



Universidad Nacional Mayor de San Marcos

Universidad del Perú. Decana de América

Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica

Escuela Profesional de Ingeniería Geológica

**Análisis exploratorio de datos con métodos multivariantes entre
los paralelos 9° - 10° latitud sur de la vertiente atlántica
aplicado a la exploración de yacimientos minerales**

TESIS

Para optar el Título Profesional de Ingeniera Geóloga

AUTOR

Elynor Estefany SANTOS VARGAS

ASESOR

Mg. Felix Abraham CORNELIO ORBEGOSO

Lima, Perú

2025



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

Referencia bibliográfica

Santos, E. (2025). *Análisis exploratorio de datos con métodos multivariantes entre los paralelos 9° - 10° latitud sur de la vertiente atlántica aplicado a la exploración de yacimientos minerales*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, Escuela Profesional de Ingeniería Geológica]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM.

Metadatos complementarios

Datos de autor	
Nombres y apellidos	Elynor Estefany Santos Vargas
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	76399719
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0003-1925-496X
Datos de asesor	
Nombres y apellidos	Mg. Felix Abraham Cornelio Orbegoso
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	42652078
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0001-5532-6209
Datos del jurado	
Presidente del jurado	
Nombres y apellidos	Mg. Victor Manuel Uribe Cordova
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	40534269
Miembro del jurado 1	
Nombres y apellidos	MSc. José Andres Yparraguirre Calderón
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	10293400
Miembro del jurado 2	
Nombres y apellidos	Dr. Aldo Alfonso Alván De la Cruz

Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	41133899
Datos de investigación	
Línea de investigación	C.0.1.11. Recursos Mineros
Grupo de investigación	No aplica.
Agencia de financiamiento	Sin financiamiento.
Ubicación geográfica de la investigación	País: Perú Departamento: Áncash-Huánuco-Lima-Pasco Provincia: Huari-Asunción-Bolognesi Distrito: San Marcos-La Unión Latitud: -9.0 / -10.40 Longitud: -76.5 / 77.6
Año o rango de años en que se realizó la investigación	2023-2025
URL de disciplinas OCDE	Geología https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#1.05.06 Geoquímica, Geofísica https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#1.05.04 Geociencias, Multidisciplinar https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#1.05.01



Universidad Nacional Mayor de San Marcos
Universidad del Perú. Decana de América
FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA, METALÚRGICA Y GEOGRÁFICA
Escuela Profesional de Ingeniería Geológica

**ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO
PROFESIONAL DE INGENIERA GEÓLOGA**

En el salón de Grados y Títulos de la Escuela Profesional de Ingeniería Geológica de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, el viernes 19 de diciembre del año de 2025 siendo las 6:00 pm, en presencia de los señores docentes designados como miembros de Jurado Calificador:

Mg. Víctor Manuel Uribe Cordova
MSc José Andres Yparraguirre Calderón
Dr. Aldo Alfonso Alván De la Cruz

(presidente de Jurado)
(Miembro de Jurado)
(Miembro de Jurado)

Reunidos para el acto académico público de colación de la Tesis de la Bach. **ELYNOR ESTEFANY SANTOS VARGAS** quien sustentará la Tesis titulada: «**ANÁLISIS EXPLORATORIO DE DATOS CON MÉTODOS MULTIVARIABLES ENTRE LOS PARALELOS 9° - 10° LATITUD SUR DE LA VERTIENTE ATLÁNTICA APLICADO A LA EXPLORACIÓN DE YACIMIENTOS MINERALES**»; su asesor el docente **CORNELIO ORBEGOSO FELIX ABRAHAM**, para la obtención del Título Profesional de Ingeniera Geóloga.

Los miembros del Jurado, escuchada la sustentación respectiva, plantearon al graduando las observaciones pertinentes, que fueron absueltas:

A SATISFACCIÓN DEL JURADO

El Jurado procedió a la calificación, cuyo resultado fue:

QUINCE (15)

Habiendo sido aprobada la sustentación de Tesis por el Jurado Calificador, el presidente recomienda que la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, proponga se le otorgue el **TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERA GEÓLOGA** a la Bach. **ELYNOR ESTEFANY SANTOS VARGAS**

Siendo las 19:40 horas se dio por concluido el acto académico, expidiéndose dos (02) actas originales de la Sustentación de la Tesis.

Lima, 19 de diciembre de 2025


MG. VÍCTOR MANUEL URIBE CORDOVA
PRESIDENTE DE JURADO


MSC JOSÉ ANDRÉS YPARRAGUIRRE CALDERÓN
MIEMBRO DE JURADO


DR. ALDO ALFONSO ALVÁN DE LA CRUZ
MIEMBRO DE JURADO


MG. FELIX ABRAHAM CORNELIO ORBEGOSO
MIEMBRO ASESOR



Anexo 1

CERTIFICADO DE SIMILITUD

Yo, **FELIX ABRAHAM CORNELIO ORBEGOSO** en mi condición de asesor acreditado con el Dictamen de la EP N° 000846-2025-D-FIGMMG de la tesis cuyo título es **“ANÁLISIS EXPLORATORIO DE DATOS CON MÉTODOS MULTIVARIABLES ENTRE LOS PARALELOS 9° - 10° LATITUD SUR DE LA VERTIENTE ATLÁNTICA APLICADO A LA EXPLORACIÓN DE YACIMIENTOS MINERALES”**, presentada por la bachiller **ELYNOR ESTEFANY SANTOS VARGAS** para optar el título profesional en INGENIERA GEÓLOGA.

CERTIFICO que se ha cumplido con lo establecido en la Directiva de Originalidad y de Similitud de Trabajos Académicos, de Investigación y Producción Intelectual. Según la revisión, análisis y evaluación mediante la plataforma PIDS, el documento evaluado cuenta con el **11 %** de similitud, nivel PERMITIDO para continuar con los trámites correspondientes y para su **publicación en el repositorio institucional**.

Se emite el presente certificado en cumplimiento de lo establecido en las normas vigentes, como uno de los requisitos para la obtención del título profesional en INGENIERA GEÓLOGA.

Lima, 02 de diciembre del 2025

Firma del Asesor
Nombres y Apellidos del asesor: Felix Abraham Cornelio Orbegoso
DNI: 42652078

* Según corresponda: bachiller, magíster, doctor; título profesional o título de segunda especialidad

La vigencia del presente certificado corresponde a un período de noventa (90) días desde la fecha de su emisión; siempre que no haya observaciones en el texto durante el proceso de revisión por el jurado informante o surja alguna contingencia.

DEDICATORIA

A Dios, mi guía y fortaleza, quien ha sido mi luz en momentos de oscuridad y mi refugio en tiempos de dificultad. A tí, Señor, dedico este trabajo con un corazón lleno de gratitud y reverencia, porque todo lo que soy y lo que he logrado es por tu gracia y misericordia. Gracias por darme la sabiduría, la perseverancia y el entendimiento necesarios para llevar a cabo este esfuerzo.

A César Noé Santos Palacios, mi padre, cuyo ejemplo ha sido una fuente constante de inspiración en cada paso de mi vida.

A Ana Isabel Valentín Santos, por su amor incondicional, aliento constante y apoyo inquebrantable, a lo largo de mi vida.

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento a mi asesor de tesis, el Ing. Félix Cornelio Orbegoso, por su incondicional apoyo, dedicación y constante motivación a lo largo de este proceso. Su orientación ha sido fundamental para el desarrollo de esta tesis.

También deseo agradecer al Ing. Humberto Cruz, por su invaluable apoyo, sabios consejos y aliento durante la realización de este trabajo.

Finalmente, quiero expresar mi más profunda gratitud a mi familia, cuyo amor incondicional ha sido el pilar fundamental sobre el cual he construido cada uno de mis logros. A mis padres, César y Eva, a mi hermano Junior, a mis tías Lidia y Raquel, y a mis primos Josué y Ana, les agradezco de corazón por estar siempre a mi lado. Sin su constante apoyo, este logro no habría sido posible.

RESUMEN

Esta tesis de pregrado se desarrolló en el marco de las actividades del Proyecto de investigación geológica “Prospección geoquímica regional entre los paralelos 9°00’–10°00’ de latitud sur (vertiente atlántica)”, ejecutado por el INGEMMET a través de la Dirección de Recursos Minerales (DRME) entre los años 2006 y 2008. Durante la campaña de prospección se recolectaron 518 muestras de sedimentos de quebrada, con una densidad de muestreo de 1/10 km², en la parte central del Perú, entre los departamentos de Áncash y Huánuco, con extensiones menores hacia Pasco y Lima. Cartográficamente, el área corresponde a los cuadrángulos de Yanahuanca (21j), Recuay (20i), La Unión (20j), Huari (19i) y Singa (19j), delimitándose entre las coordenadas WGS84 220000–340000E y 8840000–9000000N. Las muestras fueron posteriormente tamizadas con malla 200 y sometidas a análisis geoquímicos multielementales mediante ICP-MS (digestión con agua regia) para 52 elementos, así como a ensayo al fuego con espectrometría absorción atómica para oro (Au).

El presente trabajo aplica métodos estadísticos multivariados, entre ellos Análisis de Componentes Principales (ACP), Análisis Discriminante, k-means clustering, Autodominios y Mapas Autoorganizados (SOM), con el propósito de identificar patrones geoquímicos y delimitar nuevas zonas con potencial mineral. La investigación se desarrolla dentro de un contexto metalogenético donde ya se emplazan importantes depósitos tipo pórfido–skarn–polimetálicos, tales como Antamina, Contonga, Pachapaqui, Huanzala, Antamayo y Jacabamba. Los resultados obtenidos evidencian anomalías geoquímicas de interés que podrían constituir nuevos prospectos, al tiempo que demuestran la eficacia y complementariedad de los métodos estadísticos multivariados en la exploración geoquímica regional.

ABSTRACT

This undergraduate thesis was developed within the framework of the geological research project “Regional Geochemical Prospecting between 9°00’–10°00’ South Latitude (Atlantic Watershed)”, carried out by INGEMMET through the Directorate of Mineral Resources (DRME) between 2006 and 2008. During the prospecting campaign, 518 stream sediment samples were collected at a sampling density of one sample per 10 km² in central Peru, covering the departments of Áncash and Huánuco, with minor extensions into Pasco and Lima. Cartographically, the study area corresponds to the Yanahuanca (21j), Recuay (20i), La Unión (20j), Huari (19i), and Singa (19j) quadrangles, bounded by WGS84 coordinates 220000–340000E and 8840000–9000000N. The samples were subsequently sieved to -200 mesh and subjected to multielement geochemical analyses by ICP-MS (aqua regia digestion) for 52 elements, as well as fire assay with atomic absorption spectrometry (AAS) for gold (Au).

This research applies multivariate statistical methods, including Principal Component Analysis (PCA), Discriminant Analysis, k-means clustering, Eigenvalue analysis, and Self-Organizing Maps (SOM), with the aim of identifying geochemical patterns and delineating new zones with mineral potential. The study is set within a metallogenetic context already hosting significant porphyry–skarn–polymetallic deposits, such as Antamina, Contonga, Pachapqui, Huanzalá, Antamayo, and Jacabamba. The results highlight geochemical anomalies of exploration interest that could represent new prospects, while also demonstrating the effectiveness and complementarity of multivariate statistical methods in regional geochemical exploration.

CONTENIDO

CAPÍTULO 1 . INTRODUCCIÓN	18
1.1. Planteamiento del problema.....	18
1.2. Objetivos de la investigación	19
1.2.1 Objetivo General.....	19
1.2.2 Objetivos específicos	20
1.3. Importancia de la investigación.....	20
1.4. Alcances de la investigación	21
1.5. Limitaciones de la investigación	21
CAPÍTULO 2 . MARCO TEÓRICO.....	23
2.1. Antecedentes de la Investigación	23
2.1.1 Antecedente Primario	23
2.1.2 Antecedentes referenciales	24
2.2. Exploración de yacimientos minerales.....	27
2.2.1 Depósitos tipo pórfido	27
2.3. Parámetros geoquímicos	39
2.3.1 Background.....	39
2.3.2 Threshold	40
2.3.3 Anomalías geoquímicas.....	40
2.4. Métodos estadísticos aplicados a la geología.....	42
2.4.1 Control de Calidad Analítico -QA/QC	42
2.4.2 Preprocesamiento de Datos	45
2.4.3 Análisis exploratorio de datos	46

2.4.4 Análisis de Dependencia y Relaciones Lineales	51
2.4.5 Técnicas de Agrupamiento y Reducción No Supervisada.....	52
2.4.6 Métodos de Clasificación Supervisada.....	54
CAPÍTULO 3 . HIPÓTESIS Y VARIABLES	56
3.1. Hipótesis de la investigación.....	56
3.1.1 Hipótesis general	56
3.1.2 Hipótesis específicas.....	56
3.2. Variables.....	57
3.2.1 Variable independiente	57
3.2.2 Variable dependiente	57
3.3. Operacionalización de variables.....	57
3.3.1 Para la variable independiente	57
3.3.2 Para la variable dependiente	57
CAPÍTULO 4 . GENERALIDADES DEL ÁREA DE ESTUDIO	58
4.1. Área de estudio.....	58
4.1.1 Jacabamba.....	60
4.1.2 Contonga.....	61
4.1.3 Antamina	62
4.1.4 Huanzalá	63
4.1.5 Pachapaqui.....	65
4.1.6 Antamayo.....	66
4.2. Metalogenia.....	67
4.2.1 Franja de epitermales de Au-Ag del Eoceno y depósitos polimetálicos del Eoceno- Oligoceno-Mioceno (XVII)	67

4.2.2 Franja de pórfidos de Cu-Mo (Au), skarns de Pb-Zn-Cu (Ag) y depósitos polimetálicos relacionados con intrusiones del Mioceno (XX)	68
4.2.3 Franja de depósitos de W-Mo-Cu relacionados con intrusivos del Mioceno superior (XXII)	69
4.3. Geología regional	69
4.3.1 Complejo Metamórfico del Marañón	70
4.3.2 Grupo Chicama.....	71
4.3.3 Formación Oyón	71
4.3.4 Grupo Goyllarisquizga	72
4.3.5 Formación Chimú	72
4.3.6 Formación Santa	73
4.3.7 Formación Carhuaz.....	73
4.3.8 Formación Pariahuanca (o Formación Inca)	73
4.3.9 Formación Chúlec.....	74
4.3.10 Formación Pariatambo.....	74
4.3.11 Formación Jumasha	74
4.3.12 Formación Celendín	76
4.3.13 Formación La Unión.....	76
4.3.14 Depósitos Morrénicos.....	76
4.3.15 Depósitos glaciofluviales.....	77
4.3.16 Depósitos aluviales	77
4.4. Rocas Ígneas.....	77
4.4.1 Batolito de la Cordillera Blanca	77
4.4.2 Stocks de alto nivel.....	79
4.5. Geología Estructural.....	82

CAPÍTULO 5 . METODOLOGÍA	84
5.1. Diseño de investigación	84
5.2. Población y muestra	84
5.2.1 Población	84
5.2.2 Muestra	84
5.3. Procedimiento, técnicas e instrumentos de recolección de información.....	85
5.4. Control de calidad de las muestras	86
5.4.1 Precisión	87
5.4.2 Exactitud	87
5.4.3 Contaminación.....	88
5.5. Análisis estadístico	88
5.5.1 Valores Censurados e Imputación de Valores	88
5.5.2 Evaluación de datos	89
5.5.3 Normalización	100
5.5.4 Selección de variables	100
5.5.5 Eliminación de outliers	101
5.5.6 Parámetros Geoquímicos	102
5.5.7 Análisis de Correlación de Pearson	103
5.5.8 Análisis de componentes principales.....	103
5.5.9 Kmeans-clustering	104
5.5.10 Autodominios	105
5.5.11 Discriminantes	105
5.5.12 Redes Neuronales SOM.....	106
CAPÍTULO 6 . ANÁLISIS DE RESULTADOS	107

6.1. Estadística Univariante.....	107
6.1.1 Distribución As (Anexo D).....	107
6.1.2 Distribución Ag (Anexo B)	108
6.1.3 Distribución Au (Anexo C)	108
6.1.4 Distribución Bi (Anexo E).....	108
6.1.5 Distribución Cd (Anexo F)	109
6.1.6 Distribución Cu (Anexo G)	109
6.1.7 Distribución Ga (Anexo H)	110
6.1.8 Distribución In (Anexo I)	110
6.1.9 Distribución Mn (Anexo K)	111
6.1.10 Distribución Li (Anexo J).....	111
6.1.11 Distribución Mo (Anexo L)	111
6.1.12 Distribución Pb (Anexo M)	112
6.1.13 Distribución Sb (Anexo N).....	112
6.1.14 Distribución Sc (Anexo O)	113
6.1.15 Distribución Tl (Anexo P)	113
6.1.16 Distribución W (Anexo Q)	114
6.1.17 Distribución Zn (Anexo R).....	114
6.2. Estadística Multivariante.....	115
6.2.1 Chicama-Oyón.....	115
6.2.2 Goyllarisquizga.....	128
6.2.3 Jumasha	141
6.2.4 Total (Grupo Chicama, Grupo Goyllarisquizga y de las Formaciones Jumasha, Pariatambo, Pariahuanca, Chúlec, Crisnejas, Chambará, Chota, Casapalca, Mitu y Calipuy).....	154

CAPÍTULO 7 . DISCUSIÓN DE RESULTADOS	167
CAPÍTULO 8 CONCLUSIONES	173
CAPÍTULO 9 . RECOMENDACIONES	175
CAPÍTULO 10 . REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	176
CAPÍTULO 11 . ANEXOS.....	180

INDICE DE TABLAS

Tabla 2-1. Estadísticos descriptivos de las areniscas del Grupo Chicama y la Formación Oyón	48
Tabla 5-1. Estadísticos descriptivos de las areniscas del Grupo Chicama y la Formación Oyón.	90
Tabla 5-2. Estadísticos descriptivos de las areniscas del Grupo Goyllarisquizga.	90
Tabla 5-3. Estadísticos descriptivos de las calizas de la Formación Jumasha.	91
Tabla 5-4. Estadísticos descriptivos del Grupo Chicama, Grupo Goyllarisquizga y de las Formaciones Jumasha, Pariatambo, Pariahuanca, Chúlec, Crisnejas, Chambará, Chota, Casapalca, Mitu y Calipuy	91
Tabla 6-1 Análisis de Correlación de Pearson de las areniscas del Grupo Chicama y la Formación Oyón.	117
Tabla 6-2. Representatividad de cada Componente Principal de las areniscas del Grupo Chicama y la Formación Oyón	117
Tabla 6-3 Valores Eigenectores de las areniscas del Grupo Chicama y la Formación Oyón ..	118
Tabla 6-4. Discriminantes de las areniscas del Grupo Chicama y la Formación Oyón	121
Tabla 6-5. Relación de clústeres y componentes principales para Discriminantes de las areniscas del Grupo Chicama y la Formación Oyón	121
Tabla 6-6. Eigenectores Discriminantes de las areniscas del Grupo Chicama y la Formación Oyón	121
Tabla 6-7 Análisis de Correlación de Pearson de las areniscas del Grupo Goyllarisquizga ...	130
Tabla 6-8. Número de Componentes Principales usados.	130
Tabla 6-9. Eigenectores de las areniscas del Grupo Goyllarisquizga.	131
Tabla 6-10. Número de discriminantes de las areniscas del Grupo Goyllarisquizga.	134
Tabla 6-11. Relación entre clústeres y componentes principales para Discriminantes	134
Tabla 6-12. Eigenectores de las areniscas del Grupo Goyllarisquizga.	134
Tabla 6-13. Análisis de Correlación de Pearson de las calizas de la Formación Jumasha.....	143
Tabla 6-14. Número de Componentes Principales de las calizas de la Formación Jumasha ..	143
Tabla 6-15. Eigenectores de las calizas de la Formación Jumasha	144
Tabla 6-16. Discriminantes-Jumasha.	147
Tabla 6-17. Relación de clústeres y componentes principales para Discriminantes.	147
Tabla 6-18. Relación clústeres y componentes principales - Jumasha.	147
Tabla 6-19. Análisis de correlación de Pearson del Grupo Chicama, Grupo Goyllarisquizga y de las Formaciones Jumasha, Pariatambo, Pariahuanca, Chúlec, Crisnejas, Chambará, Chota, Casapalca, Mitu y Calipuy	156

Tabla 6-20. Número de componentes principales del Grupo Chicama, Grupo Goyllarisquizga y de las Formaciones Jumasha, Pariatambo, Pariahuanca, Chúlec, Crisnejas, Chambará, Chota, Casapalca, Mitu y Calipuy	156
Tabla 6-21. Eigenvectors de los componentes principales	157
Tabla 6-22. Número de discriminantes del Grupo Chicama, Grupo Goyllarisquizga y de las Formaciones Jumasha, Pariatambo, Pariahuanca, Chúlec, Crisnejas, Chambará, Chota, Casapalca, Mitu y Calipuy	160
Tabla 6-23. Relación entre clústeres y componentes principales del Grupo Chicama, Grupo Goyllarisquizga y de las Formaciones Jumasha, Pariatambo, Pariahuanca, Chúlec, Crisnejas, Chambará, Chota, Casapalca, Mitu y Calipuy.....	160
Tabla 6-24. Eigenvectors del Grupo Chicama, Grupo Goyllarisquizga y de las Formaciones Jumasha, Pariatambo, Pariahuanca, Chúlec, Crisnejas, Chambará, Chota, Casapalca, Mitu y Calipuy.....	160
Tabla 7-1. Ponderación de variables para selección de targets	171

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1. Ubicaciones a nivel mundial de sistemas pórfidos de cobre. Tomado de Porphyry Cooper System (p.4).....	29
Figura 2-2. Modelo del sistema pórfido de cobre y yacimientos asociados.	32
Figura 2-3. Zonificación típica de alteración-mineralización en un pórfido de cobre no telescópado. Tomado de Porphyry Cooper System (p.10), por Sillitoe, (2010).	39
Figura 2-4. Parámetros Geoquímicos.....	42
Figura 2-5. Representación de precisión y exactitud.....	44
Figura 2-6. Histograma del cobre en las areniscas del Grupo Chicama y la Formación Oyón.	49
Figura 2-7. Box plot del cobre en las areniscas del Grupo Chicama y la Formación Oyón	50
Figura 4-1. Ubicación zona de estudio	59
Figura 4-2. Mapa Geológico Regional. Tomado del GEOCATMIN-INGEMMET	80
Figura 4-3. Columna estratigráfica generalizada. Modificado de Vásquez et al. (2009).	81
Figura 5-1. Histogramas de las areniscas del Grupo Chicama y la Formación Oyón	92
Figura 5-2. BoxPlots de las areniscas del Grupo Chicama y la Formación Oyón	93
Figura 5-3. Histogramas de las areniscas del Grupo Goyllarisquizga	94
Figura 5-4. BoxPlots de las areniscas del Grupo Goyllarisquizga	95
Figura 5-5. Histogramas de las calizas de la Formación Jumasha	96
Figura 5-6. BoxPlots de las calizas de la Formación Jumasha	97

Figura 5-7. Histogramas del Grupo Chicama, Grupo Goyllarisquizga y de las Formaciones Jumasha, Pariatambo, Pariahuanca, Chúlec, Crisnejas, Chambará, Chota, Casapalca, Mitu y Calipuy	98
Figura 5-8. BoxPlots del Grupo Chicama, Grupo Goyllarisquizga y de las Formaciones Jumasha, Pariatambo, Pariahuanca, Chúlec, Crisnejas, Chambará, Chota, Casapalca, Mitu y Calipuy .	99
Figura 5-9. Métodos para la descomposición de materiales geológicos en función al tipo de digestión química. Tomado del laboratorio ALS.....	101
Figura 6-1. Biplot PC1-PC2 de las areniscas del Grupo Chicama y la Formación Oyón	118
Figura 6-2. Biplot PC1-PC3 de las areniscas del Grupo Chicama y la Formación Oyón	119
Figura 6-3. Autodominios de las areniscas del Grupo Chicama y la Formación Oyón	119
Figura 6-4. Número de clústeres de las areniscas del Grupo Chicama y la Formación Oyón..	120
Figura 6-5. Mapa de Atributos sectorizado por clústeres de las areniscas del Grupo Chicama y la Formación Oyón	120
Figura 6-6. Mapa Temático PC1 de las areniscas del Grupo Chicama y la Formación Oyón	122
Figura 6-7. Mapa Temático PC2 de las areniscas del Grupo Chicama y la Formación Oyón .	123
Figura 6-8. Mapa Temático PC-3 de las areniscas del Grupo Chicama y la Formación Oyón	124
Figura 6-9. Mapa DP1 de las areniscas del Grupo Chicama y la Formación Oyón	125
Figura 6-10. Mapa DP2 de las areniscas del Grupo Chicama y la Formación Oyón	126
Figura 6-11. Mapa SOM de las areniscas del Grupo Chicama y la Formación Oyón	127
Figura 6-12. Scree Plot para determinar el número de componentes a usar en el PCA.....	129
Figura 6-13. Biplot PC1-PC2 de las areniscas del Grupo Goyllarisquizga	131
Figura 6-14. Biplot PC1-PC3 de las areniscas del Grupo Goyllarisquizga	132
Figura 6-15. K-means clustering de las areniscas del Grupo Goyllarisquizga.....	132
Figura 6-16. Autodominios de las areniscas del Grupo Goyllarisquizga.....	133
Figura 6-17. Mapa de atributos sectorizado por clústeres de las areniscas del Grupo Goyllarisquizga.....	133
Figura 6-18. Mapa Temático PC1 de las areniscas del Grupo Goyllarisquizga	135
Figura 6-19. Mapa Temático PC2 de las areniscas del Grupo Goyllarisquizga	136
Figura 6-20. Mapa Temático PC3 de las areniscas del Grupo Goyllarisquizga	137
Figura 6-21. Mapa Temático DP1 de las areniscas del Grupo Goyllarisquizga	138
Figura 6-22. Mapa Temático DP2 de las areniscas del Grupo Goyllarisquizga	139
Figura 6-23. Mapa Temático SOM de las areniscas del Grupo Goyllarisquizga	140
Figura 6-24. Scree Plot de los Componentes Principales de las calizas de la Formación Jumasha	142

Figura 6-25. Biplot PC1-PC2 de las calizas de la Formación Jumasha.....	144
Figura 6-26. Biplot PC1-PC3 de las calizas de la Formación Jumasha.....	145
Figura 6-27. K-means clustering de las calizas de la Formación Jumasha.....	145
Figura 6-28. Autodominios de las calizas de la Formación Jumasha.....	146
Figura 6-29. Mapa de atributos de las calizas de la Formación Jumasha.....	146
Figura 6-30. Mapa Temático PC1 de las calizas de la Formación Jumasha.....	148
Figura 6-31. Mapa Temático PC2 de las calizas de la Formación Jumasha.....	149
Figura 6-32. Mapa Temático PC3 de las calizas de la Formación Jumasha.....	150
Figura 6-33. Mapa Temático DP1 de las calizas de la Formación Jumasha.....	151
Figura 6-34. Mapa Temático DP2 de las calizas de la Formación Jumasha.....	152
Figura 6-35. Mapa SOM de las calizas de la Formación Jumasha.....	153
Figura 6-36. Biplot PC1-PC2 del Grupo Chicama, Grupo Goyllarisquizga y de las Formaciones Jumasha, Pariatambo, Pariahuanca, Chúlec, Crisnejas, Chambará, Chota, Casapalca, Mitu y Calipuy.....	157
Figura 6-37. Biplot PC1-PC3 del Grupo Chicama, Grupo Goyllarisquizga y de las Formaciones Jumasha, Pariatambo, Pariahuanca, Chúlec, Crisnejas, Chambará, Chota, Casapalca, Mitu y Calipuy.....	158
Figura 6-38. K-means clustering del Grupo Chicama, Grupo Goyllarisquizga y de las Formaciones Jumasha, Pariatambo, Pariahuanca, Chúlec, Crisnejas, Chambará, Chota, Casapalca, Mitu y Calipuy	158
Figura 6-39. Autodominios del Grupo Chicama, Grupo Goyllarisquizga y de las Formaciones Jumasha, Pariatambo, Pariahuanca, Chúlec, Crisnejas, Chambará, Chota, Casapalca, Mitu y Calipuy.....	159
Figura 6-40. Mapa de atributos del Grupo Chicama, Grupo Goyllarisquizga y de las Formaciones Jumasha, Pariatambo, Pariahuanca, Chúlec, Crisnejas, Chambará, Chota, Casapalca, Mitu y Calipuy.....	159
Figura 6-41. Mapa Temático PC1 del Grupo Chicama, Grupo Goyllarisquizga y de las Formaciones Jumasha, Pariatambo, Pariahuanca, Chúlec, Crisnejas, Chambará, Chota, Casapalca, Mitu y Calipuy	161
Figura 6-42. Mapa Temático PC2 del Grupo Chicama, Grupo Goyllarisquizga y de las Formaciones Jumasha, Pariatambo, Pariahuanca, Chúlec, Crisnejas, Chambará, Chota, Casapalca, Mitu y Calipuy	162
Figura 6-43. Mapa Temático PC3 del Grupo Chicama, Grupo Goyllarisquizga y de las Formaciones Jumasha, Pariatambo, Pariahuanca, Chúlec, Crisnejas, Chambará, Chota, Casapalca, Mitu y Calipuy	163

Figura 6-44. Mapa Temático DP1 del Grupo Chicama, Grupo Goyllarisquizga y de las Formaciones Jumasha, Pariatambo, Pariahuanca, Chúlec, Crisnejas, Chambará, Chota, Casapalca, Mitu y Calipuy	164
Figura 6-45. Mapa Temático DP2 del Grupo Chicama, Grupo Goyllarisquizga y de las Formaciones Jumasha, Pariatambo, Pariahuanca, Chúlec, Crisnejas, Chambará, Chota, Casapalca, Mitu y Calipuy	165
Figura 6-46. Mapa Temático SOM del Grupo Chicama, Grupo Goyllarisquizga y de las Formaciones Jumasha, Pariatambo, Pariahuanca, Chúlec, Crisnejas, Chambará, Chota, Casapalca, Mitu y Calipuy	166
Figura 7-1. Targets área de estudio.....	172

LISTA DE ANEXOS

Anexo A. Matriz de consistencia.....	180
Anexo B. Mapa de distribución Ag	181
Anexo C. Mapa de distribución Ag	181
Anexo D. Mapa de distribución de Au	181
Anexo E. Mapa de distribución de Au	181
Anexo F. Mapa de distribución As.....	181
Anexo G. Mapa de distribución As	181
Anexo H. Mapa distribución Bi	181
Anexo I. Mapa distribución Bi.....	181
Anexo J. Mapa de distribución Cd.....	181
Anexo K. Mapa de distribución Cd.....	181
Anexo L. Mapa de distribución Cu	181
Anexo M. Mapa de distribución Cu	181
Anexo N. Mapa de distribución Ga.....	181
Anexo O. Mapa de distribución Ga	181
Anexo P. Mapa de distribución In	181
Anexo Q. Mapa de distribución In.....	181
Anexo R. Mapa de distribución Li	181
Anexo S. Mapa de distribución Li.....	181
Anexo T. Mapa de distribución Mn.....	181
Anexo U. Mapa de distribución Mn.....	181
Anexo V. Mapa de distribución Mo	181

<i>Anexo W. Mapa de distribución Mo</i>	<i>181</i>
<i>Anexo X. Mapa de distribución Pb</i>	<i>181</i>
<i>Anexo Y. Mapa de distribución Pb</i>	<i>181</i>
<i>Anexo Z. Mapa de distribución Sc</i>	<i>181</i>
<i>Anexo AA. Mapa de distribución Sc</i>	<i>181</i>
<i>Anexo BB. Mapa de distribución Sb</i>	<i>181</i>
<i>Anexo CC. Mapa de distribución Sb.....</i>	<i>181</i>
<i>Anexo DD. Mapa de distribución Tl.....</i>	<i>181</i>
<i>Anexo EE. Mapa de distribución Tl.....</i>	<i>181</i>
<i>Anexo FF. Mapa de distribución W.....</i>	<i>181</i>
<i>Anexo GG. Mapa de distribución W.....</i>	<i>181</i>
<i>Anexo HH. Mapa de distribución Zn.....</i>	<i>181</i>
<i>Anexo II. Mapa de distribución Zn</i>	<i>181</i>

CAPÍTULO 1 . INTRODUCCIÓN

1.1. Planteamiento del problema

Las actividades de exploración minera han aumentado considerablemente en respuesta a la creciente demanda mundial de metales y al progresivo agotamiento de las reservas conocidas. El objetivo principal de estas actividades es descubrir nuevos recursos minerales económicamente rentables, ya sea en áreas poco exploradas o en distritos mineros ya establecidos.

El área de estudio se ubica en la zona central del Perú, con una extensión aproximada de 11 000 km², principalmente en los departamentos de Áncash y Huánuco, y con áreas menores en Pasco y Lima. Cartográficamente corresponde a los cuadrángulos de Yanahuanca (21j), Recuay (20i), La Unión (20j), Huari (19i) y Singa (19j). Su localización se delimita entre las coordenadas WGS84 220000–340000E y 8890000–9000000N, las cuales corresponden aproximadamente al sector comprendido entre los paralelos 9°00' y 10°00' de latitud sur. Esta equivalencia y referencia espacial se basan en la información publicada en el Boletín N°18, Serie B Geología Económica, titulado “Prospección geoquímica regional entre los paralelos 9°00' a 10°00' sur, vertiente atlántica” (Chira et al., 2008).

En esta zona se reconocen importantes depósitos minerales de tipo pórfido-skarn, representados por minas y proyectos como: Antamina, el skarn de Cu-Zn más grande conocido, con una reserva de ~2,968 Mt y una ley promedio de 0.89 % Cu, 0.77 % Zn, 11 g/t Ag y 0.02 % Mo al 2015 (Mrozek, 2018); Contonga, con una reserva de 6.68 Mt y una ley de 1.62 oz/t Ag, 0.63 % Cu, 0.75 % Pb y 2.93 % Zn al 2017 (Escalante, 2018); Pachapaqui, con 9.1 Mt a 3.4 % Zn, 1.42 % Pb, 0.44 % Cu y 55.58 g/t Ag al 2017 (MINEM, 2023); y Huanzalá, con 4.6 Mt a 3.7 oz/t Ag,

0.85 % Cu, 4.6 % Pb y 9.9 % Zn al 2012 (Cutti, 2013). Asimismo, destacan prospectos como Jacabamba, donde en 1983 se reportaron valores de Mo superiores a 1000 ppm en un 15 % de las muestras y hasta 1.17 % Mo en los valores más altos (Mamani, 1983); y Antamayo, con intersecciones de 24 m @ 0.92 % Cu y 7.62 ppm Ag, y 34 m @ 0.39 % Cu y 4.43 ppm Ag (Tejada, 2003).

Debido al potencial geológico-minero de la zona y a la complejidad de los procesos que controlan la distribución de los elementos, surge la necesidad de aplicar métodos estadísticos multivariados. Estos permiten reconocer asociaciones geoquímicas que no son evidentes de manera directa, pero que pueden emplearse como elementos guía (pathfinders) para la prospección de cuerpos minerales poco expuestos en superficie. En los últimos años se han incorporado nuevas técnicas de análisis de datos geológicos, tales como K-means clustering, análisis discriminante y redes neuronales SOM, utilizadas por autores como Jordan Lindsay, Amirreza Bigdeli y David R. Cooke. En este contexto, la presente tesis plantea el uso de dichas metodologías multivariantes en la búsqueda de depósitos pórfido-skarn-polimetálicos en ambientes sedimentarios, con el fin de identificar nuevos blancos de exploración.

1.2. Objetivos de la investigación

1.2.1 Objetivo General

- ✓ Aplicar métodos estadísticos multivariantes para analizar datos geoquímicos de sedimentos de quebrada en el área de estudio entre los paralelos 9° y 10° latitud sur, con el fin de identificar nuevos blancos de exploración para depósitos minerales tipo pórfido-skarn-polimetálicos.

1.2.2 Objetivos específicos

- ✓ Evaluar la distribución espacial de los elementos químicos en sedimentos de quebrada para caracterizar las áreas con potencial de mineralización en el área de estudio
- ✓ Aplicar métodos de agrupamiento y clasificación multivariable, como el K-means clustering y el análisis discriminante, para identificar patrones de asociación entre elementos químicos y tipos de mineralización presentes.
- ✓ Generar redes neuronales autoorganizadas (SOM) para analizar la variabilidad geoquímica en el área de estudio y detectar posibles anomalías geoquímicas que puedan servir como guías exploratorias.
- ✓ Validar la efectividad de los elementos guía (*pathfinders*) identificados a través de la correlación de datos estadísticos con depósitos conocidos en el área, como los provenientes de las minas Antamina y Contonga, para mejorar la precisión en la localización de nuevos objetivos de exploración.

1.3. Importancia de la investigación

Esta investigación es importante para el desarrollo de nuevos métodos de exploración minera en áreas con alto potencial de recursos minerales porque permite la identificación de nuevas zonas mineralizadas, lo que es actualmente una prioridad para las empresas mineras y los gobiernos que buscan asegurar el suministro de recursos estratégicos. Además, que el uso de datos geoquímicos obtenidos de sedimentos de quebrada, combinado con métodos estadísticas multivariadas avanzadas, ofrece un enfoque innovador para la prospección minera.

En este contexto, el análisis multivariable aplicado permite detectar relaciones complejas entre los elementos geoquímicos, proporcionando información valiosa sobre la localización de posibles cuerpos mineralizados en profundidad. Y finalmente, la investigación también busca optimizar los métodos de exploración, facilitando la toma de decisiones en proyectos mineros mediante el uso de métodos como el K-means clustering, análisis discriminante y redes neuronales SOM. Estas herramientas pueden mejorar significativamente la precisión de las interpretaciones geoquímicas y reducir el riesgo y los costos asociados a la exploración minera.

1.4. Alcances de la investigación

El estudio evalúa métodos estadísticos multivariados avanzados, como el K-means clustering y redes neuronales SOM, para el análisis de datos geoquímicos. Los resultados se validaron con minas y proyectos mineros en actividad, como Antamina, Contonga, Pachapaqui, Huanzala y Jacabamba, evaluando la eficacia de los métodos utilizados para identificar cuerpos mineralizados similares o nuevos, lo que generará nuevos blancos o zonas de interés exploratorio, basados en anomalías geoquímicas detectadas a partir del análisis multivariable de los datos.

1.5. Limitaciones de la investigación

Las principales limitaciones de este estudio incluyen la antigüedad de los datos utilizados, obtenidos en la campaña geoquímica regional realizada por INGEMMET entre los años 2006 y 2008, y la baja densidad de muestreo, ya que una mayor densidad podría haber permitido interpretaciones más detalladas y precisas.

Así mismo, es importante señalar que la campaña de muestreo y el diseño de la densidad de 1 muestra por cada 10 km² no fueron realizados ni diseñados por el tesista, quien tampoco tuvo

supervisión sobre el análisis químico de las muestras de sedimentos de quebrada. El control de calidad (QA/QC) de la toma de muestras y el proceso de análisis se consideran válidos, ya que fueron gestionados y ejecutados por la Dirección de Laboratorios del Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (INGEMMET), Perú. Estas limitaciones podrían afectar la precisión de los resultados; sin embargo, se asume que los procedimientos seguidos cumplen con los estándares de calidad necesarios para garantizar la fiabilidad de los datos.

CAPÍTULO 2 . MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de la Investigación

2.1.1 Antecedente Primario

2.1.1.1 Chira et al. (2008)

En el Boletín N°18, Serie B Geología Económica, titulado "Prospección geoquímica regional entre los paralelos 9°00' a 10°00' sur, vertiente atlántica", se presenta un estudio realizado por el INGEMMET entre los años 2006 y 2008, ubicado en la zona central del Perú y abarcando aproximadamente 11 000 km², principalmente entre los departamentos de Áncash y Huánuco, con extensiones menores hacia Pasco y Lima. Cartográficamente corresponde a los cuadrángulos de Yanahuanca (21j), Recuay (20i), La Unión (20j), Huari (19i) y Singa (19j), delimitándose entre las coordenadas WGS84 220000–340000E y 8840000–9000000N. El estudio incluyó la recolección de 730 muestras de sedimentos de arroyos activos a una densidad de muestreo de 1/10 km². Estas muestras fueron tamizadas en la malla 200 para su posterior análisis con los métodos ICP-MS (ataque de agua regia) y ensayo al fuego-absorción atómica, por 52 elementos y oro, respectivamente. El análisis estadístico de la población muestral se dividió según litología y cronoestratigrafía en 4 poblaciones: (i) sedimentarios siliciclásticos del Cretácico inferior, (ii) sedimentarios clásticos del Jurásico Superior, (iii) metamórfico del Neoproterozoico, y (iv) sedimentarios carbonatados del Cretácico. Se seleccionaron 16 elementos (Sb, As, Bi, Cd, Co, Cu, Cr, Hg, Mo, Ni, Au, Ag, V, W y Zn) por su relevancia mineral, así como se vio por la asociación geoquímica que representan, basada en la evaluación bivalente y multivalente. Para encontrar los valores anómalos, se calcularon umbrales geoquímicos basados en el tipo de distribución. Como

consecuencia, se encontraron 261 anomalías, 161 de las cuales (incluidas todas las anomalías de oro) presentan un contraste de moderado a muy significativo, algunas de ellas están relacionadas con explotaciones mineras anteriores o en curso.

2.1.2 Antecedentes referenciales

Se seleccionaron distintas tesis y artículos cuyos temas principales son el análisis multivariable y la prospección geoquímica. A partir de ellos se hizo selección de algunas herramientas y criterios útiles para la elaboración de la presente tesis.

2.1.2.1 Condori (2016)

Este manuscrito referencia al proyecto Mirador Norte, un yacimiento epitermal de alta sulfuración ubicado en el distrito de Chugur, provincia de Hualgayoc y departamento de Cajamarca y operado por Cía. Minera Coimolache S.A. El área de estudio abarca aproximadamente 550x750 metros, desarrollada en rocas volcánicas fracturadas e intercaladas con cuerpos subvolcánicos y brechas hidrotermales. Para la tesis de pregrado titulada "Análisis estadístico multivariado y modelamiento de datos geoquímicos del depósito epitermal de alta sulfuración Mirador Norte - Cajamarca." se utilizó una base de datos compuesta por muestras primarias y de control de sondajes diamantinos, con análisis químicos iniciales de 39 elementos, reducidos a 17 variables finales tras control de calidad y evaluación de normalidad. Entre los procedimientos estadísticos utilizados se encuentran el control de calidad, la composición, el análisis exploratorio de datos y el análisis estadístico multivariado, que incluye técnicas de análisis de correlación múltiple (ACM), análisis de componentes principales (ACP) y análisis factorial (AF). El análisis multivariante ha demostrado que el mejor enfoque para identificar relaciones

multivariantes con coherencia geoquímica es combinar los métodos ACM y AF. El estudio concluye que el análisis factorial (AF) arroja cuatro conexiones geoquímicas principales: Al-K-Na-Sr, Au-Ag-Sb, Fe-V-Zr, y As-Cu-Pb. Además, las asociaciones establecidas demuestran una correlación con la litología y los cambios del yacimiento.

2.1.2.2 Bazán (2021)

Utilizó el modelamiento difuso y aprendizaje profundo no supervisado para crear mapas de prospectividad geoquímica en los cuadrángulos Chaparra (32o) y Atico (33o) en la provincia de Caravelí, Arequipa. El trabajo se titula "Innovaciones estadísticas y redes neuronales artificiales aplicadas a la prospección geoquímica en los cuadrángulos Chaparra y Atico, Caravelí - Arequipa" y combina el índice de enriquecimiento relativo local (LREI) de elementos indicadores de mineralización (Cu, Au, Ag, Pb, Zn y Mo), el análisis de componentes principales (ACP), los coeficientes de rango correlacional (RCC) y el análisis de componentes principales (ACP). El mapa de prospectividad elaborado mediante superposición difusa y el mapa autoorganizado (SOM) se validó trazando las ubicaciones de los depósitos y yacimientos minerales conocidos, que suelen encontrarse en regiones con una prospectividad alta o moderada. Como resultado, se concluye que los avances estadísticos tecnológicos, multivariantes y univariantes utilizados en la cartografía geoquímica son instrumentos útiles para la prospección geoquímica.

2.1.2.3 Vilca (2021)

Se aplicó una cuadrícula de muestreo de sedimentos fluviales con resolución de 1 km², como se detalla en la tesis de pregrado *“Localización de Objetivos Exploratorios Utilizando Análisis Geoestadístico de Información Geoquímica, Loja, Ecuador, 2021”*. En total, se

recolectaron 408 muestras en sectores con afloramientos rocosos y evidencia de alteración hidrotermal dentro del área de estudio en Loja, Ecuador, las cuales fueron posteriormente muestreadas y analizadas mediante ICP-MS. El tratamiento estadístico de los datos se realizó con el software ioGAS, y analiza los datos usando análisis univariado, análisis multivariado, y el uso del enfoque log (Z score) con estadísticas de vecino más cercano. Las anomalías geoquímicas se calcularon tras el análisis estadístico, proporcionando un valor para cada elemento. Se crearon mapas de anomalías con ioGAS mediante la técnica de interpolación de kriging. Además, se creó un mapa multielemental que identificaba las zonas de afloramientos rocosos y alteración hidrotermal teniendo en cuenta elementos pathfinder como Sb, As y Hg. Así, teniendo en cuenta la geología y la metalogenia de la zona de Loja, se identificaron, definieron y detectaron los 35 objetivos exploratorios con valor económico potencial (Cu - Mo, Pb - Zn, Ag - Sb y Au - Ag).

2.1.2.4 *Miranda (2015)*

En este estudio se implementó herramientas de análisis multivariante en su tesis de máster titulada "Análisis Multivariante de Alteraciones" para definir distintos tipos de alteraciones en función de las concentraciones de diferentes elementos químicos. Su objetivo final fue proponer una metodología de clasificación cuantitativa que pueda ser utilizada para estudiar las alteraciones presentes en Mina Escondida. Para ello, se dispuso de una base de datos con diecinueve categorías de alteración de rocas cartografiadas y cincuenta y cuatro variables geoquímicas -de las cuales se determinó que cinco eran diferenciables- para su uso en el desarrollo de modelos de clasificación. Para ello se crearon técnicas que ayudan al usuario a comprender cómo los numerosos tipos de alteración son similares entre sí. Los criterios de categorización se establecieron mediante procedimientos automatizados de selección de variables, que determinaron qué mediciones son las

más relevantes. La investigación se lleva a cabo mediante cuatro técnicas de clasificación: redes neuronales, agrupación k-mean, regresión logística y variable de mejor clasificación. Con una tasa media de éxito de casi el 77% en la clasificación de las cinco categorías, las redes neuronales demuestran que son la técnica más eficaz de los enfoques de análisis multivariable elegidos. El proceso de clasificación permitió identificar dos grandes grupos significativamente distintos entre sí. Estos grupos estaban formados por las alteraciones más tardías (argílica y fílica) y las más tempranas (clorita-sericita y potásica). Los elementos más significativos en la clasificación fueron Mg, Al, Rb y Sc, que en su mayoría se cree que proceden de minerales como la clorita y la biotita. En conclusión, se ha desarrollado un enfoque guiado y semiautomatizado que facilita la clasificación de categorías a los usuarios.

2.2. Exploración de yacimientos minerales

2.2.1 Depósitos tipo pórfido

Los depósitos tipo pórfido constituyen uno de los tipos de depósitos minerales más importantes a nivel mundial, caracterizados por grandes volúmenes de roca con mineralización disseminada de metales como cobre, molibdeno, oro y, en menor medida, plata. Su nombre proviene de su asociación con intrusivos ígneos de textura porfídica, aunque no todos los pórfidos mineralizados presentan esta textura (Sillitoe, 2012). Cerca del 75% del Cu, el 50% del Mo, quizá el 20% del Au, la mayor parte del renio y trazas de otros metales como Ag, Pd, Te, Se, Bi, Zn y Pb proceden actualmente en todo el mundo de sistemas de pórfidos de Cu (Sillitoe, 2010). Estos sistemas son grandes volúmenes de roca alterada hidrotermalmente que contiene sulfuros y óxidos de interés económico.

2.2.1.1 Génesis y contexto geológico

La formación de los depósitos tipo pórfido está íntimamente ligada a la evolución de magmas calcoalcalinos ricos en agua, generados por fusión parcial del manto y de materiales corticales en ambientes de subducción (Pirajno, 1992). Estos magmas, al ascender hacia la corteza superior, se estancan en cámaras magmáticas donde ocurren procesos de diferenciación, cristalización fraccionada y acumulación de volátiles. La exsolución de fluidos magmáticos desde estas cámaras genera la mineralización mediante sistemas hidrotermales. Estos fluidos, enriquecidos en metales (Cu, Mo, Au), B, F, Cl, entre otros, migran por fracturas y zona permeables, precipitando los minerales de mena y generando zonaciones de alteración características (Sillitoe, 2012; Camus, 2003). La importancia de estos sistemas radica en la variedad de yacimientos minerales asociados (**Figura 2-2**), tales como skarns, CRD, vetas y epitermales de sulfuración alta e intermedia (Seedorff et al. 2005; Sillitoe 2010).

El proceso mineralizante en los sistemas pórfidos se desarrolla en dos fases principales:

2.2.1.1.1 Fase prógrada

Asociada a temperaturas elevadas (>500 °C) y dominada por la circulación de fluidos magmáticos. Se forman vetillas A y B, alteración potásica, y se precipitan sulfuros como calcopirita, bornita y molibdenita. Esta fase define la mineralización principal del sistema (Camus, 2003).

2.2.1.1.2 Fase retrógrada

Ocurre en condiciones de menor temperatura y mayor interacción con fluidos meteóricos o derivados de la mezcla con aguas superficiales. Se asocia a la alteración fílica, propilítica y argílica, donde dominan minerales como sericita, clorita y caolinita. Esta etapa puede redissolver, removilizar o superponer la mineralización previa, modificando su ley y distribución (Sillitoe, 2012). Estas dos fases pueden estar telescopadas espacialmente debido a la rápida evolución del sistema, generando zonas superpuestas de alteración y mineralización.

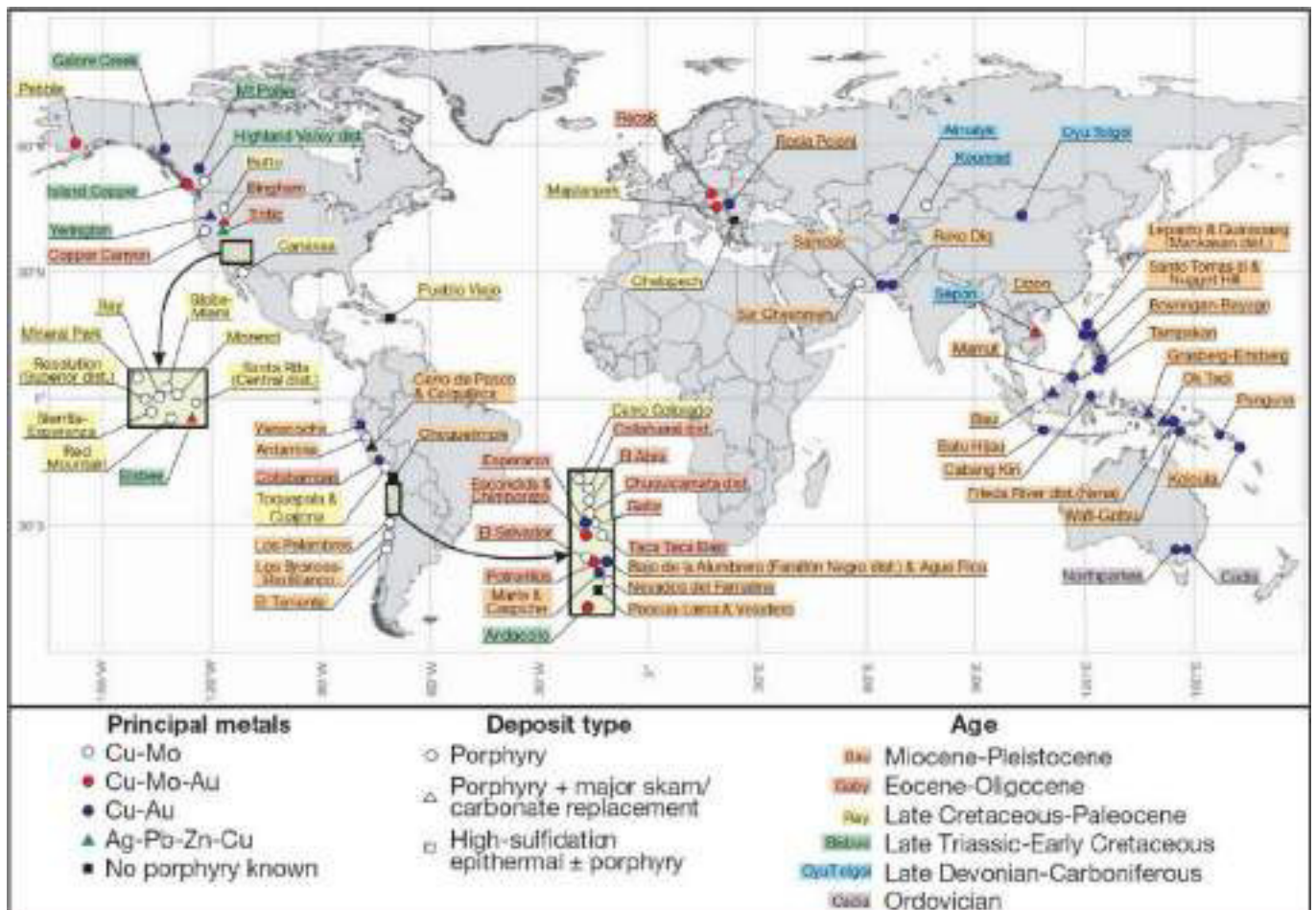


Figura 2-1. Ubicaciones a nivel mundial de sistemas pórfidos de cobre. Tomado de Porphyry Cooper System (p.4)

2.2.1.2 Relación con depósitos minerales

2.2.1.2.1 Skarn

Los depósitos tipo pórfido están estrechamente relacionados con los depósitos tipo skarn, tanto en el espacio como en el tiempo. Esta asociación es típica en casos donde los cuerpos rocosos intrusivos que generan el sistema pórfido se emplazan en rocas carbonatadas, tales como calizas o dolomitas. Durante la fase prógrada, los fluidos magmáticos ricos en metales y volátiles interactúan con estas rocas reactivas, generando la alteración metasomática típica de los skarns, caracterizada por el reemplazo de carbonatos por silicatos cálcico-ferrosos como granate (andradita, grosularia) y piroxeno (diópsido, hedenbergita) (Meinert, 1992). Esta interacción da lugar a skarns de exoskarn (en la roca encajonante) y endoskarn (en la intrusión), que pueden ser mineralizados en cobre, zinc, hierro o tungsteno, dependiendo de la composición del fluido y del encajonante. Posteriormente, en la fase retrógrada, se produce el reemplazo de estos silicatos por minerales hidratados como epidota, clorita, actinolita y sericita, mientras ocurre la precipitación de sulfuros (calcopirita, bornita, esfalerita, galena) y óxidos (magnetita, hematita) en las vetillas o zonas de brechas dentro del skarn (Camus, 2003; Meinert et al., 2005). La proximidad espacial y la superposición temporal entre la mineralización de pórfido y los skarns hacen que ambos estilos mineralógicos estén genéticamente vinculados. Los skarns suelen encontrarse en la periferia de los sistemas pórfidos, como es el caso del depósito de Antamina en Perú (Love et al., 2004). De hecho, en numerosos distritos, los skarns representan el halo de interacción más distal del sistema pórfido, con mineralización más localizada, pero de leyes más altas (Sillitoe, 2012). En el Perú un ejemplo representativo de un depósito skarn es Antamina que es uno de los depósitos skarn más grandes y ricos del mundo, este depósito es un skarn de cobre-zinc, con mineralización de calcopirita,

esfalerita, bornita y molibdenita. La zonación en Antamina muestra una transición desde un núcleo rico en cobre hacia una periferia con mayor contenido de zinc (Love et al., 2004).

2.2.1.2.2 Epitermales

Algunos estilos de mineralización asociados a los depósitos tipo pórfido de cobre son los depósitos epitermales que se forman a partir de soluciones hidrotermales en ambientes de baja a moderada temperatura (50-300°C) y baja presión, generalmente en niveles más superficiales que los pórfidos. Estos depósitos pueden contener metales como oro y plata, y están asociados con zonas de alteración argílica avanzada (Sillitoe, 1993), un ejemplo es el yacimiento minero de Yanacocha en Perú (Teal y Benavides, 2010).

2.2.1.2.3 Tipo CRD

También tenemos a los depósitos de reemplazamiento de carbonatos (CRD) que son depósitos hidrotermales donde los fluidos minerales reemplazan la roca huésped (carbonatados) con minerales de mena y ganga, suelen estar asociados con los mismos sistemas magmáticos que los pórfidos y skarns, y pueden contener metales como zinc, plomo, cobre, y plata (Megaw et al., 1988).

2.2.1.2.4 Vetas Cordilleranas

Así mismo tenemos las vetas cordilleranas que son sistemas de vetas de cuarzo que contienen minerales metálicos, y suelen estar asociadas a cinturones orogénicos y sistemas de pórfidos. Estas vetas pueden contener oro, plata, cobre, plomo, y zinc, y están formadas por la

circulación de fluidos hidrotermales a través de fracturas en la roca huésped (Hedenquist et al., 1998).

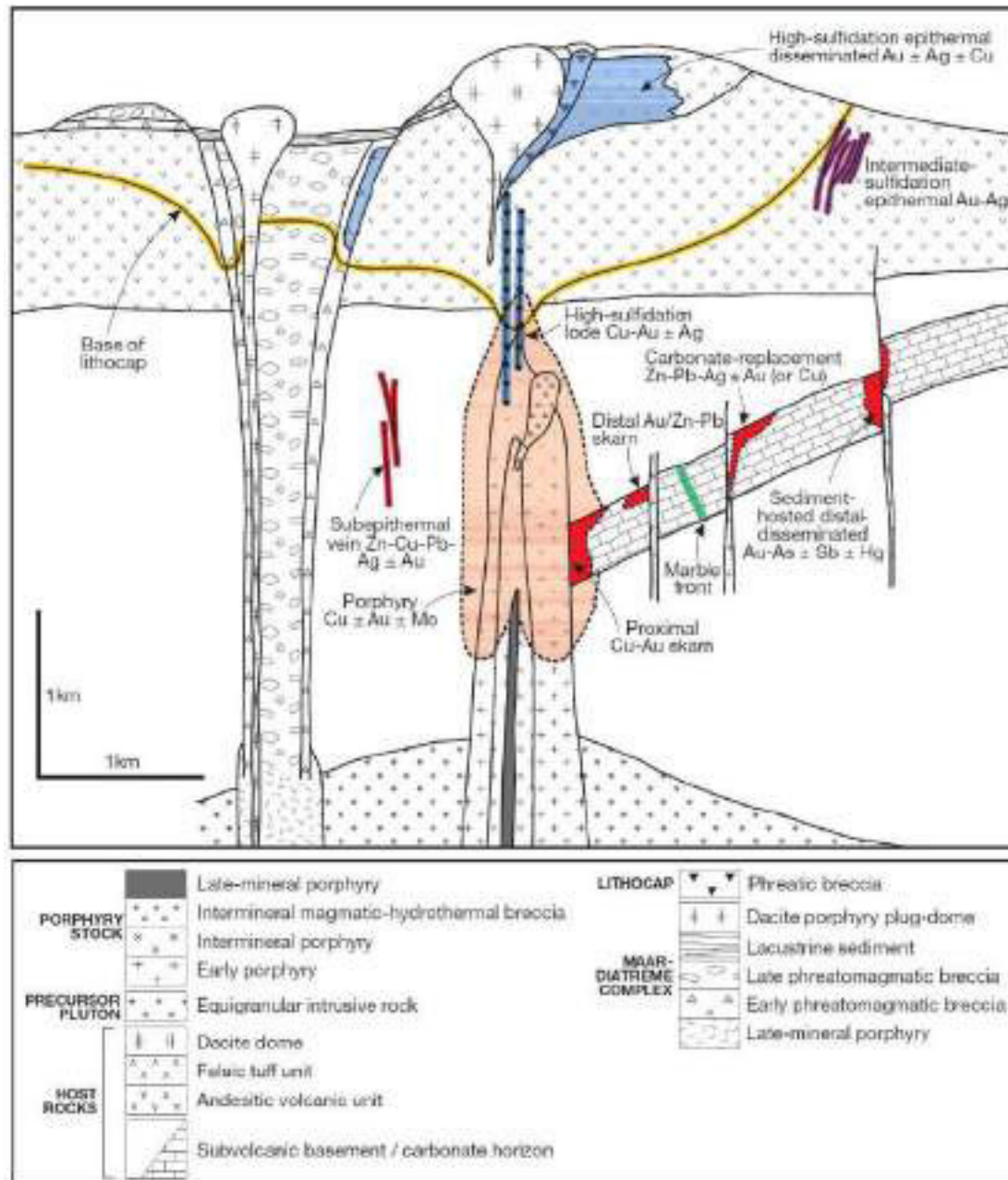


Figura 2-2. Modelo del sistema pórfido de cobre y yacimientos asociados.

Nota: El sistema de pórfido de cobre telescópico muestra cómo se relacionan espacialmente distintos tipos de depósitos minerales alrededor de un yacimiento principal de Cu ± Au ± Mo. Este se

encuentra en un stock de pórfido multiepisódico rodeado por skarns, reemplazos carbonatados, depósitos diseminados en sedimentos y vetas subepitermales. Encima se ubican depósitos epitermales asociados a un lithocap. La secuencia temporal indica que el stock pórfido es más antiguo que otras estructuras como el maar-diatrema y la brecha freática. Aunque no todos los sistemas contienen todos estos tipos de depósitos, estas representaciones esquemáticas son útiles en la exploración geológica, ya que reflejan relaciones reales observadas en el campo. Tomado de Porphyry Cooper System (p.10), Sillitoe (2010).

2.2.1.3 Tipos de depósitos tipo pórfido

Los depósitos tipo pórfido se clasifican según el metal predominante y las condiciones fisicoquímicas del sistema, donde se tiene:

2.2.1.3.1 Pórfidos de cobre (Cu)

Son los más comunes y económicamente importantes. Estos tipos de depósitos están asociados a andesitas o dacitas, y son ricos en calcopirita y bornita. Alteración potásica dominante. La mayoría de los sistemas de pórfidos de Cu se encuentran en los 4 km superiores de la corteza, donde tienen stocks centrales que están vinculados a cámaras magmáticas a profundidades de 5 a 15 km (Pirajno, 2009; Richards, 2018). Estos depósitos son notables por su gran tamaño y contenido de baja a mediana ley, donde los minerales de mena primarios están predominantemente influenciados estructuralmente y vinculados espacial y genéticamente con intrusiones porfídicas félsicas a intermedias (Kirkham, 1972). Así mismo, minerales secundarios pueden desarrollarse en zonas enriquecidas supergénicamente debido a la meteorización de sulfuros primarios. Estas áreas suelen exhibir leyes de cobre significativamente más altas, mejorando así el potencial para su explotación económica (Sinclair, 2007). Los aspectos distintivos de los depósitos tipo pórfido de Cu incluyen su tamaño considerable y los controles estructurales (venillas,

conjuntos de vetas, stockworks, fracturas y brechas pipes) que sirven para diferenciarlos de diversos depósitos periféricos.

2.2.1.3.2 Pórfidos de cobre - molibdeno (Cu - Mo)

Estos sistemas se desarrollan en ambientes relativamente más profundos y menos oxidados que los pórfidos Cu-Au, asociados a intrusivos de composición granítica. La mineralización se caracteriza por el enriquecimiento en molibdenita (MoS_2), además de calcopirita y bornita como minerales de cobre, alojados en rocas intrusivas y sus encajonantes. Su formación está vinculada a condiciones de mayor presión y menor fugacidad de oxígeno, lo que favorece la estabilidad de la molibdenita como fase dominante del Mo (Sillitoe, 2010).

2.2.1.3.3 Pórfidos de molibdeno (Mo)

Aunque son menos comunes que los pórfidos de cobre, representan la principal fuente de molibdeno a nivel mundial. Estos sistemas pueden ser primarios, con el molibdeno como metal económico principal, o constituir subproductos en pórfidos Cu-Mo. Se relacionan con magmas altamente diferenciados y ricos en volátiles, generando mineralizaciones en zonas profundas del sistema, principalmente en forma de molibdenita. Su génesis está asociada a granitos con alto contenido en sílice y baja oxidación (Sillitoe, 2010).

2.2.1.3.4 Pórfidos de oro (Au)

Estos depósitos se desarrollan en sistemas altamente oxidados, usualmente en etapas tardías de evolución magmática. La mineralización de oro se asocia a vetillas de cuarzo con pirita,

sericita y ocasionalmente con sulfuros de cobre, alojadas en rocas de afinidad calcoalcalina. Es común la presencia de hematita y magnetita, como expresión de un sistema con alta fugacidad de oxígeno. Estos sistemas son indicativos de ambientes más superficiales y oxidados dentro del contexto de arcos magmáticos (Sillitoe, 2010).

2.2.1.3.5 Pórfidos de estaño (Sn)

Corresponden a sistemas telescopados, con múltiples eventos magmáticos y fluidos hidrotermales que generan una zonación mixta. La mineralización de estaño, principalmente en forma de casiterita (SnO_2), está asociada a granitos evolucionados, ricos en volátiles como flúor y boro, lo que facilita la movilidad del Sn. Estos pórfidos se forman durante ciclos magmáticos prolongados en zonas de colisión continental o post-subducción (Sillitoe, 2010).

2.2.1.4 Minerales principales y asociados

La mineralización se distribuye a través de redes de vetillas y disseminaciones alojadas en rocas intrusivas y sus encajonantes, formando sistemas extensos, de gran tonelaje, pero generalmente de baja ley. Estos sistemas se desarrollan principalmente en márgenes convergentes activos, en ambientes de arco magmático relacionados con zonas de subducción, y se caracterizan por su zonificación tanto mineralógica como alteraciones y geoquímica (Camus, 2003; Sillitoe, 2010).

Los minerales de mena y ganga más comunes en estos sistemas son:

2.2.1.4.1 Mena

Comúnmente representado por calcopirita, bornita, molibdenita, pirita, en algunos casos esfalerita y galena.

2.2.1.4.2 Ganga

Cuarzo, feldespatos, biotita, sericita, clorita, anhidrita y turmalina.

2.2.1.5 Alteraciones asociadas a sistemas pórfidos de Cu

2.2.1.5.1 Alteración sodico-cálcica

Esta alteración se presenta en las partes más profundas del sistema, incluyendo zonas por debajo de los depósitos de pórfido de cobre, aunque es poco común. Sus minerales principales son albita u oligoclasa y actinolita, con minerales accesorios como diópsido, epidota y granate. Usualmente, no se asocia a una mineralización significativa, ya que los sulfuros están típicamente ausentes. Las vetillas contemporáneas son del tipo M (magnetita $\pm$ actinolita) y sus bordes están compuestos por albita u oligoclasa. Aunque normalmente es estéril, puede contener mineralización en algunos sectores localizados (Sillitoe, 2010).

2.2.1.5.2 Alteración Potásica (K-silicatada)

Se encuentra en las zonas núcleo de los depósitos de pórfido de cobre y está presente de manera ubicua. Está caracterizada por la presencia de biotita y feldespato potásico como minerales principales, acompañados de actinolita, epidota, sericita, andalucita, albita, turmalina y magnetita como accesorios. La mineralización incluye asociaciones de calcopirita, bornita, pirita, digenita y

calcocita. Las vetillas contemporáneas comprenden varios tipos: vetillas de biotita (tipo EB), vetillas tipo EDM/T4 (cuarzo-biotita-sericita-sulfuros con K-feldespatos y andalucita), vetillas de cuarzo-sulfuros $\pm$ magnetita (tipo A), vetillas de cuarzo-molibdenita, y vetillas centrales tipo B con pirita y calcopirita. Es la principal zona generadora de mineralización económica, y suele estar acompañada por bordes de vetillas ricos en sericita, biotita, K-feldespatos y sulfuros diseminados (Sillitoe, 2010).

2.2.1.5.3 Alteración propilítica

Esta alteración se localiza en las zonas marginales del sistema, por debajo del litocap, y es de presencia muy común. Está compuesta por clorita, epidota, albita y carbonato, con actinolita, hematita y magnetita como minerales accesorios. La mineralización asociada suele incluir pirita, esfalerita y galena. Las vetillas contemporáneas contienen pirita y epidota, aunque esta alteración se considera en general estéril, salvo que esté relacionada con vetillas subepitermales (Sillitoe, 2010).

2.2.1.5.4 Alteración clorita-sericita

También conocida como sericita-arcilla-clorita, esta alteración ocurre en las partes superiores de las zonas núcleo potásicas. Es particularmente común en pórfidos ricos en oro. Los minerales principales incluyen clorita, sericita o illita, y hematita (martita o especularita), con carbonato, epidota y esmectita como accesorios. Se asocia a mineralización de pirita y calcopirita. Las vetillas contemporáneas muestran asociaciones de clorita y sericita con sulfuros, y los bordes de vetillas pueden contener clorita, sericita o illita. Se considera un contribuyente común de mena (Sillitoe, 2010).

2.2.1.5.5 Alteración sericítica (Fílica)

Presente en las partes superiores de los depósitos porfídicos de Cu, excepto en los intrusivos alcalinos. Sus minerales principales son cuarzo y sericita, con pirofilita, carbonato, turmalina y especularita como minerales accesorios. Se asocia a una amplia variedad de sulfuros, tales como pirita, calcopirita, enargita, covelita, calcocita, bornita, esfalerita y tetraedrita. Las vetillas contemporáneas son del tipo D, y están compuestas por cuarzo-pirita y otros sulfuros, con bordes de vetillas de cuarzo-sericita. Aunque comúnmente es estéril, en algunos casos puede contener mineralización económica (Sillitoe, 2010).

2.2.1.5.6 Alteración argílica avanzada

Se desarrolla por encima del sistema porfídico, formando parte del litocap, y es común en muchos depósitos. Incluye minerales como cuarzo (residual, vuggy), alunita, pirofilita, dickita y caolinita. También puede contener minerales accesorios como diásporo, andalucita, zunyita, corindón, topacio y alunógeno. Se asocia a vetillas de pirita-enargita y sulfuros de cobre, las cuales pueden incluir mineralización significativa. Los bordes de vetillas presentan asociaciones de cuarzo con alunita, pirofilita, dickita y caolinita. Aunque muchas veces esta alteración es estéril, localmente puede contener mineralización valiosa, especialmente en el litocap y en sus rocas de caja adyacentes (Sillitoe, 2010).

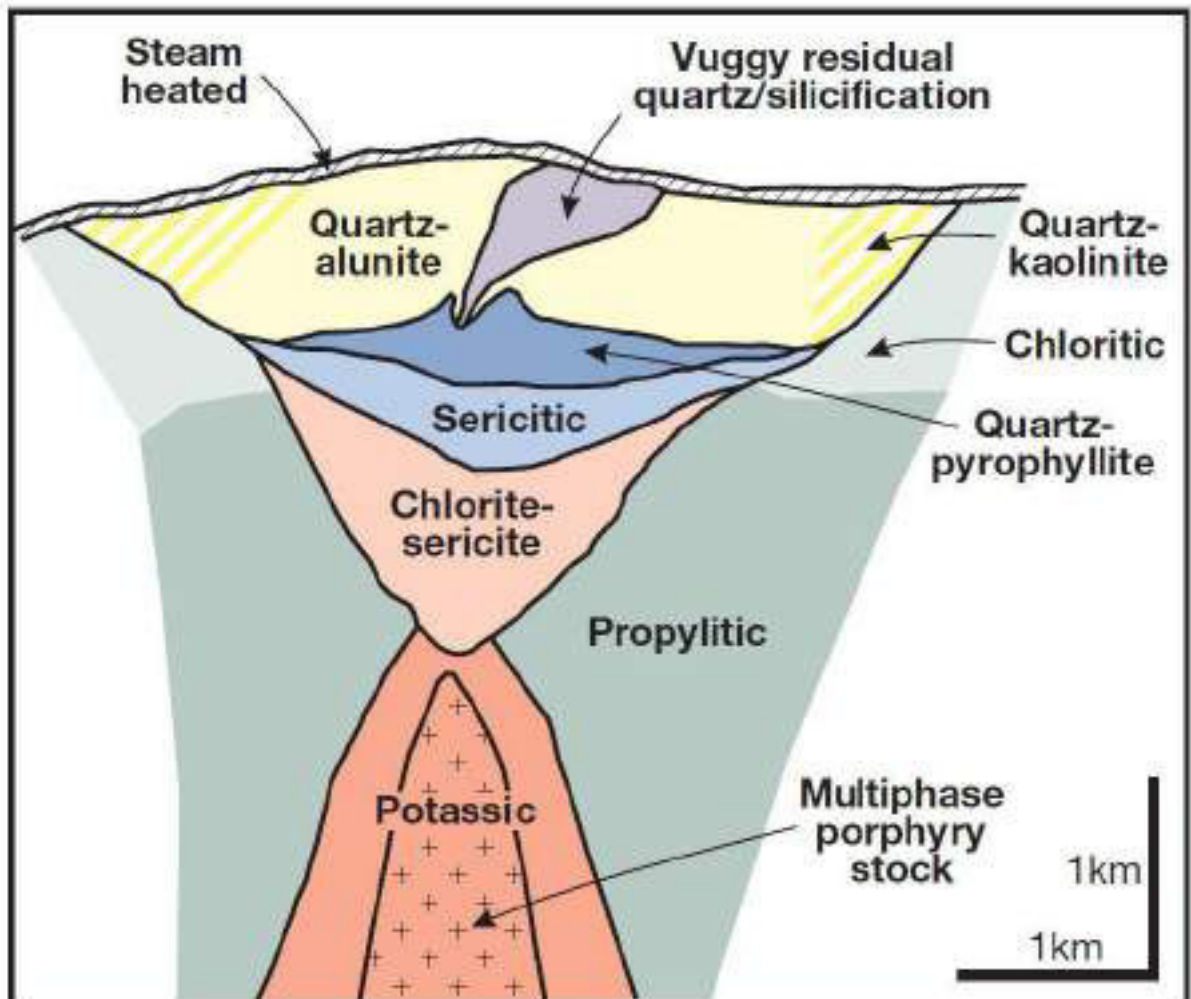


Figura 2-3. Zonificación típica de alteración-mineralización en un pórfido de cobre no telescopado. Tomado de *Porphyry Cooper System* (p.10), por Sillitoe, (2010).

2.3. Parámetros geoquímicos

2.3.1 Background

Se trata del valor habitual o de fondo de un elemento químico en un entorno geológico, geomorfológico y/o geoquímico, lo cual representa a la abundancia de cualquier elemento en la corteza terrestre. Se establece como la media ($\bar{x}$) de todos los valores obtenidos del área de estudio correspondiente (Rivera, 2007). Las variaciones del background se pueden comparar al ruido en una señal de radio o al "ruido" de un amplificador electrónico (Hawkes, 1957).

Se define como: $\bar{x}$

Donde:

$\bar{x}$: media aritmética

2.3.2 Threshold

Si las variaciones del background se pueden comparar con el ruido en un circuito amplificador, la anomalía geoquímica es análoga a la "señal". Al interpretar el patrón geoquímico de un área que contiene anomalías, se selecciona un cierto límite de corte o valor "threshold", por debajo del cual las variaciones representan solo efectos normales de background y por encima del cual tienen significado en términos de posible mineralización (Hawkes, 1957). Se puede apreciar estadísticamente por la suma del background más dos veces la desviación estándar (Rivera, 2007).

Se define como: $\bar{x} + 2\sigma$

Donde:

$\bar{x}$: media aritmética y σ : desviación estándar

2.3.3 Anomalías geoquímicas

La prospección geoquímica de minerales incluye cualquier método de exploración mineral basado en la medición sistemática de las propiedades químicas de un material de origen natural. Una anomalía geoquímica es una concentración de elementos químicos significativamente diferente al fondo geoquímico natural de un área, ya sea por exceso o déficit. Generalmente son el reflejo de procesos geológicos particulares y puede ser un indicador indirecto de mineralización o

actividad hidrotermal, y se detecta mediante mediciones. El propósito de estas mediciones es localizar anomalías geoquímicas o áreas donde el patrón químico indica la presencia de mineral en las proximidades. Las anomalías pueden formarse ya sea en profundidad por procesos ígneos y metamórficos, o en la superficie terrestre por agentes de meteorización, erosión y transporte superficial. Las anomalías geoquímicas de origen profundo, anomalías primarias, pueden resultar de: variaciones locales aparentes en la composición original de la corteza terrestre, definiendo una "provincia geoquímica" especialmente favorable para la ocurrencia de mineral, impregnación de rocas por fluidos mineralizantes relacionados con la formación de mineral o dispersión de elementos volátiles transportados en forma gaseosa. Las anomalías de origen superficial, anomalías secundarias, toman la forma de materiales residuales de la meteorización de rocas y minerales en su lugar, o de materiales dispersados desde el depósito mineral por gravedad, agua en movimiento o hielo glaciar. La movilidad de un elemento, o su tendencia a migrar en el ambiente superficial, determina las características de las anomalías geoquímicas que puede formar (Hawkes, 1957).

Se define como:

- Anomalías Débiles: $\bar{x} + 3\sigma$
- Anomalías Moderadas: $\bar{x} + 4\sigma$
- Anomalías Altas: $\bar{x} + 5\sigma$

Donde:

$\bar{x}$: media aritmética y σ : desviación estándar

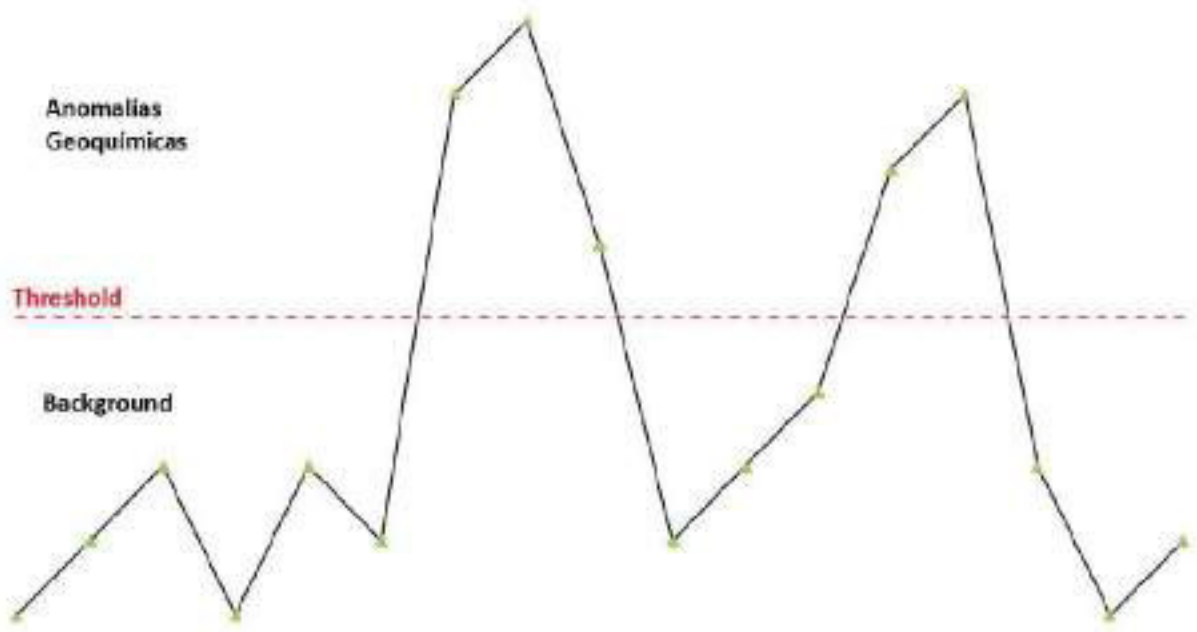


Figura 2-4. Parámetros Geoquímicos.

Nota: Representación gráfica del background, threshold y anomalías geoquímicas

2.4. Métodos estadísticos aplicados a la geología

2.4.1 Control de Calidad Analítico -QA/QC

2.4.1.1 Precisión

La precisión se refiere a la habilidad de obtener resultados de medición repetidamente similares cuando se analiza la misma muestra bajo condiciones prácticamente idénticas. Está relacionada con las variaciones impredecibles que ocurren durante el proceso de medición. Para evaluar qué tan precisa es una medición, se requiere replicarla intentando mantener las condiciones lo más parecidas posible a las de la primera vez. La precisión se puede describir cuantitativamente mediante el error relativo (ER), que se calcula como el valor absoluto de la diferencia entre la

medición original y la duplicada, dividido por el promedio de ambas, y expresado en porcentaje. Generalmente, se sugiere describir la precisión como una cualidad (por ejemplo, baja o alta), mientras que el error relativo es el dato numérico que la cuantifica. Existe una relación inversa entre ambos: un error relativo grande indica una precisión baja, y un error relativo pequeño señala una precisión alta (Simón, 2005).

2.4.1.2 Exactitud

La exactitud describe qué tan cerca están los resultados de las mediciones del valor real o de un valor considerado correcto. El concepto de exactitud depende fundamentalmente de la existencia de un valor de referencia. Una forma de evaluar la exactitud de un laboratorio es analizar estándares junto con las muestras habituales, permitiendo comparar su desempeño con el de laboratorios que se consideran de referencia. Se aconseja describir la exactitud como una cualidad (por ejemplo, baja o alta), mientras que la magnitud del error sistemático, también conocido como sesgo, es el dato numérico que la cuantifica. Existe una relación inversa entre ambos: un sesgo grande implica una exactitud baja, y un sesgo pequeño indica una exactitud alta (Simón, 2005).

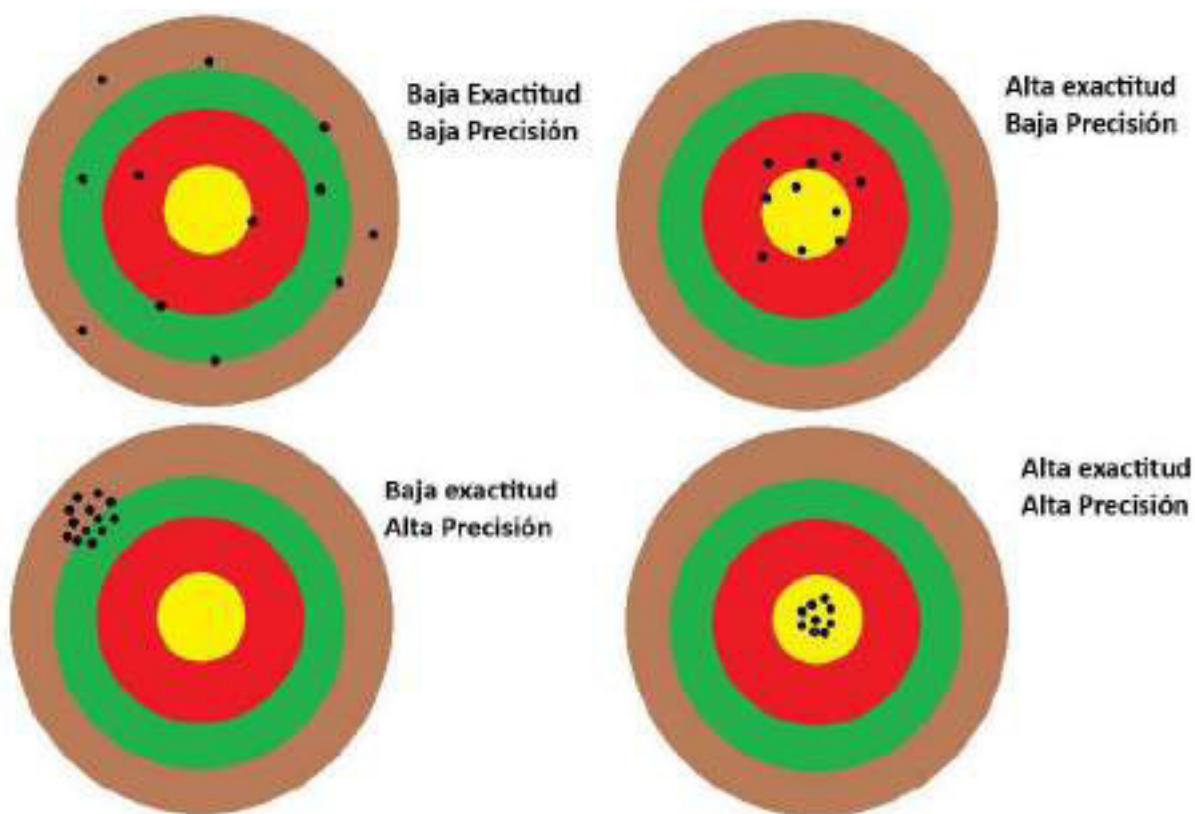


Figura 2-5. Representación de precisión y exactitud

Nota: El color amarillo representa la alta exactitud (valor verdadero), el rojo una exactitud intermedia, el verde una baja exactitud y el marrón una muy baja exactitud. Los puntos negros representan las mediciones: cuanto más concentrados se encuentren, mayor es la precisión; si están dispersos, la precisión es baja. El escenario ideal corresponde a los puntos negros concentrados en la zona amarilla, lo que refleja alta exactitud y alta precisión. Elaboración propia

2.4.1.3 Contaminación

Durante la preparación o el análisis de ciertas muestras, especialmente aquellas con alta concentración de minerales, existe la posibilidad de que una parte de la muestra o de la solución quede atrapada sin querer en el equipo utilizado. Este residuo puede luego contaminar las muestras que se analizan posteriormente, alterando sus resultados. Para detectar y evaluar la contaminación,

se utilizan blancos, que son muestras libres del analito de interés o con cantidades muy bajas, cercanas al límite de detección del instrumento.

Se considera que ha ocurrido una contaminación significativa para un elemento específico cuando los blancos muestran concentraciones que superan varias veces el límite en el que ese elemento puede ser detectado (Simón, 2005).

2.4.2 Preprocesamiento de Datos

2.4.2.1 Datos Censurados e imputación de valores

Los datos geoquímicos suelen estar censurados, es decir, las concentraciones de algunas muestras se informan como “menores que” o “mayores que” algún valor, son datos por debajo del límite de detección o datos anómalos por encima del límite de detección respectivamente. La selección de elementos usados en esta investigación no superó el 80% de datos censurados ya que las estimaciones estadísticas no serían fiables (Helsel, 2012). Los valores censurados pueden ser reemplazados por la mitad del valor absoluto del límite de detección para que no interfieran en el cálculo de los parámetros estadísticos tales como la media aritmética y la desviación estándar (Reimann, 2008; Sandfort, et al, 1993).

2.4.2.2 Transformación Center Log Ratio (CLR) - Normalización

Es una técnica usada para transformar datos composicionales, convirtiéndolos en valores logarítmicos centrados que permiten aplicar análisis estadísticos convencionales. Este procedimiento ayuda a eliminar el efecto de la suma constante y a normalizar los datos. Ahí, los datos geoquímicos son datos "cerrados" en el espacio de Aitchison, y deben “abrirse” antes de

aplicar cualquier método estadístico (van den Boogaart y Tolosana-Delgado, 2013). La transformación CLR puede "abrir" los datos y transformarlos desde el espacio de Aitchison al espacio euclidiano, consiste en tomar el logaritmo de cada parte tras dividirlo por la media geométrica de todas las partes. Con ayuda de esta transformación, los datos transformados CLR pueden utilizarse con la métrica euclidiana regular, reduciendo la operación de análisis a la regular y haciendo que las operaciones de perturbación sean iguales a sumas y que las distancias coincidan con la geometría de Aitchison en el simplex (Aitchison, 1986).

La ventaja de esta transformación no solo es que resulta más fácil de manejar que los cocientes, sino que además elimina el problema de un espacio vectorial restringido, el simplex, y pasa a un espacio no restringido, un espacio real $\mathbb{R}^D$, permitiendo el uso de la estadística multivariante estándar sin restricciones aplicada a los datos composicionales transformados (Martínez, 2022).

2.4.3 Análisis exploratorio de datos

El Análisis Exploratorio de Datos (EDA) es la primera etapa del proceso de análisis de datos y consiste en un conjunto de métodos estadísticos y gráficos que permiten organizar y estructurar los datos, explorar la distribución de las variables con la finalidad de detectar la presencia de valores faltantes, identificar valores anómalos, comprender la dispersión y la forma de los datos, entender las relaciones entre las variables, además de reorganizar y reestructurar los datos para procedimientos de análisis posteriores (Tukey, 1977).

Es el estudio estadístico de diversas variables medidas en elementos de una población con el propósito de reducir un conjunto de variables en unas pocas nuevas variables, generadas como

transformaciones de las originales, con la menor pérdida de información. De igual modo, pretende establecer grupos en los datos si existen, clasificar nuevas observaciones en grupos definidos y establecer conjuntos en variables (Peña, 2002).

2.4.3.1 Estadísticos descriptivos

Son valores que resumen las principales características del conjunto de datos.

- ✓ Media: es el promedio de los datos.
- ✓ Mediana: es el valor central cuando los datos están ordenados.
- ✓ Moda: es el valor que ocurre con mayor frecuencia.
- ✓ Desviación estándar: mide la dispersión de los datos alrededor de la media.
- ✓ Rango intercuartílico: medida de dispersión de un conjunto de datos que expresa la diferencia o distancia entre el primer cuartil (25% más bajo) y el tercer cuartil (75% más alto) de una distribución.
- ✓ Percentiles: son medidas estadísticas que indican la posición de un valor en una serie de datos ordenados de menor a mayor. Divide la serie de datos en cien partes iguales, y cada parte se conoce como un percentil.

Tabla 2-1. Estadísticos descriptivos de las areniscas del Grupo Chicama y la Formación Oyón

	Cu_ppm	Au_ppm	Mn_ppm	Zn_ppm	Ag_ppm	As_ppm	Bi_ppm	Cd_ppm	Mo_ppm	Pb_ppm	W_ppm
Conteo Numérico	141	141	141	141	141	141	141	141	141	141	141
Valores Únicos	113	26	131	113	56	59	52	90	113	121	32
Mínimo	7.6	0.0025	212	37	0.04	4	0.08	0.08	0.59	10.9	0.05
Máximo	138.3	0.456	10001	3216	10.1	633	1.62	45.2	120.9	8685	75.8
Media	27.27	0.01	1243.52	282.62	0.45	35.45	0.31	1.53	5.61	122.51	2.93
Mediana	21.5	0.0025	684	141	0.13	14	0.21	0.45	1.53	28.5	0.1
Rango	130.7	0.4535	9789	3179	10.06	629	1.54	45.12	120.31	8674.1	75.75
Rango	16.8	0.0045	678.5	165	0.245	26	0.16	1.205	1.88	24.25	0.35
Intercuartílico											
Desviación Estándar	18.57	0.04	1791.50	458.88	1.13	66.56	0.30	4.18	14.31	739.06	9.87
1 percentil	7.642	0.0025	218.3	42.04	0.04	4	0.0884	0.08	0.6068	10.942	0.05
5 percentil	10.91	0.0025	336.3	67.4	0.06	5.1	0.11	0.17	0.705	15.23	0.05
10 percentil	12.92	0.0025	381	77.6	0.062	6	0.13	0.2	0.81	16.8	0.05
25 percentil	15.85	0.0025	476	98.5	0.085	9	0.16	0.27	1.02	21.25	0.05
75 percentil	32.65	0.007	1154.5	263.5	0.33	35	0.32	1.475	2.9	45.5	0.4
90 percentil	49.14	0.023	2343.4	497.8	0.746	80.8	0.628	2.746	9.93	111.78	6.22
95 percentil	61.06	0.063	3963.5	977.4	2.081	140.3	1.183	6.908	29.15	223.43	14.98
99 percentil	123.264	0.30648	10001	3175.7	8.315	514.98	1.6032	31.046	102.84	5512.32	63.41

2.4.3.2 Histogramas

Son gráficos que representan la distribución de un conjunto de datos al agruparlos en intervalos y mostrar la frecuencia de aparición de los valores en cada intervalo. Si los datos siguen una distribución normal, el histograma debería mostrar una curva en forma de campana (distribución gaussiana) simétrica alrededor de la media. Si el histograma está inclinado hacia un lado (izquierda o derecha), indica que los datos están sesgados, lo cual puede sugerir que no siguen una distribución normal. Los valores que se alejan considerablemente del resto de los datos pueden ser detectados fácilmente en un histograma. Permite evaluar de manera visual si los datos están distribuidos de forma simétrica y sin sesgos, lo que es un indicativo de normalidad.

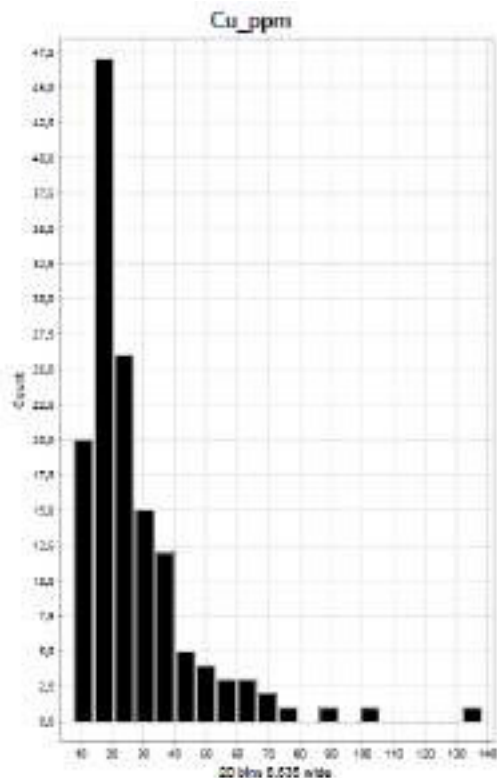


Figura 2-6. Histograma del cobre en las areniscas del Grupo Chicama y la Formación Oyón

2.4.3.3 Gráficos box plot

Son una representación visual que muestra la dispersión de los datos basándose en los cuartiles. La caja central representa el 50% intermedio de los datos (entre el primer y tercer cuartil), con la línea central indicando la mediana, mientras que los bigotes representan el valor máximo y mínimo, excluyendo los valores atípicos. Y finalmente los valores atípicos son puntos fuera de los bigotes y representan datos que están considerablemente alejados del resto. Si hay muchos outliers, es posible que los datos no sigan una distribución normal.

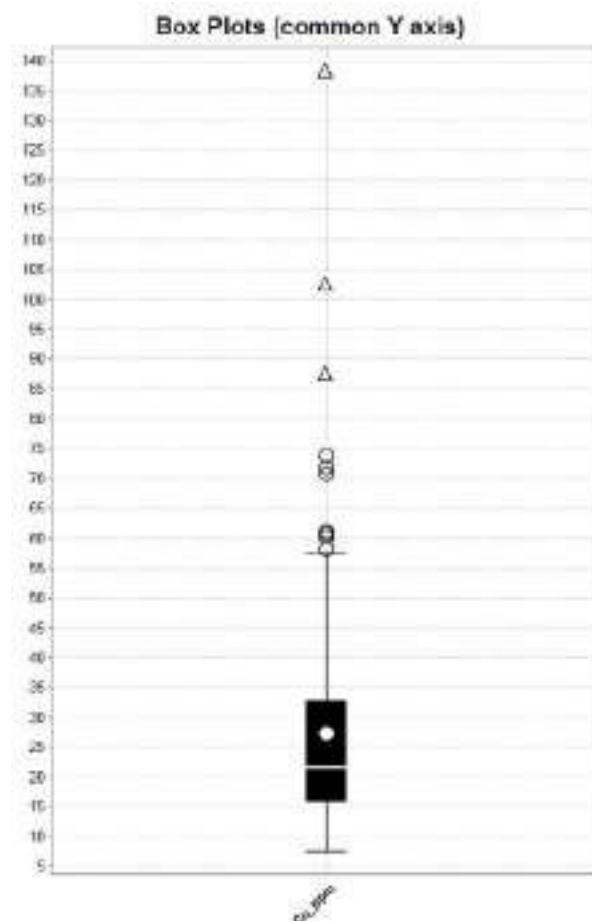


Figura 2-7. Box plot del cobre en las areniscas del Grupo Chicama y la Formación Oyón

2.4.4 Análisis de Dependencia y Relaciones Lineales

Herramientas estadísticas para evaluar correlaciones y reducir la dimensionalidad de los datos manteniendo su estructura esencial.

2.4.4.1 Análisis de Correlación de Pearson

El análisis de correlación de Pearson, también conocido como coeficiente de correlación de Pearson (r), fue desarrollado por el matemático-estadístico Karl Pearson a finales del siglo XIX como una medida estadística que cuantifica el grado de relación lineal entre dos variables cuantitativas. Su valor varía entre -1 y 1, donde +1 indica una correlación positiva perfecta (ambas variables aumentan juntas en una relación lineal perfecta), -1 indica una correlación negativa perfecta (una variable aumenta mientras que la otra disminuye en una relación lineal perfecta) y 0 indica la ausencia de correlación lineal entre las dos variables (Pearson, 1896). La fórmula se define como:

$$r = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2 \sum (y_i - \bar{y})^2}}$$

Esta fórmula mide la covarianza de las dos variables normalizada por el producto de sus desviaciones estándar, lo que permite interpretar el resultado independientemente de la escala de las variables.

2.4.4.2 Análisis de Componentes Principales (ACP)

ACP es uno de los métodos multivariados lineales tradicionales, fue desarrollado en términos geométricos por el matemático-estadístico inglés Karl Pearson en 1901 y desarrollado

más ampliamente en el álgebra lineal (autovalores y autovectores) por Harold Hotelling en la década de 1930. Esta técnica estadística multivariada permite a los usuarios reducir la dimensionalidad de las variables en menos grupos de variables no correlacionados llamados componentes principales (PC). Las interrelaciones entre múltiples variables, capturadas en una matriz de correlación, son la base para la reordenación de los datos en PC. Los PC del primero al último representan las proporciones más grandes a las más pequeñas de la varianza de los datos multivariados (Grunsky et al., 2014). El análisis de componentes principales (ACP) utiliza una transformación ortogonal para convertir un conjunto de variables inicialmente correlacionadas en un número menor de variables no correlacionadas (Jackson, 2005). Se han propuesto varios criterios para determinar el número óptimo de PC (Bartlett, 1951), pero el criterio más utilizado y el que se utilizó para esta tesis fue la “Regla de Kaiser” (por Kaiser, 1960) quien sugirió que los PC deben tener valores propios de al menos 1, esto se debe a que un PC con valor propio de >1 explica la varianza tanto como lo hace una sola variable, por lo que solo los PC con la propiedad de una sola variable son útiles para la interpretación (Piippo et al., 2022). Los componentes principales se pueden utilizar en métodos multivariados posteriores y mejorar los resultados de la agrupación ayudando a maximizar la similitud de las muestras (Filzmoser et al., 2009).

2.4.5 Técnicas de Agrupamiento y Reducción No Supervisada

Métodos no supervisados que permiten identificar patrones o grupos dentro de los datos sin necesidad de variables objetivo.

2.4.5.1 K-means clustering

Esta es una técnica multivariable, la cual se aplica a los Componentes Principales para identificar subgrupos de individuos u objetos en base a criterios de similitud en función de la distancia euclidiana. Su objetivo es representar las distintas agrupaciones naturales de la data en los mínimos grupos posibles (Wagstaff et al., 2001). Este método utiliza un proceso iterativo para encontrar el valor óptimo de K, que define el número de grupos predefinidos que deben crearse en el proceso, y la ubicación del centroide del grupo para maximizar la variación entre grupos y minimizar la variación dentro de los grupos. El número de clústeres, denotado como "K", es una decisión importante, ya que si se elige un K demasiado pequeño se podría perder detalles importantes en los datos, mientras que si se elige un K demasiado grande se podría terminar dividiendo grupos que en realidad son muy similares. El método utilizado para determinar el número óptimo de K ha sido el “método del codo” que determina los puntos de inflexión en una curva, este método consiste en trazar la suma de las distancias al cuadrado entre cada punto de datos y su centroide asignado para diferentes valores de K, busca el valor de K donde la disminución en la suma de las distancias al cuadrado se ralentiza y forma una curva similar a un codo (Kaiser, 1992). Dado que los datos geoquímicos son intrínsecamente complejos, los resultados de agrupación no necesariamente demuestran interrelaciones entre variables (Parsa et al., 2022), además que los resultados del agrupamiento deben combinarse con otros métodos para analizar e interpretar datos geoquímicos multivariados (Grunsky, 2010). Por lo tanto, en este estudio, los resultados del agrupamiento se combinan con los resultados del ACP para ayudar en la interpretación de este último.

2.4.5.2 Autodominios

Es un diagrama de clasificación a partir de grupos de datos, estos grupos pueden ser conocidos de antemano o generados mediante herramientas de clustering como K-means o Análisis de Proyección Discriminante. Los límites de los grupos se establecen mediante cálculos de Distancia de Mahalanobis que es una medida de distancia (ioGAS IMDEX, 2019). Su importancia utilitaria es que puede utilizarse para comparar dos variables aleatorias multidimensionales. La forma en que considera la correlación entre variables aleatorias es la diferencia de la distancia euclidiana (Mahalanobis, 1936). En esta tesis el gráfico de Autodominio representa la relación entre el PC1 y PC2, y la distribución espacial de los clústeres.

2.4.6 Métodos de Clasificación Supervisada

2.4.6.1 Análisis Discriminante

El Análisis de Proyección Discriminante (DPA) destaca el componente de proyección del análisis discriminante para producir salidas visuales para el análisis exploratorio de datos. Las muestras se proyectan en un espacio de dimensiones inferiores para mostrar mejor la separación entre grupos de manera gráfica. El DPA también puede utilizarse como una técnica exploratoria para indicar cuáles de las variables seleccionadas son más importantes para determinar la máxima separación entre grupos (ioGAS IMDEX, 2019). DPA es una técnica estadística multivariada que determina una proyección óptima de datos multivariados en un espacio de dimensiones inferiores para lograr la mejor separación entre grupos definidos por el usuario (Flury, 1997). La DPA utiliza un conocimiento a priori de las membresías del grupo para definir estas “reglas” o funciones de proyección. Estas funciones o proyecciones discriminantes (DP1, DP2, etc.) son combinaciones

lineales de las variables originales (es decir, concentraciones de elementos) que maximizan las diferencias entre los grupos predefinidos, permitiendo trazar las muestras en el espacio discriminante para que la separación entre grupos se pueda visualizar e investigar. El DPA también indica cuáles de las variables seleccionadas son las más importantes para determinar la separación máxima de grupo en función del tamaño del coeficiente de estructura (Nie et al, 2023).

2.4.6.2 Redes Neuronales Artificiales SOM

Es un algoritmo de entrenamiento no supervisado introducido por Teuvo Kohonen en 1986 que utiliza redes neuronales para producir una clasificación rápida de grupos dentro de un conjunto de datos (ioGAS IMDEX, 2019). Los SOM (Self-organizing map o mapas autoorganizados) son una técnica de aprendizaje no supervisado que se utilizan para reducir la dimensión de la información, identificar patrones y comportamientos comunes en los datos y realizar visualizaciones básicas en mapas bidimensionales de datos de espacios de mayor dimensión porque mantienen la topología original. Su objetivo es conservar la estructura del espacio original al tiempo que se representan conjuntos de datos de alta dimensión en un sistema de coordenadas, es decir, en el espacio de dimensión reducida que se forma, los puntos que están próximos en el espacio original permanecen próximos (Carpio, 2020). El algoritmo SOM contiene dos fases principales, la competitiva y la cooperativa. La primero intenta seleccionar la neurona que mejor se adapta, mientras que el segundo ajusta el peso del ganador y sus vecinos inmediatos de la red. Durante el procedimiento de entrenamiento SOM, se selecciona aleatoriamente un vector de muestra, luego se calculan las distancias euclidianas entre el vector de entrada y todas las neuronas. Con base en la minimización de la distancia entre una muestra y otros vectores ponderados, se calcula la mejor unidad de coincidencia (Hoffmann, 2005).

CAPÍTULO 3 . HIPÓTESIS Y VARIABLES

3.1. Hipótesis de la investigación

3.1.1 Hipótesis general

- ✓ ¿La aplicación de métodos estadísticos multivariantes en el análisis de datos geoquímicos de sedimentos de quebrada en el área comprendida entre los paralelos 9° y 10° latitud sur permite identificar nuevos blancos de exploración para depósitos minerales tipo pórfido-skarn-polimetálicos?

3.1.2 Hipótesis específicas

- ✓ ¿La distribución espacial de los elementos químicos en sedimentos de quebrada en el área de estudio muestra concentraciones y patrones específicos que indican potenciales áreas de mineralización?
- ✓ ¿Los métodos de agrupamiento y clasificación multivariable, como el K-means clustering y el análisis discriminante, permiten identificar asociaciones significativas entre elementos químicos y los tipos de mineralización presentes en el área de estudio?
- ✓ ¿Las redes neuronales autoorganizadas (SOM) son eficaces para identificar variaciones geoquímicas en el área de estudio, detectando posibles anomalías que puedan funcionar como guías para la exploración mineral?
- ✓ ¿Los elementos guía (pathfinders) identificados a partir del análisis estadístico presentan una correlación significativa con depósitos conocidos en el área, como

podría suceder con los datos de las minas Antamina y Contonga, mejorando así la precisión en la identificación de nuevos objetivos de exploración?

3.2. Variables

3.2.1 Variable independiente

Las concentraciones geoquímicas de elementos, concentraciones de diferentes elementos químicos (Au, Cu, Li, Mn, Zn, Ag, As, Bi, Cd, Ga, In, Mo, Pb, Sb, Sc, Tl y W).

3.2.2 Variable dependiente

Las anomalías geoquímicas que generan zonas de interés exploratorio.

3.3. Operacionalización de variables

3.3.1 Para la variable independiente

Se mide en ppm, donde las muestras fueron analizadas con los métodos ICP-MS (digestión de agua regia) para 52 elementos químicos y ensayo al fuego-absorción atómica para el elemento oro, y fueron es normalizadas con la transformación Center Log Ratio (CLR).

3.3.2 Para la variable dependiente

Anomalías geoquímicas detectadas mediante análisis estadístico univariable y multivariable, los criterios para considerar una anomalía son valores por encima del threshold. Para esto se usaron los programas Ms. Excel 2019, ArcGIS 10.8 y ioGAS (Reflex), que ayudaron a procesar los datos y representarlos especialmente.

CAPÍTULO 4 . GENERALIDADES DEL ÁREA DE ESTUDIO

4.1. Área de estudio

El área de investigación se localiza en la parte central del Perú, abarcando aproximadamente 11 000 km² entre los departamentos de Áncash y Huánuco, con extensiones menores hacia Pasco y Lima. Cartográficamente corresponde a los cuadrángulos de Yanahuanca (21j), Recuay (20i), La Unión (20j), Huari (19i) y Singa (19j), delimitándose entre las coordenadas WGS84 220000–340000E y 8840000–9000000N.

Desde el punto de vista geomorfológico, la región forma parte de la Cordillera de los Andes y se divide en tres unidades fisiográficas principales. La Cordillera Occidental, con rumbo NO–SE y alturas superiores a 6 600 msnm, se caracteriza por fuertes disecciones fluviales, pliegues, fallas inversas y la presencia de intrusivos mesozoico–cenozoicos. Los valles interandinos, ubicados entre 2 500 y 3 000 msnm, presentan morfologías en “V” producto de la erosión y tectonismo, recorridos por ríos como el Marañón, Pativilca, Mosna, Vizcarra y Chucpín, que marcan la divisoria continental entre las cuencas del Pacífico y del Atlántico. Finalmente, la Cordillera Oriental, con altitudes de 3 500–4 500 msnm, está conformada principalmente por rocas metamórficas neoproterozoicas del Complejo Marañón (Chira et al., 2008).

El acceso al área se realiza principalmente desde Lima a través de la Carretera Panamericana Norte, con desvíos en Huaura y Pativilca, que conducen a los principales centros poblados del área de estudio, como Chavín de Huántar, San Marcos, Huari, La Unión, Yanahuanca y Chiquián.

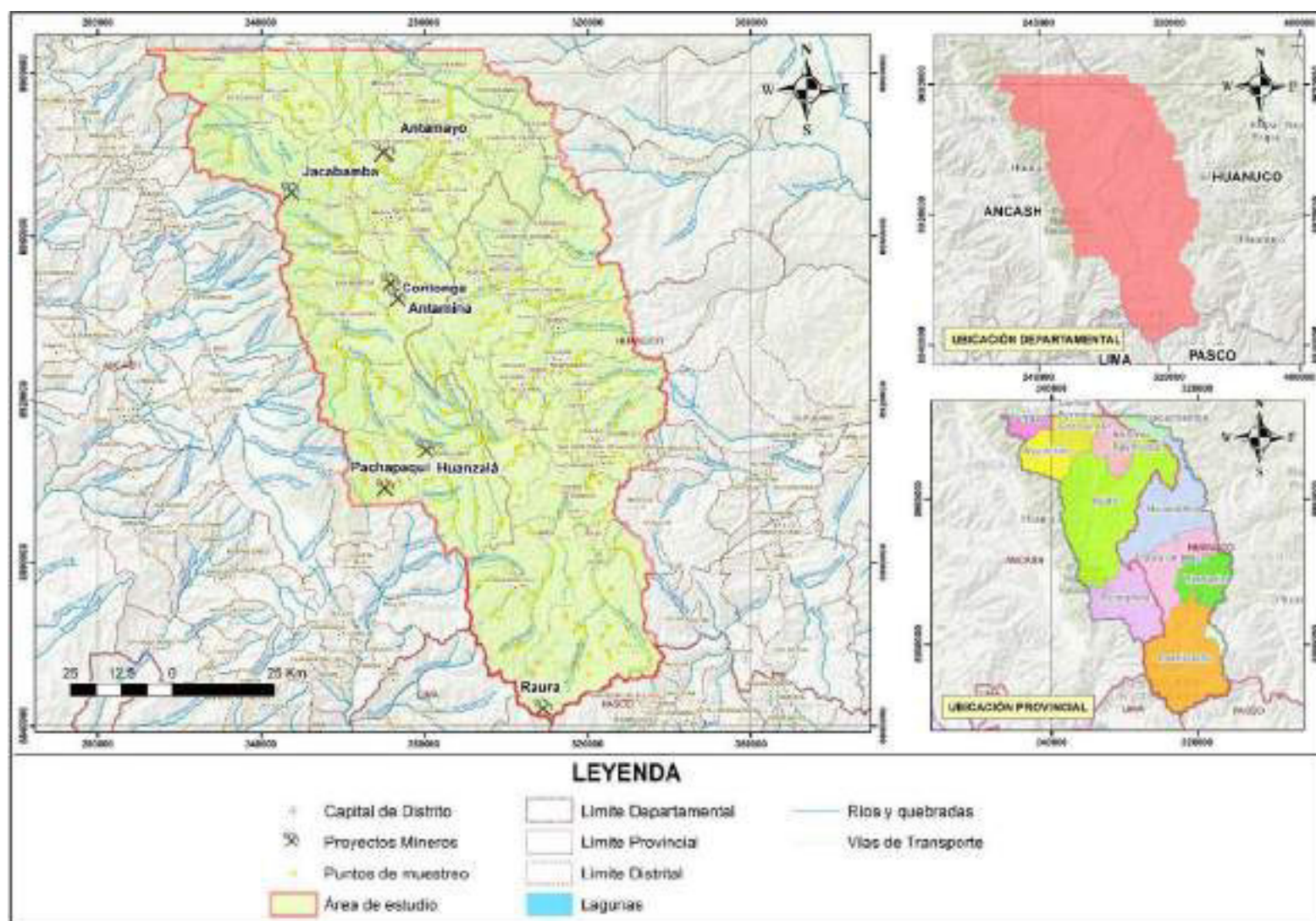


Figura 4-1. Ubicación zona de estudio

Los principales proyectos dentro del área de estudio son:

4.1.1 Jacabamba

El prospecto de molibdeno de Jacabamba fue descubierto en 1979 durante un programa de prospección geoquímica realizado por el INGEMMET en cooperación con la Misión Británica (IGS-ODA) en el marco del Proyecto Cordillera de Huayhuash. Se ubica en el flanco oriental del Batolito de la Cordillera Blanca, en la provincia de Huari (Ancash), a altitudes que varían entre los 4300 y 5500 m s.n.m (Mamani et al., 1983). Geológicamente, el área está dominada por rocas sedimentarias del Jurásico Superior-Cretáceo (Gpo. Chicama, Fm. Chimú, Fm. Santa y Fm. Carhuaz), fuertemente plegadas durante la orogenia andina, además de intrusivos asociados al Batolito de la Cordillera Blanca. Tres tipos de rocas intrusivas están presentes dentro del área, que se pueden clasificar en dos grupos: el grupo I son rocas entre pórfidos riodacíticos-dacíticos de alto nivel e intrusivos plutónicos granodioríticos-monzograníticos, el grupo II son rocas hipabisales y dioritas cuarzosas de composición tonalítica (Chirif et al., 2008). Se observa que las rocas del grupo I son contemporáneas del Batolito de la Cordillera Blanca que tiene su eje principal al oeste del área, este Batolito tiene una edad radiométrica alrededor 9 M.a (Cobbing et al., 1981). Las rocas del tipo I influyen en la mineralización que se ve en Jacabamba y otras localidades aledañas, por ejemplo, a 5 km al sur en el valle del río Rurichinchay, 20 km al NW en el prospecto de Mo California (Vidal Ingenieros, 1974) y 13 km al NNW en el pequeño proyecto cerca del pueblo Chacas (Bennet, 1981). Estos cuerpos intrusivos han generado un stockwork mineralizado que afecta tanto a las rocas ígneas como a los sedimentos encajonantes, con un desarrollo visible de aproximadamente 1,000 m de largo por 700 m de ancho, y ocurrencias aisladas que se extienden hasta 4 km hacia el norte (Mamani et al., 1983). La alteración hidrotermal reconocida se manifiesta

principalmente como asociaciones cuarzo-sericita-K y silicificación, variando en intensidad según el grado de fracturamiento de los intrusivos y la litología encajonante. En las areniscas del Gpo Chicama se observa transformación a cuarcitas, mientras que las lutitas aparecen blanqueadas y piritizadas (Mamani et al., 1983). La mineralización se encuentra dominada por pirita y molibdenita, dispuestas en venillas de cuarzo de hasta 1–2 mm de espesor, así como en disseminaciones y hojuelas en el cuarzo secundario. Los análisis preliminares de muestreo reportaron valores heterogéneos de molibdeno: entre 500 y 1,000 ppm en el 80% de las muestras, hasta 11,762 ppm (1.17% Mo) en las cuarcitas más mineralizadas. En contraste, los contenidos de cobre son bajos, entre 100 y 1,000 ppm (Mamani et al., 1983). El descubrimiento de Jacabamba constituye un ejemplo significativo de mineralización tipo stockwork asociada a intrusivos cuarcíferos, en un contexto estructural controlado por el emplazamiento del Batolito de la Cordillera Blanca.

4.1.2 Contonga

Contonga ubicado en el flanco oriental de la Cordillera Blanca a 4300 msnm se emplaza sobre un conjunto litológico dominado por calizas y margas del Cretáceo superior (formaciones Jumasha y Celendín), además de granodioritas y tonalitas del Neógeno, responsables de la mineralización al ponerse en contacto con las rocas carbonatadas (SUGLE, 2022). Las rocas intrusivas que cortan esta sucesión sedimentaria están orientadas en dirección NW-SE y se extienden a lo largo de 15 km. En el sector de Contonga (Contonga Stock) y al sur (Taully Stock) (Villareal y Rodríguez, 2009).

Estructuralmente, el área presenta un sistema de fallas con direcciones N30°-60°E, N60°-90°E y N300°-330°E-SE, las cuales afectan principalmente a las rocas carbonatadas. Estas

estructuras se asocian con fuerzas compresivas orientadas hacia N40°E, que han generado un plegamiento intenso con anticlinales y sinclinales de alto ángulo, así como pliegues volcados y disarmónicos (SUGLE, 2022). En cuanto a la mineralización, Contonga presenta dos estilos principales: skarn calcosilicatado y brechas mineralizadas. El skarn se desarrolla en el contacto norte de las rocas intrusivas con las carbonatadas y contiene pirita, esfalerita, galena, calcopirita, marmatita, cuarzo, calcita, bismutina, tetrahedrita y pirrotita. Las brechas mineralizadas, ubicadas en los contactos este y oeste, muestran una paragénesis similar, aunque con mayor presencia de minerales de plata, como galena argentífera y sulfosales poco diferenciados (SUGLE, 2022).

4.1.3 Antamina

El depósito de Antamina, ubicado en la parte central de los Andes del Perú, constituye el skarn de cobre-zinc más grande del mundo, con recursos estimados en aproximadamente 2,968 Mt con leyes de 0.89% Cu, 0.77% Zn, 11 g/t Ag y 0.02% Mo al año 2015 (Mrozek, 2018). El yacimiento presenta dimensiones cercanas a 2.5 km de longitud, 1.5 km de ancho y una extensión vertical superior a 2.2 km, manteniéndose abierto en profundidad. Los cuerpos mineralizados se hospedan principalmente en calizas y margas estructuralmente apiladas de las formaciones Cretácicas Jumasha y Celendín. La mineralización se asocia a la intrusión del Complejo Porfirítico de Antamina (APC), compuesto por cuatro centros intrusivos emplazados entre 10.95 ± 0.20 Ma y 10.24 ± 0.23 Ma, definidos mediante dataciones U-Pb en circón (Mrozek, 2018). El núcleo del yacimiento está formado por los centros Oscarina, Taco-Bornita y Usupallares, alineados en dirección NE-SO, mientras que el centro Condorcocha se ubica aproximadamente a 1 km al norte de Taco. La evolución magmática comprende al menos once fases intrusivas, agrupadas en tres principales: P1 (temprana, formadora de skarn), P2 (intermineral) y P3 (tardía). Los intrusivos P1

son los responsables directos de la formación de endoskarn y exoskarn, mientras que P2 y P3 cortan a las fases previas, mostrando relaciones de superposición mineral y textural. Las edades Re-Os en molibdenita definen dos pulsos de mineralización: uno inicial asociado a los skarns (10.58–10.39 Ma) y otro tardío en vetillas de molibdenita $\pm$ cuarzo (9.99–9.68 Ma), lo que evidencia que la actividad magmático-hidrotermal se prolongó aproximadamente 1.1 Ma (Mrozek, 2018). Los skarns de Antamina se desarrollan de manera concéntrica alrededor del complejo porfirítico, mostrando una zonación de alteración desde biotita potásica en el núcleo intrusivo, hasta endoskarn, exoskarn, mármoles blanqueados y estructuras de escape de fluidos en las zonas más distales. El gradiente mineralógico se refleja en cambios composicionales de granates (de andradita a grossularita) y piroxenos (hedenbergita a diópsido) a lo largo de la transición proximal-distal. La mineralización presenta un zonamiento metálico que progresa desde Mo $\pm$ Cu en los intrusivos centrales hacia asociaciones Cu-Ag-Bi-Zn-Pb en los skarns distales. Los principales minerales de mena son molibdenita, calcopirita, bornita y esfalerita, con menor galena y sulfuros de Bi-Ag (Mrozek, 2018). La preservación del depósito en un nivel favorable se atribuye a la combinación del emplazamiento de múltiples intrusivos fértiles a lo largo de una zona de falla de orientación NE, el levantamiento tectónico mioceno (~3.5 km) y la erosión glacial pleistocénica, que expusieron la parte superior del yacimiento (Mrozek, 2018).

4.1.4 Huanzalá

El yacimiento de Huanzalá, cercano a Pachapaqui, constituye uno de los depósitos polimetálicos más representativos del centro del Perú y un caso modelo para comprender la transición entre mineralización temprana tipo skarn y mineralización tardía tipo reemplazo carbonatado. Se encuentra en la Cordillera Occidental, en la región de Ancash, dentro de un marco

geológico controlado por rocas carbonatadas del Cretácico inferior y por intrusiones del Mioceno, en particular un stock de granodiorita porfirítica y sills de cuarzo pórfido (Suzuki & Hayashi, 2019). La mineralización se desarrolló en dos etapas principales: la primera corresponde a un evento temprano de skarn cuprífero–zincífero (con plomo subordinado), relacionado con la intrusión de granodiorita. Este estadio estuvo asociado a fluidos salinos de alta temperatura (300–>400 °C; >33 wt% NaCl eq.), que evolucionaron bajo condiciones de *rock-buffering*, lo que favoreció la formación de pirrotita y posteriormente pirita, además de una marcada variación en el contenido de FeS de la esfalerita (Suzuki & Hayashi, 2019), y la segunda etapa corresponde a la mineralización tardía, vinculada a intrusiones de cuarzo pórfido. Se caracteriza por un reemplazo hidrotermal de carbonatos con paragónita–sericitización, y por la formación de ensambles polimetálicos ricos en Zn–Pb–Cu (con Mn asociado). Los fluidos en este estadio fueron de menor salinidad (3–13 wt% NaCl eq.) y temperatura intermedia (140–290 °C), evolucionando bajo condiciones de *gas-buffering*, lo que controló la transición de pirita–bornita hacia calcopirita y modificó el contenido de FeS en la esfalerita (Suzuki & Hayashi, 2019). En conjunto, los cuerpos mineralizados presentan geometrías tipo mantos, lentes y cuerpos masivos, hospedados preferentemente en la Formación Santa (calizas del Cretácico) y subordinadamente en intercalaciones calcáreas de la Formación Carhuaz. Se extienden a lo largo de aproximadamente 4 km de rumbo y hasta 1 km de profundidad, controlados por sistemas de fallas de rumbo NW–SE y E–W. En términos metalogenéticos, el yacimiento evidencia una superposición de estilos: un skarn cuprífero inicial y un reemplazo polimetálico tardío, ambos ligados a la evolución de un mismo sistema porfirítico (Suzuki & Hayashi, 2019).

4.1.5 Pachapaqui

La Unidad Minera Pachapaqui corresponde a un depósito de tipo hidrotermal polimetálico (Zn-Pb-Ag-Cu), cuyo principal yacimiento económico se encuentra alojado en la Formación Pariahuanca. La roca encajonante está compuesta principalmente por calizas, y la mineralización se asocia al magmatismo extrusivo e intrusivo terciario (SRK Consulting, 2016). La mineralización se presenta en diferentes estilos, principalmente mantos, brechas y vetas, los cuales se desarrollaron a lo largo de sistemas de fallas que funcionaron como conductos para los fluidos hidrotermales. Los mantos se emplazan paralelos al plano de estratificación en las zonas de falla. Asimismo, hacia el noreste de la mina se han identificado cuerpos de skarn asociados a granodioritas, caracterizados por un metamorfismo de bajo grado, aunque sin valores económicos reportados hasta la fecha (SRK Consulting, 2016). Desde el punto de vista estratigráfico, el área está conformada por dos grandes secuencias. La primera corresponde a una secuencia inferior integrada por areniscas, cuarcitas, lutitas y calizas de las Formaciones Chimú, Santa y Carhuaz, que constituyen el Grupo Goyllarisquiza. La segunda es una secuencia superior compuesta por facies calcáreas (calizas, margas y lutitas calcáreas) pertenecientes a las Formaciones Pariahuanca, Pariatambo y Jumasha (SRK Consulting, 2016). La evolución tectónica del área estuvo influenciada por la actividad intermitente a lo largo de fallas mayores originadas al final de la orogenia paleozoica, las cuales condicionaron posteriormente la depositación sedimentaria mesozoica en cuencas desarrolladas a partir de bloques fallados de la corteza. Estos depocentros recibieron sedimentos derivados tanto del bloque Marañón como del cratón brasileño (SRK Consulting, 2016). En términos de recursos y reservas, se ha estimado un total de 9,056 kt con una ley media de Zn equivalente (Zneq) de 8,43%, de los cuales 5,795 kt corresponden a reservas probadas (Zneq 8,34%) y 3,261 kt (36%) a reservas probables. Las leyes promedio son: Zn 3,40%,

Pb 1,42%, Ag 55,58 g/t y Cu 0,44%. Considerando una producción proyectada de 2,500 TMD y un régimen de 350 días de operación anual, la vida útil del yacimiento se calculó en aproximadamente 11 años, ya que la operación minera incrementa progresivamente su producción en los primeros años (SRK Consulting, 2016).

4.1.6 Antamayo

El proyecto Antamayo se localiza en la faja plegada y cabalgada del Marañón, en la parte oriental de la Cordillera Occidental del Perú. La mineralización se hospeda principalmente en calizas cretácicas de la Formación Jumasha, afectadas por el emplazamiento de múltiples intrusivos intermedios a félsicos en forma de diques, sills y pequeños stocks. Estos intrusivos generan aureolas de alteración con desarrollo de hornfels, mármol y skarns de diopside–granate en facies progradantes, posteriormente sobreimpresos por ensambles retrogradantes de clorita, smectita, calcita, pirrotita, esfalerita y calcopirita (Redwood, 2014). Las edades isotópicas de Antamayo (46.4–45.3 Ma, Eoceno Medio) son más antiguas que las de depósitos vecinos como Antamina (10–9 Ma) y Magistral (15–14 Ma), pero comparables con grandes depósitos cupríferos del sur del Perú y norte de Chile. La mineralización se presenta tanto en los intrusivos (pirita, calcopirita, pirrotita, galena, esfalerita) como en las calizas alteradas (calcopirita, esfalerita, pirrotita, pirita, magnetita, galena, marcasita y molibdenita). El modelo exploratorio considera a Antamayo como la parte superior de un sistema pórfido–skarn tipo Antamina, con intrusivos que generaron un halo metamórfico extenso y una segunda fase hidrotermal que produjo mineralización porfirítica, endoskarn y exoskarn (Redwood, 2014). Se interpreta que la zona mineralizada principal se ubicaría entre los sectores Huinchos y Chequiacocha, donde perforaciones profundas han identificado amplios intervalos con anomalías de Cu, Zn, Ag y Mo,

aunque el sistema aún no ha sido erosionado lo suficiente para exponer cuerpos mayores de skarn o pórfido. En consecuencia, el objetivo de exploración en Antamayo corresponde a un skarn cálcico cuprífero con créditos de Zn–Ag–Mo, vinculado a un pórfido cuprífero oculto (Redwood, 2014).

4.2. Metalogenia

El área de trabajo se ubica en la Cordillera Central del centro del Perú entre los paralelos 9° y 10°, la cual es caracterizada por las Franjas Metalogenéticas: XXII Franja de depósitos de W-Mo-Cu relacionados con intrusivos del Mioceno superior, XX Franja de Pórfidos de Cu – Mo (Au), Skarns de Pb-Zn-Cu (Ag) y depósitos polimetálicos relacionados con Intrusivos del Mioceno y XVII Franja epitermales de Au-Ag del Eoceno y depósitos polimetálicos del Eoceno-Oligoceno-Mioceno (Acosta, 2020).

4.2.1 Franja de epitermales de Au-Ag del Eoceno y depósitos polimetálicos del Eoceno-Oligoceno-Mioceno (XVII)

Está situado en la Cordillera Occidental del Perú medio (9°-14°). Debido a la existencia de diferentes tipos de depósitos metálicos, incluyendo skarns de Pb-Zn-Cu, epitermales de Au-Ag, pórfidos de Cu-Mo y depósitos polimetálicos de Pb-Zn (Ag) asociados a intrusiones, este cinturón es conocido por estar entre los más complejos (Acosta et al., 2020). Tres episodios magmáticos ocurridos entre 39 y 33 Ma (Eoceno), 31 y 25 Ma (Oligoceno) y 20 y 10 Ma (Mioceno) están asociados a estos depósitos. De manera similar, secuencias carbonatadas del Triásico superior-Jurásico Inferior del Grupo Pucará, como los depósitos de El Porvenir (Milpo), Atacocha, Raulito, Rondoní, Patashmina y Huancamina, así como el pórfido-skarn de Vinchos, están en contacto con

depósitos de Cu-Mo de tipo pórfido, como Pariajirca y skarns de Pb-Zn-Cu. Asimismo, las vetas de Pb-Zn-Cu, como Machcán y otras, están asociadas a las intrusiones oligocenas. Las edades radiométricas K/Ar reportados, 29-26 Ma sería la edad metalogénica para los depósitos de Pb-Zn-Cu por (Soler y Bonhome, 1988). Por el contrario, las mineralizaciones de Pb-Zn-Cu, incluidos los yacimientos de Anita, Asunción, Chanchamina y otros en el Perú central, están vinculadas a intrusiones miocenas que datan de hace menos de 20 millones de años (Acosta et al., 2020).

4.2.2 Franja de pórfidos de Cu-Mo (Au), skarns de Pb-Zn-Cu (Ag) y depósitos polimetálicos relacionados con intrusiones del Mioceno (XX)

Se sitúa en la Cordillera Occidental del norte y centro de Perú (5°-12°). Está caracterizada por las fallas y cabalgamientos NW-SE de los sistemas Punre-Canchis-Magistral y Chonta, que juntos conforman la faja plegada y cabalgante del Marañón (MTFB). Este cinturón presenta tres eventos magmáticos relacionados con la mineralización, estimados en 22-20 Ma, 18-13 Ma y 10-5 Ma, estos eventos magmáticos se manifiestan por el emplazamiento intrusivo de stocks calcoalcalinos a alcalinos de diorita a granodiorita (Acosta et al, 2020). El intrusivo de 10-5 Ma, controlado por el dominio de las fallas del sistema de Chonta en contacto con rocas calcáreas del Cretácico (9°-12°30'), presenta skarns y cuerpos de reemplazamiento de Cu-Zn y Pb-Zn-Ag, como Antamina, Huanzalá, Pachapaqui, Raura, Ucchuchacua, Huarón, Yauricocha, entre otros (Chirif, 2008).

4.2.3 Franja de depósitos de W-Mo-Cu relacionados con intrusivos del Mioceno superior (XXII)

Está situado en la Cordillera Occidental del centro-norte de Perú entre los paralelos 8°-10°. La mineralización de Cu-W se asocia al granitoide de la Cordillera Blanca, cuyo emplazamiento está controlado por fallas NO-SE y N-S del sistema de la Cordillera Blanca. Los depósitos más representativos son Pasto Bueno, Nuevo Mundo, Nueva California, Jacabamba y Señor de la Soledad. Las estructuras mineralizadas presentan principalmente geometrías de vetas con contenidos variables de cuarzo y cobres grises, y también la ocurrencia de algunos depósitos de pórfidos. Las edades de mineralización se registran entre 9 y 6 Ma. Los mapas de isovalores que se generaron a raíz del análisis de sedimentos de corriente apoyan la idea de que el Batolito de la Cordillera Blanca se comporta como una gran provincia metalogénica con anomalías de Cu-W-Mo + U (Chirif, 2008).

4.3. Geología regional

Dentro del área de estudio se observa la presencia de pizarras, esquistos y filitas marrón a grises del Complejo Maraón seguidas de las calizas del Grupo Pucará, sobre estos carbonatos se superponen areniscas y lutitas gris oscuras del Gpo. Chicama del Jurásico superior y limolitas-lutitas grises oscuras de la Fm. Oyón del Cretácico Inferior. Se observa a continuación la deposición en el Berriasiano-Aptiano de una secuencia silicoclástica mayor compuesta de areniscas deltaicas-marinas someras con lutitas y calizas conocidas como el Grupo Goyllarisquizga. Estas fueron sucedidas de manera transgresiva por una secuencia marina de margas y calizas de aguas someras, de alta energía y cercanas a la costa del Albiano inferior a medio, pertenecientes a las formaciones Pariahuanca y Chúlec (Benavides, 1999). Esta

transgresión culminó con la deposición de los carbonatos fétidos anóxicos de aguas más profundas de la Formación Pariatambo del Albiano medio, al norte y noreste de Antamina, la sucesión del Albiano inferior y medio se vuelve más rica en margas y se asigna a la Formación Crisnejas, el equivalente lateral de las formaciones Chúlec y Pariatambo (Love et al., 2004). A finales del Albiano medio finaliza el evento anóxico de la Fm. Pariatambo e inicia un levantamiento regional y el desarrollo de una inconformidad significativa (Tejada, 2003). Después de este evento compresivo, comenzó un nuevo ciclo sedimentario con la deposición de la Fm. Jumasha del Albiano tardío que es una unidad marina de calizas de aguas someras de 1500 m, seguida por una transgresión marina de corta duración y la deposición de las calizas de aguas más profundas de la Formación Celendín (Benavides, 1999), y hacia el tope de la columna estratigráfica tenemos a la Fm. La Unión que consta de conglomerados polimícticos gruesos en una matriz arenosa del Pleistoceno (Chira et al., 2008).

4.3.1 Complejo Metamórfico del Marañón

Según Dalmayrac (1978), existían tres etapas tectónicas primarias que podían distinguirse principalmente por su grado estructural. Las filitas y los esquistos pardos a verdes constituyen la mayor parte de la litología. Los minerales más comunes encontrados en los esquistos del Complejo del Marañón son cuarzo, biotita, moscovita, clorita, anfíbol y feldespato potásico. Estos esquistos son típicamente de color verde a gris azulado y se encuentran principalmente en los cuadrángulos de La Unión y Yanahuanca (Chira, et al, 2008).

4.3.2 Grupo Chicama

Antiguamente conocida como Formación Chicama está constituida por lutitas marinas piríticas de color entre gris oscuro y negro, junto con intercalaciones de arenisca que siguen una tendencia andina. (Wilson y Reyes, 1964; Reyes 1980; Tejada, 2003). Su afloramiento más prolongado conforma el núcleo y flanco este de la Cordillera Blanca y se extiende hacia el sur hasta el río Pumapampa (Cobbing et al., 1996). Esta secuencia silicoclástica del Titoniano-Berriasiano fue clasificada como Grupo Chicama (Jacay, 1992; Jaillard y Jacay, 1989) y se formó como consecuencia de un evento tectónico (Jaillard et al, 1990), una fuerte subsidencia que dio lugar a un relleno turbidítico muy rápido de la cuenca Chicama (Jacay, 1992). La presencia de estratos de arenisca y el contenido orgánico en lutitas señala condiciones deltaicas, sin embargo, la abundancia de lutitas al oeste del afloramiento, así como la presencia de fauna pelágica y la abundancia de piritita en lutitas, sugiere un ambiente de aguas profundas-reductoras (Cobbing et al., 1996). Se estima un grosor aproximado de 1000-1500 m (Wilson, 1967), sin embargo, un espesor de más de 2000 m ha sido observado en los flancos de un anticlinal en el río Pativilca al SE de Chiquián.

4.3.3 Formación Oyón

Según la litología, esta formación se compone de limolitas, lutitas grises oscuras en estratos finos de 5-30 cm intercaladas con areniscas pardo-amarillentas, grises a grises claras en los estratos más gruesos, con los que puede intercalar niveles de carbón. Se encuentra predominantemente al este de la Cordillera Blanca y en ambos flancos de la Cordillera de Huayhuash (Cobbing et al., 1996). Su espesor fue descrito con una potencia de 100 m (Wilson, 1963), sin embargo, posteriormente

fue reseñada con ocurrencia en las zonas axiales de pliegues anticlinales y con un aproximado de 400 m de espesor (Cobbing et al., 1996). Se le ha atribuido una edad Valanginiana. (Wilson, 1963)

4.3.4 Grupo Goyllarisquizga

Está tipificada por areniscas siliciclásticas del Cretácico inferior, que se organizan en dos fuertes secuencias: una superior formada por facies de llanura deltaica anastomosada y otra inferior con gruesos bancos que reaccionan a la sedimentación de canales intercalados (Jacay, et al. 1997). El grupo Goyllarisquizga es una secuencia deltaica de areniscas marinas poco profundas con lutitas y calizas menores (Tejada, 2003), en sus facies de cuenca, se presenta como una potente secuencia de sedimentos, aproximadamente de 1000 m de grosor, mientras que en las facies de plataforma apenas alcanzan un máximo de 250 metros de potencia, afloran en las partes bajas del flanco occidental del valle del Marañón. En su gran mayoría el Grupo Goyllarisquizga ha sido depositado en un ambiente deltaico y playero con fuerte fluidez de aguas bien oxigenadas y de turbulencia, a excepción de la Fm. Santa y niveles inferiores de la Fm. Carhuaz que representa una transgresión marina con niveles de pocas profundidades (Reyes, 1967).

4.3.5 Formación Chimú

Su litología consiste en una alternancia de areniscas cuarzosas, cuarcitas, lutitas y, ocasionalmente, niveles de carbón en la parte inferior y de una potente secuencia de cuarcitas blancas, en bancos gruesos, en la parte superior. Tiene una edad asignada al Valangiano (Wilson y Reyes, 1964; Reyes 1980). Sus afloramientos se destacan nítidamente en la topografía por su dureza y estructuras, originando farallones (promontorios rocosos; Reyes, 1980). Toda la serie de

esta formación puede encontrarse desde 600 metros al sur hasta 100 metros al norte de los cuadrángulos Huaraz, Recuay, La Unión, Chiquián y Yanahuanca. (Chira, et al, 2008).

4.3.6 Formación Santa

Esta unidad está concordante con la Formación Chimú y se compone principalmente de calizas gris azuladas, con el potencial de mostrar chert gris oscuro a blanco. Se le asigna una edad del Valanginiano superior. Situado entre las areniscas de la Formación Chimú y las pizarras de la Formación Carhuaz, es un horizonte marcador particularmente valioso desprovisto de fósiles. Tiene un espesor casi constante de 100 a 150 metros en la región de trabajo (Huaraz-Chiquián) (Chira, et al, 2008).

4.3.7 Formación Carhuaz

Se ubica en concordancia con la formación Santa en el cuadrángulo de Huaraz y tiene una altura de 600 metros al oeste del Callejón de Huaylas. Su litología consiste en cuarcitas finas y areniscas pardas que se disponen en estratos delgados con numerosas intercalaciones de arcillolitas (Cobbing, 1978). Sobresale entre los cuadrángulos La Unión y Yanahuanca, adyacente al bloque Marañón (Wilson y Reyes, 1967). La edad es Valanginiano (Benavides,1956).

4.3.8 Formación Pariahuanca (o Formación Inca)

Esta formación está compuesta por capas cuarcíticas, lutitas ferruginosas y areniscas calcáreas que se intercalan gradualmente; descansa debajo de la Formación Chúlec y yace concordantemente sobre la Formación Carhuaz (Reyes, 1980). Este bloque estratigráfico tiene un espesor de 100 m en los Andes Centrales, mientras que otros autores reportan un espesor de más

de 400 m en la Cordillera de Huayhuash (Chira, et al, 2008). Se asignaron edades del Aptiano superior y Albiano inferior. (Benavides,1956).

4.3.9 Formación Chúlec

Esta formación, que se compone de calizas, margas, lutitas y areniscas calcáreas bien estratificadas en capas finas a medias, descansa concordantemente sobre el Grupo Goyllarisquizga. Su espesor es de 100 m, pero disminuye a menos de 50 m en la Cordillera de Huayhuash (Wilson y Reyes, 1964; Reyes, 1980). Debido a su espesor, está representada en la región de investigación junto con la formación Pariatambo (Chira et al., 2008). Sobre la base del descubrimiento de Parahoplites, fue categorizada como perteneciente al Albiano inferior.

4.3.10 Formación Pariatambo

Esta formación, paralela a la Formación Chúlec, tiene un espesor constante de 100 m pero puede alcanzar los 500 m en la Cordillera de Huayhuash. Está compuesta principalmente por arcillolitas negras con intercalaciones calcáreas y margas pardas oscuras que tienen mal olor en fracturas frescas; también contiene algunos derrames volcánicos de composición basáltica que afloran al oeste de Llamellín (Chira, et al, 2008). Podemos situarla en la mitad superior del Albiano medio basándonos en la fauna de Oxytropidoceras y Lyelliceras (Benavides, 1956).

4.3.11 Formación Jumasha

La Fm. Jumasha es principalmente calcárea, se extiende a lo largo de la cordillera occidental del centro del Perú entre Ancash y el norte de Huancavelica. Esta unidad fue definida en 1924 por McLauhlin en el poblado de Jumasha y en la laguna Punrún-Pasco, y ha sido

estudiada a lo largo del tiempo por diversos autores debido a que es un importante metalotecto que alberga depósitos polimetálicos de Au, Ag, Cu, Zn entre otros. La Fm. Jumasha representa a las facies de plataforma de las rocas calcáreas del Cretácico Superior que fueron depositadas en un mar abierto, amplio y de poca profundidad (Reyes, 1967). Está compuesta por calizas y algunas dolomías de grano fino a medio que tienen un color gris amarillento. Adicionalmente, contiene conglomerados intraformacionales, los cuales han sido encontrados en las inmediaciones de Mirgas y Llamellín (Chira, et al, 2008). La Formación Jumasha se sitúa entre las formaciones Celendín (Coniaciense-Santonense) y Pariatambo (Albiense medio), abarcando desde el Albiense superior hasta el final del Turoniense (110 - 90 Ma aproximadamente). La base del Jumasha generalmente está bien definida por el cambio entre calizas y margas muy bituminosas y fosilíferas de la Fm. Pariatambo, y las calizas macizas gris algo oscuras del inicio de la Fm. Jumasha. Este contacto corresponde muy probablemente a un hiato sedimentario por ausencia de parte del Albiano. En cambio, la posición del límite superior formacional es menos clara. En el Perú central, la regresión del Albiano superior- Cenomaniano medio está asociado a una tectónica sinsedimentaria correspondiendo a la parte inferior de la Fm. Jumasha, y la Fm. Jumasha Medio representa una transgresión (Cenomaniano medio superior – plataforma carbonatada del Turoniano), sin evidencias de influencia detrítica durante el Cenomaniano (Jaillard, 1986).

Esta formación es la encargada de hospedar la mineralización de Antamina que es la mina más importante dentro del área de trabajo, es aquí donde la mineralización de Zn-Cu es más probable que ocurra en la Formación Jumasha Superior, mientras que la mineralización de Cu-Zn es más probable que ocurra en la Formación Jumasha Media, aunque en concentraciones más bajas (Paz et al., 2015).

4.3.12 Formación Celendín

Según Benavides (1956), esta unidad yace encima de la Formación Jumasha y debajo de la Formación Chota en un contacto gradacional. Esta formación está constituida de margas azul-azuladas y amarillo-beige con gruesos bancos de yeso, laminación horizontal y finas y abundantes evidencias de reptación de anélidos en niveles específicos (Chira, et al, 2008). La Formación Celendín tiene entre 100 a 300m de potencia y cierra el ciclo marino del Cretácico superior. Su facie más arcillosa se extiende hasta el Perú central y se le asigna una edad entre Coniaciano-Santoniano (Wilson, et al. 1967).

4.3.13 Formación La Unión

Los ríos Nupe y Vizcarra atraviesan este afloramiento, situado entre Baños y La Unión. Está formado por una serie de conglomerados polimícticos gruesos en una matriz arenosa. Ocasionalmente se observan estratos de arenisca de grano grueso de color gris a marrón claro. Está datada en el Pleistoceno, y las actividades de deglaciación pueden haber sido su origen. Se ha previsto un máximo de 250 m, y su espesor varía en función de las peculiaridades del paleorrelieve (Chira, et al, 2008).

4.3.14 Depósitos Morrénicos

Estos depósitos presentan una morfología de relieve suave que consiste en crestas y colinas con material débilmente estratificado, heterogéneo y heterométrico. Son el resultado del movimiento glaciario más reciente. Según Chira et al. (2008), se encuentran en los cuadrángulos de Yanahuanca (21j) y Recuay (20i).

4.3.15 Depósitos glaciofluviales

Debido a la actividad glaciaria previa, predominan en la zona y se encuentran principalmente en las regiones más bajas de los valles glaciares y en las proximidades de lagunas con nombres similares. El lado norte de la laguna Lauricocha contiene un ejemplo clásico de estos depósitos (Chira, et al, 2008).

4.3.16 Depósitos aluviales

Los clastos redondeados y angulosos de material erosionado polimíctico, que se acumulan en las laderas junto a los macizos rocosos o a lo largo del recorrido de los ríos, constituyen estos depósitos de material reciente. Con este material erosionado se han creado terrazas que, debido a la alta concentración de materia orgánica, han generado zonas pantanosas de material fino y de color oscuro cerca de las lagunas (Chira, et al, 2008).

4.4. Rocas Ígneas

4.4.1 Batolito de la Cordillera Blanca

El Batolito de la Cordillera Blanca constituye un extenso cuerpo intrusivo generado durante la actividad magmática de los arcos Calipuy (24–10 Ma) y Negritos (10–3 Ma), en el Mioceno. Su emplazamiento estuvo controlado principalmente por sistemas de fallas regionales con rumbo NO-SE (Chávez et al., 2010). Este Batolito se extiende por aproximadamente 200 km de longitud dentro de la cuenca hidrográfica del río Santa. En su sector sur predominan rocas leucograníticas, acompañadas de escasos stocks de granodiorita tardía y aportes menores de tonalita–diorita. La litología se caracteriza por ser leucocrática y de grano más grueso que la observada en el Batolito

de la Costa. Algunos stocks que exhiben estas características, como los de Aquia, Llaella, Cajatambo y Churín, son considerados representativos del Batolito de la Cordillera Blanca (Chirif et al., 2008). En diversos sectores, la granodiorita muestra transiciones graduales hacia anfibolitas, producto de la contaminación magmática con material derivado del Grupo Chicama. En ciertos casos, aún es posible reconocer la morfología de los xenolitos parcialmente digeridos, mientras que en otros se observa una anfibolita homogénea y uniforme. Aunque su presencia es relativamente común, no representa un componente volumétricamente significativo (Rivera, Chira, Chacón, Gonzales, & Gonzales, 2015). En cuanto a la cronología, se han reportado edades entre 4.6 y 16 Ma mediante dataciones K-Ar en biotitas (Cobbing et al., 1996), mientras que análisis U-Pb (Pitcher et al., 1985) indican un rango más restringido de 9–12 Ma, correspondiente al Mioceno medio–superior.

Desde el punto de vista geoquímico, las rocas intrusivas del Batolito exhiben firmas adakíticas, caracterizadas por cocientes elevados de Sr/Y y Ce/Y. Esto refleja un emplazamiento asociado a un importante engrosamiento cortical durante el Mioceno (Defant & Drummond, 1990; Chávez et al., 2010). Particularmente, las muestras datadas entre 15 y 8 Ma presentan los valores más altos de Ce/Y (0.1–9), en contraste con los registrados en otros segmentos como Cajamarca o Cordillera Negra (Ce/Y = 0.1–7) y Santiago de Chuco (Ce/Y = 0.1–4), lo que evidencia la evolución del magmatismo en cámaras profundas e intermedias con fraccionamiento de granate–anfíbol (Mantle & Collins, 2008). En conjunto, la información geológica, geoquímica y geofísica demuestra que el Batolito de la Cordillera Blanca corresponde a un episodio de magmatismo félsico vinculado al engrosamiento y maduración térmica de la corteza durante el Mioceno. Asimismo, su emplazamiento coincide espacialmente con zonas favorables para la formación de

yacimientos metálicos, en especial de Au y Au–Ag, asociados a los arcos Calipuy y Negritos (Ordoñez et al., 2012).

4.4.2 Stocks de alto nivel

Este grupo de intrusiones se presenta por lo general en la parte sur del Batolito de la Cordillera Blanca y habitualmente entre los 4000 msnm. Estas intrusiones se presentan generalmente en forma de stocks y también como diques. Los stocks generalmente tienen un área entre 4-10 km^2 , una de sus características más destacadas es que son muy similares en muestras de mano. La ubicación de estos stocks se llevó a cabo principalmente a lo largo de fallas principales, en general, estos stocks son muy pequeños y se encuentran en áreas de control estructural. Se cree que estos stocks son los principales responsables de la mineralización en la Cordillera Occidental, donde la mayoría de los depósitos bien conocidos están relacionados con este tipo de intrusiones (Chirif et al., 2008). Algunos ejemplos de estos stocks son Hacienda Rumasca, Pira, Huanchay, Ranracota, Mina Huinac, entre otros (Villarreal y Rodríguez, 2009).

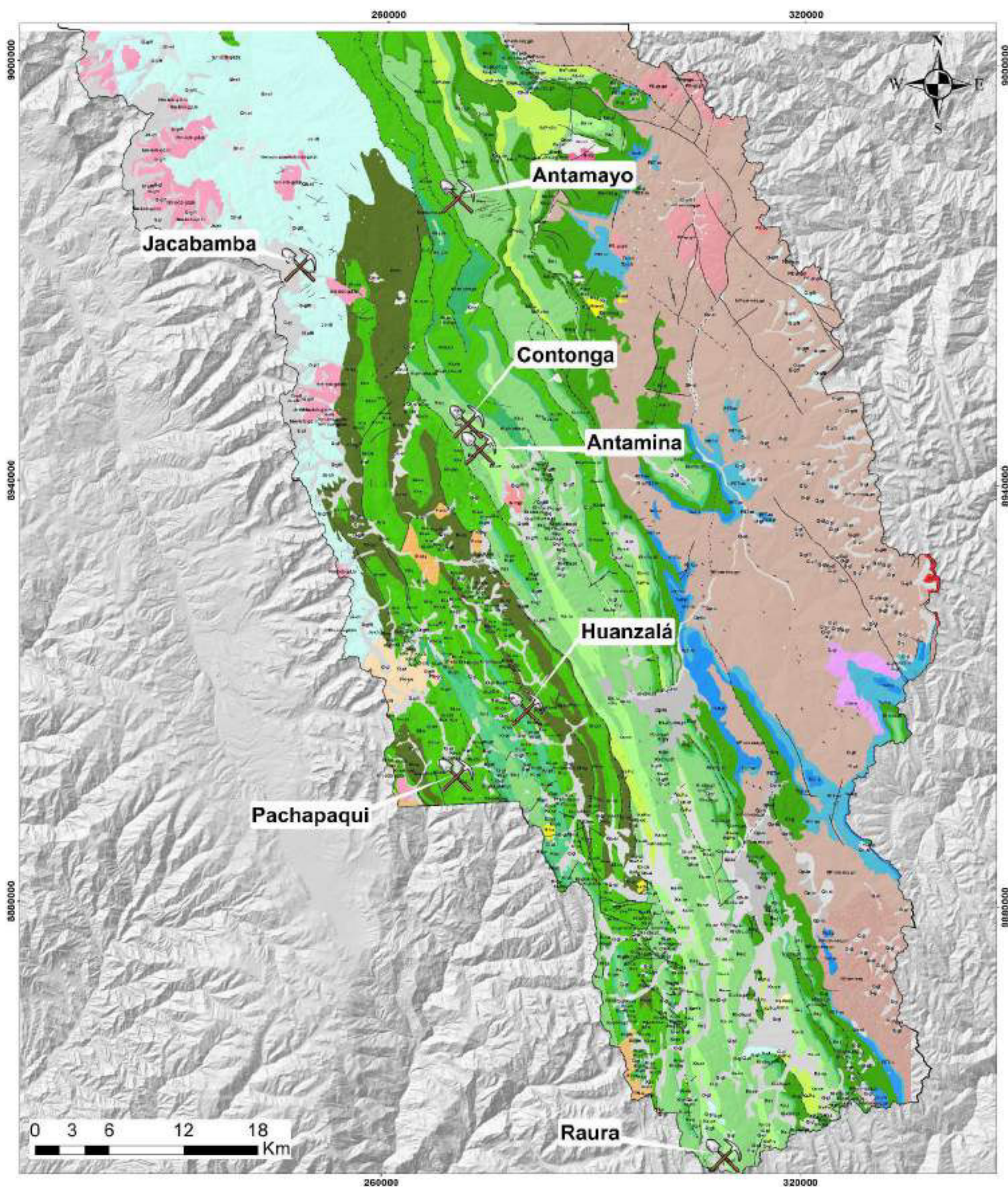


Figura 4-2. Mapa Geológico Regional. Tomado del GEOCATMIN-INGEMMET

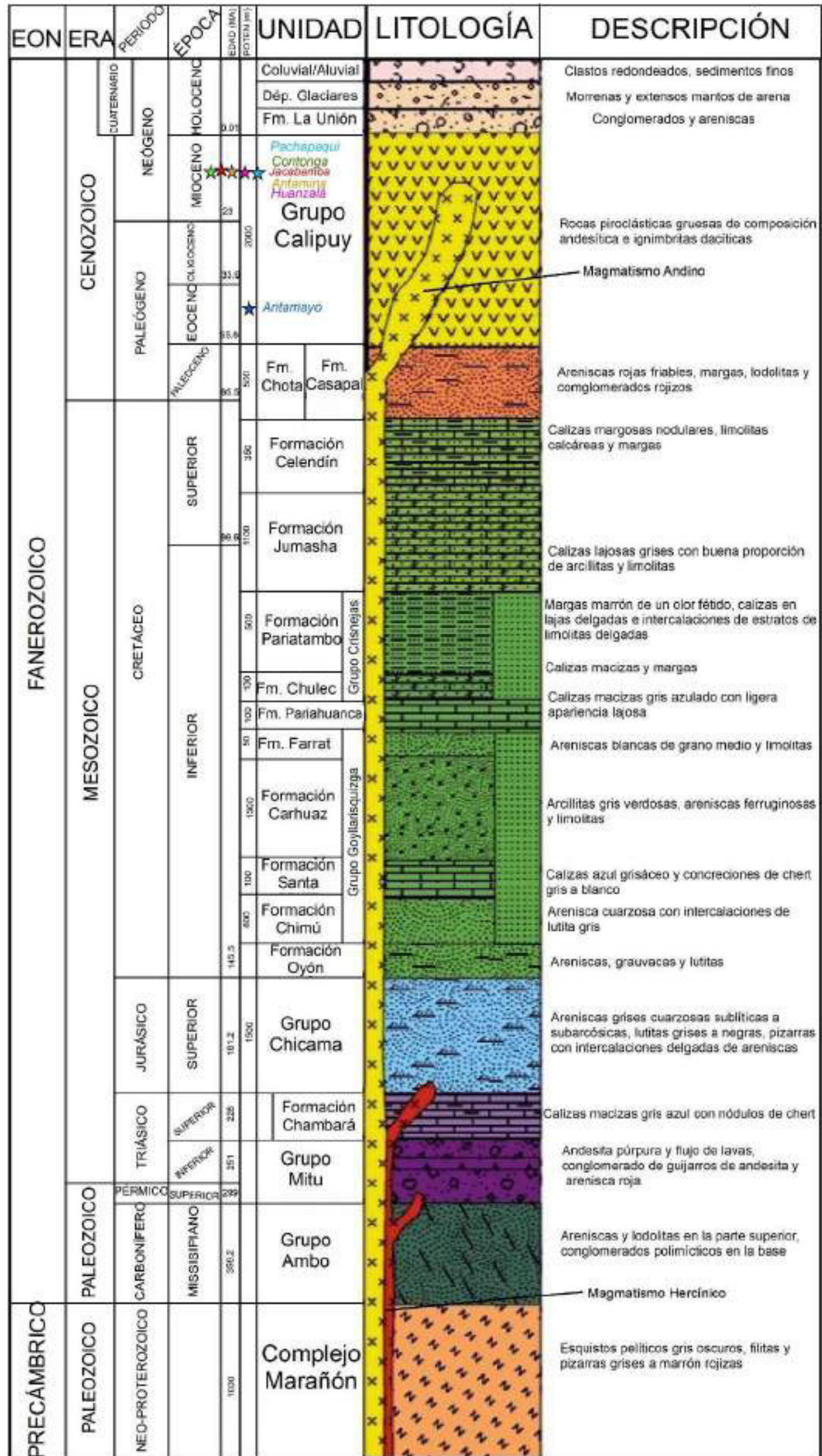


Figura 4-3. Columna estratigráfica generalizada. Modificado de Vásquez et al. (2009).

4.5. Geología Estructural

Dentro del área de estudio, se tienen afloramientos de sedimentos mesozoicos acumulados en el intervalo Jurásico superior-Cretácico dentro de la Cuenca Sedimentaria Mesozoica del Oeste Peruano y en el flanco oeste del Complejo Marañón. Tales afloramientos se agrupan en largas y apretadas estructuras sinclinales y anticlinales, llegando a la inversión de capas, intruidas por el Batolito de la Cordillera Blanca y afectadas por un sistema de fallas en bloques posterior a la deformación, denominado Cinturón de Pliegues de la Cordillera Occidental (Chira et al., 2008). El Cinturón de Pliegues de la Cordillera Occidental consiste en pliegues lineales y cabalgamientos que afectaron a los sedimentos del Mesozoico. Las principales características de este cinturón de pliegues son la deformación en los sedimentos de la Cuenca Sedimentaria del Oeste Peruano, que ocurrió principalmente por deslizamiento en las lutitas del Grupo Chicama y la Formación Oyón; las estructuras típicas son pliegues de lados empinados de 50-100 km de longitud, comúnmente limitados por fallas de cabalgamiento; los pliegues son generalmente asimétricos hacia el noreste en las áreas orientales y hacia el suroeste en los sectores occidentales; la deformación es más intensa a lo largo de los bordes noreste y suroeste del cinturón de pliegues; y la deformación ocurrió en una o más fases de la orogenia Incaica (Wilson et al., 1967; Cobbing, 1981). Este cinturón plegado fue a su vez afectado por la interacción con el Cinturón de Pliegues de la Cordillera Oriental, así como por la Provincia de Bloques de Fallas, que forma una franja larga y relativamente estrecha con dirección NO-SE, caracterizada por grandes desplazamientos verticales a lo largo de fallas de basamento inversas de alto ángulo (Wilson et al., 1967). Gran parte del área de estudio está formada por las secuencias jurásico-cretácicas del Grupo Chicama (lutitas marinas piríticas con intercalaciones de arenisca) y del Grupo Goyllarisquizga (areniscas deltaicas del

Cretácico inferior con lutitas y calizas subordinadas), cuyas estructuras presentan controles al oeste mediante tres sistemas de fallas inversas con buzamiento hacia el oeste: Tapacocha, Huacllán–Churín y Huaraz–Recuay; mientras que al este está limitada por dos sistemas de fallas inversas con buzamiento hacia el este: Cordillera Blanca y Chonta. En el sector Santa-Sihuas es el más importante desde el punto de vista metalogénico, donde existen depósitos de tipo pórfido, epitermal y vetas. Son muy pocos los depósitos que se asumen de origen singenético (Huanzalá); la mayoría de los depósitos son de origen epigenético. Se piensa que el principal motor de esta mineralización fue el magmatismo cenozoico (Grupo Calipuy y el stock relacionado con el Batolito de la Cordillera Blanca). La reducción de la secuencia sedimentaria en la cuenca Santa jugó un papel vital en la generación de estructuras plegadas con flancos fuertemente fracturados. Estas áreas favorecieron la circulación del flujo mineralizante y la generación de depósitos minerales. El mayor espesor de la Formación Santa (Grupo Goyllarisquizga) en la cuenca del mismo nombre favoreció el desarrollo de depósitos minerales tales como Huanzalá, Tuco Chira, Aija-Ticapampa, entre otros (Chirif et al., 2008).

CAPÍTULO 5 . METODOLOGÍA

5.1. Diseño de investigación

La investigación es cuantitativa no experimental, de tipo correlacional y descriptiva.

5.2. Población y muestra

5.2.1 Población

El presente trabajo se trata de una investigación experimental de análisis secundario de datos que conlleva a analizar y reevaluar datos con un enfoque metodológico diferente al que se usó inicialmente. Esta investigación se desarrolla en base a los datos obtenidos en el año 2006-2008 por el INGEMMET que realizó la campaña de prospección geoquímica en sedimentos de corrientes del proyecto «Prospección Geoquímica Regional entre los Paralelos 9°-10° Latitud Sur (Vertiente Atlántica)». En la campaña de prospección geoquímica se recolectaron 733 muestras de sedimento activo de corriente con una densidad de muestreo de $1/10 \text{ km}^2$. Los detalles del análisis químico y densidad de muestreo describen que las muestras fueron tamizadas a malla 200, se hizo análisis multielemental por los métodos ICP-MS (digestión de agua regia) para 52 elementos y ensayo al fuego-absorción atómica para el elemento oro (Chira et al, 2008).

5.2.2 Muestra

Se hizo el agrupamiento por similares características litológicas para poder hacer el análisis e interpretación, estas 3 divisiones son:

Tabla 5.1. *Tabla de poblaciones y número de muestras*

Categoría	Poblaciones	# Muestras
Principales	Chicama-Oyón	141
	Jumasha	153
	Gpo. Goyllarisquizga	153
Otros	Pariatambo - Pariahuanca	36
	- Chúlec - Crisnejas -	
	Chambará	
	Chota-Casapalca	19
	Mitu-Calipuy	16
TOTAL		518

Nota: Total de formaciones geológicas usadas para hacer comparaciones de resultados específicos y totales.

La división “Principales” (Chicama-Oyón, Jumasha y Gpo. Goyllarisquizga) se hizo en función a la litología de estas formaciones, mientras que el Total agrupa los principales dominios y otras formaciones de menor representación tales como Pariatambo, Pariahuanca, Chúlec, Crisnejas, Chambará, Chota, Casapalca, Mitu y Calipuy. El análisis del Total de las muestras se hizo para comparar un procesamiento de datos usando la separación de dominios por litologías dominantes y otro sin hacer esta discriminación de dominio.

5.3. Procedimiento, técnicas e instrumentos de recolección de información

Para este estudio los cálculos, tablas y gráficos presentados se realizaron con los programas Ms. Excel 2019 (Microsoft Office), ArcGIS 10.8 y ioGAS (Reflex). Los procedimientos estadísticos inician con la limpieza de datos que consta de la determinación del porcentaje de datos censurados, eliminación de valores atípicos y la imputación de valores faltantes. La determinación de los datos censurados se hizo a través de los límites de detección para cada elemento, solo se trabajaron con los elementos que no pasaron el 80% de datos censurados, respecto a la eliminación de los outliers se hizo a través de los cuartiles mediante el método de los bigotes superiores e

inferiores para cada elemento y luego se hizo la normalización CLR, a partir de la que se hizo el análisis univariable y multivariable.

Se realizó el cálculo de los parámetros geoquímicos tales como background, threshold y anomalías geoquímicas dentro de nuestra área que se representaron en mapas temáticos elaborados en ArcGIS a través de la selección de cada elemento, asignación de los valores calculados para background, threshold y anomalías geoquímicas, y representación espacial. El análisis multivariado se hizo mediante la correlación de Pearson, luego se hizo el Análisis de Componentes Principales (ACP) seguido de la técnica K-means clustering que busca agrupar los resultados del ACP en clústeres, después ejecutamos los Autodominios que permiten observar la relación de los componentes principales respecto a los clústeres, luego se ejecutó la técnica de Discriminantes que sintetiza los resultados obtenidos anteriormente y finalmente aplicamos la técnica multivariable de redes neuronales (SOM) que utiliza los componentes principales obtenidos del ACP junto con el número de clústeres, de cada una de estas técnicas se generaron mapas temáticos de posibles áreas prospectables para su análisis y discusión.

5.4. Control de calidad de las muestras

El aseguramiento de la calidad y el control de calidad (QA/QC) realizado por el INGEMMET en las distintas etapas del estudio se llevó a cabo conforme al protocolo establecido para la prospección geoquímica, el cual indica que debe insertarse, como mínimo, un 10 % de muestras de control en relación con el total de muestras analizadas (Bloom, 2002). En consecuencia, incluyeron 96 muestras de control, distribuidas en 32 estándares, 32 blancos y 32 duplicados (Chira et al, 2008).

5.4.1 Precisión

Para el control de este indicador, se recolectaron duplicados, lo que implica que algunas muestras de campo fueron tomadas en duplicado con el objetivo de evaluar el grado de repetibilidad de los resultados analíticos y la correcta aplicación de los protocolos de muestreo por parte del geólogo. Los valores de Cu indicaron que el 42 % del total presentó una desviación estándar relativa menor al 5 %, lo que valida los resultados. En el caso del Pb, las muestras presentaron rangos aceptables de variabilidad, con una desviación estándar relativa menor al 1 % en algunos casos, validando los resultados. Los valores de Zn mostraron rangos aceptables de variabilidad, con una desviación estándar relativa que alcanzó un máximo de 15.9 %, lo que también valida los resultados. Finalmente, los valores de Mo indicaron rangos aceptables de variabilidad, con una desviación estándar relativa máxima de 16 %, validando los resultados (Chira et al, 2008).

5.4.2 Exactitud

Este parámetro de calidad fue evaluado mediante muestras estándar adquiridas en los laboratorios de Geostats. Estas muestras fueron utilizadas para controlar la exactitud de los métodos analíticos aplicados por el laboratorio encargado del análisis del lote completo de muestras del estudio, verificando que los resultados se encontraran dentro del rango de aceptabilidad previamente establecido por el laboratorio que suministró los estándares. Los resultados de As, Pb y Ag obtenidos en las muestras estándar se encuentran dentro de los límites de aceptación, lo que confirma una buena exactitud de los procedimientos analíticos. En cuanto a las concentraciones de Cu, aunque la mayoría se ubicaron dentro del rango aceptable, tres muestras presentaron un exceso respecto al valor real del 2,4%, 12% y 3,1%. Por otro lado, los resultados

de zinc también se encontraron en rangos de aceptabilidad, aunque algunas muestras mostraron una diferencia porcentual máxima de hasta 27,32%, lo que representa únicamente una advertencia en cuanto a la exactitud (Chira et al, 2008).

5.4.3 Contaminación

Este parámetro tiene como objetivo examinar la posible presencia de contaminantes en las muestras. Para este análisis, se emplearon muestras «blanco», consistentes en arena cuarzosa con concentraciones conocidas, que fueron insertadas junto con las demás muestras de campo. Esto permitió evaluar si hubo contaminación durante las etapas de muestreo, manipulación y análisis químico de las muestras de sedimentos de quebrada. Los resultados de las muestras blancas para Ag, Cd, Cu, Hg, Pb, Sb y Zn demostraron que todas las muestras analizadas estaban libres de contaminación, ya que no excedieron los límites de aceptabilidad, validando así los resultados obtenidos (Chira et al, 2008).

5.5. Análisis estadístico

5.5.1 Valores Censurados e Imputación de Valores

Se examinó el conjunto de datos para detectar datos por debajo del límite de detección y datos anómalos por encima del límite de detección (datos censurados), por lo que para la selección de los elementos usados en esta investigación no se pasó el 80% de datos censurados.

En el reporte otorgado por el laboratorio químico se representa la concentración por debajo del límite de detección con el símbolo negativo (-), estos valores fueron reemplazados por la mitad

del valor absoluto del límite de detección para que no haya interferencia en el cálculo de los parámetros estadísticos tales como la media aritmética y la desviación estándar.

5.5.2 Evaluación de datos

Después de limpiar los datos originales, se hizo la evaluación de estos para determinar la tendencia a la normalidad del grupo de datos a través de:

- **Estadísticos descriptivos**, son valores que resumen las principales características del conjunto de datos. Tales como la Media, Mediana, Moda, Desviación estándar, Rango intercuartílico, Percentiles
- **Histogramas**, permitieron evaluar de manera visual si los datos están distribuidos de forma simétrica y sin sesgos, lo que es un indicativo de normalidad.
- **Gráficos box plot**, si hay muchos outliers, es posible que los datos no sigan una distribución normal.

Al evaluar los datos se observa que no cumplen con los criterios de normalidad, por lo que se considera necesario aplicar la transformación CLR para corregir este problema antes de aplicar análisis estadísticos más avanzados.

Tabla 5-1. Estadísticos descriptivos de las areniscas del Grupo Chicama y la Formación Oyón.

Univariado	Cu_ppm	Au_ppm	Li_ppm	Mn_ppm	Zn_ppm	Ag_ppm	As_ppm	Bi_ppm	Cd_ppm	Ga_ppm	In_ppm	Mo_ppm	Pb_ppm	Sb_ppm	Sc_ppm	Tl_ppm	W_ppm
Conteo Numérico	141	141	141	141	141	141	141	141	141	141	141	141	141	141	141	141	141
Valores Únicos	113	26	34	131	113	56	59	52	90	37	16	113	121	110	42	41	32
Mínimo	7.6	0.0025	0.5	212	37	0.04	4	0.08	0.08	0.7	0.01	0.59	10.9	0.32	0.9	0.01	0.05
Máximo	138.3	0.456	70	10001	3216	10.1	633	1.62	45.2	5.5	0.21	120.9	8685	85.2	7.3	1.14	75.8
Media	27.27	0.01	11.20	1243.52	282.62	0.45	35.45	0.31	1.53	1.91	0.05	5.61	122.51	3.76	3.26	0.16	2.93
Mediana	21.5	0.0025	8	684	141	0.13	14	0.21	0.45	1.6	0.04	1.53	28.5	1.53	3	0.11	0.1
Rango	130.7	0.4535	69.5	9789	3179	10.06	629	1.54	45.12	4.8	0.2	120.31	8674.1	84.88	6.4	1.13	75.75
Rango Inter cuartílico	16.8	0.0045	12.5	678.5	165	0.245	26	0.16	1.205	1.45	0.03	1.88	24.25	2.44	1.6	0.12	0.35
Desviación Estándar	18.57	0.04	11.34	1791.50	458.88	1.13	66.56	0.30	4.18	1.06	0.03	14.31	739.06	9.17	1.13	0.17	9.87
25 percentil	15.85	0.0025	3	476	98.5	0.085	9	0.16	0.27	1.1	0.03	1.02	21.25	0.875	2.5	0.06	0.05
75 percentil	32.65	0.007	15.5	1154.5	263.5	0.33	35	0.32	1.475	2.55	0.06	2.9	45.5	3.315	4.1	0.18	0.4
95 percentil	61.06	0.063	32.8	3963.5	977.4	2.081	140.3	1.183	6.908	3.9	0.12	29.15	223.43	10.801	5.29	0.51	14.98

Tabla 5-2. Estadísticos descriptivos de las areniscas del Grupo Goyllarisquiza.

Univariado	Au_ppm	Cu_ppm	Li_ppm	Mn_ppm	Zn_ppm	Ag_ppm	As_ppm	Bi_ppm	Cd_ppm	Ga_ppm	In_ppm	Mo_ppm	Pb_ppm	Sb_ppm	Sc_ppm	Tl_ppm	W_ppm
Conteo Numérico	153	153	153	153	153	153	153	153	153	153	153	153	153	153	153	153	153
Valores Únicos	27	123	33	145	128	52	60	52	104	43	19	115	132	123	35	69	27
Mínimo	0.0025	8.1	0.5	180	24	0.02	3	0.07	0.06	0.9	0.01	0.64	8.1	0.24	1	0.06	0.05
Máximo	0.397	1038	44	10001	2941	10.1	387	10.5	10.6	6.4	0.89	87.1	581.5	30.4	5.2	3	11.2
Media	0.01	40.36	11.04	1159.97	326.13	0.41	32.59	0.45	1.44	2.56	0.06	4.70	55.03	2.53	2.99	0.46	0.63
Mediana	0.0025	23.7	9	669	165	0.12	16	0.22	0.62	2.4	0.04	1.62	29.7	1.28	2.9	0.28	0.1
Rango	0.3945	1029.9	43.5	9821	2917	10.08	384	10.43	10.54	5.5	0.88	86.46	573.4	30.16	4.2	2.94	11.15
Rango Inter cuartílico	0.0055	13.65	9	858.5	238.5	0.15	21.5	0.15	0.96	1.5	0.02	1.82	30.4	1.735	1	0.42	0.25
Desviación Estándar	0.04	99.56	8.03	1254.59	468.95	1.27	50.27	0.99	2.02	1.07	0.13	11.32	84.64	4.11	0.83	0.50	1.61
25 percentil	0.0025	17.05	5	493.5	87	0.075	10	0.17	0.365	1.7	0.03	1.095	19.35	0.625	2.4	0.15	0.05
75 percentil	0.008	30.7	14	1352	325.5	0.225	31.5	0.32	1.325	3.2	0.05	2.915	49.75	2.36	3.4	0.57	0.3
95 percentil	0.0459	68.41	26.3	3387.6	1421.9	1.56	141.4	1.477	6.017	4.63	0.142	22.37	226.51	10.42	4.53	1.563	4.88

Tabla 5-3. Estadísticos descriptivos de las calizas de la Formación Jumasha

Univariado	Au_ppm	Cu_ppm	Li_ppm	Mn_ppm	Zn_ppm	Ag_ppm	As_ppm	Bi_ppm	Cd_ppm	Ga_ppm	In_ppm	Mo_ppm	Pb_ppm	Sb_ppm	Sc_ppm	Tl_ppm	W_ppm
Conteo Numérico	153	153	153	153	153	153	153	153	153	153	153	153	153	153	153	153	153
Valores Únicos	20	119	31	137	107	41	48	48	96	53	13	116	128	98	44	55	19
Mínimo	0.003	3.3	0.5	78	8	0.005	1	0.02	0.03	0.5	0.01	0.43	3.7	0.12	0.9	0.04	0.05
Máximo	0.295	354.2	34	1804	1208	3.96	164	2.56	4.65	8.1	0.21	62.9	119.7	52.5	6.4	4.69	17.7
Media	0.01	22.02	9.43	541.86	123.01	0.19	20.20	0.26	0.73	2.87	0.03	2.36	23.77	1.61	2.95	0.32	0.38
Mediana	0.003	15.6	7	499	88	0.07	10	0.16	0.55	2.7	0.03	1.44	17.5	0.63	2.8	0.24	0.05
Rango	0.293	350.9	33.5	1726	1200	3.955	163	2.54	4.62	7.6	0.2	62.47	116	52.38	5.5	4.65	17.65
Rango Intercuartílico	0.005	10.25	6	253	82.5	0.08	19	0.11	0.605	2.1	0.03	1.235	13.4	0.715	1.5	0.19	0.05
Desviación Estándar	0.027	38.367	6.263	278.007	144.302	0.460	25.837	0.362	0.704	1.500	0.028	5.270	21.492	4.674	1.158	0.424	1.545
25 percentil	0.003	10.8	6	389	50	0.04	6	0.12	0.295	1.7	0.01	1.1	11.75	0.405	2.2	0.15	0.05
75 percentil	0.007	21.05	12	642	132.5	0.12	25	0.23	0.9	3.8	0.04	2.335	25.15	1.12	3.7	0.34	0.1
95 percentil	0.022	46.55	23.3	1150.2	396.8	0.958	74.3	0.808	2.233	5.93	0.073	4.059	83.19	5.2	5	0.79	1.9

Tabla 5-4. Estadísticos descriptivos del Grupo Chicama, Grupo Goyllarisquizga y de las Formaciones Jumasha, Pariatambo, Pariahuanca, Chúlec, Crisnejas, Chambará, Chota, Casapalca, Mitu y Calipuy

Univariado	Au_ppm	Cu_ppm	Li_ppm	Mn_ppm	Zn_ppm	Ag_ppm	As_ppm	Bi_ppm	Cd_ppm	Ga_ppm	In_ppm	Mo_ppm	Pb_ppm	Sb_ppm	Sc_ppm	Tl_ppm	W_ppm
Conteo Numérico	518	518	518	518	518	518	518	518	518	518	518	518	518	518	518	518	518
Valores Únicos	55	294	45	414	279	93	102	92	204	63	23	285	333	272	54	103	57
Mínimo	0.0025	3.3	0.5	78	8	0.005	1	0.02	0.02	0.5	0.01	0.43	3.7	0.12	0.9	0.01	0.05
Máximo	0.456	1038	70	10001	3216	10.1	633	10.5	45.2	8.1	0.89	120.9	8685	85.2	7.3	4.69	75.8
Medio	0.012	29.002	10.923	929.344	230.500	0.344	27.886	0.329	1.170	2.591	0.047	4.218	61.335	2.457	3.114	0.319	1.145
Mediana	0.0025	19.6	8	593	120	0.09	13	0.19	0.55	2.3	0.03	1.585	24.45	0.97	3	0.19	0.1
Rango	0.4535	1034.7	69.5	9923	3208	10.095	632	10.48	45.18	7.6	0.88	120.47	8681.3	85.08	6.4	4.68	75.75
Rango Intercuartílico	0.0045	14.05	9	467	141.25	0.14	19	0.1525	0.7225	1.9	0.03	1.8225	22.525	1.6325	1.325	0.225	0.15
Desviación Estándar	0.03	59.30	9.00	1210.06	374.68	1.05	47.44	0.61	2.53	1.38	0.08	10.72	389.75	5.94	1.06	0.41	5.40
25 percentil	0.0025	14.475	5	447	74	0.06	8	0.1475	0.2875	1.5	0.02	1.08	16.4	0.57	2.4	0.1175	0.05
75 percentil	0.007	28.525	14	914	215.25	0.2	27	0.3	1.01	3.4	0.05	2.9025	38.925	2.2025	3.725	0.3425	0.2
95 percentil	0.0431	56.43	29	2603.3	864	1.1235	99.15	1.031	4.731	5.4	0.11	15.85	137.395	7.6705	5	1.081	4.72

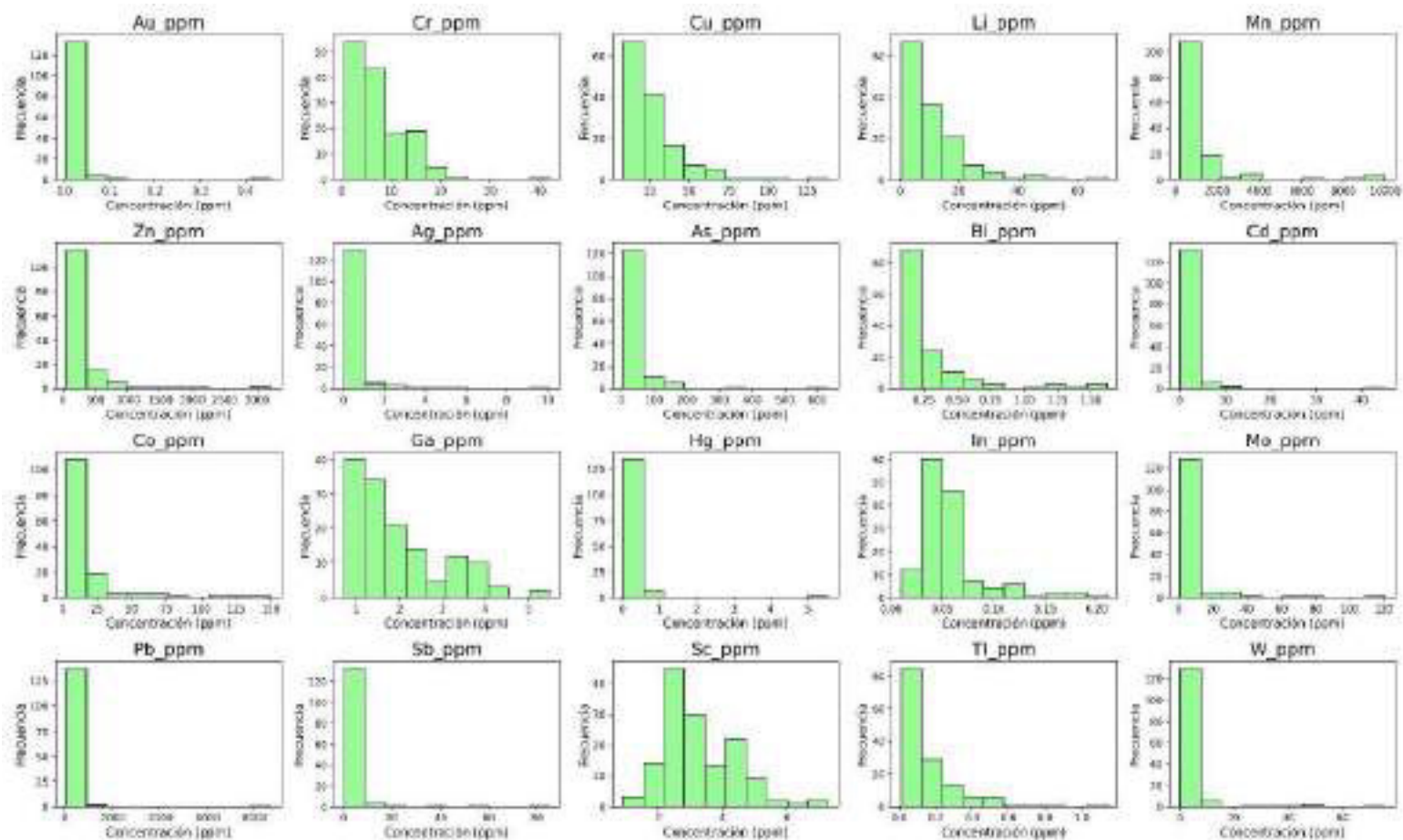


Figura 5-1. Histogramas de las areniscas del Grupo Chicama y la Formación Oyón

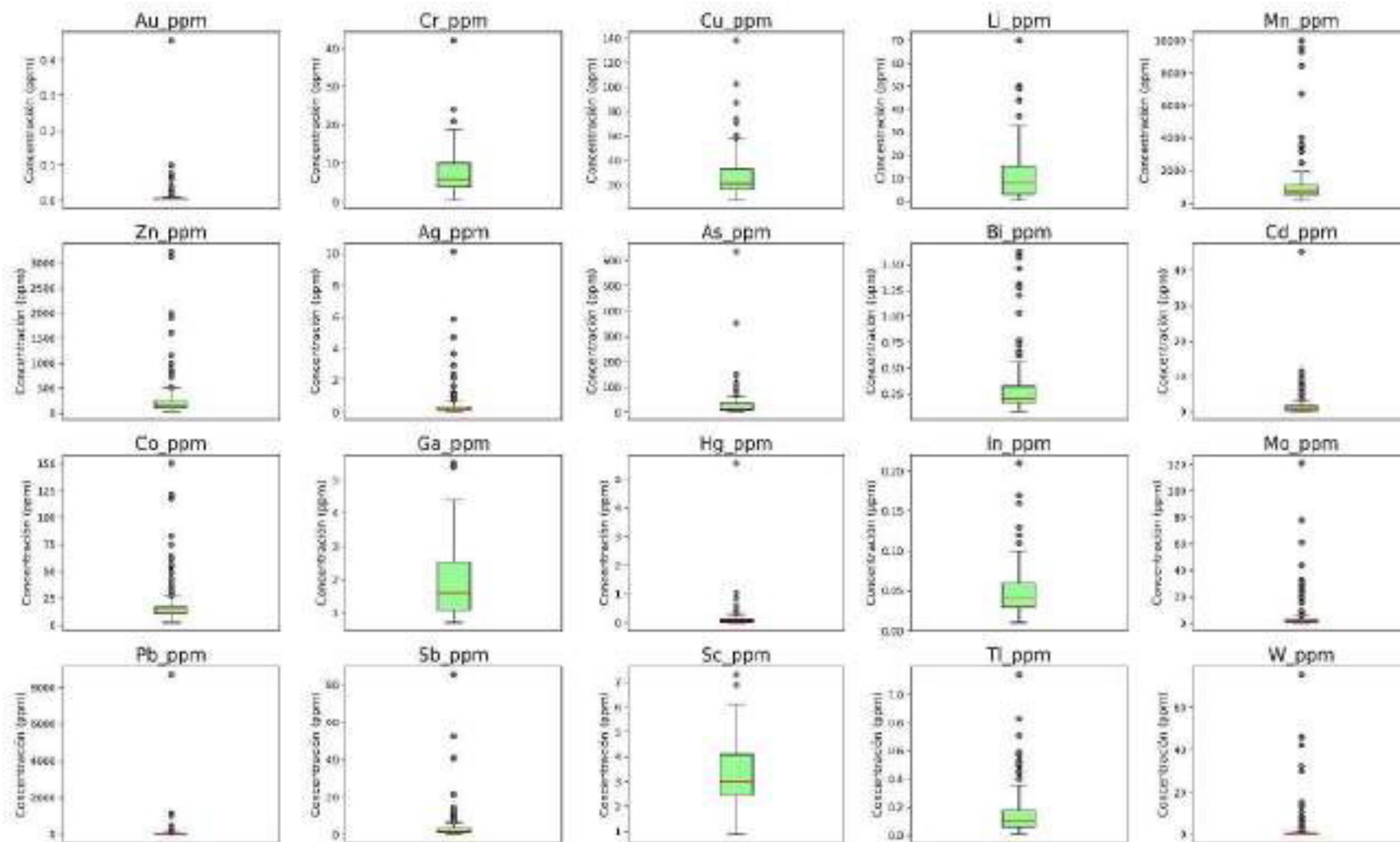


Figura 5-2. BoxPlots de las areniscas del Grupo Chicama y la Formación Oyón

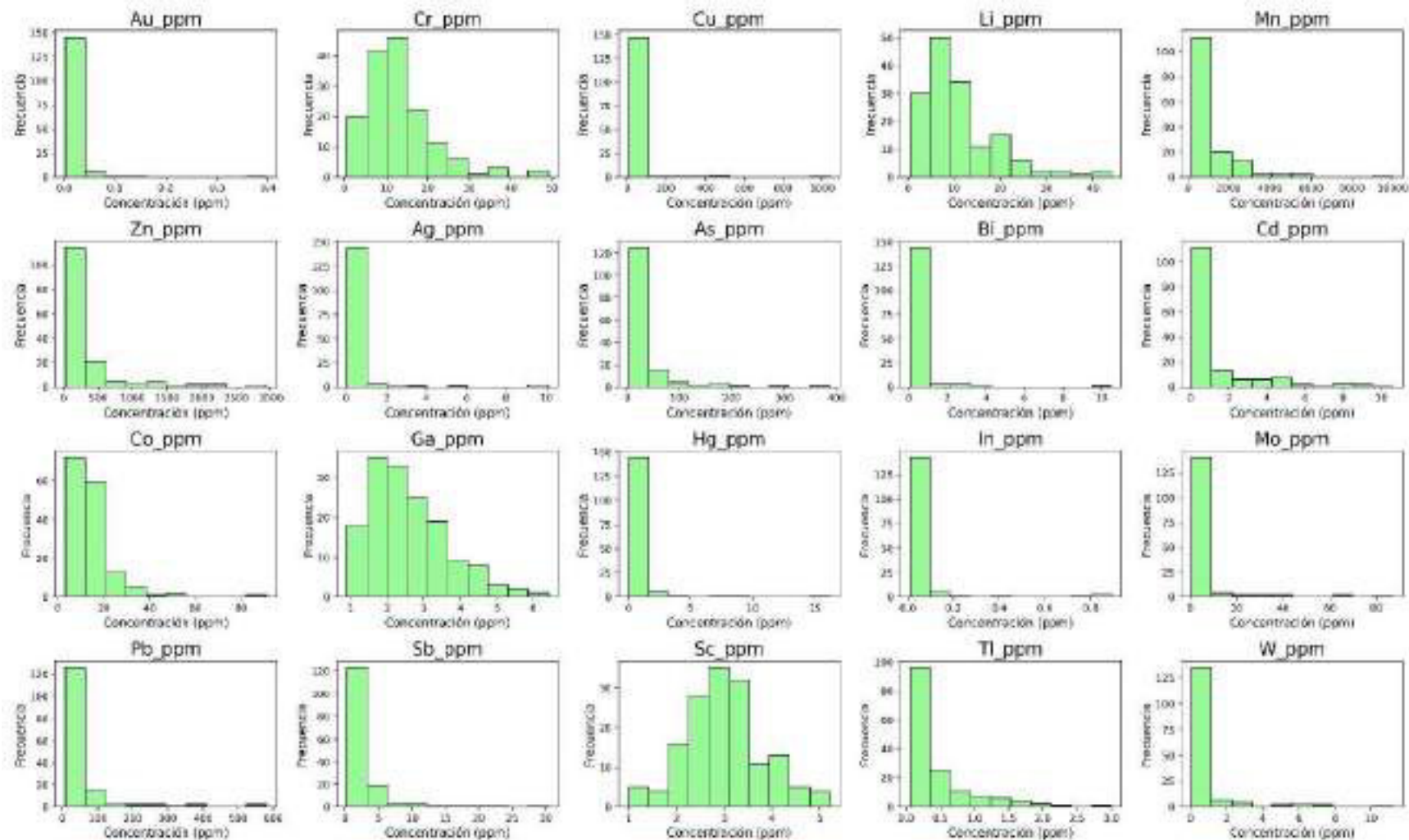


Figura 5-3. Histogramas de las areniscas del Grupo Goyllarisquizga

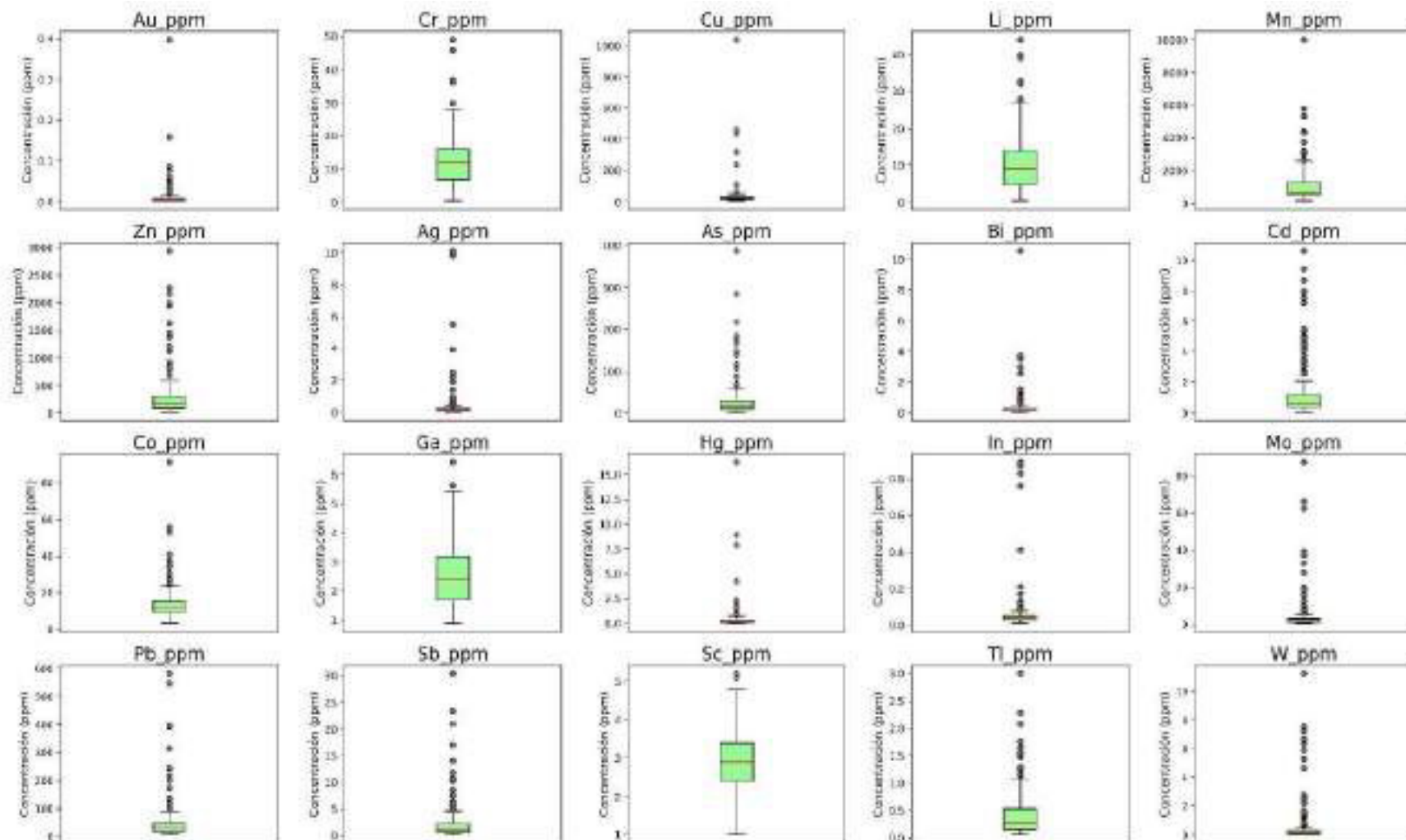


Figura 5-4.BoxPlots de las areniscas del Grupo Goyllarisquizga

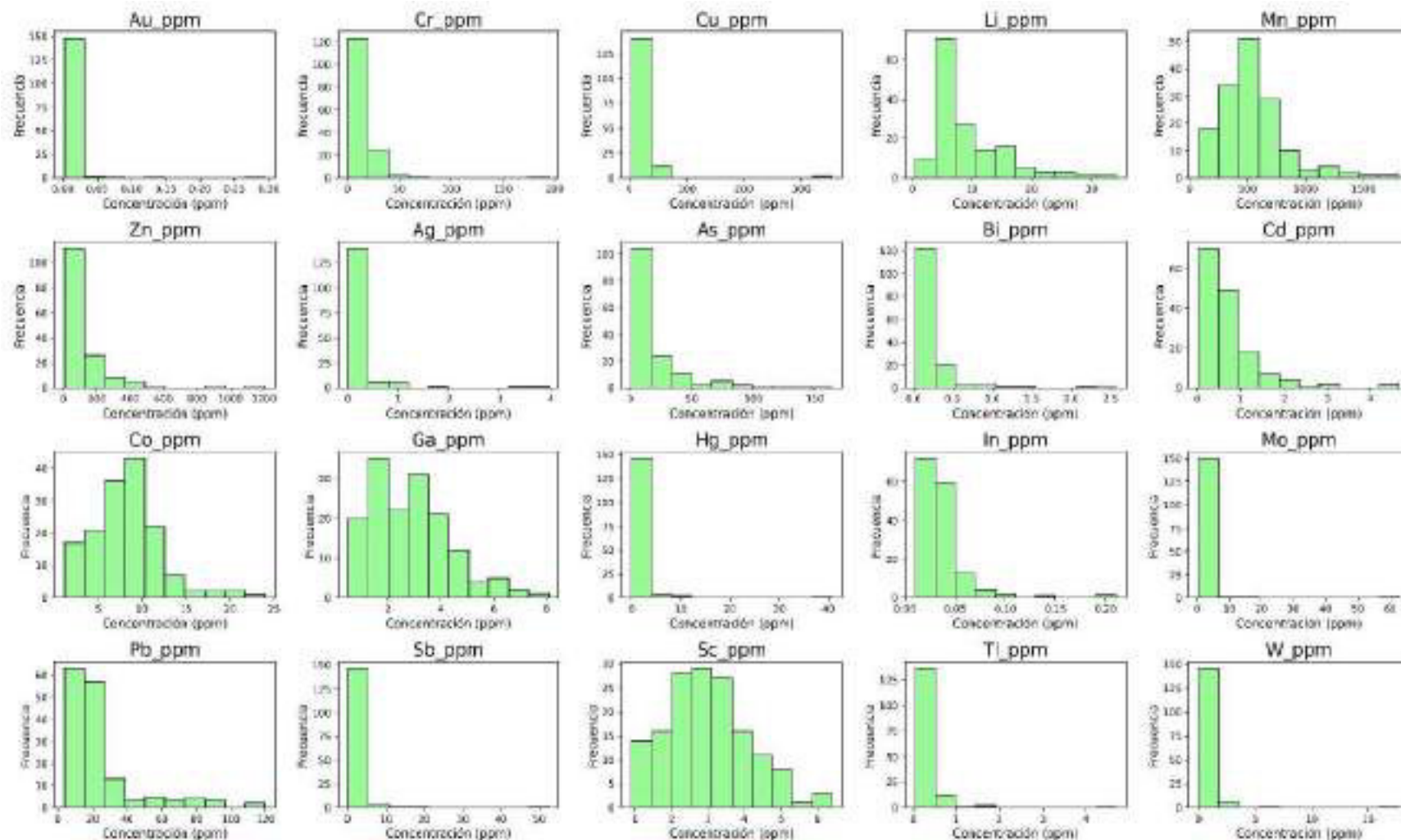


Figura 5-5. Histogramas de las calizas de la Formación Jumasha

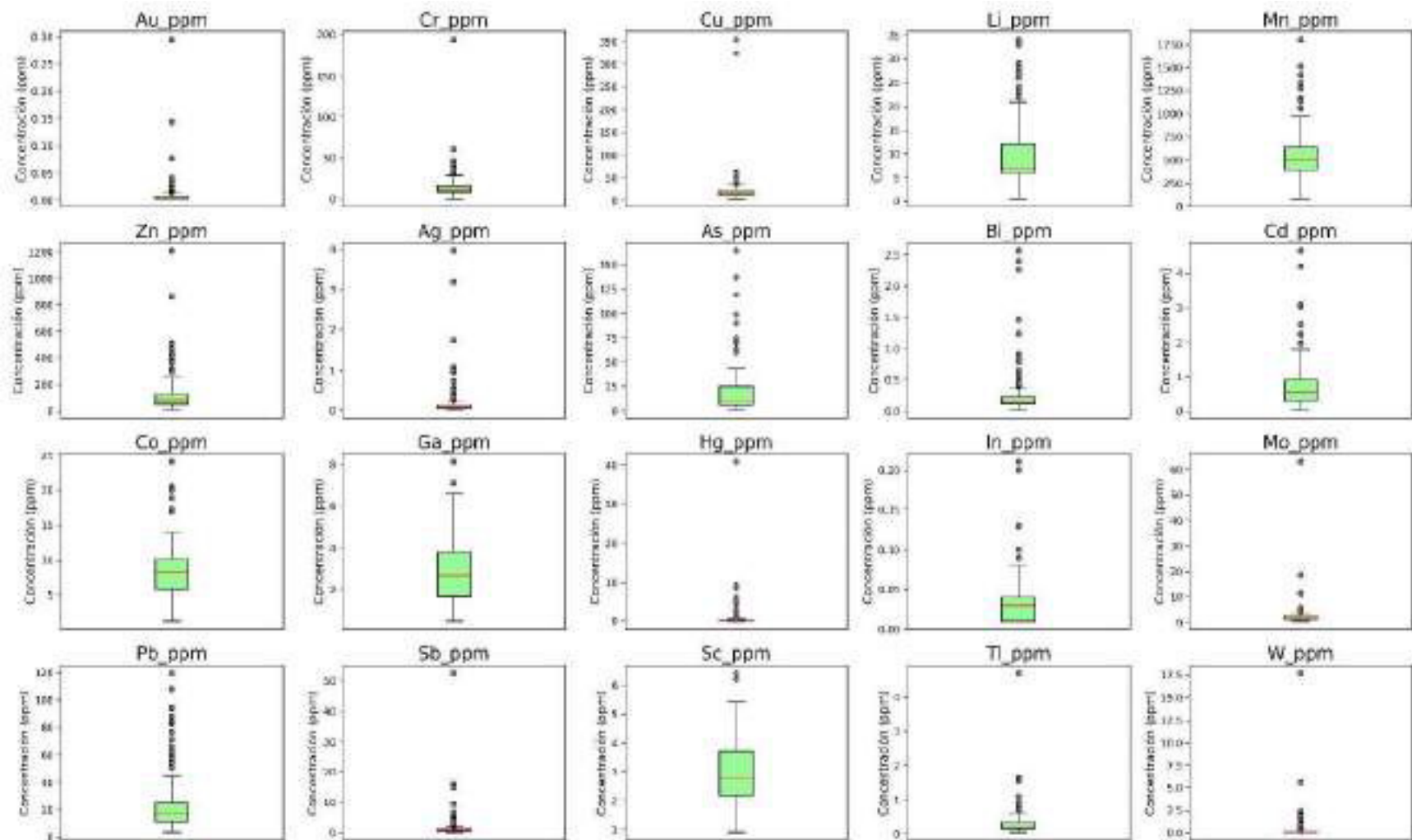


Figura 5-6.BoxPlots de las calizas de la Formación Jumasha

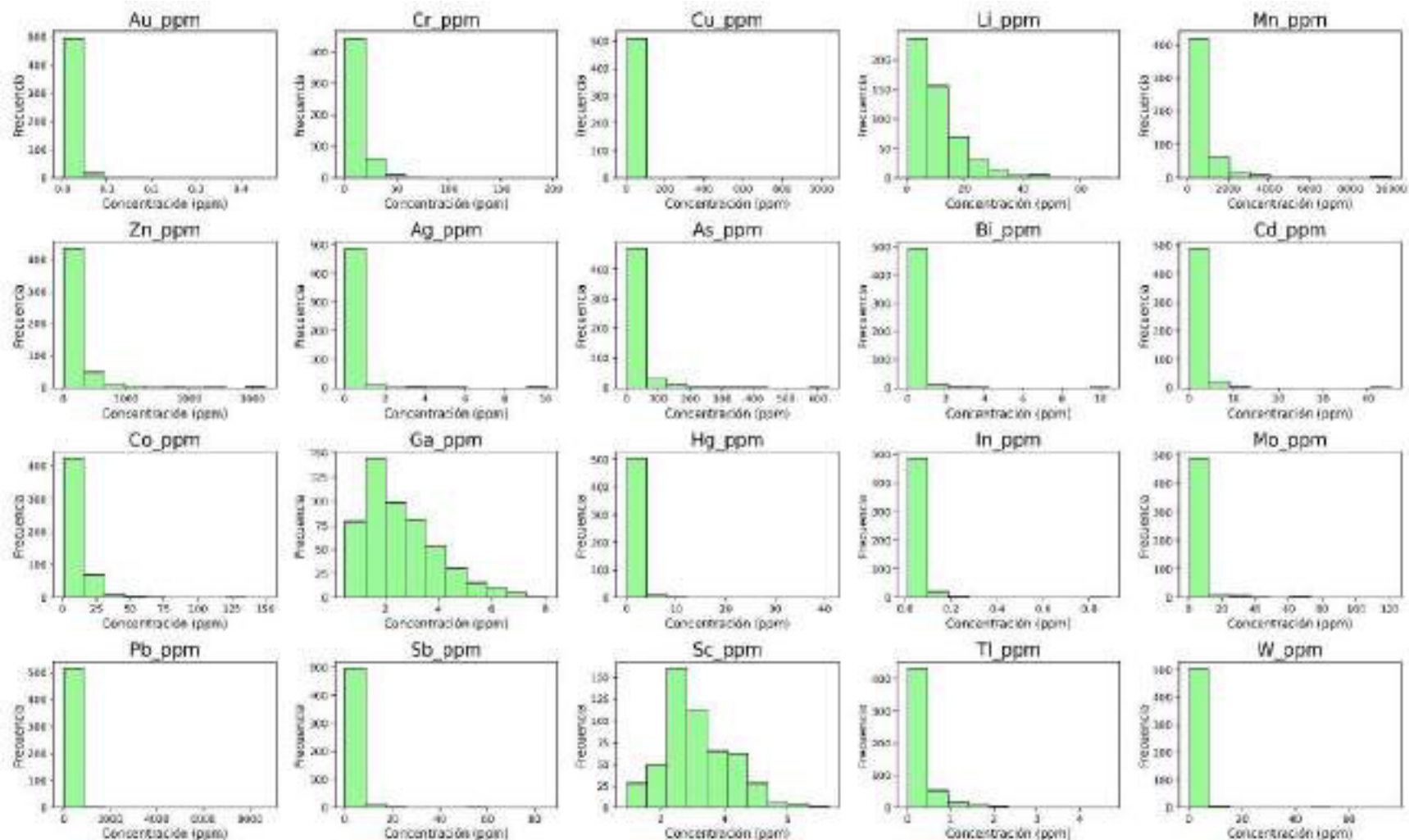


Figura 5-7. Histogramas del Grupo Chicama, Grupo Goyllarisquizga y de las Formaciones Jumasha, Pariatambo, Pariahuanca, Chúlec, Crisnejas, Chambará, Chota, Casapalca, Mitu y Calipuy

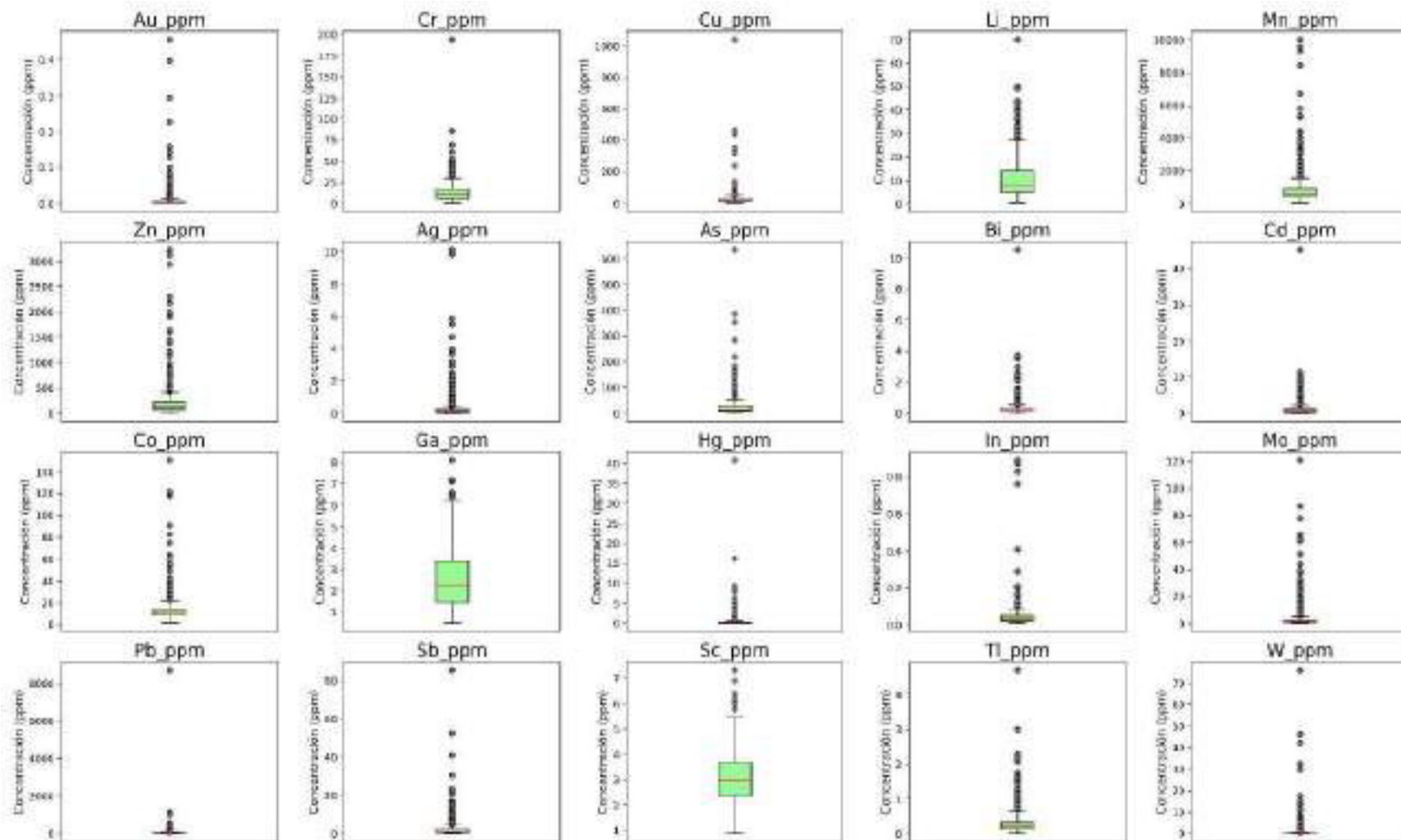


Figura 5-8. BoxPlots del Grupo Chicama, Grupo Goyllarisquizga y de las Formaciones Jumasha, Pariatambo, Pariahuanca, Chúlec, Crisnejas, Chambará, Chota, Casapalca, Mitu y Calipuy

5.5.3 Normalización

Dado que la distribución de los datos no es normal, se hizo la normalización de los datos usando la transformación Center Log Ratio (CLR). Se calcula tomando el logaritmo de cada parte y dividiéndolo por la media geométrica de todas las partes (Martínez, 2022). Las técnicas estadísticas univariantes y multivariantes que se ejecutaron fueron en base a la data con transformación CLR.

5.5.4 Selección de variables

Para este análisis, se seleccionaron 17 elementos químicos con base en el tipo de digestión empleada durante el análisis químico de las muestras (**Figura 5-9**), tales como Au, Cu, Li, Mn, Zn, Ag, As, Bi, Cd, Ga, In, Mo, Pb, Sb, Sc, Tl y W. El método de ensayo fue ICP-MS con digestión de agua regia para 52 elementos, por lo que la selección de variables se realizó considerando la eficacia de la digestión de agua regia.

Esta metodología es particularmente eficaz para digerir sulfuros porque puede oxidar eficazmente el azufre y liberar los metales base, lo que facilita su análisis en soluciones líquidas, lo que es crucial para la evaluación de metales de interés económico que se encuentran comúnmente en minerales sulfurosos.

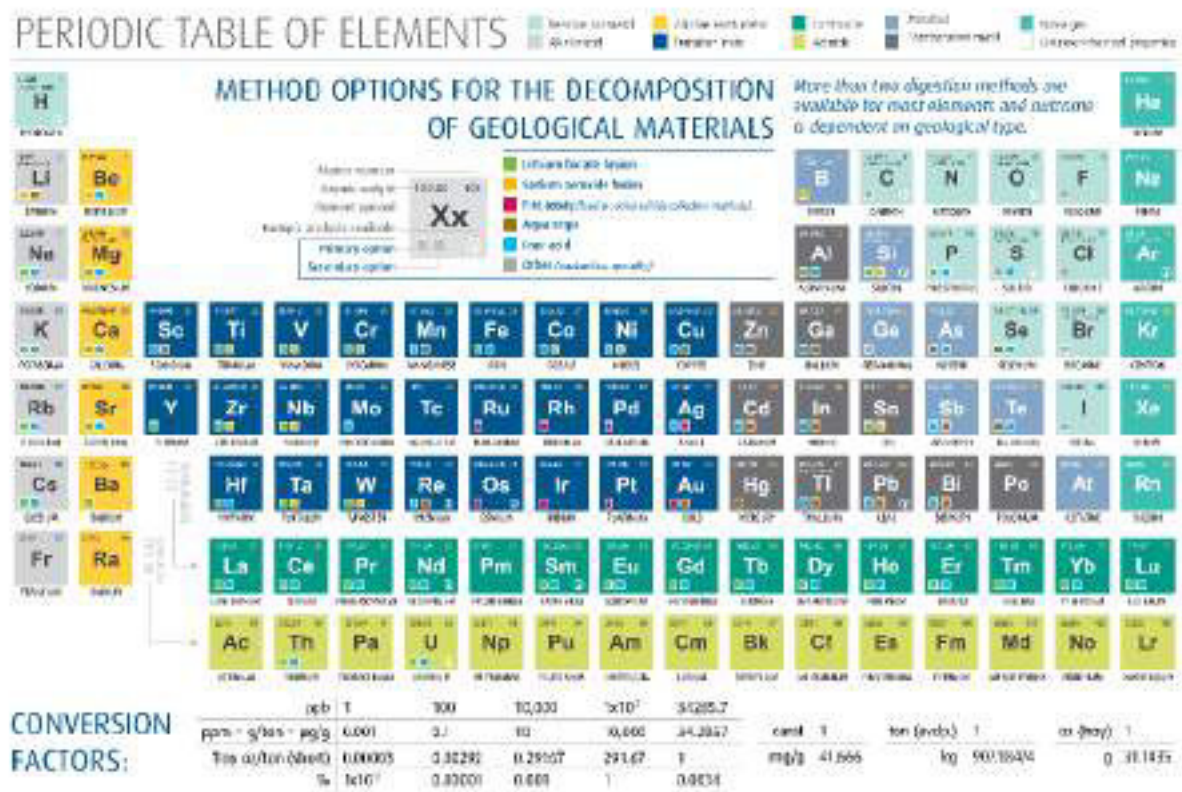


Figura 5-9. Métodos para la descomposición de materiales geológicos en función al tipo de digestión química. Tomado del laboratorio ALS.

5.5.5 Eliminación de outliers

Así mismo, para determinar los “outliers” se usó los gráficos box plot (caja y bigotes), estos valores se obtuvieron mediante el cálculo de los bigotes superior e inferior que corresponden al menor y mayor valor observado que no están fuera del rango. Se puede utilizar una herramienta estadística conocida como diagrama de caja para visualizar la distribución de una variable con respecto a sus valores máximo, mínimo y mediana. También puede utilizarse para determinar si la distribución es simétrica y si existen valores atípicos (Tukey, 1977).

Para el cálculo del bigote superior e inferior se utilizó la siguiente fórmula:

$$Bigote\ Superior = Q_3 + 1.5(Q_3 - Q_1)$$

$$Bigote\ Inferior = Q_1 - 1.5(Q_3 - Q_1)$$

Donde:

Q_3 : tercer cuartil/percentil 75

Q_1 : primer cuartil/percentil 25

Esto se tomó en cuenta para la eliminación de outliers, quitando los valores por encima y por debajo del límite establecido por los bigotes superiores e inferiores.

5.5.6 Parámetros Geoquímicos

Después de la eliminación de outliers se usó los estadísticos de tendencia central, media aritmética y desviación estándar, para determinar los parámetros geoquímicos:

- **Background:** el valor de fondo.
- **Threshold:** es el límite superior de la fluctuación del background normal.
- **Anomalías Débiles:** el valor por encima del threshold.
- **Anomalías Moderadas:** el valor por encima de anomalía débil.
- **Anomalías Altas:** el valor por encima de anomalía moderada.

Estos parámetros fueron representados gráficamente el software ArcGIS 10.8, en el que se cargó los puntos como un archivo shapefile y se procedió a seleccionar elemento por elemento

asignando en las Propiedades el rango de los valores del background, threshold, anomalía baja, anomalía moderada y anomalía alta que fueron representados por símbolos graduados por tamaños.

En los mapas que se presentan en el capítulo Análisis y Discusión de Resultados se colocó una forma geométrica distintiva para cada población muestral siendo un triángulo para la agrupación del Grupo Chicama y la Formación Oyón, círculo para el Grupo Goyllarisquizga y una estrella para la Formación Jumasha.

5.5.7 Análisis de Correlación de Pearson

El análisis de correlación de Pearson se aplicó a cada grupo poblacional para evaluar la relación entre dos variables, basándose en la covarianza de estas y el producto de sus desviaciones estándar individuales.

5.5.8 Análisis de componentes principales

Para realizar el Análisis de Componentes Principales se ha elegido el número de componentes a usar a través del “Scree Plot” o gráfico de sedimentación, esta es una herramienta que muestra los “Eigenvalues” o valores propios en orden descendente y se usa para identificar el número óptimo de componentes principales a trabajar, asegurando que el análisis sea tanto eficiente como efectivo. Para este trabajo se eligió el número de componentes a trabajar en base a los componentes con valor superior al 1% de Eigenvalues, por ejemplo, los valores propios más altos indican que el componente principal asociado explica una mayor parte de la variabilidad total en los datos.

También se observa en los resultados los “Eigenvectors” que son las combinaciones lineales de las variables originales que maximizan la varianza que representan la dirección de los nuevos ejes en el espacio de características transformado, cada “Eigenvector” está asociado con un “Eigenvalue” y define una dirección en el espacio. Los coeficientes o pesos de los “Eigenvector” indican la contribución de cada variable original a la componente principal correspondiente, estos coeficientes permiten entender cómo se construyen los componentes principales a partir de las variables originales.

Además, se tiene los "Scaled Coordinates" que indican la posición de cada muestra en el espacio de los componentes principales, cada componente principal es una combinación lineal de las variables originales, por lo que las coordenadas escaladas muestran cómo se relacionan las muestras en términos de estas nuevas combinaciones. Las muestras con coordenadas similares en los componentes principales tienden a tener características similares en las variables originales, por lo que son útiles para mostrar los patrones y agrupamientos naturales de las muestras.

5.5.9 Kmeans-clustering

Después de aplicar el ACP para reducir la dimensionalidad de los datos se utilizó la técnica del k-means clustering. La determinación del número de clústeres (k) fue mediante el Método del Codo (Elbow Method), el cual grafica la suma de los errores cuadrados dentro del clúster (Within-Cluster Sum of Squares, WCSS) frente al número de clústeres. El "codo" en el gráfico indica el punto donde añadir más clústeres no mejora significativamente la explicación de la varianza. Este punto sugiere el número óptimo de clústeres.

5.5.10 Autodominios

Una vez obtenido el número de clústeres se procede con el gráfico de Autodominio que implica crear un diagrama que clasifica y visualiza la distribución espacial de los clústeres, utilizando la distancia de Mahalanobis para definir los límites de los grupos respecto a los dos componentes principales.

El resultado será un diagrama que muestra la relación entre los componentes principales y cómo se distribuyen espacialmente los clústeres, con cada región definida por los límites calculados. Este gráfico es particularmente útil para visualizar el clúster de mayor importancia dentro de los componentes que representan el mayor porcentaje de varianza.

5.5.11 Discriminantes

La técnica de Análisis Proyección Discriminantes (DPA) ingresa los componentes principales calculados anteriormente y los clústeres obtenidos en el k-means clustering, enfatiza el componente de proyección del análisis discriminante para producir resultados visuales para el análisis de datos exploratorios.

Las muestras se proyectan en un espacio de dimensiones inferiores para mostrar mejor gráficamente la separación entre grupos. En resumen, el Análisis de Proyección Discriminante (DPA) en ioGAS toma los componentes principales o variables seleccionadas y proyecta los datos en un espacio donde la separación entre grupos es maximizada.

5.5.12 Redes Neuronales SOM

Se usó valores preprocesados anteriormente de los componentes principales y el número de clústeres para crear el SOM (mapa autoorganizado). Dentro de la configuración se colocó un número de 20x20 para filas y columnas, además de elegir 200 iteraciones con una tasa de aprendizaje con función exponencial, para iniciar el proceso de entrenamiento del SOM.

Durante el entrenamiento, el algoritmo organiza los datos en un mapa topológico que preserva la relación de vecindad entre las muestras. Las neuronas del mapa se ajustan para representar los datos de manera que las muestras similares queden próximas entre sí y así podemos visualizar la distribución de las principales zonas de interés en el área de estudio.

CAPÍTULO 6 . ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para realizar el análisis estadístico univariable y multivariable, se aplicó la transformación CLR a los datos muestrales correspondientes a cada dominio: Grupo Chicama-Formación Oyón, Grupo Goyllarisquizga, Formación Jumasha y el conjunto Total (Grupo Chicama, Grupo Goyllarisquizga y de las Formaciones Jumasha, Pariatambo, Pariahuanca, Chúlec, Crisnejas, Chambará, Chota, Casapalca, Mitu y Calipuy). En este capítulo se presentan los resultados obtenidos mediante imágenes y tablas, siguiendo los procedimientos detallados en la sección de Metodología.

6.1. Estadística Univariable

6.1.1 Distribución As (Anexo D)

- ✓ En la población muestral Chicama-Oyón se observa anomalías débiles en las cabeceras de los drenajes que nacen de la Cordillera Blanca al sur de Jacabamba y también a 12 km al NO de San Luis, al pie de la Cordillera Blanca.
- ✓ En la población muestral Goyllarisquizga altas concentraciones a 10 km al SO de San Juan de Rontoy, y anomalías bajas en las cercanías de Pachapaqui en el río Pativilca.
- ✓ En la población muestral Jumasha altas concentraciones a 10 km al NE de Contonga y anomalías moderadas al norte de Raura a lo largo del río Nupe.

6.1.2 Distribución Ag (Anexo B)

- ✓ En la población muestral Chicama-Oyón se observa alta concentración cerca al Batolito de la Cordillera Blanca en la parte alta del río Ruricocha a 13 km al NO de San Luis y otra anomalía fuerte 6 km al SE de San Luis, mientras que se observa anomalía moderada en el río Rurec al oeste de Huari y presencia de anomalía débil en el río Rurichinchay al pie del Batolito de la Cordillera Blanca.
- ✓ Dentro del grupo muestral de las areniscas del Grupo Goyllarisquizga, se observan anomalías altas en el río Pativilca en un radio de 1-3 km de Pachapaqui, también a 3 km al SO de Antamina.
- ✓ En la población muestral Jumasha se observa anomalías altas en el río Vizcarra (tramo Huallanca-La Unión) y a 9 km al SO de Rondos en el río Nupe.

6.1.3 Distribución Au (Anexo C)

- ✓ En la población muestral Chicama-Oyón las muestras están dentro del Threshold.
- ✓ En la población muestral Goyllarisquizga las muestras están dentro del Threshold.
- ✓ En la población muestral Jumasha se observa anomalías débiles en el río Taparaco, afluente del río Torres Vizcarra.

6.1.4 Distribución Bi (Anexo E)

- ✓ En la población muestral Chicama-Oyón las muestras están dentro del Threshold.

- ✓ En la población muestral Goyllarisquizga se observan altas concentraciones a 2 km de Contonga y a 5 km al NE de Contonga en el río Puchka.
- ✓ En la población muestral Jumasha se observan altas concentraciones en el río Vizcarra y a 2 km al sur de Antamayo.

6.1.5 Distribución Cd (Anexo F)

- ✓ En la población muestral Chicama-Oyón altas concentraciones adyacentes a la Cordillera Blanca en el río Rurichinchay y Rurec y anomalías débiles en el río Ruricocha al NW de San Luis y 1 km al oeste de Pachapaqui.
- ✓ En la población muestral Goyllarisquizga anomalías altas cercanas a la Cordillera Blanca en la naciente del río Mosna y anomalía débil 2 km al norte de Pachapaqui.
- ✓ En la población muestral Jumasha anomalía alta a 1 km al oeste de Contonga anomalías moderadas y débiles en el río Nupe al norte de Raura y al SW de Rondos.

6.1.6 Distribución Cu (Anexo G)

- ✓ En la población muestral Chicama-Oyón anomalías débiles en el río Rurichinchay, Shashal y Mosna al este de la Cordillera Blanca.
- ✓ En la población muestral Goyllarisquizga se observa anomalía alta a 2 km al SW de Contonga, también anomalías débiles en el río Pativilca a 1 km de Pachapaqui y a 3 km de Antamayo.

- ✓ En la población muestral Jumasha se observa anomalía moderada al sur de Antamayo y anomalía débil a 1.5 km al NE de Antamina.

6.1.7 Distribución Ga (Anexo H)

- ✓ En la población muestral Chicama -Oyón se observa anomalía moderada al NO de San Luis en su límite con la Cordillera Blanca y anomalías débiles al este de la Cordillera Blanca.
- ✓ En la población muestral Goyllarisquizga se observa que el Ga tiene valores altos al sur de Antamayo y al SE de Antamayo dentro de la Franja Metalogenética XVII.
- ✓ En la población muestral Jumasha se observa que el Ga presenta anomalías débiles dentro de la Franja Metalogenética XVII.

6.1.8 Distribución In (Anexo I)

- ✓ En la población muestral Chicama-Oyón valores dentro del threshold en el río Rurichinchay, al norte de Huari (Qda. Clavos) y al SE de San Luis (Qda. Caninacoj).
- ✓ En la población muestral Goyllarisquizga anomalía débil a 2 km al SE de Huari en la parte media del río Mosna y presencia de valores dentro del threshold hacia la parte alta del río Mosna, al sur y norte de Antamayo en un radio desde 3 a 15 km, en el río Puchka desde la parte media hasta su unión con el río Marañón resaltando al sur de San Juan de Rontoy y al este de Llamellín, entre Antamina y Huanzalá de modo espaciado.
- ✓ En la población muestral Jumasha anomalías bajas en el río Taparaco afluente del río Torres Vizcarra.

6.1.9 Distribución Mn (Anexo K)

- ✓ En la población muestral Chicama-Oyón valores dentro del threshold en la Franja XXII al SE de San Luis, al norte de Huari (Qda. Clavos), en el río Rurichinchay, río Rurec, al oeste del río Mosna y anomalía débil a 10 km al sur de Huanzalá.
- ✓ En la población muestral Goyllarisquizga altas concentraciones dentro de la Franja XX, en la cabecera del río Mosna y en el río Puchka al SE de Antamayo, presencia e anomalía débil en un afluente hacia la parte media del río Puchka. Así mismo en el río Pativilca dentro del área de influencia de Pachapaqui y al norte de Raura.
- ✓ En la población muestral Jumasha concentraciones dentro del threshold.

6.1.10 Distribución Li (Anexo J)

- ✓ En la población muestral Chicama-Oyón anomalía débil al oeste del río Ruricocha.
- ✓ En la población muestral Goyllarisquizga anomalía débil a 3 km al norte de Pachapaqui.
- ✓ En la población muestral Jumasha anomalías débiles a 2 km al sur de Rondos y en un afluente hacia la parte media del río Puchka.

6.1.11 Distribución Mo (Anexo L)

- ✓ En la población muestral Chicama-Oyón anomalía alta en el río Shashal al oeste de Huari y en el río Rurichinchay al pie de la Cordillera Blanca, y hacia la parte alta del río Mosna se observa anomalías débiles.

- ✓ En la población muestral Goyllarisquizga anomalías altas en la cabecera del río Mosna al este de la Cordillera Blanca, anomalía moderada a 3 km al NE de Pachapaqui y también a 3 km al SW de Contonga.
- ✓ En la población muestral Jumasha anomalías altas al NE de Aczo en los últimos 10 km del río Puchka antes de unirse al río Marañón y a 5 km al sur de La Unión.

6.1.12 Distribución Pb (Anexo M)

- ✓ En la población muestral Chicama-Oyón anomalías altas en la cabecera del río Ruricocha y a 3 km al sur de Huanzalá, anomalías débiles en el río Rurichinchay y a 15 km al norte de Raura en el río Carhuacocha afluente del río Nupe.
- ✓ En la población muestral Goyllarisquizga anomalías débiles entre 3-5 km al NW de Antamayo y a 3 km al SW de Antamina.
- ✓ En la población muestral Jumasha anomalías débiles a 3 km al norte de Antamayo, al este de Aczo hacia la parte final del río Puchka y 10 km al SW de Rondos.

6.1.13 Distribución Sb (Anexo N)

- ✓ En la población muestral Chicama-Oyón anomalías moderadas en río Rurichinchay y en la parte alta del río Mosna y anomalías débiles en el río Rurec y río Ruricocha.
- ✓ En la población muestral Goyllarisquizga anomalías moderadas a 10 km al norte de La Unión, presencia de anomalías débiles en los alrededores de Pachapaqui en un radio de 2 km y a 4 km al NW de Huanzalá.

- ✓ En la población muestral Jumasha anomalía alta a 10 km al SW de Rondos en el río Nupe, y anomalías moderadas al SW de La Unión y en el río Vizcarra en el tramo Huallanca -La Unión.

6.1.14 Distribución Sc (Anexo O)

- ✓ En la población muestral Chicama -Oyón se observa valores dentro del threshold.
- ✓ En la población muestral Goyllarisquizga se observa anomalía débil a 4 km al SE de Huari y a 10 km al NE de San Luis.
- ✓ En la población muestral Jumasha se observa anomalías débiles a 3 km al norte de Mirgas.

6.1.15 Distribución Tl (Anexo P)

- ✓ En la población muestral Chicama-Oyón se observa anomalía débil al este de parte alta del río Mosna.
- ✓ En la población muestral Goyllarisquizga anomalía alta a 10 km al SE de Antamayo en la cuenca media del río Puchka, anomalías débiles al este de la cabecera del río Mosna y a 3 km al sur de Antamina.
- ✓ En la población muestral Jumasha anomalía alta al este de Llamellín hacia la desembocadura del río Puchka y anomalía débil a 2 km al oeste de San Juan de Rontoy.

6.1.16 Distribución W (Anexo Q)

- ✓ En la población muestral Chicama-Oyón anomalías moderadas en el río Rurichinchay y río Shashal y anomalías débiles en el río Carhuascancha.
- ✓ En la población muestral Goyllarisquizga anomalías altas en el río Rurichinchay y río Carhuascancha y en la parte media del río Mosna, anomalía moderada a 3 km al SW de Contonga y anomalías débiles en la parte media del río Mosna, a 2 km al este de Pachapaqui, a 2 km al este de Huanzalá y a 3 km al norte de La Unión.
- ✓ En la población muestral Jumasha anomalías altas en el río Torres Vizcarra en el tramo Huallanca-La Unión y anomalía débil en la parte final del río Puchka.

6.1.17 Distribución Zn (Anexo R)

- ✓ En la población muestral Chicama-Oyón se observa anomalía débil en el río Rurec en el río.
- ✓ En la población muestral Goyllarisquizga se observa anomalías débiles al norte de Raura en un afluente del río Nupe.
- ✓ En la población muestral Jumasha se observa anomalías débiles en el tramo Huallanca-La Unión en el río Torres Vizcarra y al NE de Raura.

6.2. Estadística Multivariable

La estadística multivariable es una técnica que se utiliza cuando se trabaja con un gran número de variables para examinar la relación entre éstas, ya que aborda cuestiones de categorización y agrupación. En este trabajo se aplican modelos de aprendizaje automático que se sirven de estas técnicas estadísticas para identificar patrones complejos en los datos y predecir resultados basados en las múltiples variables seleccionadas. Para procesar la estadística multivariante se utilizó el programa informático ioGAS.

6.2.1 Chicama-Oyón

Los resultados del PC1 (**Figura 6-6**) muestran anomalía fuerte al SW de Antamina, también se observa una marcada anomalía al SE de Jacabamba en las cabeceras de los ríos Shashal y Rurichinchay, así mismo se tiene una anomalía al NW de San Luis y finalmente se presentan anomalías más focalizadas a unos 10 km al NW de la mina Huanzalá. Las anomalías principalmente involucran al Cu-Bi-Ga/ Zn-Cd-Ag-Pb, mientras que los resultados del PC2 (**Figura 6-7**) están asociados a Zn-Mn-Sc-In/ As-Mo-W que se manifiestan fuertemente cercanas a la mina Pachapaqui y también al SE de San Luis en la quebrada Tambillo.

Así mismo el mapa DP1 (**Figura 6-9**) sintetiza el PC1 dando como resultado una similitud muy marcada entre ambos mapas, generando este último las áreas de interés de manera más precisa y sintetizada. La anomalía moderada detectada en el mapa PC1 y que se observa abarcando un área mayor en el mapa DP1 se presenta claramente en el mapa SOM (**Figura 6-11**). Con el resultado de estos procesos reflejados en este mapa se determinó una nueva zona de interés al NW

de San Luis, esta zona se observa de manera ligera en el mapa DP1, mientras que en el SOM se manifiesta fuerte.

En base a los resultados observados en los diferentes mapas, vemos una fuerte tendencia a marcar como prospectable al oeste de Huari y al SE de Jacobamba, en los ríos Shashal y Rurichinchay, así mismo hacia el NO de San Luis a unos 3 km al oeste del río Ruricocha. Principalmente estas zonas resaltadas como anomalías fuertes se encuentran cercanas al Batolito de la Cordillera Blanca, siendo esta la principal influencia.

Análisis de Correlación de Pearson (Tabla 6-1):

- ✓ Correlaciones positivas altas (> 0.65): Zn-Cd, In-Sc.
- ✓ Correlaciones positivas moderadas (0.5-0.65): Cu-Bi, Cu-Sc, Mn-Zn, Zn-Pb, Mo-W

Análisis de Componentes Principales (Tabla 6-2, Tabla 6-3):

Mediante el gráfico de sedimentación se escogió 5 componentes principales los cuales explican el 74.99% de la varianza. Los resultados de los componentes con mayor explicación de la varianza son:

- ✓ PC1: Cu-Ga-Bi / Zn-Ag-Cd-Pb: 25.47%
- ✓ PC2: Mn-Zn-Sc-In / As-Mo-W: 20.5%
- ✓ PC3: Ag-In-Sb/ Li: 13.63%

Tabla 6-1 Análisis de Correlación de Pearson de las areniscas del Grupo Chicama y la Formación Oyón

Correlación	Cu-CLR	Au-CLR	Li-CLR	Mn-CLR	Zn-CLR	Ag-CLR	As-CLR	Bi-CLR	Cd-CLR	Ga-CLR	In-CLR	Mo-CLR	Pb-CLR	Sb-CLR	Sc-CLR	Tl-CLR	W-CLR
Cu-CLR	1	-0.0065	-0.022	-0.19	-0.4	-0.4	-0.29	0.62	-0.59	0.37	0.38	0.045	-0.38	-0.074	0.57	0.1	-0.15
Au-CLR	-0.0065	1	-0.023	-0.053	-0.087	0.033	-0.068	-0.17	-0.17	0.026	-0.19	-0.26	0.091	-0.11	0.13	-0.24	-0.078
Li-CLR	-0.022	-0.023	1	-0.11	-0.19	-0.37	0.011	-0.092	-0.016	0.32	-0.47	0.069	-0.36	-0.065	-0.37	0.19	0.065
Mn-CLR	-0.19	-0.053	-0.11	1	0.6	-0.23	-0.15	-0.3	0.42	0.14	0.036	-0.32	0.17	-0.085	0.19	0.12	-0.52
Zn-CLR	-0.4	-0.087	-0.19	0.6	1	0.12	-0.12	-0.52	0.81	-0.15	0.093	-0.5	0.51	-0.11	0.091	-0.044	-0.5
Ag-CLR	-0.4	0.033	-0.37	-0.23	0.12	1	0.24	-0.24	0.2	-0.57	0.005	-0.2	0.4	0.3	-0.2	-0.38	0.091
As-CLR	-0.29	-0.068	0.011	-0.15	-0.12	0.24	1	-0.22	-	-0.32	-0.36	-0.0063	0.19	0.44	-0.43	-0.43	0.3
Bi-CLR	0.62	-0.17	-0.092	-0.3	-0.52	-0.24	-0.22	1	-0.59	0.29	0.4	0.23	-0.5	-0.12	0.35	0.16	0.05
Cd-CLR	-0.59	-0.17	-0.016	0.42	0.81	0.2	-0.0059	-0.59	1	-0.31	-0.25	-0.29	0.46	-0.043	-0.33	-0.07	-0.2
Ga-CLR	0.37	0.026	0.32	0.14	-0.15	-0.57	-0.32	0.29	-0.31	1	0.11	0.0072	-0.47	-0.45	0.48	0.24	-0.2
In-CLR	0.38	-0.19	-0.47	0.036	0.093	0.005	-0.36	0.4	-0.25	0.11	1	-0.2	0.028	-0.073	0.7	0.11	-0.41
Mo-CLR	0.045	-0.26	0.069	-0.32	-0.5	-0.2	-0.0063	0.23	-0.29	0.0072	-0.2	1	-0.43	-0.14	-0.37	0.11	0.53
Pb-CLR	-0.38	0.091	-0.36	0.17	0.51	0.4	0.19	-0.5	0.46	-0.47	0.028	-0.43	1	0.24	-0.074	-0.21	-0.3
Sb-CLR	-0.074	-0.11	-0.065	-0.085	-0.11	0.3	0.44	-0.12	-0.043	-0.45	-0.073	-0.14	0.24	1	-0.17	-0.28	-0.085
Sc-CLR	0.57	0.13	-0.37	0.19	0.091	-0.2	-0.43	0.35	-0.33	0.48	0.7	-0.37	-0.074	-0.17	1	0.092	-0.56
Tl-CLR	0.1	-0.24	0.19	0.12	-0.044	-0.38	-0.43	0.16	-0.07	0.24	0.11	0.11	-0.21	-0.28	0.092	1	-0.34
W-CLR	-0.15	-0.078	0.065	-0.52	-0.5	0.091	0.3	0.05	-0.2	-0.2	-0.41	0.53	-0.3	-0.085	-0.56	-0.34	1

Tabla 6-2. Representatividad de cada Componente Principal de las areniscas del Grupo Chicama y la Formación Oyón

	Eigenvalues	Porcentaje	Acumulativo %
PC1	4.33	25.47	25.47
PC2	3.484	20.5	45.97
PC3	2.317	13.63	59.6
PC4	1.431	8.416	68.01
PC5	1.186	6.978	74.99

Tabla 6-3 Valores Eigenvectors de las areniscas del Grupo Chicama y la Formación Oyón

Eigenvectors	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5
Au-CLR	0.01736	0.02452	0.06682	0.679	0.3673
Cu-CLR	-0.3687	0.08306	0.1791	0.0893	-0.1523
Li-CLR	-0.07129	-0.157	-0.4379	0.2508	-0.3213
Mn-CLR	0.1255	0.3369	-0.231	-0.01172	-0.1367
Zn-CLR	0.2967	0.3501	-0.1383	-0.1035	0.0675
Ag-CLR	0.2685	-0.07955	0.3499	-0.08312	0.184
As-CLR	0.198	-0.2695	0.1396	0.1405	-0.3574
Bi-CLR	-0.3696	-0.02985	0.1963	-0.1755	-0.05073
Cd-CLR	0.3616	0.1534	-0.2438	-0.1794	0.07887
Ga-CLR	-0.308	0.1492	-0.2552	0.2306	-0.01283
In-CLR	-0.1702	0.3048	0.3417	-0.2628	0.0325
Mo-CLR	-0.16	-0.3238	-0.1231	-0.3559	0.1693
Pb-CLR	0.3416	0.1567	0.1796	0.01659	0.01292
Sb-CLR	0.159	-0.1159	0.2973	0.04403	-0.6305
Sc-CLR	-0.2362	0.384	0.2361	0.1301	0.03251
Ti-CLR	-0.17	0.1412	-0.2929	-0.3057	-0.1329
W-CLR	-0.01481	-0.4506	-0.001751	-0.0782	0.3143

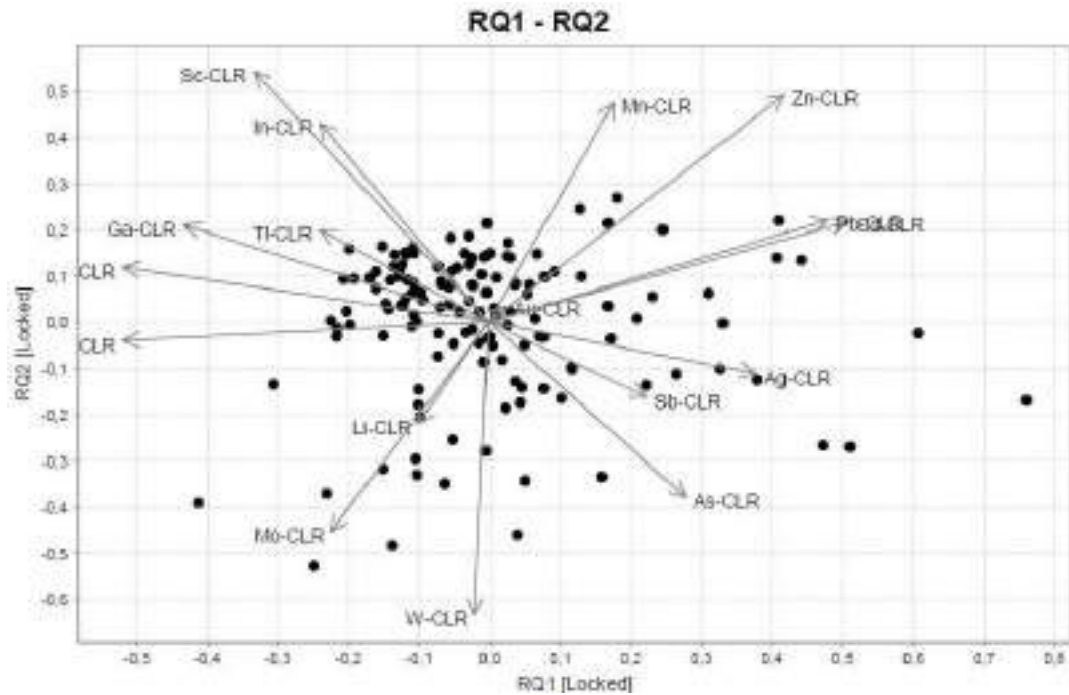


Figura 6-1. Biplot PC1-PC2 de las areniscas del Grupo Chicama y la Formación Oyón

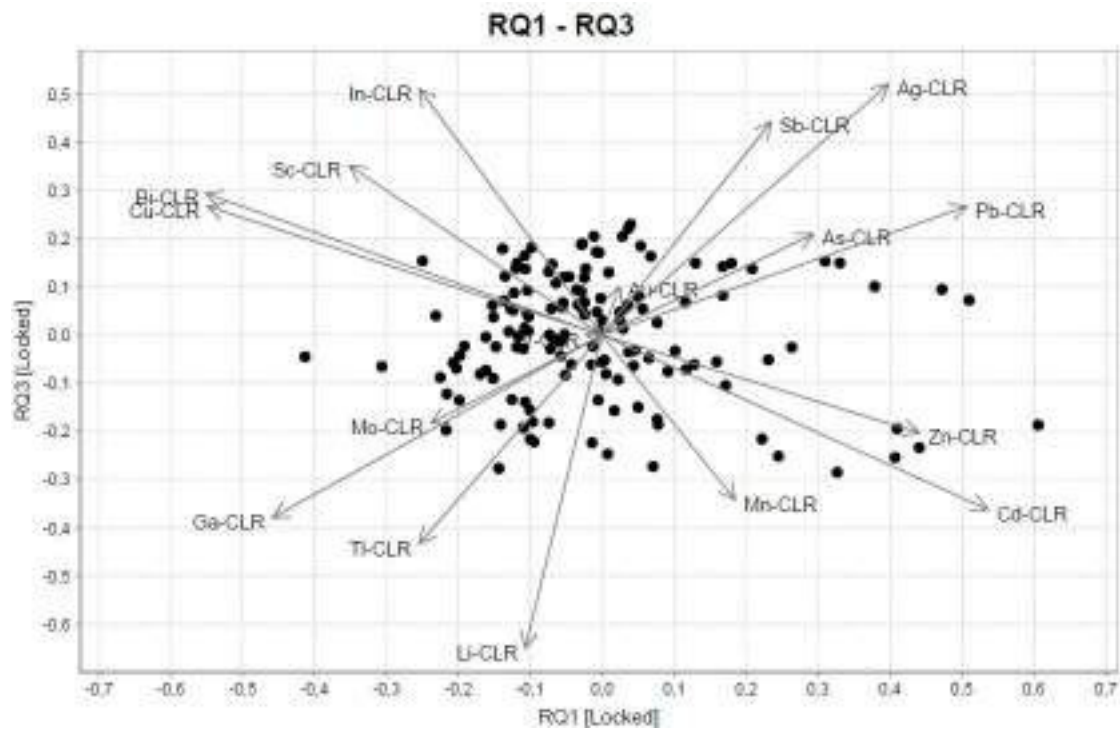


Figura 6-2. Biplot PC1-PC3 de las areniscas del Grupo Chicama y la Formación Oyón

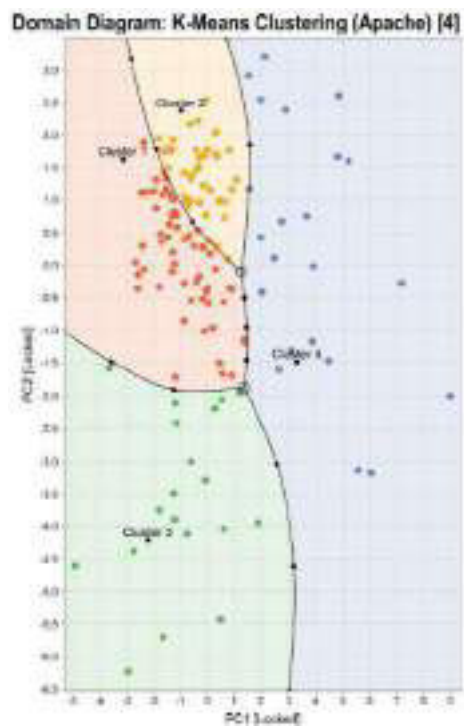


Figura 6-3. Autodominios de las areniscas del Grupo Chicama y la Formación Oyón

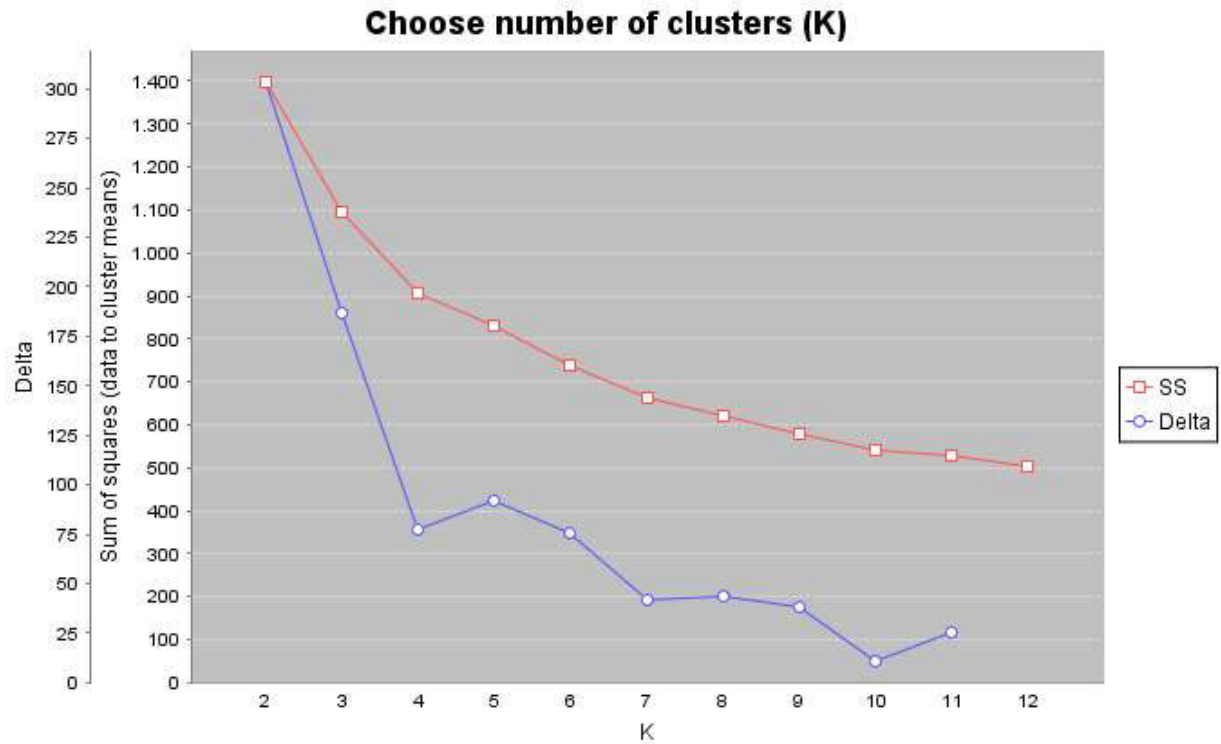


Figura 6-4. Número de clústeres de las areniscas del Grupo Chicama y la Formación Oyón

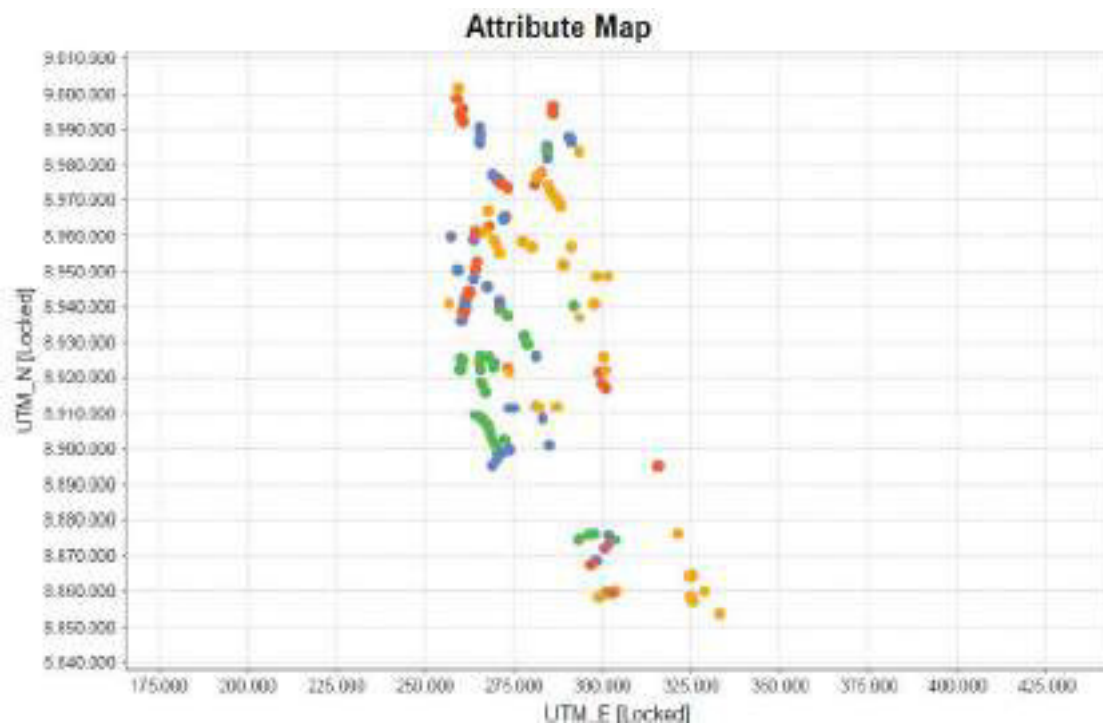


Figura 6-5. Mapa de Atributos sectorizado por clústeres de las areniscas del Grupo Chicama y la Formación Oyón

Tabla 6-4. Discriminantes de las areniscas del Grupo Chicama y la Formación Oyón

Discriminantes	Eigenvalues	Porcentaje	Acumulativo %
DP1	3.799	72.33	72.33
DP2	1.21	23.04	95.37
DP3	0.2431	4.629	100

Tabla 6-5. Relación de clústeres y componentes principales para Discriminantes de las areniscas del Grupo Chicama y la Formación Oyón

Clústeres	Conteo	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5
Clúster 4	22	3.799	0.2418	-0.1931	-0.2821	0.08526
Clúster 3	19	-1	-3.595	0.2008	-0.09214	0.1059
Clúster 2	42	-0.2924	1.374	0.9177	-0.05088	0.1338
Clúster 1	58	-0.9018	0.0908	-0.6571	0.174	-0.1639

Tabla 6-6. Eigenvectors Discriminantes de las areniscas del Grupo Chicama y la Formación Oyón

Eigenvectors	DP1	DP2	DP3
PC1	0.6067	0.6897	0.01932
PC2	0.7676	-0.6708	0.1272
PC3	0.1557	-0.1615	-0.8995
PC4	-0.1141	-0.2051	0.217
PC5	0.07342	0.07874	-0.3567

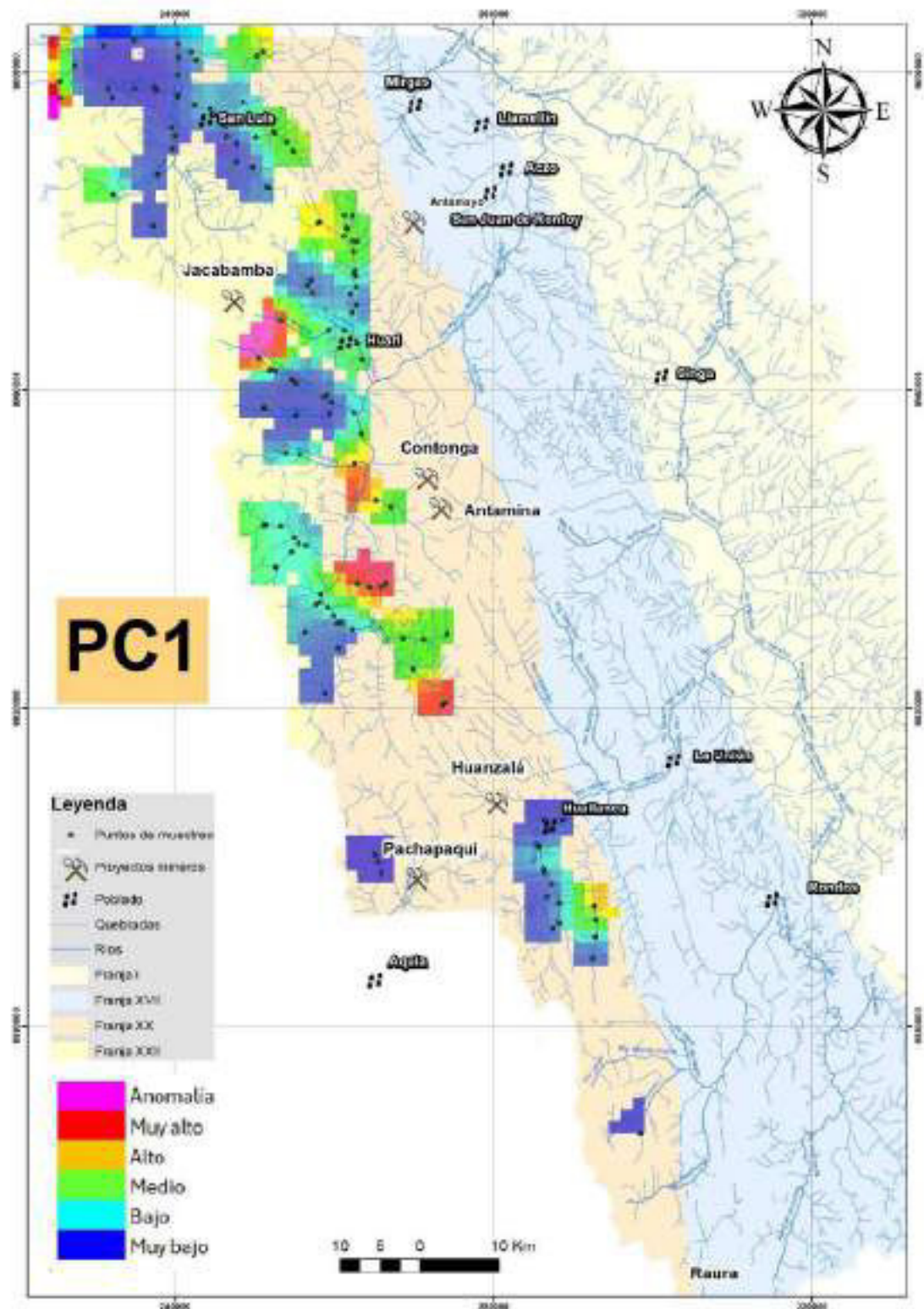


Figura 6-6. Mapa Temático PC1 de las areniscas del Grupo Chicama y la Formación Oyón

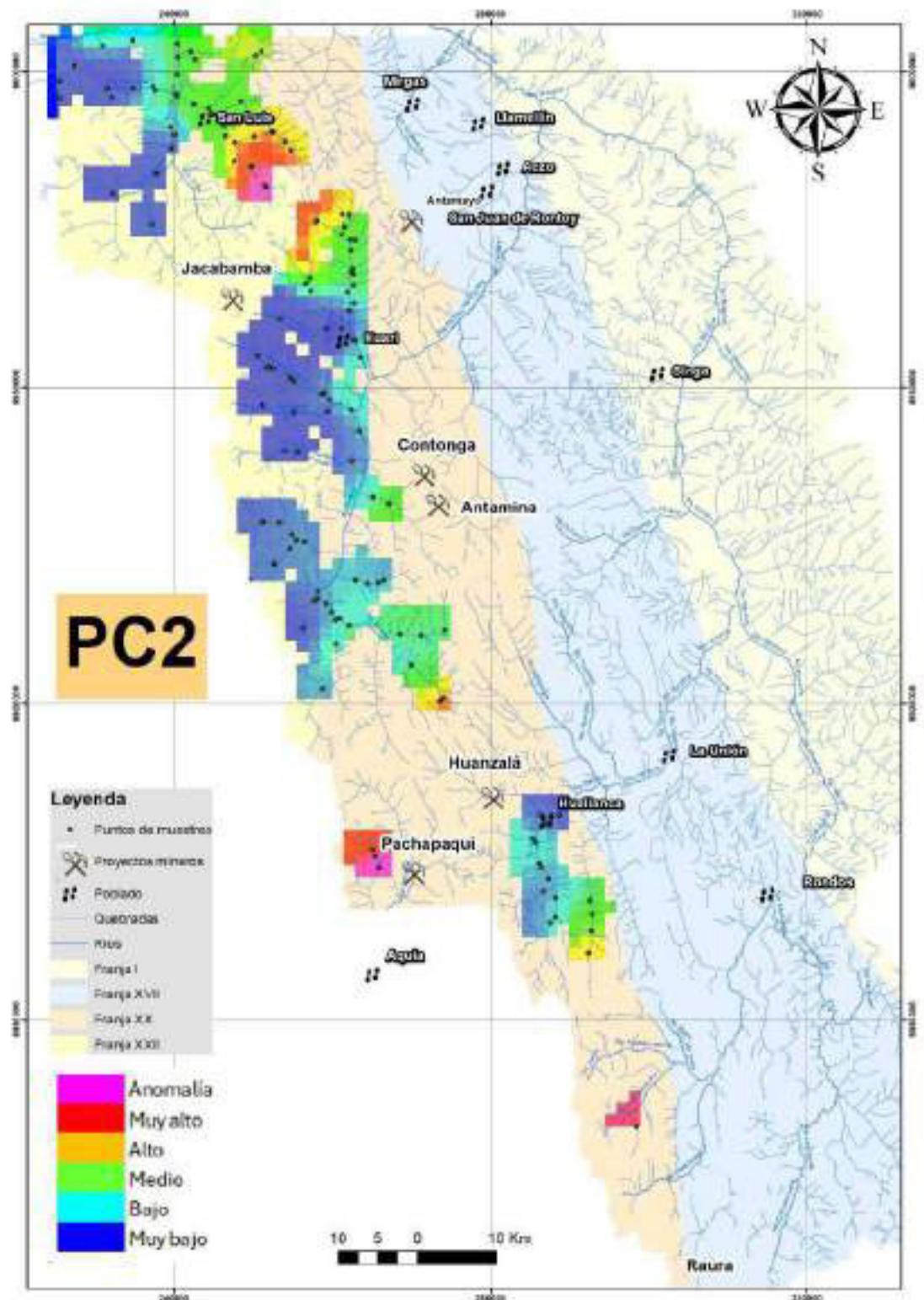


Figura 6-7. Mapa Temático PC2 de las areniscas del Grupo Chicama y la Formación Oyón

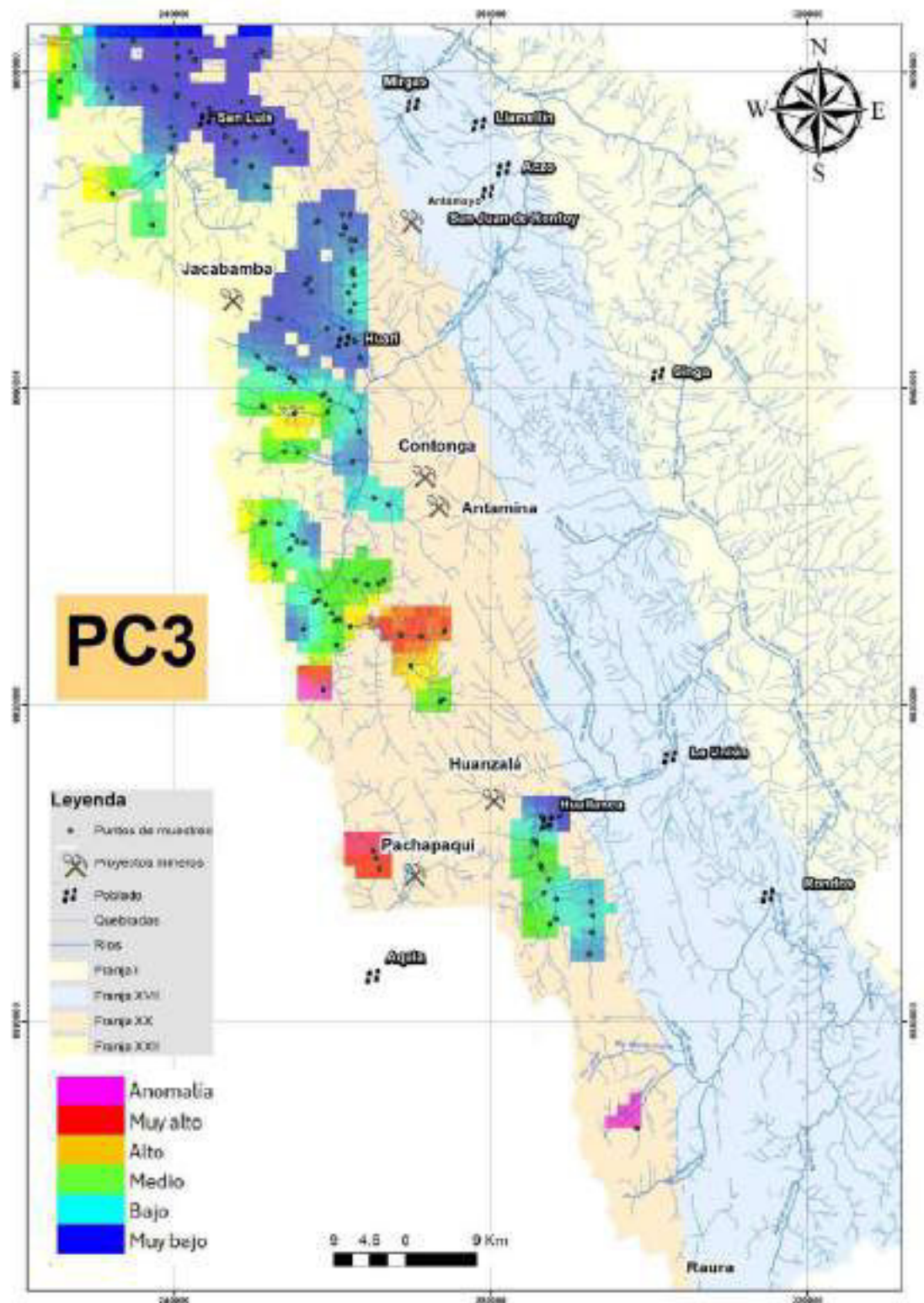


Figura 6-8. Mapa Temático PC-3 de las areniscas del Grupo Chicama y la Formación Oyón

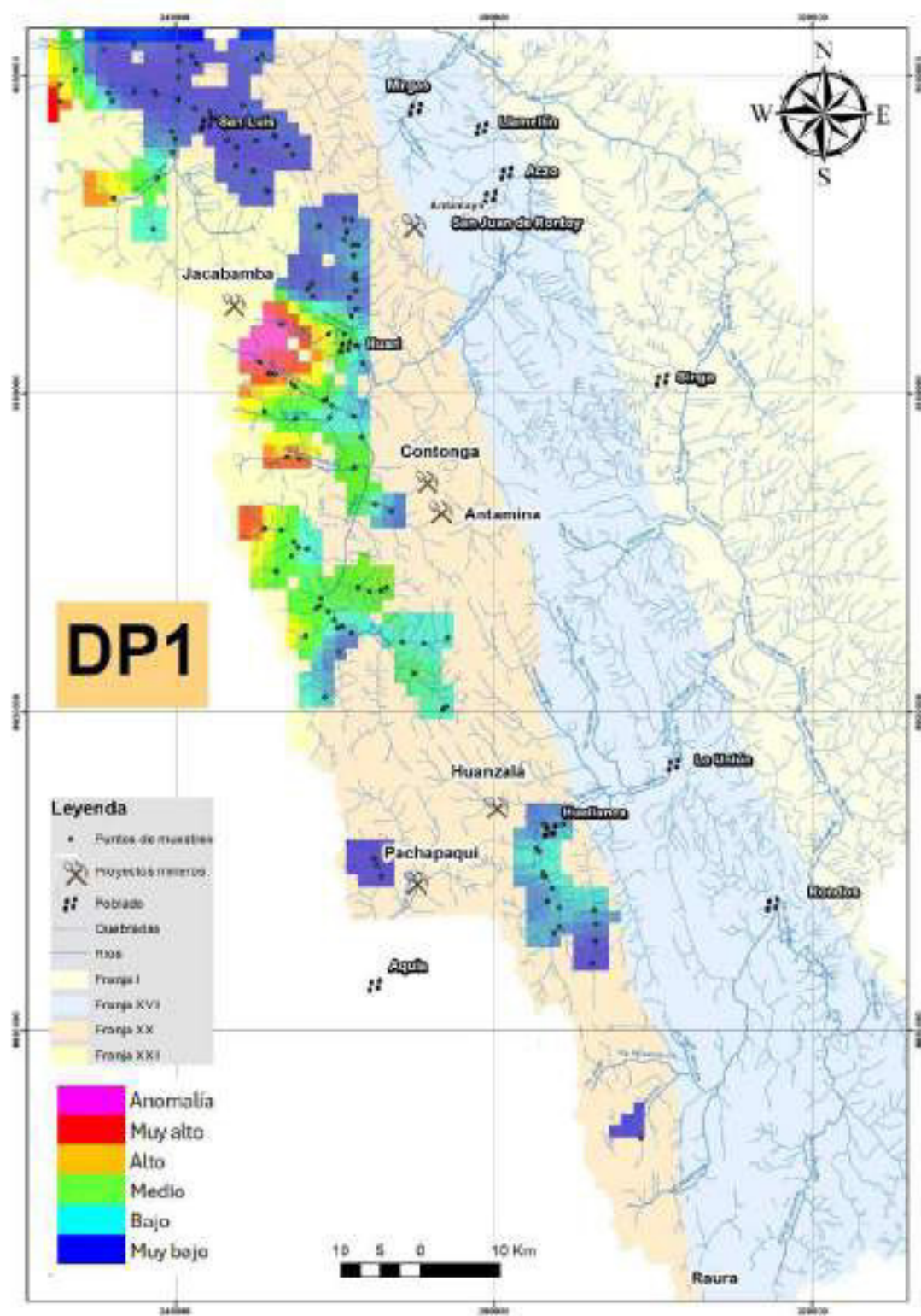


Figura 6-9. Mapa DP1 de las areniscas del Grupo Chicama y la Formación Oyón

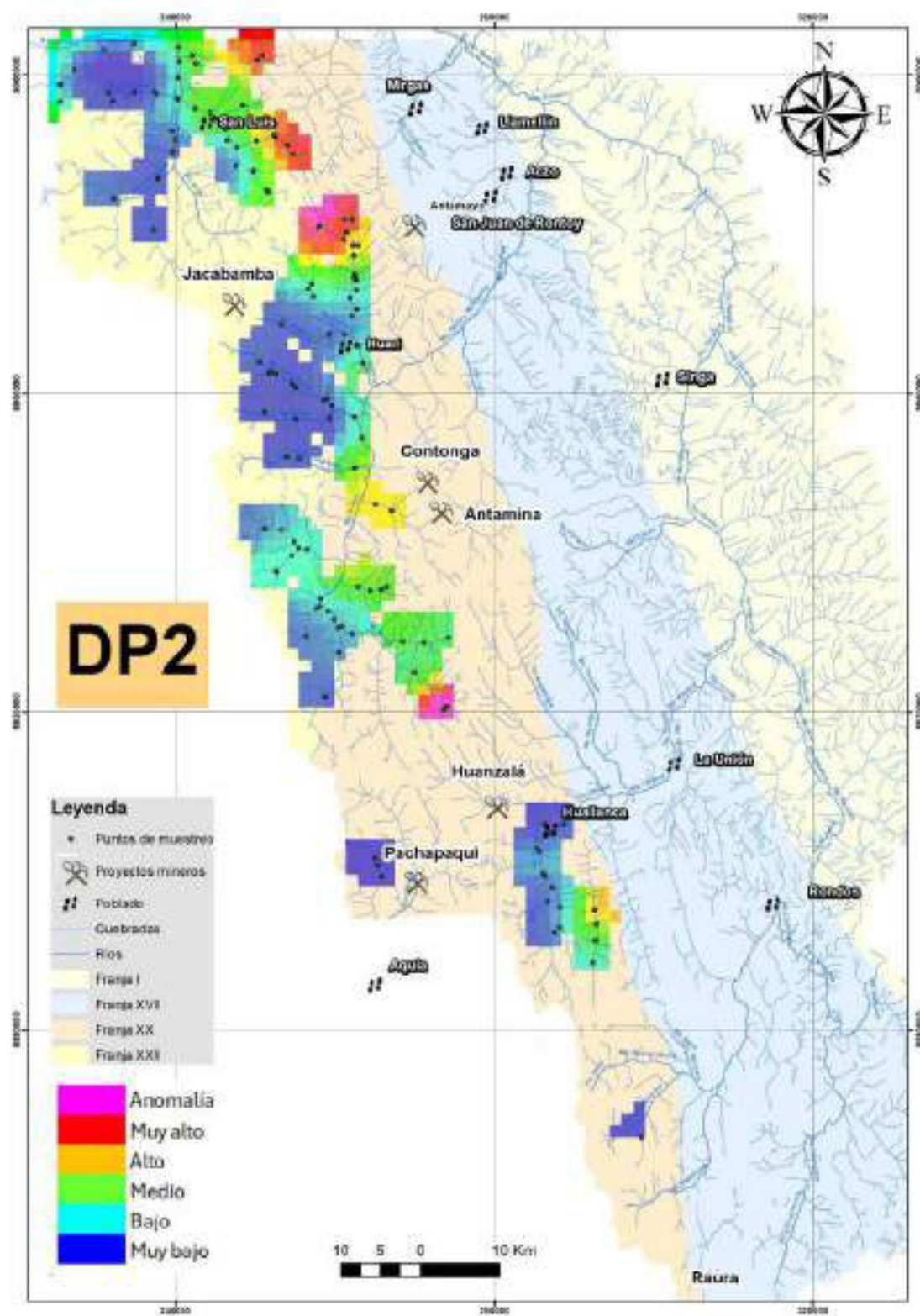


Figura 6-10. Mapa DP2 de las areniscas del Grupo Chicama y la Formación Oyón

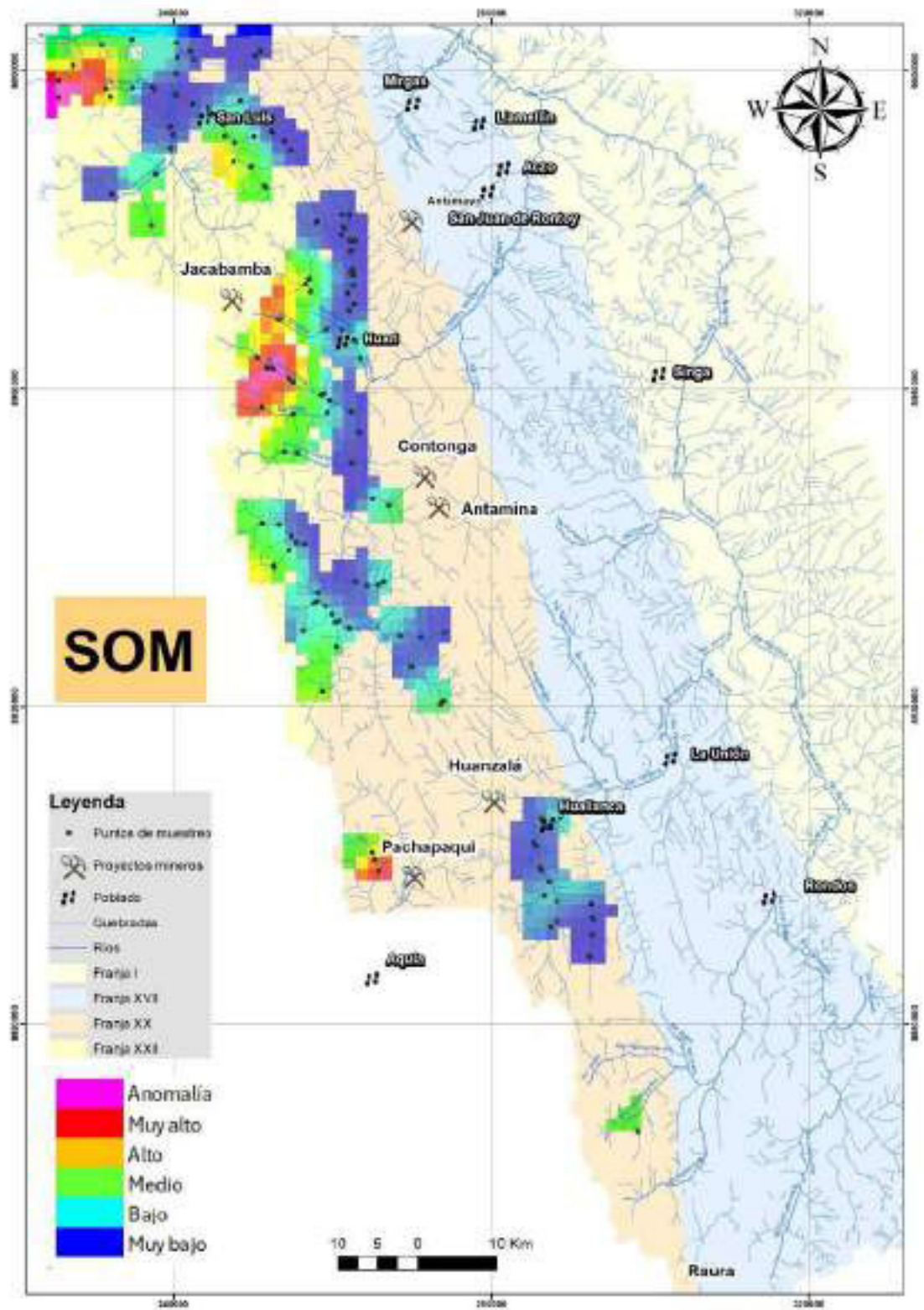


Figura 6-11. Mapa SOM de las areniscas del Grupo Chicama y la Formación Oyón

6.2.2 Goyllarisquizga

Los resultados del PC1 (**Figura 6-18**) muestran anomalía fuerte en los alrededores de Pachapaqui y cerca de Huanzalá, se puede observar que para este componente las anomalías principalmente involucran al Ag-Sb-W/ Li-Mn-Ga-Sc-Tl, mientras que los resultados del PC2 (**Figura 6-19**) están asociados a Zn-Cd/ Au-Cu-Bi que se manifiestan fuertemente entre 3-5 km al sur de Antamina y a unos 5 km de Pachapaqui, en una de las quebradas afluentes al río Pativilca.

Los mapas de discriminantes nos dan resultados similares a los PC descritos anteriormente, por ejemplo, el DP1 (**Figura 6-21**) muestra un resultado sintetizado de la fuerte anomalía al W de Contonga, se observa como nueva la anomalía en los alrededores de Huari en la parte baja del río Huari, mientras que el DP2 (**Figura 6-22**) también muestra anomalía al oeste de Antamina-Contonga dentro de un radio de 2 km, además de resaltar anomalía entre Pachapaqui y Huanzalá nuevamente en la zona de las mismas muestras que marcaron la anomalía para el DP1.

El mapa SOM (**Figura 6-23**) de esta población muestral sintetiza la anomalía fuerte al NW de Antamina-Contonga a una distancia aproximada de 6 km hacia la parte media del río Mosna, la presencia de anomalías moderadas al este de Pachapaqui entre 1-3 km en el río Pativilca y al NW de Huanzalá en un radio de 10 km, observados en los mapas discriminantes mencionados anteriormente. En base a los resultados observados en los diferentes mapas, vemos una fuerte tendencia a marcar como prospectable la zona entre Huanzalá, Pachapaqui y Antamina-Contonga, los cuales son proyectos conocidos, dando así validación a los métodos estadísticos utilizados.

Análisis de Correlación de Pearson (Tabla 6-7):

- ✓ Correlaciones positivas altas (> 0.65): Cr-Ga, Mn-Co, Zn-Cd, Co-Sc, Ga-Sc

- ✓ Correlaciones positivas moderadas (0.5-0.65): Cu-Bi, Co-Ga

Análisis de Componentes Principales:

Se escogió por medio del gráfico de sedimentación a 5 componentes principales los cuales explican el 69.71% de la varianza (**Figura 6-12**). Los resultados de los componentes con mayor explicación de la varianza son:

- ✓ PC1: Ag-Sb-W/ Li-Mn-Ga- Sc- Tl: 22.4%
- ✓ PC2: Zn-Cd / Au- Cu-Bi: 17.84%
- ✓ PC3: As / In-Pb:13.04%

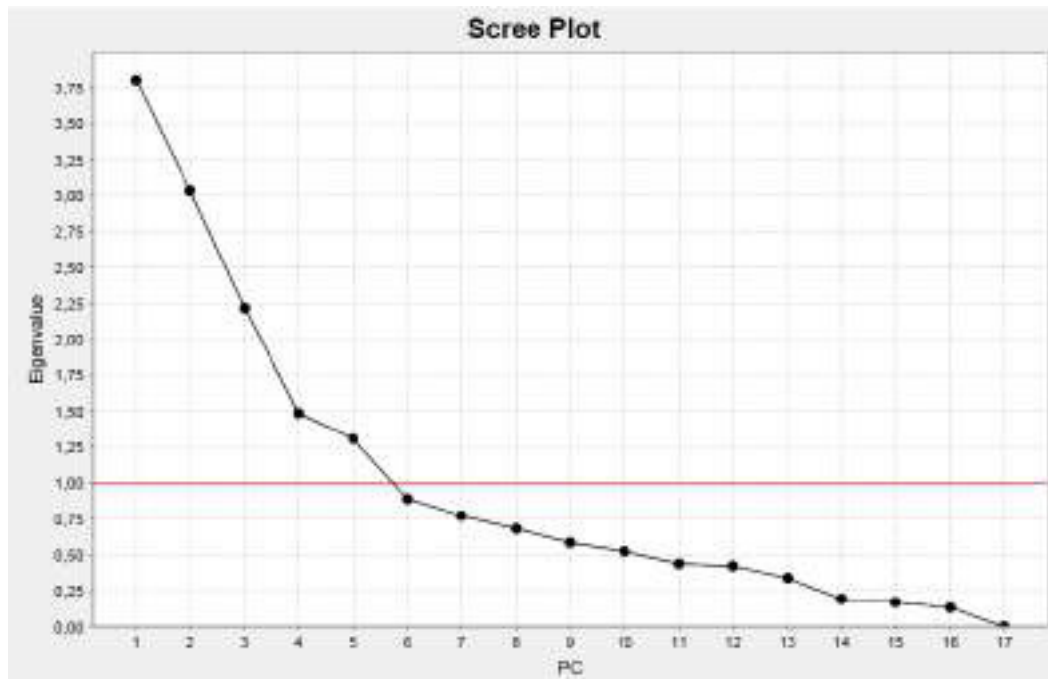


Figura 6-12. Scree Plot para determinar el número de componentes a usar en el PCA

Tabla 6-7 Análisis de Correlación de Pearson de las areniscas del Grupo Goyllarisquizga

Correlación	Au-CLR	Cu-CLR	Li-CLR	Mn-CLR	Zn-CLR	Ag-CLR	As-CLR	Bi-CLR	Cd-CLR	Ga-CLR	In-CLR	Mo-CLR	Pb-CLR	Sb-CLR	Sc-CLR	Tl-CLR	W-CLR
Au-CLR	1	0.17	-0.03	-0.22	-0.46	0.0042	0.091	0.12	-0.53	0.069	-0.14	-0.24	-0.11	0.066	0.083	-0.32	0.096
Cu-CLR	0.17	1	-0.14	-0.16	-0.27	0.074	-0.24	0.47	-0.46	0.054	0.27	-0.16	0.2	-0.064	0.12	-0.32	-0.018
Li-CLR	-0.03	-0.14	1	0.31	-0.042	-0.52	-0.3	-0.25	-0.069	0.44	-0.32	-0.026	-0.46	-0.13	0.25	0.23	-0.15
Mn-CLR	-0.22	-0.16	0.31	1	0.25	-0.37	-0.074	-0.26	0.048	0.34	-0.13	-0.2	-0.0053	-0.38	0.3	0.26	-0.43
Zn-CLR	-0.46	-0.27	-0.042	0.25	1	0.043	-0.19	-0.32	0.67	-0.38	0.19	-0.14	0.34	0.025	-0.36	-0.0075	-0.1
Ag-CLR	0.0042	0.074	-0.52	-0.37	0.043	1	0.084	0.11	0.063	-0.36	0.29	-0.18	0.44	0.22	-0.42	-0.36	0.06
As-CLR	0.091	-0.24	-0.3	-0.074	-0.19	0.084	1	-0.093	-0.094	-0.17	-0.22	-0.085	-0.19	0.23	-0.18	0.17	7.10E-04
Bi-CLR	0.12	0.47	-0.25	-0.26	-0.32	0.11	-0.093	1	-0.34	-0.12	0.19	-0.062	0.15	-0.13	-0.021	-0.38	0.23
Cd-CLR	-0.53	-0.46	-0.069	0.048	0.67	0.063	-0.094	-0.34	1	-0.39	0.023	0.27	0.089	0.06	-0.44	0.11	-0.035
Ga-CLR	0.069	0.054	0.44	0.34	-0.38	-0.36	-0.17	-0.12	-0.39	1	-0.28	-0.064	-0.22	-0.47	0.77	0.31	-0.42
In-CLR	-0.14	0.27	-0.32	-0.13	0.19	0.29	-0.22	0.19	0.023	-0.28	1	-0.1	0.29	-0.042	-0.047	-0.31	-0.066
Mo-CLR	-0.24	-0.16	-0.026	-0.2	-0.14	-0.18	-0.085	-0.062	0.27	-0.064	-0.1	1	-0.44	-0.079	-0.076	0.3	0.038
Pb-CLR	-0.11	0.2	-0.46	-0.0053	0.34	0.44	-0.19	0.15	0.089	-0.22	0.29	-0.44	1	-0.067	-0.13	-0.26	-0.086
Sb-CLR	0.066	-0.064	-0.13	-0.38	0.025	0.22	0.23	-0.13	0.06	-0.47	-0.042	-0.079	-0.067	1	-0.38	-0.23	0.19
Sc-CLR	0.083	0.12	0.25	0.3	-0.36	-0.42	-0.18	-0.021	-0.44	0.77	-0.047	-0.076	-0.13	-0.38	1	0.2	-0.41
Tl-CLR	-0.32	-0.32	0.23	0.26	-0.0075	-0.36	0.17	-0.38	0.11	0.31	-0.31	0.3	-0.26	-0.23	0.2	1	-0.48
W-CLR	0.096	-0.018	-0.15	-0.43	-0.1	0.06	7.10E-04	0.23	-0.035	-0.42	-0.066	0.038	-0.086	0.19	-0.41	-0.48	1

Tabla 6-8. Número de Componentes Principales usados

Componentes	Eigenvalues	Porcentaje	Acumulativo %
PC1	3.807	22.4	22.4
PC2	3.032	17.84	40.24
PC3	2.217	13.04	53.28
PC4	1.487	8.745	62.02
PC5	1.307	7.691	69.71

Tabla 6-9. Eigenvectors de las areniscas del Grupo Goyllarisquizga

Eigenvectors	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5
Au-CLR	0.01204	0.3605	0.1905	0.2372	0.2203
Cu-CLR	0.07915	0.3714	-0.2185	-0.1851	-0.05097
Li-CLR	-0.3328	-0.04901	0.068	-0.15	0.4766
Mn-CLR	-0.2853	-0.1549	-0.2805	0.1794	0.159
Zn-CLR	0.1261	-0.4206	-0.2874	0.009714	0.2328
Ag-CLR	0.3484	0.0335	-0.09966	0.2154	-0.2103
As-CLR	0.04948	-0.02734	0.3278	0.5026	-0.3037
Bi-CLR	0.154	0.34	-0.07782	-0.28	-0.1328
Cd-CLR	0.1146	-0.4901	-0.04876	-0.1551	0.009629
Ga-CLR	-0.4198	0.1741	-0.1125	0.04842	-0.04241
In-CLR	0.2095	0.05197	-0.3463	-0.1723	-0.1582
Mo-CLR	-0.06667	-0.1561	0.2744	-0.5085	-0.4046
Pb-CLR	0.2342	0.00969	-0.4561	0.2061	-0.03456
Sb-CLR	0.2359	-0.05003	0.2944	0.2011	0.1819
Sc-CLR	-0.3646	0.22	-0.1779	0.02254	-0.1048
Tl-CLR	-0.3091	-0.2357	0.08228	0.08264	-0.3922
W-CLR	0.2478	0.08467	0.2886	-0.2689	0.3137

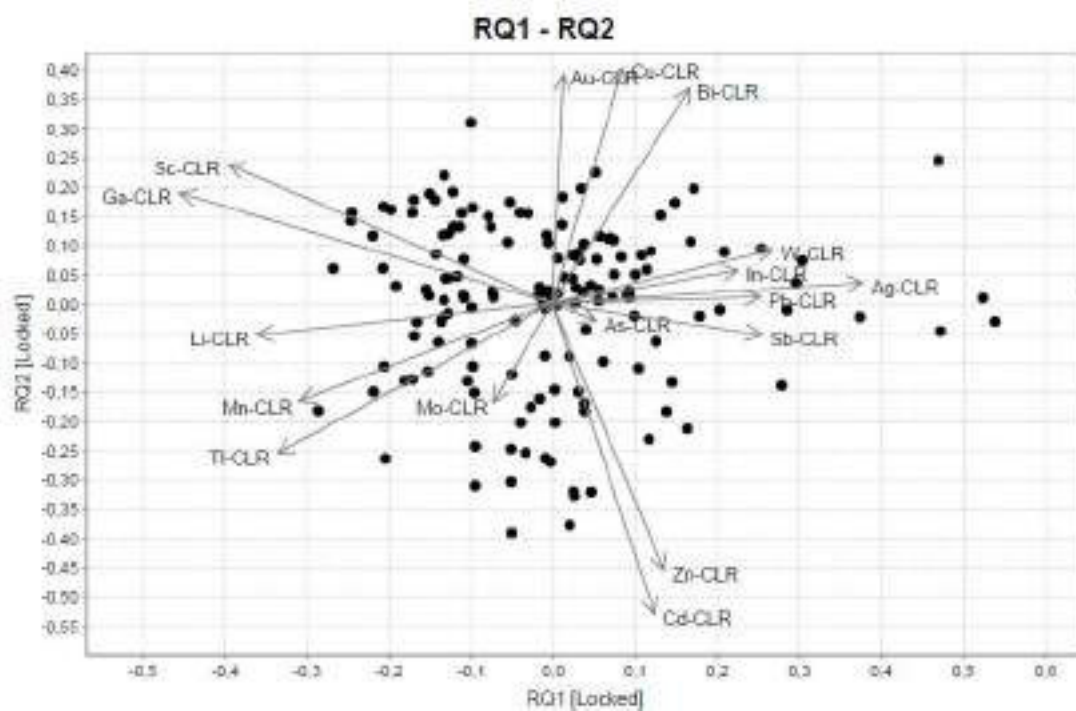


Figura 6-13. Biplot PC1-PC2 de las areniscas del Grupo Goyllarisquizga

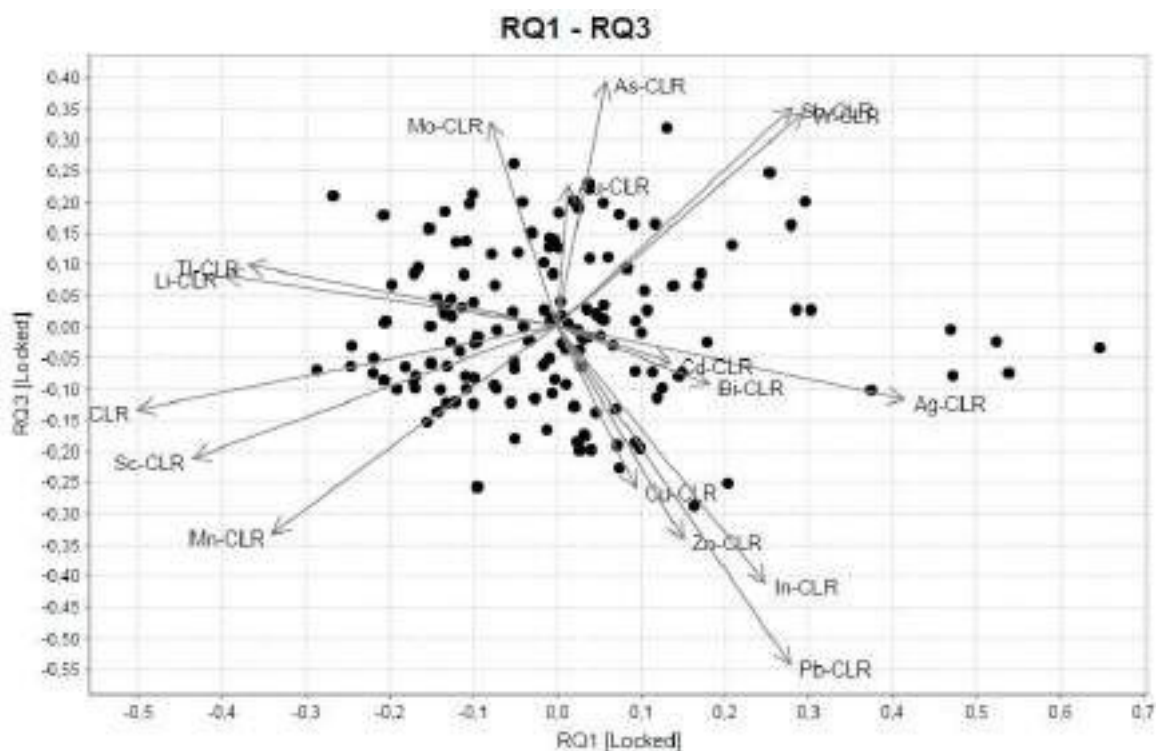


Figura 6-14. Biplot PC1-PC3 de las areniscas del Grupo Goyllarisquiza

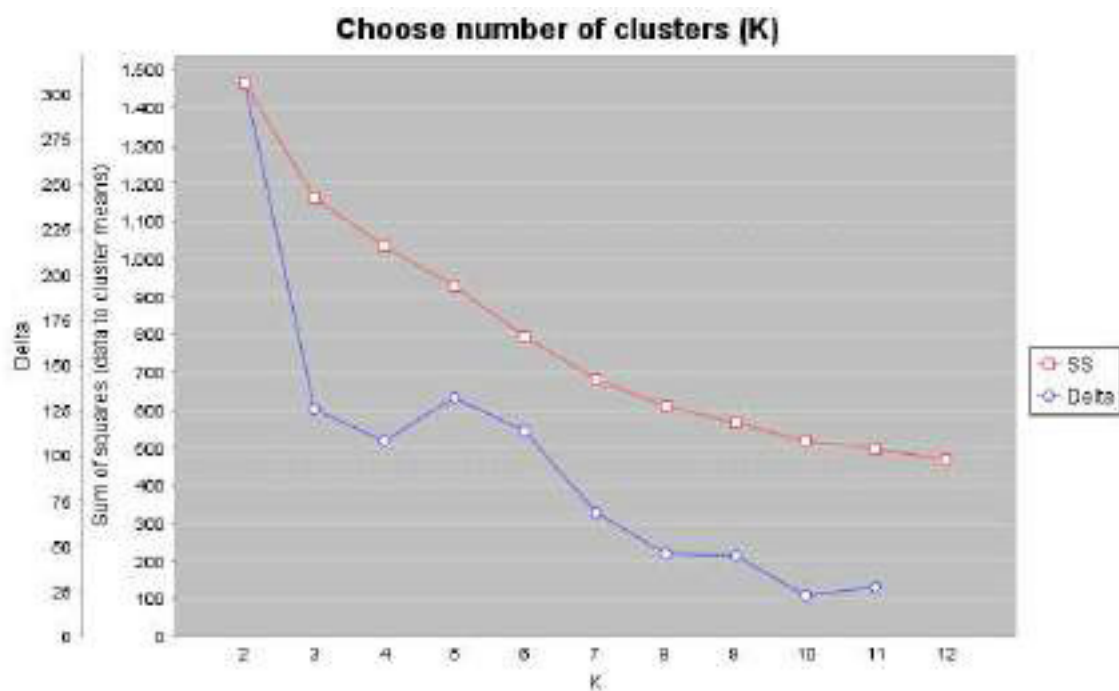


Figura 6-15. K-means clustering de las areniscas del Grupo Goyllarisquiza

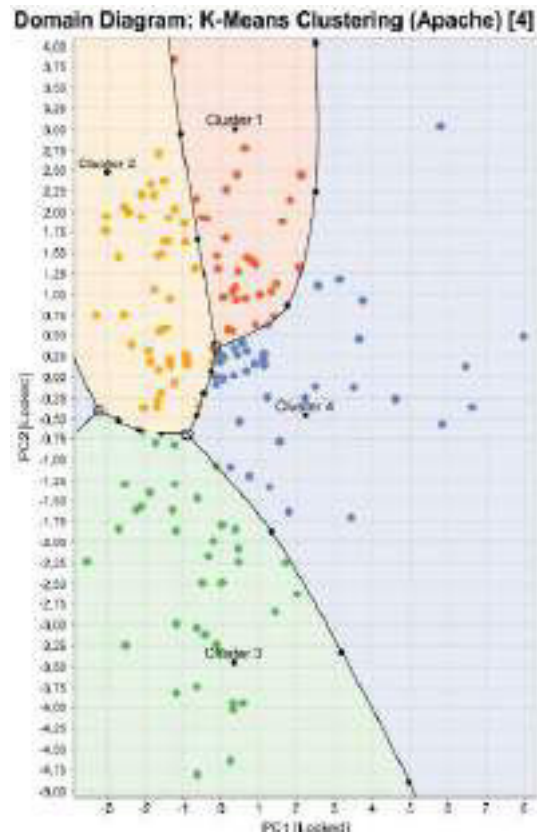


Figura 6-16. Autodominios de las areniscas del Grupo Goyllarisquizga

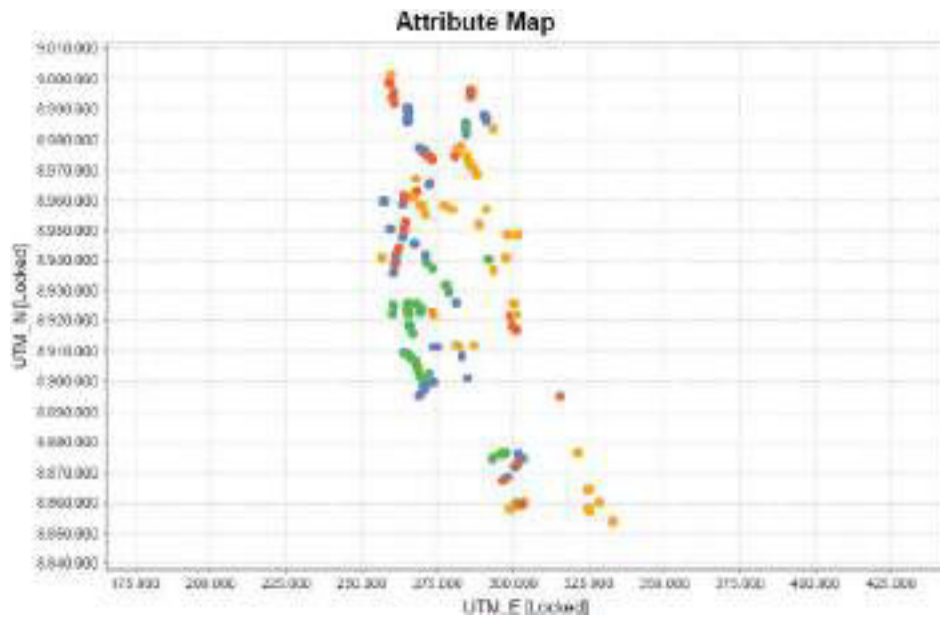


Figura 6-17. Mapa de atributos sectorizado por clústeres de las areniscas del Grupo Goyllarisquizga

Tabla 6-10. Número de discriminantes de las areniscas del Grupo Goyllarisquizga

	Eigenvalues	Porcentaje	Acumulativo %
DP1	3.155	72.68	72.68
DP2	1.155	26.61	99.29
DP3	0.03087	0.7112	100

Tabla 6-11. Relación entre clústeres y componentes principales para Discriminantes

	Conteo	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5
Clúster 4	40	1.969	0.02613	-0.1988	0.1106	0.04402
Clúster 2	44	-1.637	1.003	-0.03561	0.01017	-0.3793
Clúster 1	31	0.5852	1.519	0.1584	0.1181	0.2405
Clúster 3	38	-0.6545	-2.428	0.1213	-0.2245	0.1966
Overall	153	1.43E-08	-1.83E-09	-3.60E-08	-7.56E-08	5.89E-08

Tabla 6-12. Eigenvectors de las areniscas del Grupo Goyllarisquizga

Eigenvectors	DP1	DP2	DP3
PC1	0.1151	0.9319	0.07995
PC2	0.9692	-0.1285	-0.08239
PC3	-0.0293	-0.06196	-0.3959
PC4	0.1657	0.0932	0.0714
PC5	-0.1379	0.3201	-0.9083

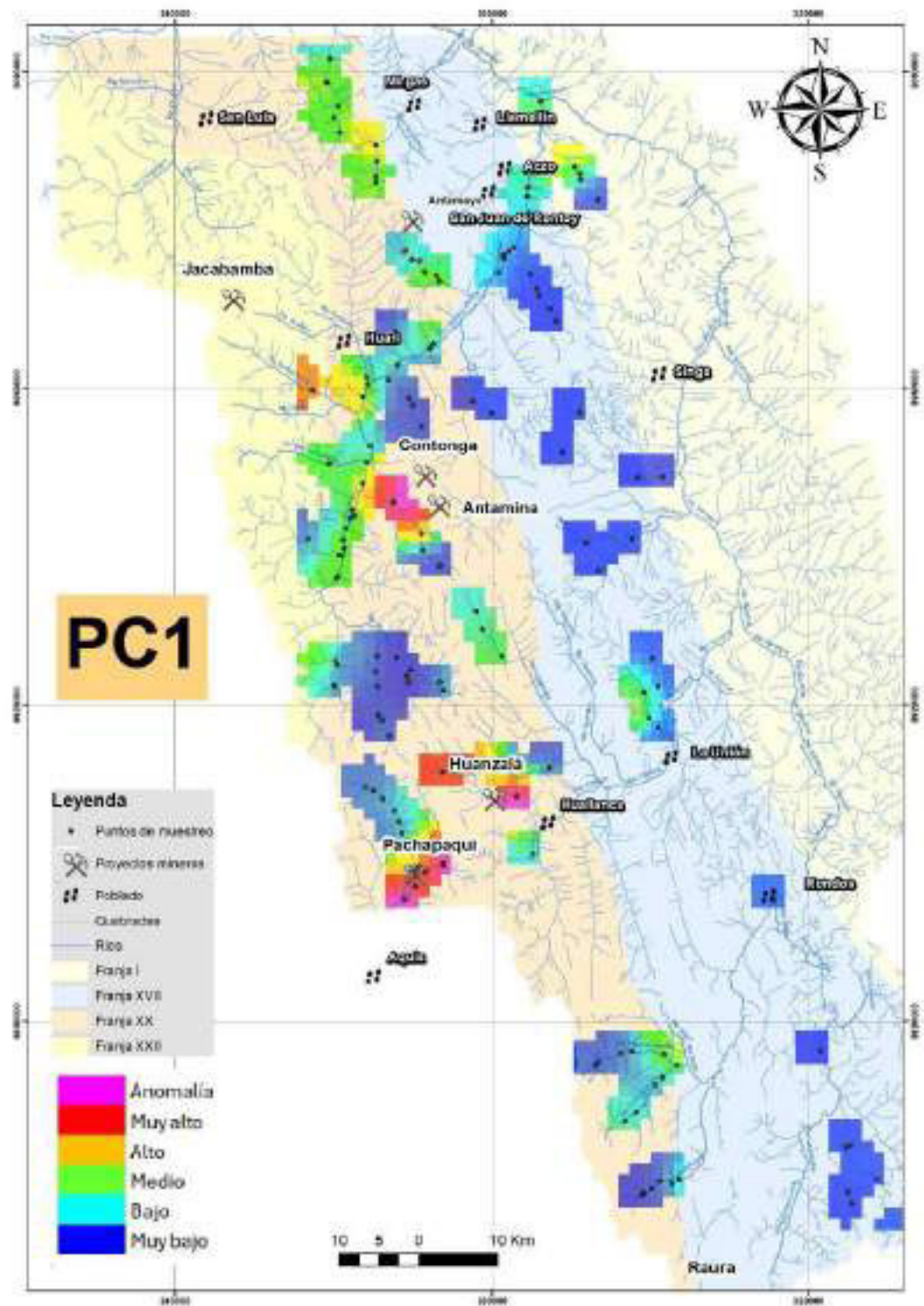


Figura 6-18. Mapa Temático PC1 de las areniscas del Grupo Goyllarisquizga

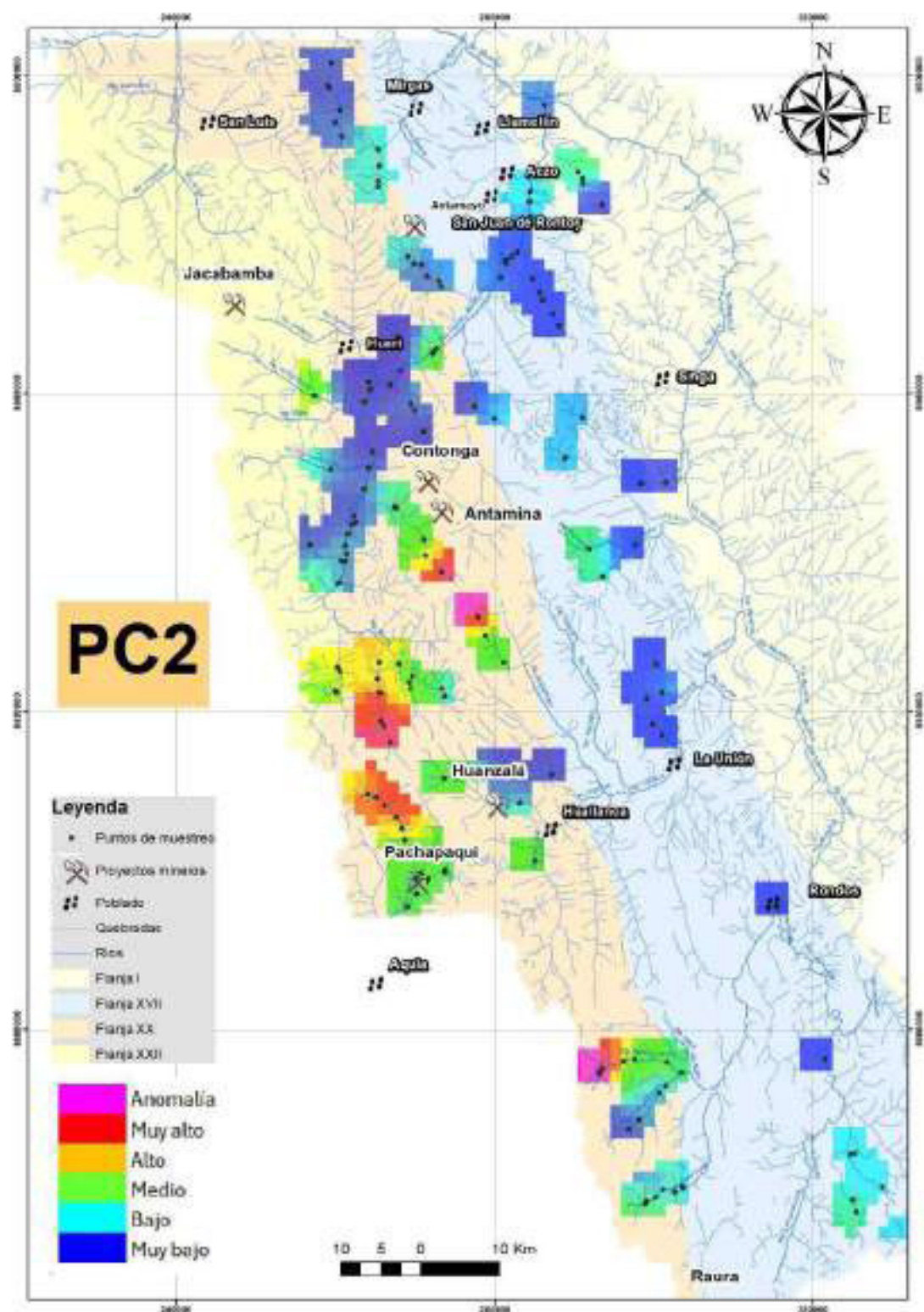


Figura 6-19. Mapa Temático PC2 de las areniscas del Grupo Goyllarisquizga

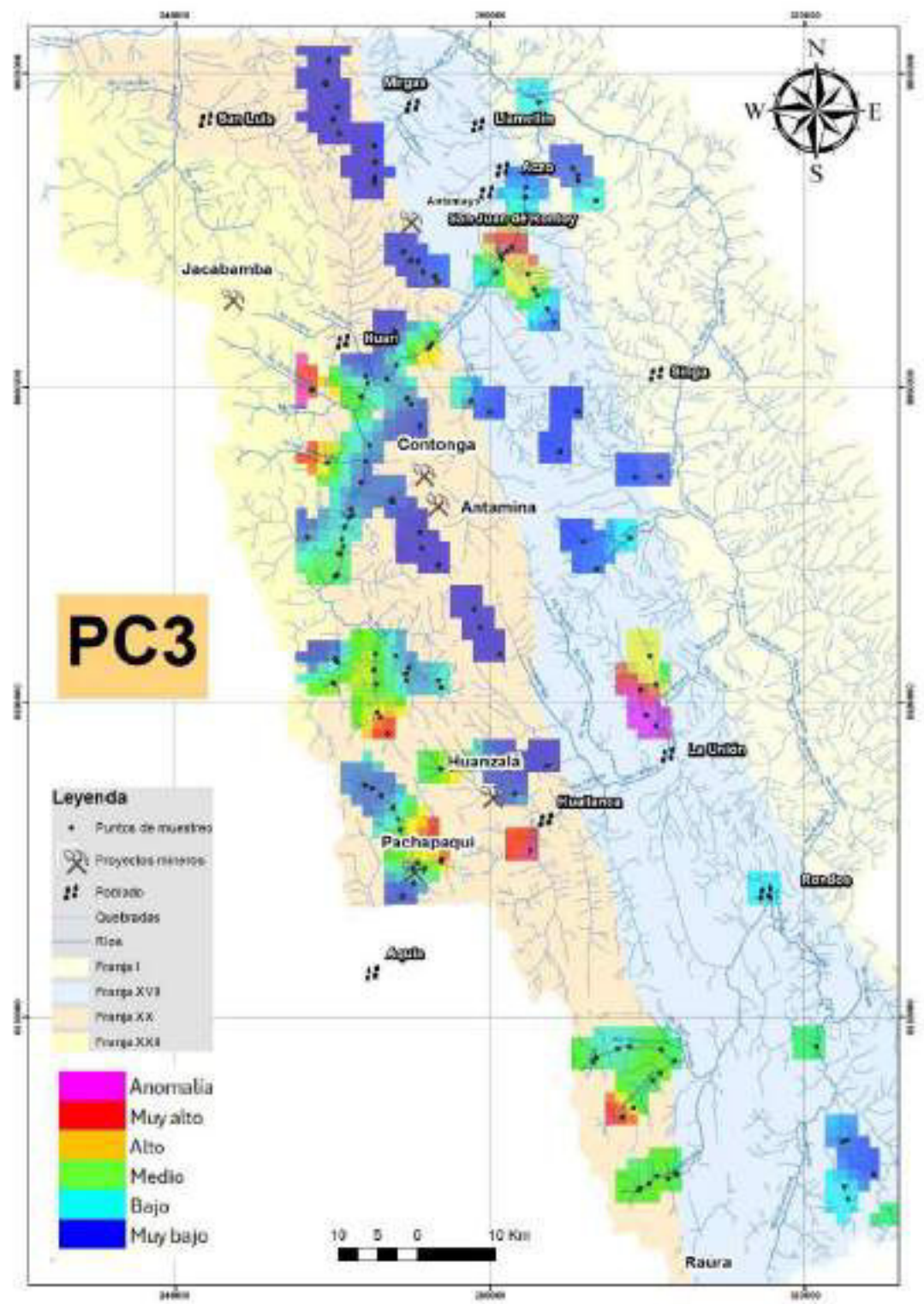


Figura 6-20. Mapa Temático PC3 de las areniscas del Grupo Goyllarisquizga

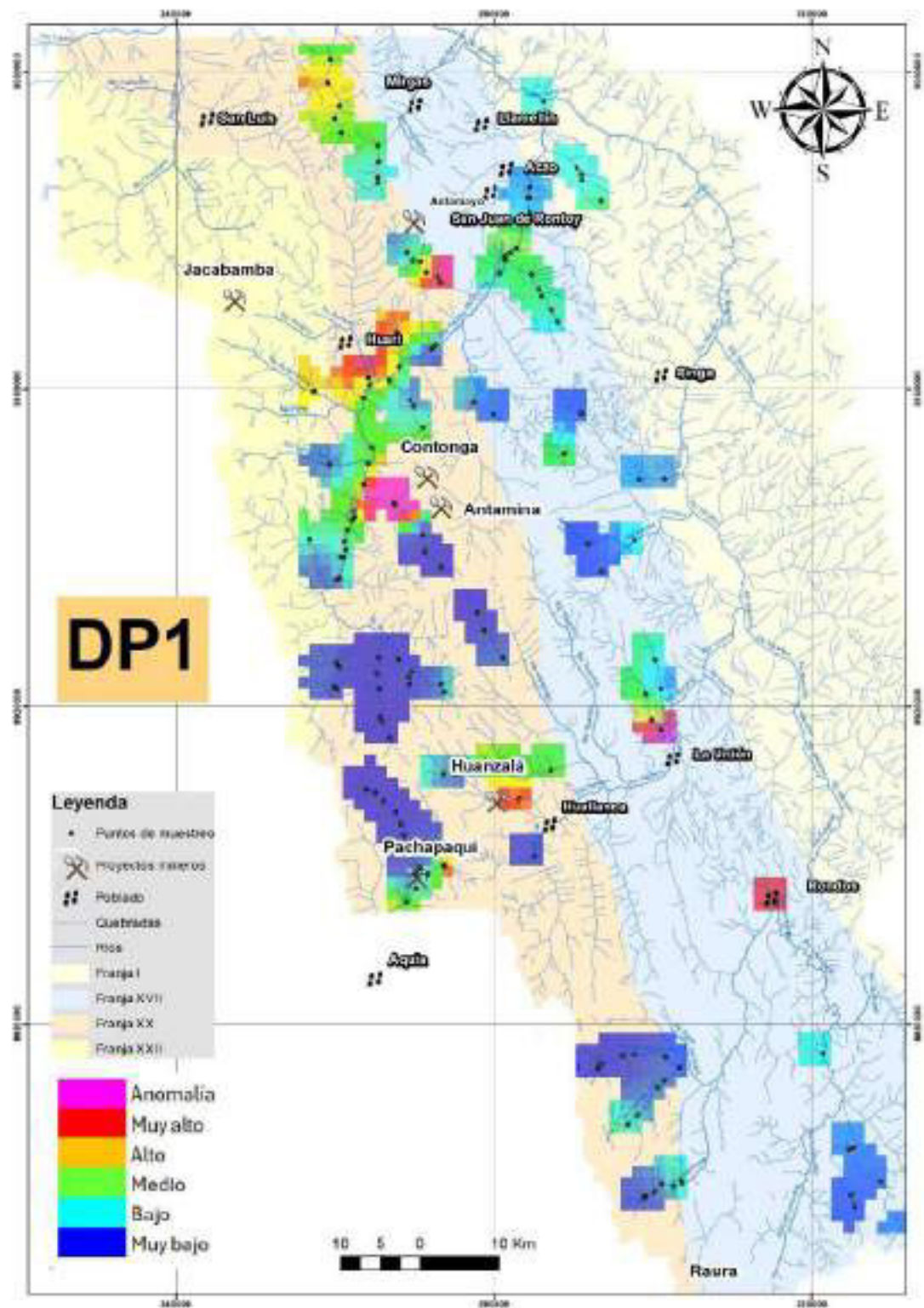


Figura 6-21. Mapa Temático DP1 de las areniscas del Grupo Goyllarisquiza

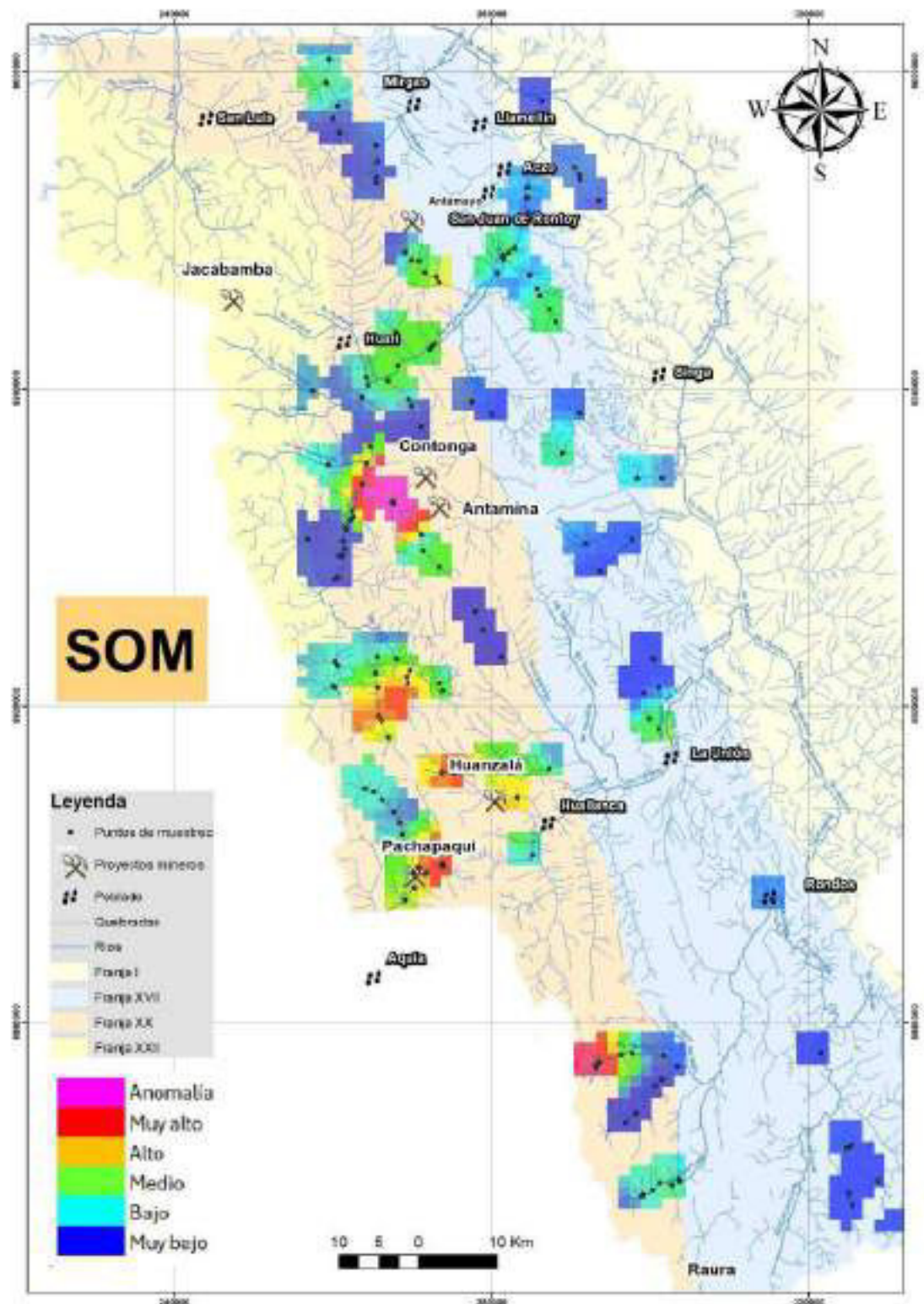


Figura 6-23. Mapa Temático SOM de las areniscas del Grupo Goyllarisquizga

6.2.3 Jumasha

Los resultados del PC1 (**Figura 6-30**) principalmente involucran al Ag-Bi-Sb-Pb-W/ Li-Mn-Ga-Mo-Sc-Tl y muestran anomalías fuertes en Contonga en un radio de 2 km, Antamayo en un radio de 3 km, el sector entre Huallanca- La Unión siguiendo la trayectoria del río Torres Vizcarra, al norte de Raura a 1.5 km al norte, además a 15 km al norte de Raura y SW de Rondos en la cabecera del río Nupe se observan marcadas anomalías. Los resultados del PC2 (**Figura 6-31**) están asociados a Cd/Cu y se manifiestan principalmente al norte de Raura en la misma área de anomalías del PC1, así también se observa a 3 km al oeste de Llamellín mientras que el PC3 (**Figura 6-32**) muestra anomalía fuerte asociada a Zn/As en Contonga, Antamayo y al NW de Huallanca a lo largo del río Andachupa en los últimos 20 km de recorrido antes de unirse al río Torres Vizcarra.

El mapa discriminante DP1 (**Figura 6-33**) muestra fuerte anomalía entre Huallanca-La Unión en el recorrido del río Torres Vizcarra, al norte de Raura a 1.5 km y luego a 15 km en el río Nupe, también en Contonga y Antamayo con un radio de 2 km, mientras que el DP2 (**Figura 6-22**) muestra anomalías al norte de Raura hasta 20 km al norte abarcando al río Nupe y en los alrededores de Llamellín se observan muestras marcando anomalías fuertes.

El mapa SOM (**Figura 6-35**) de esta población muestral sintetiza la presencia de las anomalías e indica anomalías fuertes en Llamellín, Aczo, Antamayo, Contonga, Huallanca- La Unión en una distancia entre 2-4 km alrededor. Los mapas tanto de Componentes Principales como de Discriminantes y de Redes Neuronales marcan en común y a la vez, de manera complementaria una fuerte tendencia de anomalías que sugieren interés prospectable en los alrededores de Antamayo, Contonga, Huallanca-La Unión y Llamellín-Aczo, río Nupe.

Análisis de Correlación de Pearson (Tabla 6-13):

- ✓ Correlaciones positivas altas (> 0.65): Ga-Sc
- ✓ Correlaciones positivas moderadas (0.5-0.65): Li-Ga, Li-Sc, Mn-Sc, Ga-Tl, Mn-Ga

Análisis de Componentes Principales:

Con base en el gráfico de sedimentación se escogió 5 componentes principales, los cuales explican el 69.49% de la varianza (**Figura 6-24**). Los resultados de los componentes con mayor explicación de la varianza son:

- ✓ PC1: Ag-Bi-Sb-Pb-W / Li-Mn-Ga-Sc-Tl-Mo: 31.28%
- ✓ PC2: Cd / Cu: 11.74%
- ✓ PC3: Zn / As 10.67%

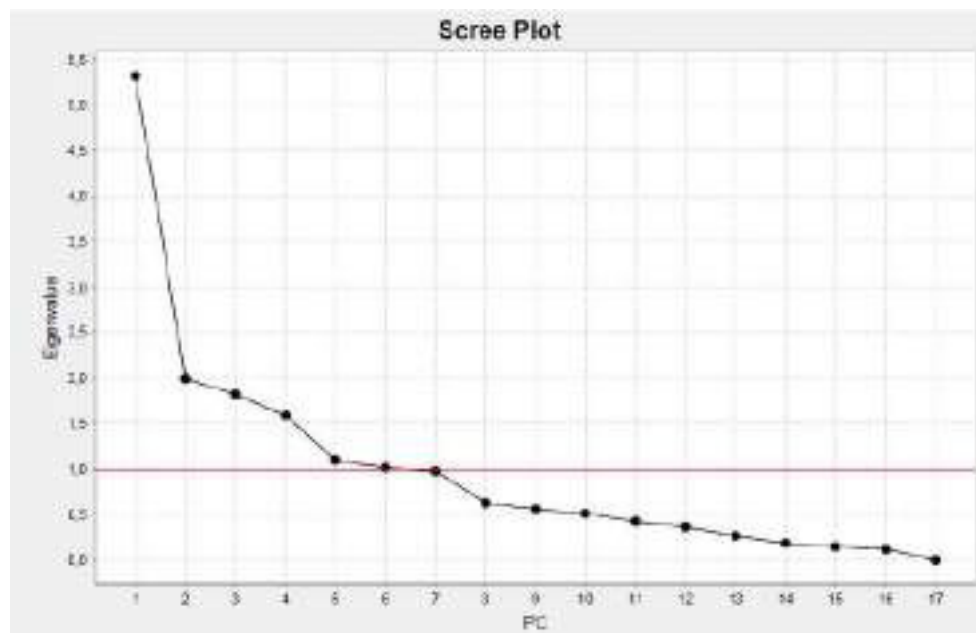


Figura 6-24. Scree Plot de los Componentes Principales de las calizas de la Formación Jumasha

Tabla 6-13. Análisis de Correlación de Pearson de las calizas de la Formación Jumasha

Correlación	Au-CLR	Cu-CLR	Li-CLR	Mn-CLR	Zn-CLR	Ag-CLR	As-CLR	Bi-CLR	Cd-CLR	Ga-CLR	In-CLR	Mo-CLR	Pb-CLR	Sb-CLR	Sc-CLR	Ti-CLR	W-CLR
Au-CLR	1	0.013	-0.17	-0.28	-0.25	0.15	-0.029	0.12	-0.3	-0.29	-0.09	-0.16	0.068	-	-0.29	-0.28	0.38
Cu-CLR	0.013	1	-0.022	0.063	-0.033	-0.12	-0.12	0.36	-0.46	0.14	0.088	0.17	-0.1	-0.23	0.084	-0.19	-0.048
Li-CLR	-0.17	-0.022	1	0.38	-0.2	-0.56	-0.35	-0.33	-0.015	0.63	-0.072	0.22	-0.46	-0.33	0.54	0.27	-0.35
Mn-CLR	-0.28	0.063	0.38	1	-0.068	-0.47	-0.15	-0.067	-0.089	0.53	-0.005	0.12	0.044	-0.42	0.57	0.16	-0.52
Zn-CLR	-0.25	-0.033	-0.2	-0.068	1	0.18	-0.059	0.23	0.33	-0.41	0.11	-0.38	0.31	0.13	-0.31	-0.24	0.0068
Ag-CLR	0.15	-0.12	-0.56	-0.47	0.18	1	0.12	0.27	-0.045	-0.63	0.15	-0.41	0.41	0.41	-0.68	-0.41	0.27
As-CLR	-0.029	-0.12	-0.35	-0.15	-0.059	0.12	1	0.14	-0.24	-0.24	-0.44	-0.18	0.082	0.36	-0.37	0.047	0.095
Bi-CLR	0.12	0.36	-0.33	-0.067	0.23	0.27	0.14	1	-0.24	-0.35	-0.039	-0.52	0.36	0.046	-0.4	-0.42	0.22
Cd-CLR	-0.3	-0.46	-0.015	-0.089	0.33	-0.045	-0.24	-0.24	1	-0.05	-0.015	0.087	-0.15	-0.16	0.021	0.29	-0.17
Ga-CLR	-0.29	0.14	0.63	0.53	-0.41	-0.63	-0.24	-0.35	-0.05	1	-0.18	0.43	-0.36	-0.48	0.77	0.54	-0.57
In-CLR	-0.09	0.088	-0.072	-0.0045	0.11	0.15	-0.44	-0.039	-0.015	-0.18	1	0.033	0.015	-	-0.0063	-0.18	-0.01
Mo-CLR	-0.16	0.17	0.22	0.12	-0.38	-0.41	-0.18	-0.52	0.087	0.43	0.033	1	-0.47	-0.36	0.45	0.39	-0.37
Pb-CLR	0.068	-0.1	-0.46	0.044	0.31	0.41	0.082	0.36	-0.15	-0.36	0.015	-0.47	1	0.19	-0.31	-0.29	0.057
Sb-CLR	-0.033	-0.23	-0.33	-0.42	0.13	0.41	0.36	0.046	-0.16	-0.48	-0.081	-0.36	0.19	1	-0.39	-0.38	0.28
Sc-CLR	-0.29	0.084	0.54	0.57	-0.31	-0.68	-0.37	-0.4	0.021	0.77	-0.006	0.45	-0.31	-0.39	1	0.33	-0.48
Ti-CLR	-0.28	-0.19	0.27	0.16	-0.24	-0.41	0.047	-0.42	0.29	0.54	-0.18	0.39	-0.29	-0.38	0.33	1	-0.56
W-CLR	0.38	-0.048	-0.35	-0.52	0.0068	0.27	0.095	0.22	-0.17	-0.57	-0.01	-0.37	0.057	0.28	-0.48	-0.56	1

Tabla 6-14. Número de Componentes Principales de las calizas de la Formación Jumasha

	Eigenvalues	Porcentaje	Acumulativo %
PC1	5.317	31.28	31.28
PC2	1.996	11.74	43.01
PC3	1.814	10.67	53.69
PC4	1.591	9.36	63.05
PC5	1.096	6.445	69.49

Tabla 6-15. Eigenvectors de las calizas de la Formación Jumasha

Eigenvectors	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5
Au-CLR	0.1433	0.2928	0.2722	0.226	0.352
Cu-CLR	-0.0301	0.5149	-0.1604	0.01492	-0.4849
Li-CLR	-0.3035	0.06523	-0.008511	0.0443	0.3775
Mn-CLR	-0.2509	0.1297	-0.3091	-0.3095	0.2081
Zn-CLR	0.1552	-0.2665	-0.4567	-0.06992	-0.02109
Ag-CLR	0.3261	-0.09557	-0.03855	0.08008	-0.1513
As-CLR	0.1416	-0.05717	0.3721	-0.5112	-0.2217
Bi-CLR	0.2243	0.2987	-0.2603	-0.2405	-0.05653
Cd-CLR	-0.06084	-0.5664	-0.1378	0.1698	0.04067
Ga-CLR	-0.3841	0.1075	0.01919	-0.1461	0.05437
In-CLR	0.02144	0.03196	-0.3586	0.4751	-0.1884
Mo-CLR	-0.2776	-6.58E-04	0.1885	0.2351	-0.4442
Pb-CLR	0.2189	0.001812	-0.3038	-0.2916	0.1346
Sb-CLR	0.2496	-0.1431	0.1902	-0.1187	0.001951
Sc-CLR	-0.3641	0.08827	-0.08465	-0.01376	0.1423
Ti-CLR	-0.2747	-0.274	0.1623	-0.1499	-0.2008
W-CLR	0.2752	0.137	0.2071	0.2597	0.2518

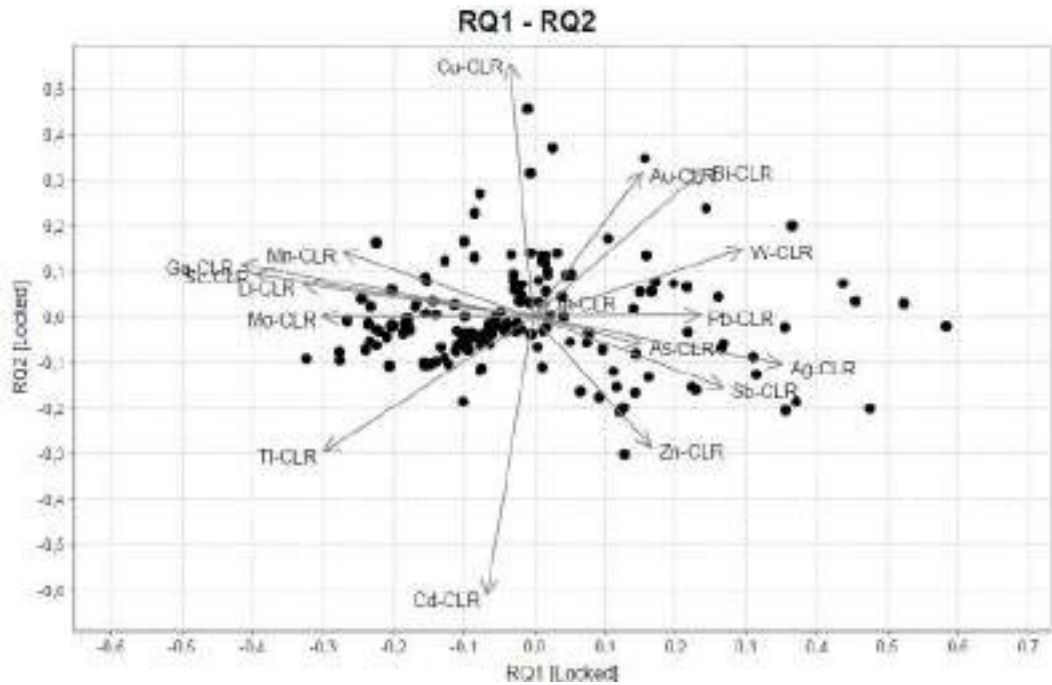


Figura 6-25. Biplot PC1-PC2 de las calizas de la Formación Jumasha

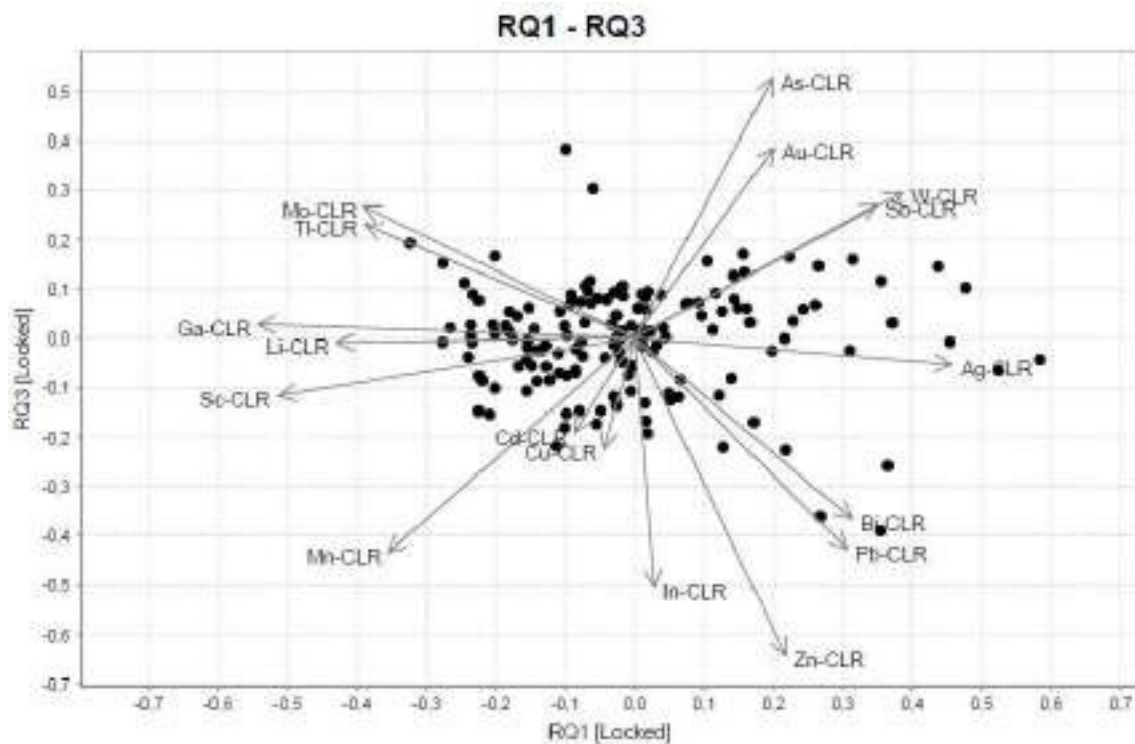


Figura 6-26. Biplot PC1-PC3 de las calizas de la Formación Jumasha

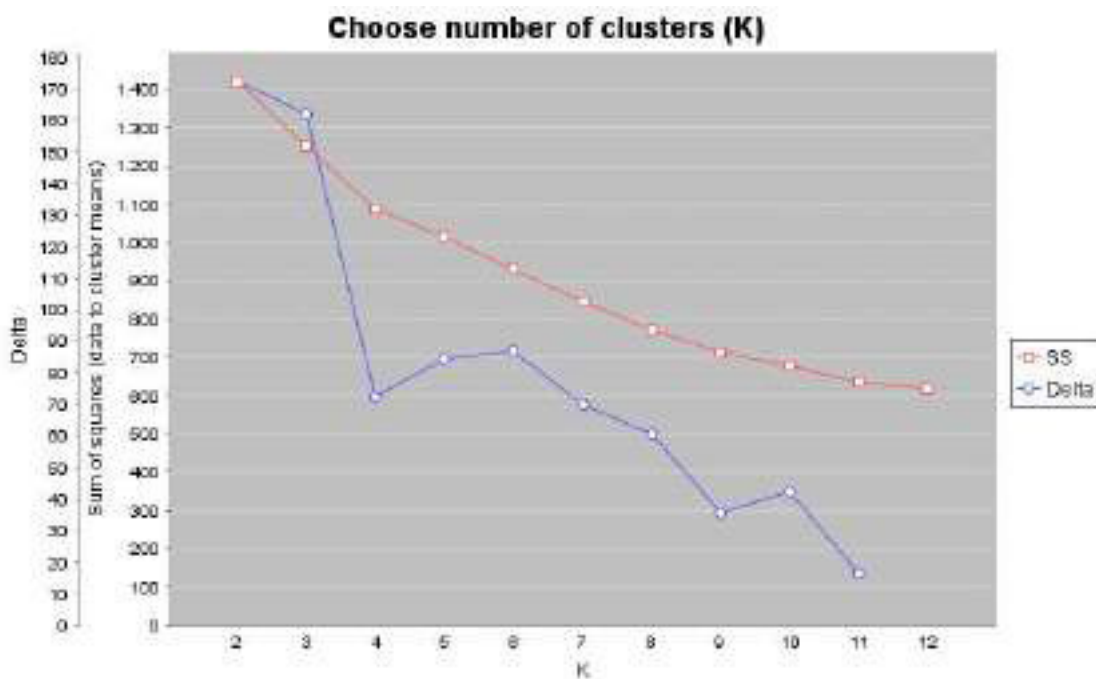


Figura 6-27. K-means clustering de las calizas de la Formación Jumasha

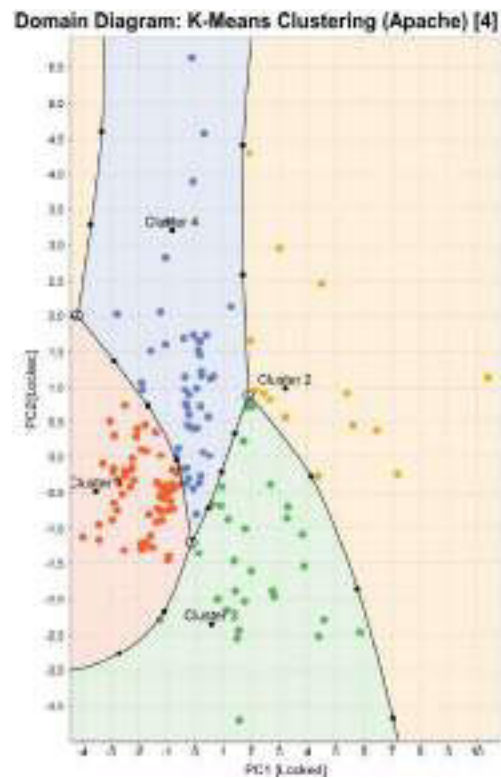


Figura 6-28.Autodominios de las calizas de la Formación Jumasha

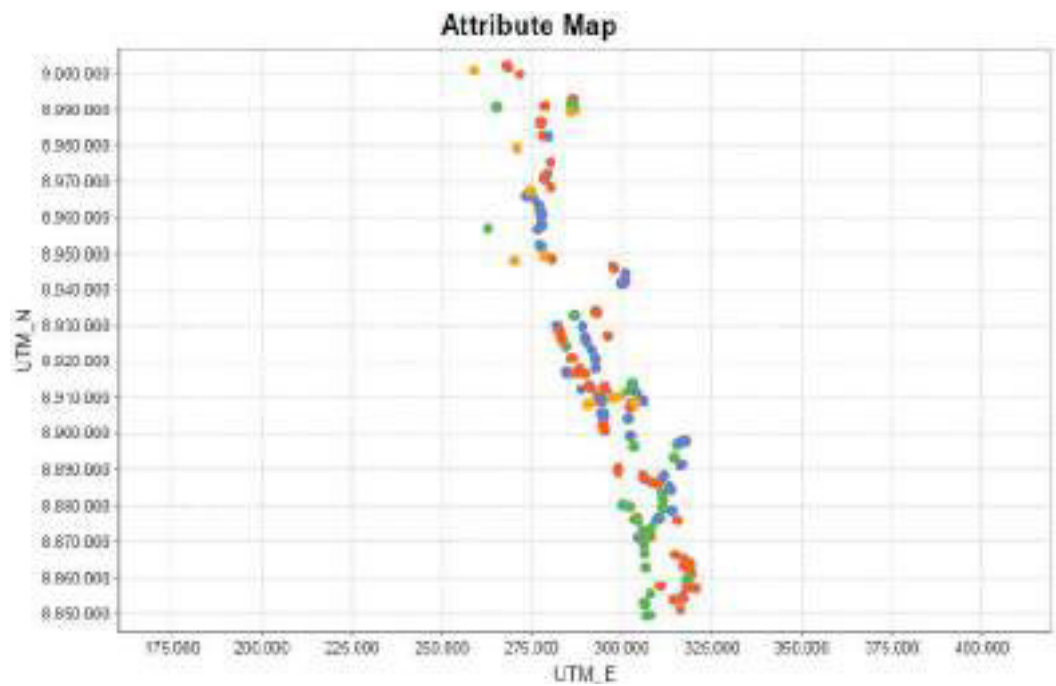


Figura 6-29. Mapa de atributos de las calizas de la Formación Jumasha

Tabla 6-16. Discriminantes-Jumasha

	Eigenvalues	Porcentaje	Acumulativo %
DP1	3.215	66.36	66.36
DP2	1.487	30.7	97.06
DP3	0.1424	2.938	100

Tabla 6-17. Relación de clústeres y componentes principales para Discriminantes

Clústeres	Conteo	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6
Clúster 4	50	-0.2521	1.095	-0.04248	0.1098	0.2737	-0.1689
Clúster 2	14	4.375	1.215	-0.2121	0.89	-0.3628	0.5292
Clúster 3	30	2.04	-1.437	-0.004249	-0.7869	-0.09564	-0.2581
Clúster 1	59	-1.862	-0.4851	0.08849	0.09592	-0.09727	0.1489
Overall	153	-5.18E-08	-2.89E-07	-7.31E-10	7.77E-08	-1.88E-07	-1.91E-07

Tabla 6-18. Relación clústeres y componentes principales - Jumasha

Eigenvectors	DP1	DP2	DP3
PC1	0.9032	0.1507	0.008061
PC2	0.3803	-0.8708	0.1872
PC3	-0.1132	0.02952	-0.01023
PC4	0.1043	-0.4195	-0.4881
PC5	-0.1102	-0.1683	0.4877
PC6	0.06061	-0.1178	-0.6991

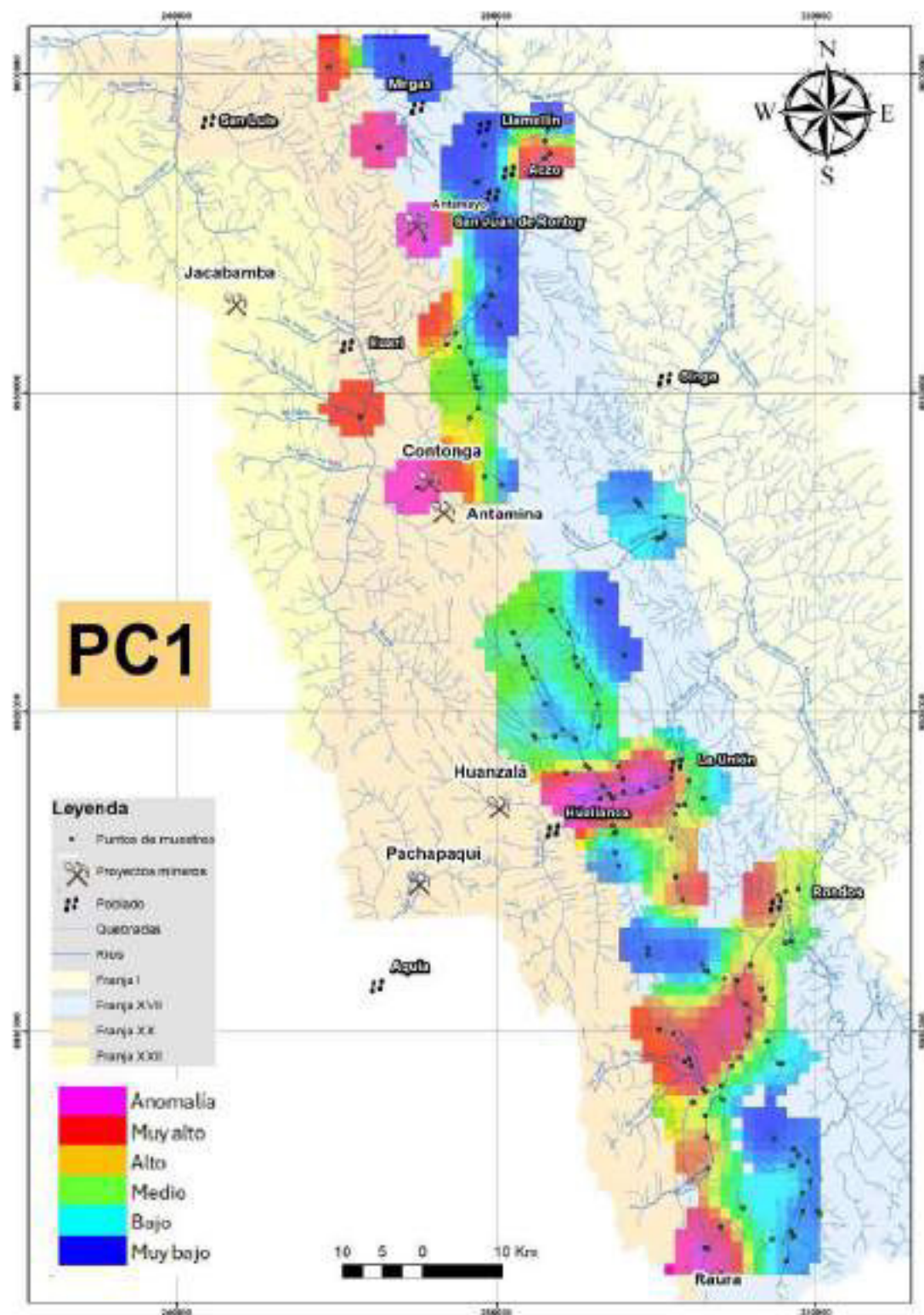


Figura 6-30. Mapa Temático PC1 de las calizas de la Formación Jumasha

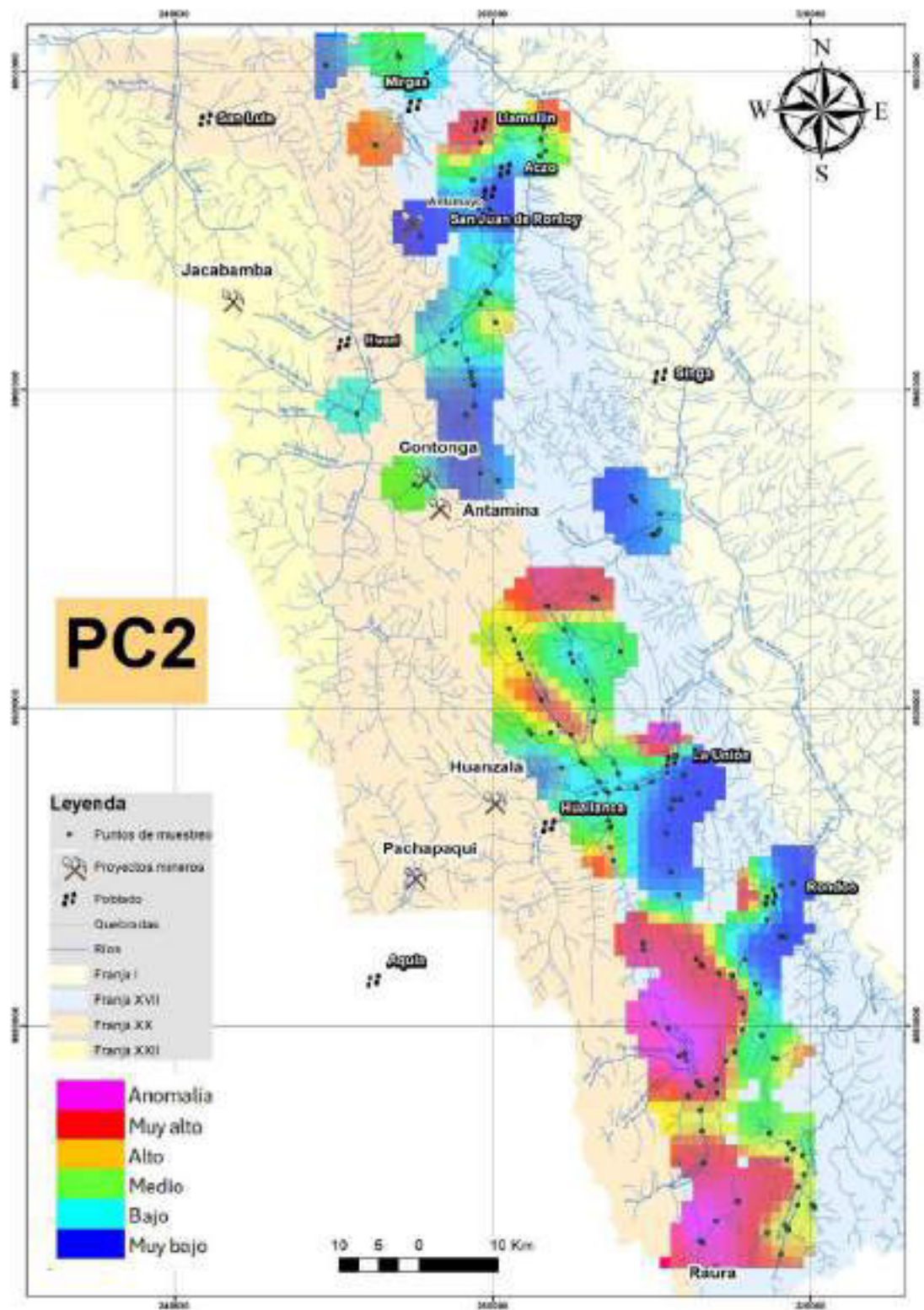


Figura 6-31. Mapa Temático PC2 de las calizas de la Formación Jumasha

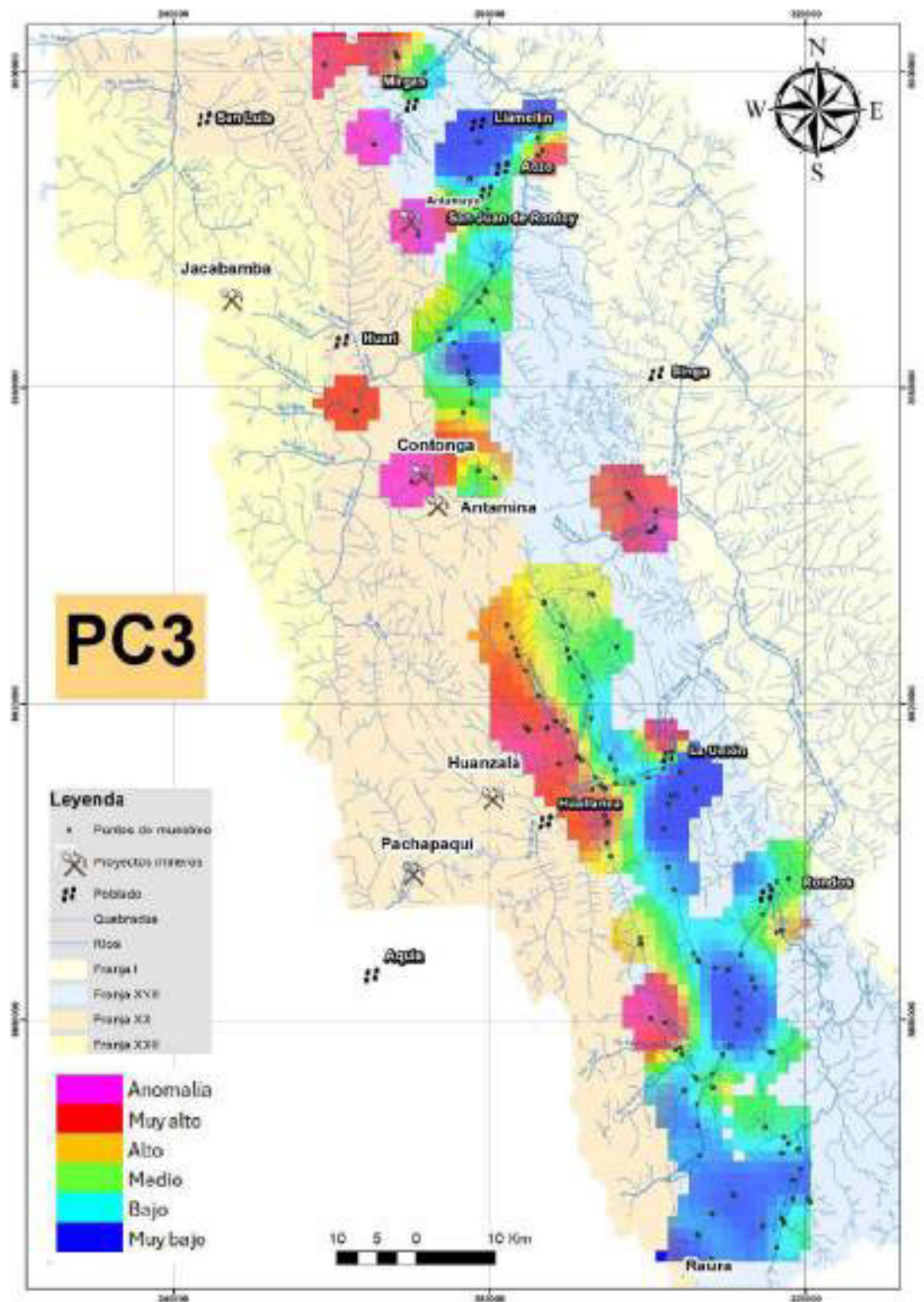


Figura 6-32. Mapa Temático PC3 de las calizas de la Formación Jumasha

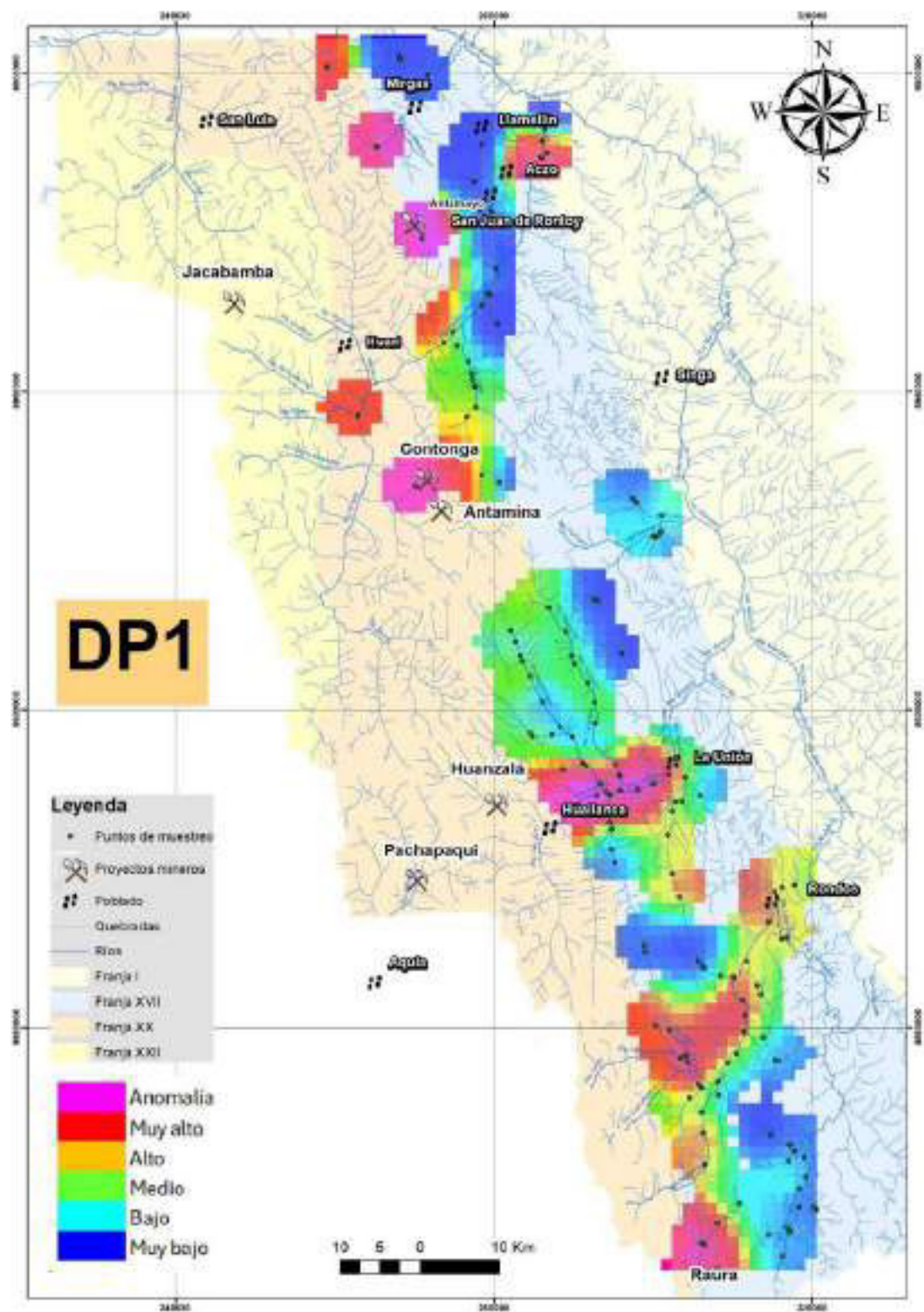


Figura 6-33. Mapa Temático DP1 de las calizas de la Formación Jumasha

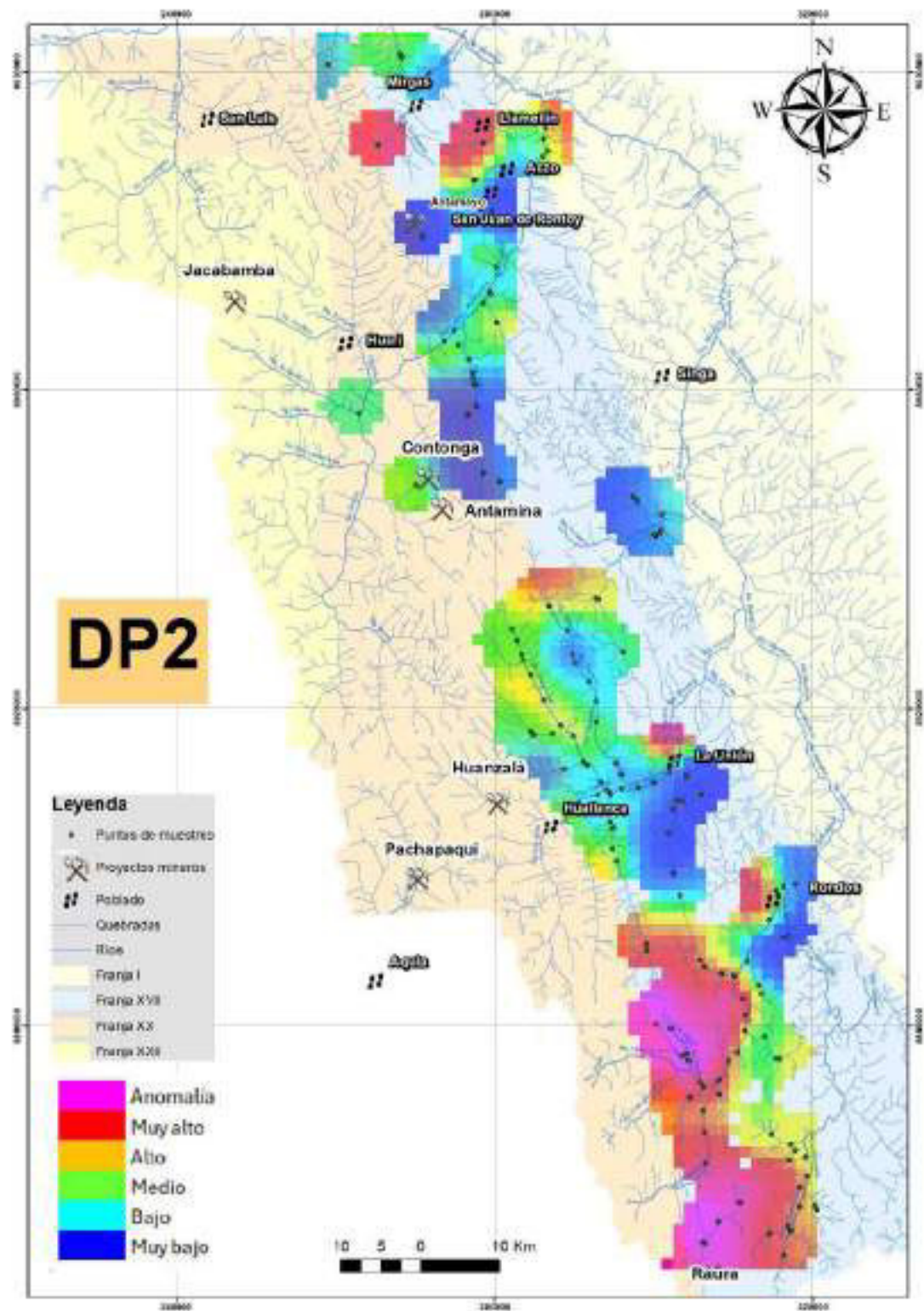


Figura 6-34. Mapa Temático DP2 de las calizas de la Formación Jumasha

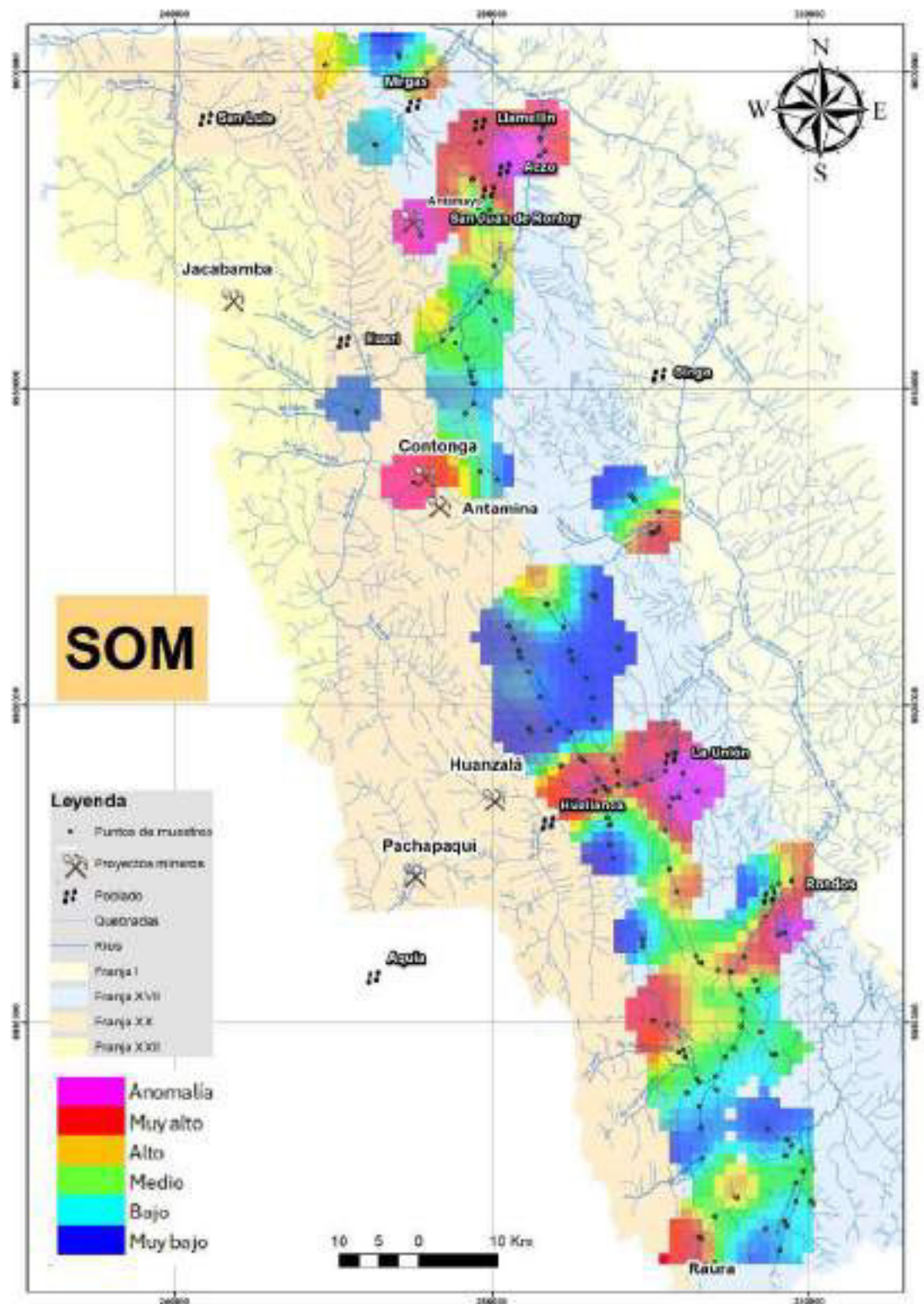


Figura 6-35. Mapa SOM de las calizas de la Formación Jumasha

6.2.4 Total (Grupo Chicama, Grupo Goyllarisquizga y de las Formaciones Jumasha, Pariatambo, Pariahuanca, Chúlec, Crisnejas, Chambará, Chota, Casapalca, Mitu y Calipuy)

Los resultados del PC1 (**Figura 6-41**) asociado a Ag-Pb-Sb / Li-Ga-Sc-Tl marcan fuertes anomalías en los alrededores de San Luis en una distancia aproximada de 15 km al SE, también hacia el NO y SO a lo largo de los ríos Ruricocha y Chacapato respectivamente, al SE de Jacabamba desde la cabecera del río Rurichinchay (nace de los deshielos de la Cordillera Blanca) hasta su desembocadura en el río Mosna, entre 1-3 km al SO de Contonga-Antamina, en Huanzalá y Pachapaqui en un radio entre 1-5 km y finalmente en el sector Huallanca-La Unión a lo largo del río Torres Vizcarra.

Mientras que los resultados del PC2 (**Figura 6-42**) asociados a Mn-Zn-Cd / Cu- Bi marcan el área de Mirgas desde la naciente del río Contadera, SE de Jacabamba en el río Rurichinchay desde la cabecera hasta su desembocadura, a 3 km al sur de Antamina, en la cabecera del río Mosna principalmente en sus afluentes al este de la Cordillera Blanca, a 20 km de Antamina a lo largo del río Andachupa, a 15 km al norte de Raura entre los ríos Machaycancha y Nupe, también anomalías moderadas a 8 km al SW de Huallanca en el río San Juan . El DP1 (**Figura 6-44**) muestra similitud con el PC1, al reiterar como anómalas los alrededores de San Luis (río Ruricocha, Chacapato y Chucpín), Huanzalá-Pachapaqui, Huallanca -La Unión, Huari-Jacabamba (río Shashal, Rurichinchay, Rurec). Los resultados del DP2 (**Figura 6-45**) engloban y sintetizan la varianza de los demás componentes principales reiterando las ubicaciones mencionadas anteriormente y complementando con áreas aledañas tales como Mirgas y norte de Raura.

El mapa SOM (**Figura 6-46**) que se observa hace una síntesis total mostrando como principales áreas de interés anómalo a las áreas alrededor de las muestras en los ríos Ruricocha, Shashal, Rurichinchay, Rurec, Contonga, cabecera del río Mosna al SW de Antamina, Pachapaqui, Huanzalá, Huallanca-La Unión, y áreas al norte de Raura a una distancia de 20 km.

Análisis de Correlación de Pearson (Tabla 6-19):

- ✓ Correlaciones positivas moderadas (0.5-0.65): Ga-Li, Zn-Cd, Ga-Sc

Análisis de Componentes Principales:

Mediante el gráfico de sedimentación se escogió 5 componentes principales los cuales explican el 67% de la varianza. Los resultados de los componentes con mayor explicación de la varianza son:

- ✓ PC1: Ag-Pb-Sb/ Li-Ga-Sc-Tl: 23.28%
- ✓ PC2: Mn-Zn-Cd / Cu-Bi: 15.53%
- ✓ PC3: Cu-In-Sc: 13.03%
- ✓ PC4: Au / Mo: 8.9%

Tabla 6-19. Análisis de correlación de Pearson del Grupo Chicama, Grupo Goyllarisquizga y de las Formaciones Jumasha, Pariatambo, Pariahuanca, Chúlec, Crisnejas, Chambará, Chota, Casapalca, Mitu y Calipuy

Correlación	Au-CLR	Cu-CLR	Li-CLR	Mn-CLR	Zn-CLR	Ag-CLR	As-CLR	Bi-CLR	Cd-CLR	Ga-CLR	In-CLR	Mo-CLR	Pb-CLR	Sb-CLR	Sc-CLR	Tl-CLR	W-CLR
Au-CLR	1	0.079	-0.0014	-0.15	-0.3	-0.02	0.019	0.084	-0.39	0.032	-0.21	-0.26	-0.052	-0.039	0.027	-0.22	0.096
Cu-CLR	0.079	1	-0.042	-0.034	-0.22	-0.14	-0.19	0.47	-0.5	0.15	0.21	-0.033	-0.082	-0.098	0.3	-0.14	-0.083
Li-CLR	-0.0014	-0.042	1	0.098	-0.23	-0.47	-0.25	-0.18	-0.076	0.52	-0.35	0.062	-0.47	-0.23	0.072	0.26	-0.1
Mn-CLR	-0.15	-0.034	0.098	1	0.3	-0.29	-0.11	-0.17	0.073	0.22	-0.0056	-0.19	0.11	-0.21	0.29	0.06	-0.44
Zn-CLR	-0.3	-0.22	-0.23	0.3	1	0.2	-0.089	-0.23	0.56	-0.45	0.21	-0.29	0.46	0.12	-0.24	-0.17	-0.2
Ag-CLR	-0.02	-0.14	-0.47	-0.29	0.2	1	0.15	0.032	0.058	-0.54	0.16	-0.27	0.47	0.38	-0.41	-0.42	0.16
As-CLR	0.019	-0.19	-0.25	-0.11	-0.089	0.15	1	-0.014	-0.13	-0.26	-0.3	-0.12	0.052	0.32	-0.31	-0.086	0.16
Bi-CLR	0.084	0.47	-0.18	-0.17	-0.23	0.032	-0.014	1	-0.41	-0.084	0.13	-0.14	-0.022	-0.05	0.027	-0.17	0.14
Cd-CLR	-0.39	-0.5	-0.076	0.073	0.56	0.058	-0.13	-0.41	1	-0.21	-0.017	0.12	0.13	-0.066	-0.24	0.15	-0.18
Ga-CLR	0.032	0.15	0.52	0.22	-0.45	-0.54	-0.26	-0.084	-0.21	1	-0.23	0.12	-0.43	-0.53	0.62	0.44	-0.36
In-CLR	-0.21	0.21	-0.35	-0.0056	0.21	0.16	-0.3	0.13	-0.017	-0.23	1	-0.048	0.16	0.029	0.24	-0.18	-0.17
Mo-CLR	-0.26	-0.033	0.062	-0.19	-0.29	-0.27	-0.12	-0.14	0.12	0.12	-0.048	1	-0.42	-0.21	-0.028	0.25	0.096
Pb-CLR	-0.052	-0.082	-0.47	0.11	0.46	0.47	0.052	-0.022	0.13	-0.43	0.16	-0.42	1	0.23	-0.2	-0.32	-0.11
Sb-CLR	-0.039	-0.098	-0.23	-0.21	0.12	0.38	0.32	-0.05	-0.066	-0.53	0.029	-0.21	0.23	1	-0.32	-0.4	0.13
Sc-CLR	0.027	0.3	0.072	0.29	-0.24	-0.41	-0.31	0.027	-0.24	0.62	0.24	-0.028	-0.2	-0.32	1	0.18	-0.48
Tl-CLR	-0.22	-0.14	0.26	0.06	-0.17	-0.42	-0.086	-0.17	0.15	0.44	-0.18	0.25	-0.32	-0.4	0.18	1	-0.44
W-CLR	0.096	-0.083	-0.1	-0.44	-0.2	0.16	0.16	0.14	-0.18	-0.36	-0.17	0.096	-0.11	0.13	-0.48	-0.44	1

Tabla 6-20. Número de componentes principales del Grupo Chicama, Grupo Goyllarisquizga y de las Formaciones Jumasha, Pariatambo, Pariahuanca, Chúlec, Crisnejas, Chambará, Chota, Casapalca, Mitu y Calipuy

	Eigenvalues	Porcentaje	Acumulativo %
PC1	3.958	23.28	23.28
PC2	2.641	15.53	38.81
PC3	2.214	13.03	51.84
PC4	1.515	8.913	60.75
PC5	1.061	6.243	67

Tabla 6-21. Eigenvectors de los componentes principales

Eigenvectors	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5
Au-CLR	0.01699	0.3083	0.0155	0.3974	0.3041
Cu-CLR	0.1107	0.3034	0.3734	-0.1587	-0.0245
Li-CLR	0.3042	-0.02509	-0.213	0.1803	0.3557
Mn-CLR	0.1218	-0.2963	0.2455	0.3209	-0.01007
Zn-CLR	-0.2386	-0.4161	0.1483	0.02585	0.1953
Ag-CLR	-0.3779	0.04096	0.04907	-0.02463	-0.01269
As-CLR	-0.1711	0.1211	-0.2354	0.2876	-0.6295
Bi-CLR	-0.01805	0.3569	0.2436	-0.1585	-0.06405
Cd-CLR	-0.09873	-0.4815	-0.1732	-0.1645	0.1301
Ga-CLR	0.4422	-3.81E-04	0.03512	0.1415	-0.02087
In-CLR	-0.09057	-0.05639	0.4194	-0.4194	3.67E-05
Mo-CLR	0.1591	-0.01444	-0.2873	-0.5255	-0.1165
Pb-CLR	-0.3128	-0.1506	0.2617	0.1737	-0.01327
Sb-CLR	-0.3083	0.08608	-0.05409	0.1115	-0.2305
Sc-CLR	0.3135	-0.01206	0.3721	0.02559	-0.1426
Ti-CLR	0.2964	-0.2089	-0.15	-0.07074	-0.3638
W-CLR	-0.181	0.3139	-0.3059	-0.1579	0.3236

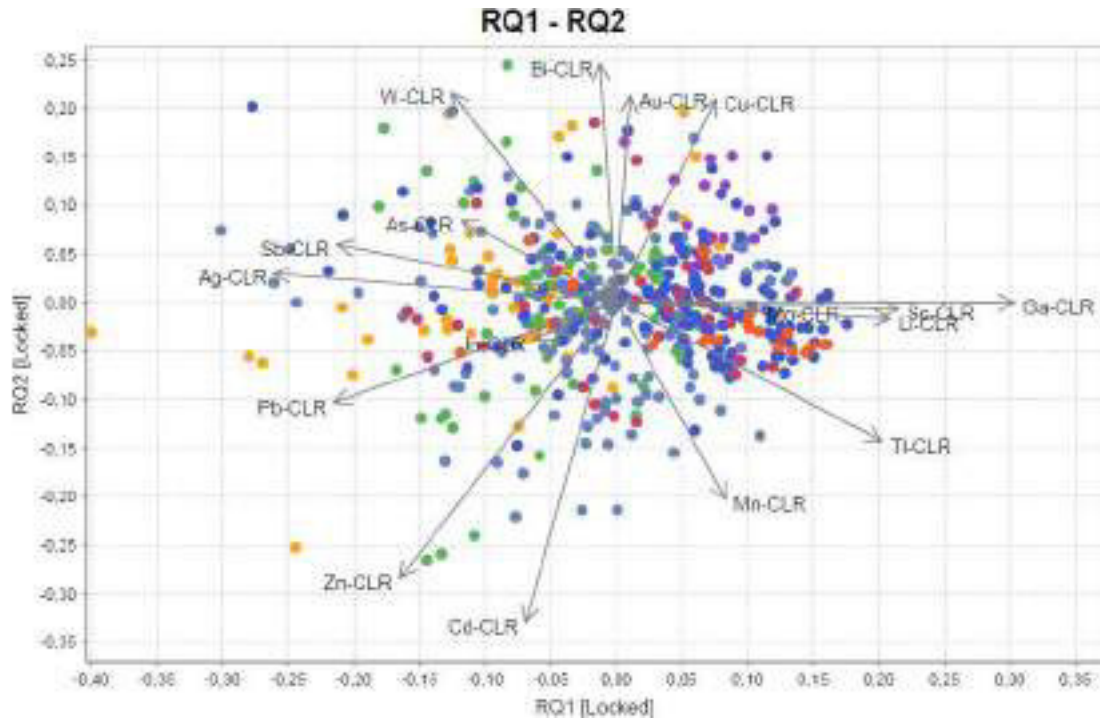


Figura 6-36. Biplot PC1-PC2 del Grupo Chicama, Grupo Goyllarisquizga y de las Formaciones Jumasha, Pariatambo, Pariahuanca, Chúlec, Crisnejas, Chambará, Chota, Casapalca, Mitu y Calipuy

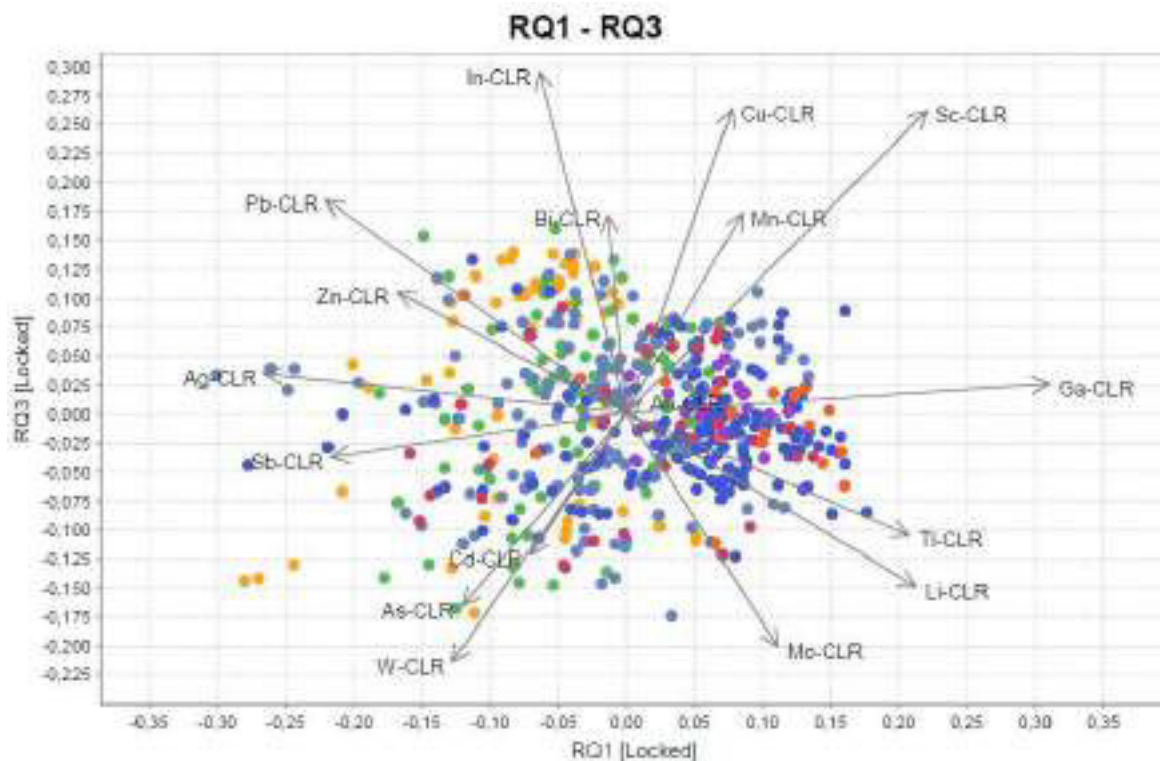


Figura 6-37. Biplot PC1-PC3 del Grupo Chicama, Grupo Goyllarisquizga y de las Formaciones Jumasha, Pariatambo, Pariahuanca, Chúlec, Crisnejas, Chambará, Chota, Casapalca, Mitu y Calipuy

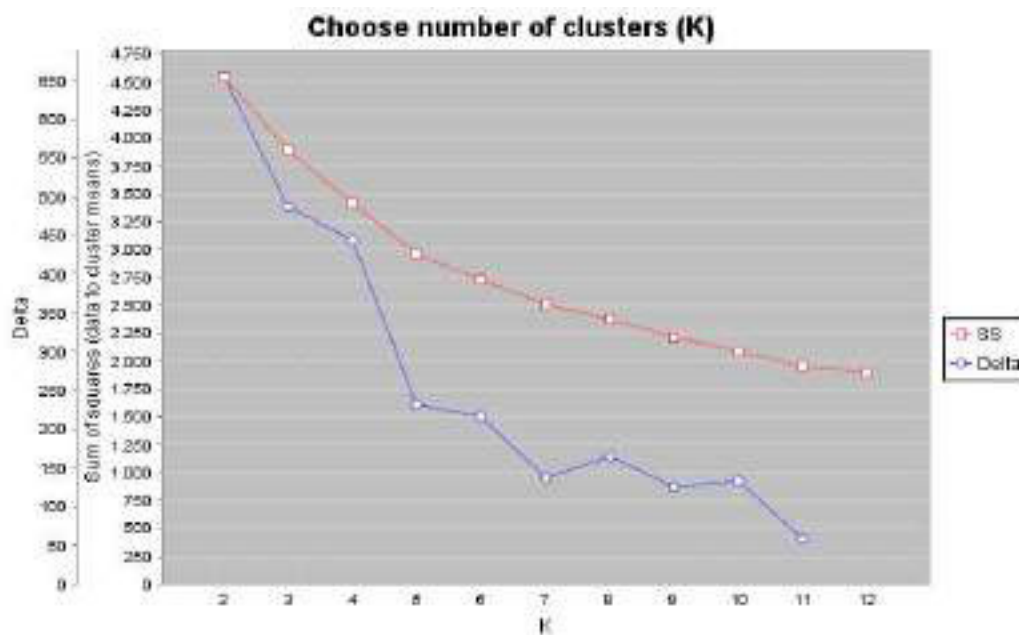


Figura 6-38. K-means clustering del Grupo Chicama, Grupo Goyllarisquizga y de las Formaciones Jumasha, Pariatambo, Pariahuanca, Chúlec, Crisnejas, Chambará, Chota, Casapalca, Mitu y Calipuy

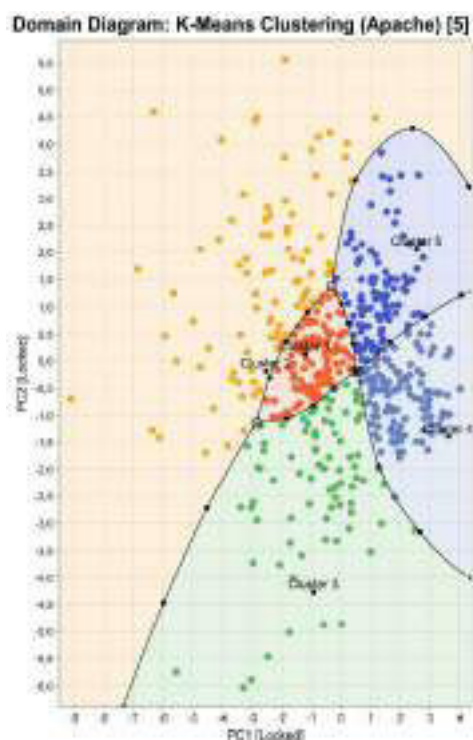


Figura 6-39. Autodominios del Grupo Chicama, Grupo Goyllarisquizga y de las Formaciones Jumasha, Pariatambo, Pariahuanca, Chúlec, Crisnejas, Chambará, Chota, Casapalca, Mitu y Calipuy

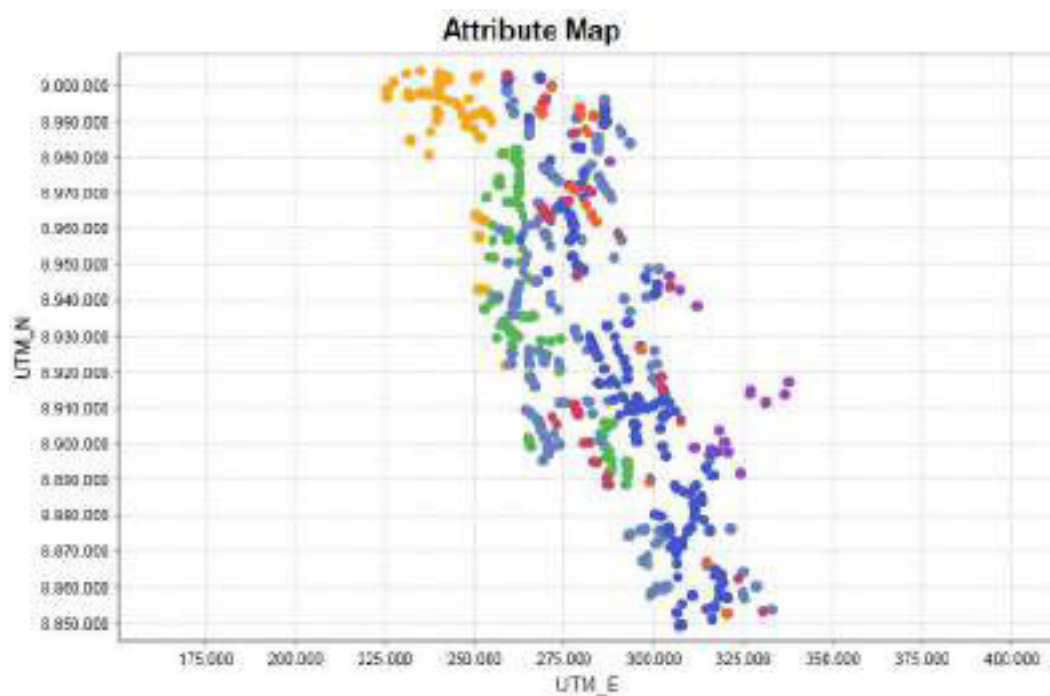


Figura 6-40. Mapa de atributos del Grupo Chicama, Grupo Goyllarisquizga y de las Formaciones Jumasha, Pariatambo, Pariahuanca, Chúlec, Crisnejas, Chambará, Chota, Casapalca, Mitu y Calipuy

Tabla 6-22. Número de discriminantes del Grupo Chicama, Grupo Goyllarisquizga y de las Formaciones Jumasha, Pariatambo, Pariahuanca, Chúlec, Crisnejas, Chambará, Chota, Casapalca, Mitu y Calipuy

	Eigenvalues	Porcentaje	Acumulativo %
DP1	3.662	72.7	72.7
DP2	1.218	24.18	96.88
DP3	0.1223	2.429	99.31
DP4	0.03474	0.6898	100

Tabla 6-23. Relación entre clústeres y componentes principales del Grupo Chicama, Grupo Goyllarisquizga y de las Formaciones Jumasha, Pariatambo, Pariahuanca, Chúlec, Crisnejas, Chambará, Chota, Casapalca, Mitu y Calipuy

Clústeres	Conteo	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5
Clúster 5	105	1.271	1.268	0.1741	0.5042	0.1003
Clúster 2	90	-2.559	1.49	-0.5794	-0.1708	0.1511
Clúster 1	112	-0.8475	0.03902	0.7001	-0.02071	-0.2803
Clúster 3	85	-0.8216	-2.219	-0.1779	-0.01659	0.02218
Clúster 4	126	2.076	-0.6587	-0.2335	-0.2686	0.04264
Overall	518	2.44E-07	2.09E-07	-4.33E-08	6.99E-08	-3.11E-08

Tabla 6-24. Eigenvectors del Grupo Chicama, Grupo Goyllarisquizga y de las Formaciones Jumasha, Pariatambo, Pariahuanca, Chúlec, Crisnejas, Chambará, Chota, Casapalca, Mitu y Calipuy

Eigenvectors	DP1	DP2	DP3	DP4
PC1	0.7586	0.4846	0.03593	0.04063
PC2	-0.6498	0.8447	0.02656	0.1007
PC3	0.0379	0.04453	-0.7974	0.128
PC4	-0.02488	0.2023	-0.326	-0.8907
PC5	-0.01428	0.09385	0.5059	-0.4224

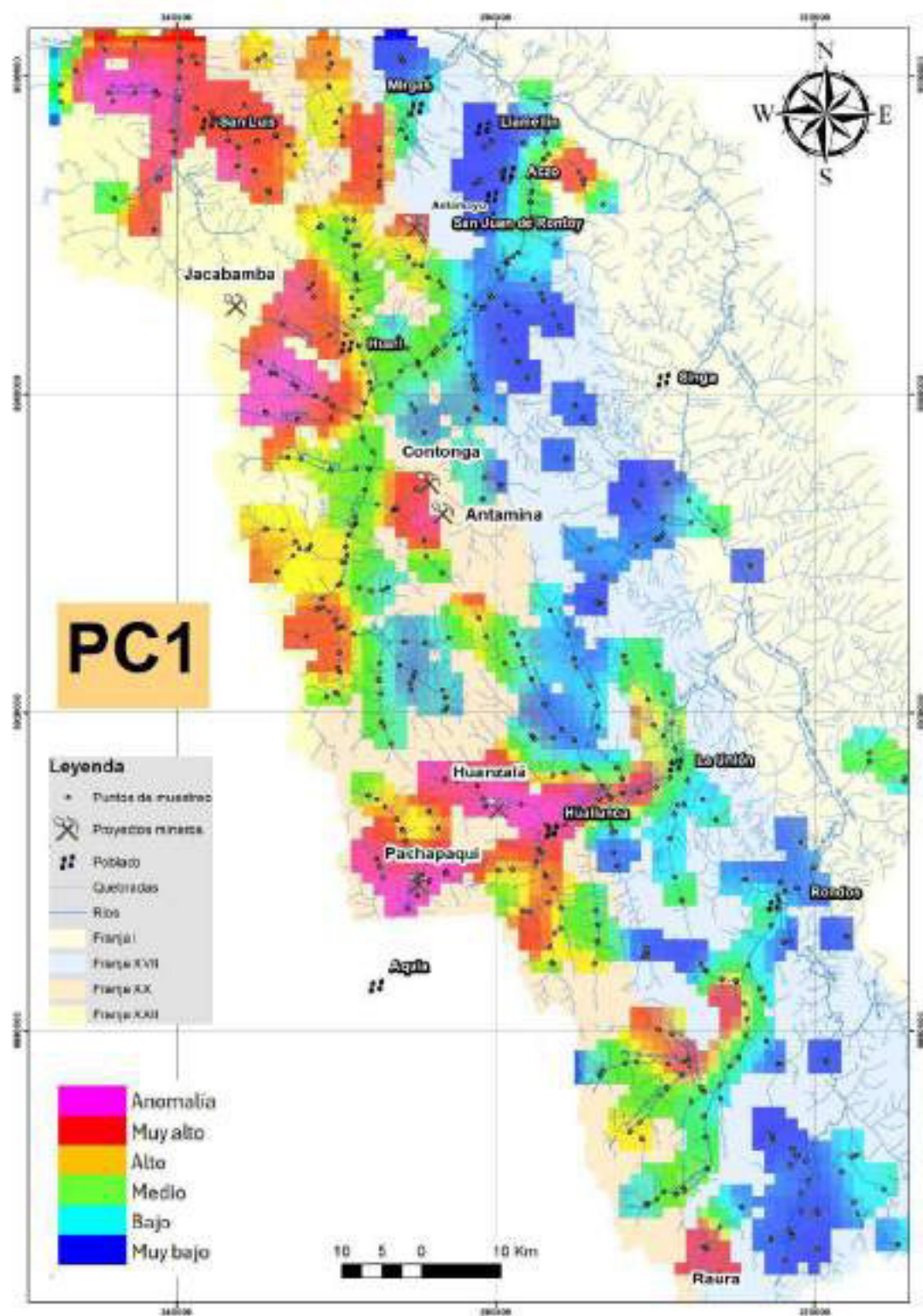


Figura 6-41. Mapa Temático PC1 del Grupo Chicama, Grupo Goyllarisquizga y de las Formaciones Jumasha, Pariatambo, Pariahuanca, Chúlec, Crisnejas, Chambará, Chota, Casapalca, Mitu y Calipuy

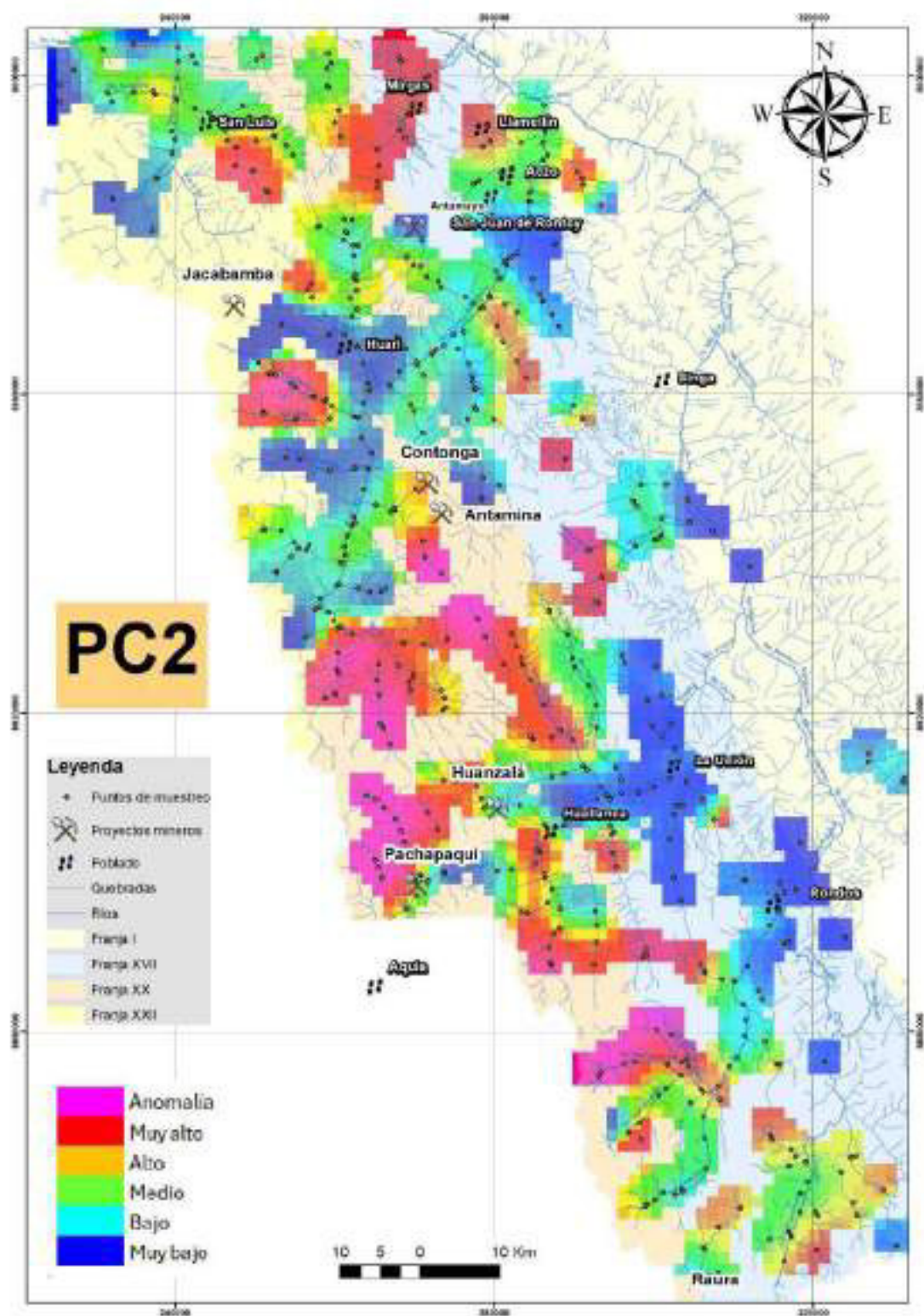


Figura 6-42. Mapa Temático PC2 del Grupo Chicama, Grupo Goyllarisquizga y de las Formaciones Jumasha, Pariatambo, Pariahuanca, Chúlec, Crisnejas, Chambará, Chota, Casapalca, Mitu y Calipuy

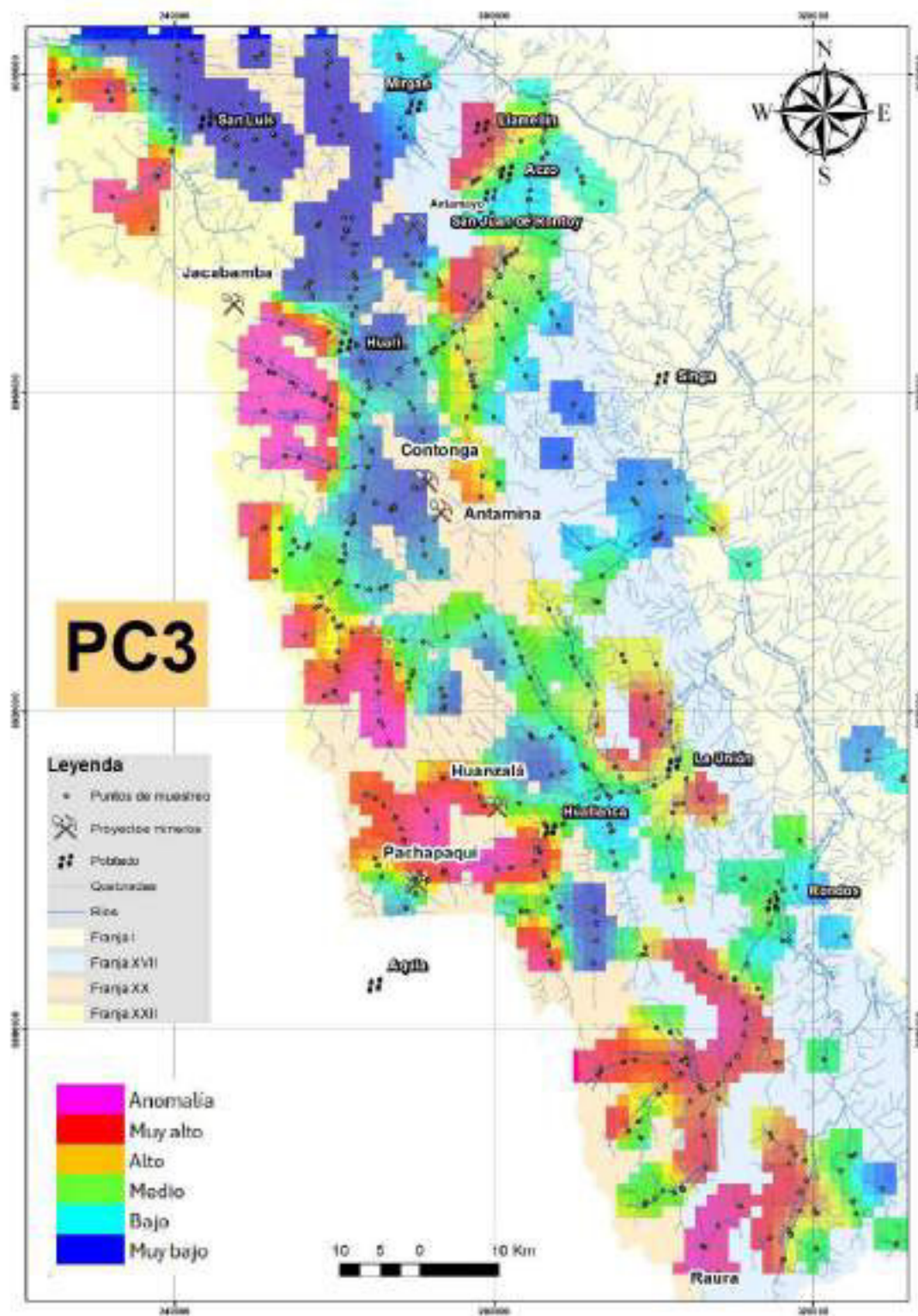


Figura 6-43. Mapa Temático PC3 del Grupo Chicama, Grupo Goyllarisquizga y de las Formaciones Jumasha, Pariatambo, Pariahuanca, Chúlec, Crisnejas, Chambará, Chota, Casapalca, Mitu y Calipuy

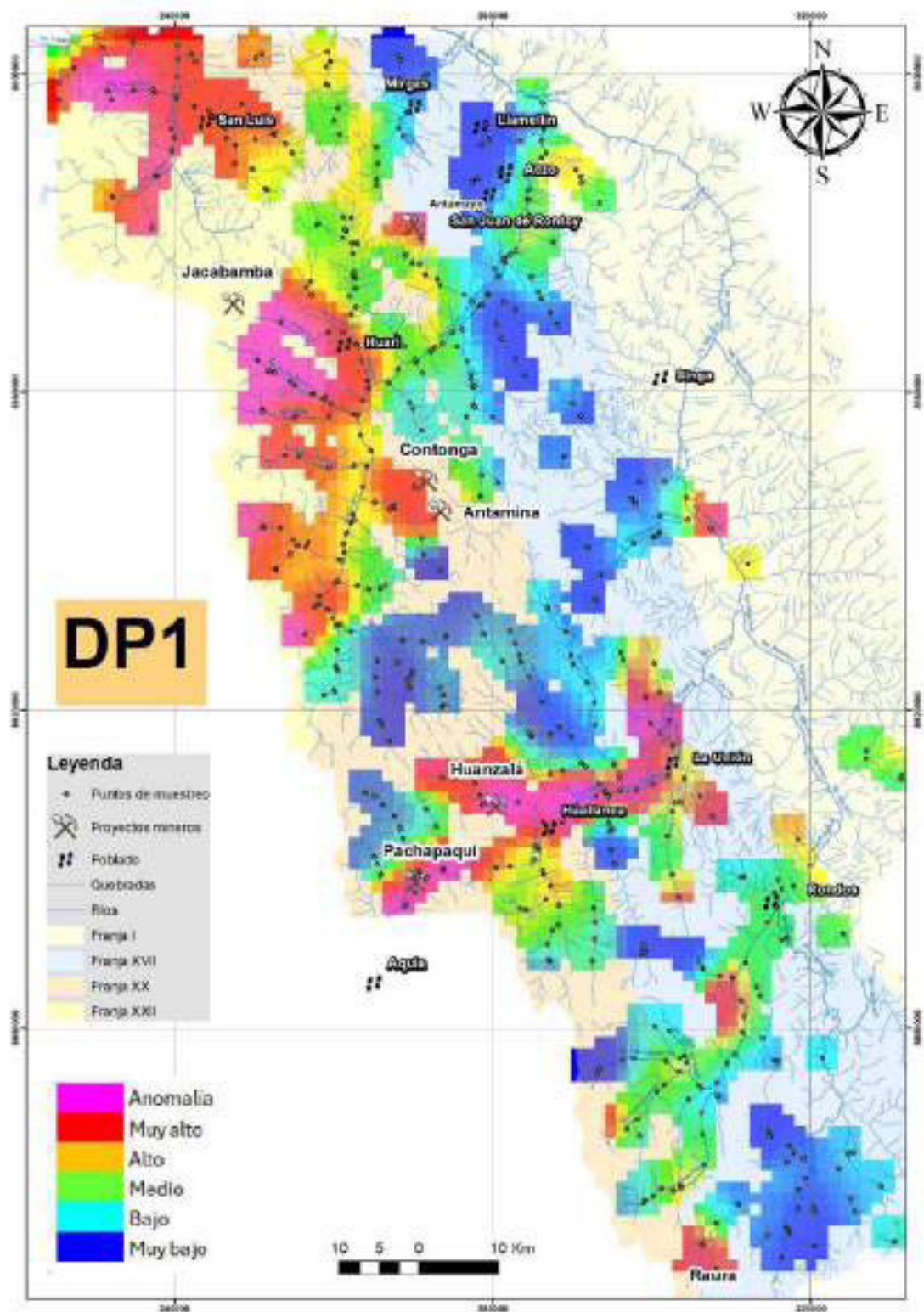


Figura 6-44. Mapa Temático DP1 del Grupo Chicama, Grupo Goyllarisquizga y de las Formaciones Jumasha, Pariatambo, Pariahuanca, Chúlec, Crisnejas, Chambará, Chota, Casapalca, Mitu y Calipuy

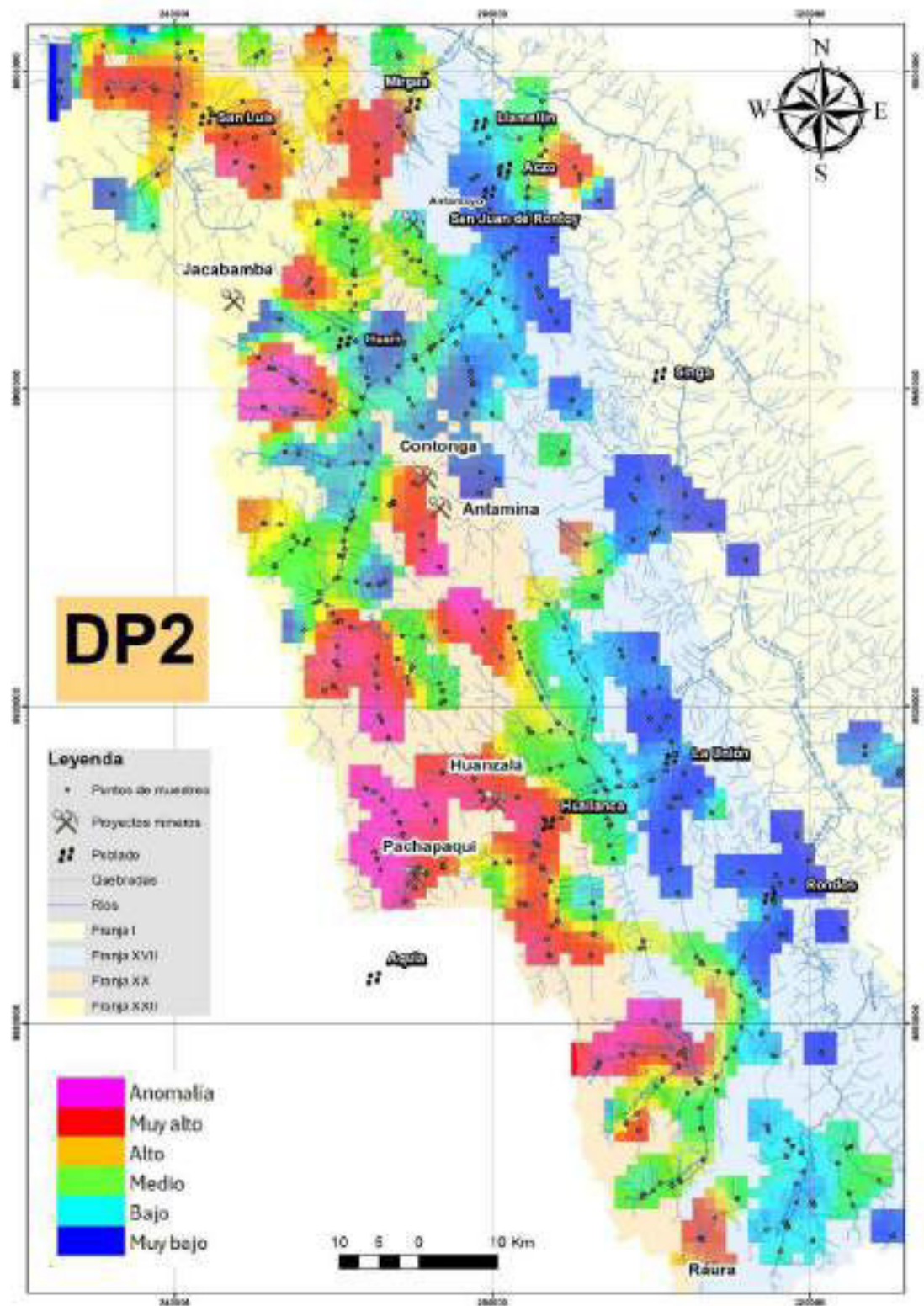


Figura 6-45. Mapa Temático DP2 del Grupo Chicama, Grupo Goyllarisquizga y de las Formaciones Jumasha, Pariatambo, Pariahuanca, Chúlec, Crisnejas, Chambará, Chota, Casapalca, Mitu y Calipuy

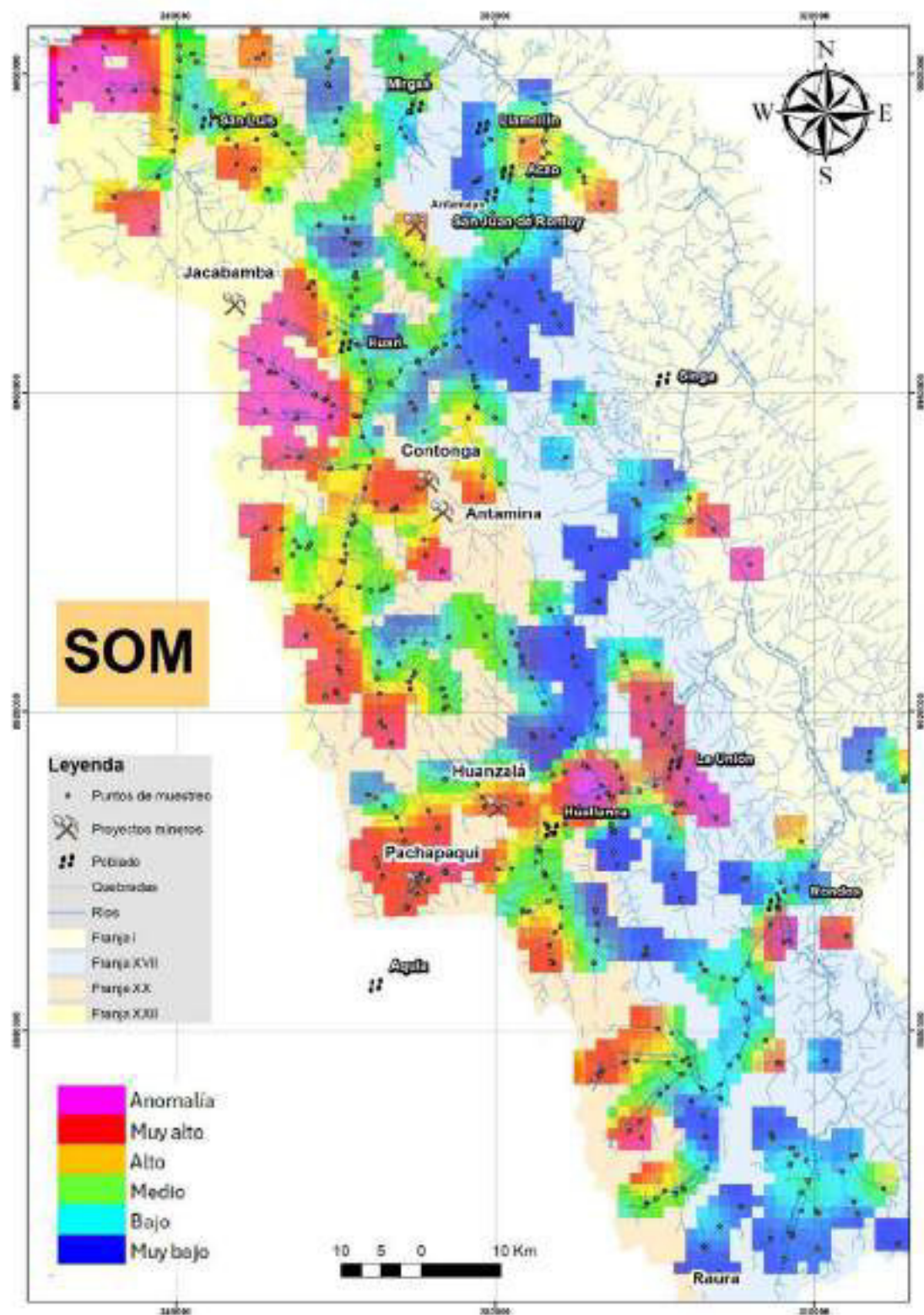


Figura 6-46. Mapa Temático SOM del Grupo Chicama, Grupo Goyllarisquizga y de las Formaciones Jumasha, Pariatambo, Pariahuanca, Chúlec, Crisnejas, Chambará, Chota, Casapalca, Mitu y Calipuy

CAPÍTULO 7 . DISCUSIÓN DE RESULTADOS

La división de las poblaciones muestrales se realizó en tres dominios principales, por lo cual se ha permitido tener una visión más detallada de los resultados ya que, a pesar de la heterogeneidad de la zona se puede observar mejor las anomalías. La densidad de muestreo fue de $1/10 \text{ km}^2$ lo que le da un enfoque regional. Se observa que la pendiente dentro del área de estudio es un factor influyente ya que facilita la erosión y el arrastre de sedimentos.

En función a los análisis realizados en el 2006-2008 por el INGEMMET a partir de la separación en cuatro grupos muestrales: (i) sedimentarios carbonatados cretácicos, (ii) sedimentarios silicoclásticos cretácicos, (iii) sedimentarios clásticos jurásicos y (iv) metamórficos neoproterozoicos, se observó que la asociación Pb-Zn está relacionada a Ag-Cd en los ambientes sedimentarios, además que la distribución de elementos señala altas concentraciones de Sb, Bi, As, Mo, Pb, W y Zn hacia la zona de la Cordillera Blanca. Respecto a estas conclusiones en este trabajo observamos que en las tres divisiones muestrales (población muestral Chicama-Oyón, Goyllarisquiza y Jumasha) el procesamiento de datos para cada uno de los elementos mostró altas concentraciones hacia la Cordillera Blanca de Ag, Cd, Ga, Sb, Mo y W (Chira et al., 2008).

En este trabajo al realizar la distribución geoquímica por cada elemento a través de estadística univariable se observó que anomalías altas presentes en Ag-Bi-Cd-Cu-Mo-Pb-Sb-Tl-W, anomalías moderadas en As-Ga y anomalías bajas en Au-In-Li-Mn-Sc-Zn. Las anomalías altas del cobre se observan a 1 km de los yacimientos mineros Contonga y Antamayo. El Mo presenta anomalías altas a una distancia de 5 km desde depósitos minerales conocidos, las anomalías del Pb se observan hacia el oeste de San Luis y al sur de Huanzalá a una distancia de 5 km. Mientras que en el análisis que se hizo usando métodos estadísticos multivariados se observó que el grupo

muestral Chicama-Oyón presenta asociaciones Cu-Bi-Ga / Zn-Ag-Cd-Pb y Mn-Zn-Sc-In / As-Mo-W, el grupo muestral Goyllarisquizga manifiesta Ag-Sb-W / Li-Mn-Ga-Sc-Tl y Zn-Cd / Au-Cu-Bi, el grupo muestral Jumasha tiene asociaciones Ag-Bi-Sb-Pb-W / Li-Mn-Ga-Sc-Tl- Mo, Cd-Cu, y Zn-As. Y finalmente, en el agrupamiento de poblaciones muestrales se observa las asociaciones Ag-Pb-Sb / Li-Ga-Sc-Tl, Mn-Zn-Cd/ Cu-Bi y Cu-In-Sc. Las asociaciones mencionadas para cada grupo muestral se encuentran relacionadas a depósitos tipo skarn y depósitos polimetálicos.

En el caso del pórfido Cu-Mo Jacabamba, el Análisis de Componentes Principales (PC1) muestra una anomalía a 3 km al sureste, en la cabecera de los ríos Shashal y Rurichinchay. Tras aplicar k-means clustering y autodomínios, el mapa de discriminantes (DP1) evidencia una anomalía similar al PC1, pero con una mayor extensión, cubriendo desde la naciente de los ríos hasta 5 km aguas abajo. Por su parte, el mapa temático SOM amplía aún más la extensión de la anomalía, principalmente en la parte media del río Rurichinchay.

En el skarn de Ag, Pb y Zn Contonga, las muestras de la población Goyllarisquizga muestran que el PC1 identifica una anomalía a 2 km al suroeste, confirmada por el mapa de discriminantes (DP1) y el SOM, este último ampliando la zona de influencia. En contraste, las muestras de la población Jumasha detectan una anomalía a 0.3 km al oeste de Contonga, corroborada también por DP1 y SOM, con resultados consistentes en ubicación y área.

En el skarn Pachapaqui, las muestras de la población Goyllarisquizga identifican anomalías en un radio de hasta 3 km alrededor del río Pativilca según el PC1. Sin embargo, el mapa de discriminantes (DP1) no refleja esta anomalía, siendo más relevante el DP2, esto debido a que en el proceso de clusterización se le dio un menor valor referente a la representación de la varianza explicada. El SOM, por su parte, muestra una anomalía similar, pero con menor extensión.

En el depósito polimetálico Huanzalá, el PC1 de la población Goyllarisquizga identifica una anomalía a 1 km del depósito. Los mapas de discriminantes (DP1 y DP2) y el SOM confirman la anomalía, aunque este último con menor intensidad.

En Antamina, un skarn de Cu-Zn, las poblaciones Goyllarisquizga y Jumasha muestran anomalías en los alrededores del depósito, aunque con limitaciones debido a la baja densidad de muestras, con una sola muestra ubicada a más de 4 km de distancia. Mientras que en Antamayo, las muestras de la población muestral Jumasha reflejan una anomalía a 1 km en el PC1, corroborada por el DP1 y el mapa SOM, con consistencia en ubicación y extensión.

Finalmente, al analizar la población muestral total, se observaron anomalías más intensas y con un rango de influencia mayor en las mismas zonas identificadas por los análisis específicos de cada población muestral, destacando tanto los depósitos minerales conocidos como nuevas áreas de interés exploratorio.

Tras validar los proyectos y operaciones mineras ya conocidas, se observó que cada población muestral identificó nuevas áreas prospectables. En la población muestral Chicama-Oyón, se detectaron anomalías en los ríos Rurichinchay, Shashal, la cabecera del río Rurec y al este del río Ruricocha, al noroeste de San Luis. Los componentes principales (PC1 y PC2) mostraron anomalías de menor intensidad, mientras que el análisis discriminante permitió resaltarlas con mayor claridad, complementándose con la información proporcionada por el mapa SOM.

En la población muestral Goyllarisquizga, las anomalías generadas se concentran principalmente en las inmediaciones de depósitos minerales conocidos, como lo reflejan tanto los

componentes principales como los discriminantes. Sin embargo, el mapa SOM destacó una anomalía focalizada en la cabecera del río Machaycancha.

Finalmente, la población muestral Jumasha presentó la mayor cantidad e intensidad de anomalías, localizándose al norte de Raura, en la zona de influencia de los ríos Nupe, Machaycancha y Huayhuash. También se identificaron anomalías en las áreas cercanas a Llamellín, Aczo y San Juan de Rontoy. Cabe destacar que una zona resaltante fue el tramo entre Huallanca y La Unión, a lo largo del río Torres Vizcarra. Sin embargo, esta área no se incluyó en la ponderación final debido a evidencia de impacto antrópico documentada en los reportes del INGEMMET (Chira et al., 2008).

Para ponderar las áreas de interés (targets), se utilizaron los resultados de la estadística univariable de los elementos pathfinder: Cu, Pb, Mo, Zn y Ag. A cada elemento se le asignaron valores de 1 a 3, siendo 3 el valor correspondiente a las anomalías de mayor intensidad. Asimismo, se consideraron los resultados de la estadística multivariable obtenidos mediante los métodos de Análisis de Componentes Principales (ACP), Análisis Discriminante y SOM. En este caso, también se empleó una valoración de 1 a 3, asignándose el valor más alto a las anomalías que explican una mayor proporción de la varianza. Los resultados detallados se presentan en la Tabla.

Los blancos de exploración identificados en el área se clasificaron en tres categorías: alta, media y baja (**Figura 7-1**). En la categoría alta se encuentran los ríos Rurichinchay, Rurec, Shashal, Mosna 1 y Ruricocha. La categoría media incluye la Quebrada Tambillo, el río Machaycancha, Chacapato, Puchka 2, San Juan y Nupe. Finalmente, la categoría baja comprende las áreas alrededor de los ríos Huayhuash, Lauricocha y la Quebrada Pañoragra-río Mirgas (**Figura 7-1**).

Tabla 7-1. Ponderación de variables para selección de targets

ID	TARGETS	Ubicación Referencial	M. Univariadas					M. Multivariadas						Puntuación
			Cu	Pb	Mo	Zn	Ag	PC1	PC2	PC3	DP1	DP2	SOM	
1	Río Rurichinchay	SW Huari	1	1	2		1	3	2.5	2	3	2	3	20.5
2	Río Rurec	SW Huari		1		1	2	3	2.5	2	2	2	3	18.5
3	Río Mosna 1	E Cordillera Blanca			3			3	2.5	2	2	2	3	17.5
4	Río Ruricocha	NW San Luis		3				3		2	3	1.5	3	15.5
5	Río Shashal	W Huari	1		3			3		1.5	3		2.5	14
6	Qda. Tambillo	SE San Luis					3	3	2.5			2	1	11.5
7	Río Machaycancha	N Raura - SW Rondos			1	1			2.5	2		2	1.5	10
8	Río Chacapato	SW San Luis						2		2	3	1	1	9
9	Río Nupe	N Raura - SW Rondos						2	2.5	1.5		2	1	9
10	Río Puchka 2	Altura San Juan de Rontoy - Río Marañón	3	1	3	1								8
11	Río San Juan	SW Huallanca	1	2					2.5			2		7.5
12	Río Chucpín	NW San Luis						3			3	1		7
13	Qda. Pañoragra – Río Mirgas	S Mirgas – W Río Contadera	1					2	2.5					5.5
14	Río Huayhuash	N Raura – SW Rondos					3			1.5				4.5
15	Río Lauricocha	S Rondos	1			1			1	1.5				4.5
16	Río Carhuacocha	N Raura – SW Rondos		1						1.5			1	3.5

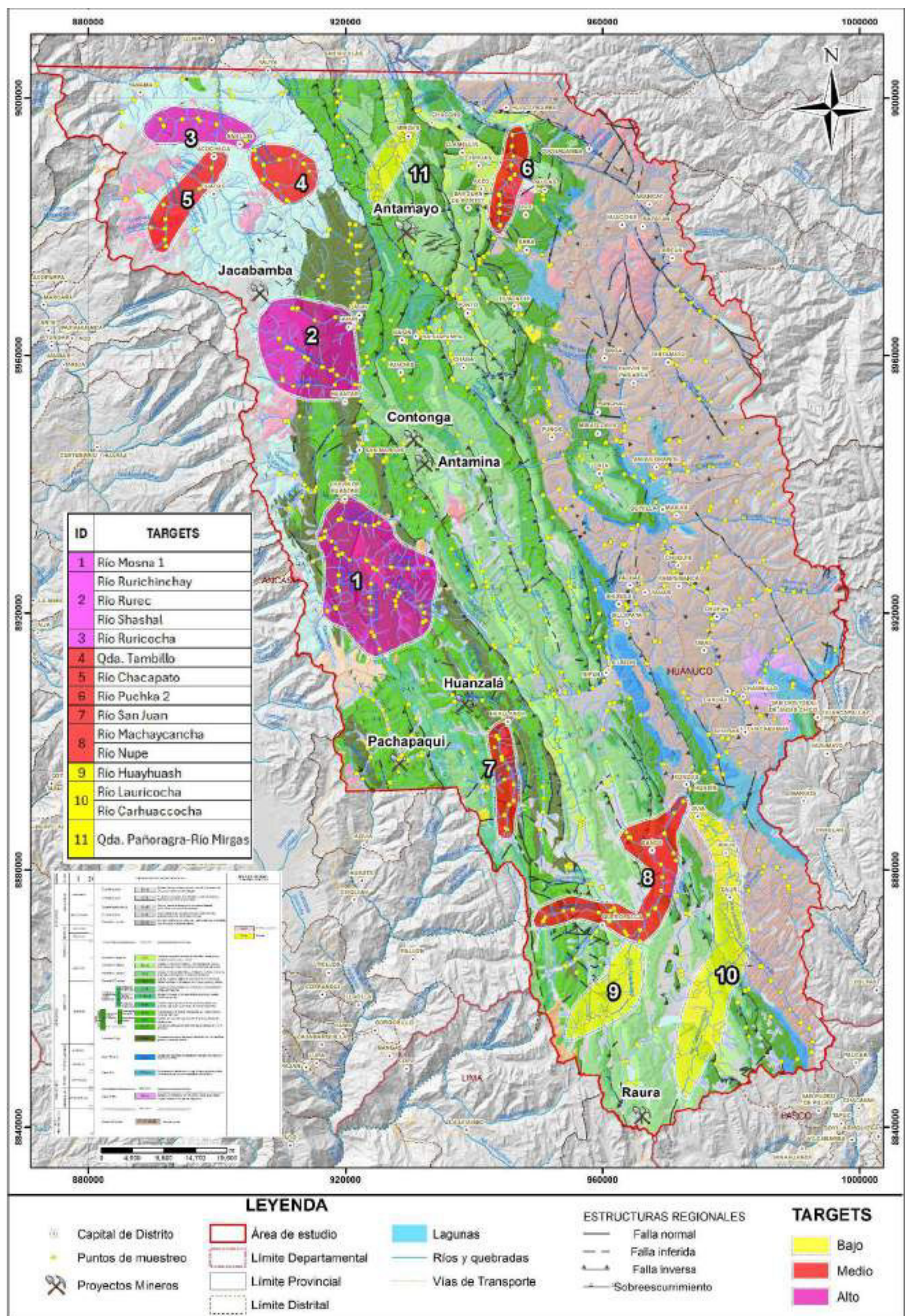


Figura 7-1. Targets área de estudio

CAPÍTULO 8 CONCLUSIONES

La evaluación de la distribución espacial de los elementos químicos en condición de anomalía, permitió caracterizar áreas con anomalías geoquímicas relevantes, alineadas tanto con zonas mineralizadas conocidas como con nuevos sectores sin registrar actividad minera previa. Este análisis evidenció una fuerte influencia de la geología local y la dinámica sedimentaria en la concentración y dispersión de elementos metálicos.

El uso combinado de técnicas como el Análisis de Componentes Principales (ACP), el clustering K-means, el análisis discriminante y las redes neuronales autoorganizadas (SOM) fue fundamental para detectar asociaciones elementales representativas de ambientes mineralizados. Estas metodologías permitieron superar las limitaciones del análisis univariable, identificando patrones complejos que revelan procesos geológicos subyacentes y fortaleciendo la interpretación exploratoria.

Las asociaciones detectadas (por ejemplo, Cu-Bi-Ga o Ag-Pb-Sb) están estrechamente relacionadas con mineralizaciones tipo skarn y polimetálicas, y fueron consistentes entre distintas poblaciones muestrales. Estas asociaciones actúan como firmas geoquímicas útiles para la delimitación de objetivos exploratorios en áreas similares.

La correlación entre las anomalías detectadas y depósitos minerales conocidos (como Antamina, Contonga, Huanzalá y Jacabamba) confirmó la efectividad de los elementos guía seleccionados (Cu, Pb, Mo, Zn, Ag) y de las técnicas multivariadas aplicadas. La concordancia

espacial entre las anomalías identificadas y los yacimientos validados respalda el uso de estos métodos como herramientas confiables para la exploración regional.

Finalmente, la integración de resultados univariados y multivariados permitió identificar áreas prospectivas clasificadas en alta, media y baja prioridad. Dentro de los blancos de alta prioridad destacan los ríos Rurichinchay, Rurec, Shashal, Mosna 1 y Ruricocha, que presentan anomalías geoquímicas robustas y consistentes con la geología favorable para depósitos tipo pórfido y skarn. Las áreas de prioridad media incluyen la Quebrada Tambillo, río Machaycancha, Chacapato, Puchka 2, San Juan y Nupe, mientras que las zonas de baja prioridad se concentran alrededor de los ríos Huayhuash, Lauricocha y la Quebrada Pañoragra-río Mirgas. Estos resultados proporcionan blancos de exploración robustos, con respaldo estadístico y geológico, que pueden orientar futuras campañas de prospección minera en la región.

CAPÍTULO 9 . RECOMENDACIONES

Recopilar datos de sedimentos de quebradas con una malla de menor densidad de muestreo en las áreas de mayor interés prospectivo, haciendo una campaña de prospección geoquímica local que continúe la investigación de los procesos que nos permitieron obtener los resultados de esta tesis.

En los casos donde el muestreo original no cubrió suficientes puntos alrededor de depósitos conocidos, como en Antamina, se recomienda realizar una campaña específica para cubrir estos vacíos. Esto permitirá una evaluación más precisa de la extensión de la mineralización y reducirá la incertidumbre en la interpretación de datos, se podrá evaluar el comportamiento de este yacimiento tipo mundial con relación a los proyectos mineros de menor envergadura en la misma área.

Se recomienda realizar campañas de muestreo adicionales en las áreas donde se han identificado anomalías geoquímicas significativas, especialmente en las cercanías de Jacabamba, San Luis, y en la cabecera de ríos en la Cordillera Blanca. Un muestreo más detallado permitirá validar y precisar los blancos de exploración generados en este estudio, así como identificar nuevas áreas prospectivas.

Dada la eficacia demostrada de las técnicas estadísticas multivariantes en la identificación de nuevas zonas de interés exploratorio, se recomienda continuar investigando y aplicando estas técnicas en otras áreas geográficas con potencial mineral.

CAPÍTULO 10 . REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acosta, J., & Rivera, R. (2020). *Mapa Metalogénico del Perú 2020. Memoria*. INGEMMET.
- Aitchison, J. (1986). *The statistical analysis of compositional data*. Chapman & Hall. <https://doi.org/10.1007/978-94-009-4109-0>
- Carlotto, V., & Quispe, J. (2009). Dominios Geotectónicos y Metalogénesis del Perú. *Boletín de la Sociedad Geológica del Perú*, 103, 1–89.
- Carpio, D. (2020). *Mapas Autoorganizados (Self-Organizing Maps)* [Grado en Estadística, Universidad de Valladolid].
- Chira, J., Gónzales, R., Vargas, L., Rivera, R., Chero, D., & Guerra, K. (2008). *Prospección Geoquímica Regional entre los Paralelos 9°-10° Latitud Sur (Vertiente Atlántica)* (Serie B. Geología Económica, N° 18). INGEMMET.
- Chirif Rivera, H., Rivera Cornejo, R., Santisteban Angeldonis, A., & Villarreal Jaramillo, E. (2008). *Potential evaluation of the mineral deposits in the Western Cordillera of the Ancash Region* (Metallogeny Area Report). Dirección de Recursos Minerales y Energéticos, INGEMMET. Lima, Perú.
- Cobbing, E. J., Pitcher, W. S., & Garayar, J. (1973). *Geología de los Cuadrángulos de Barranca, Ámbar, Oyon, Huacho, Huaral y Canta* (Boletín 26). Servicio de Geología y Minería.
- Egozcue, J. J., Tolosana, R., Jarauta, E., Ortego, M. I., & Díaz, J. L. (2011). Análisis de datos composicionales: aguas, contaminantes, recursos, sociología... *Jornada de Recerca i Innovació a l'Escola de Camins*. Universitat Politècnica de Catalunya. <http://hdl.handle.net/2099/11635>
- Einaudi, M. T., Meinert, L. D., & Newberry, R. J. (1981). Skarn Deposits. In *Seventy-Fifth Anniversary Volume*. Economic Geology.
- Flury, B. (1997). *A First Course in Multivariate Statistics*. Springer-Verlag. <https://doi.org/10.1007/978-1-4612-0611-7>
- Fontboté, L. (2019). Cordilleran Polymetallic Deposits as a Class in Porphyry Systems: Exploration implications [Presentación de PowerPoint]. SEG-SGA-UNESCO Latino American Metallogeny Course.
- Fontboté, L. (2020). Systematic trends in the evolution of porphyry-related Zn-Pb-Ag deposits. *Swiss Geoscience Meeting*, Zurich, 2 p.

Ghasemi, A., & Zahediasl, S. (2012). Normality Tests for Statistical Analysis: A Guide for Non-Statisticians. *International Journal of Endocrinology and Metabolism*, 10(2), 486–49. <https://doi.org/10.5812/ijem.3505>

Glencore. (2015). *Annual report 2015*. https://www.glencore.com/assets/investors/doc/reports_and_results/2015/GLEN-2015-Annual-Report.pdf

Grunsky, E. C. (2010). The interpretation of Geochemical Survey Data. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 10(1), 27-74. <https://doi.org/10.1144/1467-7873/09-243>

Hawkes, H. E. (1957). *Principles of Geochemical Prospecting*. U.S. Geological Survey Bulletin 1000-F.

Helsel, D. R. (2012). *Statistics for Censored Environmental Data Using Minitab and R* (2nd ed.). John Wiley & Sons.

IoGAS IMDEX. (2019). *Quick Start Tutorial* (Version 7.1).

Jackson, J. (2005). *A User's Guide to Principal Components*. John Wiley & Sons.

Nie, L., Wang, F., White, N., Zhang, D., Yan, C., & Wang, X. (2023). Scheelite trace element compositions: A robust new tool for mineral exploration. *Ore Geology Reviews*, 155, 105295. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2023.105295>

Love, D. A., Clark, A. H., & Glover, J. K. (2004). The lithologic, stratigraphic, and structural setting of the giant Antamina copper-zinc skarn deposit, Ancash, Peru. *Economic Geology*, 99(5), 887-916. <https://doi.org/10.2113/99.5.887>

MacQueen, J. (1967). Some methods for classification and analysis of multivariate observations. In *Proceedings of the Fifth Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability* (Vol. 1, pp. 281–297).

Mahalanobis, P. C. (1936). On the Generalized Distance in Statistics. *Proceedings of the National Institute of Sciences of India*, 2, 49–55.

Mamani, F., Rodríguez, W., & Jiménez, W. (1983). Estudio geoestadístico de las vetas "A" y "Z" de la mina Bella Unión, Hualgayoc. *Boletín de la Sociedad Geológica del Perú*, 72, 89-97.

Martínez, S. (2022). *Datos Composicionales: Geometría de Aitchison* [Trabajo de fin de grado, Universidad de Salamanca].

Meinert, L. D. (1992). Skarns and Skarn Deposits. *Geoscience Canada*, 19(4). <https://journals.lib.unb.ca/index.php/GC/article/view/3773>

- Meinert, L. D., Dipple, G. M., & Nicolescu, S. (2005). World Skarn Deposits. In Hedenquist, J. W., Thompson, J. F. H., Goldfarb, R. J., & Richards, J. P. (Eds.), *One Hundredth Anniversary Volume*. Economic Geology.
- Monreal, R. (2013). La exploración geológica. *Epistemos*, 15(7), 73-77.
- Mrozek, S. (2018). *The giant Antamina deposit, Peru: intrusive sequence, skarn formation, and mineralization* [PhD Thesis, James Cook University].
- Ottesen, R. T., & Theobald, P. K. (1994). Stream Sediments in Mineral Exploration. In *Handbook of Exploration Geochemistry* (pp. 147–184).
- Peña, D. (2002). *Análisis de Datos Multivariantes*. McGraw Hill.
- Reimann, C., Filzmoser, P., Garrett, R. G., & Dutter, R. (2008). *Statistical data analysis explained*. John Wiley & Sons.
- Rivera, H., Chira, J., Chacón, N., Gonzales, V., & Gonzales, J. (2015). Caracterización litogeoquímica de los Batolitos de Las Lomas y Noque en el departamento de Piura y su comparación con los Batolitos de la Cordillera Blanca y Challaviento. *Revista del Instituto de Investigación de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, Universidad Nacional Mayor de San Marcos (RIIGEO)*, 18(35), 83–96.
- Samamé, M. (1980). El Perú minero. *Tomo IV*, Primer Volumen, 75-86.
- Sanford, R. F., Pierson, C. T., & Crovelli, R. A. (1993). An objective replacement method for censored geochemical data. *Mathematical Geology*, 25(1), 59–80. <https://doi.org/10.1007/BF00893785>
- Seedorff, E., Dilles, J., Proffett, J., Einaudi, M., Zurcher, L., Stavast, W., Johnson, D., & Barton, M. (2005). Porphyry Deposits: Characteristics and Origin of Hypogene Features. In *Economic Geology 100th Anniversary Volume* (pp. 251–298).
- Tejada, W. (2003). *Regional setting and petrographic characterization of the Antamayo calcic Cu-Zn skarn* [Tesis de Maestría, Queen's University, Ontario, Canadá].
- Tukey, J. W. (1977). *Exploratory data analysis*. Addison-Wesley.
- Vasquez, R., Martínez, J., & Quispe, J. (2008). Distribución geoquímica de tierras raras y otros elementos traza en la franja polimetálica 9°-10°S del Perú Central. En *XIV Congreso Peruano de Geología*.
- Van den Boogaart, K. G., & Tolosana-Delgado, R. (2013). *Analyzing Compositional Data with R*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-36809-7>

Viladevall, M. (2008). La prospección geoquímica. Universitat de Barcelona.

Villareal, E., & Rodríguez, I. (2009). *Informe Geoeconómico de la región Ancash*. INGEMMET.

Wagstaff, K., Cardie, C., Rogers, S., & Schrödl, S. (2001). Constrained k-means clustering with background knowledge. In *Proceedings of the Eighteenth International Conference on Machine Learning* (pp. 577–584).

Wilson, J. (1963). Cretaceous stratigraphy of Central Andes of Peru. *AAPG Bulletin*, 47(1), 1-34.

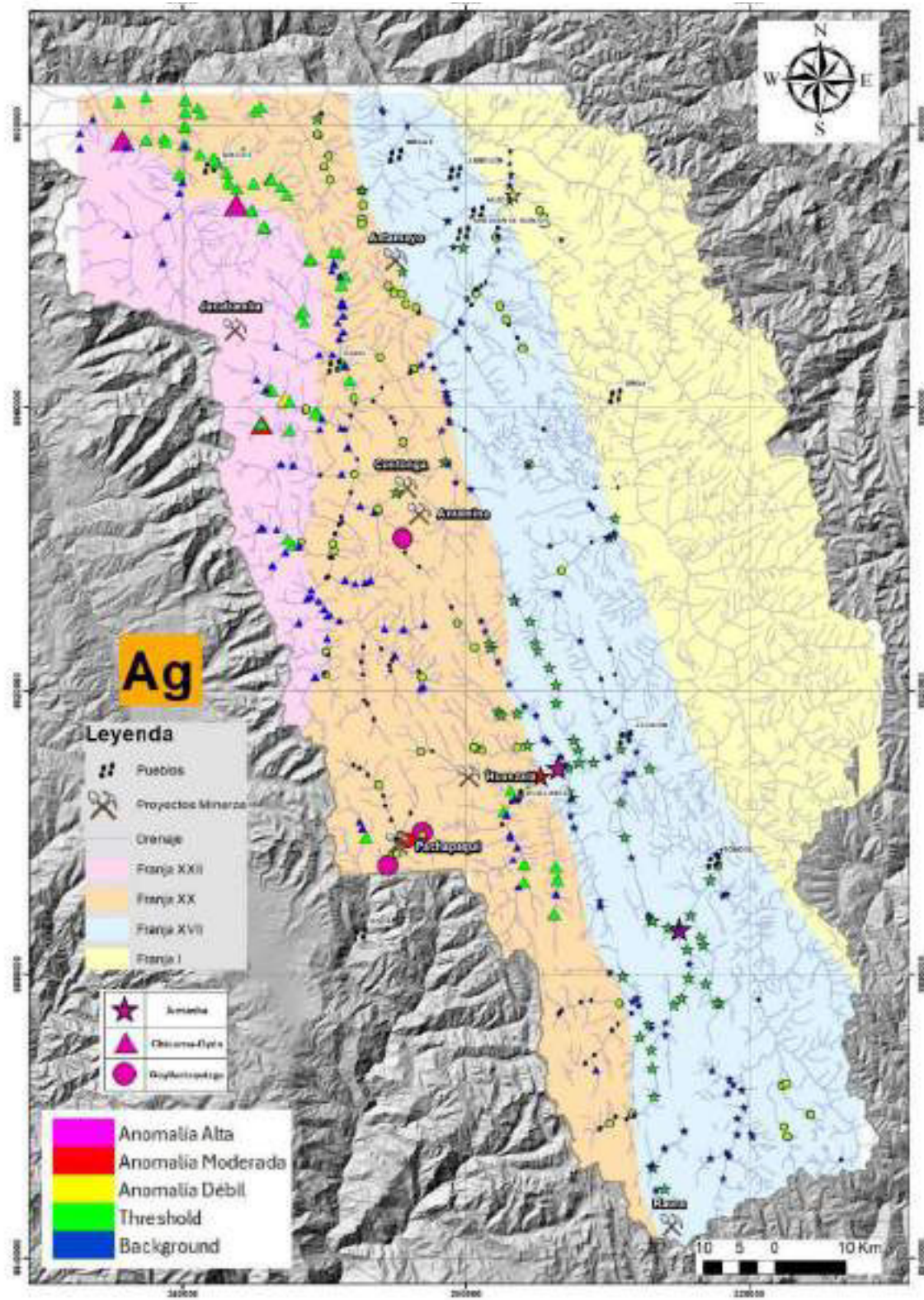
CAPÍTULO 11 . ANEXOS

Anexo A. Matriz de consistencia

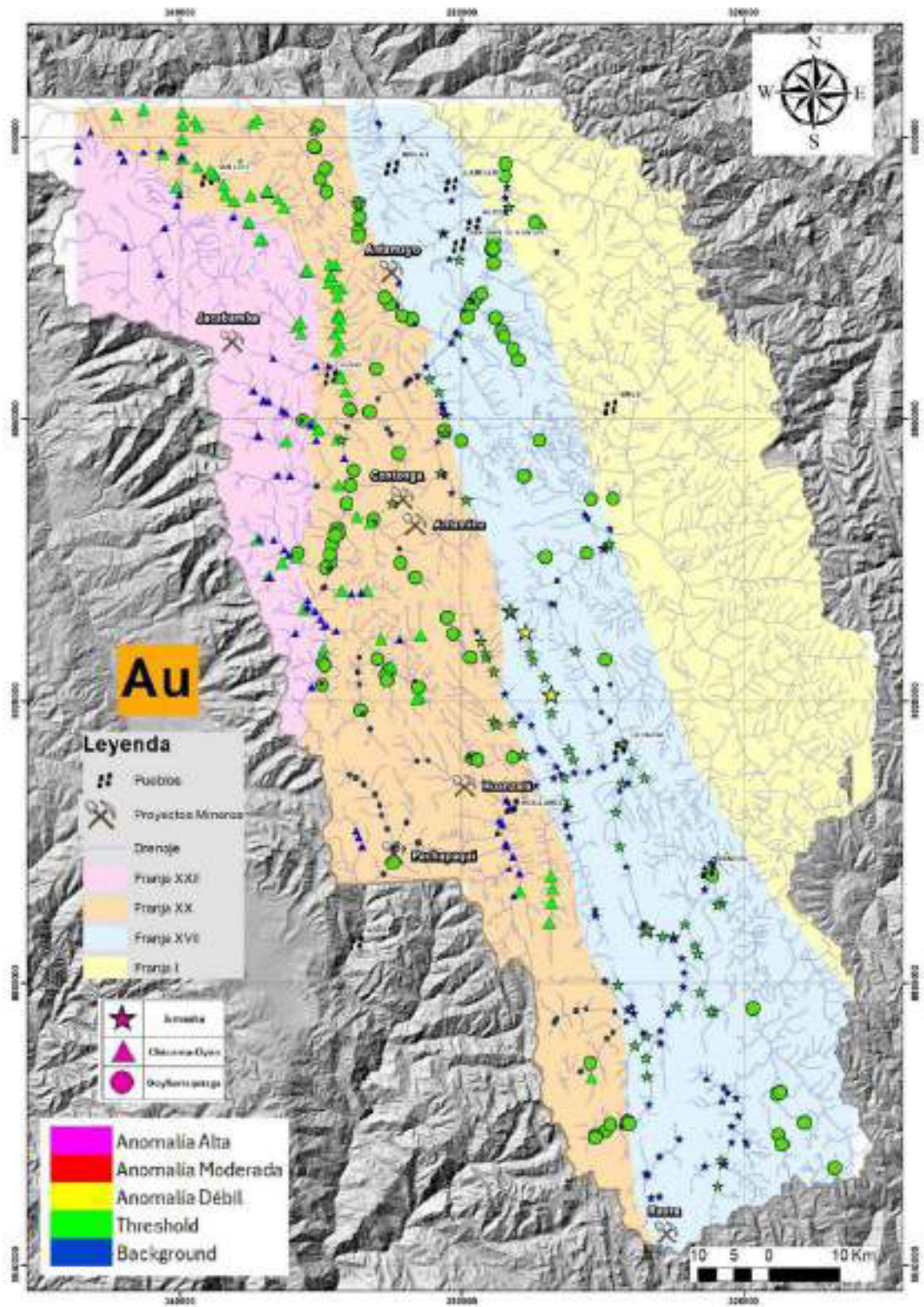
Elementos	Descripción
Título	Análisis Exploratorio de Datos con Métodos Multivariantes entre los Paralelos 9° - 10° Latitud Sur de la Vertiente Atlántica Aplicado a la Exploración de Yacimientos Minerales
Planteamiento del Problema	Las actividades de exploración minera han aumentado frente a la creciente demanda de metales y agotamiento de reservas. Este estudio propone el uso de técnicas multivariantes en datos geoquímicos de sedimentos de quebrada recolectados por INGEMMET (2006-2008) para identificar nuevas zonas de interés mineral.
Problema General	¿Cómo pueden las técnicas estadísticas multivariantes ayudar a identificar nuevas zonas de interés exploratorio para la búsqueda de depósitos minerales tipo pórfido-skarn-polimetálicos en las franjas metalogenéticas XX, XXII y XVII entre los paralelos 9° y 10° latitud sur?
Problemas Específicos	1. ¿La distribución espacial de los elementos químicos muestra patrones que indiquen zonas de mineralización?2. ¿Los métodos multivariantes como K-means y análisis discriminante permiten identificar asociaciones significativas?3. ¿Las redes neuronales SOM son eficaces para identificar anomalías geoquímicas?4. ¿Los elementos guía identificados se correlacionan con depósitos conocidos?
Objetivo General	Aplicar métodos estadísticos multivariantes para analizar datos geoquímicos de sedimentos de quebrada en el área entre los paralelos 9° y 10° latitud sur, con el fin de identificar nuevos blancos de exploración para depósitos tipo pórfido-skarn-polimetálicos.
Objetivos Específicos	1. Evaluar la distribución espacial de elementos en sedimentos de quebrada para caracterizar áreas con potencial mineral.2. Aplicar K-means y análisis discriminante para identificar patrones geoquímicos asociados.3. Generar redes SOM para detectar anomalías.4. Validar elementos guía mediante correlación con depósitos conocidos.
Hipótesis General	La aplicación de métodos estadísticos multivariantes en el análisis de datos de sedimentos de quebrada permitirá identificar nuevas zonas de interés exploratorio para la exploración de depósitos minerales tipo pórfido-skarn-polimetálicos en las Franjas Metalogenéticas XX, XXII y XVII.

Hipótesis Específicas	1. La estadística multivariable revelará interrelaciones entre variables que indican zonas con mineralización.2. Las técnicas multivariantes permitirán una clasificación eficaz de datos geoquímicos.3. Las redes SOM detectarán con precisión anomalías geoquímicas.4. Los elementos guía tendrán correlación estadística con depósitos conocidos.
Variable Independiente	Concentraciones geoquímicas de elementos (Au, Cu, Li, Mn, Zn, Ag, As, Bi, Cd, Ga, In, Mo, Pb, Sb, Sc, Tl, W) en sedimentos de quebrada.
Variable Dependiente	Zonas de interés exploratorio, determinadas por anomalías geoquímicas identificadas mediante análisis multivariable.
Metodología	1. Tipo de Investigación: No experimental, correlacional y descriptiva. 2. Enfoque: Cuantitativo. 3. Técnicas de análisis: Análisis univariable y multivariable (ACP, clustering, discriminante, SOM), análisis espacial con ArcGIS.
Población y Muestra	Muestras geoquímicas recolectadas por INGEMMET (2006) en el área entre los paralelos 9° y 10° latitud sur, con una densidad de 1 muestra por 10 km ² . Se trabajó con 518 muestras.
Técnicas de Recolección de Datos	Uso de base de datos geoquímica proporcionada por INGEMMET. El muestreo fue realizado entre 2006-2008
Técnicas de Análisis de Datos	Procesamiento y normalización de datos (CLR), eliminación de outliers, análisis univariado y multivariado: ACP, K-means clustering, análisis discriminante, SOM. Visualización de resultados en mapas temáticos usando ioGAS y ArcGIS.

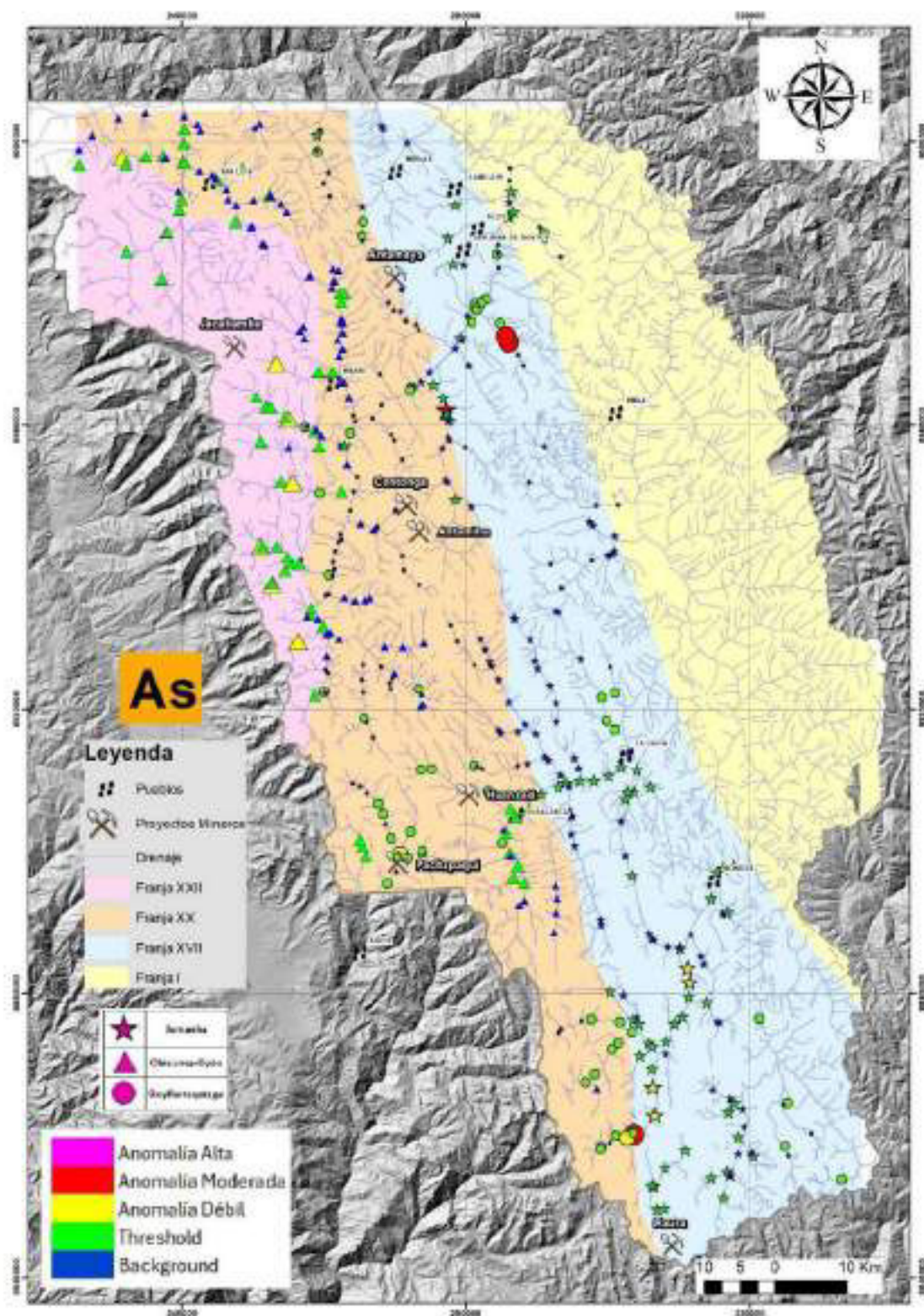
Anexo B. Mapa de distribución Ag



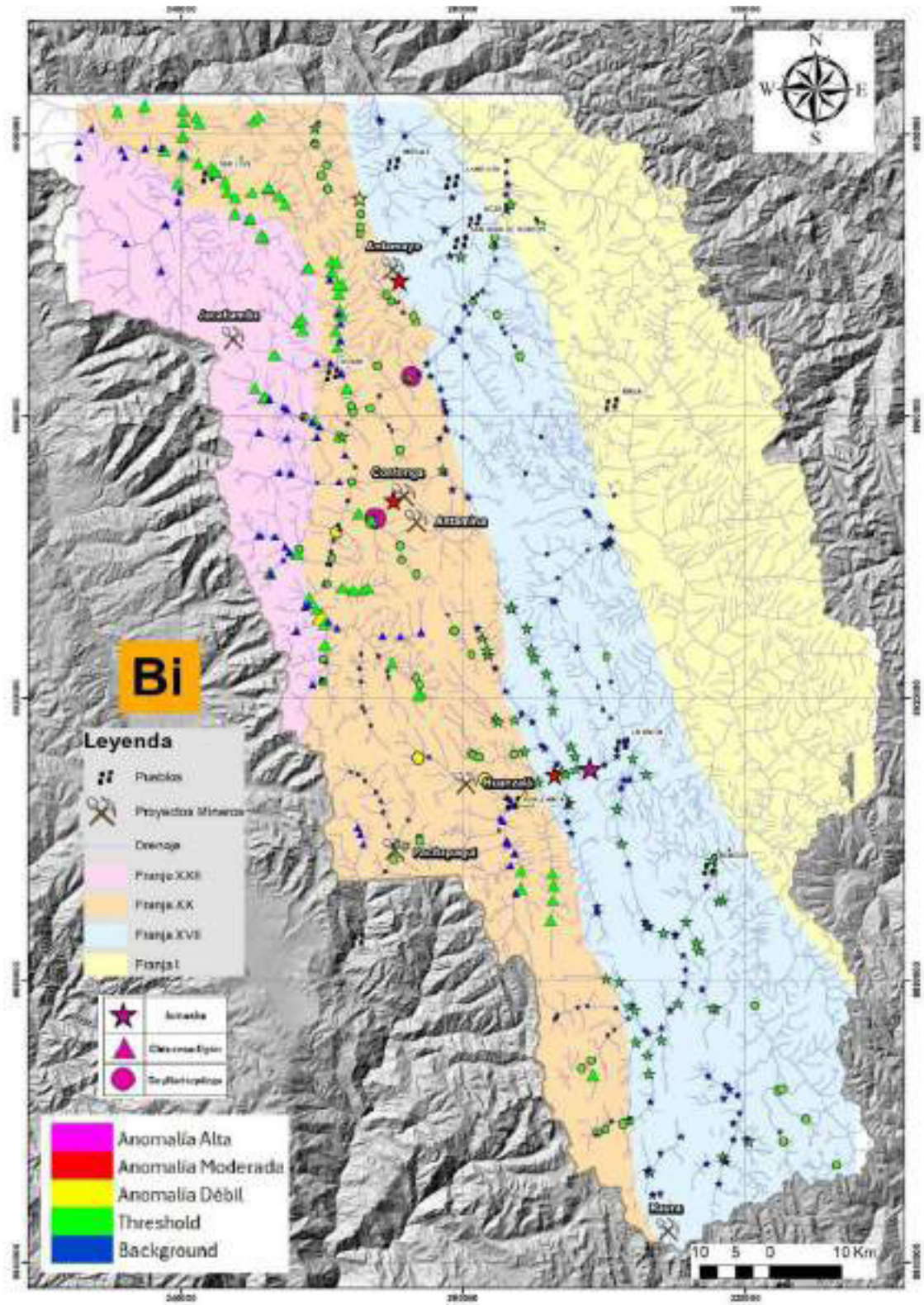
Anexo D. Mapa de distribución de Au



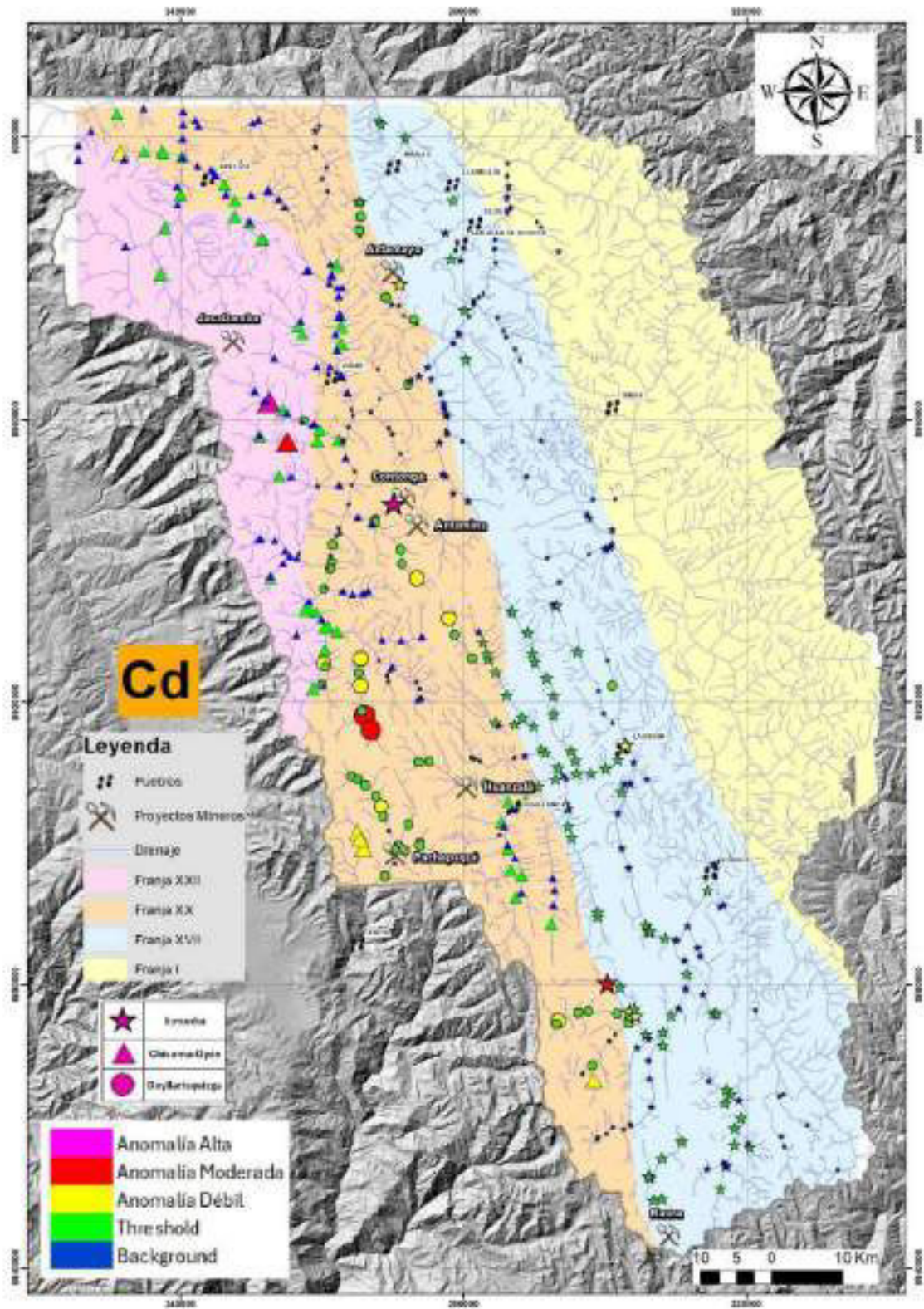
Anexo F. Mapa de distribución As



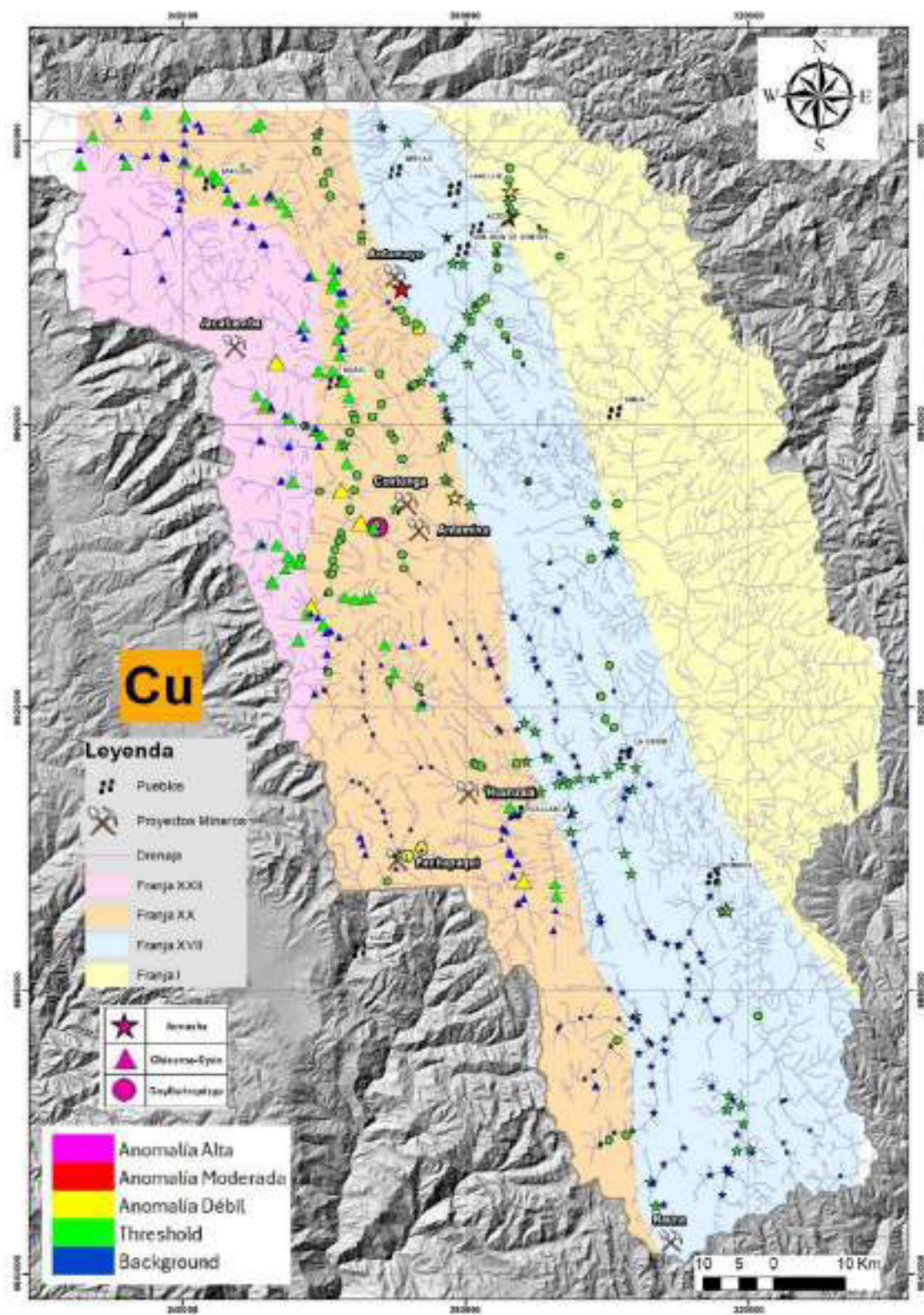
Anexo H. Mapa distribución Bi



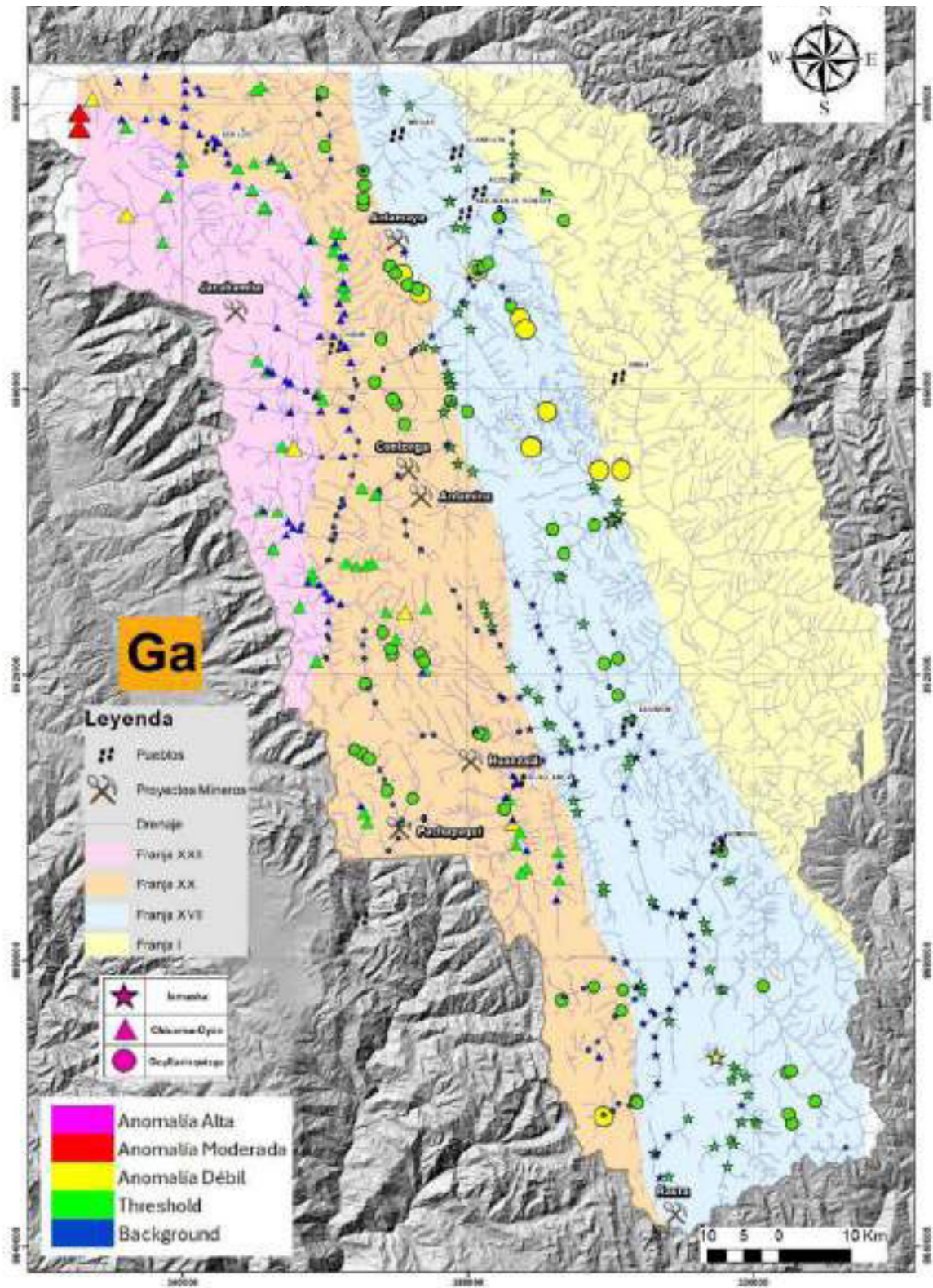
Anexo J. Mapa de distribución Cd



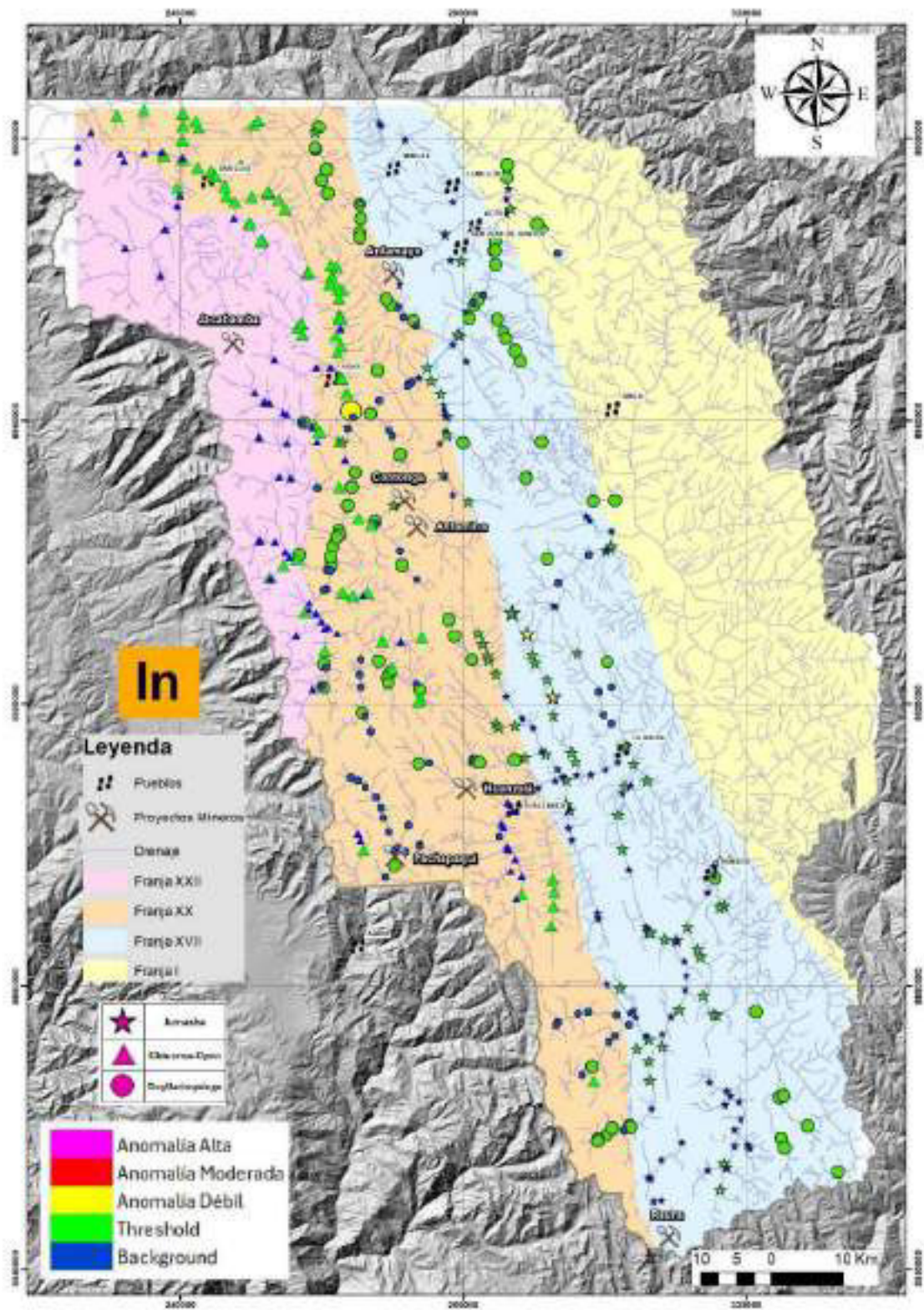
Anexo L. Mapa de distribución Cu



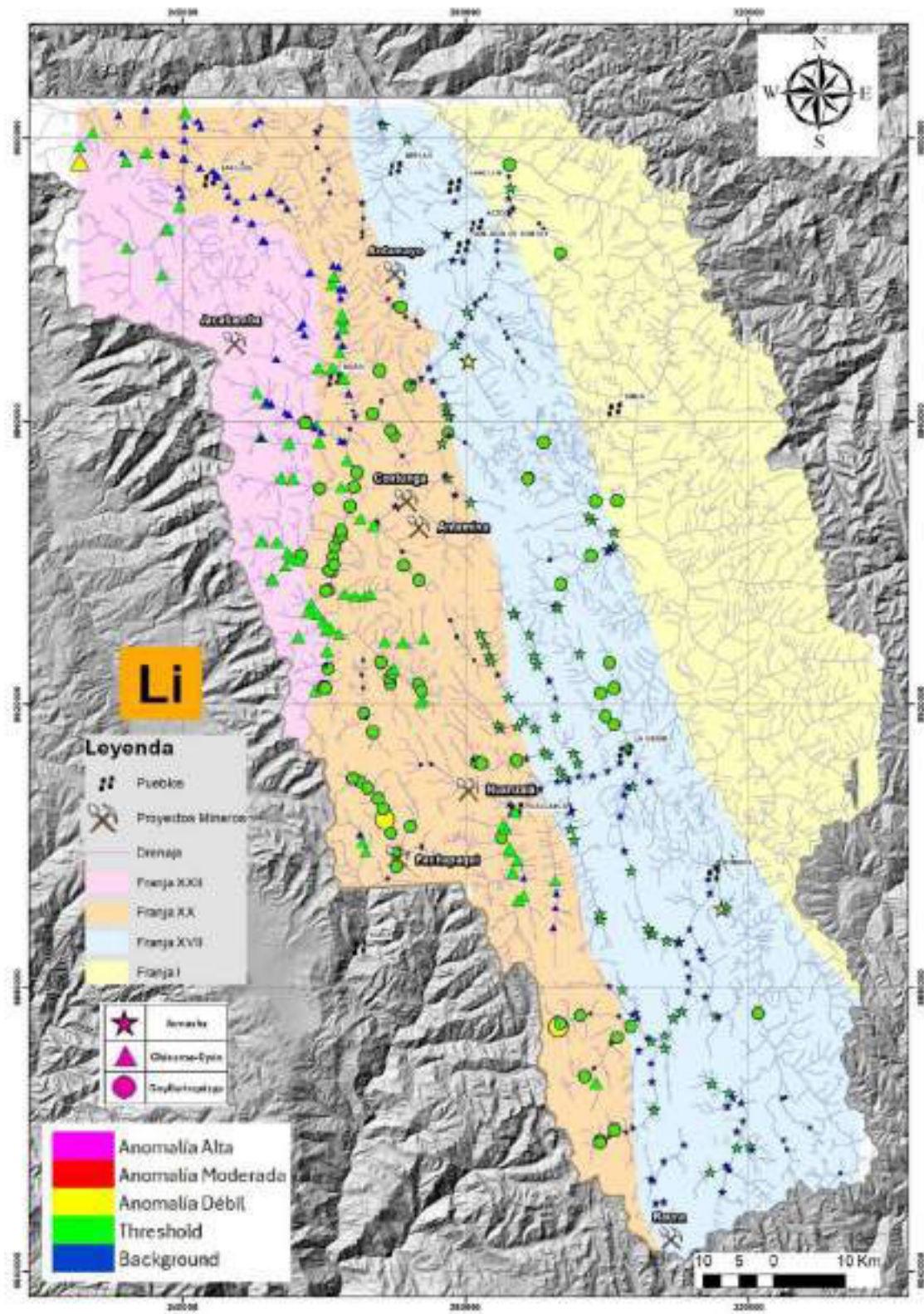
Anexo N. Mapa de distribución Ga



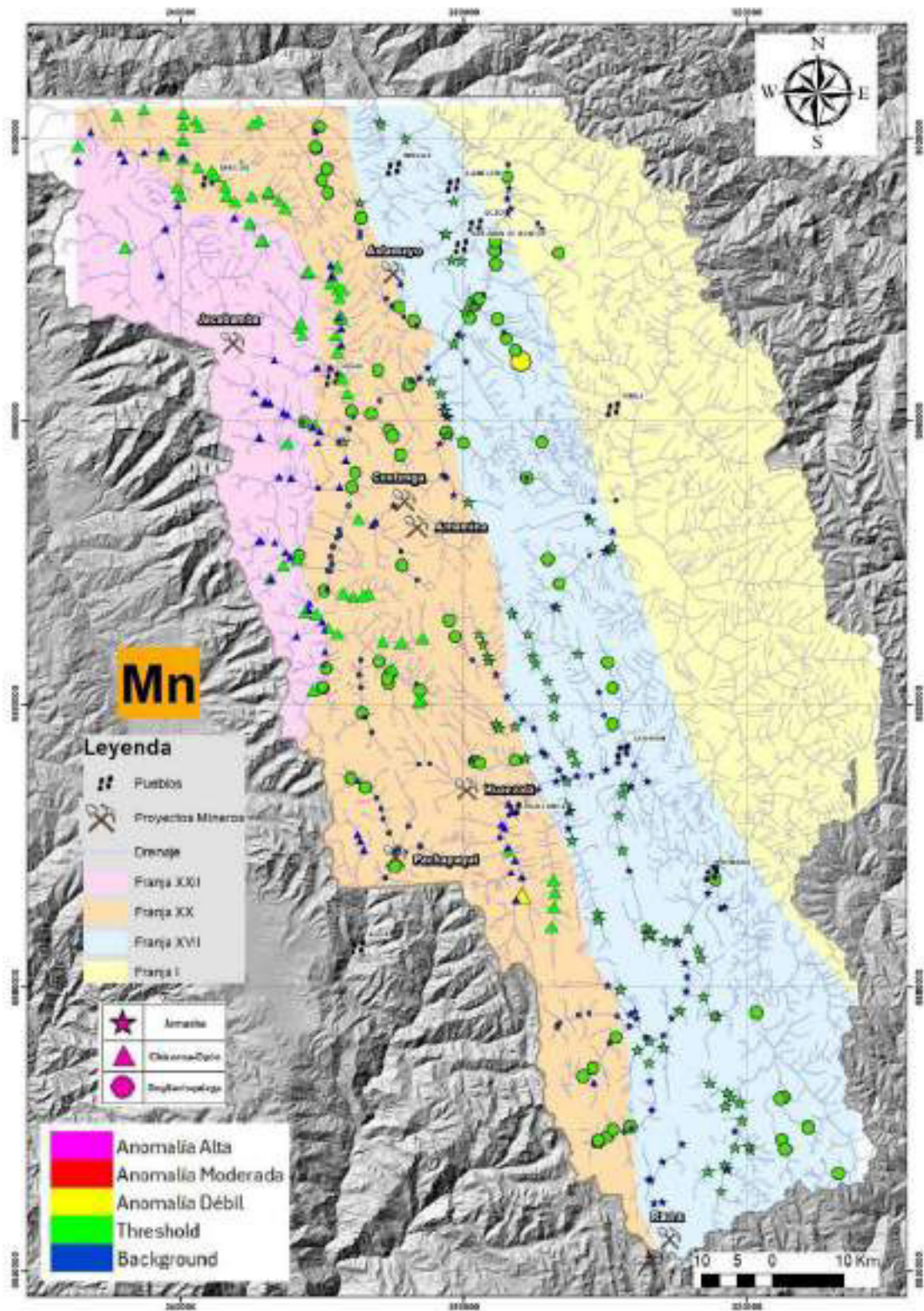
Anexo P. Mapa de distribución In



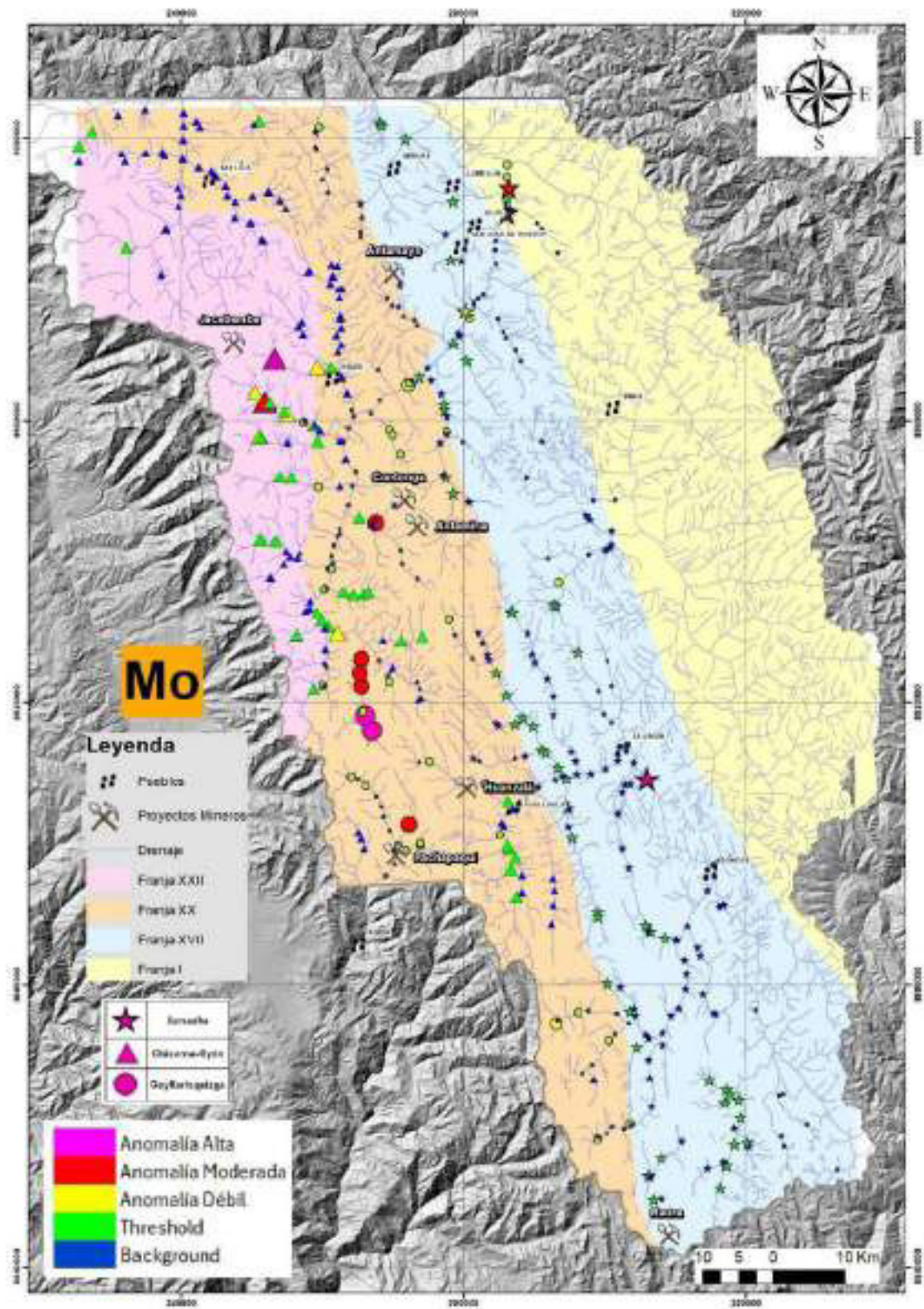
Anexo R. Mapa de distribución Li



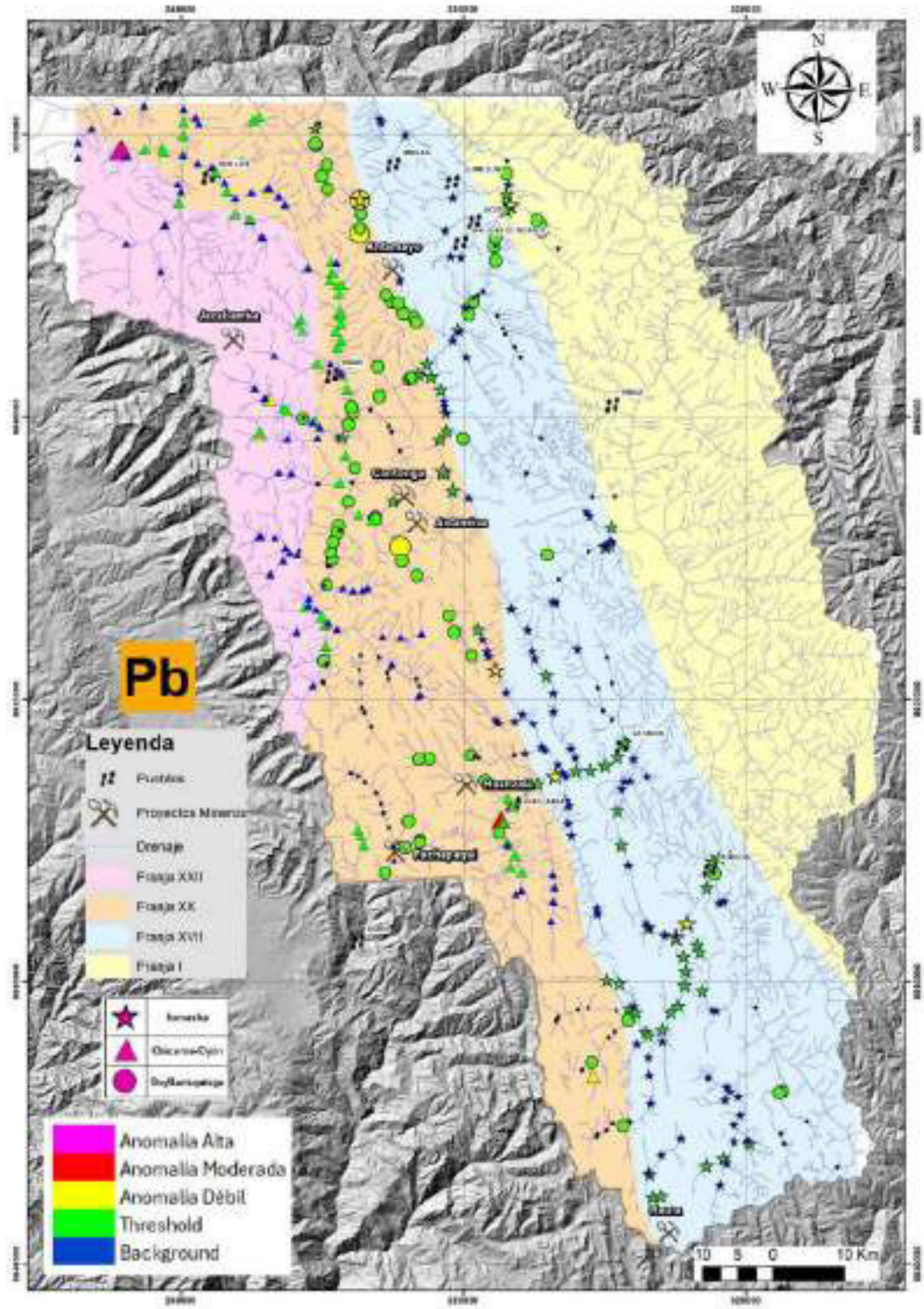
Anexo T. Mapa de distribución Mn



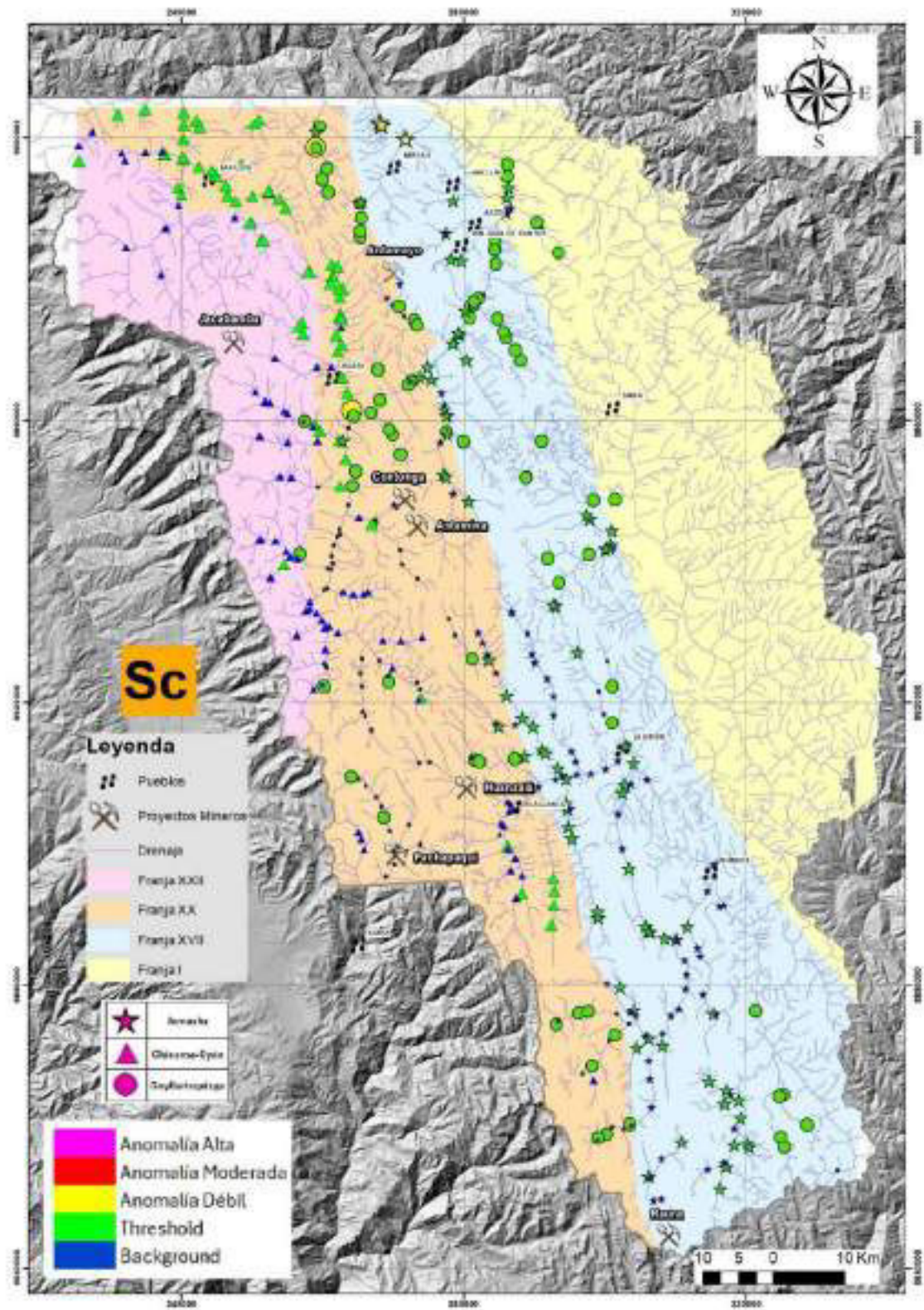
Anexo V. Mapa de distribución Mo



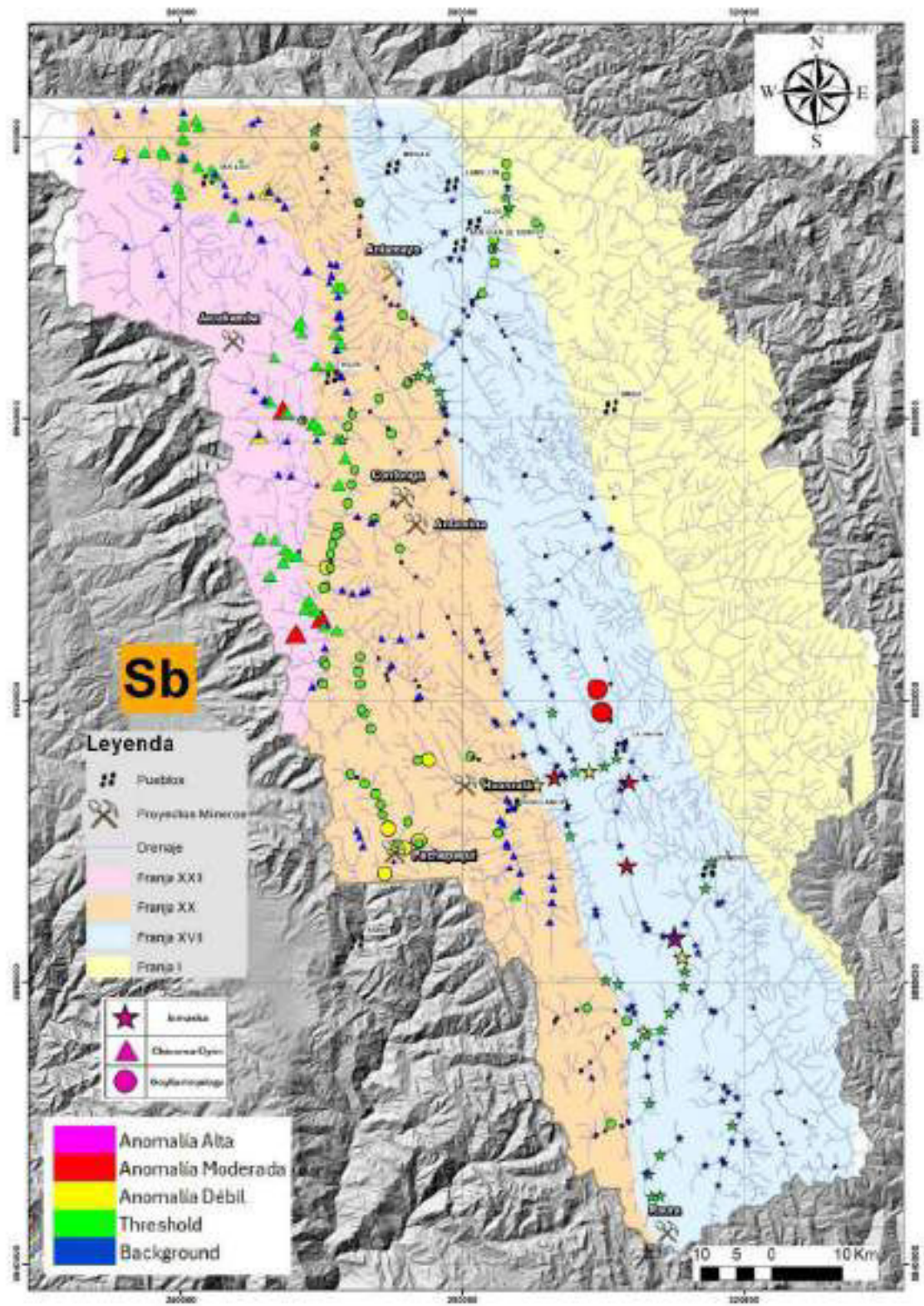
Anexo X. Mapa de distribución Pb



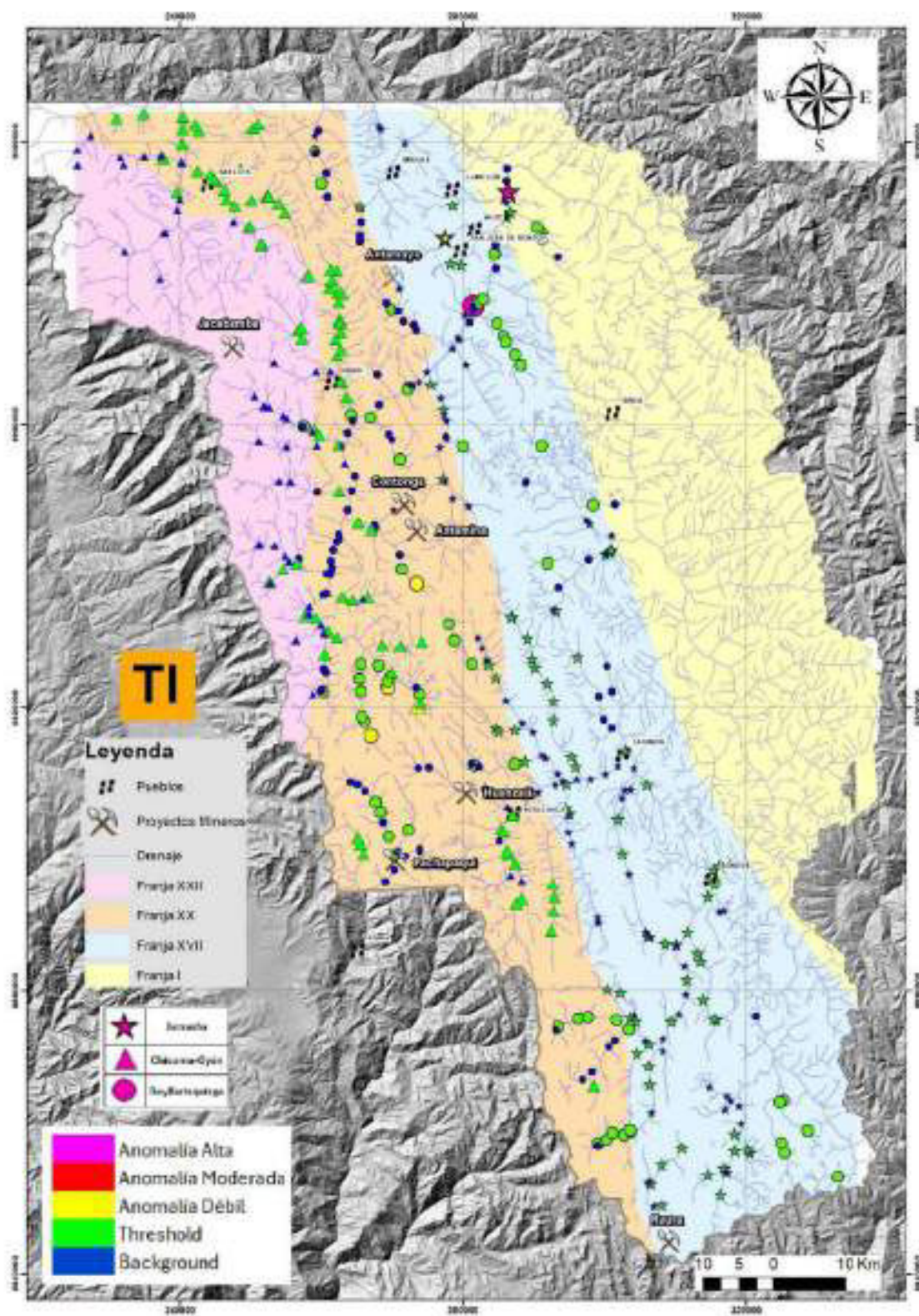
Anexo Z. Mapa de distribución Sc



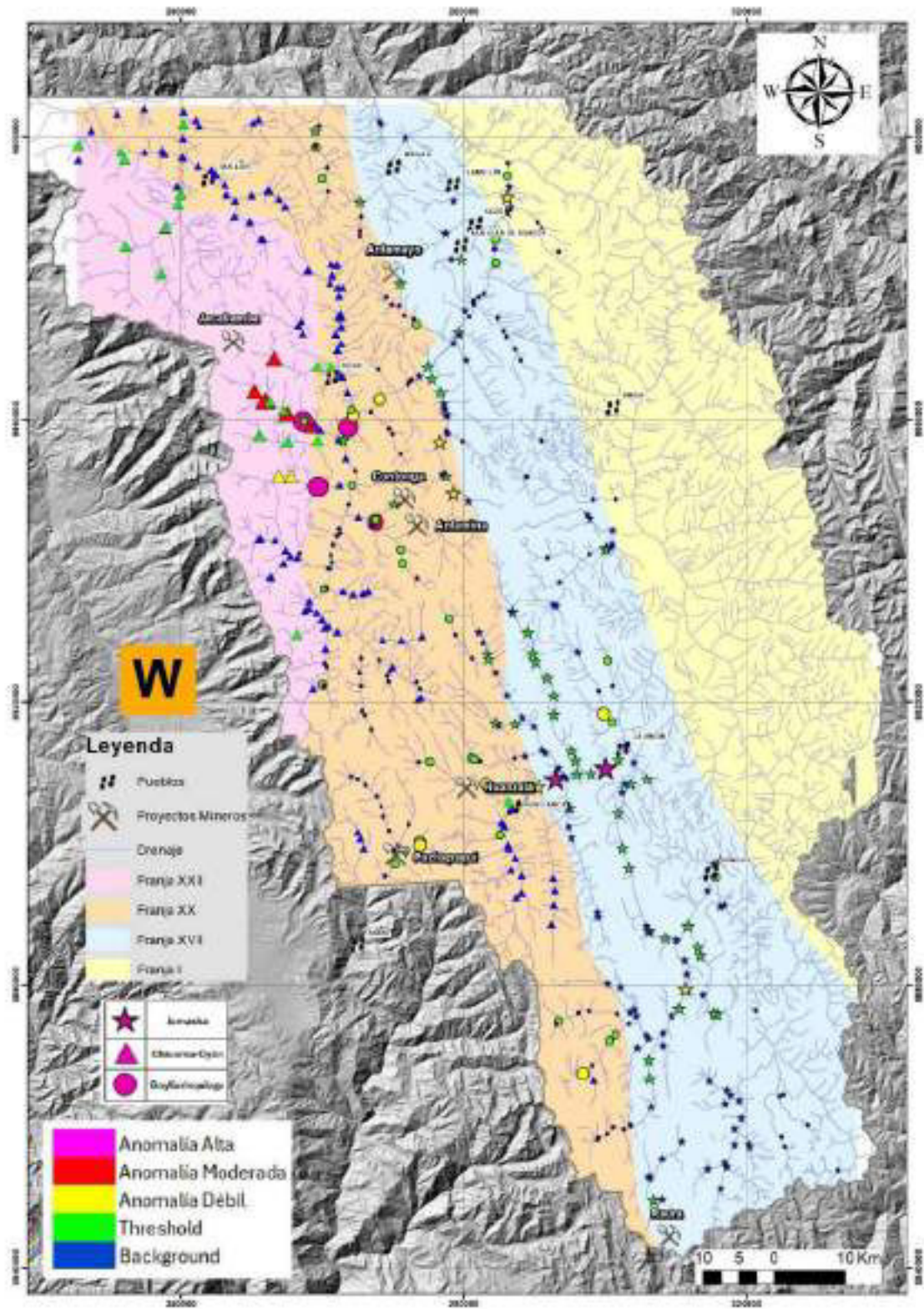
Anexo BB. Mapa de distribución Sb



Anexo DD. Mapa de distribución TI



Anexo FF. Mapa de distribución W



Anexo HH. Mapa de distribución Zn

