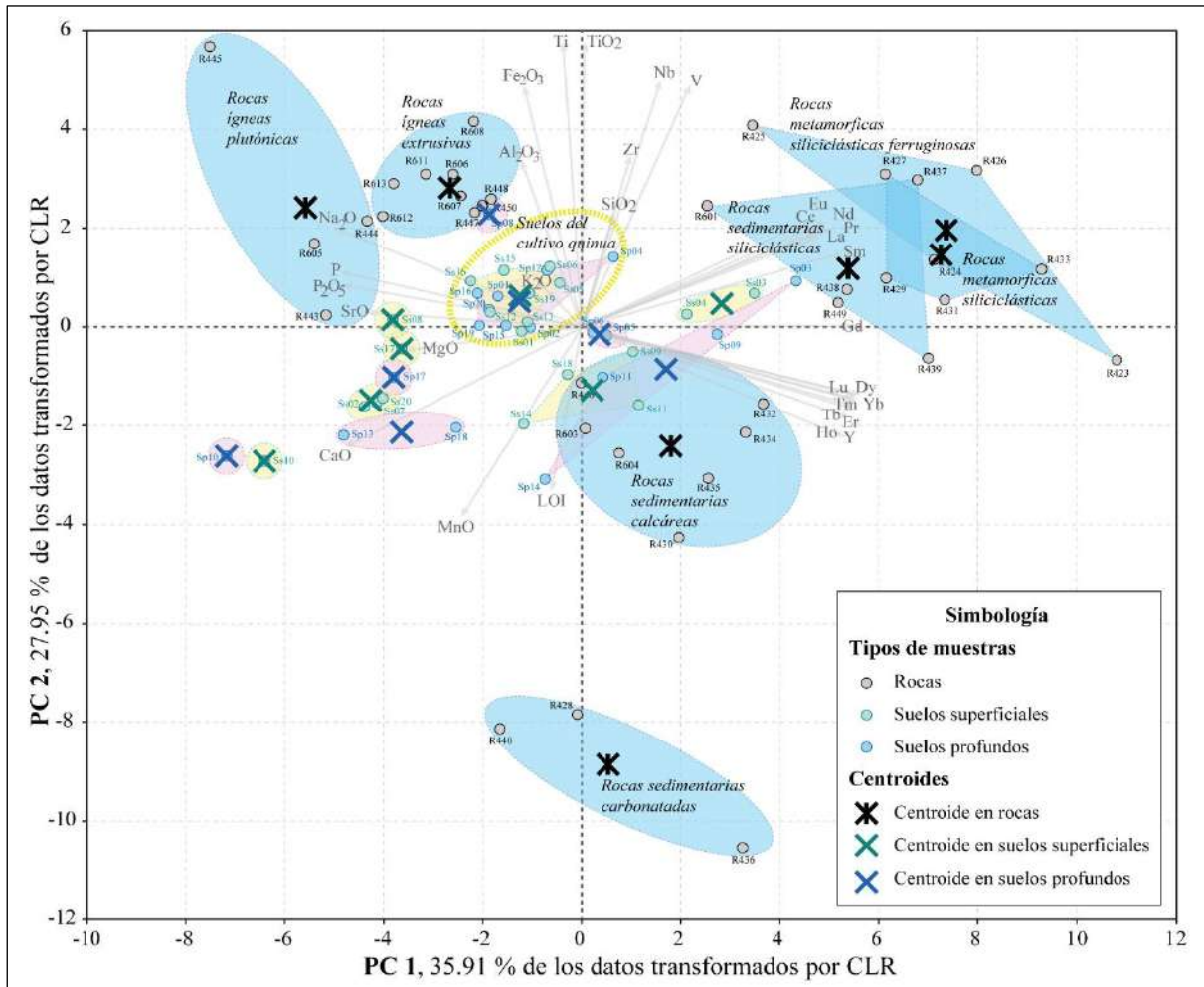
Nota. Abreviaturas R: Rocas, Ss: Suelos en horizontes superficiales, y Sp: Suelos en horizontes profundos.

**d. Visualización Gráfica**

Para la visualización se proyectará en los dos primeros componentes de PC1 y PC2

**Figura 5.34**

Diagrama bidimensional de las componentes PC1-PC2, de muestras de roca, suelos en horizontes superficiales y profundos con sus centroides de cada clúster.



De la [Figura 5.34](#), se observa que la varianza explicada para la primera y segunda componentes principales explica el 35.91 % y el 27.95 % de la variación total en los datos, respectivamente, un total de 63.86 %, lo que sugiere que una cantidad significativa de la variabilidad se captura en estos dos componentes.

Tanto como la gráfica de PCA (ver [Figura 5.34](#)) y la tabla de matriz de distancias euclidianas (ver [Figura 5.33](#)), se realizará el análisis comparativo del sistema roca-suelo, comparando roca – suelo (horizonte superficial), roca – suelo (horizonte profundo) y suelo – suelo (horizonte superficial y profundo). Con el objetivo de evaluar como la litología influencia en la química de los suelos tanto en horizontes profundos y superficiales con respecto a los suelos del cultivo quinua.

### 5.7.1 RELACIÓN GEOQUÍMICA ENTRE LAS AGRUPACIONES DE ROCAS PARENTALES Y LOS SUELOS PARA EL CULTIVO QUINUA

En este apartado se exploran las relaciones geoquímicas entre los suelos asociados al cultivo quinua (Suelos profundos: *Sp-Sd-al,fl/are,grv* y suelos superficiales: *Ss-Sd-al,fl/are,grv*) y las rocas parentales de las que podrían derivar. La relación se analiza en el espacio de los primeros Componentes Principales (PCs), utilizando las distancias previamente calculadas entre los clústeres de rocas y suelos (ver Figura 5.33), lo que captura la proximidad espacial. Además, se consideran los vectores o cargas que describen las variables que caracterizan cada clúster o grupo, proporcionando información detallada sobre las relaciones geoquímicas y los procesos que conectan los suelos y las rocas parentales.

#### 5.7.1.1 RELACIÓN ENTRE LAS ROCAS PARENTALES Y LOS SUELOS PROFUNDOS

El análisis de los suelos profundos asociados al cultivo de quinua (*Sp-Sd-al,fl/are,grv*) revela que las distancias calculadas entre el clúster del suelo y las rocas parentales muestran una fuerte proximidad a ciertas litologías. Los suelos profundos del cultivo de quinua presentan distancias cercanas con las rocas sedimentarias clásticas calcáreas (*Sd,Mt-C/calut,grv,ltar*) con un valor de  $(C_R, C_{Sp}) = 4.64$  y las rocas volcánicas efusivas (*Ig-e/efu-land,lba*) con un valor de  $(C_R, C_{Sp}) = 5.02$ , mientras que presentan distancias más lejanas con las rocas sedimentarias carbonatadas (*Sd-nC/qm-clz*) con un valor de  $(C_R, C_{Sp}) = 10.04$  y las rocas metamórficas siliciclásticas ferruginoso (*Mt-fC/si,fe-czar,ltar*) con un valor de  $(C_R, C_{Sp})=9.53$ .

Aparentemente, entre las litologías cercanas, las rocas sedimentarias calcáreas podrían tener una mayor influencia sobre los suelos debido a su menor distancia. Sin embargo, al integrar los vectores o cargas de las variables que formaron los clústeres, se observa que los suelos del cultivo de quinua y las rocas volcánicas efusivas comparten las mismas características geoquímicas, lo que indica una mayor relación en términos de composición. Por otro lado, las rocas sedimentarias calcáreas presentan cargas geoquímicas diferentes, lo que sugiere que, aunque estén cercanas en distancia, su influencia sobre los suelos profundos es menos significativa.

En síntesis, a pesar de la proximidad en distancia, los suelos profundos parecen haber sido principalmente influenciados por las rocas volcánicas, compartiendo composiciones geoquímicas similares. Las rocas sedimentarias calcáreas, aunque cercanas en distancia, muestran una menor contribución a la composición de estos suelos.

En cuanto a las distancias lejanas, los clústeres asociados a las rocas carbonatadas y las rocas metamórficas siliciclásticas ferruginosas presentan diferencias significativas, lo que indica también que no influyen directamente sobre los suelos profundos. En el caso de las rocas de las rocas carbonatadas, por su alto contenido de carbonatos lo que podría explicar su lejanía, mientras que las rocas metamórficas se caracterizan por su elevado contenido de sílice, lo que también marca una diferencia notable.

### 5.7.1.2 RELACIÓN ENTRE LAS ROCAS PARENTALES Y LOS SUELOS SUPERFICIALES

El análisis de suelos superficiales para el cultivo de quinua (*Ss-Sd-al,fl/are,grv*) revela relaciones geoquímicas interesantes con respecto a las rocas parentales. A partir del mapa de calor de las distancias euclidianas (ver [Figura 5.33](#)), se observan distancias relevantes que permiten comprender la influencia de diferentes litologías sobre los suelos superficiales.

Los suelos superficiales asociados al cultivo de quinua muestran una cercanía importante con las rocas sedimentarias clásticas calcáreas (*Sd,Mt-C/ca-lut,grv,ltar*) y las rocas volcánicas efusivas (*Ig-e/efu-land,lba*), con distancias de  $(C_R, C_{Ss}) = 4.68$  y  $(C_R, C_{Ss}) = 5.79$ , respectivamente. Al igual que en los suelos profundos, esto sugiere una aparente influencia combinada de estas litologías sobre la geoquímica de los suelos superficiales.

Aparentemente, la proximidad más corta corresponde a las rocas sedimentarias clásticas calcáreas, lo que podría sugerir una mayor influencia sobre los suelos superficiales. No obstante, es importante integrar las cargas o vectores de las variables que formaron estos clústeres para obtener una visión más clara. Al realizar esta integración, se observa que las rocas volcánicas efusivas comparten una mayor similitud composicional con los suelos superficiales, lo que indica que estas rocas volcánicas han ejercido una influencia geoquímica significativa sobre los suelos, aunque las distancias no lo reflejen.

En cuanto a las rocas sedimentarias calcáreas, a pesar de su proximidad, las diferencias en las cargas geoquímicas indican que su influencia sobre los suelos superficiales es menor que la de las rocas volcánicas.

Por otro lado, las distancias más lejanas, como las de las rocas carbonatadas (*Sd-nC/qm-clz*) con un valor de  $(C_R, C_{Ss}) = 10.4$  y las rocas metamórficas siliciclásticas ferruginosas (*Mt-fC/si,fe-czar,ltar*) con un valor de  $(C_R, C_{Ss}) = 9.4$ , indican que estas litologías no influyen significativamente en la composición de los suelos superficiales para el cultivo quinua.

En síntesis, los suelos superficiales para el cultivo de quinua están siendo influenciados por las rocas volcánicas efusivas.

### **5.7.1.3 RELACIÓN ENTRE LOS SUELOS PROFUNDOS Y SUPERFICIALES**

El análisis comparativo entre los suelos profundos (*Sp-Sd-al,fl/are,grv*) y suelos superficiales (*Ss-Sd-al,fl/are,grv*), en el contexto del cultivo de quinua, revela una fuerte relación entre ambos tipos de suelos. En el mapa de calor (ver [Figura 5.33](#)), se observa una distancia muy pequeña entre los suelos profundos y superficiales para el cultivo de quinua, con un valor de  $(C_{Sp}, C_{Ss}) = 1.2$ , lo que sugiere que los procesos geoquímicos que han afectado a estos suelos son muy similares. Esta proximidad puede explicarse por la moderada meteorización química, influida por el clima de la zona de Cabana (ver [Figura 4.1](#)), que ha mantenido condiciones bastante estables entre los horizontes profundos y superficiales.

A pesar de la similitud general, se observan diferencias mínimas pero importantes en las distancias con respecto a otros clústeres de rocas. Por ejemplo, los suelos profundos muestran una menor distancia con las rocas volcánicas efusivas con un valor de  $(C_R, C_{Sp}) = 5.02$ , mientras que los suelos superficiales tienen una distancia ligeramente mayor con un valor de  $(C_R, C_{Ss}) = 5.79$ . Esto indicaría que la meteorización ha afectado de manera más intensa a los suelos superficiales, lo que ha generado pequeñas variaciones en su composición geoquímica con respecto a los suelos profundos.

Por otro lado, las mayores distancias observadas entre los suelos profundos y superficiales respecto a las rocas carbonatadas y metamórficas refuerzan la idea de que estas litologías no han influido significativamente en la formación de estos suelos.

En síntesis, los suelos profundos y superficiales para el cultivo de quinua están fuertemente relacionados, compartiendo características geoquímicas comunes, las cuales han sido influenciadas por las mismas rocas parentales o por procesos de meteorización continuos, lo que ha mantenido su composición bastante homogénea.

## CAPÍTULO 6. ELEMENTOS MINERALES ESENCIALES PARA EL CULTIVO DE QUINUA EN EL SISTEMA ROCA- SUELO-PLANTA

### 6.1 PREÁMBULO

La quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.), un cultivo ancestral de la región andina, específicamente en la zona de Cabana, es reconocida por su alto valor nutricional y su producción orgánica. Sin embargo, la calidad de sus granos esta influenciada por la disponibilidad de *elementos minerales esenciales* presentes en los suelos, los cuales, a su vez, derivan de las rocas parentales. Este capítulo tiene como propósito *comparar distribuciones* de estos elementos esenciales en el sistema roca-suelo-planta, considerando diferentes litologías parentales, suelos profundos, suelos superficiales y las plantas de quinua.

El **objetivo** de este estudio es *comparar las distribuciones* de los *Elementos Minerales Esenciales* en rocas parentales, suelos y plantas destinados al cultivo de quinua, buscando entender cómo estos elementos minerales podrían transferirse desde las rocas hasta los suelos y, posteriormente, a la planta quinua. Por lo tanto, la pregunta de investigación que se busca responder es: ¿Cómo se distribuyen los *Elementos Minerales Esenciales* en las rocas parentales, suelos y plantas destinados al cultivo de quinua?

Para responder a esta pregunta, los resultados serán analizados en función de la distribución de los *Elementos Minerales Esenciales* en las rocas parentales, agrupadas según sus características litológicas similares. Posteriormente, se evaluará la composición de los suelos, tanto profundos como superficiales, y se comparará con los datos obtenidos de los granos de quinua. Este análisis se llevará a cabo mediante métodos estadísticos, utilizando gráficos de cajas y bigotes para evaluar la variabilidad y gráficos de radar para resaltar la distribución. Las concentraciones serán expresadas en ppm o mg/kg, lo que implica la conversión de valores de porcentaje a ppm cuando sea necesario.

Finalmente, al término de este capítulo se discutirán los resultados obtenidos, proporcionando las relaciones entre elementos minerales esenciales en el sistema Roca-Suelo-Planta. De este modo, se espera aportar una comprensión más profunda sobre la influencia de estos elementos en el crecimiento y la calidad de los granos de quinua.

## 6.2 ELEMENTOS MINERALES ESENCIALES EN LOS GRANOS DE QUINUA

En este apartado se presentan los resultados de los elementos minerales esenciales presentes en los granos de quinua cultivados en la región de Cabana. Las muestras analizadas, identificadas como "QN-CB22-01", "QN-CB22-02" y "QN-CB22-03", fueron evaluadas en términos de su contenido en elementos minerales esenciales, es decir, por su contenido en macronutrientes y micronutrientes, los cuales son fundamentales el desarrollo de la planta y la calidad nutricional de los granos.

La composición mineral de los granos de quinua se agrupa en:

- **Macronutrientes:** Incluyen nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg) y azufre (S), que son requeridos en mayores cantidades para asegurar el adecuado desarrollo de la planta.
- **Micronutrientes:** Incluyen hierro (Fe), zinc (Zn), cobre (Cu), manganeso (Mn), boro (B) y molibdeno (Mo) que, aunque necesarios en menores concentraciones, son igualmente importantes para procesos vitales de la planta.

### 6.2.1 COMPOSICIÓN MINERAL DE LOS GRANOS DE QUINUA

Los granos de quinua se analizaron para determinar su composición química en términos de minerales esenciales. Las muestras analizadas se obtuvieron de diferentes fuentes:

- **QN-CB22-01 y QN-CB22-03:** Provenientes de parcelas ubicadas en las Altiplanicies, con suelos formados sobre depósitos fluvio-aluviales compuestos predominantemente por gravas y arenas de origen volcánico.
- **QN-CB22-02:** Muestra adquirida en un local comercial de COPAIN CABANA, destinada al consumo humano.

Los resultados analíticos de las muestras se detallan en la [Tabla 6.1](#), con macronutrientes expresados en porcentaje (%) y micronutrientes en miligramos por kilogramo (mg/kg).

**Tabla 6.1**

Cuadro de elementos minerales esenciales en macronutrientes (%) y micronutrientes (mg/kg) de los granos de quinua de Cabana.

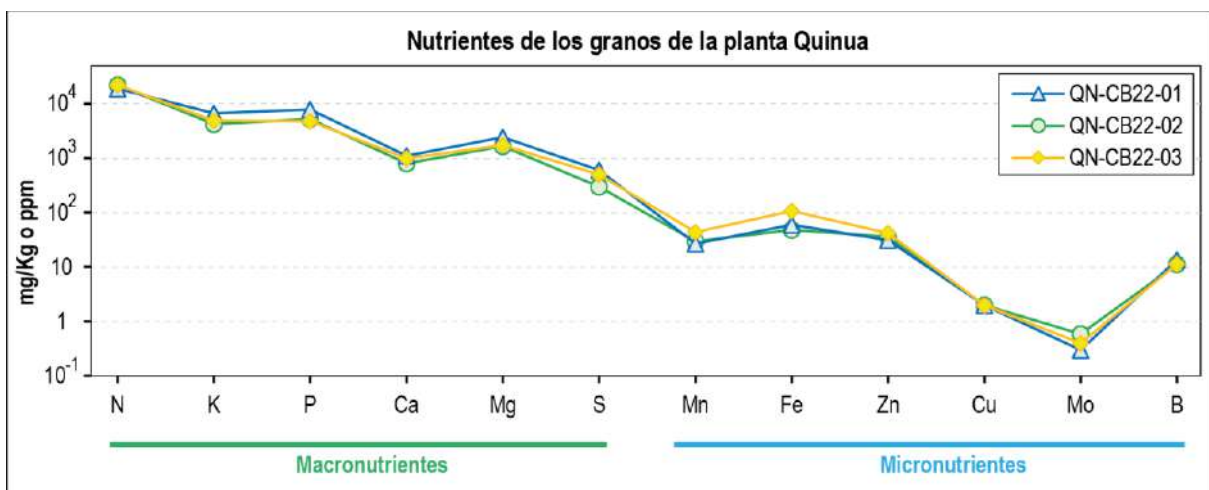
	Elementos	QN-CB22-01	QN-CB22-02	QN-CB22-03
Macronutrientes (%)	Nitrógeno total	1.9	2.2	2.2
	Potasio	0.67	0.42	0.49
	Fósforo	0.787	0.524	0.475
	Calcio	0.11	0.08	0.10
	Magnesio	0.242	0.166	0.172
	Azufre	0.06	0.03	0.05
Micronutrientes (mg/kg)	Molibdeno	0.30	0.59	0.40
	Hierro	59.7	48.0	107
	Manganeso	26.8	29.5	43.7
	Cobre	<2.00	<2.00	<2.00
	Zinc	31.3	35.7	41.9
	Boro	13.5	11.2	11.3

De la [Tabla 6.1](#), se observa que los macronutrientes predominantes son nitrógeno (1.9-2.2%), fósforo (0.475-0.787%) y potasio (0.42-0.67%), mientras que el calcio (0.08-0.11%), magnesio (0.166-0.242%) y azufre (0.03-0.06%) presentan menores concentraciones. Entre los micronutrientes, el hierro (48-107 mg/kg), el zinc (31.3-41.9 mg/kg) y el manganeso (26.8-43.7 mg/kg) destacan por sus mayores concentraciones, en comparación con el molibdeno (0.3-0.59 mg/kg), el boro (11.2-13.5 mg/kg) y el cobre (<2 mg/kg).

Estos resultados se representan gráficamente en la [Figura 6.1](#), que muestra las concentraciones de macronutrientes y micronutrientes de los granos de quinua de Cabana.

**Figura 6.1**

Diagrama de concentración de macronutrientes y micronutrientes en los granos de la planta quinua de Cabana.





En la [Figura 6.1](#), se aprecia que los macronutrientes nitrógeno, fósforo y potasio presentan las concentraciones más altas, seguidos por magnesio. Entre los micronutrientes, el hierro es el elemento con mayor concentración, seguido por el zinc y el manganeso.

En síntesis, en promedio de cada elemento analizado en los granos de quinua, se muestran de la siguiente manera:

- **Macronutrientes:** nitrógeno total (2.1%), potasio (0.527%) y fósforo (0.595%) como los más abundantes, mientras que calcio (0.097%), magnesio (0.193%) y azufre (0.047%) presentan concentraciones más bajas.
- **Micronutrientes:** El hierro (71.57 mg/kg) destaca entre los elementos analizados, seguido por el zinc (36.30 mg/kg) y el manganeso (33.33 mg/kg). Los valores más bajos corresponden al cobre (<2 mg/kg) y al molibdeno (0.43 mg/kg).

Estos resultados resaltan la importancia de los elementos minerales esenciales en el cultivo de quinua, no solo para garantizar su desarrollo óptimo, sino también para la transferencia de estos elementos desde las rocas y suelos hasta los granos de quinua. Asimismo, destaca el alto contenido mineral de la quinua

### 6.3 ELEMENTOS MINERALES ESENCIALES EN LAS LITOLOGÍAS

En este apartado se *comparan las distribuciones* de los elementos minerales esenciales presentes en las muestras litológicas del área de Cabana, con el objetivo de comprender su papel como fuente primaria de nutrientes para el sistema suelo-planta, particularmente en el cultivo de quinua. Las litologías estudiadas incluyen formaciones sedimentarias, volcánicas, metamórficas y químicas, que constituyen los materiales parentales de los suelos en esta región.

El análisis químico de las litologías se centra en determinar distribución de las concentraciones de elementos esenciales, como macronutrientes y micronutrientes, que pueden ser liberados al sistema suelo-planta mediante procesos de meteorización química.

Estas distribuciones serán analizadas mediante diagramas de cajas y bigotes, con el objetivo de visualizar la dispersión y concentración de dichos elementos en las distintas agrupaciones litológicas (ver [Figura 6.2](#); [Tabla C.6](#)).

Las muestras de litologías fueron analizadas para determinar las concentraciones de macronutrientes como potasio (K), fósforo (P), calcio (Ca), magnesio (Mg) y azufre (S), así como de micronutrientes como manganeso (Mn), hierro (Fe), zinc (Zn), cobre (Cu), molibdeno (Mo) y níquel (Ni).

Para una interpretación más clara, se emplearán las medianas obtenidas de cada grupo litológico a partir de los diagramas de cajas, para elaborar gráficos de radar. Estos gráficos permitirán una comparación visual más precisa de los elementos minerales esenciales entre las diferentes litologías. Este enfoque complementa el análisis presentado en el anterior, utilizando las litologías agrupadas como base (ver Capítulo 5).

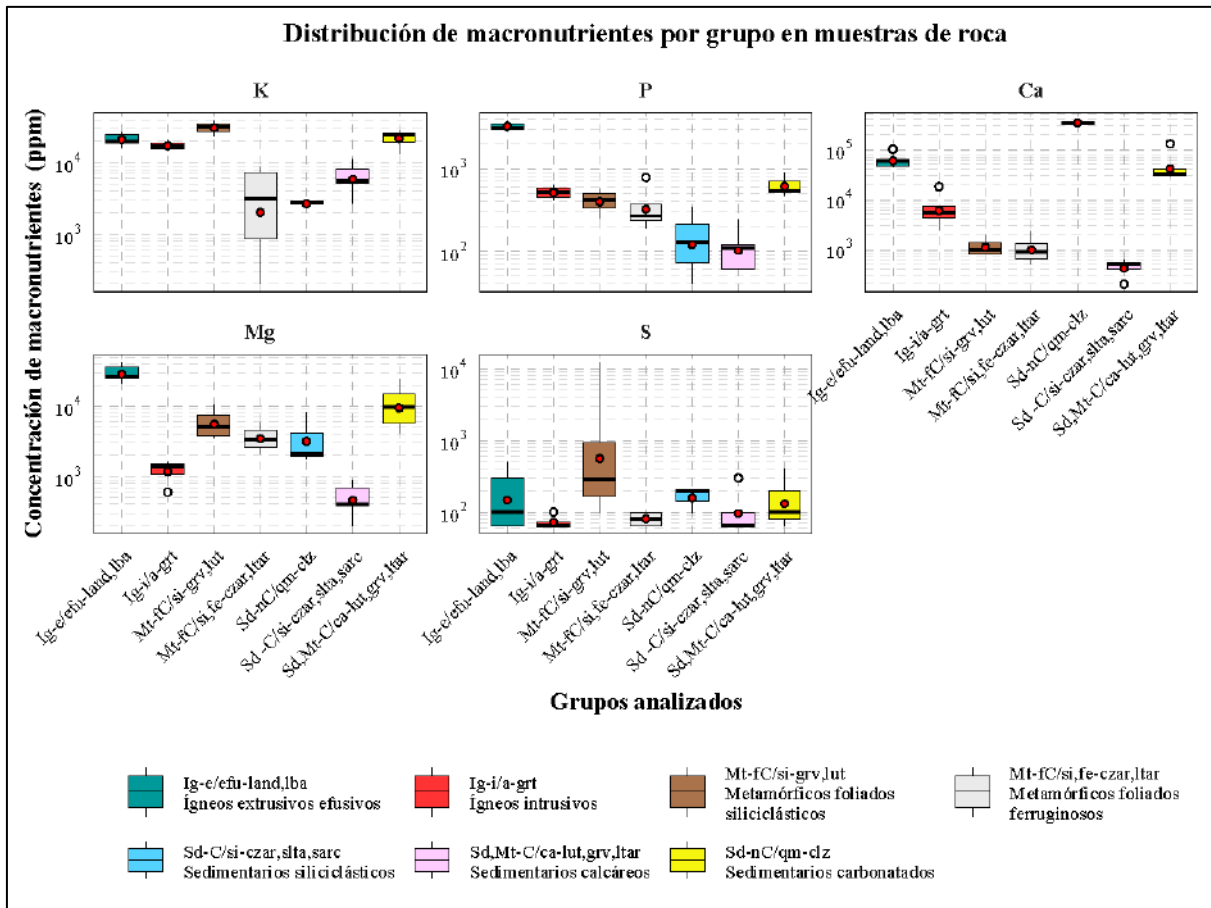
#### 6.3.1 DISTRIBUCIÓN DE MACRONUTRIENTES EN ROCAS PARENTALES

Los macronutrientes, esenciales para el desarrollo de la planta quinua, se analizarán a través de las muestras litológicas previamente agrupadas. En el gráfico de cajas y bigotes se observa la dispersión de elementos como potasio (K), fósforo (P), calcio (Ca), magnesio (Mg) y Azufre (S) en cada grupo de litología (ver [Figura 6.2](#)). Los promedios de cada grupo litológico, representadas en el gráfico, permiten identificar la distribución y tendencia de los macronutrientes esenciales en las rocas parentales.

Esta comparación facilitará la identificación de las litologías que ofrecen un mayor aporte de macronutrientes, lo que podría influir directamente en la calidad de los suelos destinados al cultivo de quinua.

**Figura 6.2**

*Comparación de la distribución de las concentraciones elementos minerales esenciales por agrupaciones litológicas, específicamente para los macronutrientes.*



La Figura 6.2 presenta diagramas de cajas y bigotes que muestran la concentración de macronutrientes en los diferentes grupos litológicos. A continuación, se analiza cada elemento considerando la posición de las medianas:

**6.3.1.1 Potasio (K)**

El potasio (K) es el primer elemento analizado dentro del grupo de macronutrientes esenciales para las plantas. Este macronutriente presenta concentraciones que oscilan entre 2,700 ppm y 31,200 ppm en las muestras de roca analizadas. Su distribución entre las diferentes litologías muestra variaciones significativas.

Los grupos litológicos metamórficos de bajo grado, de grano fino (*Mt-fC/si-grv,lut*) y sedimentarios calcáreos (*Sd,Mt-C/ca-lut,grv,ltar*) exhiben las mayores concentraciones de potasio, con medianas de 31,200 ppm y 24,100 ppm, respectivamente. Estas litologías están caracterizadas principalmente por la presencia de lutitas y grauwas. Posteriormente, las volcánicas efusivas (*Ig-e/efu-land,lba*) y las ígneas intrusivas (*Ig-i/a-grt*) presentan medianas de 20,000 ppm y 17,200 ppm, respectivamente, posicionándolas como fuentes importantes de este macronutriente.

Por el contrario, los grupos litológicos como las sedimentarias siliciclásticas (*Sd-C/si-czar,ltar*), metamórficas siliciclásticas ferruginosas (*Mt-fC/si,fe-czar,ltar*) y carbonatadas (*Sd-nC/qm-clz*), presentan medianas de 5,500 ppm, 4,100 ppm y 2,700 ppm, respectivamente. Estas litologías, compuestas principalmente por cuarzoarenitas y calizas, muestran un contenido de potasio limitado, lo que podría ofrecer un aporte menor de este elemento esencial a los suelos.

### 6.3.1.2 Fosforo (P):

La distribución de fósforo (P) en las diferentes litologías muestra variaciones significativas entre los grupos analizados. Este macronutriente presenta concentraciones que oscilan entre 110 ppm y 3,120 ppm en las muestras de roca evaluadas.

Las volcánicas efusivas (*Ig-e/efu-land,lba*) destacan como la litología con la mayor concentración de fósforo, con una mediana de 3,120 ppm, posicionándolas como la principal fuente de este macronutriente. Asimismo, las sedimentarias calcáreas (*Sd,Mt-C/ca-lut,grv,ltar*), las ígneas intrusivas (*Ig-i/a-grt*) y las metamórficas de grano fino (*Mt-fC/si-grv,lut*) presentan medianas de 530 ppm, 515 ppm y 420 ppm, respectivamente, y pueden considerarse como aportantes secundarios relevantes de fósforo en comparación con las volcánicas efusivas.

En contraste, las litologías con menores concentraciones de fósforo incluyen a las sedimentarias siliciclásticas (*Sd-C/si-czar,slta,sarc*) y las sedimentarias carbonatadas (*Sd-nC/qm-clz*), con medianas de 110 ppm y 130 ppm, respectivamente.

### 6.3.1.3 Calcio (Ca)

El calcio (Ca) muestra concentraciones que varían entre 500 ppm y 330,000 ppm en las rocas analizadas. Su distribución entre los distintos grupos litológicos revela diferencias significativas en los aportes de este macronutriente.

Las sedimentarias carbonatadas (*Sd-nC/qm-clz*), caracterizadas por la presencia de calizas, destacan como la litología con la mayor concentración de calcio, con una mediana de 330,000 ppm, posicionándolas como la principal fuente de este macronutriente. Les siguen las volcánicas efusivas (*Ig-e/efu-land,lba*) y las sedimentarias calcáreas (*Sd,Mt-C/calut,grv,ltar*), con medianas de 59,100 ppm y 32,500 ppm, respectivamente, las cuales también aportan cantidades importantes de calcio.

En contraste, las sedimentarias siliciclásticas (*Sd-C/si-czar,slta,sarc*) se destacan por tener la menor concentración de calcio, con una mediana de 500 ppm. Otras litologías con bajas concentraciones incluyen a las metamórficas de grano fino (*Mt-fC/si-grv,lut*) y a las metamórficas siliciclásticas ferruginosas (*Mt-fC/si,fe-czar,ltar*), con medianas de 1,000 ppm y 900 ppm, respectivamente. Estas litologías aportan cantidades limitadas de calcio, lo que podría influir negativamente en la disponibilidad de este macronutriente en los suelos derivados.

### 6.3.1.4 Magnesio (Mg)

El magnesio (Mg) presenta concentraciones que oscilan entre 400 ppm y 26,200 ppm en las muestras de roca evaluadas. La comparación de su distribución entre los diferentes grupos litológicos muestra variaciones significativas.

Las volcánicas efusivas (*Ig-e/efu-land,lba*) destacan como la litología con la mayor concentración de magnesio, con una mediana de 26,200 ppm, posicionándolas como la principal fuente de este macronutriente. Les siguen las sedimentarias calcáreas (*Sd,Mt-C/calut,grv,ltar*), con una mediana de 9,800 ppm, clasificándolas como una fuente secundaria relevante de magnesio.

En contraste, las sedimentarias siliciclásticas (*Sd-C/si-czar,slta,sarc*) presentan la menor concentración de magnesio, con una mediana de 400 ppm. Esta litología aporta cantidades limitadas de este macronutriente, lo que podría influir en la disponibilidad de magnesio en los suelos derivados.

### 6.3.1.5 Azufre (S)

El azufre (S) presenta concentraciones que oscilan entre 65 ppm y 300 ppm en las muestras de roca evaluadas. Según el control de calidad, la confiabilidad del azufre como elemento es moderada, por lo que los resultados obtenidos deben interpretarse de manera referencial. La comparación de su distribución entre los diferentes grupos litológicos muestra variaciones significativas.

Las metamórficas de grano fino (*Mt-fC/si-grv,lut*), caracterizadas por meta-lutitas y meta-grauwacas, presentan la mayor concentración de azufre, con una mediana de 300 ppm, destacándose como la principal fuente de este elemento entre los grupos litológicos. Les siguen las sedimentarias carbonatadas (*Sd-nC/qm-clz*), con una mediana de 200 ppm, que también aportan cantidades importantes de este micronutriente.

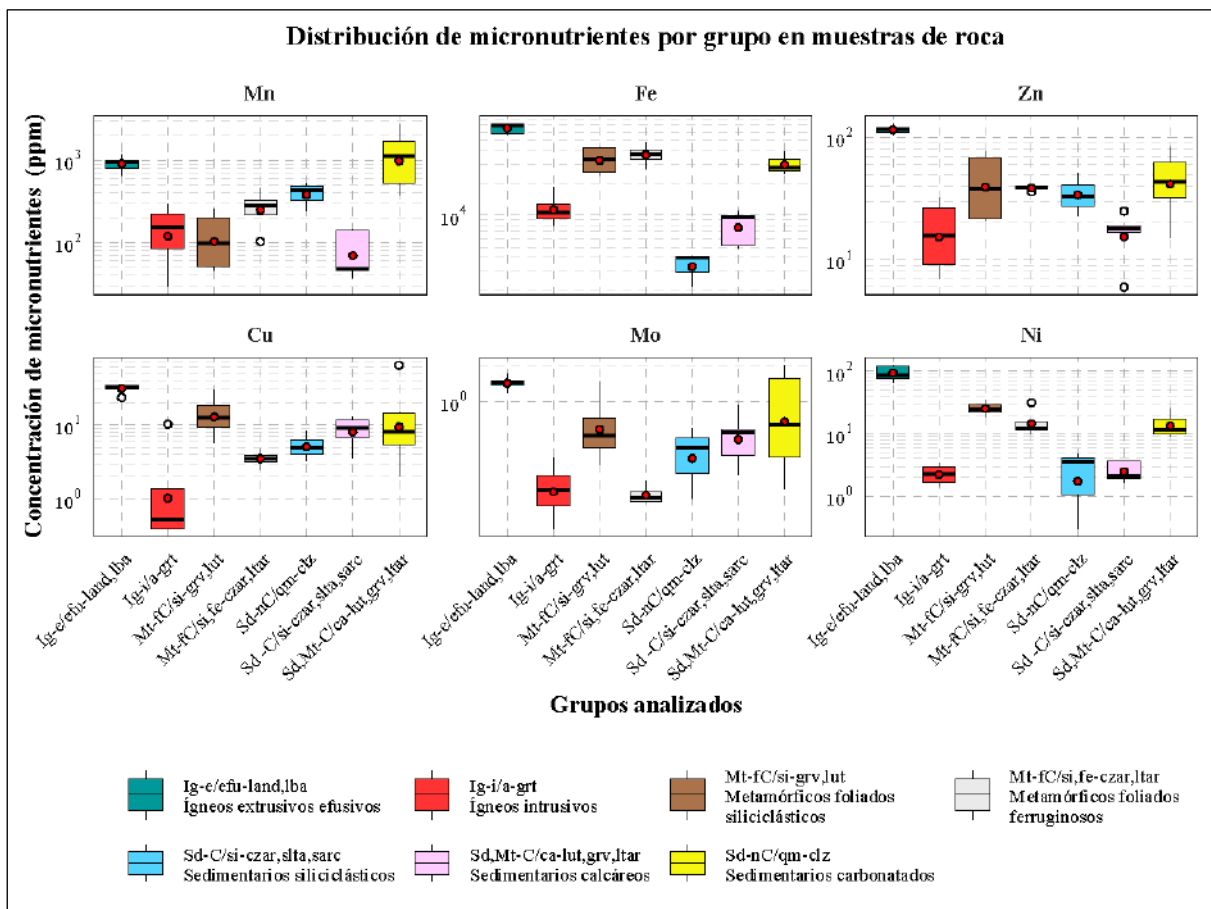
En contraste, las litologías con menores concentraciones incluyen a las ígneas intrusivas (*Ig-i/a-grt*) y las sedimentarias siliciclásticas (*Sd-C/si-czar,slta,sarc*), ambas con una mediana de 65 ppm, lo que las posiciona como fuentes limitadas de azufre. Asimismo, las metamórficas siliciclásticas ferruginosas (*Mt-fC/si,fe-czar,ltar*) tienen una mediana de 82.50 ppm, confirmando su aporte restringido en comparación con otros grupos litológicos.

### 6.3.2 DISTRIBUCIÓN DE MICRONUTRIENTES EN ROCAS PARENTALES

Esta sección se centra en la evaluación de los micronutrientes esenciales para las plantas, como el manganeso (Mn), hierro (Fe), zinc (Zn), cobre (Cu), y molibdeno (Mo), y níquel (Ni), analizando su distribución en los distintos grupos litológicos. Para ello, se emplean diagramas de cajas y bigotes que permiten comparar las concentraciones de estos elementos (ver [Figura 6.3](#)).

**Figura 6.3**

*Comparación de la distribución de las concentraciones de micronutrientes por agrupaciones litológicas.*



La [Figura 6.3](#) muestra la dispersión y posición de las medianas de los micronutrientes analizados en cada grupo litológico. A continuación, se describen las características principales de cada elemento:

### 6.3.2.1 Manganese (Mn)

La comparación de la distribución de manganeso (Mn) en los diferentes grupos litológicos muestra variaciones significativas entre los grupos analizados. Este micronutriente presenta concentraciones que oscilan entre 48 ppm y 1,120 ppm en las muestras de rocas evaluadas.

El análisis de la distribución de manganeso en los diferentes grupos litológicos indica que litologías sedimentarias calcáreas (*Sd,Mt-C/ca-lut,grv,ltar*) y volcánicas efusivas (*Ig-e/efu-land,lba*) ofrecen los mayores aportes de manganeso a los suelos, con medianas 1120 ppm y 959 ppm, respectivamente.

En contraste, las litologías sedimentarias siliciclásticas (*Sd-C/si-czar,slta,sarc*) presentan la mediana más baja con 48 ppm. Asimismo, metamórficas siliciclásticas de grano fino (*Mt-fC/si-grv,lut*) tienen una mediana de 120.5 ppm, y las rocas ígneas intrusivas (*Ig-i/a-grt*) alcanzarán una mediana de 162 ppm. Estos grupos podrían impactar negativamente la fertilidad de los suelos derivados de estas rocas.

### 6.3.2.2 Hierro (Fe)

La comparación de la distribución de hierro (Fe) en los diferentes grupos litológicos muestra variaciones significativas entre los grupos analizados. Este micronutriente presenta concentraciones que oscilan entre 4,000 ppm y 69,600 ppm en las muestras de rocas evaluadas. Las litologías metamórficas siliciclásticas ferruginosas (*Mt-fC/si,fe-czar,ltar*) y metamórficas de grano fino (*Mt-fC/si-grv,lut*) ofrecen los mayores aportes de hierro a los suelos, con medianas de 37,500 ppm y 34,400 ppm, respectivamente. Estas litologías se caracterizan por una alta proporción de minerales ricos en hierro, lo que contribuye a sus concentraciones elevadas.

En contraste, las litologías sedimentarias carbonatadas (*Sd-nC/qm-clz*) presentan la mediana más baja con 4,000 ppm. Asimismo, las sedimentarias siliciclásticas (*Sd-C/si-czar,slta,sarc*) tienen una mediana de 9,600 ppm, mientras que las rocas ígneas intrusivas (*Ig-i/a-grt*) alcanzan una mediana de 10,500 ppm. Estos grupos podrían limitar el aporte de hierro a los suelos, lo que podría impactar su capacidad para proporcionar este elemento esencial a las plantas.



### 6.3.2.3 Zinc (Zn)

La comparación de la distribución de zinc (Zn) en los diferentes grupos litológicos muestra variaciones importantes entre los grupos analizados. Este micronutriente presenta concentraciones que oscilan entre 18 ppm y 116 ppm en las muestras de rocas evaluadas.

El análisis indica que las volcánicas efusivas (*Ig-e/efu-land,lba*) presentan la mayor concentración de zinc, con una mediana de 116 ppm, superando ampliamente a los demás grupos litológicos. Esto representa más del doble de las concentraciones observadas en otros grupos litológicos, destacando a las volcánicas efusivas como una fuente significativa de este micronutriente. Por su parte, las litologías metamórficas de grano fino (*Mt-fC/si-grv,lut*) y sedimentarias calcáreas (*Sd,Mt-C/ca-lut,grv,ltar*) presentan medianas de 44.5 ppm y 43 ppm, respectivamente.

Por otro lado, las litologías con menores concentraciones de zinc incluyen a las sedimentarias siliciclásticas (*Sd-C/si-czar,slta,sarc*) y las ígneas intrusivas (*Ig-i/a-grt*), con medianas de 18 ppm y 17.5 ppm, respectivamente. Estas litologías tienen un aporte significativamente menor de zinc en comparación con las volcánicas efusivas, lo que podría impactar la disponibilidad de este elemento esencial para las plantas.

### 6.3.2.4 Cobre (Cu)

Este micronutriente (Cu) presenta concentraciones que oscilan entre 0.55 ppm y 32.30 ppm en las muestras de rocas evaluadas. La comparación de su distribución entre los diferentes grupos litológicos muestra variaciones significativas.

El análisis de la distribución del cobre en las litologías de rocas parentales indica que las litologías volcánicas (*Ig-e/efu-land,lba*) presentan la mayor concentración de cobre, con una mediana de 32.3 ppm, superando ampliamente a los demás grupos litológicos. Por su parte, las litologías sedimentarias calcáreas (*Sd,Mt-C/ca-lut,grv,ltar*) tienen una mediana de 12.95 ppm, posicionándolas también como una fuente relevante de este micronutriente.

En contraste, la litología ígnea intrusiva (*Ig-i/a-grt*) presenta la menor concentración de cobre, con una mediana de 0.55 ppm, mientras que las metamórficas siliciclásticas ferruginosas (*Mt-fC/si,fe-czar,ltar*) y las sedimentarias carbonatadas (*Sd-nC/qm-clz*) tienen medianas de 3.55 ppm y 4.90 ppm, respectivamente. Estas litologías aportan cantidades significativamente menores de cobre en comparación con las volcánicas efusivas, limitando relativamente la disponibilidad de este micronutriente en los suelos derivados.

### 6.3.2.5 Molibdeno (Mo)

El molibdeno (Mo) presenta concentraciones que oscilan entre 0.16 ppm y 1.45 ppm en las muestras de rocas evaluadas. La comparación de su distribución entre los diferentes grupos litológicos muestra diferencias importantes.

El análisis indica que las volcánicas efusivas (*Ig-e/efu-land,lba*) presentan la mayor concentración de molibdeno, con una mediana de 1.45 ppm, lo que las posiciona como la fuente más importante de este micronutriente entre los grupos litológicos. Por su parte, las litologías sedimentarias calcáreas (*Sd,Mt-C/ca-lut,grv,ltar*) tienen una mediana de 0.64 ppm, ubicándolas igualmente como una fuente relevante de molibdeno, aunque en menor cantidad respecto a las volcánicas efusivas.

En contraste, las litologías con menores concentraciones incluyen a las metamórficas siliciclásticas ferruginosas (*Mt-fC/si,fe-czar,ltar*) y a las ígneas intrusivas (*Ig-i/a-grt*), con medianas de 0.16 ppm y 0.19 ppm, respectivamente. Estas litologías aportan cantidades considerablemente menores de molibdeno.

### 6.3.2.6 Níquel (Ni)

El níquel (Ni) constituye el último micronutriente evaluado, con concentraciones que varían entre 2.10 ppm y 87.40 ppm en las rocas analizadas. Su distribución en los diferentes grupos litológicos revela diferencias significativas.

El análisis indica que las volcánicas efusivas (*Ig-e/efu-land,lba*) presentan la mayor concentración de níquel, con una mediana de 87.40 ppm, destacándolas como la principal fuente de este micronutriente entre los grupos litológicos. Por su parte, las metamórficas de grano fino (*Mt-fC/si-grv,lut*) tienen una mediana de 25.55 ppm, posicionándolas como una fuente secundaria de níquel en comparación con las volcánicas efusivas.

En contraste, las litologías con menores concentraciones incluyen a las sedimentarias carbonatadas (*Sd-nC/qm-clz*), las ígneas intrusivas (*Ig-i/a-grt*) y las sedimentarias siliciclásticas (*Sd-C/si-czar,slta,sarc*), con medianas de 3.60 ppm, 2.30 ppm y 2.10 ppm, respectivamente. Estas litologías aportan cantidades considerablemente menores de níquel, lo que podría limitar la disponibilidad de este micronutriente en los suelos derivados.

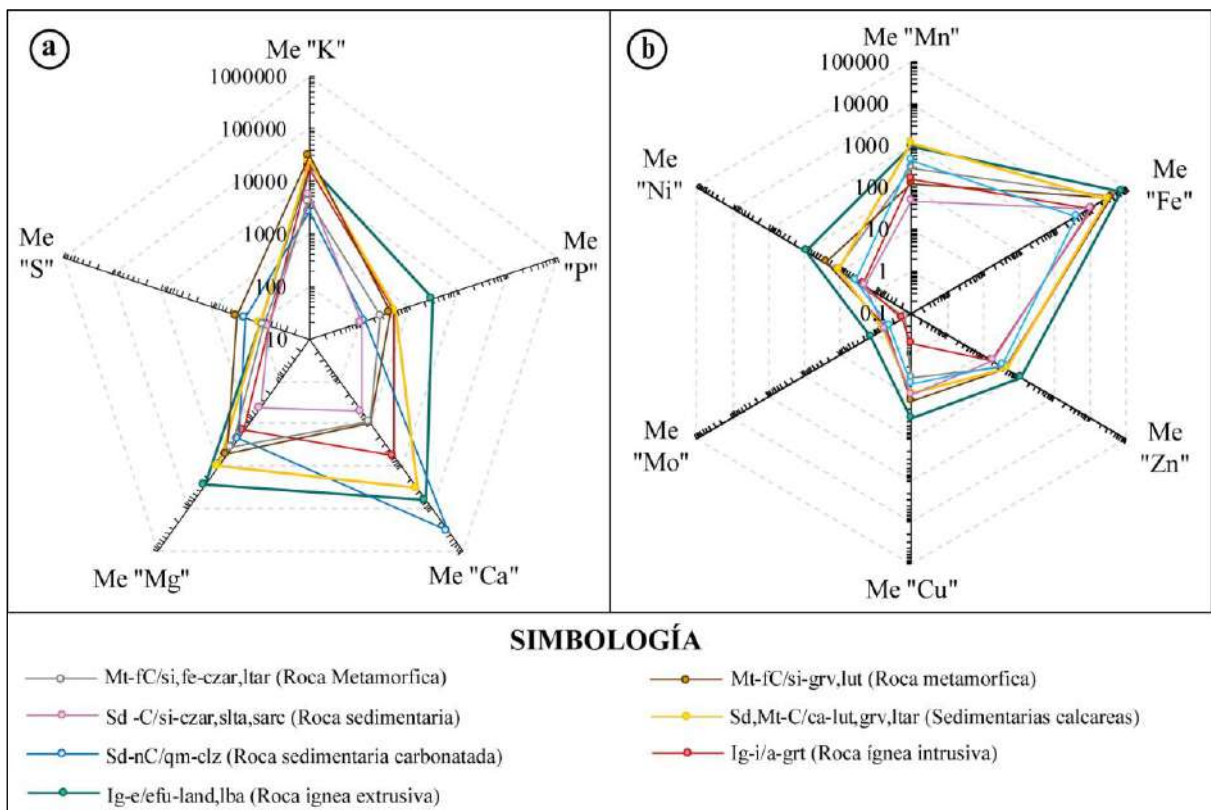
### 6.3.3 COMPARACIÓN DE MACRONUTRIENTES Y MICRONUTRIENTES EN ROCAS PARENTALES

En esta sección se compara la concentración de los elementos minerales esenciales, tanto macronutrientes como micronutrientes, presentes en las rocas parentales que influyen formación de suelos. Las medianas de los macronutrientes y micronutrientes para las diferentes agrupaciones litológicas proporcionan una base sólida para comprender qué tipos de rocas aportan la mayoría de los nutrientes esenciales a los suelos.

Para realizar esta comparación, se utilizaron gráficos de radar (ver Figura 6.4), los cuales permiten visualizar de manera clara la distribución relativa de cada elemento esencial en las distintas agrupaciones litológicas. Estos gráficos facilitan la identificación de los tipos de rocas parentales que aportan mayores o menores cantidades de ciertos nutrientes.

**Figura 6.4**

Comparación de las medianas de las agrupaciones litológicas de (a) macronutrientes y (b) micronutrientes, mediante gráficos de radar.



En la Figura 6.4, se puede observar que diferentes litologías agrupadas, de los elementos químicos totales de los macronutrientes y micronutrientes en las diferentes litologías agrupadas.

- **Macronutrientes en rocas (Figura 6.4a):**

El grupo de litologías que aporta mayor proporción de macronutrientes corresponde a las rocas volcánicas efusivas (*Ig-e/efu-land,lba*). Este grupo litológico se destaca como una de las principales fuentes de macronutrientes, liderando en magnesio (Mg), con una mediana de 26,200 ppm, y en fósforo (P), con 3,120 ppm, siendo estos los valores más altos entre todas las litologías analizadas. Además, contribuye de manera significativa con calcio (Ca) (59,100 ppm) y potasio (K) (20,000 ppm), consolidándose como una litología clave para el suministro de nutrientes esenciales a los suelos.

Le sigue el grupo litológico de rocas sedimentarias calcáreas (*Sd,Mt-C/calut,grv,ltar*), que también sobresale por su aporte significativo en macronutrientes. Este grupo es una de las principales fuentes de potasio (K) (24,100 ppm) y calcio (Ca) (32,500 ppm). Asimismo, contribuye de manera relevante en magnesio (Mg), con una mediana de 9,800 ppm, y fosforo (P), con una mediana de 530 ppm, lo que la consolida como una litología balanceada y esencial para la fertilidad de los suelos.

En contraste, las litologías que menos aportan macronutrientes son las sedimentarias siliciclásticas (*Sd-C/si-czar,slta,sarc*). Este grupo presenta las menores concentraciones en casi todos los macronutrientes evaluados, con valores como 500 ppm de calcio (Ca), 400 ppm de magnesio (Mg) y 110 ppm de fósforo (P), lo que limita considerablemente su contribución a la fertilidad de los suelos. De manera similar, las metamórficas siliciclásticas ferruginosas (*Mt-fC/si,fe-czar,ltar*), aunque tienen un aporte de potasio (K) (4,100 ppm) superior al de las sedimentarias siliciclásticas, presentan bajas concentraciones de calcio (Ca) (900 ppm) y magnesio (Mg) (3,450 ppm), posicionándose también entre las litologías menos relevantes para el suministro de macronutrientes.

- **Micronutrientes en rocas (Figura 6.4b):**

El grupo de litologías que aporta mayor proporción de micronutrientes corresponde a las rocas volcánicas efusivas (*Ig-e/efu-land,lba*). Este grupo litológico sobresale como la fuente más significativa de micronutrientes, liderando en manganeso (Mn) (959 ppm), hierro (Fe) (69,600 ppm), zinc (Zn) (116 ppm), cobre (Cu) (32.30 ppm), molibdeno (Mo) (1.45 ppm) y níquel (Ni) (87.40 ppm). Estas

concentraciones superan ampliamente a las demás litologías, consolidándola como una litología clave en la provisión de estos elementos esenciales para los suelos.

El siguiente grupo destacado es el de las rocas sedimentarias calcáreas (*Sd,Mt-C/ca-lut,grv,ltar*), que ocupa el segundo lugar en el aporte de micronutrientes. Este grupo lidera en manganeso (Mn) con una mediana de 1,120 ppm, superando incluso a las rocas volcánicas en este elemento. Además, aporta cantidades relevantes de hierro (Fe) (28,100 ppm), zinc (Zn) (43 ppm) y níquel (Ni) (11.40 ppm). Aunque no lidera en todos los micronutrientes, su contribución balanceada refuerza su importancia para la fertilidad de los suelos.

En contraste, las litologías que menos aportan micronutrientes son las sedimentarias siliciclásticas (*Sd-C/si-czar,slta,sarc*). Este grupo presenta las menores concentraciones de casi todos los micronutrientes evaluados, con valores como 48 ppm de manganeso (Mn), 9,600 ppm de hierro (Fe) y 18 ppm de zinc (Zn). Estas bajas concentraciones limitan considerablemente su capacidad de enriquecer los suelos con micronutrientes esenciales. Asimismo, las ígneas intrusivas (*Ig-i/a-grt*) presentan las menores concentraciones de níquel (Ni) (2.30 ppm), cobre (Cu) (0.55 ppm) y molibdeno (Mo) (0.19 ppm), lo que las posiciona entre las litologías menos influyentes en el suministro de estos nutrientes.

En **comparación conjunta** de estos elementos esenciales, las volcánicas efusivas (*Ig-e/efu-land,lba*) se destacan como las litologías más completas, sobresaliendo tanto en macronutrientes como en micronutrientes. Estas litologías lideran especialmente en magnesio, fósforo, hierro y zinc, consolidándose como una fuente clave para la fertilidad de los suelos.

Por su parte, las sedimentarias calcáreas (*Sd,Mt-C/ca-lut,grv,ltar*) tienen un papel crucial en el aporte de calcio, potasio y manganeso, posicionándose como una litología balanceada y esencial en el suministro de nutrientes.

En contraste, las sedimentarias siliciclásticas (*Sd-C/si-czar,slta,sarc*) y las metamórficas siliciclásticas ferruginosas (*Mt-fC/si,fe-czar,ltar*) presentan las menores contribuciones tanto de macronutrientes como de micronutrientes, lo que limita significativamente su impacto en la fertilidad de los suelos derivados.

## 6.4 ELEMENTOS MINERALES ESENCIALES EN SUELOS PROFUNDOS

En esta sección se detallan los resultados del análisis de los elementos minerales esenciales presentes en los suelos profundos, recolectados en el área de Cabana, tanto en suelos destinados al cultivo de quinua como en sus alrededores. Este análisis es clave para comprender la disponibilidad de nutrientes necesarios para el desarrollo de las plantas en esta región.

Las muestras de suelos profundos han sido analizadas para determinar las concentraciones de macronutrientes, incluyendo potasio (K), fósforo (P), calcio (Ca), magnesio (Mg) y azufre (S), así como de micronutrientes como manganeso (Mn), hierro (Fe), zinc (Zn), cobre (Cu), molibdeno (Mo) y níquel (Ni).

Al igual que en la sección de litologías, las distribuciones de estos elementos serán presentadas mediante diagramas de cajas y bigotes, lo que permitirá una visualización clara de la variabilidad y concentración de los elementos minerales esenciales en los suelos profundos (ver Figuras 6.5 y 6.6; Tabla C.6).

Finalmente, se utilizarán gráficos de radar para comparar visualmente los niveles de los elementos esenciales presentes en los suelos profundos, utilizando las medianas observadas en los diagramas de cajas.

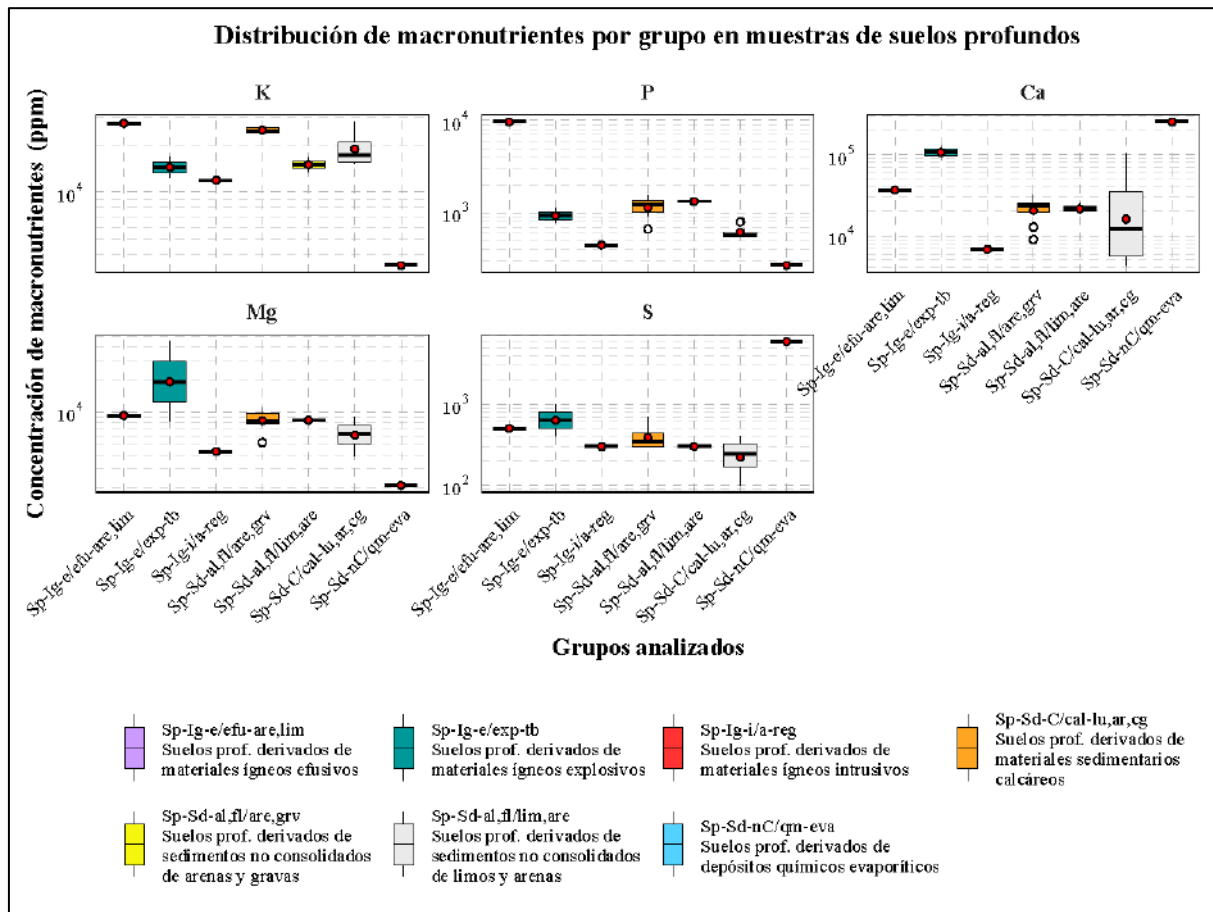
### 6.4.1 DISTRIBUCIÓN DE MACRONUTRIENTES EN SUELOS PROFUNDOS

Continuando con el análisis de suelos profundos, la Figura 6.5 presenta la concentración y distribución de los elementos minerales esenciales, enfocándose específicamente en los macronutrientes. En esta figura se han utilizado diagramas de cajas y bigotes, que permiten visualizar la dispersión y la concentración de los macronutrientes en los diferentes grupos de suelos profundos.

A partir de los diagramas de la Figura 6.5, se pueden identificar patrones significativos en la distribución de cada macronutriente según las agrupaciones de suelos profundos. Estos patrones reflejan las características composicionales de los suelos en el área de estudio. A continuación, se analiza en detalle cada macronutriente, destacando la posición de las medianas y las diferencias observadas en las concentraciones.

**Figura 6.5**

Comparación de la distribución de las concentraciones elementos minerales esenciales por agrupaciones de suelos profundos, específicamente para los macronutrientes.



#### 6.4.1.1 Potasio (K)

El análisis del potasio (K) en los suelos profundos, representado en la Figura 6.5, revela una importante variabilidad en las concentraciones entre los diferentes grupos analizados. Las medianas oscilan entre 3,400 ppm y 27,600 ppm, reflejando diferencias significativas en el aporte de este macronutriente esencial para el desarrollo agrícola.

Los valores más altos de potasio se observan en los suelos derivados de materiales ígneos efusivos (*Sp-Ig-e/efu-are,lim*), con una mediana de 27,600 ppm, consolidándolos como la principal fuente de este macronutriente en suelos profundos.

Sin embargo, es particularmente relevante el grupo de suelos destinados al cultivo de quinua, derivados de sedimentos no consolidados de arenas y gravas (*Sp-Sd-al,fl/are,grv*), que presentan una mediana de 24,650 ppm de potasio. Esta alta concentración posiciona a este grupo como una fuente significativa para el suministro de potasio en los suelos utilizados para el cultivo de quinua, un cultivo exigente en nutrientes.

En comparación, los suelos derivados de materiales sedimentarios calcáreos (*Sp-Sd-C/cal-lu,ar,cg*) aportan potasio de manera moderada, con una mediana de 17,300 ppm, mientras que los suelos asociados a depósitos químicos evaporíticos (*Sp-Sd-nC/qm-eva*) presentan la menor concentración, con 3,400 ppm, lo que limita su contribución al potasio disponible en los suelos profundos. De igual manera, los suelos derivados de materiales ígneos intrusivos (*Sp-Ig-i/a-reg*) presentan una mediana de 11,900 ppm, lo que refleja un aporte reducido en comparación con los grupos líderes.

#### **6.4.1.2 Fosforo (P)**

El análisis del fósforo (P) en los grupos de suelos profundos revela una considerable variabilidad en las concentraciones, con medianas que oscilan entre 270 ppm y 9,680 ppm, reflejando diferencias significativas en el aporte de este macronutriente esencial.

El grupo de suelos profundos derivados de materiales ígneos efusivos (*Sp-Ig-e/efu-are,lim*) presenta la mayor concentración de fósforo, con una mediana de 9,680 ppm, consolidándose como la principal fuente de este nutriente entre todos los grupos analizados.

Por su parte, el grupo de suelos profundos derivados de sedimentos no consolidados de arenas y gravas (*Sp-Sd-al,fl/are,grv*), destinados específicamente al cultivo de quinua, presenta una mediana de 1,210 ppm de fósforo. Este valor es significativo para la productividad de la quinua, ya que este cultivo depende del fósforo para procesos metabólicos esenciales como la formación de raíces y la fotosíntesis. Otro grupo importante es el de los suelos derivados de sedimentos no consolidados de limos y arenas (*Sp-Sd-al,fl/lim,are*), que presenta una mediana ligeramente superior de 1,330 ppm, siendo también relevante para cultivos en suelos profundos.

En contraste, los grupos de suelos profundos derivados de depósitos químicos evaporíticos (*Sp-Sd-nC/qm-eva*) y los asociados a materiales ígneos intrusivos (*Sp-Ig-i/a-reg*) presentan las menores concentraciones de fósforo, con medianas de 270 ppm y 450 ppm, respectivamente. Esto limita considerablemente su impacto en la fertilidad de los suelos en términos de fósforo disponible para los cultivos.



### 6.4.1.3 Calcio (Ca)

El análisis de calcio (Ca) en los grupos de suelos profundos muestra una significativa variabilidad en las concentraciones, con medianas que oscilan entre 6,800 ppm y 255,000 ppm, lo que evidencia diferencias importantes en el aporte de este macronutriente esencial.

El grupo de suelos profundos derivados de depósitos químicos evaporíticos (*Sp-Sd-nC/qm-eva*) lidera de manera sobresaliente con una mediana de 255,000 ppm, siendo la fuente más importante de calcio entre todos los grupos analizados. Esta altísima concentración está directamente relacionada con la composición mineral de estos suelos, ricos en evaporitas.

Continúa con los suelos profundos derivados de materiales ígneos explosivos (*Sp-Ig-e/exp-tb*) presentan una mediana de 109,350 ppm, seguidos por los suelos asociados a materiales ígneos efusivos (*Sp-Ig-e/efu-are,lim*) con 36,600 ppm. Ambos grupos destacan como fuentes significativas de calcio.

Entre los grupos de suelos destinados al cultivo de quinua, los derivados de sedimentos no consolidados de arenas y gravas (*Sp-Sd-al,fl/are,grv*) aportan 23,650 ppm, mientras que los derivados de limos y arenas (*Sp-Sd-al,fl/lim,are*) tienen una mediana de 21,700 ppm. Estos niveles de calcio son relevantes para sustentar el cultivo de quinua.

En contraste, los menores valores de calcio se encuentran en los suelos asociados a materiales ígneos intrusivos (*Sp-Ig-i/a-reg*) y sedimentarias calcáreas (*Sp-Sd-C/cal-lu,ar,cg*), con medianas de 6,800 ppm y 15,400 ppm, respectivamente. Estas litologías presentan un aporte limitado de calcio.

### 6.4.1.4 Magnesio (Mg)

El análisis de magnesio (Mg) en los grupos de suelos profundos revela una amplia variabilidad en las concentraciones, con medianas que oscilan entre 2,100 ppm y 26,350 ppm, reflejando marcadas diferencias en el aporte de este macronutriente esencial.

El grupo de suelos profundos derivados de materiales ígneos explosivos (*Sp-Ig-e/exp-tb*) lidera en el aporte de magnesio, con una mediana de 26,350 ppm, seguido por los suelos derivados de materiales ígneos efusivos (*Sp-Ig-e/efu-are,lim*) con una mediana de 9,300 ppm.

Les siguen de cerca los suelos asociados a sedimentos no consolidados de limos y arenas (*Sp-Sd-al,fl/lim,are*) y sedimentos no consolidados de arenas y gravas (*Sp-Sd-al,fl/are,grv*), con medianas de 8,400 ppm y 8,150 ppm, respectivamente. Estos suelos son relevantes para el cultivo de quinua, que destacan por su aporte significativo de magnesio.

En el rango intermedio, los suelos derivados de materiales sedimentarios calcáreos (*Sp-Sd-C/cal-lu,ar,cg*) presentan una mediana de 6,350 ppm, aportando moderadamente al suministro de magnesio.

En contraste, los menores valores de magnesio se encuentran en los suelos asociados a materiales ígneos intrusivos (*Sp-Ig-i/a-reg*) y depósitos químicos evaporíticos (*Sp-Sd-nC/qm-eva*), con medianas de 4,300 ppm y 2,100 ppm, respectivamente.

#### **6.4.1.5 Azufre (S)**

El análisis de azufre (S) en los grupos de suelos profundos muestra variaciones significativas, con medianas que oscilan entre 250 ppm y 5,900 ppm, destacando importantes diferencias en el aporte de este macronutriente.

El grupo de suelos profundos derivados de depósitos químicos evaporíticos (*Sp-Sd-nC/qm-eva*) lidera en la concentración de azufre, con una mediana de 5,900 ppm, convirtiéndose en la principal fuente de este elemento.

En el rango superior se encuentran también los suelos profundos asociados a materiales ígneos explosivos (*Sp-Ig-e/exp-tb*), con una mediana de 700 ppm, consolidándose como un aporte relevante de azufre. Les siguen los suelos derivados de materiales ígneos efusivos (*Sp-Ig-e/efu-are,lim*), con una mediana de 500 ppm, mostrando niveles moderadamente altos de este macronutriente.

En el rango intermedio se posicionan los suelos asociados a sedimentos no consolidados de arenas y gravas (*Sp-Sd-al,fl/are,grv*) y los sedimentos no consolidados de limos y arenas (*Sp-Sd-al,fl/lim,are*), con medianas de 350 ppm y 300 ppm, respectivamente.

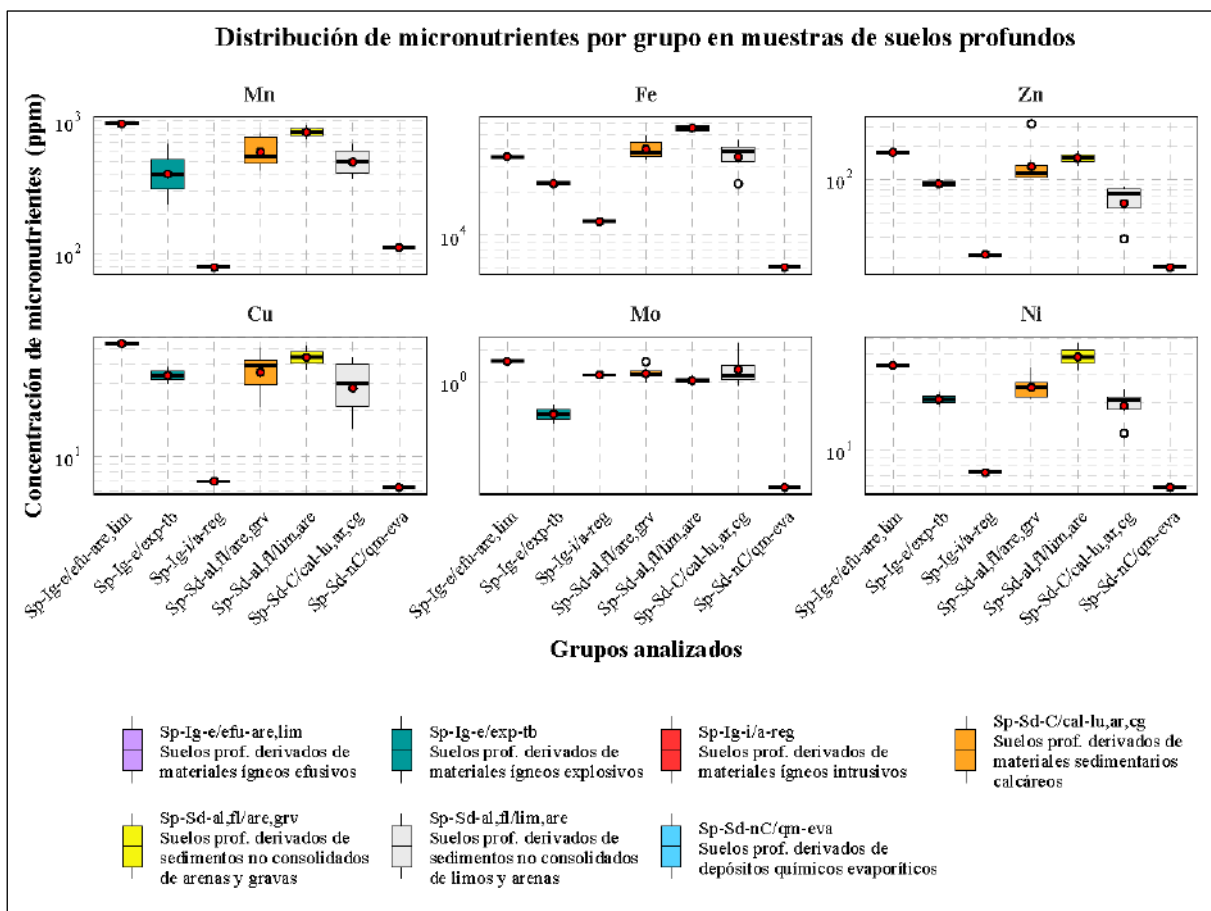
En contraste, los menores valores de azufre se encuentran en los suelos derivados de materiales sedimentarios calcáreos (*Sp-Sd-C/cal-lu,ar,cg*), con una mediana de 250 ppm, posicionándolos como los de menor aporte de azufre entre los suelos profundos analizados.

### 6.4.2 DISTRIBUCIÓN DE MICRONUTRIENTES EN SUELOS PROFUNDOS

En esta sección, se analizan las concentraciones de micronutrientes presentes en los suelos profundos del área de Cabana, con énfasis en los elementos esenciales como manganeso (*Mn*), hierro (*Fe*), zinc (*Zn*), cobre (*Cu*), molibdeno (*Mo*) y níquel (*Ni*). Para representar la distribución y variabilidad de estos micronutrientes, se utilizaron diagramas de cajas y bigotes, los cuales permiten identificar diferencias significativas entre los diferentes grupos de suelos profundos analizados (ver Figura 6.6).

**Figura 6.6**

*Comparación de la distribución de las concentraciones de elementos minerales esenciales por agrupaciones de suelos profundos, específicamente para los micronutrientes.*



La Figura 6.6 muestran la variabilidad en la concentración de micronutrientes en los suelos profundos. Las concentraciones de estos elementos varían ampliamente entre los diferentes tipos de suelo, lo que refleja las diversas condiciones geoquímicas presentes en las áreas de estudio. A continuación, se describen las concentraciones de los micronutrientes más representativos:

#### 6.4.2.1 Manganese (Mn):

El análisis de manganeso (Mn) en los grupos de suelos profundos muestra una amplia variabilidad en las concentraciones, con medianas que oscilan entre 79 ppm y 960 ppm, lo que refleja diferencias significativas en el aporte de este micronutriente esencial.

El grupo de suelos profundos derivados de materiales ígneos efusivos (*Sp-Ig-e/efu-are,lim*) lidera con una mediana de 960 ppm, consolidándose como la principal fuente de manganeso entre los grupos analizados. Le sigue el grupo de suelos derivados de sedimentos no consolidados de limos y arenas (*Sp-Sd-al,fl/lim,are*), con una mediana de 835 ppm, y de arenas y gravas (*Sp-Sd-al,fl/are,grv*), con 547 ppm. Ambos grupos son especialmente importantes, ya que corresponden a suelos profundos destinados al cultivo de quinua, lo que destaca su relevancia para la producción agrícola.

En contraste, las menores concentraciones se registran en los suelos de depósitos químicos evaporíticos (*Sp-Sd-nC/qm-eva*) y los derivados de materiales ígneos intrusivos (*Sp-Ig-i/a-reg*), con medianas de 112 ppm y 79 ppm, respectivamente. Estos últimos grupos tienen un aporte limitado de manganeso.

#### 6.4.2.2 Hierro (Fe)

El análisis de hierro (Fe) en los suelos profundos revela una amplia variabilidad en las concentraciones, con medianas que oscilan entre 6,000 ppm y 55,700 ppm. Estas diferencias reflejan las diversas condiciones geoquímicas presentes en los suelos del área de Cabana.

El grupo de suelos derivados de sedimentos no consolidados de limos y arenas (*Sp-Sd-al,fl/lim,are*) lidera en el aporte de hierro, con una mediana de 55,700 ppm, posicionándose como el grupo más relevante para el suministro de este micronutriente esencial.

Le siguen el grupo de suelos profundos derivados de materiales sedimentarios calcáreos (*Sp-Sd-C/cal-lu,ar,cg*), el grupo de suelos no consolidados de arenas y gravas (*Sp-Sd-al,fl/are,grv*, suelos profundos destinados al cultivo de quinua) y el grupo derivado de materiales ígneos efusivos (*Sp-Ig-e/efu-are,lim*), con medianas de 38,450 ppm, 37,800 ppm y 35,200 ppm, respectivamente.

En contraste, los suelos profundos derivados de depósitos químicos evaporíticos (*Sp-Sd-nC/qm-eva*) muestran las menores concentraciones de hierro, con una mediana de 6,000 ppm, evidenciando su limitada capacidad para aportar este micronutriente.

### 6.4.2.3 Zinc (Zn)

El análisis de zinc (Zn) en los grupos de suelos profundos revela una amplia variabilidad en las concentraciones, con medianas que oscilan entre 16 ppm y 176 ppm. Estos valores reflejan diferencias significativas en la capacidad de las diferentes litologías para aportar este micronutriente esencial.

El grupo de suelos profundos derivados de materiales ígneos efusivos (*Sp-Ig-e/efu-are,lim*) lidera el aporte de zinc, con una mediana de 176 ppm, destacándose como la principal fuente de este micronutriente entre los grupos analizados. Le siguen los grupos de suelos profundos derivados de sedimentos no consolidados de limos y arenas (*Sp-Sd-al,fl/lim,are*), con una mediana de 158 ppm, y de sedimentos no consolidados de arenas y gravas (*Sp-Sd-al,fl/are,grv*), con una mediana de 113.5 ppm. Ambos grupos, además de ser relevantes para los suelos destinados al cultivo de quinua, exhiben una notable capacidad para contribuir con zinc a los suelos agrícolas.

En contraste, los suelos profundos derivados de depósitos químicos evaporíticos (*Sp-Sd-nC/qm-eva*) presentan la menor concentración de zinc, con una mediana de 16 ppm, lo que limita significativamente su aporte de este micronutriente a los suelos. Otros grupos con concentraciones bajas incluyen a los derivados de materiales ígneos intrusivos (*Sp-Ig-i/a-reg*), con una mediana de 21 ppm.

### 6.4.2.4 Cobre (Cu):

El análisis de la concentración de cobre (Cu) en los grupos de suelos profundos evidencia una marcada variabilidad, con medianas que oscilan entre 6.3 ppm y 54.4 ppm, lo que refleja diferencias significativas en el aporte de este micronutriente entre los diferentes grupos de suelos.

El grupo de suelos derivados de materiales ígneos efusivos (*Sp-Ig-e/efu-are,lim*) se posiciona como el principal aportante de cobre, con una mediana de 54.4 ppm. Le siguen los grupos de suelos profundos derivados de sedimentos no consolidados de limos y arenas (*Sp-Sd-al,fl/lim,are*) y de arenas y gravas (*Sp-Sd-al,fl/are,grv*), ambos destinados al cultivo de quinua. Estos grupos presentan medianas de 44.9 ppm y 39.2 ppm, respectivamente, resaltando su relevancia en el aporte de cobre en los suelos.

En contraste, los valores más bajos corresponden a los depósitos químicos evaporíticos (*Sp-Sd-nC/qm-eva*) y los suelos asociados a materiales ígneos intrusivos (*Sp-Ig-i/a-reg*), con medianas de 6.3 ppm y 6.9 ppm, respectivamente.

#### 6.4.2.5 Molibdeno (Mo)

El análisis de molibdeno (Mo) en los suelos profundos revela concentraciones con medianas que oscilan entre 0.1 ppm y 1.56 ppm, lo que indica una distribución variable entre los diferentes grupos de suelos profundos evaluados.

El grupo de suelos profundos derivados de materiales ígneos efusivos (*Sp-Ig-e/efu-are,lim*) lidera en la concentración de molibdeno, con una mediana de 1.56 ppm, consolidándose como la principal fuente de este micronutriente esencial.

Por otro lado, los grupos de suelos profundos derivados de sedimentos no consolidados de arenas y gravas (*Sp-Sd-al,fl/are,grv*), materiales sedimentarios calcáreos (*Sp-Sd-C/cal-lu,ar,cg*), materiales ígneos intrusivos (*Sp-Ig-i/a-reg*) y sedimentos no consolidados de limos y arenas (*Sp-Sd-al,fl/lim,are*) presentan concentraciones relativamente similares de molibdeno, con medianas de 1.18 ppm, 1.16 ppm, 1.16 ppm y 1.03 ppm, respectivamente.

En contraste, las concentraciones más bajas de molibdeno se encuentran en los suelos profundos asociados a depósitos químicos evaporíticos (*Sp-Sd-nC/qm-eva*), con una mediana de 0.1 ppm, lo que limita su contribución al suministro de este elemento.

#### 6.4.2.6 Níquel (Ni)

El análisis del níquel (Ni) en los grupos de suelos profundos revela una variabilidad significativa, con valores de medianas que oscilan entre 5.9 ppm y 39.1 ppm, lo que refleja diferencias importantes en el aporte de este micronutriente entre las distintas litologías presentes en la región.

Los grupos de suelos profundos derivados de sedimentos no consolidados de limos y arenas (*Sp-Sd-al,fl/lim,are*), materiales ígneos efusivos (*Sp-Ig-e/efu-are,lim*) y sedimentos no consolidados de arenas y gravas (*Sp-Sd-al,fl/are,grv*) presentan concentraciones relativamente similares, con medianas de 39.1 ppm, 34 ppm y 24.85 ppm, respectivamente. Estos suelos están destinados al cultivo de quinua.

En contraste, los grupos con las menores concentraciones son los suelos derivados de materiales ígneos intrusivos (*Sp-Ig-i/a-reg*) y depósitos químicos evaporíticos (*Sp-Sd-nC/qm-eva*), con medianas de 7.3 ppm y 5.9 ppm, respectivamente.

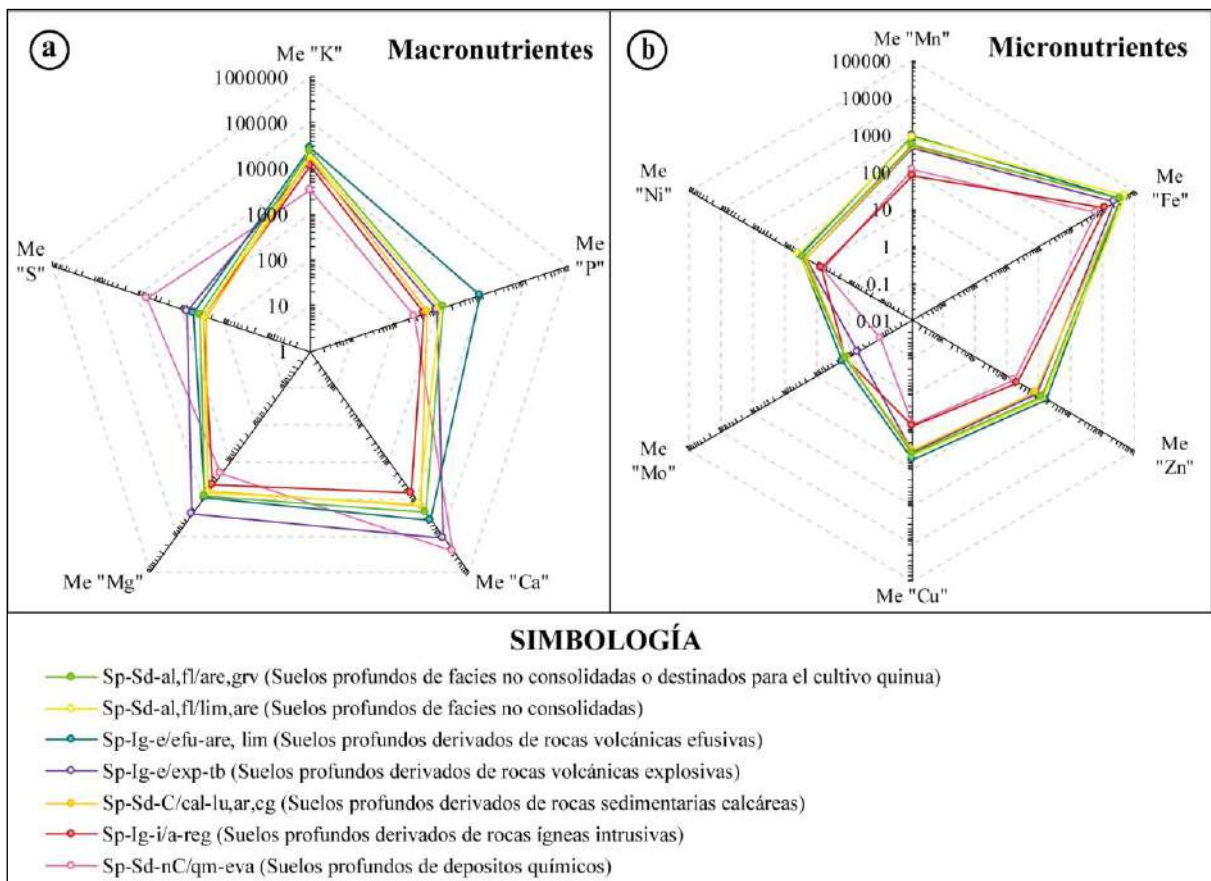
### 6.4.3 COMPARACIÓN DE MICRONUTRIENTES Y MACRONUTRIENTES EN SUELOS PROFUNDOS

En esta sección se compara la concentración de los elementos minerales esenciales, tanto macronutrientes como micronutrientes, presentes en los suelos profundos. Las medianas de estos elementos esenciales para las diferentes agrupaciones de suelos profundos.

Para realizar esta comparación, se utilizaron gráficos de radar, los cuales permiten visualizar de manera clara la distribución relativa de cada elemento esencial en las distintas agrupaciones de suelos profundos. Estos gráficos facilitan la identificación de los tipos de suelos que aportan mayores o menores cantidades de ciertos nutrientes.

**Figura 6.7**

*Comparación de las medianas de las agrupaciones de suelos profundos de (a) macronutrientes y (b) micronutrientes, mediante gráficos de radar*



En la [Figura 6.7](#), se representan las concentraciones de macronutrientes (K, P, Ca, Mg y S) y micronutrientes (Mn, Fe, Zn, Cu, Mo y Ni) en las distintas agrupaciones de suelos profundos:

- **Macronutrientes en suelos profundos (Figura 6.7a):**

Los suelos profundos derivados de materiales ígneos efusivos (*Sp-Ig-e/efu-are,lim*) son los más completos en términos de macronutrientes, liderando en potasio (27,600 ppm), fósforo (9,680 ppm) y calcio (36,600 ppm). Este grupo también destaca por su magnesio (9,300 ppm), lo que refuerza su perfil equilibrado y los posiciona como una fuente clave de nutrientes esenciales para cultivos de alta demanda nutricional. Cabe mencionar que este suelo se realiza de manera referencial, ya que fueron contaminados por artefactos, es decir se encontró materiales como cerámica, huesos, entre otros, lo cual afectaría en la composición química de este suelo.

Por otro lado, los suelos para el cultivo quinua, es decir, suelos derivados de sedimentos no consolidados de arenas y gravas (*Sp-Sd-al,fl/are,grv*) son competitivos en potasio (24,650 ppm) y calcio (23,650 ppm), con un balance adecuado de magnesio (8,150 ppm), lo que los convierte balanceados.

En cuanto a aportes específicos, los suelos derivados de depósitos químicos evaporíticos (*Sp-Sd-nC/qm-eva*) sobresalen exclusivamente en calcio, con una concentración extremadamente alta de 255,000 ppm. Sin embargo, sus bajos niveles de potasio (3,400 ppm) y fósforo (270 ppm) limitan su contribución general a la fertilidad del suelo. Por su parte, los suelos derivados de materiales ígneos explosivos (*Sp-Ig-e/exp-tb*) se destacan en magnesio (26,350 ppm) y azufre (700 ppm), siendo relevantes para cultivos que demandan estos elementos en particular.

En el extremo opuesto, los suelos derivados de materiales ígneos intrusivos (*Sp-Ig-i/a-reg*) presentan las menores concentraciones de macronutrientes. Valores como 11,900 ppm de potasio, 450 ppm de fósforo y 6,800 ppm de calcio limitan considerablemente su capacidad para sostener cultivos exigentes sin un manejo adecuado.

- **Micronutrientes en suelos profundos (Figura 6.7b):**

Los micronutrientes son fundamentales para el desarrollo metabólico de las plantas, y los suelos profundos derivados de sedimentos no consolidados de limos y arenas (*Sp-Sd-al,fl/lim,are*) para el cultivo quinua, lideran en hierro con medianas de (55,700 ppm) y zinc (158 ppm). También presentan altas concentraciones de manganeso (835 ppm) y cobre (44.9 ppm), lo que los convierte en una opción sobresaliente para cultivos exigentes en micronutrientes esenciales. De manera



similar, los suelos derivados de materiales ígneos efusivos (*Sp-Ig-e/efu-are,lim*) muestran altos niveles de manganeso (960 ppm), zinc (176 ppm) y cobre (54.4 ppm).

Por otro lado, ciertos suelos presentan aportes específicos de micronutrientes. Los suelos derivados de materiales ígneos explosivos (*Sp-Ig-e/exp-tb*) destacan en molibdeno (1.56 ppm) y níquel (34 ppm), además de niveles moderados de zinc (91.5 ppm) y cobre (34.05 ppm). Asimismo, los suelos derivados de materiales calcáreos (*Sp-Sd-C/cal-lu,ar,cg*) son relevantes por sus contribuciones específicas de cobre (31.15 ppm) y níquel (20.6 ppm), aunque sus concentraciones generales de otros micronutrientes son menores.

En contraste, los suelos derivados de depósitos químicos evaporíticos (*Sp-Sd-nC/qm-eva*) presentan las menores concentraciones de hierro (6,000 ppm), zinc (16 ppm) y níquel (5.9 ppm). Estas limitaciones los posicionan como los menos relevantes para el aporte de micronutrientes esenciales.

En términos generales, los suelos derivados de materiales ígneos efusivos (*Sp-Ig-e/efu-are,lim*) son los más completos, ya que lideran tanto en macronutrientes como en micronutrientes. Su equilibrio sobresaliente los hace ideales para cultivos de alta demanda, donde se requieren niveles elevados de nutrientes esenciales y trazas. Por otro lado, los suelos derivados de sedimentos no consolidados (*Sp-Sd-al,fl/are,grv*) destacan por su balance general, especialmente en calcio, potasio y zinc, lo que los convierte en una opción confiable y estratégica para cultivos como la quinua. Este grupo combina altos niveles de macronutrientes esenciales con concentraciones adecuadas de micronutrientes.

Por otro lado, los suelos derivados de materiales calcáreos (*Sp-Sd-C/cal-lu,ar,cg*) y depósitos químicos evaporíticos (*Sp-Sd-nC/qm-eva*) sobresalen únicamente en nutrientes específicos como calcio y cobre. Aunque útiles en situaciones puntuales, carecen del balance necesario para aplicaciones agrícolas más amplias. Finalmente, los suelos derivados de materiales ígneos intrusivos (*Sp-Ig-i/a-reg*) presentan las menores concentraciones tanto de macronutrientes como de micronutrientes.

## **6.5 ELEMENTOS MINERALES ESENCIALES EN SUELOS SUPERFICIALES**

En esta sección se presentan los resultados del análisis de los elementos minerales esenciales en los suelos superficiales del área de Cabana, tanto en suelos de cultivo de quinua como en zonas cercanas. Los suelos superficiales son particularmente relevantes para el desarrollo inicial de las plantas, ya que constituyen la capa principal de acceso a nutrientes.

Las muestras de suelos superficiales fueron analizadas para determinar las concentraciones de macronutrientes como potasio (K), fósforo (P), calcio (Ca), magnesio (Mg) y azufre (S), así como de micronutrientes como manganeso (Mn), hierro (Fe), zinc (Zn), cobre (Cu), molibdeno (Mo) y níquel (Ni).

De manera similar a las secciones anteriores de litologías y suelos profundos, las distribuciones de estos elementos serán representadas mediante diagramas de cajas y bigotes para visualizar la dispersión y concentración de los elementos minerales en los suelos superficiales (ver [Figuras 6.8 y 6.9](#); [Tabla C.6](#)).

Finalmente, se emplearán gráficos de radar para comparar los niveles de los elementos minerales esenciales en los suelos superficiales, utilizando las medianas observadas como base para facilitar una comparación visual más clara entre los diferentes tipos de suelo.

### **6.5.1 DISTRIBUCIÓN DE MACRONUTRIENTES EN SUELOS SUPERFICIALES**

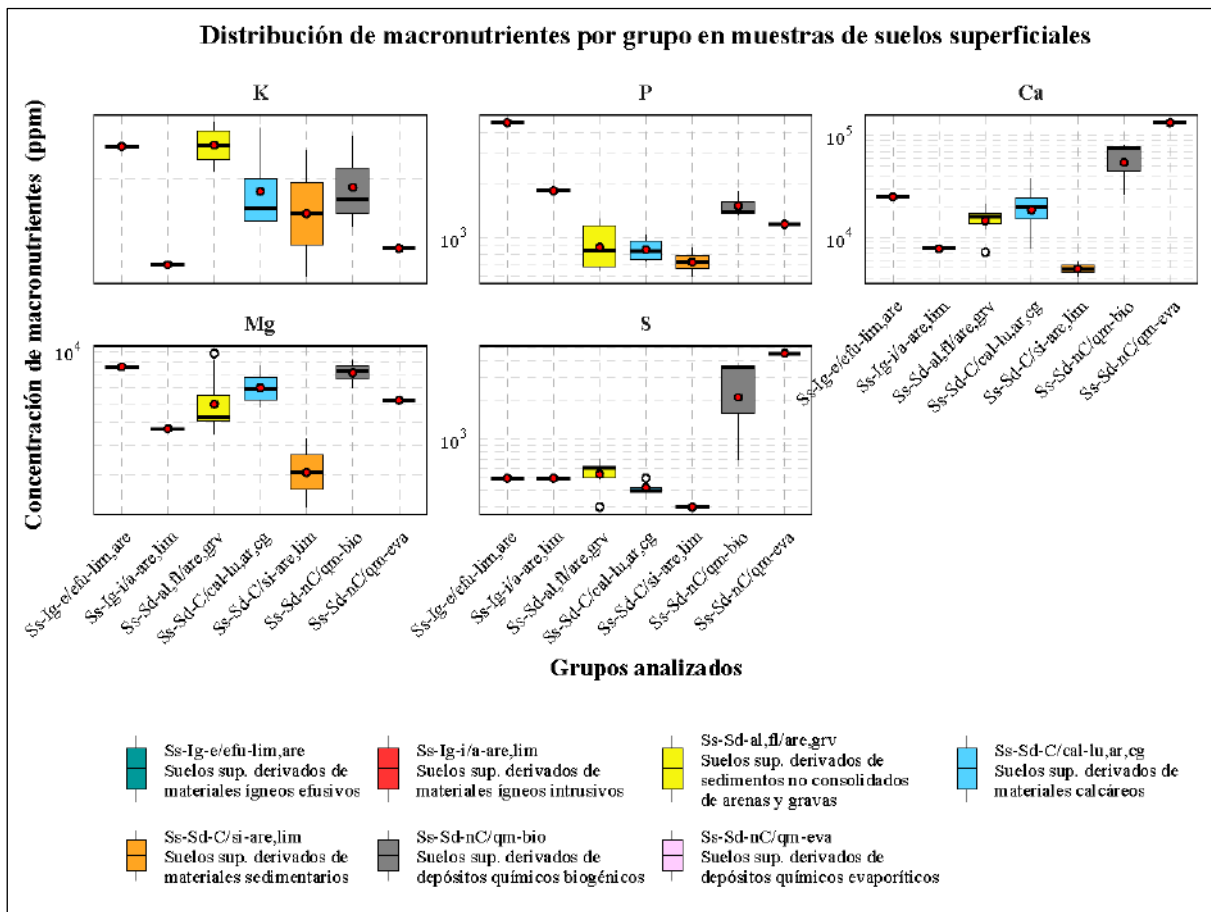
La distribución de los macronutrientes en los suelos superficiales muestra una notable diversidad en las concentraciones entre las agrupaciones de suelos analizados. Los diagramas de cajas y bigotes facilitan la visualización de las medianas y la dispersión de los elementos clave, como potasio, fósforo, calcio, magnesio y azufre.

Este análisis proporciona información esencial para identificar los grupos de suelos con mayor capacidad para aportar macronutrientes esenciales.

A partir de la [Figura 6.8](#), se describen los resultados obtenidos, basados en las medianas, para cada uno de los macronutrientes en las agrupaciones de suelos superficiales.

**Figura 6.8**

Comparación de la distribución de las concentraciones elementos minerales esenciales por agrupaciones de suelos superficiales, específicamente para los macronutrientes.



### 6.5.1.1 Potasio (K)

El análisis de potasio (K) en los suelos superficiales muestra una variabilidad significativa entre las agrupaciones de suelos analizados, con medianas que oscilan entre 13,200 ppm y 23,550 ppm. Este rango de valores refleja las diferencias en la capacidad de las agrupaciones para aportar este macronutriente esencial.

El grupo de suelos derivados de sedimentos no consolidados de arenas y gravas (*Ss-Sd-al, fl/are, grv*), destinados al cultivo de quinua, destaca como la principal fuente de potasio, con una mediana de 23,550 ppm. Le siguen los suelos derivados de materiales ígneos efusivos (*Ss-Ig-e/efu-lim, are*), que presentan una mediana de 23,400 ppm.

Por último, los valores más bajos se observan en los suelos derivados de depósitos químicos evaporíticos (*Ss-Sd-nC/qm-eva*), con una mediana de 14,300 ppm, y en los asociados a materiales ígneos intrusivos (*Ss-Ig-i/a-are, lim*), con 13,200 ppm.

### 6.5.1.2 Fosforo (P)

El análisis de fósforo (P) en los suelos superficiales muestra una variabilidad significativa en las concentraciones, con medianas que oscilan entre 735 ppm y 4,560 ppm, dependiendo del grupo de suelos analizado.

El grupo de suelos superficiales derivados de materiales ígneos efusivos (*Ss-Ig-e/efu-lim,are*) lidera en el aporte de fósforo, con una mediana de 4,560 ppm, representando la mayor concentración entre las agrupaciones evaluadas. Esto resalta la importancia de estos suelos como fuente potencial de este macronutriente esencial. Le sigue el grupo de suelos derivados de materiales ígneos intrusivos (*Ss-Ig-i/a-are,lim*), con una mediana de 1,850 ppm, que también ofrece una contribución significativa al aporte de fósforo en los suelos superficiales.

En contraste, las agrupaciones asociadas a sedimentos no consolidados, como los de arenas y gravas (*Ss-Sd-al,fl/are,grv*), presentan una mediana de 840 ppm, mientras que los derivados de materiales sedimentarios calcáreos (*Ss-Sd-C/cal-lu,ar,cg*) y los sedimentarios siliciclásticos (*Ss-Sd-C/si-are,lim*) tienen medianas de 840 ppm y 735 ppm, respectivamente, situándose en las concentraciones menores de fósforo en los suelos superficiales con respecto a otros grupos.

### 6.5.1.3 Calcio (Ca)

El análisis de calcio (Ca) del grupo de suelos superficiales. El grupo derivados de depósitos químicos evaporíticos (*Ss-Sd-nC/qm-eva*) se posiciona en el extremo superior en términos de concentración de calcio, con una mediana de 134,500 ppm, siendo la fuente más alta de este macronutriente entre las agrupaciones analizadas. Siguiendo este grupo, se encuentran los suelos derivados de depósitos químicos biogénicos (*Ss-Sd-nC/qm-bio*), con una mediana de 75,300 ppm, lo que refleja también un aporte significativo de calcio.

Los suelos superficiales destinados al cultivo de quinua, específicamente aquellos asociados a sedimentos no consolidados de arenas y gravas (*Ss-Sd-al,fl/are,grv*), con medianas de 15,950 ppm.

Por último, los suelos derivados de materiales sedimentarios siliciclásticos (*Ss-Sd-C/si-are,lim*) y materiales ígneos intrusivos (*Ss-Ig-i/a-are,lim*) muestran las menores concentraciones de calcio, con medianas de 5,000 ppm y 7,800 ppm, respectivamente.

#### 6.5.1.4 Magnesio (Mg)

El análisis de las concentraciones de magnesio (Mg) en los suelos superficiales revela una variabilidad significativa, con medianas que van desde 3,250 ppm hasta 8,600 ppm.

Las mayores concentraciones de magnesio se encuentran en el grupo de suelos derivados de materiales ígneos efusivos (*Ss-Ig-e/efu-lim,are*), con una mediana de 8,600 ppm, seguido de cerca por los suelos asociados a depósitos químicos biogénicos (*Ss-Sd-nC/qm-bio*), con 8,300 ppm. Estos grupos se destacan como las principales fuentes de magnesio en los suelos superficiales.

En el rango intermedio, se sitúan los suelos derivados de materiales sedimentarios calcáreos (*Ss-Sd-C/cal-lu,ar,cg*) con 6,950 ppm, los depósitos químicos evaporíticos (*Ss-Sd-nC/qm-eva*) con 6,200 ppm, y los suelos derivados de sedimentos no consolidados de arenas y gravas (*Ss-Sd-al,fl/are,grv*), con 5,300 ppm.

Las menores concentraciones de magnesio se observan en los suelos derivados de materiales ígneos intrusivos (*Ss-Ig-i/a-are,lim*), con 4,700 ppm, y los materiales sedimentarios silíceos (*Ss-Sd-C/si-are,lim*), con 3,250 ppm. Estos grupos presentan una capacidad limitada para suministrar magnesio en comparación con los grupos más ricos en este nutriente.

#### 6.5.1.5 Azufre (S)

El análisis de azufre (S) en los suelos superficiales resalta la marcada variabilidad de este nutriente entre las agrupaciones de suelos, con medianas que fluctúan entre 300 ppm y 4,600 ppm, reflejando diferencias significativas en el aporte de este macronutriente esencial.

Los grupos *Ss-Sd-nC/qm-eva* y *Ss-Sd-nC/qm-bio* se destacan por sus mayores concentraciones de azufre, con medianas de 4,600 ppm y 3,600 ppm, respectivamente. Estos suelos, derivados de depósitos químicos evaporíticos y biogénicos, representan las fuentes más relevantes de azufre en los suelos superficiales, consolidándose como claves para el suministro de este elemento.

En contraste, los grupos *Ss-Sd-al,fl/are,grv* y *Ss-Ig-e/efu-lim,are*, con medianas de 600 ppm y 500 ppm, aportan cantidades moderadas de azufre. Estos suelos presentan un potencial complementario, especialmente en áreas destinadas al cultivo de quinua.

Por otro lado, la menor concentración de azufre se encuentra en el grupo *Ss-Sd-C/si-are,lim*, asociado a suelos sedimentarios silíceos, con una mediana de 300 ppm.

### 6.5.2 DISTRIBUCIÓN DE MICRONUTRIENTES EN SUELOS SUPERFICIALES

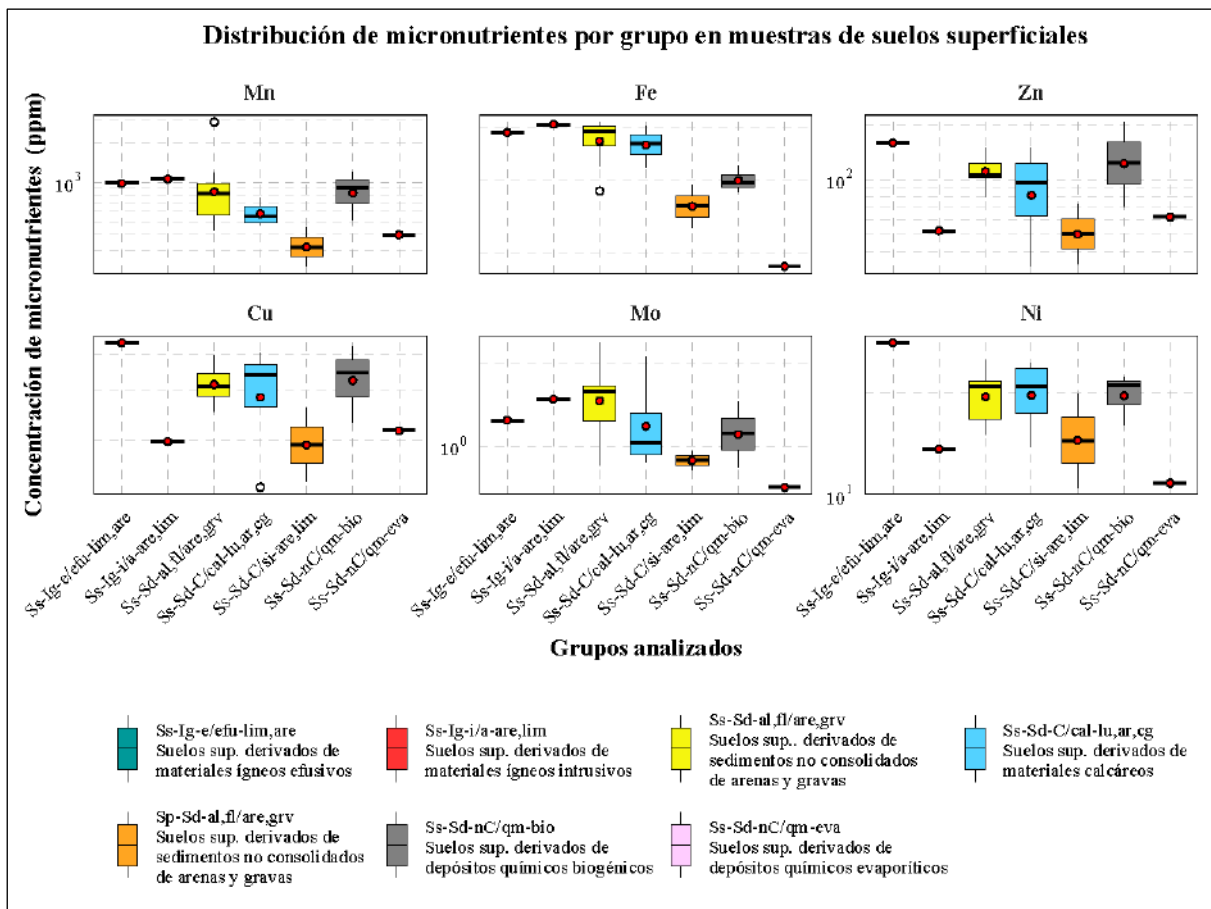
La distribución de los micronutrientes en los suelos superficiales revela una variabilidad considerable en las concentraciones de manganeso (Mn), hierro (Fe), zinc (Zn), cobre (Cu), molibdeno (Mo) y níquel (Ni) entre las diferentes agrupaciones de suelos analizados. Estos elementos, aunque presentes en menores cantidades en comparación con los macronutrientes, son esenciales para el desarrollo de los cultivos.

Los diagramas de cajas y bigotes presentados en la [Figura 6.9](#) permiten visualizar la dispersión y las medianas de estos elementos, facilitando la comparación entre los distintos grupos de suelos superficiales y destacando las agrupaciones con mayores y menores aportes de micronutrientes.

A continuación, se describen los resultados obtenidos, destacando las medianas y patrones observados para cada micronutriente en las agrupaciones de suelos superficiales.

**Figura 6.9**

*Comparación de la distribución de las concentraciones elementos minerales esenciales por agrupaciones de suelos superficiales, específicamente para los micronutrientes.*



### 6.5.2.1 Manganese (Mn)

La distribución de manganeso (Mn) en los suelos superficiales presenta una amplia variabilidad, con valores que oscilan entre 341.5 ppm y 1,060 ppm, dependiendo de la agrupación de suelos analizados.

El grupo de suelos superficiales derivados de materiales ígneos intrusivos (*Ss-Ig-i/a-are,lim*) presenta la mayor concentración de manganeso, con una mediana de 1,060 ppm, posicionándose como la agrupación más relevante para el aporte de este elemento. Le sigue el grupo derivado de materiales ígneos efusivos (*Ss-Ig-e/efu-lim,are*), con una mediana de 983 ppm, consolidándose también como una fuente significativa de manganeso.

En un rango intermedio, los suelos derivados de sedimentos no consolidados de arenas y gravas (*Ss-Sd-al,fl/are,grv*) presentan una mediana de 817 ppm, mientras que los suelos derivados de materiales sedimentarios calcáreos (*Ss-Sd-C/cal-lu,ar,cg*) alcanzan una mediana de 557.5 ppm.

Por otro lado, las concentraciones más bajas de manganeso se encuentran en los suelos asociados a depósitos químicos evaporíticos (*Ss-Sd-nC/qm-eva*) y materiales sedimentarios siliciclásticos (*Ss-Sd-C/si-are,lim*), con medianas de 399 ppm y 341.5 ppm, respectivamente. Estos valores reflejan una contribución limitada de manganeso en estas agrupaciones de suelos superficiales.

### 6.5.2.2 Hierro (Fe)

La concentración de hierro (Fe) en los suelos superficiales presenta una variación significativa entre las agrupaciones analizadas, con medianas que oscilan entre 18,500 ppm y 40,700 ppm, reflejando las diferencias en la disponibilidad de este micronutriente esencial.

El grupo de suelos superficiales derivados de materiales ígneos intrusivos (*Ss-Ig-i/a-are,lim*) tiene la mayor concentración de hierro, con una mediana de 40,700 ppm, consolidándose como la fuente principal de este elemento.

Le sigue el grupo de suelos asociados a sedimentos no consolidados de arenas y gravas (*Ss-Sd-al,fl/are,grv*), materiales ígneos efusivos (*Ss-Ig-e/efu-lim,are*) y sedimentos calcáreos (*Ss-Sd-C/cal-lu,ar,cg*), con medianas de 39,150 ppm, 38,900 ppm y 36,550 ppm, respectivamente. Estos grupos son relativamente similares en su capacidad de aporte de hierro, indicando una contribución relevante pero no tan alta como la de los suelos intrusivos.

En contraste, las concentraciones más bajas de hierro se registran en los suelos derivados de depósitos químicos evaporíticos (Ss-Sd-nC/qm-eva), con una mediana de 18,500 ppm, posicionándose como la agrupación con la menor disponibilidad de hierro.

### **6.5.2.3 Zinc (Zn)**

La concentración de zinc (Zn) en los suelos superficiales varía significativamente entre las agrupaciones analizadas, con medianas que oscilan entre 53.5 ppm y 159 ppm, lo que refleja las diferencias en la disponibilidad de este micronutriente esencial.

El grupo de suelos derivados de materiales ígneos efusivos (Ss-Ig-e/efu-lim,are) lidera en la concentración de zinc, con una mediana de 159 ppm, consolidándose como la mayor fuente de zinc entre los grupos analizados. Le sigue el grupo de depósitos químicos biogénicos (Ss-Sd-nC/qm-bio), con una mediana de 124 ppm, destacándose por su capacidad significativa de aporte de zinc.

A continuación, el grupo de suelos asociados a sedimentos no consolidados de arenas y gravas (Ss-Sd-al,fl/are,grv) muestra una mediana de 105.5 ppm, posicionándose en un rango superior dentro de las concentraciones de zinc.

Finalmente, los depósitos químicos evaporíticos (Ss-Sd-nC/qm-eva) presentan una mediana de 62 ppm, posicionándose como una de las agrupaciones con menor aporte de zinc en los suelos superficiales.

### **6.5.2.4 Cobre (Cu)**

La concentración de cobre (Cu) en los suelos superficiales exhibe una amplia variabilidad entre las agrupaciones analizadas, con medianas que oscilan entre 6.9 ppm y 43.9 ppm, lo que refleja las diferencias en el contenido de este micronutriente esencial para el desarrollo de los cultivos.

El grupo de suelos derivados de materiales ígneos efusivos (Ss-Ig-e/efu-lim,are) se posiciona como la principal fuente de cobre, con una mediana de 43.9 ppm, destacándose por su notable aporte de este micronutriente. Le sigue el grupo de depósitos químicos biogénicos (Ss-Sd-nC/qm-bio) con una mediana de 34.6 ppm, resaltando también como una fuente significativa de cobre en los suelos analizados.



En un rango intermedio, el grupo de suelos asociados a sedimentos calcáreos (Ss-Sd-C/cal-lu,ar,cg) presenta una mediana de 34.05 ppm, seguido de los suelos asociados a sedimentos no consolidados de arenas y gravas (Ss-Sd-al,fl/are,grv), con 31 ppm.

Por otro lado, los grupos de suelos asociados a depósitos químicos evaporíticos (Ss-Sd-nC/qm-eva) y los sedimentos siliciclásticos (Ss-Sd-C/si-are,lim) muestran concentraciones más bajas, con medianas de 21.6 ppm y 20.1 ppm, respectivamente.

Finalmente, el grupo de suelos asociados a materiales ígneos intrusivos (Ss-Ig-i/a-are,lim) presenta la menor concentración de cobre, con una mediana de 19.8 ppm, posicionándose como el grupo con el aporte más limitado de este micronutriente.

#### **6.5.2.5 Molibdeno (Mo)**

La concentración de molibdeno (Mo) en los suelos superficiales presenta una variabilidad moderada entre las agrupaciones analizadas, con medianas que oscilan entre 0.71 ppm y 1.58 ppm, lo que refleja la importancia de las características geoquímicas de los suelos en la disponibilidad de este micronutriente esencial.

El grupo de suelos asociados a sedimentos no consolidados de arenas y gravas (Ss-Sd-al,fl/are,grv) se posiciona como la agrupación con la mayor concentración de molibdeno, con una mediana de 1.58 ppm, destacándose como la principal fuente de este elemento en los suelos superficiales. Le siguen los suelos derivados de materiales ígneos intrusivos (Ss-Ig-i/a-are,lim) y materiales ígneos efusivos (Ss-Ig-e/efu-lim,are), con medianas de 1.48 ppm y 1.24 ppm, respectivamente, reflejando un aporte significativo de molibdeno en estas agrupaciones.

Finalmente, las menores concentraciones de molibdeno se registran en los depósitos químicos evaporíticos (Ss-Sd-nC/qm-eva) y los materiales sedimentarios siliciclásticos (Ss-Sd-C/si-are,lim), con medianas de 0.71 ppm y 0.89 ppm, respectivamente.

#### **6.5.2.6 Níquel (Ni)**

El níquel (Ni) es un micronutriente esencial en pequeñas cantidades para el metabolismo de las plantas, siendo clave para la activación de ciertas enzimas y el metabolismo del nitrógeno. En los suelos superficiales analizados, las concentraciones de níquel presentan una variabilidad significativa, con medianas que oscilan entre 10.8 ppm y 28 ppm, dependiendo del grupo de suelos.

El grupo de suelos derivados de materiales ígneos efusivos (*Ss-Ig-e/efu-lim,are*) presenta la mayor concentración de níquel, con una mediana de 28 ppm, posicionándose como la principal fuente de este elemento en los suelos superficiales.

Le siguen los suelos asociados a sedimentos no consolidados de arenas y gravas (*Ss-Sd-al,fl/are,grv*) y sedimentos calcáreos (*Ss-Sd-C/cal-lu,ar,cg*), con medianas de 20.8 ppm y 21 ppm, respectivamente, lo que los posiciona en un rango intermedio de aporte de níquel.

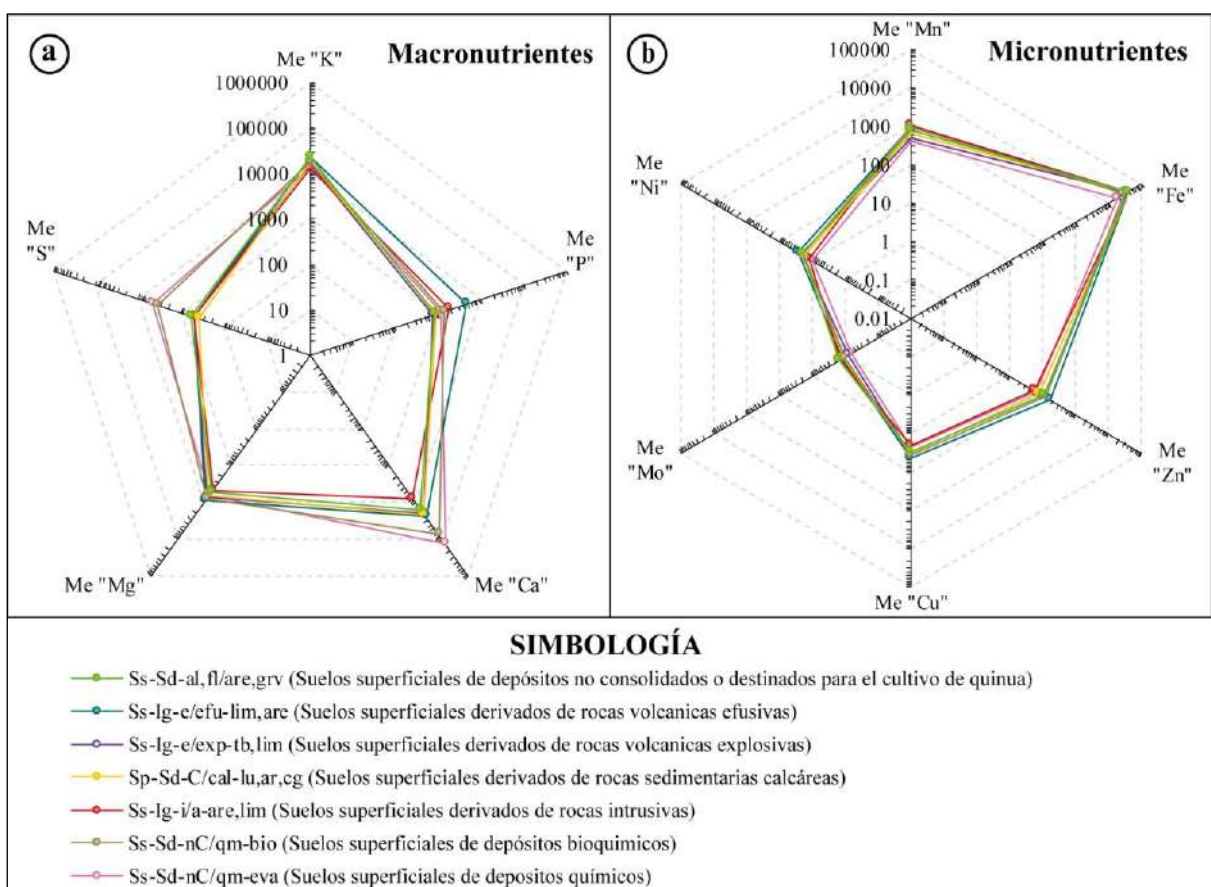
En un rango menor, los suelos derivados de materiales ígneos intrusivos (*Ss-Ig-i/a-are,lim*) muestran una mediana de 13.6 ppm, mientras que los depósitos químicos evaporíticos (*Ss-Sd-nC/qm-eva*) presentan una concentración de 10.8 ppm, posicionándose como la agrupación con la menor concentración de níquel.

### 6.5.3 COMPARACIÓN DE MACRONUTRIENTES Y MICRONUTRIENTES EN SUELOS SUPERFICIALES

La comparación conjunta de macronutrientes y micronutrientes en los suelos superficiales permite identificar patrones y diferencias significativas en el aporte de elementos esenciales entre las distintas agrupaciones de suelos. Este análisis integral se presenta mediante gráficos de radar, los cuales destacan las medianas relativas de cada elemento para facilitar una interpretación visual clara (ver [Figura 6.10](#)).

**Figura 6.10**

Comparación de las medianas de las agrupaciones de suelos superficiales de (a) macronutrientes y (b) micronutrientes, mediante gráficos de radar.



En la [Figura 6.10](#), se pueden observar las concentraciones de macronutrientes y micronutrientes en las diferentes agrupaciones de suelos superficiales, en gráficos de radar permitiendo observar las siguientes tendencias:

- **Macronutrientes en suelos superficiales ([Figura 6.10a](#)):**

El análisis de macronutrientes revela que los suelos derivados de materiales ígneos efusivos (*Ss-Ig-e/efu-lim,are*) lideran en la mayoría de los elementos esenciales. Este grupo presenta las mayores concentraciones de fósforo (4,560 ppm),

potasio (23,400 ppm) y magnesio (8,600 ppm), además de un aporte significativo de calcio (25,100 ppm). Estas características los posicionan como los más completos en términos de macronutrientes.

Por otro lado, los suelos derivados de sedimentos no consolidados de arenas y gravas (*Ss-Sd-al,fl/are,grv*) se destacan por su alta concentración de potasio (23,550 ppm), el valor más alto entre todas las agrupaciones. Además, presentan un buen balance en magnesio (5,300 ppm) y calcio (15,950 ppm), lo que los convierte a los más equilibrados para los cultivos que requieren nutrientes balanceados.

En contraste, los suelos derivados de materiales sedimentarios siliciclásticos (*Ss-Sd-C/si-are,lim*) presentan las menores concentraciones de casi todos los macronutrientes evaluados. Con valores como 735 ppm de fósforo, 3,250 ppm de magnesio y 5,000 ppm de calcio, su capacidad para sostener cultivos intensivos es limitada, requiriendo manejo específico para mejorar su fertilidad.

Por último, los suelos derivados de depósitos químicos evaporíticos (*Ss-Sd-nC/qm-eva*) sobresalen en la concentración de calcio, con un valor extremadamente alto de 134,500 ppm. Sin embargo, sus niveles de fósforo (1,190 ppm) y magnesio (6,200 ppm) son más bajos en comparación con otras agrupaciones, lo que indica que su contribución es específica y limitada a ciertos macronutrientes.

- **Micronutrientes en suelos superficiales (Figura 6.10b):**

El análisis de micronutrientes evidencia que los suelos derivados de materiales ígneos efusivos (*Ss-Ig-e/efu-lim,are*) también lideran en la mayoría de los elementos esenciales. Este grupo muestra las mayores concentraciones de hierro (38,900 ppm), zinc (159 ppm) y cobre (43.9 ppm), junto con niveles destacados de manganeso (983 ppm) y níquel (28 ppm). Su aporte equilibrado y completo los convierte en una fuente clave para enriquecer suelos con micronutrientes esenciales.

De manera similar, los suelos derivados de sedimentos no consolidados de arenas y gravas (*Ss-Sd-al,fl/are,grv*) presentan un perfil balanceado con altas concentraciones de hierro (39,150 ppm) y zinc (105.5 ppm), además de buenos niveles de manganeso (817 ppm) y níquel (20.8 ppm). Aunque no lideran en todos los micronutrientes, su aporte general es significativo, especialmente para cultivos que dependen de estos elementos traza.

En el extremo opuesto, los suelos derivados de materiales sedimentarios siliciclásticos (*Ss-Sd-C/si-are,lim*) presentan las menores concentraciones de micronutrientes, incluyendo 341.5 ppm de manganeso, 26,000 ppm de hierro y 53.5

ppm de zinc. Estas limitaciones los posicionan como los menos favorables para contribuir al enriquecimiento del suelo con elementos esenciales.

Por otro lado, los suelos derivados de materiales calcáreos (Ss-Sd-C/cal-lu,ar,cg) tienen un aporte específico de cobre (34.05 ppm) y níquel (21 ppm), aunque sus niveles generales de otros micronutrientes son moderados. Esto sugiere que su contribución es más relevante para necesidades puntuales.

En términos generales, tanto en macronutrientes y micronutrientes, los suelos derivados de materiales ígneos efusivos (Ss-Ig-e/efu-lim,are) destacan como los más completos en términos de elementos esenciales, tanto en macronutrientes como en micronutrientes. Su equilibrio sobresaliente y concentraciones altas en *fósforo, potasio, magnesio y hierro* los convierten en una opción prioritaria para cultivos de alta demanda nutricional. Además, su elevado contenido de zinc y cobre refuerza su potencial para sostener procesos metabólicos críticos en las plantas.

Por otro lado, los *suelos para el cultivo quinua*, es decir, suelos derivados de sedimentos no consolidados de arenas y gravas (Ss-Sd-al,fl/are,grv) son particularmente adecuados para el cultivo de quinua. Este grupo combina un balance óptimo de macronutrientes como potasio (23,550 ppm) y calcio (15,950 ppm), esenciales para el cultivo. Además, su aporte significativo de micronutrientes como hierro (39,150 ppm), zinc (105.5 ppm) y manganeso (817 ppm) asegura la disponibilidad de elementos necesarios para el desarrollo sano y equilibrado de la quinua.

En contraste, los suelos derivados de materiales sedimentarios siliciclásticos (Ss-Sd-C/si-are,lim) muestran las concentraciones más bajas tanto en macronutrientes como en micronutrientes. Esta deficiencia limita considerablemente su capacidad para soportar cultivos exigentes como la quinua o cultivos intensivos.

Finalmente, los suelos derivados de depósitos químicos evaporíticos (Ss-Sd-nC/qm-eva) y calcáreos (Ss-Sd-C/cal-lu,ar,cg) se destacan por sus aportes específicos. Mientras que los depósitos químicos evaporíticos son una fuente excepcional de calcio (134,500 ppm), los suelos calcáreos ofrecen concentraciones moderadas de cobre (34.05 ppm) y níquel (21 ppm). Estos suelos pueden complementarse en sistemas agrícolas que requieran suplir deficiencias puntuales de nutrientes en áreas específicas.

## 6.6 INTEGRACIÓN DE ELEMENTOS MINERALES ESENCIALES EN EL SISTEMA ROCA-SUELO-PLANTA PARA EL CULTIVO QUINUA

La quinua es un cultivo estratégico cuya productividad depende de un sistema integrado que conecta las rocas parentales, los suelos profundos, los suelos superficiales y los nutrientes que se transfieren hacia los granos de quinua.

El análisis integrado del sistema roca-suelo-planta permite comprender la dinámica de los elementos minerales esenciales (EME) en el desarrollo del cultivo de quinua. Considerando lo establecido en el capítulo anterior (capítulo 5) y lo determinado en el capítulo anterior, se concluyó que los suelos profundos y superficiales destinados al cultivo de quinua (*Sp-Sd-al,fl/are,grv* y *Ss-Sd-al,fl/are,grv*) han sido influenciados significativamente por las rocas volcánicas del Cenozoico (*Ig-e/efu-land,lba*). Este sistema se completa con la integración de los granos de quinua (Planta), que reflejan los requerimientos específicos de la planta en términos de macronutrientes y micronutrientes.

A lo largo de este capítulo, se ha evidenciado la importancia de los EME, tanto macronutrientes como micronutrientes, en cada uno de los componentes estudiados en la región de Cabana. Estos elementos esenciales se visualizan mediante un análisis gráfico en un diagrama de radar ([Figura 6.11](#)), que compara sus valores centrales o medianas a lo largo del sistema.

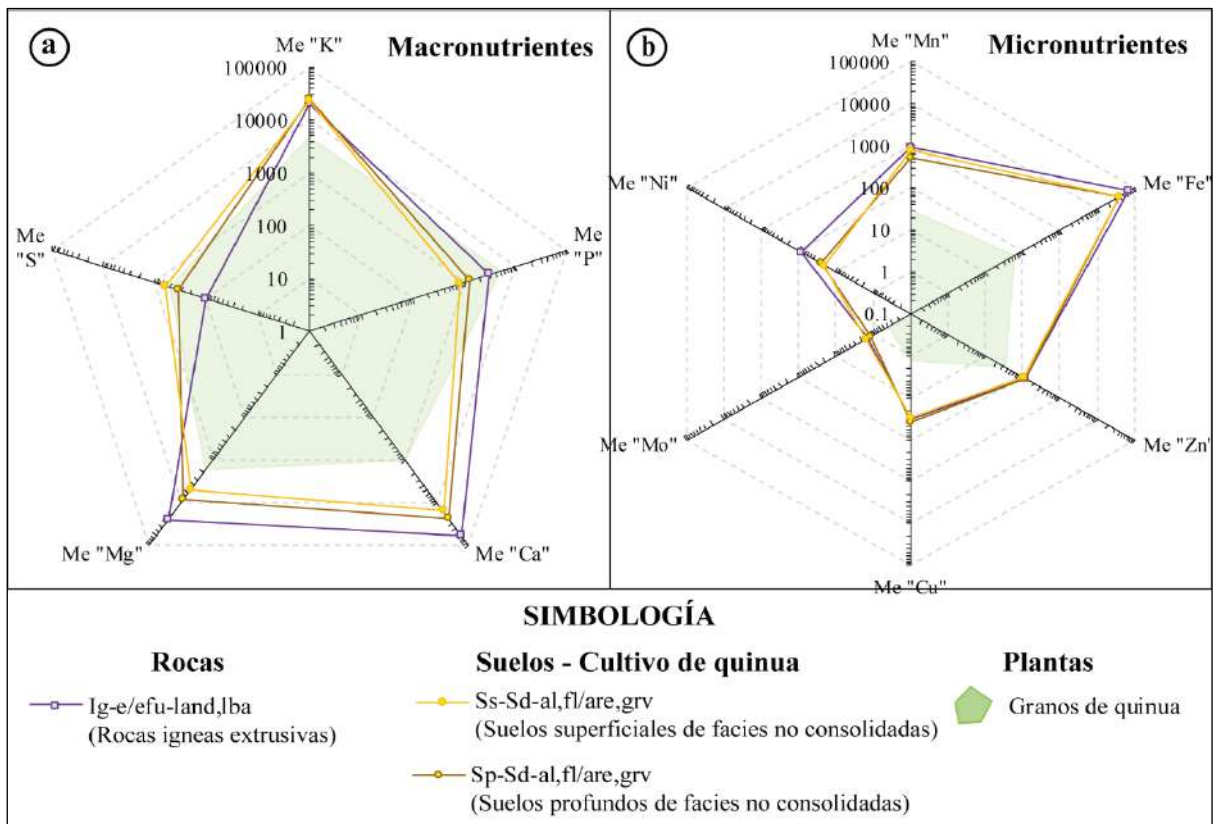
En la [Figura 6.11](#), se presenta gráficamente la distribución de macronutrientes ([Figura 6.11a](#)) y micronutrientes ([Figura 6.11b](#)) a través del sistema roca-suelo-planta. El análisis muestra cómo los nutrientes fluyen desde las rocas parentales hacia los suelos profundos y superficiales, finalmente a los granos de quinua. A continuación, se describen los resultados de este sistema:

### Macronutrientes en el Sistema Roca - Suelo - Planta

En la [Figura 6.11a](#), En la [Figura 6.11a](#), se observa que las rocas volcánicas del Cenozoico (*Ig-e/efu-land,lba*) son la fuente primaria de macronutrientes esenciales. Presentan concentraciones destacadas de potasio (23,400 ppm), fósforo (4,560 ppm), magnesio (8,600 ppm) y calcio (25,100 ppm). Estos elementos son liberados gradualmente durante el proceso de meteorización, desintegración y erosión de las rocas parentales, enriqueciendo los suelos profundos y superficiales.

**Figura 6.11**

Integración del sistema roca-suelo-planta, mediante los elementos minerales esenciales para el cultivo de quinua.



Los suelos profundos (*Sp-Sd-al,fl/are,grv*) actúan como reservorios clave de macronutrientes. Retienen potasio (24,650 ppm), calcio (23,650 ppm), magnesio (8,150 ppm) y azufre (350 ppm), formando una base nutricional sólida que garantiza un suministro continuo hacia los horizontes superficiales.

Los suelos superficiales (*Ss-Sd-al,fl/are,grv*) reflejan un perfil nutricional similar al de los suelos profundos, con concentraciones de potasio (23,550 ppm), calcio (15,950 ppm), magnesio (5,300 ppm) y fósforo (840 ppm). Estas cantidades son suficientes para satisfacer las demandas nutricionales del cultivo de quinua, y permiten un desarrollo equilibrado y sostenible.

Finalmente, los macronutrientes son absorbidos por las raíces y transferidos a la planta para producir los granos de quinua, que representan los niveles finales de estos nutrientes. Los valores centrales alcanzados en los granos incluyen potasio (4,900 ppm), fósforo (5,240 ppm), calcio (1,000 ppm), magnesio (1,720 ppm) y azufre (500 ppm). Estas concentraciones coinciden estrechamente con las disponibles en los suelos superficiales, lo que demuestra una transferencia eficiente de nutrientes a lo largo del sistema.

### **Micronutrientes en el Sistema Roca - Suelo - Planta**

En la [Figura 6.11b](#), se detalla cómo los micronutrientes fluyen desde las rocas parentales hasta los granos de quinua. Las rocas volcánicas del Cenozoico (*Ig-e/efu-land,lba*) aportan cantidades significativas de micronutrientes, como hierro (38,900 ppm), zinc (159 ppm) y manganeso (983 ppm), esenciales para las funciones metabólicas de las plantas.

Los suelos profundos (*Sp-Sd-al,fl/are,grv*) funcionan como depósitos importantes de micronutrientes, reteniendo hierro (37,800 ppm), zinc (113.5 ppm) y manganeso (547 ppm). Estos niveles aseguran que los elementos minerales estén disponibles para su transferencia hacia los suelos superficiales.

Los suelos superficiales (*Ss-Sd-al,fl/are,grv*) también reflejan la riqueza de micronutrientes presentes en los suelos profundos, con hierro (39,150 ppm), zinc (105.5 ppm) y manganeso (817 ppm). Estas concentraciones no solo cumplen, sino que superan los requerimientos mínimos del cultivo de quinua, asegurando una absorción óptima por parte de las plantas.

En los granos de quinua (Planta), se encuentran los niveles finales de micronutrientes, que incluyen hierro (59.7 ppm), zinc (35.7 ppm) y manganeso (29.5 ppm). Estas concentraciones reflejan una transferencia eficiente desde los suelos superficiales hacia la planta, y garantizan que las necesidades nutricionales del cultivo sean atendidas a lo largo del sistema.

En términos generales, el sistema roca-suelo-planta evidencia un flujo integral y eficiente de nutrientes, donde las rocas volcánicas del Cenozoico (*Ig-e/efu-land,lba*) actúan como la fuente primaria de macronutrientes y micronutrientes esenciales, liberados gradualmente hacia los suelos profundos (*Sp-Sd-al,fl/are,grv*) y posteriormente transferidos a los suelos superficiales (*Ss-Sd-al,fl/are,grv*). Este sistema dinámico asegura que los nutrientes necesarios para el desarrollo del cultivo de quinua sean retenidos, almacenados y posteriormente transferidos de manera efectiva hacia las raíces de la planta, reflejándose finalmente en los granos de quinua.



## CAPÍTULO 7. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

### 7.1 PREÁMBULO

El presente capítulo tiene como propósito analizar e interpretar los resultados obtenidos en los capítulos anteriores (específicamente en los capítulos 4, 5 y 6), conectándolos con el objetivo general de la investigación: "*Analizar la influencia litológica en los suelos para el cultivo de quinua, mediante un análisis químico del sistema roca-suelo-planta en el área de Cabana, Puno*". Este análisis busca integrar los objetivos específicos de la investigación. Este capítulo se organiza en tres secciones principales: (1) consideraciones geomorfológicas y geológicas en la formación de suelos, (2) influencia litológica en la química del suelo, y (3) distribución de nutrientes esenciales en el sistema roca-suelo-planta.

### 7.2 CONSIDERACIONES GEOMORFOLÓGICAS Y GEOLÓGICAS EN LA FORMACIÓN DE SUELOS PARA EL ÁREA DE CABANA

La formación de suelos para el cultivo de quinua en el área de Cabana está influenciada por factores geomorfológicos y geológicos que determinan las características físicas y químicas del suelo. Este análisis se basa en los resultados obtenidos en el Capítulo 4, donde se describen las geoformas predominantes y las litologías presentes en el área de Cabana.

#### 7.2.1 GEOFORMAS: PERSPECTIVA GEOMORFOLÓGICA

La geomorfología del área de Cabana desempeña un papel fundamental en la formación de suelos, ya que las geoformas presentes determinan las condiciones físicas necesarias para la acumulación de sedimentos y la disponibilidad de nutrientes esenciales para el cultivo de quinua. Según [Zinck \(2012\)](#), el reconocimiento de estas geoformas desde distintos puntos de percepción (nacional, regional y local) permite analizar cómo las características geomorfológicas influyen en la formación de sedimentos y suelos destinados a usos agrícolas.

##### 7.2.1.1 *Perspectiva nacional*

Desde la perspectiva nacional, el área de Cabana está ubicada dentro de la *Cordillera de los Andes Centrales*, una de las principales unidades geomorfológicas del territorio

peruano. Esta cordillera, identificada como una geoforma de *geoestructura*, no solo configura la topografía, sino que también influyen factores, como el clima, la hidrografía y los suelos del área de estudio.

En este sentido, la Cordillera de los Andes Centrales proporciona las condiciones geológicas y climáticas que favorecen la formación de suelos agrícolas.

### **7.2.1.2 Perspectiva regional**

Desde la perspectiva regional, el área de Cabana se encuentra ubicada en el *Altiplano* sur del Perú, una geoforma clave de la región andina, que se extiende como una cuenca intramontañosa limitada por la Cordillera Occidental y la Cordillera Oriental. Este Altiplano, parte de la cuenca hidrográfica del Lago Titicaca, se caracteriza por un paisaje dinámico influido por procesos tectónicos, climáticos y sedimentarios que configuran su relieve y suelos.

La perspectiva regional demuestra que las geoformas y procesos geomorfológicos del Altiplano ofrecen un entorno adecuado para la agricultura. Las altiplanicies y planicies, destacan por su estabilidad topográfica y fertilidad del suelo, haciendo de ellas áreas ideales para cultivos como la quinua, que se adapta bien a las condiciones extremas de altura y clima.

### **7.2.1.3 Perspectiva local**

En el contexto local, el área de Cabana presenta una diversidad de geoformas influenciadas por procesos geomorfológicos específicos, que tienen un impacto directo en la formación y distribución de los suelos agrícolas. Estas geoformas incluyen principalmente *altiplanicies* y *planicies*, así como lomeríos, piedemontes y montañas, que interactúan en el ambiente morfogénico para moldear las características de los suelos.

Además, las geoformas en conjunción con *Litologías/facies* forman como Altiplanicies de facies fluvio-aluviales, ideales para el cultivo de quinua. Las cuales condicionarían y favorecerían en la formación de suelos para el cultivo quinua a través de estas geoformas.

La perspectiva local, las altiplanicies y planicies destacan como zonas de alta productividad agrícola, donde el cultivo de quinua se ha adaptado a las condiciones específicas de los suelos locales.

Además, el factor clima en el área de Cabana, es clave que interactúa con las geoformas locales, influenciando la formación de suelos agrícolas destinados al cultivo de quinua. Según las características climáticas regionales, Cabana registra una temperatura

media anual de entre 5 y 10 °C y una precipitación media de 629 a 755 mm (Gobierno Regional de Puno y EUROECOTRADE, 2017). Estas condiciones climáticas propician una *moderada meteorización química con acción del hielo*, como lo demuestra el diagrama de Peltier (Figura 4.1).

## 7.2.2 LITOLOGÍA: UN ENFOQUE GEOLÓGICO REGIONAL Y LOCAL

El área de Cabana, ubicada en el Altiplano del sur peruano, se caracteriza por una litología diversa que resulta de procesos geológicos de distinta magnitud y escala temporal. La influencia de los sedimentos del Cuaternario, particularmente la *Formación Azángaro*, juega un rol fundamental en la formación de suelos, esenciales para el cultivo de quinua. Este análisis se aborda desde dos perspectivas complementarias: el enfoque geológico regional y el enfoque geológico local, que permiten comprender tanto los procesos de gran escala que afectan al Altiplano, como los factores específicos que influyen directamente en los suelos de Cabana.

### 7.2.2.1 Enfoque geológico regional

Desde una perspectiva geológica regional, el área de Cabana se encuentra dentro del *Altiplano*, que forma parte de la *Cordillera de los Andes Centrales*. Esta región está directamente influenciada por procesos magmáticos del Cenozoico, desarrollados predominantemente a lo largo de la Cordillera Occidental. Los *arcos magmáticos* de Tacaza, Huaylillas y Barroso desempeñaron un papel fundamental en la formación de unidades litoestratigráficas clave, como el Grupo Tacaza, Grupo Maure, y los grupos Barroso Inferior y Superior, los cuales componen los sedimentos de la *Formación Azángaro*. Estos sedimentos representan el material parental de los suelos agrícolas en Cabana.

Los procesos magmáticos del Cenozoico dieron lugar a materiales volcánicos ricos en elementos minerales esenciales. La meteorización química de estos materiales ha liberado nutrientes, tanto en macronutrientes y micronutrientes, que enriquecen el suelo. Adicionalmente, la erosión activa, influenciado por procesos tectónicos, transportó estos sedimentos desde las cumbres de la Cordillera Occidental hasta las cuencas del Altiplano, configurando un marco litológico que favorece la formación de suelos agrícolas.

### 7.2.2.2 Enfoque geológico local

A nivel local, los cultivos de quinua en el área de Cabana, está dominada por los sedimentos de la *Formación Azángaro*, compuesta principalmente por sedimentos cuaternarios derivados de procesos fluviales y aluviales. Estos sedimentos están conformados por una mezcla de gravas, arenas y limos, los cuales constituyen el material parental de los suelos agrícolas. El análisis de las columnas estratigráficas de esta formación revela una alta proporción de clastos volcánicos, predominantemente de origen efusivo (45.75 %) y explosivo (41.00 %), junto con cantidades menores de clastos sedimentarios e intrusivos (ver [Figura 4.15](#)).

Los procesos fluvio-aluviales en el Plioceno – Pleistoceno, han jugado un papel fundamental en la redistribución de estos materiales en el Altiplano, favoreciendo su acumulación en geformas como altiplanicies y planicies (ver [Figuras 4.5 y 4.6](#)).

El análisis litológico desde un enfoque geológico regional y local permite comprender cómo los procesos magmáticos, tectónicos y sedimentarios interactúan para generar un marco litológico favorable en el área de Cabana. Esta integración de escalas geológicas resalta la importancia de los factores litológicos en la sostenibilidad agrícola de la región.

### 7.3 CONSIDERACIONES QUÍMICAS PARA DETERMINAR LA INFLUENCIA LITOLÓGICA EN LOS SUELOS

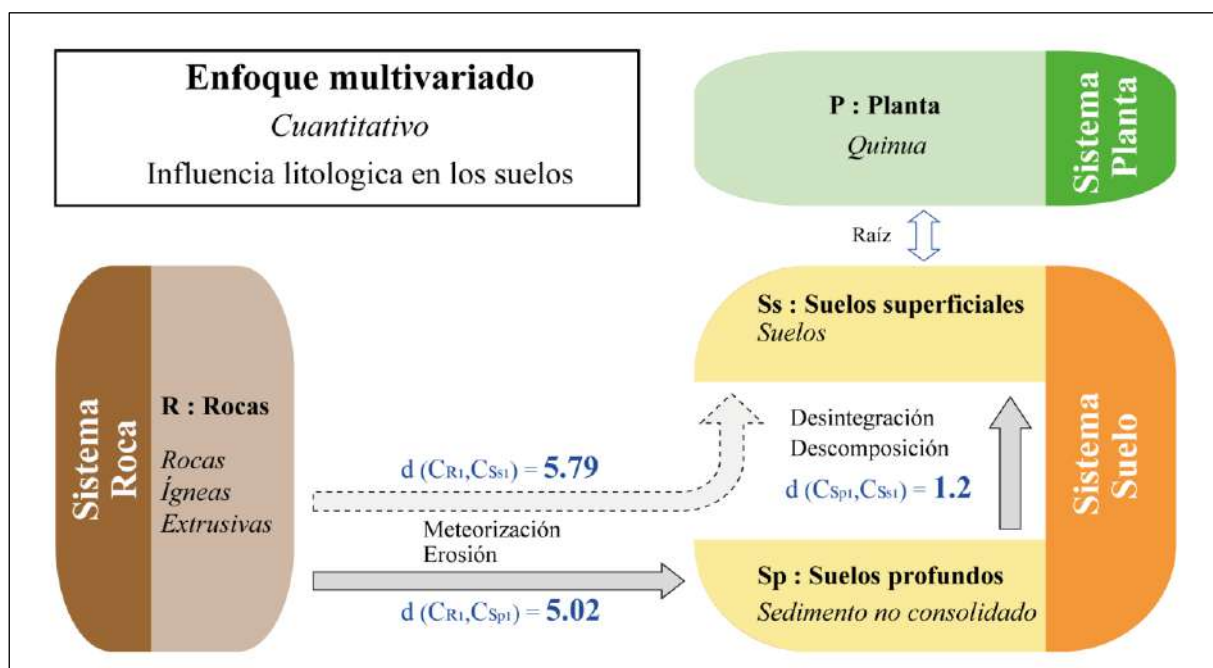
La composición química de los suelos en el área de Cabana está influenciada directamente por los materiales parentales, que determinan sus propiedades geoquímicas y su capacidad para sostener cultivos como la quinua. Este análisis, basado en los resultados del Capítulo 5, enfatiza cómo los procesos de meteorización y erosión enriquecen los sedimentos y suelos con nutrientes esenciales, favoreciendo el cultivo de quinua.

#### 7.3.1 INFLUENCIA LITOLÓGICA EN LOS SUELOS: UN ENFOQUE MULTIVARIADO

El enfoque multivariado permite entender la influencia directa de los materiales parentales y procesos geológicos sobre las características químicas del suelo. Aplicando técnicas estadísticas como los Análisis de Componentes Principales Robusto (*RPCA*), Análisis de Componentes Principales (*PCA*) y el análisis jerárquico, con los cuales se identificaron clústeres o grupos de rocas y suelos (ver [Figura 5.34](#)). Además, con estos grupos mediante el cálculo de los centroides (ver [Figura 5.33](#)), se cuantificaron las distancias entre los centroides roca-suelo, permitiendo analizar las proximidades composicionales entre ambos, resumiéndolo en la [Figura 7.1](#).

**Figura 7.1**

*Relación cuantitativa entre grupos de centroides Roca-Suelo*



Las siguientes subsecciones examinan, en detalle las relaciones geoquímicas entre los suelos y sus materiales parentales, considerando tanto los diferentes horizontes del suelo como la influencia específica de las rocas ígneas extrusivas. Este análisis permite establecer una conexión directa entre los materiales parentales y los suelos.

### **7.3.1.1 Relación entre rocas parentales y suelos profundos**

La relación entre las rocas parentales y los suelos profundos en el área de Cabana está determinada por procesos de meteorización y erosión (ver [Figura 7.1](#)). Las rocas ígneas extrusivas, son el principal material parental y originan sedimentos no consolidados que constituyen los suelos profundos.

El análisis multivariado, apoyado en los cálculos de centroides (ver [Figura 7.1](#)), muestra una distancia euclidiana de  $(C_{R1}, C_{Sp1}) = 5.02$  entre los grupos de rocas y los suelos profundos. Esta distancia refleja una transferencia significativa de elementos químicos desde las rocas hacia los sedimentos no consolidados que constituyen los suelos profundos.

### **7.3.1.2 Relación entre suelos profundos y suelos superficiales**

La continuidad geoquímica entre los suelos profundos y superficiales se evidencia en las mínimas diferencias composicionales entre ambos horizontes, con una distancia euclidiana de  $(C_{Sp1}, C_{Ss1}) = 1.2$  entre sus centroides. Este resultado, se muestra en el mapa de calor (ver [Figura 5.33](#)) y sugiere que los procesos geoquímicos que afectan a ambos horizontes del suelo son relativamente similares.

Los suelos superficiales, están sometidos a meteorización moderada, como lo muestra el diagrama de Peltier ([Figura 4.1](#)). Han conservado una composición química relativamente similar a los suelos profundos. Este flujo geoquímico asegura la disponibilidad de nutrientes esenciales para el cultivo de quinua, reforzando la estabilidad del sistema roca-suelo.

### **7.3.1.3 Relación entre rocas parentales y suelos superficiales para el cultivo de quinua**

La interacción entre las rocas parentales y los suelos cultivables es clave para la fertilidad del suelo y el desarrollo del cultivo de quinua. En Cabana, las litologías volcánicas influyen significativamente en química del suelo destinado a quinua.

La distancia geoquímica entre los grupos de rocas ígneas extrusivas y los suelos superficiales, estimada en  $(C_{R1}, C_{Ss1}) = 5.79$ , resalta la influencia prolongada de las rocas ígneas en la composición química del suelo. Esto demuestra que, aunque las rocas influyen directamente en los suelos profundos, su impacto también se *extiende* a los superficiales.

## 7.4 CONEXIÓN ENTRE LOS SISTEMAS ROCA-SUELO-PLANTA

La conexión entre los sistemas roca-suelo-planta en el área de Cabana se establece principalmente a través de los *elementos minerales esenciales (EME)*, que actúan como el nexo químico entre las rocas parentales, los suelos y el cultivo de quinua. Este análisis se fundamenta en lo determinado en los capítulos 5 y 6, que establecen la relación química Roca-Suelo mediante elementos representativos y discriminantes. Aunque las rocas influyen químicamente en los suelos, este estudio se centra en los EME, que permiten observar las interacciones entre las rocas parentales, los suelos y la planta de quinua, tal como se representa en la [Figura 2.1](#).

Los elementos minerales esenciales son movilizados desde las rocas parentales hacia los suelos profundos y, posteriormente, a los suelos superficiales, desde donde son absorbidos por las raíces de la planta de quinua. Este flujo constante de nutrientes, facilitado por procesos de meteorización, erosión y actividad biológica, asegura el desarrollo sostenible del sistema agrícola. En este contexto, los sedimentos no consolidados cumplen un papel crucial como reservorios y fuentes primarias de macronutrientes y micronutrientes. Además, las rocas ígneas extrusivas que se destacan como la principal fuente litológica en nutrientes, esenciales para garantizar la fertilidad y calidad del suelo.

### 7.4.1 RELACIÓN QUÍMICA ENTRE LOS SISTEMAS ROCA-SUELO-PLANTA

Los elementos minerales esenciales (*EME*) conectan los sistemas Roca-Suelo-Planta. En la [Figura 7.2](#) se representa gráficamente las concentraciones centrales de estos elementos en cada componente, resaltando la continuidad química a lo largo del sistema. A continuación, se discuten las funciones de cada componente:

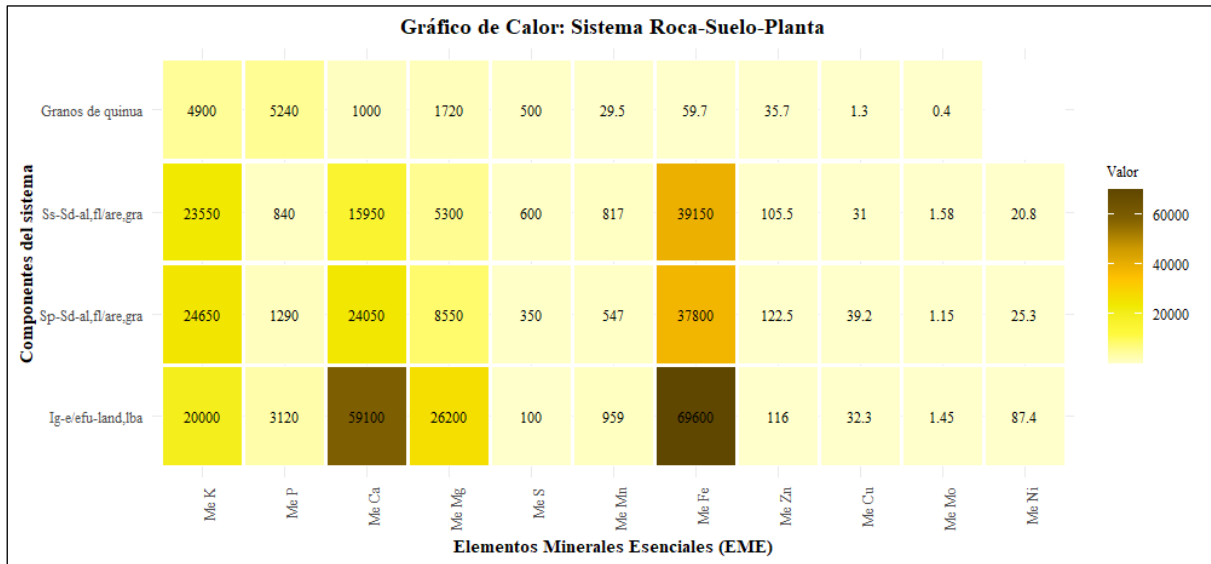
#### 7.4.1.1 Fuente primaria: Rocas ígneas extrusivas

Las rocas ígneas extrusivas del Cenozoico, ricas en calcio (Ca: 59,100 ppm), magnesio (Mg: 26,200 ppm), hierro (Fe: 69,600 ppm) y zinc (Zn: 116 ppm), son la principal fuente litológica de nutrientes en el sistema. Estos elementos minerales esenciales están presentes en las rocas en forma de minerales, las cuales son liberados por diferentes procesos como meteorización y erosión. En los procesos de meteorización se tiene a la química que disuelve los minerales primarios y estos enriquecen a los suelos. Simultáneamente la meteorización física que intensificada por las condiciones climáticas del Altiplano, fragmenta las rocas, exponiendo una mayor superficie para la liberación de nutrientes. Además del biológico.

El aporte de estas rocas ígneas extrusivas establece una base química para la formación de sedimentos, y estos a su vez en la formación de suelos.

### Figura 7.2

Gráfico de calor del Sistema Roca-Suelo-Planta, con valores centrales de Elementos Minerales Esenciales de cada grupo



#### 7.4.1.2 Intermediario: Transferencia a través del suelo

Los suelos profundos y superficiales actúan como intermediarios clave en la transferencia de nutrientes desde las rocas hacia las plantas. Los suelos profundos, con altas concentraciones de potasio (K: 24,650 ppm) y calcio (Ca: 24,050 ppm), funcionan como reservorios temporales, reteniendo los nutrientes liberados por las rocas parentales. Estas concentraciones reflejan la capacidad de los suelos profundos para proteger los nutrientes contra la lixiviación y garantizar su disponibilidad a largo plazo.

Por su parte, los suelos superficiales aseguran la disponibilidad inmediata de nutrientes para las plantas, destacándose elementos como el zinc (Zn: 105.5 ppm) y el hierro (Fe: 39,150 ppm). La movilidad de los nutrientes desde los suelos profundos hacia los superficiales está mediada por procesos hidrológicos y biológicos, asegurando que las raíces de las plantas tengan acceso a los nutrientes esenciales para su desarrollo.

La continuidad geoquímica entre los horizontes del suelo, evidenciada en el análisis multivariado, refuerza la estabilidad del sistema agrícola, proporcionando un flujo eficiente de macronutrientes y micronutrientes necesarios para el cultivo de quinua.



#### **7.4.1.3 Receptores: Absorción por la planta quinua**

La planta de quinua es el receptor en el sistema roca-suelo-planta, absorbiendo los nutrientes disponibles en los suelos superficiales y reflejando su eficiencia en los niveles de EME presentes en los granos. Los valores de potasio (K: 4,900 ppm), fósforo (P: 5,240 ppm), zinc (Zn: 35.7 ppm) y hierro (Fe: 59.7 ppm) son representativos de un sistema agrícola bien integrado y funcional.

Estos elementos desempeñan funciones críticas en el metabolismo de la planta, además de contribuir a la calidad nutricional de los granos, así como aumentar su competitividad en el mercado debido a su alto valor nutricional.

El sistema roca-suelo-planta en el área de Cabana se distingue por la eficiencia en la transferencia de nutrientes desde las rocas ígneas extrusivas hacia los suelos agrícolas y, finalmente, hacia los granos de quinua. Esta conexión está determinada por la influencia litológica de las rocas parentales, que condicionan la composición química de los suelos y garantizan la disponibilidad de nutrientes esenciales para el cultivo.

---

## CAPÍTULO 8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 8.1 CONCLUSIONES

#### 8.1.1 CONCLUSIÓN GENERAL

En esta tesis se *analizó la influencia litológica en los suelos para el cultivo de quinua mediante un análisis químico del sistema roca-suelo-planta en el área de Cabana, Puno*. Lo más importante del análisis fue que las características litológicas del material parental son fundamentales para comprender la formación de sedimentos en las Altiplanicies como geoforma, y estos a su vez formación de suelos para el cultivo de cultivo de quinua. Específicamente, el análisis detallado de la unidad litoestratigráfica de la Formación Azángaro ha revelado la significativa influencia de sedimentos compuestos por gravas, arenas y limos, enriquecidos con clastos volcánicos efusivos y explosivos, es decir son derivados de unidades litoestratigráficas volcánicas del Cenozoico, en la producción agrícola local.

Además, se ha determinado que las rocas volcánicas del Cenozoico ejercen una influencia directa en la composición química de los suelos utilizados para el cultivo de quinua. Los centroides calculados a partir de la reducción de dimensiones mediante el análisis de componentes principales (*PCA*) han cuantificado esta influencia, mostrando una conexión directa entre la composición de las rocas volcánicas y los nutrientes minerales disponibles en los suelos profundos y superficiales.

Finalmente, se ha establecido que los Elementos Minerales Esenciales (*EME*), tanto como los macronutrientes y micronutrientes, se transfieren desde las rocas parentales a través de procesos de meteorización y descomposición de sedimentos no consolidados, enriqueciendo así los suelos y, por ende, los granos de quinua. Esta transferencia nutricional no solo sustenta la fertilidad del suelo, sino que también mejora significativamente el valor nutricional de los granos de quinua, contribuyendo a una agricultura sostenible en la región de Cabana.

Los anteriores permiten corroborar la **hipótesis** planteada, ya que existe una influencia directa de la litología de las rocas parentales en los suelos utilizados para el cultivo quinua en el área de Cabana, Puno.

## 8.1.2 CONCLUSIONES ESPECIFICAS

### Conclusión 1

En este estudio se *identificaron las características litológicas del material parental que influyen en la formación de suelos utilizados para el cultivo de Quinoa, así como se analizó las geoformas en el área de Cabana, Puno*. La identificación de las características litológicas del material parental ha sido fundamental para comprender la formación de sedimentos del Cuaternario y su influencia en los suelos utilizados para el cultivo de quinua del área de estudio. El análisis de las unidades litoestratigráficas, especialmente de las unidades volcánicas del Cenozoico y la Formación Azángaro. Donde la Formación Azángaro resalta la importancia de estos sedimentos, compuestos principalmente por gravas, arenas y limos, en la producción agrícola local. Las columnas estratigráficas revelan que los sedimentos están predominantemente formados por clastos volcánicos efusivo (45.75 %) y explosivo (41.00 %), además de menores cantidades de clastos sedimentarios e intrusivos, lo que sugiere una conexión con arcos volcánicos del Cenozoico. Este estudio proporciona un marco geológico integral que enfatiza la relación entre las características litológicas y la agricultura en la región. Además, mediante el análisis de geoformas se identificó que el área se encuentra dentro de la Cordillera de Andes Centrales, en el Altiplano del sur del Perú. En este entorno, las geoformas predominantes como altiplanicies y planicies, compuestas por facies de sedimentos no consolidados (Formación Azángaro), proporcionan condiciones óptimas para el cultivo de quinua.

### Conclusión 2

En este estudio se *determinó la influencia relativa de las rocas parentales en la composición química del suelo utilizado para el cultivo de quinua, mediante el análisis químico multivariado del sistema roca-suelo en el área de Cabana, Puno*. Las rocas volcánicas del Cenozoico influyen directamente en los suelos para el cultivo de la planta quinua en el área de Cabana. Según los centroides calculados a partir de la reducción de dimensiones mediante el análisis de componentes principales (PCA) en muestras rocas y suelos, cuantificados mediante las distancias euclidianas con valores de 5.02 y 5.79 para suelos profundos y superficiales respectivamente, con respecto a las rocas volcánicas, además de tener características químicas similares determinados por las cargas vectoriales. Que indica una transferencia más directa de los componentes químicos desde las rocas hacia los suelos profundos, y luego hacia los suelos superficiales.

### Conclusión 3

En este estudio se *comparó las distribuciones de elementos minerales esenciales en rocas, suelos y plantas destinado al cultivo de quinua en el área de Cabana, Puno*. Los Elementos Minerales Esenciales (EME) se distribuyen desde las rocas parentales, principalmente de las rocas ígneas extrusivas, es decir de los volcánicos Cenozoicos, hacia los suelos profundos y superficiales, en el cual se formaron estos suelos del cultivo, y finalmente a los granos de quinua. El cual estos elementos esenciales se liberan y transfieren desde los materiales parentales, suelos, hacia los granos de la planta quinua, el cual presenta concentraciones significativas de macronutrientes, como potasio (K: 4,900 ppm), fósforo (P: 5,240 ppm), calcio (Ca: 1,000 ppm), magnesio (Mg: 1,720 ppm) y azufre (S: 500 ppm), así como de micronutrientes, como manganeso (Mn: 29.5 ppm), hierro (Fe: 59.7 ppm), zinc (Zn: 35.7 ppm), cobre (Cu: 1.3 ppm) y molibdeno (Mo: 0.4 ppm), reflejando la eficiencia del sistema en la transferencia de nutrientes esenciales. Las rocas ígneas extrusivas del Cenozoico actúan como la principal fuente litológica de nutrientes en el sistema. Durante los procesos de meteorización y erosión, estos nutrientes son liberados hacia los suelos. Los suelos profundos, con altas capacidades de retención, funcionan como reservorios temporales de los nutrientes esenciales. Por otro lado, los suelos superficiales, al presentar concentraciones más accesibles.

## **8.2 RECOMENDACIONES**

1. Se propone que se realice estudios interdisciplinarios de zonas de cultivos en el altiplano para mejorar la sostenibilidad de las estrategias de manejo de cultivos de la planta quinua, con una proyección a futuro de planificar las actividades de producción de quinua. Estableciendo colaboraciones entre geólogos, agrónomos y autoridades locales para continuar evaluando la interacción entre geología y agricultura en la región. Este enfoque multidisciplinario permitiría desarrollar estrategias integradas de gestión del paisaje que no solo mejoren la producción de quinua, sino que también preserven la salud de los ecosistemas locales.
2. Para recomendaciones agrícolas, se debe desarrollar prácticas agrícolas basadas en las características de las rocas parentales y suelos para optimizar el cultivo de quinua en Cabana, Puno. Esto ayudaría a identificar áreas con mayor potencial agrícola y a implementar prácticas de manejo de suelos específicas que aprovechen las características únicas de los sedimentos locales. Así como también para futuras investigaciones, se sugiere profundizar en el análisis de las interacciones entre las rocas, y los sedimentos de la Formación Azángaro, y así corroborar la procedencia específica de estos sedimentos.
3. Implementar programas de formación para agricultores sobre la importancia del conocimiento de las características geológicas en la fertilidad del suelo. Dando a conocer las propiedades específicas de los suelos volcánicos, así como la aplicación adecuada de enmiendas basados en la composición química detallada de los suelos.
4. Se recomienda realizar estudios de biodisponibilidad de elementos químicos en suelos, cultivos de la planta quinua, para determinar las diversas formas químicas que se encuentran en los suelos. Así también, entender el comportamiento químico y conocer elementos químicos que son absorbidos por la planta quinua en los suelos.

**REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA**

- Adobe Inc. (2018). Adobe Illustrator (Version 23.0.5, 64-bit).  
<https://www.adobe.com/products/illustrator.html>
- AGQ Labs. (2022). *Informe de Ensayo - Material Vegetal*. AGQ PERU S.A.C., Lima, Perú.
- Alexandre, P. (2021). *Practical Geochemistry*. Springer Cham. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-72453-5>
- ALS. (2018). *Geochemistry Shedule of Services & Fees, USD*. Geochemistry.  
<https://www.alsglobal.com/en/geochemistry/geochemistry-fee-schedules>
- Amezcu, N. (Ed.). (2017). *La geología del Tequila*. Pachuca, México: Orgánica Editores.  
<https://www.organicaeditores.mx/bibliotecavirtual/79>
- Anderson, S. P., Dietrich, W. E., & Brimhall, G. H. (2002). Weathering profiles, mass-balance analysis, and rates of solute loss: Linkages between weathering and erosion in a small, steep catchment. *GSA Bulletin*, 114(9), 1143–1158.  
[https://doi.org/10.1130/0016-7606\(2002\)114<1143:WPMBAA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(2002)114<1143:WPMBAA>2.0.CO;2)
- Apaza, V., Cáceres, G., Estrada, R., & Pinedo, R. (2013). *Catálogo de variedades comerciales de quinua en el Perú*. Lima, Perú: Instituto Nacional de Innovación Agraria [INIA] y Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO]. Repositorio institucional.  
<http://repositorio.inia.gob.pe/handle/20.500.12955/76>
- Arias, J., & Covinos, M. (2021). *Diseño y metodología de la investigación* (1ra ed.). Arequipa, Perú: ENFOQUES CONSULTING EIRL.
- Arnon, D. I., & Stout, P. R. (1939). The Essentiality of Certain Elements in Minute Quantity For Plants With Special Reference to Copper. *Plant Physiology*, 14(2), 371–375.  
<https://doi.org/10.1104/pp.14.2.371>
- Bing Maps. (2022). *Vista satelital del sur del Perú, con enfoque en la ruta de acceso desde la ciudad de Lima a Juliaca [Mapa]*. <https://www.bing.com/maps>
- Broadley, M., Brown, P., Cakmak, I., Ma, J. F., Rengel, Z., & Zhao, F. (2012a). Beneficial Elements. En P. Marschner (Ed.), *Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants*

- (Third Edition ed., págs. 249-269). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384905-2.00008-X>
- Broadley, M., Brown, P., Cakmak, I., Rengel, Z., & Zhao, F. (2012b). Function of Nutrients: Micronutrients. En P. Marschner (Ed.), *Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants* (Third Edition ed., págs. 191-248). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384905-2.00007-8>
- Cabrera, A., & Petersen, G. (1936). Reconocimiento geológico de los yacimientos petrolíferos del departamento de Puno. *Boletín del cuerpo de ingenieros de minas*, 115.
- Canahuire, A. E., Endara, F., & Morante, E. A. (2015). *¿Cómo hacer la tesis universitaria? Una guía para investigadores* (1ra ed.). Cusco, Perú: Colorgraf S.R.L.
- Carlotto, V., Carlier, G., Heiningen, P., Hodgins, E., Cárdenas, J., Ligarda, R., . . . Maquera, V. (2023). Andean evolution, orogenic deformation and uplift of the Western Cordillera and Altiplano of southern Peru, northern Bolivia and Chile: Eocene-Oligocene lithospheric delamination. *Journal of South American Earth Sciences*, 128(104423). <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2023.104423>
- Castillo, P. I. (2019). *Biogeoquímica del sistema roca-suelo-planta en cuatro viñas de Chile Central (33°-36°S): influencias litogénicas, pedogenéticas y antrópicas*. [Tesis de doctorado, Universidad de Chile]. Repositorio académico de la Universidad de Chile. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/174184>
- Castillo, P. I., Serra, I., Townley, B., Aburto, F., López, S., Tapia, J., & Contreras, M. (2021). Biogeochemistry of plant essential mineral nutrients across rock, soil, water and fruits in vineyards of Central Chile. *Catena*, 196. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104905>
- Cereceda, C., García, A., López, W., Benavente, C., Aguirre, E., Guevara, D., . . . Fernández, V. (2019). *Geología del pisco, valle de Ica*. Lima, Perú: Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico. Repositorio Institucional. <https://hdl.handle.net/20.500.12544/2268>
- Chávez, C. A. (2019). *Proveniência sedimentar dos sedimentos Jurássicos e Cretáceos da Bacia de Arequipa – Tarapacá (sul do Peru): implicações paleogeográficas e geodinâmicas*. [Tesis de maestría, Universidad de Brasília]. Repositorio institucional de UnB. <http://repositorio.unb.br/handle/10482/35305>

- De la Roche, H., Leterrier, J., Grandclaude, P., & Marchal, M. (1980). A classification of volcanic and plutonic rocks using R1-R2 diagram and major-element analyses — Its relationships with current nomenclature. *Chemical Geology*, 29, 183-210. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(80\)90020-0](https://doi.org/10.1016/0009-2541(80)90020-0)
- El Congreso de la República. (2013, 5 de junio). *Ley N.º 30035, Ley que Regula el Repositorio Nacional Digital de Ciencia, Tecnología e Innovación de Acceso Abierto*. Diario oficial El Peruano. <https://www.gob.pe/institucion/minsa/normas-legales/240456-30035>
- Gobierno Regional de Puno y EUROECOTRADE. (2017). *Micro Zonificación Ecológica y Económica [ZEE]: Distrito de Cabana de la Provincia de San Román*. Gerencia Regional de Recursos Naturales y Gestión del Medio Ambiente.
- Gómez, L., & Aguilar, E. (2016). *Guía de cultivo de la quinua*. (FAO-UNALM, Ed.) Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO] y Universidad Nacional Agraria La Molina [UNALM]. <https://www.fao.org/family-farming/detail/es/c/411552/>
- González de Vallejo, L., Ferrer, M., Ortuño, L., & Oteo, C. (2004). *Ingeniería Geológica*. Madrid, España: Pearson Educación, S. A.
- Hajnajafi, G., Jafari-Rad, A., Afzal, P., & Sheikh-Zakariaee, S. (2020). Classification of rock types using multivariate analysis in the Dezak area, SW Iran. *SN Applied Sciences*, 2(1692). <https://doi.org/10.1007/s42452-020-03364-z>
- Hawkesford, M., Horts, W., Kichey, T., Lambers, H., Schjoerring, J., Møller, I. S., & White, P. (2012). Functions of Macronutrients. En P. Marschner (Ed.), *Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants* (Third ed., págs. 135-189). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384905-2.00006-6>
- Hernández-Sampieri, R., & Mendoza, C. (2018). *Metodología de la Investigación: Las rutas Cuantitativa, Cualitativa y Mixta*. McGraw-Hill Interamericana Editores, S.A.
- Herron, M. (1988). Geochemical classification of terrigenous sands and shales from core or log data. *SEPM Journal of Sedimentary Research*, 58(5), 820-829. <https://doi.org/10.1306/212f8e77-2b24-11d7-8648000102c1865d>
- Instituto Geográfico Nacional [IGN]. (2024). *Información Geoespacial Fundamental*. <https://www.idep.gob.pe/geovisor/VisorDeMapas/>



- Instituto Geológico, Minero y Metalurgico [INGEMMET]. (Diciembre de 2023). *GEOCATMIN*. Sistema de Información Geográfico: <https://geocatmin.ingemmet.gob.pe/geocatmin/>
- Jaillard, E., & Santander, G. (1992). La tectónica polifásica en escamas de la zona de Mañazo-Lagunillas (Puno, Sur del Perú). *Bulletin de l'Institut Français d'Études Andines*, 21(1), 37-58. [https://www.persee.fr/doc/bifea\\_0303-7495\\_1992\\_num\\_21\\_1\\_1055](https://www.persee.fr/doc/bifea_0303-7495_1992_num_21_1_1055)
- Kabata-Pendias, A. (2010). *Trace Elements in Soils and Plants* (4th Edition ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b10158>
- Kirkby, E. (2012). Introduction, Definition and Classification of Nutrients. En P. Marschner (Ed.), *Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants* (Third ed., págs. 3-5). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384905-2.00001-7>
- Klinck, B., Ellinson, R., & Hawkins, M. (1986). *The geology of the Cordillera Occidental and Altiplano West of Lake Titicaca Southern Peru*. British Geological Survey & Instituto Geológico Minero y Metalúrgico.
- Laubacher, G. (1978). *Géologie des Andes péruviennes : géologie de la Cordillère orientale et de l'Altiplano au Nord et Nord-Ouest du lac Titicaca (Pérou)* (Vol. 95). Travaux et Documents de l'ORSTOM. Université des Sciences et Techniques du Languedoc. [https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins\\_textes/pleins\\_textes\\_6/Tra\\_d\\_cm/09864.pdf](https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/pleins_textes_6/Tra_d_cm/09864.pdf)
- Laurente, L. F., & Mamani, A. (2020). Modelamiento de la producción de quinua aplicando ARIMA en Puno-Perú. *Fides Et Ratio*, 19(19), 205-230. [http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2071-081X2020000100010](http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2071-081X2020000100010)
- Mamani, A. (2019). *Modelamiento de la producción de quinua en la región de Puno, periodo 1951 - 2017*. [Examen de suficiencia profesional, Universidad Nacional de Altiplano]. Repositorio Institucional. <http://repositorio.unap.edu.pe/handle/20.500.14082/13300>
- Mamani, E. L. (2019). *Regionalización espacial de precipitaciones mensuales en la cuenca de la vertiente del lago Titicaca - lado peruano*. [Tesis de título profesional, Universidad Nacional del Altiplano]. Repositorio Institucional. <http://repositorio.unap.edu.pe/handle/20.500.14082/12489>

- Mamani, M., Rodríguez, R., Acosta, H., Jaimes, F., Navarro, P., & Carlotto, V. (2013). Características litológicas y geoquímicas mas resaltantes de los arcos magmáticos del Perú desde el Ordovícico. *Sociedad Geológica del Perú*, 107, 1-5. <https://hdl.handle.net/20.500.12544/724>
- Marquez, J. E. (2013). *Geochemical characterization of coal and mine rock waste samples from the region of Cam Pha in NE-Vietnam and their effect on rice paddy soil composition and toxic metal bioavailability*. [Tesis de Maestria, Universität Freiburg]. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.3301.2648>
- Marschner, P. (Ed.). (2012). *Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants*. Academic Press. <https://doi.org/10.1016/C2009-0-63043-9>
- Microsoft. (2021). Microsoft Excel (Versión LTSC Profesional Plus 2021). <https://www.microsoft.com/excel>
- Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego [MIDAGRI]. (2023). *Los granos andinos en el Perú: Nota Técnica de Coyuntura Agraria N.º011*. Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego. Repositorio Institucional MIDAGRI. <http://hdl.handle.net/20.500.13036/1458>
- Mujica, A., & Jacobsen, S.-E. (2006). La quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) y sus parientes silvestres. (M. Moraes, B. Øllgaard, L. Kvist, F. Borchsenius, & H. Balslev, Edits.) *Botánica Económica de los Andes Centrales*, 449-457.
- Muñoz, C. (2024). *Monocultivo de la quinua (Chenopodium quinoa Willd), sobre la fertilidad del suelo, distrito de Cabana, 2021*. [Tesis de Maestria, Universidad Nacional de Altiplano]. Repositorio Institucional. <https://repositorio.unap.edu.pe/handle/20.500.14082/22425>
- Newell, N. (1949). Geology of the Lake Titicaca Region, Peru and Bolivia. *Geological Society of America*, 36. <https://doi.org/10.1130/MEM36>
- Nils, F. J., Rodney, L. A., Göran, S., & Saman, T. (2022). Principal component analysis and K-means clustering as tools during exploration for Zn skarn deposits and industrial carbonates, Sala area, Sweden. *Journal of Geochemical Exploration*, 233(106909). <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2021.106909>
- O'Dell, B., & Sunde, R. (Edits.). (1997). *Handbook of nutritionally Essential Mineral Elements*. New York, United States of America: Marcel Dekker Inc.

- Olivera, P., & Nieto, D. (2014). Caracterización elemental en granos de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) mediante la técnica de fluorescencia de rayos X. *Instituto Peruano de Energía Nuclear*, 14, 1-5. Repositorio Institucional. <https://hdl.handle.net/20.500.13054/560>
- Palacios, O., De La Cruz, J., De La Cruz, N., Klinck, B., Allison, R., & Hawkins, M. (1993). *Geología de la Cordillera Occidental y Altiplano al Oeste del Lago Titicaca Sur del Perú (Proyecto Integrado del Sur)*. Lima, Perú: Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico. Boletín, Serie A: Carta Geológica Nacional, 42. Repositorio Institucional. <https://hdl.handle.net/20.500.12544/162>
- Portugal, J. A. (1974). Mesozoic and Cenozoic Stratigraphy and Tectonic Events of Puno-Santa Lucia Area, Department of Puno, Peru. *AAPG Bulletin*, 58(6), 982-999. <https://doi.org/10.1306/83D915E7-16C7-11D7-8645000102C1865D>
- Posit Team. (2024). RStudio: Integrated Development Environment for R (versión 2024.4.2.764, "Chocolate Cosmos") [Software]. <https://www.posit.co/>
- R Core Team. (2024). R: A language and environment for statistical computing (Version 4.4.1). <https://www.r-project.org>
- Railsback, L. (2003). An earth scientist's periodic table of the elements and their ions. *Geology*, 31(9), 737-740. <https://doi.org/10.1130/G19542.1>
- Repo-Carrasco, R., & Solórzano, F. (2020). *Granos andinos: superalimentos en la cocina*. Repositorio institucional. <https://hdl.handle.net/20.500.12996/4411>
- Rodríguez, R., Sánchez, E., Choquehuanca, S., Fabián, C., & Del Castillo, B. (2020). *Geología de los cuadrángulos de Puno (hojas 32v1, 32v2, 32v3, 32v4) y Ácora (hojas 32x1, 32x2, 32x3 y 32x4)*. Lima, Perú: Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico. Boletín Serie L: Actualización Carta Geológica Nacional (Escala 1: 50 000), 2. Repositorio Institucional. <https://hdl.handle.net/20.500.12544/2883>
- Rojas, W., Pinto, M., & Soto, J. (2010). Distribución geográfica y variabilidad genética de los granos andinos. En W. Rojas, J. Soto, M. Pinto, M. Jäger, & S. Padulosi (Edits.), *Granos andinos: avances, logros y experiencias desarrolladas en quinua, cañahua y amaranto en Bolivia* (págs. 11-23). <https://hdl.handle.net/10568/104701>

- Rollinson, H., & Pease, V. (2021). *Using Geochemical Data: To Understand Geological Processes* (2nd ed.). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781108777834>
- Rudnick, R., & Gao, S. (2014). Composition of the Continental Crust. En D. Heinrich, & Karl K. T. (Edits.), *Treatise on Geochemistry* (Second ed., págs. 1-51). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-095975-7.00301-6>
- SENAMHI. (2020). *Mapa Climático del Perú*. Clasificación climática elaborado por el método de Thornthwaite (Periodo de referencia 1981-2010): <https://www.senamhi.gob.pe/?p=mapa-climatico-del-peru>
- Servicio Geológico Colombiano. (2018). *De la Geología al Café*. Bogotá, Colombia: Sistema Nacional de Bibliotecas Enrique Hubach Eqqers. <https://catalogo.sgc.gov.co/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=73700>
- Seyfried, H., Worrier, G., Uhlig, D., Kohler, I., & Calvo, C. (1998). Introducción a la geología y morfología de Los Andes en el norte de Chile. *Chungará (Arica)*, 30(1), 7-39. <https://dx.doi.org/10.4067/S0717-73561998000100002>
- Siegel, F. R. (2002). *Environmental Geochemistry of Potentially Toxic Metals*. Springer Berlin, Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-04739-2>
- Tarbuck, E., Lutgens, F., & Tasa, D. (2005). *Ciencias de la tierra : una introducción a la geología física*. Madrid, España: Pearson Educación S. A.
- Taylor, S. R., & McLennan, S. M. (1985). The Continental Crust: Its Composition and Evolution. *Geological Magazine*, 122(6), 673–674. <https://doi.org/10.1017/S0016756800032167>
- Thió-Henestrosa, S., & Martín-Fernández, J. (2005). CoDaPack (versión 2.03.1) [Software]. <https://www.compositionaldata.com/codapack.php>
- Valencia, M., & Rosell, R. (2003). *Memoria descriptiva de la revisión y actualización del cuadrángulo de Puno (32-v), Escala 1:50 000*. Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico - INGEMMET. <https://hdl.handle.net/20.500.12544/2068>
- Verna, S., & Rivera-Gómez, M. (2013). Computer programs for the classification and nomenclature of igneous rocks. *International Union of Geological Sciences*, 36(2), 115-124. <https://doi.org/10.18814/epiugs/2013/v36i2/005>

- Wikipedia. (22 de marzo de 2022). *Chenopodium quinoa*.  
[https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Chenopodium\\_quinoa&oldid=158974771](https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Chenopodium_quinoa&oldid=158974771)
- Zinck, J. (2012). *Geopedología. Elementos de geomorfología para estudios de suelos y de riesgos naturales*. ITC Special Lecture Notes Series.

## **ANEXOS**

### **ANEXO A INFORMACIÓN SUPLEMENTARIA**

Tabla A.1

Matriz de consistencia de la investigación

TÍTULO DE LA INVESTIGACIÓN			
“INFLUENCIA LITOLÓGICA EN LOS SUELOS PARA EL CULTIVO DE QUINUA ( <i>Chenopodium Quinoa</i> Willd): UN ANÁLISIS QUÍMICO DEL SISTEMA ROCA-SUELO-PLANTA EN EL ÁREA DE CABANA, PUNO”			
PROBLEMAS	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	METODOLOGÍA
<p><b>Problema general</b></p> <p>¿Cómo influye la litología en los suelos para el cultivo de quinua, según el análisis químico del sistema roca-suelo-planta en el área de Cabana, Puno?</p>	<p><b>Objetivo general</b></p> <p>Analizar la influencia litológica en los suelos para el cultivo de quinua, mediante un análisis químico del sistema roca-suelo-planta en el área de Cabana, Puno.</p>	<p><b>Hipótesis General</b></p> <p>La litología de las rocas parentales podría tener una influencia significativa en la composición química de los suelos utilizados para el cultivo quinua en el área de Cabana, Puno. Se espera que el análisis químico del sistema roca-suelo-planta revele una correlación directa entre las características litológicas de las rocas y las propiedades químicas de los suelos, que a su vez influyen el crecimiento y desarrollo de la quinua.</p>	<p><b>Diseño de investigación</b> No experimental - transeccional - Correlacional Descriptivo e interpretativo</p> <p><b>Método de investigación</b> <i>Finalidad:</i> Básica y aplicada <i>Enfoque:</i> Mixto <i>Alcance:</i> Exploratoria y descriptiva <i>Fuente de datos:</i> Documental y de campo</p>
<p><b>Problemas específicos</b></p> <p>a) ¿Cómo influyen las características litológicas del material parental en la formación de suelos utilizados para el cultivo de quinua, así como en relación con las geoformas en el área de Cabana, Puno?</p> <p>b) ¿Cuál es la influencia relativa de las rocas parentales en la composición química del suelo para el cultivo de quinua, según el análisis químico multivariado del sistema roca-suelo en el área de Cabana, Puno?</p> <p>c) ¿Cómo se distribuyen los Elementos Minerales Esenciales en las rocas parentales, suelos y plantas destinadas al cultivo de quinua en el área de Cabana, Puno?</p>	<p><b>Objetivos específicos</b></p> <p>a) Identificar las características litológicas del material parental que influyen en la formación de suelos utilizados para el cultivo de Quinua, así como analizar las geoformas en el área de Cabana, Puno.</p> <p>b) Determinar la influencia relativa de las rocas parentales en la composición química del suelo utilizado para el cultivo de quinua, mediante el análisis químico multivariado del sistema roca-suelo en el área de Cabana, Puno.</p> <p>c) Comparar las distribuciones de Elementos Minerales Esenciales en rocas, suelos y plantas destinado al cultivo de quinua en el área de Cabana, Puno.</p>	<p><b>Hipótesis Específicos</b></p> <p>a) Las características litológicas del material parental podrían influir significativamente en la formación de suelos utilizados para el cultivo de Quinua, así como en relación con las geoformas en el área de Cabana, Puno.</p> <p>b) La composición química de los suelos utilizados para el cultivo de quinua en el área de Cabana, Puno, estarían significativamente influenciada por las rocas parentales. Mediante el análisis químico multivariado del sistema roca-suelo, se espera encontrar una correlación directa entre las características geoquímicas de las rocas parentales y las propiedades químicas de los suelos.</p> <p>c) La distribución de Elementos Minerales Esenciales en las rocas, suelos, y los granos de la planta Quinua tendrían una relación directa significativa en los cultivos de quinua en el área de Cabana, Puno.</p>	<p><b>Técnicas de recolección:</b> Técnica teórica Técnica de campo</p> <p><b>Instrumentos de recolección:</b> Libretas de campo Equipos de campo Equipos de Laboratorio</p> <p><b>Procesamiento de datos:</b> Software estadísticos Software geológicos</p> <p><b>Análisis de datos:</b> Diagramas Gráficos</p>

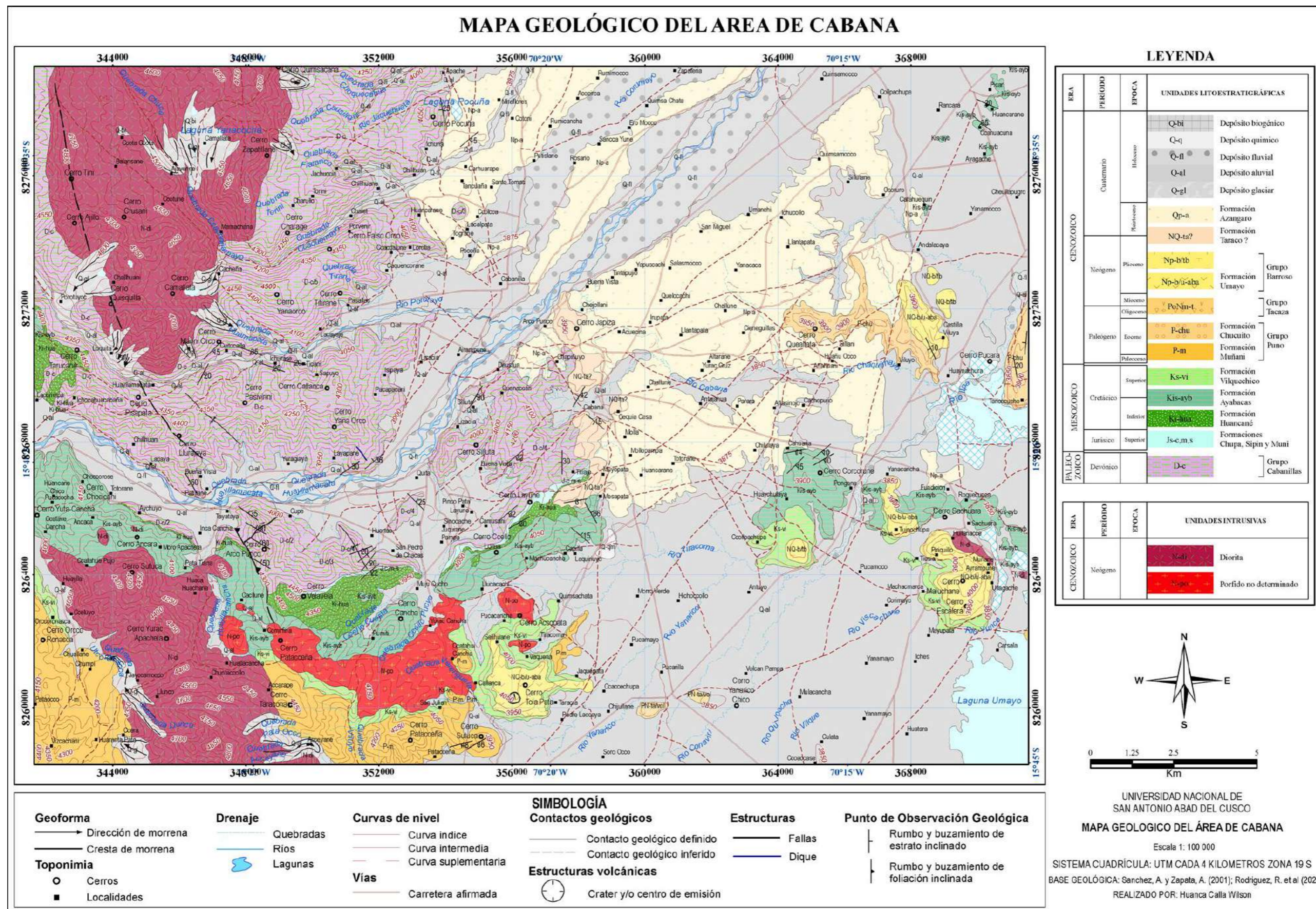
**Tabla A.2***Matriz de operacionalización de variables*

TIPO DE VARIABLE	VARIABLE	DIMENSIÓN	NATURALIZACIÓN	INDICADORES	NIVELES DE MEDICIÓN	CRITERIOS DE MEDICIÓN DE LAS CATEGORÍAS (Datos)
<b>Variable Independiente:</b>	Influencia litológica	Geomorfología	Cualitativa	Paisaje Geomorfológico	Nominal	Basado en la clasificación de Zinc, J. A. (2012).
		Geología	Cualitativa	Unidades litoestratigráficas (Grupo, Formación, Miembro, Capa(s), y Flujo(s))	Nominal	Basado en características litológicas y sus relaciones estratigráficas
			Cualitativa	Tipo de litologías o facies	Nominal	Basado en la clasificación de rocas.
	Composición química de la roca	Geoquímica	Cuantitativa	Composición química de la roca (Elementos mayores, Tierras raras, y nutrientes minerales)	Intervalo/Razón	Basado en el análisis químico de la roca
	Influencia litológica en los suelos	Propiedades del suelo	Agronomía	Cualitativa	Material parental de los suelos (Litología o facies)	Nominal
Cuasi cuantitativas				Horizontes de suelo - Superficial (0-20 cm) - Profundo (>20 cm)	Ordinal	Basado en el nivel de profundidad de horizontes de suelos
Composición química del suelo		Geoquímica	Cuantitativa	Composición química del suelo (Elementos mayores, Tierras raras, y nutrientes minerales)	Intervalo/Razón	Basado en el análisis químico de los suelos
<b>Variable Dependiente:</b>	Características de la Quinua	Agronomía	Cualitativo	Color, forma, tamaño del grano	Nominal	Basado en la inspección visual
Cultivo de Quinua	Composición nutricional de la Quinua	Bioquímica	Cuantitativa	Composición química mineral de la planta (Nutrientes minerales).	Intervalo/Razón	Basado en el análisis químico de la planta



Figura A.1

Mapa geológico del área de Cabana



Fuente: Modificado de Rodríguez et. al. (2020).

## CLASIFICACIÓN GEOQUÍMICA DE ROCAS

**Tabla A.3**

Clasificación geoquímica con datos de las muestras de rocas ígneas extrusivas del área de Cabana.

Etiqueta de muestra	(SiO <sub>2</sub> %) adj (%m/m)	(Na <sub>2</sub> O) adj + (K <sub>2</sub> O) adj (%m/m)	Clasificación TAS según Le Maitre <i>et al.</i> (1989)	Subdivisión		
				Na <sub>2</sub> O-2.0	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O-2.0<K <sub>2</sub> O
GR38B-18-447	55.62460334	6.860738778	Traquiandesita basáltica	1.747	3.082	Shoshonita
GR38B-18-448	56.38153996	7.02341214	Traquiandesita basáltica	1.806	3.185	Shoshonita
GR38B-18-450	54.99337934	6.776242487	Traquiandesita basáltica	1.695	3.047	Shoshonita
GR38B-18-613	50.84680358	5.749243444	Traquibasalto	1.613	2.098	Traquibasalto potásico
GR38B-18-612	48.58946867	5.542973368	Traquibasalto	1.516	1.992	Traquibasalto potásico
GR38B-18-611	51.38663099	5.913905654	Traquibasalto	1.664	2.213	Traquibasalto potásico
GR38B-18-608	51.2392132	6.161866852	Traquibasalto	1.616	2.507	Traquibasalto potásico
GR38B-18-607	52.42041296	6.252992019	Traquiandesita basáltica	1.892	2.321	Shoshonita
GR38B-18-606	51.83370874	6.126987046	Traquiandesita basáltica	1.877	2.212	Shoshonita

Nota. Se procesó con el Programa “IgRoCS (1.0)” (Verna y Rivera-Gómez, 2013).

**Tabla A.4**

Clasificación geoquímica con datos de las muestras de rocas ígneas intrusivas del área de Cabana.

Etiqueta de muestra	Clasificación de mili cationes R1-R2 (De la Roche <i>et al.</i> , 1980)		Clasificación según De la Roche <i>et al.</i> (1980)
	R1=4Si-11(Na+K)-2(Fe+Ti)	R2=6Ca+2Mg+Al	
GR38B-18-445	1646.0	436.0	Granito alcalino
GR38B-18-444	1244.6	471.5	Cuarzosienita
GR38B-18-605	1337.3	445.7	Cuarzosienita
GR38B-18-443	1789.8	643.3	Monzogranito

**Tabla A.5**

Clasificación geoquímica con datos de las muestras sedimentarias del área de Cabana.

Etiqueta de muestra	$\log \text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$	$\log \text{Fe}_2\text{O}_3/\text{K}_2\text{O}$	CaO %	Clasificación según Herron (1988)	
GR38B-18-604	0.57	0.28	7.44	Lutita	Calcárea
GR38B-18-603	0.71	0.12	4.15	Grauwaca	Calcárea
GR38B-18-601	1.15	0.10	0.07	Sublitoarenita	No calcárea
GR38B-18-449	1.19	0.33	0.05	Sublitoarenita	No calcárea
GR38B-18-446	0.60	0.19	4.84	Lutita	Calcárea
GR38B-18-428	0.78	-0.05	94.03	**Caliza tipo Packstone	Carbonatado
GR38B-18-440	1.05	0.27	79.00	**Caliza tipo Mudstone	Carbonatado
GR38B-18-439	1.47	-0.32	0.07	Subarcosa	No calcárea
GR38B-18-438	1.95	0.31	0.02	Cuarzoarenita	No calcárea
GR38B-18-437	1.59	0.29	0.05	Sublitoarenita	No calcárea
GR38B-18-436	0.88	0.21	89.84	** Caliza tipo Wackstone	Carbonatado
GR38B-18-435	0.92	0.05	4.91	Litoarenita	Calcárea
GR38B-18-434	0.83	0.08	5.36	Litoarenita	Calcárea
GR38B-18-433	0.64	-0.12	0.11	*Meta-grauwaca	No calcárea
GR38B-18-432	0.85	0.22	4.25	*Meta-litoarenita	Calcárea
GR38B-18-431	0.72	0.08	0.08	*Meta-grauwaca	No calcárea
GR38B-18-430	0.76	0.29	22.40	**Caliza tipo Packstone	Carbonatado
GR38B-18-429	0.48	0.08	0.23	*Meta-lutita	No calcárea
GR38B-18-427	0.64	0.22	0.15	*Meta-grauwaca	No calcárea
GR38B-18-426	1.03	0.54	0.15	*Meta-litoarenita	No calcárea
GR38B-18-424	1.09	0.79	0.05	*Meta-cuarzoarenita ferruginosa	No calcárea
GR38B-18-425	1.21	1.44	0.08	*Meta-cuarzoarenita ferruginosa	No calcárea
GR38B-18-423	1.38	2.49	0.30	*Meta-cuarzoarenita ferruginosa (fuera de campo)	No calcárea

Nota. Herron (1988) utiliza el % de Ca para diferenciar de rocas siliciclásticas (areniscas y lutitas) de las rocas carbonatadas, que separa de la siguiente manera en: no calcáreas ( $\text{Ca} < 4\%$ ), calcáreas ( $4\% < \text{Ca} < 15\%$ ) y carbonatadas ( $\text{Ca} > 15\%$ ). \*Estas muestras pertenecen a la unidad litoestratigráfica del Grupo Cabanillas, anteponen a la clasificación la palabra “Meta” por presentar metamorfismo de bajo a medio grado. \*\*Rocas sedimentarias carbonatadas clasificadas en campo.

**ANEXO B**  
**BASE DE DATOS Y CONTROL DE CALIDAD**

Tabla B.1

Base de datos para rocas

Etiqueta	Oxidos mayores														Elementos de tierras raras														Elementos minerales esenciales										Elementos inmóviles						
	Al2O3	BaO	CaO	Cr2O3	Fe2O3	K2O	MgO	MnO	Na2O	P2O5	SO3	SiO2	SrO	TiO2	LOI1000	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	K	P	Ca	Mg	S	Mn	Fe	Zn	Cu	Mo	Ni	Zr	Ti	Y	Nb	V
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	%	ppm	%	%	%	ppm	%	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	%	ppm	ppm
GR38B-18-423	3.58	<0.01	0.3	0.01	6.89	0.02	0.47	0.06	<0.01	0.18	0.01	86.74	0.01	0.4	2.01	45.2	123	13.15	48.4	9.19	1.85	6.72	0.69	3.75	0.63	1.76	0.24	1.57	0.22	0.02	780	0.23	0.28	<0.01	465	4.8	40	4.8	0.22	31.6	22.4	0.206	14.9	5.7	175
GR38B-18-424	6.81	0.01	0.05	0.01	5.74	0.83	0.73	0.04	0.69	0.07	0.01	83.04	0.01	0.65	1.98	38.2	80.4	9.67	34.1	6.24	1.04	4.56	0.52	3.09	0.53	1.5	0.23	1.46	0.24	0.68	290	0.05	0.41	0.01	275	3.93	39	3.7	0.15	11.8	73.6	0.247	15.2	7.9	70
GR38B-18-425	5.23	0.01	0.08	0.01	5.25	0.17	1.03	0.04	0.94	0.05	0.02	85.27	<0.01	0.49	1.61	28.5	60.6	6.94	23.9	3.97	0.64	2.52	0.24	1.17	0.19	0.49	0.07	0.4	0.07	0.14	190	0.07	0.59	0.01	291	3.57	39	2.5	0.17	9.7	17.9	0.224	4.4	6.2	38
GR38B-18-426	7.62	<0.01	0.14	<0.01	3.96	1.03	0.37	0.02	<0.01	0.07	<0.01	82.58	<0.01	0.5	2.58	37.2	86.1	9.91	33.9	5.57	1.07	3.45	0.39	2.23	0.4	1.09	0.16	1.15	0.18	0.86	250	0.11	0.21	<0.01	104	2.73	36	3.4	0.15	12.2	54.5	0.252	9.5	7.9	82
GR38B-18-427	15.8	0.05	0.15	0.04	6.49	3.55	0.7	0.01	0.06	0.14	0.1	69.44	0.06	0.86	3.62	52.7	107	13.25	45.3	6.62	1.17	3.96	0.55	3.37	0.68	1.81	0.3	1.92	0.3	2.9	570	0.12	0.38	0.04	53	4.33	22	5.8	0.58	28.2	64.8	0.431	15	14.8	102
GR38B-18-428	0.36	<0.01	54.2	<0.01	0.31	0.31	0.23	0.03	<0.01	0.04	0.06	2.15	0.03	<0.01	42.31	5.3	9.9	1.17	4.1	0.7	0.15	0.57	0.08	0.43	0.08	0.2	0.03	0.16	0.02	0.27	130	37.2	0.21	0.02	239	0.21	33	3.3	0.16	0.3	3.8	0.014	2.5	0.5	4
GR38B-18-429	19.68	0.07	0.22	0.02	6.15	4.57	1.86	0.04	0.43	0.11	2.85	59.91	0.01	0.81	5.9	47.7	95	12	42.6	8.13	1.57	5.62	0.7	4.41	0.87	2.61	0.38	2.66	0.44	3.84	470	0.19	1.05	1.23	253	4.23	76	29.4	1.46	35.1	92.6	0.449	22.2	16.5	117
GR38B-18-430	8.28	0.03	18.55	0.01	3.55	1.62	1.04	0.37	0.76	0.11	0.06	48.08	0.03	0.46	16.77	32.8	68	8.22	28.9	5.58	1.65	4.56	0.62	3.72	0.69	1.97	0.29	1.82	0.27	1.36	470	12.9	0.59	0.02	2760	2.44	81	8	0.19	11.4	62.7	0.251	18.8	9.1	49
GR38B-18-431	14.2	0.05	0.08	0.01	3.89	2.9	1.21	0.03	1.21	0.09	0.06	74.33	0.01	0.68	2.92	42.8	95.1	10.8	39.1	7.64	1.44	5.84	0.69	4.2	0.8	2.5	0.36	2.43	0.37	2.37	370	0.08	0.67	0.02	188	2.65	67	15.3	0.3	22.9	93.5	0.342	22.3	13.7	87
GR38B-18-432	10.14	0.02	3.93	0.01	3.6	1.95	0.73	0.24	0.08	0.13	0.09	71.11	0.01	0.57	6.16	34.7	72.5	8.48	30.4	5.73	1.19	4.34	0.55	3.23	0.6	1.7	0.25	1.63	0.26	1.63	530	2.84	0.41	0.04	1770	2.44	31	63.5	0.21	14.9	73.8	0.264	15.4	9.6	51
GR38B-18-433	16.48	0.06	0.11	0.02	3.42	4.07	0.64	0.01	0.13	0.07	0.02	72.44	0.02	0.84	3.15	45.4	99.7	11.4	39.9	7.56	1.58	5.53	0.69	4.45	0.88	2.77	0.41	2.81	0.46	3.34	250	0.08	0.35	0.01	46	2.34	21	10.6	0.47	18.7	104.5	0.444	22.2	16	98
GR38B-18-434	9.93	0.05	4.96	0.03	4.12	3.07	2.43	0.15	0.07	0.12	0.02	67.11	0.01	0.55	7.69	36.9	73.9	8.82	30.9	5.92	1.25	4.93	0.59	3.72	0.69	1.95	0.27	1.83	0.3	2.54	520	3.54	1.37	0.01	1120	2.84	43	5.5	0.64	10	83	0.301	17.7	10.1	83
GR38B-18-435	8.28	0.04	4.55	0.06	4.12	3.34	2.85	0.22	0.25	0.12	0.01	68.32	0.01	0.69	7.7	30.6	63.5	7.96	29.4	6.25	1.17	5.23	0.68	4.06	0.71	2	0.27	1.82	0.29	2.77	520	3.25	1.61	<0.01	1650	2.77	49	5.4	0.58	9	97.6	0.35	19.7	9.6	64
GR38B-18-436	0.55	0.04	53.7	<0.01	0.61	0.34	0.26	0.07	<0.01	0.02	0.06	4.16	0.02	0.06	41.06	4.1	8.04	1.08	4.6	1.01	0.22	1.15	0.18	0.99	0.23	0.58	0.07	0.5	0.07	0.28	40	33	0.18	0.01	529	0.41	51	8.1	0.6	4.7	7.8	0.029	8.8	0.8	8
GR38B-18-437	2.42	<0.01	0.05	0.02	1.46	0.67	0.07	0.01	<0.01	0.04	0.02	94.84	0.02	0.56	0.55	12.8	23.6	2.9	10.7	1.88	0.29	1.43	0.21	1.18	0.28	0.8	0.11	0.82	0.11	0.51	120	0.04	0.04	0.01	48	0.96	25	6.7	0.55	3.7	69.9	0.299	6.7	6	44
GR38B-18-438	1.08	<0.01	0.02	<0.01	0.78	0.34	0.02	0.01	<0.01	0.03	0.01	96.84	0.01	0.14	0.27	5.5	10.55	1.23	4.8	0.87	0.15	0.74	0.11	0.57	0.11	0.31	0.05	0.32	0.05	0.27	110	0.02	0.02	<0.01	37	0.52	19	3.6	0.25	1.7	20.3	0.073	3	2.2	10
GR38B-18-439	3.12	0.11	0.07	0.02	0.74	1.39	0.07	0.01	0.01	0.06	0.08	93.02	0.03	0.19	0.58	10.4	21.7	2.6	10.4	2.01	0.43	1.8	0.26	1.35	0.28	0.83	0.11	0.74	0.13	1.11	240	0.05	0.04	0.03	46	0.49	17	9.2	0.36	2.1	44.6	0.101	7.2	3.7	12
GR38B-18-440	0.85	0.02	48.5	<0.01	0.58	0.28	1.46	0.06	<0.01	0.08	0.07	9.52	0.02	0.06	38.89	6.1	11.45	1.4	5.5	1.16	0.29	1.23	0.17	0.92	0.18	0.43	0.06	0.35	0.05	0.25	340	31.8	0.83	0.02	434	0.4	23	4.9	0.41	3.6	7.6	0.031	4.4	1.1	29
GR38B-18-443	17.6	0.05	2.52	0.01	1.18	1.94	0.26	0.02	6.34	0.12	0.02	67.35	0.01	0.26	3.13	4.8	12	1.6	6.8	1.41	0.41	1.28	0.16	0.87	0.16	0.4	0.06	0.33	0.04	1.58	460	1.78	0.13	0.01	123	0.79	7	0.7	0.22	2.8	12.8	0.145	3.9	4	26
GR38B-18-444	18.97	0.05	0.74	<0.01	1.46	1.82	0.28	0.05	7.8	0.14	<0.01	67.05	0.02	0.35	1.47	10.7	21.5	2.6	10.3	1.81	0.55	1.61	0.18	1	0.17	0.48	0.06	0.38	0.05	1.48	570	0.53	0.15	<0.01	293	0.97	10	0.4	0.16	3.4	8.8	0.189	4.6	4.5	45
GR38B-18-445	19.12	0.05	0.32	<0.01	1.66	2.19	0.28	0.01	6.42	0.1	<0.01	66.61	0.04	0.35	1.73	5.8	11.1	1.51	5.9	1	0.28	0.78	0.08	0.4	0.08	0.21	0.03	0.15	0.02	1.86	410	0.24	0.16	<0.01	29	1.13	25	0.4	0.09	1.4	3.6	0.184	1.7	3.3	48
GR38B-18-446	15.48	0.08	4.56	0.02	5.57	3.22	1.78	0.06	1.46	0.21	<0.01	61.33	0.01	0.62	6.36	26.9	52.7	6.64	26	5.1	1.18	4.81	0.62	3.47	0.63	1.67	0.24	1.41	0.2	2.66	880	3.17	0.98	<0.01	369	3.88	15	2	1.75	25.5	25.5	0.343	16.7	9	119
GR38B-18-447	15.6	0.19	6.58	0.03	8.09	3.06	4.87	0.12	3.72	0.72	<0.01	54.97	0.15	1.56	0.51	69.7	133.5	16.35	61.3	10.05	2.49	7.87	0.87	4.62	0.81	2.2	0.3	1.77	0.28	2.5	3050	4.49	2.76	<0.01	810	5.67	118	34.1	1.35	75.4	281	0.911	22.8	22	159
GR38B-18-448	15.32	0.24	6.27	0.03	7.91	3.13	4.43	0.09	3.74	0.69	0.05	55.15	0.15	1.54	0.61	73.1	139.5	17.1	65.1	10.55	2.71	8.22	0.89	4.77	0.84	2.27	0.29	1.68	0.27	2.68	3120	4.45	2.62	0.02	655	5.8	120	32.3	1.67	83.7	297	0.929	23	22.7	162
GR38B-18-449	5.76	0.02	0.05	<0.01	1.59	0.67	0.15	0.02	1.7	0.02	<0.01	88.4	0.01	0.21	0.85	12.4	18.75	3.07	12	2.11	0.62	1.83	0.23	1.34	0.24	0.67	0.09	0.58	0.09	0.55	60	0.05	0.09	<0.01	141	1.1	18	11.7	0.93	3.7	21.6	0.114	7	2.7	41
GR38B-18-450	16.09	0.21	6.72	0.02	8.32	3.01	4.39	0.11	3.65	0.8	0.02	54.05	0.16	1.63	1.01	74.2	144	17.85	67	10.95	2.8	8.88	0.94	5.02	0.89	2.37	0.31	1.88	0.29	2.5	3480	4.66	2.48	0.01	738	5.85	129	29.8	1.4	66	311	0.974	22.9	23	165
GR38B-18-601	6.31	0.04	0.07	0.005	1.34	0.95	0.11	0.02	2.04	0.02	<0.01	88.72	0.01	0.23	0.72	9.1	15.6	2.09	6.8	1.07	0.28	0.84	0.1	0.76	0.17	0.51	0.08	0.5	0.07	0.82	60	0.06	0.07	<0.01	145	0.96	6	12.8	0.59	1.9	30.2	0.131	4.4	3.8	35
GR38B-18-603	12.96	0.12	3.95	<0.01	4.17	2.83	0.97	0.06	2.52	0.14	0.04	66.98	0.03	0.55	4.83	20.3	39.5	4.92	19	3.8	0.97	3.67</																							

Tabla B.2

Base de datos para suelos

Etiqueta	Oxidos mayores														Elementos de tierras raras														Elementos minerales esenciales										Elementos inmoviles							
	Al2O3	BaO	CaO	Cr2O3	Fe2O3	K2O	MgO	MnO	Na2O	P2O5	SO3	SiO2	SrO	TiO2	LOI1000	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	K	P	Ca	Mg	S	Mn	Fe	Zn	Cu	Mo	Ni	Zr	Ti	Y	Nb	V	
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	%	ppm	%	%	%	ppm	%	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	%	ppm	ppm	ppm
Muestras de terreno	GR38B-CA001-P	16.03	0.13	3.79	0.01	7.27	3.14	1.35	0.07	3.42	0.26	0.1	62.33	0.09	0.99	1.65	36.5	74.8	7.8	27.1	5.07	1.53	4.48	0.59	3.37	0.6	1.77	0.25	1.68	0.25	2.64	1070	2.81	0.74	0.03	495	4.96	148	51.2	1.54	24.5	124	0.547	16.7	15.6	180
	GR38B-CA001-S	14.46	0.13	2.18	<0.01	5.92	2.62	0.96	0.4	2.14	0.2	0.13	62.16	0.05	0.82	7.08	36.8	74.1	8.01	28.3	5.25	1.31	4.31	0.57	3.2	0.58	1.65	0.24	1.49	0.24	2.16	840	1.61	0.53	0.05	2890	4.02	118	33.1	2.37	22.2	119	0.444	15.5	13.8	89
	GR38B-CA002-P	16	0.1	3.07	0.01	7.28	2.93	1.99	0.06	2.3	0.27	0.13	59.96	0.07	1.08	5.17	38.1	75.8	8.42	29.9	5.89	1.49	4.93	0.67	3.94	0.7	1.97	0.29	1.86	0.29	2.47	1160	2.26	1.11	0.04	432	4.92	318	41.6	1.06	32.6	138.5	0.586	18.8	15.7	140
	GR38B-CA002-S	9.96	0.06	3.63	<0.01	4.73	1.93	1.23	0.16	1.57	0.33	0.56	40.13	0.06	0.57	34.5	23.9	50.5	5.38	19.1	3.59	0.9	2.97	0.4	2.39	0.41	1.18	0.17	1.1	0.17	1.59	1400	2.69	0.7	0.36	1200	3.22	208	42.5	1.11	22.2	85.7	0.307	11.7	9.9	72
	GR38B-CA003-P	13.8	0.08	0.53	0.01	5.28	2.19	0.67	0.08	0.97	0.14	0.11	70.19	0.02	1.06	4.54	44.6	108.5	10.95	39.7	8.46	1.94	6.97	0.89	4.86	0.83	2.49	0.34	2.19	0.35	1.89	570	0.43	0.39	0.04	577	3.68	68	38.7	1.23	24.2	144.5	0.548	21.4	16	113
	GR38B-CA003-S	8	0.05	0.53	<0.01	3.29	1.48	0.39	0.03	0.64	0.15	0.09	77.76	0.01	0.74	5.76	39.9	88	9.9	35.5	6.66	1.17	4.72	0.56	2.9	0.5	1.37	0.19	1.35	0.21	1.25	600	0.42	0.22	0.03	229	2.3	34	14.3	0.82	10.5	96.9	0.324	12.9	10.4	68
	GR38B-CA004-P	15.05	0.09	1.21	0.01	6.47	2.9	0.96	0.12	1.42	0.23	0.09	66.12	0.04	1.03	4.04	40.6	85	9.01	32.2	6.27	1.36	4.73	0.64	3.52	0.62	1.84	0.26	1.76	0.27	2.35	920	0.9	0.52	0.03	812	4.33	103	30.6	1.21	25.2	113	0.523	16.7	15.8	129
	GR38B-CA004-S	12.97	0.07	0.71	0.01	4.06	2.62	0.75	0.06	1.08	0.2	0.06	71.25	0.02	0.8	4.91	36.9	78.5	8.87	31.2	6.17	1.23	4.41	0.58	3.12	0.58	1.71	0.25	1.61	0.27	2.29	870	0.58	0.43	0.03	454	2.9	73	25.9	0.96	19.8	103.5	0.411	16.5	14.4	90
	GR38B-CA005-P	22.09	0.15	2.78	0.01	9.91	1.79	1.62	0.14	2.06	0.34	0.1	51.21	0.07	1.18	6.71	49.1	101.5	10.8	39.5	7.57	2.02	7.05	0.89	5.08	0.94	2.67	0.37	2.38	0.38	1.36	1340	1.86	0.81	0.03	925	5.95	181	52.5	0.93	46.5	187.5	0.586	26	15.9	161
	GR38B-CA005-S	17.79	0.1	1.02	0.01	6.24	2.64	0.98	0.12	1.58	0.29	0.19	59.78	0.04	1	8.8	41.9	85.6	9.14	31.6	5.88	1.5	4.96	0.65	3.6	0.61	1.73	0.23	1.57	0.23	2.08	1190	0.72	0.52	0.07	825	4.09	139	39.9	1.66	25	148.5	0.522	17	17.1	109
	GR38B-CA006-P	19.12	0.12	3.47	0.01	8.06	2.04	1.63	0.11	2.65	0.31	0.09	56.68	0.08	1.06	4.49	48.2	104.5	11.4	41.8	8.19	1.91	6.28	0.86	4.9	0.87	2.51	0.35	2.19	0.34	1.66	1320	2.48	0.87	0.03	745	5.19	135	37.3	1.13	31.7	145	0.558	24.3	15.7	146
	GR38B-CA006-S	15.64	0.11	1.67	0.01	6.23	2.72	0.84	0.17	2.39	0.17	0.17	62.34	0.05	1.05	5.41	40.1	79	8.62	29.7	5.4	1.41	4.39	0.58	3.26	0.57	1.65	0.23	1.41	0.23	2.21	680	1.24	0.45	0.06	1190	4.12	102	31	1.66	20.2	133	0.549	15.2	16.3	116
	GR38B-CA007-S	10.56	0.07	10.7	<0.01	4.37	2.19	1.52	0.13	1.32	0.31	0.96	49.51	0.05	0.58	17.87	25.2	52.7	5.71	20.2	3.96	0.91	3.12	0.41	2.28	0.41	1.19	0.17	1.13	0.17	1.81	1340	7.53	0.83	0.37	912	2.94	71	23.2	0.84	16	81.2	0.304	11.2	10.2	60
	GR38B-CA008-P	17.29	0.07	0.95	<0.01	1.9	1.45	0.78	0.01	5.6	0.11	0.08	67.58	0.04	0.87	2.91	20.1	43.7	4.66	16.2	3.06	0.78	2.41	0.3	1.56	0.27	0.73	0.1	0.63	0.09	1.19	450	0.68	0.43	0.03	79	1.25	21	6.9	1.16	7.3	33.9	0.389	6.9	11.5	62
	GR38B-CA008-S	16.26	0.13	1.02	<0.01	5.93	1.58	0.85	0.15	3.71	0.42	0.14	59.8	0.03	0.65	9.48	23.6	50.5	5.34	19.2	3.77	0.98	2.98	0.4	2.15	0.36	1.01	0.14	0.87	0.13	1.32	1850	0.78	0.47	0.05	1060	4.07	52	19.8	1.48	13.6	55.3	0.307	10.4	8.6	70
	GR38B-CA009-P	16	0.08	0.79	<0.01	6.44	3.31	0.96	0.05	1.2	0.18	0.07	63.87	0.02	0.82	5.67	36.8	66.7	8.38	29.6	6.16	1.52	5.26	0.79	2.15	0.3	1.82	0.28	2.82	800	0.62	0.56	0.03	369	4.55	29	15.2	2.29	20.3	59	0.422	20.8	10.9	120		
	GR38B-CA009-S	15.41	0.09	1.04	<0.01	5.52	3.06	1.06	0.09	1.69	0.17	0.12	63.08	0.02	0.74	7.96	29	62	6.84	25	5.39	1.41	5.03	0.7	3.93	0.67	1.81	0.24	1.46	0.22	2.56	730	0.79	0.58	0.04	620	3.78	33	13.7	2.1	18.7	55	0.364	17.7	10.4	100
	GR38B-CA010-P	2.59	0.04	46.1	<0.01	1.11	0.49	0.41	0.02	0.45	0.08	1.78	10.88	0.16	0.15	37.2	4.1	8.04	0.99	3.5	0.71	0.18	0.64	0.09	0.51	0.09	0.27	0.04	0.26	0.04	0.34	270	25.5	0.21	0.59	112	0.6	16	6.3	0.1	5.9	16.8	0.052	2.8	1.8	11
	GR38B-CA010-S	7.61	0.06	19.85	<0.01	2.78	1.71	1.14	0.06	2.91	0.28	1.14	33.31	0.1	0.37	29.88	15.7	32.1	3.57	12.8	2.46	0.61	2.08	0.28	1.58	0.28	0.84	0.12	0.79	0.12	1.43	1190	13.45	0.62	0.46	399	1.85	62	21.6	0.71	10.8	57	0.205	8.4	6.2	39
	GR38B-CA011-P	17.57	0.1	3.45	<0.01	6.18	1.98	1.4	0.06	1.74	0.15	0.05	60.06	0.07	0.75	6.69	30	55.4	7.28	28.5	5.12	1.42	4.96	0.68	3.77	0.7	1.93	0.26	1.64	0.26	1.57	570	2.46	0.71	0.02	420	4.01	85	23.6	0.93	20.9	84.1	0.388	20	9.7	98
	GR38B-CA011-S	15.31	0.09	2.79	<0.01	5.92	2.22	1.14	0.07	1.32	0.22	0.1	58.74	0.04	0.77	11.07	36.6	62.2	8.31	30.5	6.15	1.57	5.5	7.4	4.18	0.76	2.27	0.32	2.02	0.32	1.85	930	2.1	0.64	0.04	495	4.04	78	32.5	0.95	24.5	101	0.398	25.9	10.8	101
	GR38B-CA012-P	14.72	0.09	1.68	0.01	5.73	3	1.96	0.07	2.28	0.17	0.08	66.25	0.04	0.89	4.46	33.8	67.3	7.91	28.4	4.72	1.17	4.35	0.55	3.12	0.55	1.48	0.19	1.25	0.18	2.45	670	1.28	1.1	0.03	464	3.82	112	26.5	1.15	21.5	80.8	0.424	15.1	13.1	105
	GR38B-CA012-S	14.67	0.09	1.86	<0.01	5.73	3.05	1.68	0.06	2.68	0.28	0.09	63.06	0.04	0.87	5.11	28.4	58.8	6.91	24.6	4.89	1.33	4.34	0.57	3.04	0.52	1.42	0.19	1.18	0.18	2.51	1150	1.4	0.92	0.03	428	3.85	149	25.2	1.2	15.2	66.5	0.429	14.3	11.4	102
	GR38B-CA013-P	10.76	0.1	12.4	<0.01	3.59	2.01	7.69	0.1	1.87	0.26	0.12	46.6	0.16	0.55	14.22	25	49.3	5.57	19.8	3.27	0.94	3.29	0.43	2.42	0.47	1.33	0.18	1.2	0.18	1.69	1120	8.82	4.46	0.04	678	2.42	84	38.1	0.61	23.1	104.5	0.314	14	12.6	64
	GR38B-CA013-S	15.33	0.1	2.31	<0.01	4.82	2.88	1.78	0.09	2.42	0.16	0.15	62.59	0.06	0.82	6.53	33.9	65.4	7.48	26.4	5.05	1.34	4.17	0.56	3.06	0.55	1.56	0.22	1.39	0.21	2.35	640	1.68	0.98	0.06	592	3.23	108	29.4	0.85	17.2	118.5	0.433	15.1	14.4	64
	GR38B-CA014-P	10.56	0.07	14.35	<0.01	3.41	1.85	1.64	0.1	1.68	0.14	0.03	53.06	0.02	0.48	13.1	22.4	39.2	5.22	18.7	3.25	1	3.7	0.55	3.22	0.59	1.73	0.24	1.51	0.23	1.53	560	10.2	0.89	0.01	676	2.28	81	44.4	1.09	12.8	80.3	0.254	19	8.1	70
	GR38B-CA014-S	12.33	0.12	5.31	<0.01	4.77	2.03	1.6	0.11	2.02	0.25	0.1	61.08	0.02	0.67	8.52	25.1	49.4	5.86	21.1	4.37	1.23	3.93	0.56	3.37	0.61	1.85	0.26	1.73	0.26	1.63	1030	3.82	0.87	0.04	764	3.2	149	40.4	1.12	13.8	80.8	0.341	18.1	8.6	93
	GR38B-CA015-P	15.98	0.12	3.25	<0.01	5.07	3.15	1.46	0.09	2.67	0.3	0.11	64.12																																	

Tabla B.3

Grado de confianza: Control de calidad de las muestras de rocas y suelos de elementos mayores, tierras raras, elementos minerales esenciales e inmóviles.

	Analitos	Límite inferior de detección	Unidades	Rocas					Suelos									
				n	Sin resp. Analít.	Prom. CV%	Prom. CV%	Error analít. (EA)	n	Sin resp. Analít.	Prom. CV%	Prom. CV%	Error analít. (EA)					
						Dup. analít.	Estánd. analít.				Dup. analít.	Estánd. analít.						
Elementos mayores (XRF)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.01	%	36	0.00%	2	0.94	2	1.14	1.04	39	0.00%	4	0.87	3	0.89	0.88	
	BaO	0.01	%	36	13.89%	2	24.58	2	39.79	33.07	39	0.00%	4	6.67	3	3.14	5.21	
	CaO	0.01	%	36	0.00%	2	7.71	2	0.38	5.46	39	0.00%	4	2.11	3	0.64	1.56	
	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.01	%	36	33.33%	2	21.21	2	0.00	15.00	39	64.10%	4	17.61	3	10.00	14.32	
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.01	%	36	0.00%	2	5.11	2	0.89	3.67	39	0.00%	4	1.63	3	0.58	1.22	
	K <sub>2</sub> O	0.01	%	36	0.00%	2	0.74	2	0.22	0.54	39	0.00%	4	0.98	3	0.73	0.86	
	MgO	0.01	%	36	0.00%	2	0.68	2	0.63	0.66	39	0.00%	4	0.65	3	1.84	1.38	
	MnO	0.01	%	36	0.00%	2	2.04	2	1.57	1.82	39	0.00%	4	0.00	3	0.00	0.00	
	Na <sub>2</sub> O	0.01	%	36	19.44%	2	6.21	2	14.31	11.03	39	0.00%	4	1.48	3	1.71	1.60	
	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.01	%	36	0.00%	2	0.00	2	0.30	0.21	39	0.00%	4	1.72	3	0.24	1.23	
	SO <sub>3</sub>	0.01	%	36	27.78%	2	5.26	2	21.65	15.76	39	0.00%	4	8.51	3	26.73	19.84	
	SiO <sub>2</sub>	0.01	%	36	0.00%	2	1.25	2	0.22	0.90	39	0.00%	4	1.06	3	1.04	1.05	
	SrO	0.01	%	36	5.56%	2	0.00	2	1.97	1.39	39	0.00%	4	0.00	3	1.63	1.15	
TiO <sub>2</sub>	0.01	%	36	2.78%	2	0.00	2	2.80	1.98	39	0.00%	4	2.41	3	0.64	1.76		
LOI 1000	0.01	%	36	0.00%	3	5.30	3	1.46	3.89	39	0.00%	5	6.97	4	0.99	4.98		
Tierras raras - RRE (ICP-MS)	Ce	0.01	ppm	36	0.00%	2	6.34	4	3.41	5.09	39	0.00%	5	2.90	2	3.28	3.10	
	La	0.5	ppm	36	0.00%	2	7.77	4	4.23	6.26	39	0.00%	5	3.11	2	6.05	4.81	
	Dy	0.05	ppm	36	0.00%	2	8.18	4	3.06	6.18	39	0.00%	5	2.27	2	0.89	1.73	
	Er	0.03	ppm	36	0.00%	2	6.38	4	3.75	5.23	39	0.00%	5	4.55	2	6.32	5.51	
	Eu	0.03	ppm	36	0.00%	2	9.80	4	6.30	8.24	39	0.00%	5	2.06	2	5.76	4.32	
	Gd	0.05	ppm	36	0.00%	2	2.71	4	4.58	3.77	39	0.00%	5	2.06	2	2.71	2.41	
	Ho	0.01	ppm	36	0.00%	2	8.84	4	2.90	6.58	39	0.00%	5	3.30	2	3.50	3.40	
	Lu	0.01	ppm	36	0.00%	2	6.67	4	5.52	6.12	39	0.00%	5	2.68	2	6.15	4.75	
	Nd	0.1	ppm	36	0.00%	2	2.94	4	2.83	2.89	39	0.00%	5	4.64	2	7.24	6.08	
	Pr	0.03	ppm	36	0.00%	2	5.59	4	4.92	5.26	39	0.00%	5	3.69	2	6.12	5.06	
	Sm	0.03	ppm	36	0.00%	2	3.50	4	3.20	3.35	39	0.00%	5	4.62	2	6.41	5.59	
	Tb	0.01	ppm	36	0.00%	2	2.86	4	6.60	5.09	39	0.00%	5	2.17	2	2.58	2.38	
	Tm	0.01	ppm	36	0.00%	2	16.93	4	4.72	12.43	39	0.00%	5	2.32	2	2.18	2.25	
Yb	0.03	ppm	36	0.00%	2	4.86	4	3.46	4.22	39	0.00%	5	5.31	2	4.87	5.10		
Elementos minerales esenciales (ICP-MS)	Macronutrientes	K	0.1	%	36	0.00%	2	1.19	4	2.38	1.88	39	0.00%	5	1.64	2	1.69	1.67
		*P	10	ppm	36	0.00%	2	0.00	4	1.10	0.78	39	0.00%	5	3.66	2	1.72	2.86
		Ca	0.01	%	36	0.00%	2	0.92	4	1.68	1.36	39	0.00%	5	1.75	2	1.37	1.57
		Mg	0.01	%	36	0.00%	2	0.00	4	2.74	1.94	39	0.00%	5	1.80	2	2.74	2.32
		S	0.01	%	36	36.00%	2	21.21	4	1.02	15.02	39	0.00%	5	0.00	2	2.08	1.47
	Macronutrientes	Mn	5	ppm	36	0.00%	2	1.48	4	2.17	1.86	39	0.00%	5	3.69	2	3.69	3.69
		Fe	0.01	%	36	0.00%	2	5.52	4	2.40	4.26	39	0.00%	5	1.81	2	0.80	1.40
		Zn	2	ppm	36	0.00%	2	11.27	4	1.86	8.08	39	0.00%	5	2.93	2	1.65	2.38
		Cu	0.2	ppm	36	0.00%	2	5.25	4	1.83	3.93	39	0.00%	5	5.29	2	0.96	3.80
Inmóviles (ICP-MS)	Mo	0.05	ppm	36	0.00%	2	5.27	4	3.11	4.32	39	0.00%	5	4.32	2	5.07	4.71	
	Ni	0.2	ppm	36	0.00%	2	5.88	4	3.76	4.94	39	0.00%	5	3.76	2	3.39	3.58	
	Zr	0.5	ppm	36	0.00%	2	0.33	4	4.32	3.06	39	0.00%	5	7.10	2	9.55	8.41	
	Ti	0.005	%	36	0.00%	2	0.63	4	2.05	1.52	39	0.00%	5	2.59	2	2.54	2.57	
	Y	0.1	ppm	36	0.00%	2	6.94	4	3.35	5.45	39	0.00%	5	3.82	2	3.90	3.86	
*P	Nb	0.1	ppm	36	0.00%	2	4.26	4	5.31	4.81	39	0.00%	5	7.39	2	4.31	6.05	
	V	1	ppm	36	0.00%	2	0.00	4	3.66	2.59	39	0.00%	5	1.27	2	3.09	2.36	

Nota. El color rojizo indica que los datos no son confiables (>20%), y el color anaranjado indica que son moderadamente confiables (10-20%) y el de color plomo son confiables (<10%). Donde: n: número de datos; Dup. analít. = Duplicado analítico; Estand. Analít. = Estándar analítico; CV%= Porcentaje de coeficiente de variación; Error analít. = Error analítico. \*P, es considerado tanto en los elementos esenciales como en los inmóviles.

**ANEXO C**  
**CÁLCULOS ESTADÍSTICOS PARA EL ANÁLISIS GEOQUÍMICO**



Tabla C.1

Datos de rocas calculados a partir de las variables ( $Al_2O_3$ ,  $SiO_2$ ,  $Ca_2O$ ,  $Na_2O$ , etc.) mediante la transformación logarítmica centrada (CLR, en inglés Centered Log-Ratio)

Etiquetas de muestra	Oxidos mayores												Elementos de Tierras Raras												Elementos Inmoviles							
	clr.Al2O3	clr.CaO	clr.Fe2O3	clr.K2O	clr.MgO	clr.MnO	clr.Na2O	clr.P2O5	clr.SiO2	clr.SrO	clr.TiO2	clr.LOI 1000	clr.La	clr.Ce	clr.Pr	clr.Nd	clr.Sm	clr.Eu	clr.Gd	clr.Tb	clr.Dy	clr.Ho	clr.Er	clr.Tm	clr.Yb	clr.Lu	clr.Ti	clr.Zr	clr.Y	clr.Nb	clr.V	clr.P
GR38B-18-423	6.01	3.53	6.66	0.82	3.98	1.92	-0.30	3.02	9.19	0.13	3.82	5.43	-0.67	0.33	-1.90	-0.60	-2.26	-3.86	-2.57	-4.85	-3.16	-4.94	-3.91	-5.91	-4.03	-5.99	3.15	-1.37	-1.78	-2.74	0.69	2.18
GR38B-18-424	6.56	1.64	6.39	4.45	4.32	1.42	4.27	1.98	9.06	0.03	4.21	5.32	-0.93	-0.18	-2.30	-1.04	-2.74	-4.53	-3.05	-5.22	-3.44	-5.21	-4.17	-6.04	-4.19	-6.00	3.24	-0.27	-1.85	-2.50	-0.32	1.10
GR38B-18-425	6.81	2.63	6.81	3.38	5.18	1.94	5.09	2.16	9.60	0.12	4.44	5.63	-0.71	0.05	-2.12	-0.88	-2.68	-4.50	-3.13	-5.48	-3.90	-5.72	-4.77	-6.72	-4.97	-6.72	3.66	-1.17	-2.57	-2.23	-0.42	1.19
GR38B-18-426	6.94	2.94	6.29	4.94	3.91	1.00	-0.13	2.25	9.32	-0.13	4.22	5.86	-0.68	0.15	-2.01	-0.78	-2.58	-4.23	-3.06	-5.24	-3.50	-5.22	-4.21	-6.13	-4.16	-6.02	3.53	-0.30	-2.05	-2.23	0.11	1.22
GR38B-18-427	7.16	2.51	6.27	5.67	4.05	-0.20	1.59	2.44	8.64	1.59	4.25	5.69	-0.84	-0.13	-2.22	-0.99	-2.92	-4.65	-3.43	-5.40	-3.59	-5.19	-4.21	-6.01	-4.15	-6.01	3.56	-0.63	-2.10	-2.11	-0.18	1.54
GR38B-18-428	5.29	10.31	5.15	5.15	4.85	2.81	1.28	3.10	7.08	2.81	1.28	10.06	-1.23	-0.60	-2.74	-1.48	-3.25	-4.79	-3.46	-5.42	-3.74	-5.42	-4.50	-6.40	-4.73	-6.81	2.05	-1.56	-1.98	-3.59	-1.51	1.97
GR38B-18-429	7.17	2.68	6.01	5.71	4.81	0.97	3.35	1.99	8.29	-0.41	3.98	5.97	-1.15	-0.46	-2.53	-1.27	-2.92	-4.57	-3.29	-5.37	-3.53	-5.16	-4.06	-5.98	-4.04	-5.84	3.39	-0.49	-1.92	-2.21	-0.26	1.14
GR38B-18-430	6.34	7.15	5.49	4.71	4.26	3.23	3.95	2.02	8.10	0.72	3.45	7.04	-1.50	-0.77	-2.88	-1.62	-3.27	-4.49	-3.47	-5.46	-3.67	-5.36	-4.31	-6.22	-4.39	-6.30	2.84	-0.85	-2.05	-2.78	-1.09	1.17
GR38B-18-431	6.99	1.81	5.70	5.40	4.53	0.83	4.53	1.93	8.65	-0.27	3.95	5.41	-1.11	-0.32	-2.49	-1.20	-2.84	-4.51	-3.11	-5.24	-3.44	-5.09	-3.95	-5.89	-3.98	-5.86	3.27	-0.33	-1.77	-2.25	-0.40	1.04
GR38B-18-432	6.74	5.79	5.70	5.09	4.11	2.99	1.90	2.38	8.69	-0.18	3.86	6.24	-1.24	-0.51	-2.65	-1.38	-3.04	-4.62	-3.32	-5.39	-3.62	-5.30	-4.26	-6.18	-4.30	-6.14	3.09	-0.49	-2.06	-2.53	-0.86	1.48
GR38B-18-433	7.19	2.18	5.61	5.79	3.94	-0.22	2.34	1.72	8.67	0.47	4.21	5.53	-1.01	-0.23	-2.39	-1.14	-2.80	-4.37	-3.12	-5.20	-3.33	-4.96	-3.81	-5.72	-3.79	-5.60	3.57	-0.18	-1.73	-2.05	-0.24	0.69
GR38B-18-434	6.61	5.91	5.73	5.43	5.20	2.41	1.65	2.19	8.52	-0.29	3.71	6.35	-1.29	-0.60	-2.72	-1.47	-3.12	-4.68	-3.30	-5.43	-3.59	-5.27	-4.23	-6.21	-4.30	-6.10	3.11	-0.48	-2.03	-2.59	-0.48	1.35
GR38B-18-435	6.37	5.77	5.67	5.46	5.30	2.74	2.87	2.13	8.48	-0.35	3.88	6.30	-1.53	-0.80	-2.88	-1.57	-3.12	-4.80	-3.30	-5.34	-3.55	-5.30	-4.26	-6.26	-4.36	-6.19	3.21	-0.37	-1.97	-2.69	-0.80	1.30
GR38B-18-436	5.26	9.84	5.37	4.78	4.51	3.20	0.82	1.95	7.29	1.95	3.05	9.57	-1.94	-1.27	-3.27	-1.82	-3.34	-4.86	-3.21	-5.07	-3.36	-4.82	-3.90	-6.01	-4.04	-6.01	2.32	-1.30	-1.18	-3.57	-1.27	0.34
GR38B-18-437	6.40	2.52	5.89	5.11	2.86	0.91	0.48	2.30	10.07	1.60	4.94	4.92	-1.15	-0.53	-2.63	-1.32	-3.06	-4.93	-3.34	-5.26	-3.53	-4.97	-3.92	-5.90	-3.89	-5.90	4.31	0.55	-1.79	-1.90	0.09	1.09
GR38B-18-438	6.36	2.37	6.03	5.20	2.37	1.68	1.25	2.78	10.86	1.68	4.32	4.97	-1.22	-0.57	-2.72	-1.36	-3.07	-4.83	-3.23	-5.14	-3.49	-5.14	-4.10	-5.92	-4.07	-5.92	3.66	0.08	-1.83	-2.14	-0.63	1.77
GR38B-18-439	6.68	2.89	5.25	5.88	2.89	0.94	0.94	2.73	10.08	2.04	3.89	5.00	-1.32	-0.59	-2.71	-1.32	-2.97	-4.51	-3.08	-5.01	-3.36	-4.94	-3.85	-5.87	-3.96	-5.70	3.25	0.13	-1.69	-2.36	-1.18	1.82
GR38B-18-440	5.48	9.52	5.09	4.37	6.02	2.83	0.60	3.11	7.89	1.73	2.83	9.30	-1.76	-1.13	-3.24	-1.87	-3.42	-4.81	-3.36	-5.34	-3.65	-5.29	-4.42	-6.38	-4.62	-6.57	2.17	-1.54	-2.09	-3.48	-0.20	2.26
GR38B-18-443	8.16	6.22	5.46	5.96	3.95	1.38	7.14	3.18	9.51	0.69	3.95	6.44	-2.35	-1.43	-3.44	-2.00	-3.57	-4.81	-3.67	-5.75	-4.05	-5.75	-4.83	-6.73	-5.02	-7.13	3.37	-1.36	-2.55	-2.53	-0.66	2.22
GR38B-18-444	8.07	4.83	5.50	5.73	3.85	2.13	7.18	3.16	9.33	1.21	4.08	5.51	-1.71	-1.02	-3.13	-1.75	-3.49	-4.68	-3.61	-5.80	-4.08	-5.86	-4.82	-6.90	-5.05	-7.08	3.46	-1.91	-2.56	-2.58	-0.28	2.26
GR38B-18-445	8.53	4.44	6.09	6.36	4.31	0.97	7.44	3.28	9.78	2.36	4.53	6.13	-1.87	-1.22	-3.22	-1.86	-3.63	-4.90	-3.88	-6.16	-4.55	-6.16	-5.19	-7.14	-5.53	-7.54	3.89	-2.35	-3.10	-2.44	0.24	2.39
GR38B-18-446	7.04	5.82	6.02	5.47	4.88	1.49	4.68	2.74	8.42	-0.30	3.83	6.15	-1.61	-0.94	-3.01	-1.65	-3.28	-4.74	-3.33	-5.38	-3.66	-5.37	-4.39	-6.33	-4.56	-6.52	3.23	-1.67	-2.09	-2.71	-0.13	1.87
GR38B-18-447	6.45	5.59	5.80	4.82	5.29	1.59	5.02	3.38	7.71	1.81	4.15	3.03	-1.26	-0.61	-2.71	-1.39	-3.20	-4.59	-3.44	-5.64	-3.97	-5.72	-4.72	-6.71	-4.93	-6.78	3.61	0.13	-2.38	-2.41	-0.44	2.52
GR38B-18-448	6.43	5.53	5.77	4.84	5.19	1.29	5.02	3.33	7.71	1.80	4.13	3.20	-1.22	-0.57	-2.67	-1.34	-3.16	-4.51	-3.40	-5.63	-3.95	-5.69	-4.69	-6.75	-4.99	-6.82	3.63	0.18	-2.38	-2.39	-0.42	2.53
GR38B-18-449	7.19	2.44	5.90	5.04	3.54	1.53	5.97	1.53	9.92	0.83	3.88	5.28	-1.26	-0.84	-2.65	-1.29	-3.03	-4.25	-3.17	-5.24	-3.48	-5.20	-4.17	-6.18	-4.32	-6.18	3.27	-0.70	-1.83	-2.78	-0.06	0.32
GR38B-18-450	6.41	5.54	5.75	4.74	5.12	1.43	4.93	3.41	7.63	1.80	4.12	3.65	-1.27	-0.60	-2.69	-1.37	-3.18	-4.54	-3.39	-5.64	-3.96	-5.69	-4.71	-6.75	-4.94	-6.81	3.61	0.17	-2.44	-2.44	-0.47	2.58
GR38B-18-601	7.46	2.95	5.91	5.56	3.41	1.70	6.33	1.70	10.10	1.01	4.14	5.29	-1.39	-0.85	-2.86	-1.68	-3.53	-4.87	-3.77	-5.90	-3.87	-5.37	-4.27	-6.12	-4.29	-6.26	3.58	-0.19	-2.12	-2.26	-0.04	0.50
GR38B-18-603	6.94	5.76	5.81	5.42	4.35	1.57	5.31	2.42	8.59	0.88	3.78	5.96	-1.82	-1.15	-3.24	-1.88	-3.49	-4.86	-3.53	-5.46	-3.65	-5.31	-4.28	-6.26	-4.38	-6.26	3.20	-0.61	-2.13	-2.81	-0.36	1.52
GR38B-18-604	6.77	5.99	5.85	5.10	5.54	1.66	4.48	2.56	8.07	-0.53	3.80	6.26	-1.77	-1.03	-3.13	-1.80	-3.38	-4.82	-3.40	-5.39	-3.58	-5.24	-4.24	-6.22	-4.36	-6.25	3.17	-0.60	-2.04	-2.59	-0.54	1.66
GR38B-18-605	8.13	4.86	6.20	6.12	3.03	1.73	7.17	3.34	9.43	2.57	4.21	5.52	-2.41	-1.64	-3.53	-2.09	-3.55	-4.80	-3.75	-5.69	-3.94	-5.75	-4.73	-6.79	-5.18	-6.97	3.60	-2.22	-2.54	-2.47	-0.34	2.48
GR38B-18-606	6.32	5.74	5.95	4.42	5.44	1.73	4.98	3.39	7.57	1.79	4.39	3.03	-1.49	-0.78	-2.86	-1.53	-3.21	-4.54	-3.44	-5.64	-3.90	-5.63	-4.76	-6.79	-4.97	-6.79	3.87	-0.13	-2.40	-1.98	-0.35	2.57
GR38B-18-607	6.35	5.71	5.97	4.45	5.07	1.78	4.97	3.39	7.56	1.71	4.42	3.75	-1.58	-0.89	-2.95	-1.60	-3.27	-4.54	-3.41	-5.60	-3.84	-5.60	-4.69	-6.68	-4.93	-6.84	3.79	-0.21	-2.36	-2.09	-0.42	2.55
GR38B-18-608	6.30	5.74	5.99	4.57	5.60	1.67	4.93	3.49	7.58	1.92	4.47	1.34	-1.45	-0.68	-2.71	-1.36	-3.11	-4.50	-3.47	-5.65	-3.93	-5.67	-4.73	-6.71	-4.96	-6.81	3.94	-0.02	-2.35	-1.82	-0.27	2.67
GR38B-18-611	6.41	5.83	6.02	4.48	5.53	1.67	4.99	3.33	7.62	1.59	4.42	4.22	-1.71	-0.99	-3.08	-1.72	-3.30	-4.57	-3.54	-5.63	-3.92	-5.67	-4.73	-6.81	-4.99	-6.93	3.89	-0.15	-2.41	-2.07	-0.28	2.52
GR38B-18-612	6.36	6.37	5.96	4.36	5.10	1.70	4.93	3.31	7.55	1.53	4.36	5.49	-1.80	-1.08	-3.16	-1.78	-3.41	-4.67	-3.54	-5.68	-3.96	-5.70	-4.77	-6.78	-4.97	-6.86	3.84	-0.23	-2.54	-2.15	-0.29	2.50
GR38B-18-613	6.42	6.05	6.02	4.41	5.02	1.73	4.96	3.37	7.59	1.65	4.42	4.76	-1.72	-1.00	-3.09	-1.75	-3.37	-4.67	-3.55	-5.68	-3.95	-5.68	-4.76	-6.79	-4.99	-6.90	3.86	-0.15	-2.49	-2.08	-0.19	2.53

Nota. Los datos fueron transformados con el software CoDaPack (Thió-Henestrosa & Martín-Fernández, 2005), transformación por CLR

Tabla C.2

Datos de suelos en horizontes superficiales calculados a partir de las variables (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub>, Ca<sub>2</sub>O, Na<sub>2</sub>O, etc.) mediante la transformación logarítmica centrada (CLR, en ingles Centered Log-Ratio)

Etiquetas de muestra	clr.Al2O3	clr.CaO	clr.Fe2O3	clr.K2O	clr.MgO	clr.MnO	clr.Na2O	clr.P2O5	clr.SiO2	clr.SrO	clr.TiO2	clr.LOI 1000	clr.La	clr.Ce	clr.Pr	clr.Nd	clr.Sm	clr.Eu	clr.Gd	clr.Tb	clr.Dy	clr.Ho	clr.Er	clr.Tm	clr.Yb	clr.Lu	clr.P	clr.Ti	clr.Zr	clr.Y	clr.Nb	clr.V
GR38B-CA001-S	6.792	4.900	5.899	5.084	4.080	3.204	4.881	2.511	8.250	1.125	3.922	6.078	-1.493	-0.775	-3.036	-1.790	-3.467	-4.665	-3.590	-5.618	-3.875	-5.601	-4.519	-6.476	-4.571	-6.476	1.644	3.309	-0.311	-2.349	-2.465	-0.601
GR38B-CA002-S	6.463	5.453	5.718	4.822	4.371	2.332	4.615	3.056	7.856	1.351	3.602	7.705	-1.441	-0.741	-2.965	-1.703	-3.388	-4.776	-3.585	-5.608	-3.883	-5.591	-4.545	-6.473	-6.647	-6.473	2.198	2.983	-0.595	-2.587	-2.754	-0.769
GR38B-CA003-S	6.514	3.799	5.625	4.826	3.493	0.928	3.988	2.537	8.788	-0.171	4.133	6.185	-1.136	-0.448	-2.645	-1.378	-3.003	-4.377	-3.181	-5.176	-3.405	-5.133	-4.098	-6.014	-4.155	-6.014	1.621	3.307	-0.202	-2.219	-2.434	-0.556
GR38B-CA004-S	7.033	4.128	5.872	5.434	4.183	1.657	4.548	2.861	8.737	0.559	4.248	6.062	-1.566	-0.818	-3.057	-1.790	-3.461	-4.845	-3.651	-5.656	-3.868	-5.631	-4.574	-6.512	-6.644	-6.512	2.029	3.582	-0.100	-1.936	-2.072	-0.240
GR38B-CA005-S	6.855	3.996	5.807	4.947	3.956	1.856	4.433	2.738	8.067	0.757	3.976	6.151	-1.437	-0.548	-2.841	-1.553	-3.099	-4.572	-3.293	-5.351	-3.653	-5.421	-4.322	-6.313	-4.450	-6.284	1.847	3.326	-0.234	-2.401	-2.395	-0.543
GR38B-CA006-S	6.906	4.669	5.985	5.156	3.981	2.384	5.027	2.384	8.288	1.160	4.204	5.844	-1.368	-0.577	-2.762	-1.485	-3.159	-4.898	-3.503	-5.634	-3.990	-5.748	-4.740	-6.715	-4.755	-6.615	1.467	3.556	-0.164	-2.333	-2.263	-0.301
GR38B-CA007-S	6.472	6.485	5.590	4.899	4.534	2.075	4.392	2.944	8.017	1.119	3.570	6.998	-1.392	-0.653	-2.897	-1.624	-3.260	-4.788	-3.542	-5.542	-3.837	-5.574	-4.486	-6.443	-4.530	-6.405	2.105	2.924	-0.699	-2.680	-2.773	-1.001
GR38B-CA008-S	6.995	4.226	5.986	4.664	4.044	2.309	5.517	3.339	8.297	0.700	3.775	6.455	-1.396	-0.641	-2.822	-1.564	-3.185	-4.797	-3.520	-5.549	-3.866	-5.549	-4.468	-6.390	-4.528	-6.314	2.519	3.025	-0.991	-2.662	-2.852	-0.756
GR38B-CA009-S	6.829	4.133	5.802	5.212	4.152	1.686	4.618	2.322	8.238	0.181	3.792	6.168	-1.223	-0.497	-2.737	-1.441	-3.093	-4.414	-3.164	-5.233	-3.492	-5.179	-4.135	-6.111	-4.250	-6.084	1.476	3.083	-1.110	-2.243	-2.775	-0.512
GR38B-CA010-S	6.233	7.191	5.226	4.740	4.334	1.390	5.271	2.930	7.709	1.901	3.209	7.600	-1.272	-0.558	-2.795	-1.554	-3.236	-4.602	-3.406	-5.438	-3.726	-5.502	-4.459	-6.477	-4.556	-6.477	2.074	2.618	-0.964	-2.879	-3.183	-1.344
GR38B-CA011-S	6.744	5.042	5.794	4.813	4.147	1.356	4.293	2.502	8.089	0.797	3.754	6.420	-1.319	-0.545	-2.761	-1.462	-3.092	-4.548	-3.357	-5.345	-3.605	-5.334	-4.274	-6.244	-4.411	-6.273	1.641	3.094	-0.580	-1.940	-2.815	-0.580
GR38B-CA012-S	6.866	4.801	5.926	5.296	4.699	1.367	5.166	2.908	8.325	0.962	4.041	5.812	-1.338	-0.660	-2.876	-1.639	-3.343	-4.686	-3.550	-5.574	-3.848	-5.592	-4.529	-6.499	-4.686	-6.499	2.018	3.334	-0.832	-2.369	-2.596	-0.405
GR38B-CA013-S	7.057	5.165	5.900	5.385	4.904	1.920	5.211	2.495	8.464	1.514	4.129	6.204	-1.656	-0.918	-3.140	-1.877	-3.506	-4.977	-3.745	-5.774	-4.058	-5.774	-4.709	-6.655	-4.760	-6.655	1.579	3.491	-0.108	-2.168	-2.215	-0.724
GR38B-CA014-S	7.009	6.166	6.059	5.205	4.967	2.289	5.200	3.110	8.609	0.585	4.096	6.639	-1.713	-0.936	-3.175	-1.929	-3.595	-4.962	-3.834	-5.918	-4.269	-6.023	-5.028	-7.016	-5.176	-7.122	2.224	3.421	-0.322	-1.818	-2.562	-0.181
GR38B-CA015-S	7.108	5.085	6.032	5.476	4.164	2.131	5.313	2.677	8.474	1.525	4.244	6.099	-1.711	-0.950	-3.197	-1.917	-3.545	-4.892	-3.780	-5.788	-4.107	-5.894	-4.862	-6.838	-5.011	-6.912	1.861	3.641	-0.005	-2.151	-1.982	-0.287
GR38B-CA016-S	6.777	5.066	5.784	5.045	4.061	1.982	5.090	2.784	8.156	1.363	4.012	5.555	-1.583	-0.988	-3.062	-1.800	-3.370	-4.769	-3.528	-5.424	-3.680	-5.424	-4.423	-6.392	-4.589	-6.461	1.959	3.364	-0.313	-2.379	-2.309	-0.506
GR38B-CA017-S	6.651	5.220	5.761	5.042	4.450	2.039	4.868	4.015	8.112	1.192	3.943	5.910	-1.838	-1.078	-3.283	-1.986	-3.521	-4.862	-3.590	-5.562	-3.837	-5.606	-4.612	-6.632	-4.827	-6.719	3.220	3.310	-0.405	-2.360	-2.414	-0.600
GR38B-CA018-S	7.713	6.038	6.747	5.771	5.384	2.374	5.717	3.319	9.170	2.038	4.785	7.136	-2.766	-2.092	-4.187	-2.924	-4.519	-5.892	-4.623	-6.585	-4.850	-6.585	-5.486	-7.396	-5.524	-7.396	2.443	4.120	0.590	-1.166	-1.620	0.266
GR38B-CA019-S	7.247	5.424	5.928	5.637	4.440	1.853	5.570	2.680	8.653	1.853	4.338	6.359	-1.944	-1.229	-3.426	-2.149	-3.798	-5.192	-3.966	-5.971	-4.241	-5.971	-4.872	-6.818	-4.934	-6.818	1.794	3.729	0.169	-1.977	-1.932	-0.435
GR38B-CA020-S	6.589	6.547	5.553	5.227	4.645	1.583	4.291	3.288	7.988	0.602	3.752	6.934	-1.700	-1.087	-3.116	-1.752	-3.468	-4.751	-3.500	-5.487	-3.774	-5.458	-4.444	-6.449	-4.607	-6.449	2.421	3.073	-0.571	-2.477	-2.592	-0.811

Nota. Los datos fueron transformados con el software CoDaPack (Thió-Henestrosa & Martín-Fernández, 2005), transformación por CLR

Tabla C.3

Datos de suelos en horizontes profundos calculados a partir de las variables (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub>, Ca<sub>2</sub>O, Na<sub>2</sub>O, etc.) mediante la transformación logarítmica centrada (Crl, en ingles Centered Log-Ratio)

Etiquetas de muestra	clr.Al2O3	clr.CaO	clr.Fe2O3	clr.K2O	clr.MgO	clr.MnO	clr.Na2O	clr.P2O5	clr.SiO2	clr.SrO	clr.TiO2	clr.LOI 1000	clr.La	clr.Ce	clr.Pr	clr.Nd	clr.Sm	clr.Eu	clr.Gd	clr.Tb	clr.Dy	clr.Ho	clr.Er	clr.Tm	clr.Yb	clr.Lu	clr.P	clr.Ti	clr.Zr	clr.Y	clr.Nb	clr.V
GR38B-CA001-P	6.798	5.355	6.007	5.167	4.323	1.364	5.253	2.676	8.156	1.615	4.013	4.524	-1.587	-1.057	-3.070	-1.770	-3.371	-4.736	-3.483	-5.488	-3.757	-5.462	-4.367	-6.327	-4.484	-6.327	1.788	3.420	-0.367	-2.372	-2.440	0.006
GR38B-CA002-P	6.895	5.244	6.107	5.197	4.810	1.309	4.955	2.813	8.216	1.463	4.199	5.765	-1.568	-0.879	-3.020	-1.742	-3.537	-4.931	-3.618	-5.686	-3.951	-5.686	-4.696	-6.749	-4.865	-6.803	1.968	3.588	-0.158	-2.155	-2.335	-0.147
GR38B-CA003-P	6.980	3.720	6.019	5.139	3.954	1.829	4.324	2.389	8.606	0.443	4.413	5.868	-1.509	-0.781	-2.922	-1.653	-3.268	-4.570	-3.388	-5.418	-3.744	-5.509	-4.505	-6.516	-4.690	-6.570	1.490	3.753	0.118	-1.792	-2.083	-0.128
GR38B-CA004-P	7.032	4.511	6.187	5.385	4.279	2.200	4.671	2.851	8.512	1.101	4.350	5.717	-1.671	-0.992	-3.173	-1.904	-3.705	-4.952	-3.699	-5.734	-4.006	-5.645	-4.605	-6.605	-4.708	-6.605	1.934	3.672	-0.163	-2.075	-2.130	-0.030
GR38B-CA005-P	7.143	5.070	6.341	4.630	4.530	2.081	4.770	2.969	7.983	1.388	4.213	5.951	-1.639	-0.982	-3.151	-1.889	-3.543	-4.870	-3.735	-5.743	-4.044	-5.761	-4.718	-6.677	-4.833	-6.723	2.038	3.513	0.071	-1.905	-2.396	-0.081
GR38B-CA006-P	7.088	5.381	6.224	4.850	4.626	1.930	5.112	2.966	8.174	1.611	4.195	5.639	-1.964	-1.405	-3.421	-2.145	-3.895	-5.073	-3.765	-5.671	-3.904	-5.601	-4.525	-6.500	-4.661	-6.543	2.112	3.554	-0.097	-1.883	-2.320	-0.090
GR38B-CA008-P	7.344	4.443	5.136	4.866	4.246	-0.111	6.217	2.287	8.707	1.275	4.355	5.562	-1.493	-0.816	-2.948	-1.667	-3.242	-4.509	-3.348	-5.296	-3.501	-5.211	-4.101	-6.063	-4.168	-6.063	1.393	3.550	-1.193	-2.785	-2.274	-0.589
GR38B-CA009-P	7.045	4.037	6.135	5.469	4.232	1.277	4.455	2.558	8.429	0.361	4.074	6.008	-1.254	-0.647	-2.799	-1.550	-3.382	-4.630	-3.423	-5.449	-3.702	-5.400	-4.350	-6.324	-4.539	-6.324	1.747	3.410	-0.860	-1.903	-2.549	-0.150
GR38B-CA010-P	5.748	8.627	4.901	4.083	3.905	0.884	3.998	2.271	7.183	2.964	2.899	8.413	-0.768	-0.153	-2.322	-1.092	-2.962	-4.159	-2.986	-5.068	-3.329	-5.030	-4.015	-6.023	-4.152	-6.023	1.185	1.840	-1.592	-3.384	-3.826	-2.016
GR38B-CA011-P	7.037	5.409	5.992	4.854	4.507	1.357	4.725	2.274	8.266	1.512	3.883	6.071	-1.251	-0.610	-2.798	-1.516	-3.346	-4.647	-3.479	-5.534	-3.787	-5.502	-4.486	-6.509	-4.614	-6.467	1.306	3.224	-0.608	-2.044	-2.767	-0.455
GR38B-CA012-P	6.909	4.738	5.965	5.318	4.892	1.560	5.044	2.447	8.413	1.001	4.103	5.715	-1.287	-0.643	-2.807	-1.531	-3.380	-4.752	-3.578	-5.626	-3.853	-5.589	-4.534	-6.552	-4.669	-6.552	1.516	3.361	-0.599	-2.276	-2.418	-0.337
GR38B-CA013-P	6.490	6.632	5.392	4.812	6.154	1.812	4.740	2.767	7.956	2.282	3.516	6.769	-1.624	-0.942	-3.125	-1.826	-3.624	-4.881	-3.649	-5.694	-3.958	-5.676	-4.671	-6.657	-4.818	-6.657	1.925	2.956	-0.447	-2.457	-2.562	-0.937
GR38B-CA014-P	6.630	6.937	5.500	4.888	4.768	1.970	4.792	2.307	8.244	0.361	3.539	6.845	-1.408	-0.730	-2.901	-1.609	-3.425	-4.755	-3.524	-5.500	-3.784	-5.448	-4.455	-6.452	-4.552	-6.452	1.390	2.902	-0.552	-1.993	-2.846	-0.

Tabla C.4

Concentración de elementos de Tierras raras de muestras de roca, normalizados a los valores del Condrito y el Promedio global de suelos y, los índices geoquímicos.

Etiqueta Original	Etiqueta Simplificada	Concentración de Elementos de tierras raras (REE) en rocas														Σ REE	Normalización a los valores del Condrito														Normalización a los valores del Promedio global de suelos																					
																	Taylor y McLennan (1985)														Kabata-Pendias (2010)																					
		La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu		La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	[LREE/HREE] <sub>N</sub>	MREE*	Eu*	Ce*	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	[LREE/HREE] <sub>N</sub>	MREE*	Eu*	Ce*
GR38B-18-423	R423	45.2	123	13.15	48.4	9.19	1.85	6.72	0.69	3.75	0.63	1.76	0.24	1.57	0.22	256.37	123.16	128.53	95.99	68.07	39.78	21.26	21.96	11.90	9.84	7.40	7.07	6.74	6.33	5.77	21.33	0.82	0.72	1.18	1.67	2.17	1.88	1.86	2.00	1.32	1.72	1.10	1.04	0.88	0.80	0.65	0.60	0.59	2.82	1.73	0.71	1.22
GR38B-18-424	R424	38.2	80.4	9.67	34.1	6.24	1.04	4.56	0.52	3.09	0.53	1.5	0.23	1.46	0.24	181.78	104.09	84.01	70.58	47.96	27.01	11.95	14.90	8.97	8.11	6.23	6.02	6.46	5.89	6.30	16.52	0.58	0.60	0.98	1.41	1.42	1.38	1.31	1.36	0.74	1.17	0.83	0.86	0.74	0.68	0.62	0.56	0.65	2.18	1.22	0.59	1.01
GR38B-18-425	R425	28.5	60.6	6.94	23.9	3.97	0.64	2.52	0.24	1.17	0.19	0.49	0.07	0.4	0.07	129.70	77.66	63.32	50.66	33.61	17.19	7.36	8.24	4.14	3.07	2.23	1.97	1.97	1.61	1.84	42.27	0.69	0.62	1.01	1.06	1.07	0.99	0.92	0.86	0.46	0.65	0.38	0.33	0.26	0.22	0.19	0.15	0.19	5.58	1.45	0.61	1.04
GR38B-18-426	R426	37.2	86.1	9.91	33.9	5.57	1.07	3.45	0.39	2.23	0.4	1.09	0.16	1.15	0.18	182.80	101.36	89.97	72.34	47.68	24.11	12.30	11.27	6.72	5.85	4.70	4.38	4.49	4.64	4.72	21.46	0.52	0.75	1.05	1.38	1.52	1.42	1.30	1.21	0.76	0.88	0.62	0.62	0.56	0.50	0.43	0.44	0.49	2.83	1.08	0.74	1.09
GR38B-18-427	R427	52.7	107	13.25	45.3	6.62	1.17	3.96	0.55	3.37	0.68	1.81	0.3	1.92	0.3	238.93	143.60	111.81	96.72	63.71	28.66	13.45	12.94	9.48	8.85	7.99	7.27	8.43	7.74	7.87	18.24	0.38	0.70	0.95	1.95	1.89	1.89	1.74	1.44	0.84	1.02	0.87	0.94	0.94	0.82	0.81	0.74	0.81	2.41	0.81	0.69	0.98
GR38B-18-428	R428	5.3	9.9	1.17	4.1	0.7	0.15	0.57	0.08	0.43	0.08	0.2	0.03	0.16	0.02	22.89	14.44	10.34	8.54	5.77	3.03	1.72	1.86	1.38	1.13	0.94	0.80	0.84	0.65	0.52	27.51	0.68	0.73	0.93	0.20	0.17	0.17	0.16	0.15	0.11	0.15	0.13	0.12	0.11	0.09	0.08	0.06	0.05	3.63	1.42	0.72	0.96
GR38B-18-429	R429	47.7	95	12	42.6	8.13	1.57	5.62	0.7	4.41	0.87	2.61	0.38	2.66	0.44	224.69	129.97	99.27	87.59	59.92	35.19	18.05	18.37	12.07	11.57	10.22	10.48	10.67	10.73	11.55	11.25	0.47	0.71	0.93	1.77	1.68	1.71	1.64	1.77	1.12	1.44	1.11	1.23	1.21	1.19	1.03	1.02	1.19	1.49	0.99	0.70	0.96
GR38B-18-430	R430	32.8	68	8.22	28.9	5.58	1.65	4.56	0.62	3.72	0.69	1.97	0.29	1.82	0.27	159.09	89.37	71.06	60.00	40.65	24.16	18.97	14.90	10.69	9.76	8.11	7.91	8.15	7.34	7.09	12.61	0.59	1.00	0.97	1.21	1.20	1.17	1.11	1.21	1.18	1.17	0.98	1.03	0.96	0.90	0.78	0.70	0.73	1.66	1.24	0.99	1.00
GR38B-18-431	R431	42.8	95.1	10.8	39.1	7.64	1.44	5.84	0.69	4.2	0.8	2.5	0.36	2.43	0.37	214.07	116.62	99.37	78.83	54.99	33.07	16.55	19.08	11.90	11.02	9.40	10.04	10.11	9.80	9.71	12.01	0.57	0.66	1.04	1.59	1.68	1.54	1.50	1.66	1.03	1.50	1.10	1.17	1.11	1.14	0.97	0.93	1.00	1.59	1.19	0.65	1.07
GR38B-18-432	R432	34.7	72.5	8.48	30.4	5.73	1.19	4.34	0.55	3.23	0.6	1.7	0.25	1.63	0.26	165.56	94.55	75.76	61.90	42.76	24.81	13.68	14.18	9.48	8.48	7.05	6.83	7.02	6.57	6.82	13.86	0.56	0.73	0.99	1.29	1.28	1.21	1.17	1.25	0.85	1.11	0.87	0.90	0.83	0.77	0.68	0.63	0.70	1.83	1.17	0.72	1.02
GR38B-18-433	R433	45.4	99.7	11.4	39.9	7.56	1.58	5.53	0.69	4.45	0.88	2.77	0.41	2.81	0.46	223.54	123.71	104.18	83.21	56.12	32.73	18.16	18.07	11.90	11.68	10.34	11.12	11.52	11.33	12.07	10.25	0.47	0.75	1.03	1.68	1.76	1.63	1.53	1.64	1.13	1.42	1.10	1.24	1.22	1.26	1.11	1.08	1.24	1.35	0.98	0.74	1.06
GR38B-18-434	R434	36.9	73.9	8.82	30.9	5.92	1.25	4.93	0.59	3.72	0.69	1.95	0.27	1.83	0.3	171.97	100.54	77.22	64.38	43.46	25.63	14.37	16.11	10.17	9.76	8.11	7.83	7.58	7.38	7.87	12.77	0.57	0.71	0.96	1.37	1.30	1.26	1.19	1.29	0.89	1.26	0.94	1.03	0.96	0.89	0.73	0.70	0.81	1.69	1.20	0.70	0.99
GR38B-18-435	R435	30.6	63.5	7.96	29.4	6.25	1.17	5.23	0.68	4.06	0.71	2	0.27	1.82	0.29	153.94	83.38	66.35	58.10	41.35	27.06	13.45	17.09	11.72	10.66	8.34	8.03	7.58	7.34	7.61	10.95	0.68	0.63	0.95	1.13	1.12	1.14	1.13	1.36	0.84	1.34	1.08	1.13	0.99	0.91	0.73	0.70	0.78	1.45	1.42	0.62	0.99
GR38B-18-436	R436	4.1	8.04	1.08	4.6	1.01	0.22	1.15	0.18	0.99	0.23	0.58	0.07	0.5	0.07	22.82	11.17	8.40	7.88	6.47	4.37	2.53	3.76	3.10	2.60	2.70	2.33	1.97	2.02	1.84	6.08	0.83	0.62	0.90	0.15	0.14	0.15	0.18	0.22	0.16	0.29	0.29	0.28	0.32	0.26	0.19	0.19	0.19	0.80	1.74	0.62	0.93
GR38B-18-437	R437	12.8	23.6	2.9	10.7	1.88	0.29	1.43	0.21	1.18	0.28	0.8	0.11	0.82	0.11	57.11	34.88	24.66	21.17	15.05	8.14	3.33	4.67	3.62	3.10	3.29	3.21	3.09	3.31	2.89	12.08	0.47	0.54	0.91	0.47	0.42	0.41	0.41	0.41	0.21	0.37	0.33	0.33	0.39	0.36	0.30	0.32	0.30	1.59	0.98	0.54	0.94
GR38B-18-438	R438	5.5	10.55	1.23	4.8	0.87	0.15	0.74	0.11	0.57	0.11	0.31	0.05	0.32	0.05	25.36	14.99	11.02	8.98	6.75	3.77	1.72	2.42	1.90	1.50	1.29	1.24	1.40	1.29	1.31	11.42	0.55	0.57	0.95	0.20	0.19	0.18	0.18	0.19	0.11	0.19	0.17	0.16	0.15	0.14	0.14	0.12	0.14	1.51	1.14	0.57	0.98
GR38B-18-439	R439	10.4	21.7	2.6	10.4	2.01	0.43	1.8	0.26	1.35	0.28	0.83	0.11	0.74	0.13	53.04	28.34	22.68	18.98	14.63	8.70	4.94	5.88	4.48	3.54	3.29	3.33	3.09	2.98	3.41	8.31	0.60	0.69	0.98	0.39	0.38	0.37	0.40	0.44	0.31	0.46	0.41	0.38	0.39	0.38	0.30	0.28	0.35	1.10	1.25	0.68	1.01
GR38B-18-440	R440	6.1	11.45	1.4	5.5	1.16	0.29	1.23	0.17	0.92	0.18	0.43	0.06	0.35	0.05	29.29	16.62	11.96	10.22	7.74	5.02	3.33	4.02	2.93	2.41	2.12	1.73	1.69	1.41	1.31	12.67	0.86	0.74	0.92	0.23	0.20	0.20	0.21	0.25	0.21	0.32	0.27	0.26	0.25	0.20	0.16	0.13	0.14	1.67	1.80	0.73	0.95
GR38B-18-443	R443	4.8	12	1.6	6.8	1.41	0.41	1.28	0.16	0.87	0.16	0.4	0.06	0.33	0.04	30.32	13.08	12.54	11.68	9.56	6.10	4.71	4.18	2.76	2.28	1.88	1.61	1.69	1.33	1.05	12.46	1.13	0.93	1.01	0.18	0.21	0.23	0.26	0.31	0.29	0.33	0.25	0.24	0.22	0.18	0.16	0.13	0.11	1.64	2.37	0.92	1.05
GR38B-18-444	R444	10.7	21.5	2.6	10.3	1.81	0.55	1.61	0.18	1	0.17	0.48	0.06	0.38	0.05	51.39	29.16	22.47	18.98	14.49	7.84	6.32	5.26	3.10	2.62	2.00	1.93	1.69	1.53	1.31	22.22	0.85	0.98	0.96	0.40	0.38	0.37	0.40	0.39	0.39	0.41	0.29	0.28	0.24	0.22	0.16	0.15	0.14	2.93	1.78	0.97	0.99
GR38B-18-445	R445	5.8	11.1	1.51	5.9	1	0.28	0.78	0.08	0.4	0.08	0.21	0.03	0.15	0.02	27.34	15.80	11.60	11.02	8.30	4.33	3.22	2.55	1.38	1.05	0.94	0.84	0.84	0.60	0.52	30.11	0.88	0.97	0.88	0.21	0.20	0.22	0.23	0.22	0.20	0.20	0.13	0.11	0.11	0.10	0.08	0.06	0.05	3.97	1.86	0.96	0.91
GR38B-18-446	R446	26.9	52.7	6.64	26	5.1	1.18	4.81	0.62	3.47	0.63	1.67	0.24	1.41	0.2	131.57	73.30	55.07	48.47	36.57	22.08	13.56	15.72	10.69	9.11	7.40	6.71	6.74	5.69	5.25	13.96	0.80	0.73	0.92	1.00	0.93	0.95	1.00	1.11	0.84	1.23	0.98	0.96	0.88	0.76	0.65	0.54	0.54	1.84	1.68	0.72	0.96
GR38B-18-447	R447	69.7	133.5	16.35	61.3	10.05	2.49	7.87	0.87	4.62	0.81	2.2	0.3	1.77	0.28	312.11	189.92	139.50	119.34	86.22	43.51	28.62	25.72	15.00	12.13	9.52	8.84	8.43	7.14	7.35	25.84	0.69	0.86	0.93	2.58	2.35	2.34	2.36	2.18	1.78	2.02	1.38	1.28	1.13	1.00	0.81	0.68	0.76	3.41	1.44	0.85	0.96
GR38B-18-448	R448	73.1	139.5	17.1	65.1	10.55	2.71	8.22	0.89	4.77	0.84	2.27	0.29	1.68	0.27	327.29	199.18	145.77	124.82	91.56	45.67	31.15	26.86	15.																												

Tabla C.5

Concentración de elementos de Tierras raras de muestras de suelos, normalizados a los valores del Promedio global de suelos y al Condrito y, los índices geoquímicos.

		Concentración de Elementos de tierras raras (REE) en suelos													Normalización a los valores del Promedio global de suelos													Normalización a los valores del Condrito																								
															Kabata-Pendias (2010)													Taylor y McLennan (1985)																								
															27 56.7 7 26 4.6 1.4 3.9 0.63 3.6 0.72 2.2 0.37 2.6 0.37													0.367 0.957 0.137 0.711 0.231 0.087 0.306 0.058 0.381 0.0851 0.249 0.0356 0.248 0.0381																								
Etiqueta Original	Etiqueta Simplificada	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Σ REE	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	[LREE/HREE] <sub>N</sub>	MREE* <sub>N</sub>	Eu* <sub>N</sub>	Ce* <sub>N</sub>	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	[LREE/HREE] <sub>N</sub>	MREE* <sub>N</sub>	Eu* <sub>N</sub>	Ce* <sub>N</sub>
GR38B-CA001-P	Sp01	36.5	74.8	7.8	27.1	5.07	1.53	4.48	0.59	3.37	0.6	1.77	0.25	1.68	0.25	165.79	1.35	1.32	1.11	1.04	1.10	1.09	1.15	0.94	0.94	0.83	0.80	0.68	0.65	0.68	2.00	1.20	0.97	1.07	99.46	78.16	56.93	38.12	21.95	17.59	14.64	10.17	8.85	7.05	7.11	7.02	6.77	6.56	15.16	0.57	0.98	1.04
GR38B-CA002-P	Sp02	38.1	75.8	8.42	29.9	5.89	1.49	4.93	0.67	3.94	0.7	1.97	0.29	1.86	0.29	174.25	1.41	1.34	1.20	1.15	1.28	1.06	1.26	1.06	1.09	0.97	0.90	0.78	0.72	0.78	1.80	1.20	0.84	1.03	103.81	79.21	61.46	42.05	25.50	17.13	16.11	11.55	10.34	8.23	7.91	8.15	7.50	7.61	13.64	0.57	0.84	0.99
GR38B-CA003-P	Sp03	44.6	108.5	10.95	39.7	8.46	1.94	6.97	0.89	4.86	0.83	2.49	0.34	2.19	0.35	233.07	1.65	1.91	1.56	1.53	1.84	1.39	1.79	1.41	1.35	1.15	1.13	0.92	0.84	0.95	1.75	1.43	0.76	1.19	121.53	113.38	79.93	55.84	36.62	22.30	22.78	15.34	12.76	9.75	10.00	9.55	8.83	9.19	13.23	0.68	0.77	1.15
GR38B-CA004-P	Sp04	40.6	85	9.01	32.2	6.27	1.36	4.73	0.64	3.52	0.62	1.84	0.26	1.76	0.27	188.08	1.50	1.50	1.29	1.24	1.36	0.97	1.21	1.02	0.98	0.86	0.84	0.70	0.68	0.73	2.06	1.16	0.76	1.08	110.63	88.82	65.77	45.29	27.14	15.63	15.46	11.03	9.24	7.29	7.39	7.30	7.10	7.09	15.61	0.55	0.76	1.04
GR38B-CA005-P	Sp05	49.1	101.5	10.8	39.5	7.57	2.02	7.05	0.89	5.08	0.94	2.67	0.37	2.38	0.38	230.25	1.82	1.79	1.54	1.52	1.65	1.44	1.81	1.41	1.41	1.31	1.21	1.00	0.92	1.03	1.77	1.32	0.84	1.07	133.79	106.06	78.83	55.56	32.77	23.22	23.04	15.34	13.33	11.05	10.72	10.39	9.60	9.97	13.41	0.63	0.84	1.03
GR38B-CA006-P	Sp06	48.2	104.5	11.4	41.8	8.19	1.91	6.28	0.86	4.9	0.87	2.51	0.35	2.19	0.34	234.30	1.79	1.84	1.63	1.61	1.78	1.36	1.61	1.37	1.36	1.21	1.14	0.95	0.84	0.92	1.94	1.26	0.81	1.08	131.34	109.20	83.21	58.79	35.45	21.95	20.52	14.83	12.86	10.22	10.08	9.83	8.83	8.92	14.72	0.60	0.81	1.04
GR38B-CA008-P	Sp08	20.1	43.7	4.66	16.2	3.06	0.78	2.41	0.3	1.56	0.27	0.73	0.1	0.63	0.09	94.59	0.74	0.77	0.67	0.62	0.67	0.56	0.62	0.48	0.43	0.38	0.33	0.27	0.24	0.24	3.06	1.45	0.87	1.09	54.77	45.66	34.01	22.78	13.25	8.97	7.88	5.17	4.09	3.17	2.93	2.81	2.54	2.36	23.19	0.69	0.88	1.06
GR38B-CA009-P	Sp09	36.8	66.7	8.38	29.6	6.16	1.52	5.26	0.79	4.52	0.79	2.15	0.3	1.82	0.28	165.07	1.36	1.18	1.20	1.14	1.34	1.09	1.35	1.25	1.26	1.10	0.98	0.81	0.70	0.76	1.80	1.33	0.81	0.92	100.27	69.70	61.17	41.63	26.67	17.47	17.19	13.62	11.86	9.28	8.63	8.43	7.34	7.35	13.64	0.63	0.82	0.89
GR38B-CA010-P	Sp10	4.1	8.04	0.99	3.5	0.71	0.18	0.64	0.09	0.51	0.09	0.27	0.04	0.26	0.04	19.46	0.15	0.14	0.14	0.13	0.15	0.13	0.16	0.14	0.14	0.13	0.12	0.11	0.10	0.11	1.40	1.28	0.81	0.97	11.17	8.40	7.23	4.92	3.07	2.07	2.09	1.55	1.34	1.06	1.08	1.12	1.05	1.05	10.64	0.61	0.82	0.94
GR38B-CA011-P	Sp11	30	55.4	7.28	28.5	5.12	1.42	4.96	0.68	3.77	0.7	1.93	0.26	1.64	0.26	141.92	1.11	0.98	1.04	1.10	1.11	1.01	1.27	1.08	1.05	0.97	0.88	0.70	0.63	0.70	1.58	1.44	0.85	0.91	81.74	57.89	53.14	40.08	22.16	16.32	16.21	11.72	9.90	8.23	7.75	7.30	6.61	6.82	11.98	0.69	0.86	0.88
GR38B-CA012-P	Sp12	33.8	67.3	7.91	28.4	4.72	1.17	4.35	0.55	3.12	0.55	1.48	0.19	1.25	0.18	154.97	1.25	1.19	1.13	1.09	1.03	0.84	1.12	0.87	0.87	0.76	0.67	0.51	0.48	0.49	2.57	1.43	0.78	1.00	92.10	70.32	57.74	39.94	20.43	13.45	14.22	9.48	8.19	6.46	5.94	5.34	5.04	4.72	19.49	0.68	0.79	0.96
GR38B-CA013-P	Sp13	25	49.3	5.57	19.8	3.27	0.94	3.29	0.43	2.42	0.47	1.33	0.18	1.2	0.18	113.38	0.93	0.87	0.80	0.76	0.71	0.67	0.84	0.68	0.67	0.65	0.60	0.49	0.46	0.49	1.90	1.26	0.87	1.01	68.12	51.52	40.66	27.85	14.16	10.80	10.75	7.41	6.35	5.52	5.34	5.06	4.84	4.72	14.42	0.60	0.88	0.98
GR38B-CA014-P	Sp14	22.4	39.2	5.22	18.7	3.25	1	3.7	0.55	3.22	0.59	1.73	0.24	1.51	0.23	101.54	0.83	0.69	0.75	0.72	0.71	0.71	0.95	0.87	0.89	0.82	0.79	0.65	0.58	0.62	1.33	1.32	0.87	0.88	61.04	40.96	38.10	26.30	14.07	11.49	12.09	9.48	8.45	6.93	6.95	6.74	6.09	6.04	10.11	0.63	0.88	0.85
GR38B-CA015-P	Sp15	39.8	73	8.49	29.6	4.74	1.36	4.55	0.6	3.44	0.63	1.8	0.25	1.49	0.25	170.00	1.47	1.29	1.21	1.14	1.03	0.97	1.17	0.95	0.96	0.88	0.82	0.68	0.57	0.68	2.18	1.17	0.89	0.96	108.45	76.28	61.97	41.63	20.52	15.63	14.87	10.34	9.03	7.40	7.23	7.02	6.01	6.56	16.53	0.56	0.89	0.93
GR38B-CA016-P	Sp16	44.2	83.9	9.41	33.9	5.44	1.48	4.76	0.61	3.5	0.63	1.74	0.23	1.53	0.24	191.57	1.64	1.48	1.34	1.30	1.18	1.06	1.22	0.97	0.97	0.88	0.79	0.62	0.59	0.65	2.52	1.18	0.88	1.00	120.44	87.67	68.69	47.68	23.55	17.01	15.56	10.52	9.19	7.40	6.99	6.46	6.17	6.30	19.12	0.56	0.89	0.96
GR38B-CA017-P	Sp17	32.2	63.7	7.18	26.3	4.36	1.24	4.25	0.55	3.12	0.56	1.53	0.21	1.32	0.21	146.73	1.19	1.12	1.03	1.01	0.95	0.89	1.09	0.87	0.87	0.78	0.70	0.57	0.51	0.57	2.10	1.32	0.87	1.02	87.74	66.56	52.41	36.99	18.87	14.25	13.89	9.48	8.19	6.58	6.14	5.90	5.32	5.51	15.92	0.63	0.88	0.98
GR38B-CA018-P	Sp18	23.3	45.8	5.32	19.2	3.11	0.83	3.34	0.42	2.48	0.46	1.34	0.18	1.13	0.18	107.09	0.86	0.81	0.76	0.74	0.68	0.59	0.86	0.67	0.69	0.64	0.61	0.49	0.43	0.49	1.77	1.32	0.78	1.00	63.49	47.86	38.83	27.00	13.46	9.54	10.92	7.24	6.51	5.41	5.38	5.06	4.56	4.72	13.44	0.63	0.79	0.96
GR38B-CA019-P	Sp19	38.9	72.5	8.31	29	4.64	1.35	4.68	0.59	3.35	0.62	1.79	0.24	1.54	0.24	167.75	1.44	1.28	1.19	1.12	1.01	0.96	1.20	0.94	0.93	0.86	0.81	0.65	0.59	0.65	2.22	1.24	0.88	0.98	105.99	75.76	60.66	40.79	20.09	15.52	15.29	10.17	8.79	7.29	7.19	6.74	6.21	6.30	16.83	0.59	0.89	0.94
GR38B-CA020-P	Sp20	46.2	91.5	10.1	35.8	5.48	1.55	4.9	0.62	3.59	0.64	1.75	0.23	1.48	0.23	204.07	1.71	1.61	1.44	1.38	1.19	1.11	1.26	0.98	1.00	0.89	0.80	0.62	0.57	0.62	2.75	1.22	0.90	1.03	125.89	95.61	73.72	50.35	23.72	17.82	16.01	10.69	9.42	7.52	7.03	6.46	5.97	6.04	20.85	0.58	0.91	0.99
GR38B-CA001-S	Ss01	36.8	74.1	8.01	28.3	5.25	1.31	4.31	0.57	3.2	0.58	1.65	0.24	1.49	0.24	166.05	1.36	1.31	1.14	1.09	1.14	0.94	1.11	0.90	0.89	0.81	0.75	0.65	0.57	0.65	2.10	1.18	0.83	1.05	100.27	77.43	58.47	39.80	22.73	15.06	14.08	9.83	8.40	6.82	6.63	6.74	6.01	6.30	15.92	0.56	0.84	1.01
GR38B-CA002-S	Ss02	23.9	50.5	5.38	19.1	3.59	0.9	2.97	0.4	2.39	0.41	1.18	0.17	1.1	0.17	112.16	0.89	0.89	0.77	0.73	0.78	0.64	0.76	0.63	0.66	0.57	0.54	0.46	0.42	0.46	1.93	1.19	0.83	1.08	65.12	52.77	39.27	26.86	15.54	10.34	9.71	6.90	6.27	4.82	4.74	4.78	4.44	4.46	14.60	0.57	0.84	1.04
GR38B-CA003-S	Ss03	39.9	88	9.9	35.5	6.66	1.17	4.72	0.56	2.9	0.5	1.37	0.19	1.35	0.21	192.93	1.48	1.55	1.41	1.37	1.45	0.84	1.21	0.89	0.81	0.69	0.62	0.51	0.52	0.57	2.60	1.32	0.63	1.07	108.72	91.95	72.26	49.93	28.83	13.45	15.42	9.66	7.61	5.88	5.50	5.34	5.44	5.51	19.72	0.63	0.64	1.04
GR38B-CA004-S	Ss04	36.9	78.5	8.87	31.2	6.17	1.23	4.41	0.58	3.12	0.58	1.71	0.25	1.61	0.27	175.40	1.37	1.38	1.27	1.20	1.34	0.88	1.13	0.92	0.87	0.81	0.78	0.68	0.62	0.73	1.87	1.13	0.71	1.05	100.54	82.03	64.74	43.88	26.71	14.14	14.41	10.00	8.19	6.82	6.87	7.02	6.49	7.09	14.19	0.54	0.72	1.02
GR38B-CA005-S	Ss05	41.9																																																		

Tabla C.6

Medidas estadísticas descriptivas de cada grupo en rocas, suelos profundos y suelos superficiales, de los elementos minerales esenciales.

Elementos Minerales Esenciales	Medidas estadísticas descriptivas	Rocas					Suelos Profundos					Suelos Superficiales										
		Ig-e/fe-land,lba	Ig-1/a-grt	Mt-1C/si,fe-czar,litar	Mt-1C/si-grv,lut	Sd-1C/si-czar, slta,sarc	Sd,Mt-1C/ca-lut,grv,litar	Sd-nC/qm-clz	Sp-Ig-e/efu-are,lim	Sp-Ig-e/exp-lb	Sp-Ig-1/a-reg	Sp-Sd-C/cal-lu,ar,reg	Sp-Sd-al/are,grv	Sp-Sd-al/l/lim,are	Sp-Sd-nC/qm-eva	Ss-Ig-e/efu-lim,are	Ss-Ig-1/a-are,lim	Ss-Sd-C/cal-lu,ar,reg	Ss-Sd-C/si-are,lim	Ss-Sd-al/l/are,grv	Ss-Sd-nC/qm-bio	Ss-Sd-nC/qm-eva
Potasio (K)	Media (K)	21,222.22	17,475.00	4,250.00	31,125.00	6,520.00	22,385.71	2,666.67	27,600.00	14,650.00	11,900.00	19,525.00	25,000.00	15,100.00	3,400.00	23,400.00	13,200.00	19,175.00	17,700.00	23,625.00	19,533.33	14,300.00
	Mediana (K)	20,000.00	17,200.00	4,100.00	31,200.00	5,500.00	24,100.00	2,700.00	27,600.00	14,650.00	11,900.00	17,300.00	24,650.00	15,100.00	3,400.00	23,400.00	13,200.00	17,400.00	17,700.00	23,550.00	18,100.00	14,300.00
	Desviación estandar (K)	3,681.98	2,684.99	4,080.44	6,264.92	3,219.01	5,363.90	152.75 NA	27,600.00	3,181.98 NA	3,181.98 NA	6,003.54	975.41	2,121.32 NA	NA	NA	NA	4,407.10	7,353.91	2,049.22	4,523.64 NA	NA
	Maximo (K)	26,800.00	20,700.00	8,600.00	38,400.00	11,100.00	27,700.00	2,800.00	27,600.00	16,900.00	11,900.00	28,200.00	26,400.00	16,600.00	3,400.00	23,400.00	13,200.00	25,600.00	22,900.00	26,300.00	24,600.00	14,300.00
	Minimo (K)	16,200.00	14,800.00	200.00	23,700.00	2,700.00	13,600.00	2,500.00	27,600.00	12,400.00	11,900.00	15,300.00	23,500.00	13,600.00	3,400.00	23,400.00	13,200.00	16,300.00	20,800.00	15,900.00	15,900.00	14,300.00
	Rango intercuartil (K)	5,700.00	3,575.00	6,150.00	6,975.00	3,100.00	6,350.00	150.00	0.00	2,250.00	0.00	5,625.00	1,300.00	1,500.00	0.00	0.00	0.00	3,975.00	5,200.00	3,350.00	4,350.00	0.00
Fósforo (P)	Media (P)	3,273.33	520.00	377.50	415.00	118.00	627.14	170.00	9,680.00	950.00	450.00	625.00	1,173.75	1,330.00	270.00	4,560.00	1,850.00	860.00	735.00	908.75	1,530.00	1,190.00
	Mediana (P)	3,120.00	515.00	270.00	420.00	110.00	530.00	130.00	9,680.00	950.00	450.00	570.00	1,210.00	1,330.00	270.00	4,560.00	1,850.00	840.00	735.00	840.00	1,400.00	1,190.00
	Desviación estandar (P)	293.00	104.24	271.46	136.99	73.62	182.00	153.95 NA	9,680.00	240.42 NA	240.42 NA	116.76	283.85	14.14 NA	NA	NA	NA	144.68	190.92	257.37	278.75 NA	NA
	Maximo (P)	3,800.00	640.00	780.00	570.00	240.00	900.00	340.00	9,680.00	1,120.00	450.00	800.00	1,540.00	1,340.00	270.00	4,560.00	1,850.00	1,030.00	870.00	1,270.00	1,850.00	1,190.00
	Minimo (P)	2,890.00	410.00	190.00	250.00	60.00	470.00	40.00	9,680.00	780.00	450.00	560.00	670.00	1,320.00	270.00	4,560.00	1,850.00	730.00	600.00	640.00	1,340.00	1,190.00
	Rango intercuartil (P)	410.00	140.00	177.50	155.00	60.00	205.00	150.00	0.00	170.00	0.00	60.00	330.00	10.00	0.00	0.00	0.00	210.00	135.00	485.00	255.00	0.00
Calcio (Ca)	Media (Ca)	61,211.11	7,725.00	1,150.00	1,175.00	440.00	47,785.71	340,000.00	36,600.00	109,350.00	6,800.00	34,275.00	21,987.50	21,700.00	255,000.00	25,100.00	7,800.00	21,575.00	5,000.00	15,275.00	60,800.00	134,500.00
	Mediana (Ca)	59,100.00	5,350.00	900.00	1,000.00	500.00	32,500.00	330,000.00	36,600.00	109,350.00	6,800.00	15,400.00	23,650.00	21,700.00	255,000.00	25,100.00	7,800.00	20,100.00	5,000.00	15,950.00	75,300.00	134,500.00
	Desviación estandar (Ca)	17,845.62	6,859.24	806.23	518.81	151.66	36,413.16	28,354.89 NA	36,600.00	29,910.62 NA	29,910.62 NA	46,068.74	7,555.78	4,384.06 NA	NA	NA	NA	12,508.23	1,131.37	4,221.29	29,460.31 NA	NA
	Maximo (Ca)	101,000.00	17,800.00	2,300.00	1,900.00	600.00	129,000.00	372,000.00	36,600.00	130,500.00	6,800.00	102,000.00	31,900.00	24,800.00	255,000.00	25,100.00	7,800.00	38,200.00	5,800.00	21,100.00	80,200.00	134,500.00
	Minimo (Ca)	44,500.00	2,400.00	500.00	800.00	200.00	28,400.00	318,000.00	36,600.00	88,200.00	6,800.00	4,300.00	9,000.00	18,600.00	255,000.00	25,100.00	7,800.00	7,900.00	4,200.00	7,200.00	26,900.00	134,500.00
	Rango intercuartil (Ca)	14,400.00	3,925.00	750.00	575.00	100.00	11,200.00	27,000.00	0.00	21,150.00	0.00	38,225.00	5,025.00	3,100.00	0.00	0.00	0.00	8,925.00	800.00	3,700.00	26,650.00	0.00
Magnesio (Mg)	Media (Mg)	29,166.67	1,250.00	3,725.00	6,125.00	520.00	11,357.14	4,066.67	9,300.00	26,350.00	4,300.00	6,375.00	8,537.50	8,400.00	2,100.00	8,600.00	4,700.00	7,100.00	3,250.00	6,225.00	8,166.67	6,200.00
	Mediana (Mg)	26,200.00	1,400.00	3,450.00	5,250.00	400.00	9,800.00	2,100.00	9,300.00	26,350.00	4,300.00	6,350.00	8,150.00	8,400.00	2,100.00	8,600.00	4,700.00	6,950.00	3,250.00	5,300.00	8,300.00	6,200.00
	Desviación estandar (Mg)	7,275.47	450.92	1,670.08	3,254.10	277.49	7,228.61	3,669.24 NA	9,300.00	25,809.40 NA	25,809.40 NA	2,131.31	1,950.78	424.26 NA	NA	NA	NA	1,278.02	1,484.92	2,065.88	1,106.04 NA	NA
	Maximo (Mg)	42,000.00	1,600.00	5,900.00	10,500.00	900.00	24,300.00	8,300.00	9,300.00	44,600.00	4,300.00	8,900.00	11,100.00	8,700.00	2,100.00	8,600.00	4,700.00	8,700.00	4,300.00	9,800.00	9,200.00	6,200.00
	Minimo (Mg)	21,400.00	600.00	2,100.00	3,500.00	200.00	4,100.00	1,800.00	9,300.00	8,100.00	4,300.00	3,900.00	5,200.00	8,100.00	2,100.00	8,600.00	4,700.00	5,800.00	2,200.00	4,500.00	7,000.00	6,200.00
	Rango intercuartil (Mg)	11,600.00	400.00	1,925.00	3,925.00	300.00	9,150.00	3,250.00	0.00	18,250.00	0.00	2,375.00	2,025.00	300.00	0.00	0.00	0.00	1,550.00	1,050.00	1,575.00	1,100.00	0.00
Azufre (S)	Media (S)	199.44	73.75	82.50	3,250.00	119.00	161.43	166.67	500.00	700.00	300.00	250.00	412.50	300.00	5,900.00	500.00	500.00	425.00	300.00	550.00	2,666.67	4,600.00
	Mediana (S)	100.00	65.00	82.50	300.00	65.00	100.00	200.00	500.00	700.00	300.00	250.00	350.00	300.00	5,900.00	500.00	500.00	400.00	300.00	600.00	3,600.00	4,600.00
	Desviación estandar (S)	163.81	17.50	20.21	6,034.62	102.31	119.75	57.74 NA	500.00	424.26 NA	424.26 NA	129.10	155.26	0.00 NA	NA	NA	NA	50.00	0.00	119.52	1,703.92 NA	NA
	Maximo (S)	500.00	100.00	100.00	12,300.00	300.00	400.00	200.00	500.00	1,000.00	300.00	400.00	700.00	300.00	5,900.00	500.00	500.00	500.00	300.00	700.00	3,700.00	4,600.00
	Minimo (S)	65.00	65.00	65.00	100.00	65.00	65.00	100.00	500.00	400.00	300.00	100.00	300.00	300.00	5,900.00	500.00	500.00	400.00	300.00	300.00	700.00	4,600.00
	Rango intercuartil (S)	235.00	8.75	35.00	3,200.00	35.00	117.50	50.00	0.00	300.00	0.00	150.00	150.00	0.00	0.00	0.00	0.00	25.00	0.00	100.00	1,500.00	0.00
Manganeso (Mn)	Media (Mn)	921.33	161.50	283.75	135.00	83.40	1,245.57	400.67	960.00	457.50	79.00	510.50	607.00	835.00	112.00	983.00	1,060.00	588.50	341.50	1,019.38	876.67	399.00
	Mediana (Mn)	959.00	162.00	283.00	120.50	48.00	1,120.00	434.00	960.00	457.50	79.00	498.50	547.00	835.00	112.00	983.00	1,060.00	557.50	341.50	817.00	912.00	399.00
	Desviación estandar (Mn)	159.98	112.38	147.52	102.27	54.58	872.59	147.85 NA	960.00	311.83 NA	311.83 NA	141.45	160.36	127.28 NA	NA	NA	NA	133.44	159.10	794.75	342.37 NA	NA
	Maximo (Mn)	1,160.00	293.00	465.00	253.00	145.00	2,760.00	529.00	960.00	678.00	79.00	676.00	824.00	925.00	112.00	983.00	1,060.00	764.00	454.00	2,890.00	1,200.00	399.00
	Minimo (Mn)	655.00	29.00	104.00	46.00	37.00	369.00	239.00	960.00	237.00	79.00	369.00	432.00	745.00	112.00	983.00	1,060.00	475.00	229.00	428.00	518.00	399.00
	Rango intercuartil (Mn)	188.00	124.50	102.25	153.00	95.00	1,185.00	145.00	0.00	220.50	0.00	194.50	267.00	90.00	0.00	0.00	0.00	166.00	112.50	418.25	341.00	0.00
Hierro (Fe)	Media (Fe)	65,677.78	11,750.00	37,575.00	33,875.00	8,060.00	30,271.43	3,400.00	35,200.00	22,900.00	12,500.00	36,300.00	40,212.50	55,700.00	6,000.00	38,900.00	40,700.00	36,375.00	26,000.00	37,300.00	29,833.33	18,500.00
	Mediana (Fe)	69,600.00	10,500.00	37,500.00	34,400.00	9,600.00	28,100.00	4,000.00	35,200.00	22,900.00	12,500.00	38,450.00	37,800.00	55,700.00	6,000.00	38,900.00	40,700.00	36,550.00	26,000.00	39,150.00	29,400.00	18,500.00
	Desviación estandar (Fe)	6,357.83	4,455.33	8,578.02	10,391.14	2,808.56	6,378.01	1,126.94 NA	35,200.00	1,838.48 NA	1,838.48 NA	9,688.14	6,371.24	5,374.01 NA	NA	NA	NA	3,583.64	4,242.64	4,689.20	2,182.51 NA	NA
	Maximo (Fe)	72,000.00	18,100.00	48,000.00	43,300.00	11,000.00	39,700.00	4,100.00	35,200.00	24,200.00	12,500.00	45,500.00	49,600.00	59,500.00	6,000.00	38,900.00	40,700.00	40,400.00	29,000.00			