



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

**Modelamiento geológico 3D y estimación de recursos
minerales de la veta Cristina en la Unidad Minera
Animon-Pasco**

TESIS

Para optar el Título Profesional de Ingeniera Geóloga

AUTOR

Marilin Gina ORÉ HUACACHE

ASESOR

Mg. Christian Augusto HURTADO ENRIQUEZ

Lima, Perú

2026



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

Oré, M. (2026). *Modelamiento geológico 3D y estimación de recursos minerales de la veta Cristina en la Unidad Minera Animon-Pasco*. [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	Marilin Gina Oré Huacache
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	46562563
URL de ORCID	https://orcid.org/0009-0006-4480-8898
Datos de asesor	
Nombres y apellidos	Hurtado Enriquez Christian Augusto
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	45585445
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0001-7474-2451
Datos del jurado	
Presidente del jurado	
Nombres y apellidos	Iván Mesias Santos Paredes
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	25627100
Miembro del jurado 1	
Nombres y apellidos	Diana Pajuelo Aparicio
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	43540870
Miembro del jurado 2	
Nombres y apellidos	Pedro Antonio Olivares Ballena
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	06085689

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: Pasco Provincia: Pasco Distrito: Huayllay Latitud: 11° 1' 53.78" S Longitud: 76° 25' 24.79" O
Año o rango de años en que se realizó la investigación	2025-2026
URL de disciplinas OCDE	Geología https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#1.05.06 Mineralogía https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#1.05.02 Geociencias 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 lunes 12 de enero del año de 2026 siendo las 12:00 pm, en presencia de los señores docentes designados como miembros de Jurado Calificador:

Ing. Iván Mesias Santos Paredes
MSc. Diana Pajuelo Aparicio
Ing. Pedro Antonio Olivares Ballena

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

Reunidos para el acto académico público de colación de la Tesis de la Bach. **MARILIN GINA ORÉ HUACACHE** quien sustentará la Tesis titulada: «**MODELAMIENTO GEOLÓGICO 3D Y ESTIMACIÓN DE RECURSOS MINERALES DE LA VETA CRISTINA EN LA UNIDAD MINERA ANIMON-PASCO**»; su asesor el docente **Hurtado Enriquez Christian Augusto**, para la obtención del Título Profesional de Ingeniera Geóloga.

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

A Satisfacción del Jurado

El Jurado procedió a la calificación, cuyo resultado fue:

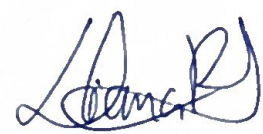
Diecisiete (17)

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. **MARILIN GINA ORÉ HUACACHE**.

Siendo las 12:50 horas se dio por concluido el acto académico, expidiéndose dos (05) actas originales de la Sustentación de la Tesis.

Lima 12 de enero del 2026


ING. IVÁN MESIAS SANTOS PAREDES
PRESIDENTE DE JURADO


MSC. DIANA PAJUELO APARICIO
MIEMBRO DE JURADO


ING. PEDRO ANTONIO OLIVARES BALLENA
MIEMBRO DE JURADO


MG. CHRISTIAN AUGUSTO HURTADO ENRIQUEZ
MIEMBRO ASESOR



Anexo 1

CERTIFICADO DE SIMILITUD

Yo, **CHRISTIAN AUGUSTO HURTADO ENRIQUEZ** en mi condición de asesor acreditado con el Dictamen de la EP N° 000846-2025-D-FIGMMG de la tesis, cuyo título es "**MODELAMIENTO GEOLÓGICO 3D Y ESTIMACIÓN DE RECURSOS MINERALES DE LA VETA CRISTINA EN LA UNIDAD MINERA ANIMON-PASCO** ", presentado por la bachiller **MARILIN GINA ORÉ HUACACHE** 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 **9%** 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 de Ingeniera Geóloga.

Firma del Asesor

Lima, de 11 de diciembre 2025

Nombres y Apellidos del asesor: **CHRISTIAN AUGUSTO HURTADO ENRIQUEZ**

DNI: 45585445

* 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.

RESUMEN

Animón se ubica en la Cordillera Occidental de los Andes en Pasco, Perú, a 4600 msnm., con clima frío y seco. Presenta una estratigrafía compleja y mineralización de tipo hidrotermal, destacando la veta Cristina como un yacimiento polimetálico significativo. La geomorfología sigue una orientación Suroeste-Noreste, y la geología regional incluye estructuras del Mioceno que favorecen la mineralización polimetálica de Pb-Zn-Cu-Ag. El yacimiento presenta tres estructuras principales formadas durante la orogenia andina.

La Unidad Minera Animón ha enfrentado problemas en la estimación precisa de recursos debido a la falta de un modelo geológico 3D preciso, afectando la toma de decisiones y la planificación minera.

Se describe la metodología para estimar los recursos minerales conforme al Código NI 43-101. Compilamos la base de datos, se construye el wireframe con Leapfrog Geo, y se modela la veta ajustando la geometría con polilíneas. Se realiza el análisis exploratorio de datos (EDA), tratamiento de altos erráticos (capping), composición de datos y variografía. Luego, se detalla la construcción del modelo de bloques, análisis de parámetros de estimación, validación de la estimación, asignación de densidad y clasificación de recursos en categorías medidas, indicadas e inferidas. Concluyendo con la interpretación 3D del modelo de la Veta Cristina donde se observa que se mejora notablemente la estimación de recursos minerales, definiendo mejor la geometría y permitiendo una interpretación dinámica y precisa. El tratamiento de altos erráticos controla la influencia de leyes altas, logrando una estimación confiable. Finalmente, la variografía muestra una buena correlación a 80 m y las validaciones muestran valores dentro de las buenas prácticas, dando certeza

aceptable en los bloques estimados. La asignación de densidad mediante regresión multivariable permite predecir la densidad según las leyes de los elementos, y los parámetros para la categorización de recursos son razonables y confiables para la planificación minera.

ABSTRACT

Animón is located in the Western Cordillera of the Andes in Pasco, Peru, at 4,600 m above sea level, with a cold and dry climate. It presents a complex stratigraphy and hydrothermal mineralization, highlighting the Cristina vein as a significant polymetallic deposit. The geomorphology follows a southwest-northeast orientation, and the regional geology includes Miocene structures that favor polymetallic Pb-Zn-Cu-Ag mineralization. The deposit presents three main structures formed during the Andean orogeny.

The Animón Mining Unit has faced problems in the accurate estimation of resources due to the lack of an accurate 3D geological model, affecting decision making and mine planning.

The methodology for estimating mineral resources is described, in accordance with the guidelines of the Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum (CIM) and National Instrument 43-101. Initially, the database is compiled, the wireframe is built using Leapfrog Geo 3D, the data is selected to model the vein, the geometry of the vein is developed, finally adjusting the geometry using polylines. The exploratory data analysis (EDA), treatment of erratic highs (CAPPING), data compositing, and spatial continuity analysis using variography are developed. Likewise, the construction of the block model, analysis of the estimation parameters, validation of the estimate, assignment of density, and classification of mineral resources into measured, indicated and inferred categories are detailed. Finally, the reasonable prospects for eventual economic extraction are discussed and a mineral resource statement based on the Zinc Eq. cutoff is reported.

DEDICATORIA

A mi madre Yolanda, por ser mi mayor fuente de inspiración, por su apoyo incondicional y por enseñarme a perseverar en cada paso de mi vida. Este logro es, en gran parte, gracias a tu amor y sacrificio.

A mi papá, por ser guía moral y académica dentro de todos estos años.

A mis hermanos Angelo y Neil, por estar siempre a mi lado, brindándome su aliento, cariño y confianza. Gracias por creer en mí incluso cuando dudaba de mí misma.

Y a esa persona especial que ha dejado una huella profunda en mi vida y en mi trabajo. Tu guía, apoyo y sabiduría han sido esenciales para llegar hasta aquí, y siempre estaré agradecida por ello.

AGRADECIMIENTOS

A mi asesor de tesis, quiero expresarle mi más profunda gratitud por su orientación, paciencia y apoyo a lo largo de todo este proceso. Su experiencia y disposición para guiarme fueron esenciales para culminar este trabajo con éxito.

A una persona muy especial que ha sido un pilar fundamental durante esta etapa, gracias por tu amor, apoyo incondicional y por estar a mi lado en cada paso. Tu presencia y ayuda fueron clave no solo en el ámbito personal, sino también en mi crecimiento académico.

INDICE GENERAL

RESUMEN	2
ABSTRACT	4
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN	15
1.1. Situación Problemática	15
1.2. Formulación del Problema	15
1.2.1. <i>Problema General</i>	16
1.2.2. <i>Problema Específico</i>	16
1.3. Justificación de la Investigación	16
1.3.1. <i>Justificación Teórica</i>	16
1.3.2. <i>Justificación Práctica</i>	17
1.4. Objetivos de la Investigación	18
1.4.1. <i>Objetivo Principal</i>	18
1.4.2. <i>Objetivos Secundarios</i>	18
1.5. Variables	18
1.5.1. <i>Variable Independiente</i>	18
1.5.2. <i>Variable Dependiente</i>	18
1.6. Hipótesis de la Investigación	18
1.6.1. <i>Hipótesis General</i>	18
1.6.2. <i>Hipótesis Específicos</i>	19
1.7. Operacionalización de Variables	19
1.8. Matriz de Consistencia	20
CAPÍTULO II: METODOLOGÍA	22
2.1. Área de estudio	22
2.2. Tipo y diseño de investigación	22
2.3. Población y muestra	22

2.4. Procedimientos, técnicas e instrumentos de recolección de datos	23
2.5. Evaluación de recursos minerales	23
CAPÍTULO III: MARCO TEÓRICO	24
3.1. Bases teóricas.....	24
3.1.1. Contexto Geológico.....	25
3.1.2. Sistema Mineral	26
3.1.3. Criterios Geoestadísticos para la estimación de recursos	27
3.1.4. Tipo de Modelo Geológico	27
3.2. Marco conceptual.....	28
3.2.1. Anisotropía geométrica	28
3.2.2. Anisotropía zonal	29
3.2.3. Efecto Pepita (Nugget Effect).....	31
3.2.4. Estacionariedad (Stationarity)	31
3.2.5. Geoestadística (Geostatistics)	32
3.2.6. Inverso a la Distancia (IDW).....	32
3.2.7. kriging (Kriging).....	33
3.2.8. Meseta y Rango	34
3.2.9. Nearest-Neighbour (NN)	35
3.2.10. Recursos minerales inferidos.....	35
3.2.11. Recursos minerales indicados	36
3.2.12. Recursos minerales medidos.....	36
3.2.13. Semivariograma.....	37
3.2.14. Validación del Modelo Geológico.....	37
3.2.15. Validación en la estimación.....	37
3.2.16. Variable Regionalizada (V.R.).....	38
3.3. Vocabulario de Términos Geoestadísticos	38
CAPÍTULO IV: CARACTERÍSTICAS DEL ÁREA DE ESTUDIO	41

4.1. Ubicación, Límites y Extensión.	41
4.2. Accesibilidad	45
4.3. Clima	47
4.4. Fisiografía	47
CAPÍTULO V: MARCO GEOLÓGICO	49
5.1. Geomorfología	49
5.2. Geología Regional	53
5.2.1. <i>Estratigrafía</i>	58
5.2.1.1. <i>Formación Pariatambo (Ki-pt)</i>	58
5.2.1.2. <i>Formación Jumasha (Ks-ju)</i>	59
5.2.1.3. <i>Formación Celendín (Ks-ce)</i>	59
5.2.1.4. <i>Formación Casapalca (Kp-ca)</i>	60
5.2.2. <i>Rocas Intrusivas Regionales</i>	64
5.2.3. <i>Geología estructural regional</i>	66
5.3. Geología Local	72
MINA ANIMÓN	72
5.3.1. <i>Rocas Intrusivas</i>	72
5.3.2. <i>Geología estructural Local</i>	73
5.3.3. <i>Mineralización Animón</i>	77
5.3.3.1. <i>Área de la mina Animón</i>	82
Veta CRISTINA.....	82
CAPÍTULO VI: MODELAMIENTO GEOLÓGICO 3D.....	83
6.1. Modelo Genético del Yacimiento Animón	83
6.2. Modelamiento Geológico Empleando el Software Leapfrog Geo 3D.	87
6.2.1. <i>Elaboración del modelo de la estructura (veta)</i>	88
6.2.2. <i>Recepción de la Base de Datos</i>	88
6.2.3. <i>Recepción de la Topografía y Límites de Proyecto</i>	91

6.2.4. <i>Recepción de las Interpretaciones Geológicas en 2D</i>	92
6.2.5. <i>Elaboración e Interpretación Geológica en 3D usando Leapfrog</i> Geo.	94
CAPÍTULO VII: ESTIMACIÓN DE RECURSOS MINERALES	111
7.1. Introducción.....	111
7.2. Pasos para la estimación de recursos minerales.	111
7.2.1. <i>Base de datos de recursos.</i>	112
7.2.2. <i>Elaboración del modelo de la estructura en Leapfrog Geo.</i>	112
7.2.3. <i>Análisis Exploratorio De Datos (EDA).</i>	113
7.2.4. <i>Análisis y Tratamiento de Altos Erráticos (CAPPING).</i>	120
7.2.5. <i>Compositación</i>	129
7.2.6. <i>Análisis de continuidad espacial (variografía)</i>	130
7.2.7. <i>Modelo de Bloques</i>	139
7.2.8. <i>Análisis de los parámetros de estimación</i>	140
7.2.9. <i>Validación de la estimación</i>	141
7.2.10. <i>Asignación de la densidad.</i>	152
7.2.11. <i>Clasificación de Recursos Minerales.</i>	153
7.2.12. <i>Perspectivas Razonables para la Eventual Extracción</i> <i>Económica</i>	158
7.2.13. <i>Declaración de los Recursos Minerales</i>	159
7.2.14. <i>Resultados de Reconciliación - Modelo Largo Plazo versus</i> <i>Mineral Ejecutado</i>	160
CAPÍTULO VIII: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	163
8.1. Conclusiones.....	163
8.2. Recomendaciones	164
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	165

INDICE DE TABLAS

TABLA 1	OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES.	19
TABLA 2	MATRIZ DE CONSISTENCIA.	20
TABLA 3	RUTAS DE LIMA HACIA EL ÁREA DE ESTUDIO.	45
TABLA 4	UNIDADES LITOESTRATIGRÁFICAS DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	63
TABLA 5	COLUMNA ESTRATIGRÁFICA A DETALLE DE FM. CASAPALCA DE ROCAS INTRUSIVAS.....	65
TABLA 6	NIVELES DE MINERALIZACIÓN EN LA MINA ANIMÓN.	80
TABLA 7	DATOS COLLAR.	88
TABLA 8	DATOS SURVEY.	89
TABLA 9	DATOS ASSAY.....	89
TABLA 10	LÍMITES.	91
TABLA 11	RESUMEN DE LOS DATOS UTILIZADOS EN LA ESTIMACIÓN DE RECURSOS MINERALES.....	112
TABLA 12	ABREVIATURA Y NOMBRE DEL SÓLIDO DE LA VETA CRISTINA.	113
TABLA 13	MUESTRA LOS VALORES DE CAPPING.	128
TABLA 14	MUESTRA LA ESTADÍSTICA BÁSICA DATA CRUDA.	128
TABLA 15	MUESTRA LA ESTADÍSTICA DE LAS LEYES DE ZN, Pb, Ag Y Cu DESPUÉS DE CAPEAR.....	128
TABLA 16	MUESTRA LA ESTADÍSTICA DE LAS LEYES DE ZN, Pb, Ag Y Cu DESPUÉS DE COMPOSITAR.....	129
TABLA 17	PARÁMETROS DE MODELOS DE VARIOGRAMAS AJUSTADOS PARA LAS LEYES DE ZN, Pb, Ag Y Cu.	131
TABLA 18	PARÁMETROS DEL MODELO DE BLOQUE ANIMÓN SUBTERRÁNEO.	139
TABLA 19	PARÁMETROS DE ESTIMACIÓN DE LA VETA CRISTINA.	141
TABLA 20	COMPARACIÓN DE MEDIAS GLOBALES DE KRIGING ORDINARIO (OK), INVERSO A LA DISTANCIA (IDW) Y NEAREST NEIGHBOUR (NN) PARA LA VETA CRISTINA.	146
TABLA 21	PRECIOS DE LOS METALES USADOS PARA CALCULAR EL ZN EQ.....	158
TABLA 22	RECUPERACIÓN METALÚRGICAS USADAS PARA EL CÁLCULO DE ZN EQ.	158
TABLA 23	REPORTE DE RECURSOS MINERALES DE LA VETA CRISTINA.	159

INDICE DE FIGURAS

FIGURA.1	<i>UBICACIÓN DE LA MINA ANIMÓN EN PASCO, PERÚ.</i>	42
FIGURA.2	<i>ÁREA VETA CRISTINA EN LA MINA ANIMÓN EN PASCO, PERÚ.</i>	43
FIGURA.3	<i>ÁREA VETA CRISTINA EN LA MINA ANIMÓN Y PROYECTOS MINEROS, PERÚ.</i>	44
FIGURA.4	<i>RUTAS HACIA LA MINA ANIMÓN, SUROESTE DE PASCO, PERÚ.</i>	46
FIGURA.5	<i>FISIOGRAFÍA DE LA MINA ANIMÓN, SUROESTE DE PASCO, PERÚ.</i>	48
FIGURA.6	<i>GEOMORFOLOGÍA DE LA MINA ANIMÓN, SUROESTE DE PASCO, PERÚ.</i>	50
FIGURA.7	<i>GEOMORFOLOGÍA DE LA MINA ANIMÓN, SUROESTE DE PASCO, PERÚ.</i>	51
FIGURA.8	<i>GEOMORFOLOGÍA DE LA MINA ANIMÓN, SUROESTE DE PASCO, PERÚ.</i>	52
FIGURA.9	<i>MAPA METALOGÉNICO CON FALLAS REGIONALES Y DOMINIO TECTÓNICO, PERÚ.</i>	55
FIGURA.10	<i>MAPA METALOGÉNICO (INCLUYE ZONA ANIMÓN), PERÚ.</i>	56
FIGURA.11	<i>MAPA METALOGÉNICO CON PROYECTOS MINEROS, PERÚ.</i>	57
FIGURA.12	<i>ESTRUCTURA REGIONAL DE LA MINA ANIMÓN, SUROESTE DE PASCO, PERÚ.</i>	69
FIGURA.13	<i>MAPA REGIONAL DE LA MINA ANIMÓN, SUROESTE DE PASCO, PERÚ.</i>	70
FIGURA.14	<i>MAPA REGIONAL DE LA MINA ANIMÓN, SUROESTE DE PASCO, PERÚ.</i>	71
FIGURA.15	<i>MAPA GENÉTICO DE LA MINA ANIMÓN, SUROESTE DE PASCO, PERÚ.</i>	75
FIGURA.16	<i>ESTRUCTURA LOCAL DE LA MINA ANIMÓN, SUROESTE DE PASCO, PERÚ.</i>	76
FIGURA.17	<i>NIVELES DE MINERALIZACIÓN DE LA MINA ANIMÓN EN LA VETA CRISTINA</i>	81
FIGURA.18	<i>MAPA GENÉTICO DE LA MINA ANIMÓN, SUROESTE DE PASCO, PERÚ.</i>	84
FIGURA.19	<i>VISTA 3D DE LOS DATOS.</i>	91
FIGURA.20	<i>LÍMITES DEL PROYECTO.</i>	92
FIGURA.21	<i>INTERPRETACIÓN DE LA VETA CRISTINA EN BASE AL MAPEO DE CAMPO.</i>	93
FIGURA.22	<i>IMPORTAR LOS DRILLHOLES AL LEAPFROG GEO.</i>	94
FIGURA.23	<i>SE SELECCIONA LOS ARCHIVOS CSV DE LOS DATOS COLLAR, SURVEY Y ASSAY.</i>	95
FIGURA.24	<i>ICONOS PARA IMPORTAR IMÁGENES A UN PROYECTO DE LEAPFROG GEO.</i>	96
FIGURA.25	<i>GEORREFERENCIAR UNA IMAGEN EN LEAPFROG GEO.</i>	97
FIGURA.26	<i>IMPORTACIÓN DE SECCIONES AL LEAPFROG GEO.</i>	98
FIGURA.27	<i>CREAR EL ARCHIVO DE SELECCIÓN PARA LA VETA CRISTINA.</i>	99
FIGURA.28	<i>CREAR EL ARCHIVO PARA LA ELABORACIÓN DE LOS MODELOS.</i>	99
FIGURA.29	<i>ELABORACIÓN DE MODELOS DE ESTRUCTURAS UTILIZANDO ARCHIVOS DE SELECCIÓN.</i>	100
FIGURA.30	<i>GENERACIÓN DE LA SUPERFICIE DE CONTROL PARA LA GEOMETRÍA.</i>	101

FIGURA.31	<i>AJUSTE QUE SE HA HECHO USANDO POLILÍNEAS.</i>	102
FIGURA.32	<i>VISTA LONGITUDINAL DE LA VETA CRISTINA.</i>	103
FIGURA.33	<i>SECCIÓN AA', SE MUESTRA LA VALIDACIÓN VISUAL; HAY CORRESPONDENCIA DE LOS IMPACTOS CON LA GEOMETRÍA GENERADA.</i>	104
FIGURA.34	<i>SECCIÓN BB', SE MUESTRA LA VALIDACIÓN VISUAL; HAY CORRESPONDENCIA DE LOS IMPACTOS CON LA GEOMETRÍA GENERADA.</i>	105
FIGURA.35	<i>SECCIÓN CC', SE MUESTRA LA VALIDACIÓN VISUAL; HAY CORRESPONDENCIA DE LOS IMPACTOS CON LA GEOMETRÍA GENERADA.</i>	106
FIGURA.36	<i>SECCIÓN DD', SE MUESTRA LA VALIDACIÓN VISUAL; HAY CORRESPONDENCIA DE LOS IMPACTOS CON LA GEOMETRÍA GENERADA.</i>	107
FIGURA.37	<i>SECCIÓN EE', SE MUESTRA LA VALIDACIÓN VISUAL; HAY CORRESPONDENCIA DE LOS IMPACTOS CON LA GEOMETRÍA GENERADA.</i>	108
FIGURA.38	<i>SECCIÓN FF', SE MUESTRA LA VALIDACIÓN VISUAL; HAY CORRESPONDENCIA DE LOS IMPACTOS CON LA GEOMETRÍA GENERADA.</i>	109
FIGURA.39	<i>SECCIÓN GG', SE MUESTRA LA VALIDACIÓN VISUAL; HAY CORRESPONDENCIA DE LOS IMPACTOS CON LA GEOMETRÍA GENERADA.</i>	110
FIGURA.40	<i>HISTOGRAMA DE LAS LEYES DE ZN.</i>	114
FIGURA.41	<i>HISTOGRAMA DE LAS LEYES DE Pb.</i>	114
FIGURA.42	<i>HISTOGRAMA DE LAS LEYES DE Ag.</i>	115
FIGURA.43	<i>HISTOGRAMA DE LAS LEYES DE Cu.</i>	115
FIGURA.44	<i>CURVA DE PROBABILIDAD ACUMULADA DE LAS LEYES DE ZN.</i>	116
FIGURA.45	<i>CURVA DE PROBABILIDAD ACUMULADA DE LAS LEYES DE Pb.</i>	117
FIGURA.46	<i>CURVA DE PROBABILIDAD ACUMULADA DE LAS LEYES DE Ag.</i>	117
FIGURA.47	<i>CURVA DE PROBABILIDAD ACUMULADA DE LAS LEYES DE Cu.</i>	118
FIGURA.48	<i>BOX PLOT DE LAS LEYES DE ZN, Pb, Cu Y Ag.</i>	119
FIGURA.49	<i>ANÁLISIS PARA ENCONTRAR EL VALOR DEL ALTO ERRÁTICO PARA EL ZN.</i>	121
FIGURA.50	<i>ANÁLISIS PARA ENCONTRAR EL VALOR DEL ALTO ERRÁTICO PARA EL Pb.</i>	123
FIGURA.51	<i>ANÁLISIS PARA ENCONTRAR EL VALOR DEL ALTO ERRÁTICO PARA LA Ag.</i>	125
FIGURA.52	<i>ANÁLISIS PARA ENCONTRAR EL VALOR DEL ALTO ERRÁTICO PARA EL Cu.</i>	127
FIGURA.53	<i>GRÁFICA DE LOS VARIOGRAMAS PARA LA LEY DE ZN.</i>	132
FIGURA.54	<i>GRÁFICA DE LOS VARIOGRAMAS PARA LA LEY DE Pb.</i>	134
FIGURA.55	<i>GRÁFICA DE LOS VARIOGRAMAS PARA LA LEY DE Ag.</i>	136

FIGURA.56	<i>GRÁFICA DE LOS VARIOGRAMAS PARA LA LEY DE CU.</i>	138
FIGURA.57	<i>MUESTRA LA VISTA 3D DE LOS LÍMITES DEL MODELO.</i>	139
FIGURA.58	<i>VALIDACIÓN VISUAL DEL ELEMENTO ZN, VETA CRISTINA.</i>	142
FIGURA.59	<i>VALIDACIÓN VISUAL DEL ELEMENTO Pb, VETA CRISTINA.</i>	143
FIGURA.60	<i>VALIDACIÓN VISUAL DEL ELEMENTO AG, VETA CRISTINA.</i>	143
FIGURA.61	<i>VALIDACIÓN VISUAL DEL ELEMENTO CU, VETA CRISTINA.</i>	143
FIGURA.62	<i>VALIDACIÓN SWATH PLOT EN DIRECCIÓN ESTE, NORTE Y ELEVACIÓN, ELEMENTO ZN.</i>	148
FIGURA.63	<i>VALIDACIÓN SWATH PLOT EN DIRECCIÓN ESTE, NORTE Y ELEVACIÓN, ELEMENTO Pb.</i>	149
FIGURA.64	<i>VALIDACIÓN SWATH PLOT EN DIRECCIÓN ESTE, NORTE Y ELEVACIÓN, ELEMENTO AG.</i>	150
FIGURA.65	<i>VALIDACIÓN SWATH PLOT EN DIRECCIÓN ESTE, NORTE Y ELEVACIÓN, ELEMENTO CU.</i>	151
FIGURA.66	<i>REGRESIÓN MULTILINEAL DE LA DENSIDAD VS. LEYES DE ZN, Pb, AG, CU Y Fe.</i>	152
FIGURA.67	<i>RANGOS DEL VARIOGRAMA DEL ZN USADOS PARA LA CLASIFICACIÓN DE RECURSOS.</i>	154
FIGURA.68	<i>VISTA EN SECCIÓN DEL MODELO DE RECURSOS MINERALES ANTES DEL SUAVIZADO.</i>	156
FIGURA.69	<i>VISTA EN SECCIÓN DEL MODELO DE RECURSOS MINERALES DESPUÉS DEL SUAVIZADO.</i>	157
FIGURA.70	<i>GRÁFICO DE BARRAS COMPARACIÓN DE TONELAJE Y LEY DE ZN.</i>	161
FIGURA.71	<i>GRÁFICO DE LÍNEAS DE VARIACIÓN PORCENTUAL TONELAJE Y LEY DE ZN</i>	162

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

1.1. Situación Problemática

La Unidad Minera Animón, ubicada en Pasco, presenta dificultades para cuantificar con exactitud sus recursos minerales, principalmente porque aún no se cuenta con un modelo geológico tridimensional (3D) suficientemente detallado de la veta Cristina. La ausencia de este tipo de modelo puede conducir tanto a subestimar como a sobrestimar los recursos disponibles en diferentes horizontes de tiempo, pese a que los sondeos han evidenciado intersecciones con leyes elevadas de zinc, plomo, plata y cobre. En conjunto, estos resultados indican que el yacimiento posee un potencial económico importante, siempre que se logre caracterizar de manera adecuada el cuerpo mineralizado.

1.2. Formulación del Problema

La estimación confiable de los recursos minerales constituye un elemento clave para la gestión eficiente de una operación minera, pues permite definir el potencial económico del yacimiento y sustentar la planificación de las labores de explotación. En la Unidad Minera de Animón (Pasco), la veta Cristina presenta limitaciones significativas asociadas a un modelamiento geológico 3D todavía insuficiente. La geometría y la continuidad tridimensional de la veta no se encuentran plenamente definidas, lo que introduce un nivel de incertidumbre que repercute de manera directa en la programación y diseño de la explotación. El problema se centra, por tanto, en la necesidad de incrementar el detalle y la precisión del modelo geológico tridimensional a fin de mejorar la estimación de los recursos minerales en la veta Cristina. De manera adicional, resulta fundamental identificar las zonas de enriquecimiento de zinc, plomo,

plata y cobre dentro de la estructura vetiforme, ya que ello permite comprender con mayor claridad la distribución de las leyes y refuerza la pertinencia de adoptar un enfoque tridimensional en la evaluación de recursos.

1.2.1. Problema General

- ¿Cómo influye la optimización del modelamiento geológico tridimensional (3D) en la estimación confiable de los recursos minerales de la veta Cristina en la Unidad Minera de Animón, ubicada en la región Pasco?

1.2.2. Problema Específico

- ¿Cómo se puede determinar la adecuada interpretación geológica en el modelamiento geológico 3D?
- ¿Qué metodologías y técnicas pueden ser implementadas para optimizar el modelamiento geológico y superar las deficiencias identificadas?

1.3. Justificación de la Investigación

1.3.1. Justificación Teórica

El estudio del modelamiento geológico tridimensional y de la estimación de recursos minerales en la veta Cristina de la Unidad Minera Animón (Pasco) surge como una respuesta a las carencias identificadas en las algunas prácticas actuales de evaluación de yacimientos. La aplicación de tecnologías emergentes en la representación espacial de la geología se ha convertido en una necesidad imperante para la industria minera moderna. En este contexto, autores como Matheron (2008) han destacado la importancia de comprender las variables regionalizadas y su

estimación, sentando las bases teóricas para la aplicación efectiva de la geoestadística en la evaluación de recursos minerales.

La realización de una estimación precisa de los recursos minerales es esencial para la planificación y operación minera efectiva, ya que afecta directamente la toma de decisiones estratégicas en la explotación de yacimientos. Para Matheron (2008), la precisión en la estimación de recursos depende en gran medida de la calidad del modelamiento geológico, ya que este proporciona la base para la extrapolación y predicción de la distribución de los recursos en el subsuelo. Por lo tanto, la investigación en este campo es fundamental para mejorar la confiabilidad de las estimaciones y garantizar una planificación minera óptima.

1.3.2. Justificación Práctica

La optimización del modelamiento geológico es esencial para mejorar la toma de decisiones en la Unidad Minera Animón. Una representación más precisa de la veta Cristina permitirá estimaciones de recursos y reservas minerales más confiables, facilitando la planificación minera eficiente y confiable. Esto se traduce en beneficios económicos y operativos tangibles para la unidad minera, ya que la optimización del modelamiento geológico permitirá una explotación más efectiva y sostenible de los recursos minerales. Además, la mejora en la precisión contribuirá a la mitigación de riesgos asociados con la extracción minera, promoviendo prácticas responsables y sostenibles en la industria minera de la región de Pasco.

1.4. Objetivos de la Investigación

1.4.1. Objetivo Principal

- Determinar la influencia de la optimización del modelamiento geológico tridimensional (3D) en la estimación confiable de los recursos minerales de la veta Cristina en la Unidad Minera de Animón, ubicada en la región Pasco.

1.4.2. Objetivos Secundarios

- Determinar la adecuada interpretación geológica en el modelamiento geológico 3D.
- Determinar qué metodologías y técnicas pueden ser implementadas para optimizar el modelamiento geológico y superar las deficiencias identificadas.

1.5. Variables

1.5.1. Variable Independiente

X1: Optimización del modelamiento geológico 3D.

1.5.2. Variable Dependiente

Y1: Confiabilidad y precisión en la estimación de recursos minerales de la veta Cristina.

1.6. Hipótesis de la Investigación

1.6.1. Hipótesis General

- Implementación de un óptimo modelamiento geológico tridimensional influirá eficazmente en la estimación confiable de recursos minerales de la veta Cristina en la Unidad Minera de Animón, ubicada en la región de Pasco.

1.6.2. Hipótesis Específicos

- La adecuada interpretación geológica permite optimizar la precisión del modelamiento geológico tridimensional en la representación de estructuras y distribución de los recursos minerales.
- La implementación de metodologías y técnicas superan deficiencias identificadas y optimizan el modelamiento geológico.

1.7. Operacionalización de Variables

Tabla 1

Operacionalización de variables.

VARIABLE	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	DIMENSIÓN	INDICADOR
Nivel de optimización del modelamiento geológico 3D	El nivel de optimización se refiere al grado de mejoramiento del modelamiento geológico tridimensional para garantizar una representación precisa del subsuelo. (Mallet, J.L., 2004).	Grado de resolución espacial del modelo, consistencia con los datos de perforación, inclusión de características geológicas clave.	Proceso de Optimización del modelo	- Visualización e Interpretación 3D. - Geometría de la Veta Cristina.
Confiabilidad y precisión en la estimación de recursos minerales de la veta Cristina	La confiabilidad y precisión en las estimaciones de recursos minerales se refiere a la capacidad del modelo geológico para proporcionar resultados cercanos a los valores reales de los recursos. (Agterberg, F.P., 2003).	Comparación de las estimaciones con los datos reales de perforación, análisis de la variabilidad y continuidad en las estimaciones, evaluación de la coherencia con la geología conocida en la región.	Resultados de la Estimación	- Confiabilidad en el cálculo de recursos minerales.

Nota: Describe la Operacionalización de Variables el proceso de definir cómo se va a medir y observar las variables.

1.8. Matriz de Consistencia

La estimación de recursos minerales en la unidad minera se venía realizando mediante métodos tradicionales considerando los parámetros geométricos de longitud, ancho y altura de la veta. Para optimizar este proceso y mejorar la precisión de la planificación, he propuesto la implementación de un modelo geológico tridimensional (3D) detallado de la veta, utilizando software especializado. Este modelo permite definir con mayor exactitud los límites y geometría del cuerpo mineralizado. Posteriormente, se realizó un análisis exhaustivo de los datos mediante técnicas geoestadísticas, como son; el análisis exploratorio de datos (EDA), la identificación y tratamiento de valores atípicos, la elaboración de variogramas y la estimación de bloques mediante el método de kriging Ordinario. Esta metodología no solo optimiza la cubicación del mineral, sino que también permite dar confiabilidad en la ejecución de los planes de minado tanto de largo como corto plazo.

Tabla 2

Matriz de Consistencia.

MODELAMIENTO GEOLÓGICO 3D Y ESTIMACIÓN DE RECURSOS MINERALES DE LA VETA CRISTINA EN LA UNIDAD MINERA ANIMÓN-PASCO

DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPOTESIS	VARIABLES	INDICADORES	DISEÑO METODOLÓGICO
PROBLEMA GENERAL	OBJETIVO GENERAL	HIPÓTESIS GENERAL	VARIABLE INDEPEDIENTE	INDICADORES DE X	TIPO DE INVESTIGACIÓN
¿Cómo influye la optimización del modelamiento geológico tridimensional (3D) en la estimación confiable de los recursos minerales de la veta Cristina en la Unidad Minera de Animón, ubicada en la región de Pasco?	Determinar la influencia de la optimización del modelamiento geológico tridimensional (3D) en la estimación confiable de los recursos minerales de la veta Cristina en la Unidad Minera de Animón, ubicada en la región de Pasco.	Implementación de un óptimo modelamiento geológico 3D influirá eficazmente en la estimación confiable de recursos minerales de la veta Cristina en la Unidad Minera de Animón, ubicada en la región de Pasco.	X: Optimización del modelamiento geológico 3D.	X1: Visualización e Interpretación 3D. X2: Geometría de la Veta Cristina	Exploratorio y Descriptivo
					NIVEL DE INVESTIGACIÓN
					Descriptivo
PROBLEMAS ESPECÍFICOS	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	HIPÓTESIS ESPECÍFICA	VARIABLE DEPENDIENTE	INDICADORES DE Y	DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN
PE1: ¿Cómo se puede determinar la adecuada interpretación geológica en el modelamiento geológico 3D?	OE1: Determinar la adecuada interpretación geológica en el modelamiento geológico 3D.	HE1: La adecuada interpretación geológica permite optimizar la precisión del modelamiento geológico 3D en la representación de estructuras y recursos minerales.	Y: Confiabilidad y precisión en la estimación de recursos minerales de la veta Cristina.	Y: Confiabilidad en el cálculo de recursos minerales.	Experimental
PE2: ¿Qué metodologías y técnicas pueden ser implementadas para optimizar el modelamiento geológico y superar las deficiencias identificadas?	OE2: Determinar qué metodologías y técnicas pueden ser implementadas para optimizar el modelamiento geológico y superar las deficiencias identificadas.	HE2: La implementación de metodologías y técnicas superan deficiencias identificadas y optimizan el modelamiento geológico.			POBLACIÓN
					Recursos y datos geológicos de la Unidad Minera Animón en Pasco
					MUESTRA
					Datos de perforaciones diamantinas y canales de la Veta Cristina de la Unidad Minera de Animón, ubicada en la región de Pasco

CAPÍTULO II: METODOLOGÍA

2.1. Área de estudio

Se localiza en la Unidad Minera Animón en Pasco, específicamente en la Veta Cristina. Esta área seleccionada es debido a su relevancia en la exploración y explotación de recursos minerales, y la mejora del modelamiento geológico 3D tendrá un impacto directo en la precisión de la estimación de recursos en este yacimiento.

2.2. Tipo y diseño de investigación

La tesis adopta un enfoque exploratorio y descriptivo, siendo exploratorio para identificar deficiencias en el modelamiento geológico y descriptivo para caracterizar detalladamente las variables geológicas. Además, se emplea un diseño experimental para validar la efectividad de las mejoras propuestas, comparando métodos de optimización y estimación.

2.3. Población y muestra

La población objetivo está constituida por toda la información geológica y de exploración disponible de la veta Cristina en la Unidad Minera de Animón. La muestra consistirá en una selección representativa de perforaciones diamantinas y canales de muestreo. La elección de la muestra se realizará de manera estratégica para abordar las limitaciones identificadas en el modelamiento actual y garantizar la validez de los resultados.

2.4. Procedimientos, técnicas e instrumentos de recolección de datos

Los procedimientos incluirán la revisión exhaustiva de datos geológicos existentes, como perforaciones diamantinas y canales de muestreo. Las técnicas aplicadas abarcarán desde el análisis de contactos hasta la interpolación de leyes mediante métodos geoestadísticos como el kriging ordinario. Los instrumentos de recolección de datos comprenderán herramientas de software especializado, como Leapfrog Geo 3D para el modelamiento y técnicas geoestadísticas para el análisis espacial.

2.5. Evaluación de recursos minerales

El proceso comienza con la obtención de muestras de sondajes diamantinos y canales de muestreo, luego se realizará el modelamiento e interpretación geológica 3D usando el software Leapfrog con esto se va a definir la geometría de la veta. Posteriormente, se realizará el análisis exploratorio de datos (EDA), luego se realizará el análisis de los altos erráticos o outliers; el proceso continúa con la composición de datos, análisis variográfico y modelo de bloques, estos pasos nos permitirán realizar la estimación de recursos, y así efectuar la validación de la estimación, a continuación, se asigna la densidad para clasificar los recursos minerales y finalmente se calcula los recursos minerales.

CAPÍTULO III: MARCO TEÓRICO

3.1. Bases teóricas

La zona de estudio está posicionada en la unidad morfoestructural del Perú denominada Cordillera Occidental. Esta cordillera tiene orientación Noroeste-Sureste, es decir que cambia su disposición hacia el oeste en las deflexiones del Abancay y Huancabamba. Cerro de Pasco está en la parte central de la Cordillera Occidental y forma parte del bloque andino logrando alcanzar su altura durante el Terciario tardío y cuaternario, con un ancho aproximadamente de 140 km.

Jacay Huarache et al. (2000) en su artículo *Evolución tectono-sedimentaria de la margen andina: el Cretáceo superior de los Andes del Perú Central y Septentrional*, explicó a las “Capas roja” de la Formación Casapalca como una serie sedimentaria roja, que sobreyace a la Formación Celendín; de grano grueso (sedimentos detríticos y macizos) y estratos crecientes, sus afloramientos son ampliamente expuestos por delante de la faja plegada de la Cordillera Occidental.

En el área de estudio aflora un conjunto diverso de litologías que incluye margas rojas a gris verdosas, areniscas, conglomerados polimícticos y calizas con intercalaciones margosas correspondientes a la Formación Casapalca del Paleógeno, las cuales están instruidas por cuerpos de composición granodiorítica y diorítica. Sobre estas unidades se disponen depósitos volcánicos del Grupo Calipuy, integrados por secuencias piroclásticas de granulometría gruesa, tobas y derrames andesíticos de edad neógena. La mineralización es de tipo hidrotermal y se presenta en vetas tabulares con rumbo dominante Este-Oeste y buzamiento de 70°-75° hacia el norte, que cortan la laguna Naticocha por debajo del nivel freático, con espesores medios del orden de 1,80 a 2 m y

una longitud aproximada de 950 m. Las principales asociaciones de alteración son clorítica, argílica, silíceas y, en menor proporción, sericitica. Los minerales de mena más representativos son esfalerita, galena y calcopirita, acompañados por una ganga compuesta por cuarzo, pirita, rodocrosita, siderita y fluorita, de acuerdo con lo descrito por John, Luis y Manuel en la sección de minería económica de la Carta Geológica de los cuadrángulos de Ambo, Cerro de Pasco y Ondores.

3.1.1. Contexto Geológico

Jacay et al. (2000), en un estudio publicado en el Boletín de la Sociedad Geológica del Perú sobre el estilo estructural de la Cordillera Occidental en los Andes del Perú central, señalan que la evolución tectónica de la zona favoreció el desarrollo de la formación Casapalca en el sector sur. En determinadas áreas se reconoce un estilo estructural de carácter transpresivo, expresado en pliegues y fallas inversas, que a su vez propició el emplazamiento de stocks graníticos, como ocurre en la mina Chungar. La propagación de estas fallas inversas hacia niveles superiores deformó las margas lutáceas de la Formación Celendín y generó el arrastre de escamas tectónicas de las formaciones Jumasha o Pariatambo, fenómeno que se observa, por ejemplo, en las minas Ragra.

Los estudios de Carpio, Torre y Fuentes (2018) en el *Boletín Serie B: Geología Económica Prospección de Recursos de Rocas y Minerales Industriales en la Región Pasco*, revelaron la presencia de diversas formaciones desde el Cretácico superior hasta el Plioceno en la región de Pasco. Destacan la Formación Casapalca (Pocobamba) con miembros como Cacuán y Shuco, así como la Formación La Calera, ambas con relevancia en la zona de Huayllay. Asimismo, el Grupo Calipuy y la Formación Huayllay

son relevantes, siendo esta última una destacada fuente de ignimbritas. En conclusión, la región muestra una compleja estratigrafía que influye en la distribución y composición de los recursos minerales, como se evidencia en la veta Cristina de la mina Chungar.

3.1.2. Sistema Mineral

Matta y Luis (2013), en un informe técnico sobre la mina Islay-Chungar, en el departamento de Pasco, caracterizan el yacimiento como un depósito polimetálico de vetas y cuerpos, con mineralizaciones de Ag, Pb, Zn y Cu alojadas en margas rojas a gris verdosas, areniscas, calcarenitas y conglomerados, sobre las cuales se reconoce una alteración hidrotermal de tipo variado. El estudio resalta la presencia de rocas intrusivas vinculadas al emplazamiento del depósito y señala que la explotación actual se sitúa en torno a las 2000 toneladas por día. Asimismo, los autores plantean la posible existencia de cuerpos mineralizados análogos en otras zonas del yacimiento, controlados por factores estructurales y litológicos.

En su tesis sobre los controles de mineralización del yacimiento filoniano argentífero Islay-Chungar en la región de Pasco, Matta y Luis (2013) profundizan en los factores que gobiernan la mineralización del depósito Islay-Chungar. Señalan que se trata de un sistema polimetálico de vetas y cuerpos con contenidos de Zn, Pb, Ag y Cu, alojados en margas rojas a gris verdosas, areniscas, conglomerados polimícticos y calizas, todas ellas pertenecientes al Grupo Casapalca. Estas unidades se encuentran afectadas por una alteración hidrotermal de tipo argílico, silíceo y propilítico, que constituye un elemento clave en el control de la mineralización.

Finalmente, el sistema mineral de la zona de la mina Chungar en la Unidad Minera Animón presenta una mineralización polimetálica que abarca más de 50 vetas con

contenido principalmente de esfalerita, galena y sulfosales menores, junto con cuarzo, carbonatos variables y pirita como la ganga predominante. La mineralización se ha caracterizado en cinco tipos distintos, que varían en composición y estilo mineral. En las vetas se han identificado una mineralización diseminada a masiva de esfalerita y galena con tetraedrita menor, con una extensión considerable definida principalmente por perforación diamantina y desarrollo subterráneo.

3.1.3. Criterios Geoestadísticos para la estimación de recursos

Alfaro (2006), en su obra sobre estimación de recursos mineros, propone un conjunto integrado de criterios geoestadísticos y de modelamiento geológico orientados a la cuantificación de recursos. Entre las etapas que plantea se encuentran la definición de dominios geológicos representativos, la utilización de técnicas de interpretación espacial como el kriging, el modelado tridimensional de la distribución de leyes y la construcción de modelos geológicos mediante herramientas 3D como el Leapfrog. Asimismo, el autor aborda la evaluación de la incertidumbre asociada a las estimaciones mediante métodos de simulación estocástica y resalta la relevancia de la validación cruzada y de la integración de distintas fuentes de información para incrementar la precisión y la confiabilidad de los resultados de recursos minerales.

3.1.4. Tipo de Modelo Geológico

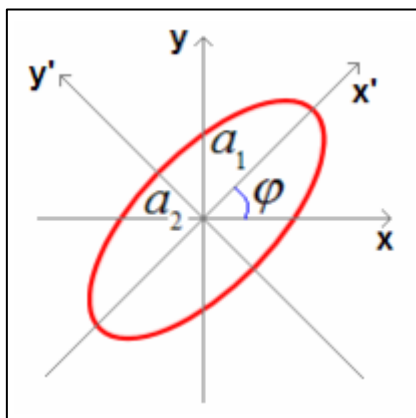
Royer, Mejía, Caumon y Collon (2015), en su texto “Geomodelación 3D y estimación de recursos minerales: una introducción”, presentan de manera sistemática la aplicación de la geomodelación en la industria minera, poniendo énfasis en el empleo de modelos tridimensionales para la exploración y evaluación de recursos. El propósito central de la obra es introducir los conceptos y métodos vinculados a la geomodelación

3D, con especial atención al desarrollo de modelos geológicos en Leapfrog a partir de información geológica, geofísica y geoquímica. La metodología descrita abarca desde la recopilación de datos de campo hasta la construcción y validación de modelos 3D en software especializado. Mediante estudios de caso y ejemplos prácticos, los autores muestran cómo estas herramientas permiten representar con mayor realismo la geometría de las unidades geológicas y la distribución de los recursos, apoyando la toma de decisiones en la industria minera. En clave para optimizar la exploración y evaluación de recursos y para mejorar la comprensión de la geología del subsuelo.

3.2. Marco conceptual

3.2.1. Anisotropía geométrica

De acuerdo con Alfaro (2006), se denomina anisotropía geométrica al caso en el que los variogramas calculados en distintas direcciones pueden transformarse, mediante un cambio lineal de coordenadas, en un variograma isotrópico. En términos prácticos, esta situación se reconoce cuando los variogramas presentan una misma meseta, pero difieren en el alcance según la dirección de análisis.

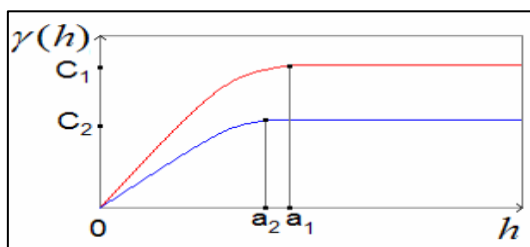


Nota: Estimación de recursos mineros (p. 87), por Marco Alfaro, 2006. Depto. Ingeniería en Minas, Universidad de Santiago, 2006.

Gráficamente, la estructura de continuidad espacial deja de representarse como un círculo (caso isotrópico) y pasa a describirse como una elipse. Si se define $k = \frac{a_1}{a_2} > 1$ como la relación entre el alcance mayor y el menor, las transformaciones de coordenadas permiten alinear los ejes de la elipse con las direcciones principales de continuidad. En este contexto, ϕ representa el ángulo entre el eje original x y el eje principal x' , mientras que los alcances a_1 y a_2 describen la extensión de la correlación espacial en cada dirección. Cuando el variograma es lineal pero presenta pendientes distintas según la orientación, el tratamiento es análogo y se recurre a una “elipse de pendientes” o de inversos de pendientes (Alfaro, 2006).

3.2.2. Anisotropía zonal

Alfaro (2007) indica que la anisotropía zonal corresponde a situaciones en las que las diferencias direccionales del variograma no pueden corregirse únicamente mediante una transformación lineal sencilla de coordenadas. En estos casos, el comportamiento espacial de la variable se explica mejor como la superposición de varias estructuras con alcances y direcciones propias, lo que obliga a utilizar modelos anidados o imbricados para representar la variabilidad.



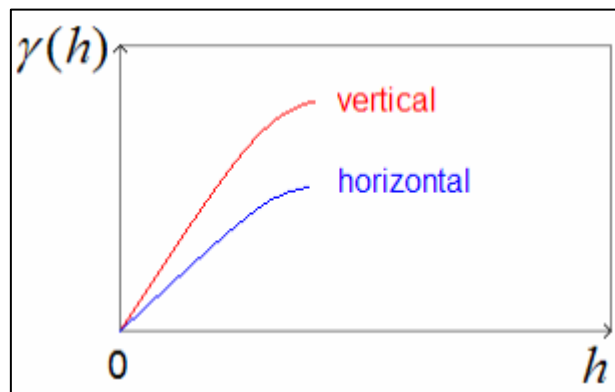
Nota: Estimación de recursos mineros (p. 89), por Marco Alfaro, 2006. Depto. Ingeniería en Minas, Universidad de Santiago, 2006.

Se define entonces el modelo de anisotropía zonal como un modelo anidado (o imbricado), es decir:

$$\gamma(h) = \gamma_1(h_1) + \gamma_2(h_2) + \dots$$

En que cada constituyente puede representar su propia anisotropía.

Por ejemplo, en un yacimiento sedimentario el variograma vertical puede ser muy diferente al variograma horizontal:



Nota: Estimación de recursos mineros (p. 90), por Marco Alfaro, 2006. Depto. Ingeniería en Minas, Universidad de Santiago, 2006.

Se puede utilizar en este caso un modelo del tipo:

$$\gamma(h_x, h_y, h_z) = \gamma_1(|\vec{h}|) + \gamma_2(|\vec{h}|)$$

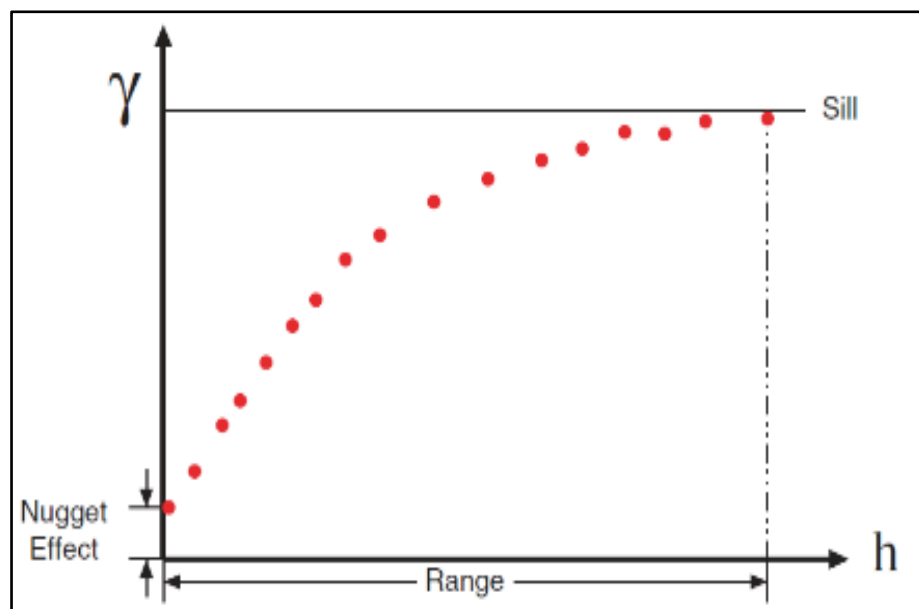
En que:

$$(|\vec{h}|) = \sqrt{h_x^2 + h_y^2 + h_z^2}$$

Y h_z corresponde a la dirección vertical.

3.2.3. Efecto Pepita (Nugget Effect)

Para Henao (2009) en su libro Introducción a la Geoestadística: Teoría y Aplicación, denotó por C_0 y representa una discontinuidad puntual del semivariograma en el origen. Puede ser debido a errores de medición en la variable o a la escala de la misma. En algunas ocasiones puede ser indicativo de que parte de la estructura espacial se concentra a distancias inferiores a las observadas.



Nota: Mineral Resource Estimation (p. 99), por Rossi, M. E., & Haus, R., 2017, Rossi, M. E., & Deutsch, C. V. (2014). Mineral Resource Estimation. Dordrecht, Heidelberg, Nueva York, Londres: Springer.

3.2.4. Estacionariedad (Stationarity)

Para Guillermo Pareja (2008), un dominio es estacionario cuando las leyes dentro de dicho dominio son homogéneas y no varían con la ubicación dentro de dicho dominio (es decir, que no hayan “trends”).

3.2.5. Geoestadística (Geostatistics)

Díaz (2002) señala que el término geoestadística fue introducido por Georges Matheron en la década de 1960, quien la definió como “la aplicación del formalismo de las funciones aleatorias al reconocimiento y estimación de fenómenos naturales” (Matheron, 1962).

En la práctica, la geoestadística se considera una rama de la estadística aplicada orientada a describir y modelar la variabilidad espacial y/o temporal de variables medidas en ciencias de la Tierra. Entre sus aplicaciones más frecuentes se incluyen la estimación de leyes de metales, la caracterización de porosidades y la evaluación de concentraciones de contaminantes, Aunque el prefijo geo- la vincula con la geología, su desarrollo inicial estuvo fuertemente ligado a la industria minera (Díaz, 2002).

3.2.6. Inverso a la Distancia (IDW)

Guillermo (2008) describe el método del Inverso de la Distancia (IDW) como un interpolador en el que cada muestra contribuye a la estimación con un peso inversamente proporcional a su distancia al punto o bloque a estimar, elevada a una potencia determinada. De esta forma, las muestras más cercanas ejercen mayor influencia sobre el valor estimado.

Entre sus principales ventajas destacan su sencillez conceptual y su fácil implementación, además de que introduce explícitamente la idea de que la correlación disminuye con la distancia y puede adaptarse para considerar anisotropía, agrupamiento de datos (clustering) y cambios de soporte. Sin

embargo, la estructura de correlación espacial que utiliza es arbitraria, no garantiza la minimización de la varianza del error y, cuando se requiere un tratamiento riguroso de la anisotropía o del cambio de soporte, es necesario complementarlo con un análisis variográfico (Guillermo, 2008).

3.2.7. *krigeado (Kriging)*

Díaz (2002) define el kriging como el “mejor estimador lineal insesgado” dentro de la clase de estimadores lineales, tanto para la estimación puntual como para el promedio de un bloque. Se trata de un método de estimación local que utiliza la información contenida en el variograma o en la covarianza de la variable regionalizada, es decir, en los momentos de segundo orden de la función aleatoria, los cuales pueden inferirse a la partir de los datos disponibles.

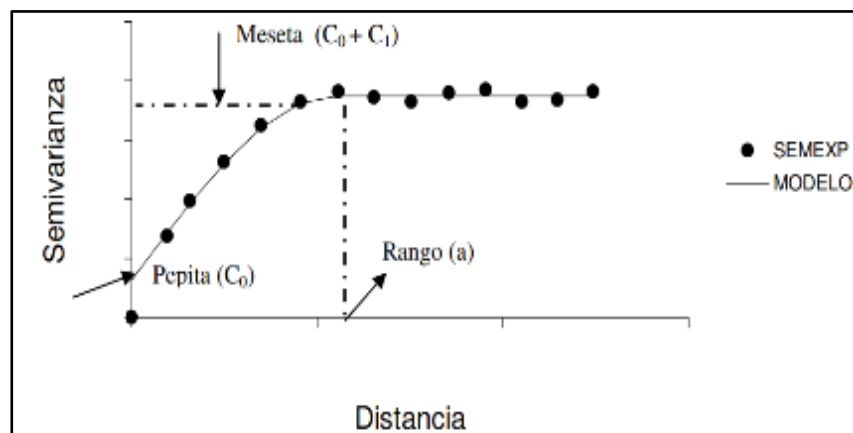
En la práctica, se emplean variantes como el Ordinary Kriging (OK) y el Simple Kriging (SK). El OK suele ser más apropiado en zonas con buena densidad de información y dominios que pueden asumirse localmente estacionarios, mientras que el SK puede resultar útil en áreas con menor cantidad de datos, aunque tiende a producir modelos más suavizados.

En síntesis, el kriging se considera un estimador robusto porque asigna los pesos a cada muestra teniendo en cuenta la correlación espacial definida por el variograma, la disposición relativa de los datos entre sí, su ubicación respecto al bloque a estimar y el tamaño de dicho bloque (Díaz, 2002; Guillermo, 2008).

3.2.8. Meseta y Rango

Henao (2009) señala que la meseta del semivariograma corresponde al valor límite que alcanza la semivarianza cuando la distancia h tiende a infinito; es decir, representa la cota superior de la variabilidad que puede describir el modelo. Cuando el semivariograma presenta una meseta finita, la variable cumple con la hipótesis de estacionariedad fuerte; si no existe meseta definida, solo se satisface la hipótesis intrínseca. Habitualmente, la meseta se representa por C o por $C + C_0$ cuando se considera explícitamente el efecto pepita.

En cuanto al rango, se interpreta como la distancia a partir de la cual dos observaciones dejan de mostrar correlación apreciable y pueden asumirse prácticamente independientes. El rango delimita, por tanto, la zona de influencia espacial de cada muestra. En algunos modelos, el semivariograma no alcanza la meseta en una distancia finita, por lo que se recurre al concepto de rango efectivo, definido como la distancia donde la semivarianza alcanza aproximadamente el 95% de la meseta (Henao, 2009).



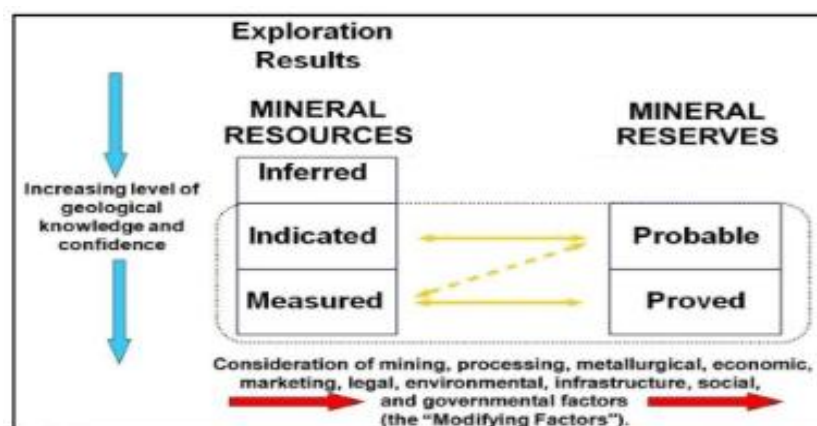
Nota: Introducción a la Geoestadística-Teoría y Aplicación (p. 24), por Giraldo Henao R., 2009. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia.

3.2.9. Nearest-Neighbour (NN)

Guillermo (2008) señala que el método del vecino más cercano (Nearest-Neighbour, NN) asigna a cada bloque la ley del compósito ubicado a menor distancia de su centro. Es un interpolador sencillo y rápido de aplicar, pero cada bloque se estima con una sola muestra, no considera el cambio de soporte, genera resultados discontinuos entre bloques y no incorpora explícitamente la correlación espacial entre datos, lo que limita su confiabilidad para estimar recursos minerales.

3.2.10. Recursos minerales inferidos

Según CRIRSCO (2019, p. 7.4), un Recurso Mineral Inferido es la porción del recurso cuya cantidad y ley o calidad se estima a partir de información geológica y de muestreo aún limitada; la evidencia permite sugerir, pero no confirmar, la continuidad geológica y de las leyes. Por ello, constituye la categoría con menor nivel de confianza, no puede declararse reserva ni integrarse a ella, y se espera que, con exploración adicional, una parte importante pueda reclasificarse como Recurso Mineral Indicado.



Nota: CRIRSCO (Committee for Mineral Reserves International Reporting Standards). (2019). International reporting template for the public reporting of exploration targets, exploration

results, mineral resources and mineral reserves (November 2019) (p. 14). International Council on Mining & Metals (ICMM).

3.2.11. Recursos minerales indicados

CRIRSCO (2019, secc. 7.8), un Recurso Mineral Indicado es aquella parte del recurso cuya cantidad, ley o calidad, densidad, forma y características físicas se han estimado con un nivel de confianza suficiente como para permitir la aplicación de Factores Modificadores y respaldar una planificación minera preliminar, así como una evaluación inicial de la viabilidad económica del depósito.

Aunque el grado de certeza es menor que en el caso de un Recurso Mineral Medido, los recursos indicados pueden convertirse en Reservas Minerales Probadas cuando los estudios técnicos y económicos lo justifican (CRIRSCO, 2019).

3.2.12. Recursos minerales medidos

Para CRIRSCO (2019, secc. 7.10) define el Recurso Mineral Medido a la fracción del recurso cuya cantidad, ley o calidad, densidad y características geométricas y físicas se conocen con el mayor nivel de confianza, suficiente para aplicar Factores Modificadores en una planificación minera detallada y en la evaluación definitiva de la viabilidad económica. Debido a este alto grado de certidumbre, pueden reclasificarse como Reserva Mineral Probada o, en algunos casos, como Reserva Mineral Probable, según los resultados de los estudios técnicos y económicos.

3.2.13. Semivariograma

Para Díaz (2002), el semivariograma es la herramienta central de la geoestadística. Cuando una variable regionalizada cumple la Hipótesis Intrínseca, es posible definir la función de semivarianza $\gamma(h)$, la cual describe la evolución de la dispersión de la variable en función del vector de separación h . En términos sencillos, el semivariograma relaciona el valor de la semivarianza con el *lag* h , que se expresa la distancia y la dirección entre pares de datos. El análisis de su forma permite caracterizar la continuidad espacial y escala de la correlación de la variable en el dominio de estudio (Díaz, 2002).

3.2.14. Validación del Modelo Geológico.

Guillermo (2008) indica que la validación de un modelo geológico debe incluir dos componentes principales: una revisión visual y una verificación cuantitativa. La validación visual consiste en analizar secciones en planta y en vertical para comprobar que los sólidos representen coherentemente la interpretación geológica de base, mientras que la validación cuantitativa compara la proporción de litologías registradas en el logueo con la proporción de esas mismas litologías en el modelo,

3.2.15. Validación en la estimación

Guillermo (2008) sostiene que un modelo de estimación puede considerarse validado cuando no presenta errores evidentes y mantiene coherencia interna entre sus distintos componentes. La validación es una etapa crítica en la

estimación de recursos, pues permite decidir si el modelo es apto para apoyar la toma de decisiones o si requiere ajustes en sus parámetros y una nueva ejecución de la interpolación.

3.2.16. *Variable Regionalizada (V.R.)*

Díaz (2002), siguiendo la Teoría de la Variables Regionalizadas de Matheron (1962), indica que la geoestadística se ocupa de variables que representan dependencia espacial. Se denomina variable regionalizada a una magnitud cuyos valores, definidos como una variable aleatoria $Z(u)$ en cada punto u , muestran una estructura de correlación en el espacio, que en el caso más general corresponde a un dominio tridimensional.

3.3. Vocabulario de Términos Geoestadísticos

3.3.1. *Box Plot*

Es un diagrama estadístico que resume, en una sola figura, la distribución de una o varias poblaciones, permitiendo comparar de forma visual medidas como la media, los cuartiles y la presencia de valores atípicos.

3.3.2. *Composición*

Compositar es homogenizar el tamaño de las muestras; es decir cuando los tamaños de las muestras son diferentes o las muestras son muy pequeñas relativos al tamaño del bloque.

3.3.3. EDA (Análisis Exploratorio de Datos)

Consiste en la realización de elaboración de histogramas, curvas de probabilidad acumulada, análisis de contacto, diagramas de cajas (Box Plot).

3.3.4. Histograma

Es un gráfico de barras que representa la frecuencia absoluta o relativa de los datos agrupados en intervalos de clase de igual amplitud. Facilita la visualización de la forma de la distribución (asimetrías, concentraciones de datos, colas) y permiten identificar visualmente valores extremos o irregularidades en el conjunto de datos.

3.3.5. Interpolación

Luego de definir las tendencias y sus modelos, se aplica un interpolador para estimar valores en posiciones no muestreadas y generar las superficies y modelos tridimensionales.

3.3.6. Outlier

Es un valor atípico que se distancia notablemente del patrón general de los datos y que, si no se trata de forma adecuada, puede distorsionar las estadísticas y los análisis posteriores.

3.3.7. *Probability Plot*

Es un diagrama que compara los datos observados con una distribución teórica (por ejemplo, normal o lognormal) y facilita evaluar visualmente el grado de ajuste entre ambos.

3.3.8. *Wireframe*

Es un modelo tridimensional que representa la forma de un cuerpo o estructura mediante superficies y aristas, utilizado para delinear vetas, cuerpos mineralizados, capas de roca o fallas.

CAPÍTULO IV: CARACTERÍSTICAS DEL ÁREA DE ESTUDIO

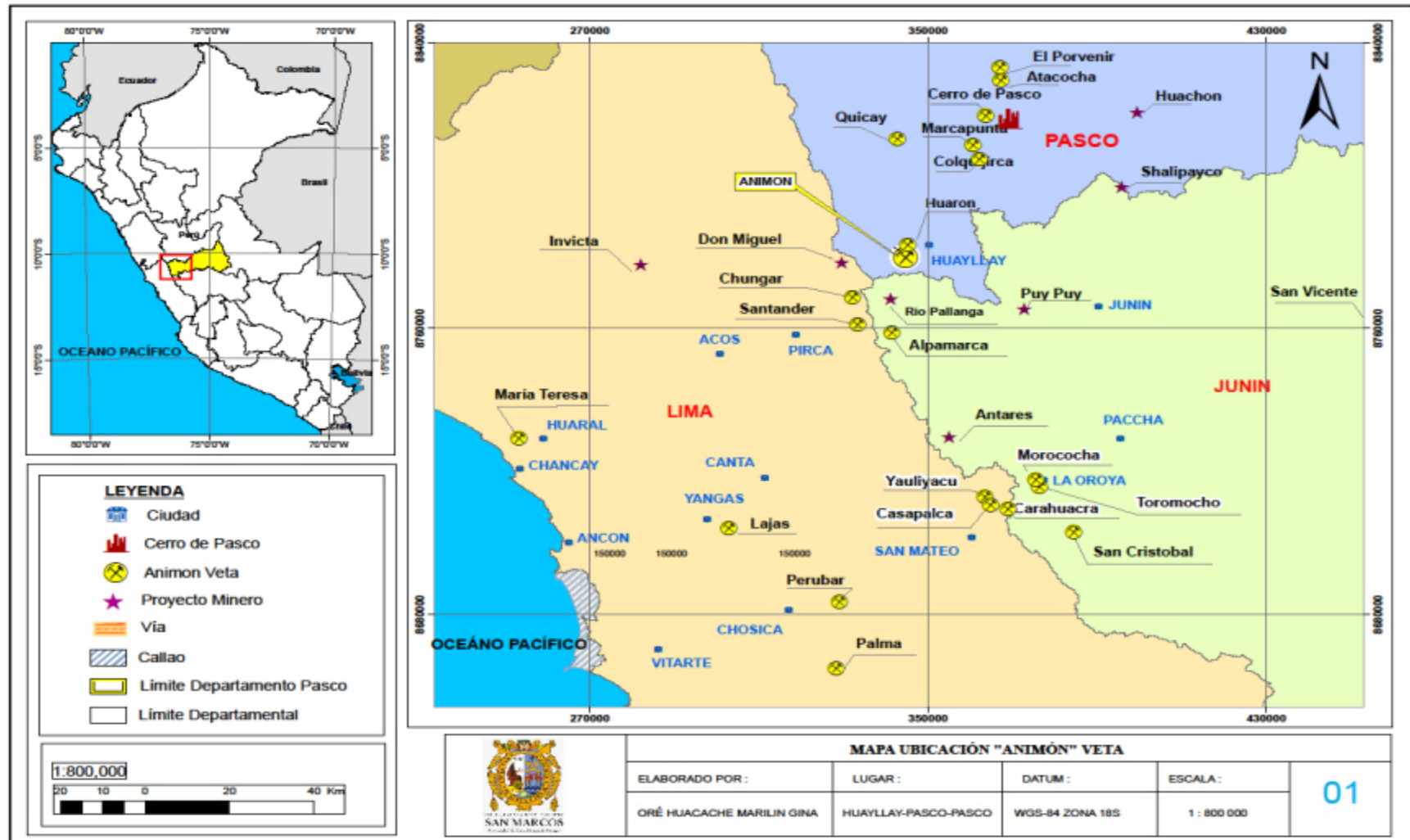
4.1. Ubicación, Límites y Extensión.

La mina Animón se localiza aproximadamente a 130 km al noreste de la ciudad de Lima, en jurisdicción del distrito de Huayllay, provincia y departamento de Pasco, Perú.

Animón está situado en la Cordillera Occidental las montañas de los Andes en centro de Perú, a una altura de aproximadamente 4600 msnm. El área donde se encuentra la veta tiene aproximadamente 20 ha y está orientada al sur oeste de la ciudad de Cerro de Pasco, o a 7 km al noroeste del pueblo de Huayllay. En la Figura 1 se muestra la ubicación de la Mina Animón incluyendo los departamentos y en la Figura 2 incluye los proyectos mineros cercanos a la zona de estudio; finalmente en la Figura 3 se contiene las franjas metalogenéticas.

Figura 1

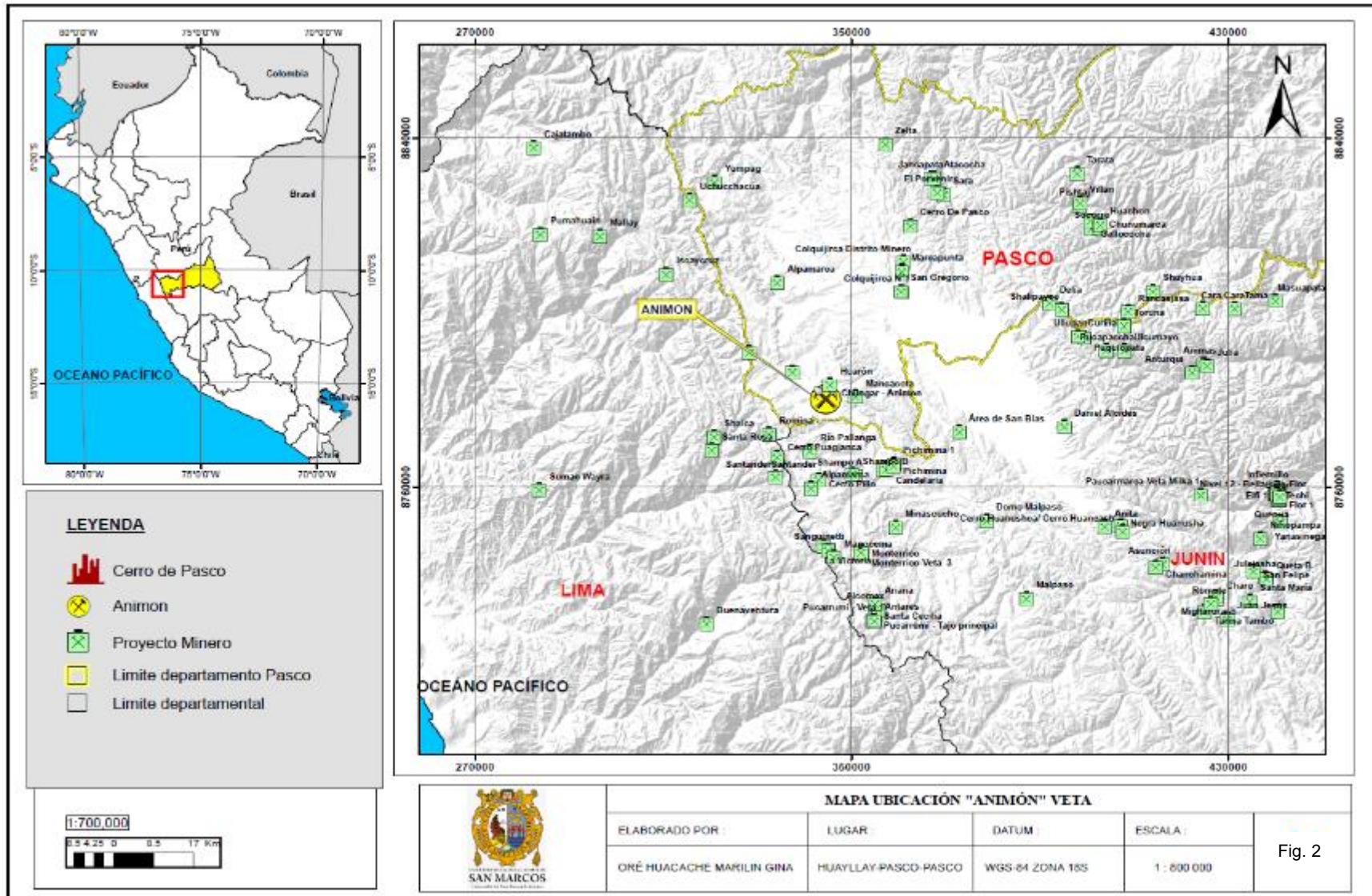
Ubicación de la Mina Animón en Pasco, Perú.



Nota: Propia.

Figura 2

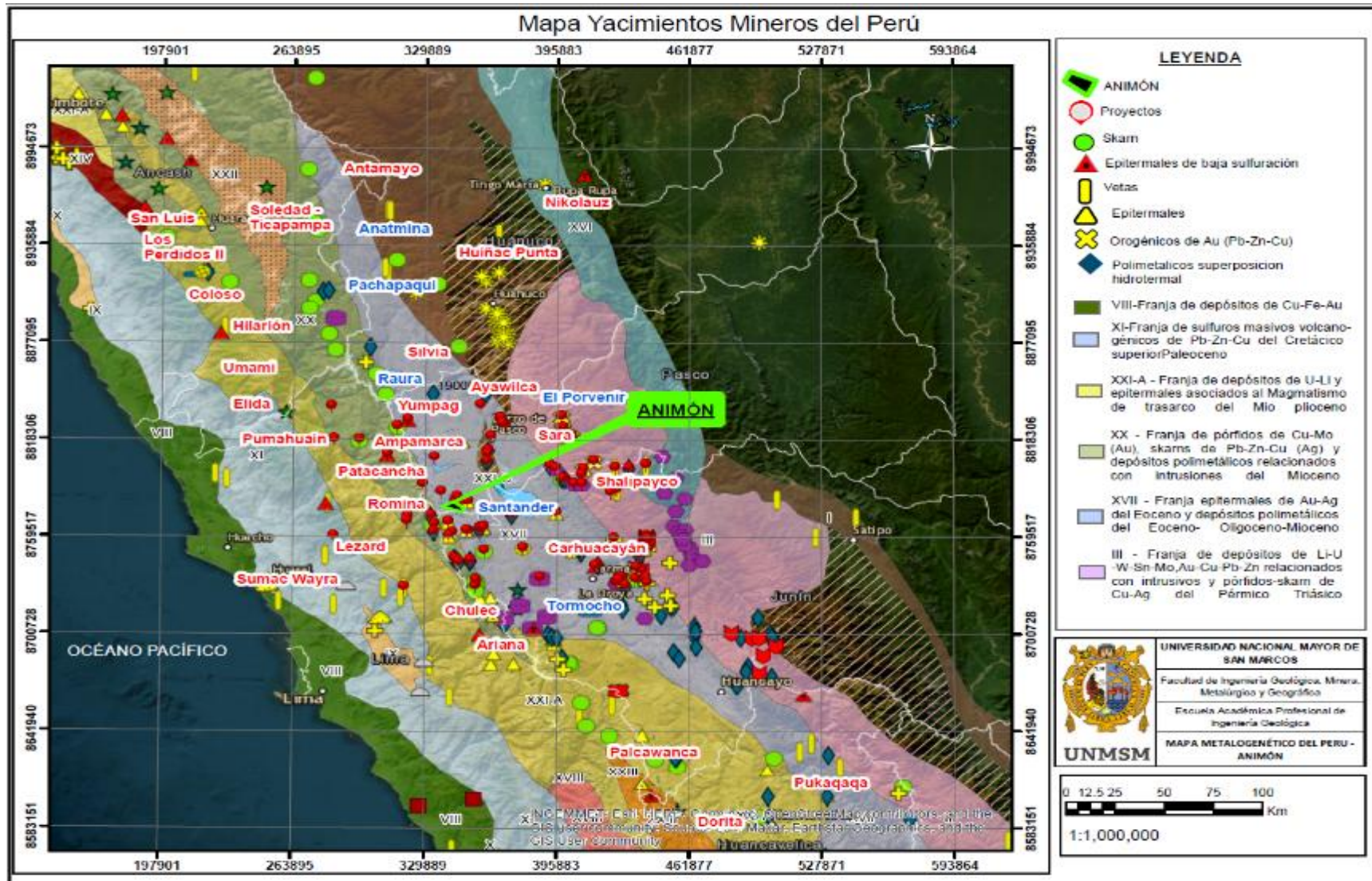
Área Veta Cristina en la Mina Animón en Pasco, Perú.



Nota: Propia.

Figura 3

Área Veta Cristina en la Mina Animón y proyectos mineros, Perú.



Nota: INGEMMET-Geocatmin.

4.2. Accesibilidad

Para llegar a la Mina Animón desde la ciudad de Lima, hay tres rutas terrestres disponibles (Tabla 4). La primera opción es tomar la carretera 20A, pasando por la pintoresca localidad de Canta.

La segunda alternativa de acceso parte desde Lima hacia el norte por la carretera 1N hasta la ciudad de Huaral. Finalmente, la ruta de acceso concluye mediante el tramo comprendido entre San Mateo y La Oroya, hasta llegar a la mina Animón. En la Figura 4 se muestran en un mapa las rutas hacia la zona donde se ubica la Mina.

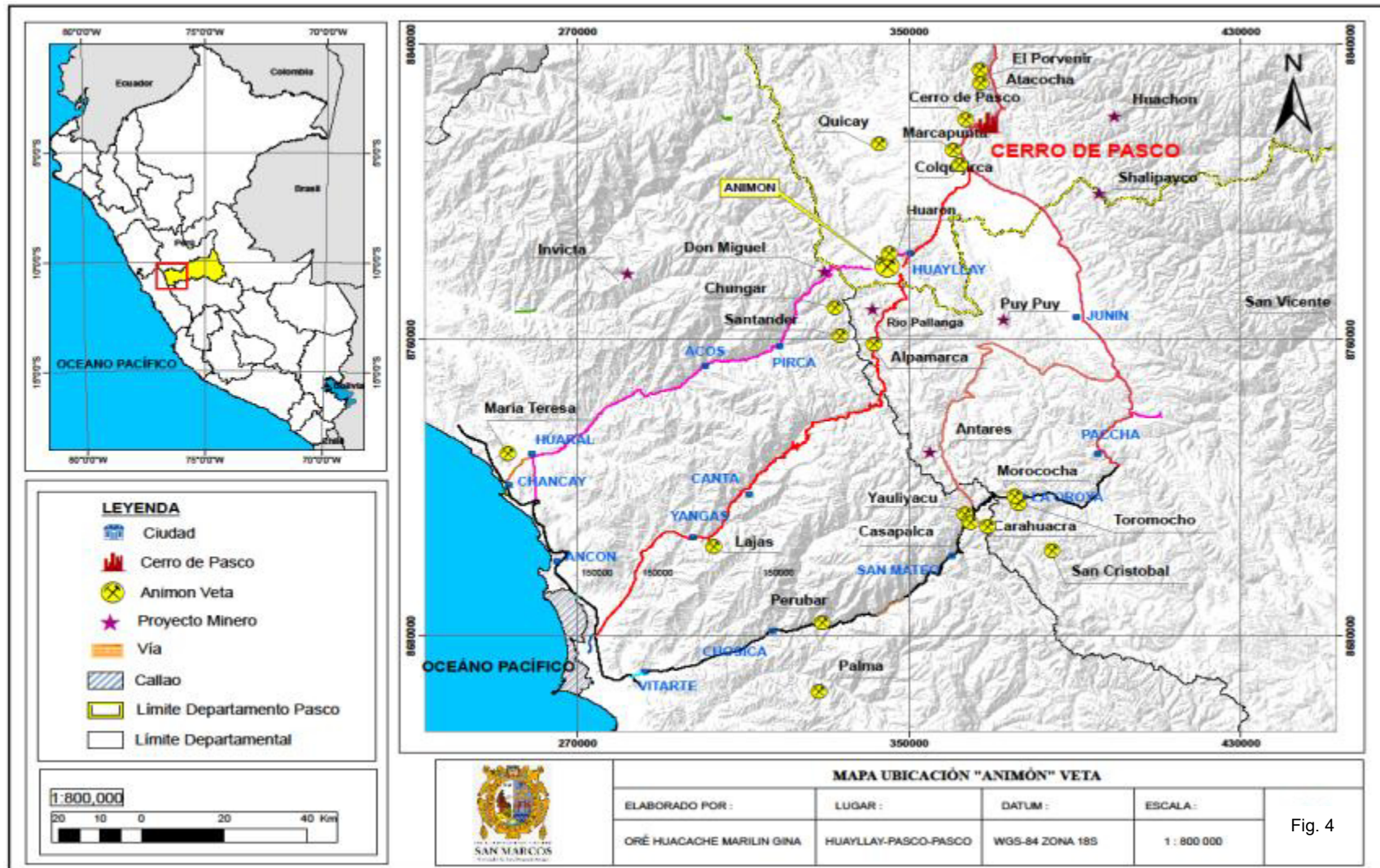
Tabla 3

Rutas de Lima hacia el área de estudio.

Ruta (Transporte terrestre)	Distancia (km)	Tiempo (horas)
Lima-La Oroya-Huayllay-Chungar	321	7
Lima-Acos-Huarón-Chungar	272	5
Lima-Canta-Huarón-Chungar	236	5

Figura 4

Rutas hacia la Mina Animón, Suroeste de Pasco, Perú.



Nota: Propia.

4.3. Clima

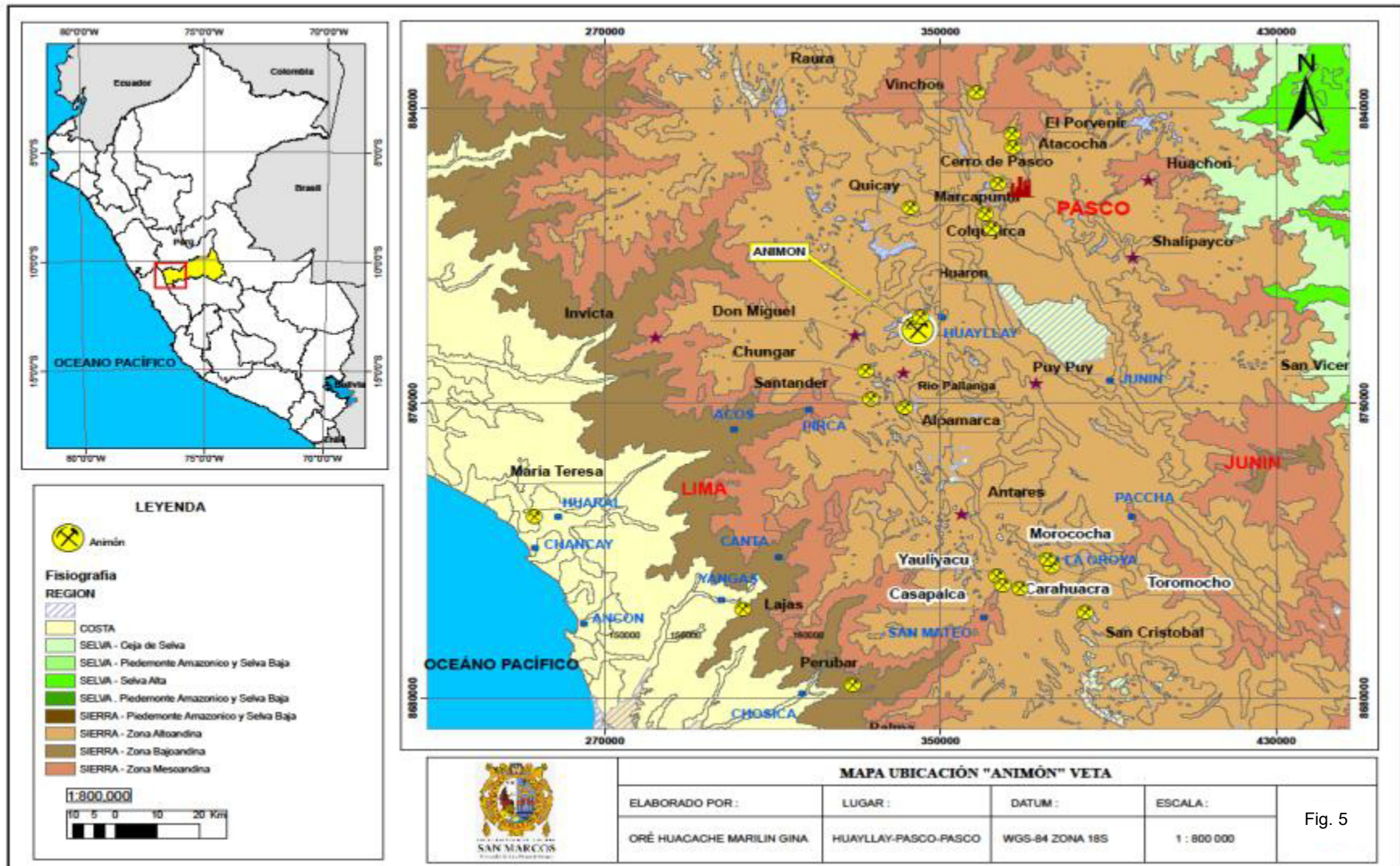
El clima es frío y seco, típico de la región montañosa de los Andes Centrales. En la zona de Huayllay la temperatura media anual es de 4,4°C, con 906 mm de precipitación (Fuente: climate-data.org). En tiempo de verano (diciembre a marzo) coincide con la temporada de lluvias, que puede incluir nieve y tormentas eléctricas; mientras que la estación seca es de abril a noviembre. Las temperaturas máximas y mínimas promedio varían de aproximadamente 12°C a -3°C, respectivamente.

4.4. Fisiografía

El área está cerca de la esquina noroeste de la Meseta de Bombón, al este de la Cordillera Occidental. La veta se encuentra dentro del terreno montañoso a más de 4200 msnm y el sitio de la mina a 4600 msnm. Hay pequeños lagos o lagunas dentro y alrededor del área de la mina Chungar: Llacsacocha, Naticocha y Hauroncocha. Poca vegetación envuelve la topografía; limitado a una variedad de pastos, llamados “ichus” y “silvestres”, y arbustos bajos. La Figura 5 contiene las regiones donde se observa la fisiografía.

Figura 5

Fisiografía de la Mina Animón, Suroeste de Pasco, Perú.



Nota: Propia.

CAPÍTULO V: MARCO GEOLÓGICO

5.1. Geomorfología

En el Distrito Minero Chungar-Animón, las características geomorfológicas revelan una alineación con una orientación Sureste-Noroeste (SE-NW), en paralelo a la tendencia andina reconocida en todo el territorio peruano. Esta posición estratégica ha propiciado el desarrollo de cordilleras con diversos estilos de mineralización como cuerpos, vetas y mantos. Los factores meteorizantes, como las condiciones térmicas locales, las precipitaciones pluviales y los flujos de escorrentía, tanto superficial como subterránea, han desempeñado un papel crucial en la evolución geológica de la zona.

La configuración del relieve en el área de estudio responde a procesos de degradación vinculados a la meteorización, los cuales han modificado las unidades litológicas, conformadas principalmente por calizas y, en menor proporción, por areniscas. Para este sector se han definido unidades geomorfológicas tomando en cuenta criterios geográficos, morfoestructurales y litológicos. En la Figura 6 se resalta el emplazamiento de la zona de estudio dentro del contexto geomorfológico del Perú, mientras que en las Figuras 7 y 8 se muestran con mayor detalle los rasgos geomorfológicos locales y los proyectos cercanos al área evaluada.

Geomorfología de la Mina Animón, Suroeste de Pasco, Perú.



Geomorfología de la Mina Animón, Suroeste de Pasco, Perú.



Geomorfología de la Mina Animón, Suroeste de Pasco, Perú.



52

5.2. Geología Regional

La mina Animón ocurre cerca del límite del cinturón epitermal polimetálico del Eoceno-Mioceno, y el cinturón metalogénico de pórfido de Au-Cu-Mo y/o skarn polimetálico del Mioceno dentro del Perú central; que coincide con los límites del dominio estructural de la Cordillera Occidental (VI) y Alto Condoroma-Caylloma (X) al oeste y al este, respectivamente (Carlotto et al., 2009).

La geología regional y sus apartados descritos a continuación se han recolectado a partir de numerosas fuentes, incluidas Cobbing et al. (1996), Moncayo et al. (1995) y Internal report: Acosta Ale (2016).

Desde el punto de vista geológico, la mina Animón se integra a una estructura compleja generada durante la orogenia andina del Terciario (Mioceno). En la zona se reconocen tres lineamientos principales: el lineamiento estructural E-W de Animón, un dique intrusivo con orientación NW-SE y la falla Llacsacocha de rumbo NE-SW. Estos elementos estructurales habrían favorecido el desarrollo de la mineralización a partir de dos focos subparalelos, donde el foco de Huarón constituye el más importante y el foco secundario se asocia al lineamiento E-W de Animón.

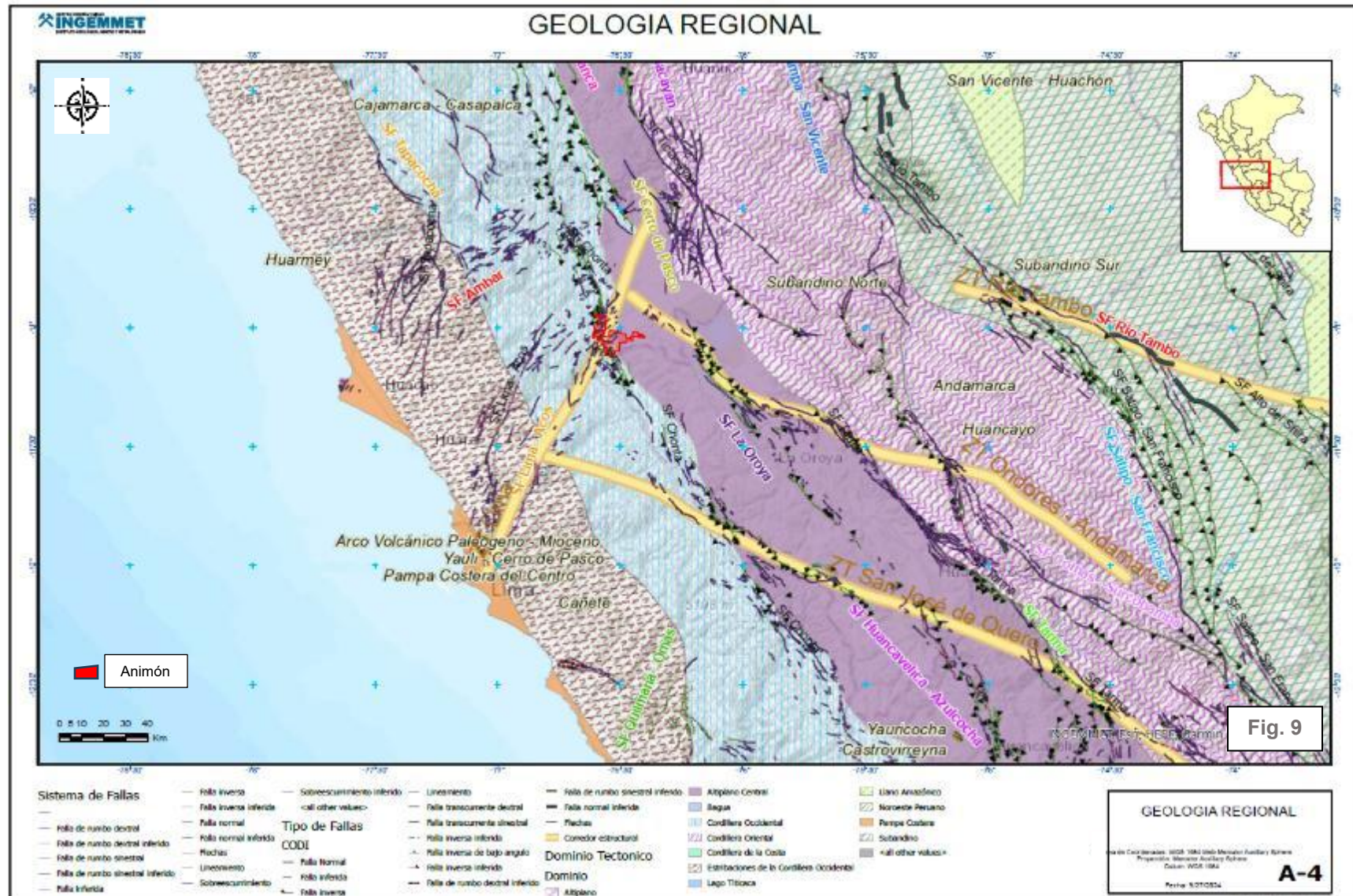
El depósito hidrotermal Animón-Huarón ha originado un sistema de vetas que se distribuye en un área irregular de aproximadamente 5 km en dirección N-S y 7 km en dirección E-W. Dichas estructuras son producto de la interacción de varios esfuerzos vinculados a la actividad tectónico-magmático, a través de la cual las soluciones mineralizantes se alojan en fisuras epigenéticas generadas por esfuerzos tensionales y fracturas de cizalla. La mineralización polimetálica presenta un arreglo típico de Pb-Zn-Cu-Ag.

En la región afloran diversas unidades litoestratigráficas conformadas por rocas sedimentarias de clastos gruesos, conocidos como Capas Rojas, así como rocas volcánicas andesíticas y dacíticas asociadas a plutones hipabisales, Las Capas Rojas, adscritas al Grupo Casapalca, se encuentran ampliamente distribuidas y abarcan edades que van desde el Cretácico superior hasta el Terciario inferior (Eoceno). Superponiéndose en discordancia, se observan rocas volcánicas del Grupo Calipuy, compuestas principalmente por andesitas, dacitas y riolitas de edad Cretácico superior-Terciario inferior (Mioceno), localizadas al suroeste de la mina Animón.

La zona también ha sido afectada por otros eventos geológicos, entre ellos la generación de depósitos de rocas volcánicas ácidas del tipo ignimbrítico y el desarrollo, durante el Plioceno, de formas erosivas singulares producto de la meteorización diferencial, conocidos como el “Bosque de Rocas”. Posteriormente, en el Pleistoceno, la erosión glacial dejó una huella marcada evidenciada por la presencia de numerosas lagunas, que constituyen el rasgo más notorio de dicha actividad glacial. En la Figura 9 se presenta la geología regional junto con las fallas principales vinculadas al área de estudio, en la Figura 10 se superpone el mapa metalogenético sobre la geología regional para facilitar la comprensión del contexto mineralizado y, finalmente, en la Figura 11 se muestran los proyectos mineros más próximos a Animón.

Figura 9

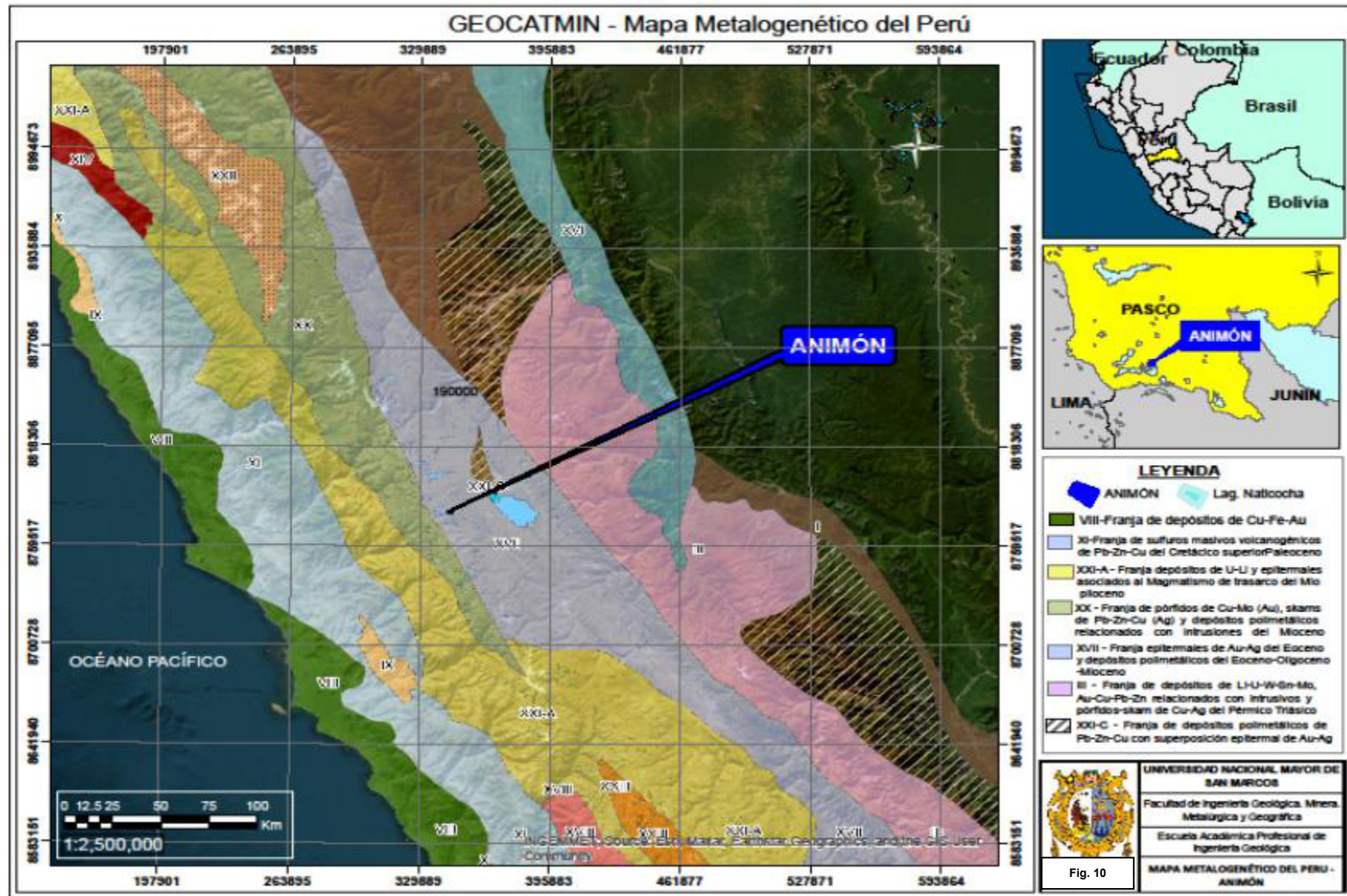
Mapa Metalogénico con fallas regionales y dominio tectónico, Perú.



Nota: INGEMMET-Geocatmin.

Figura 10

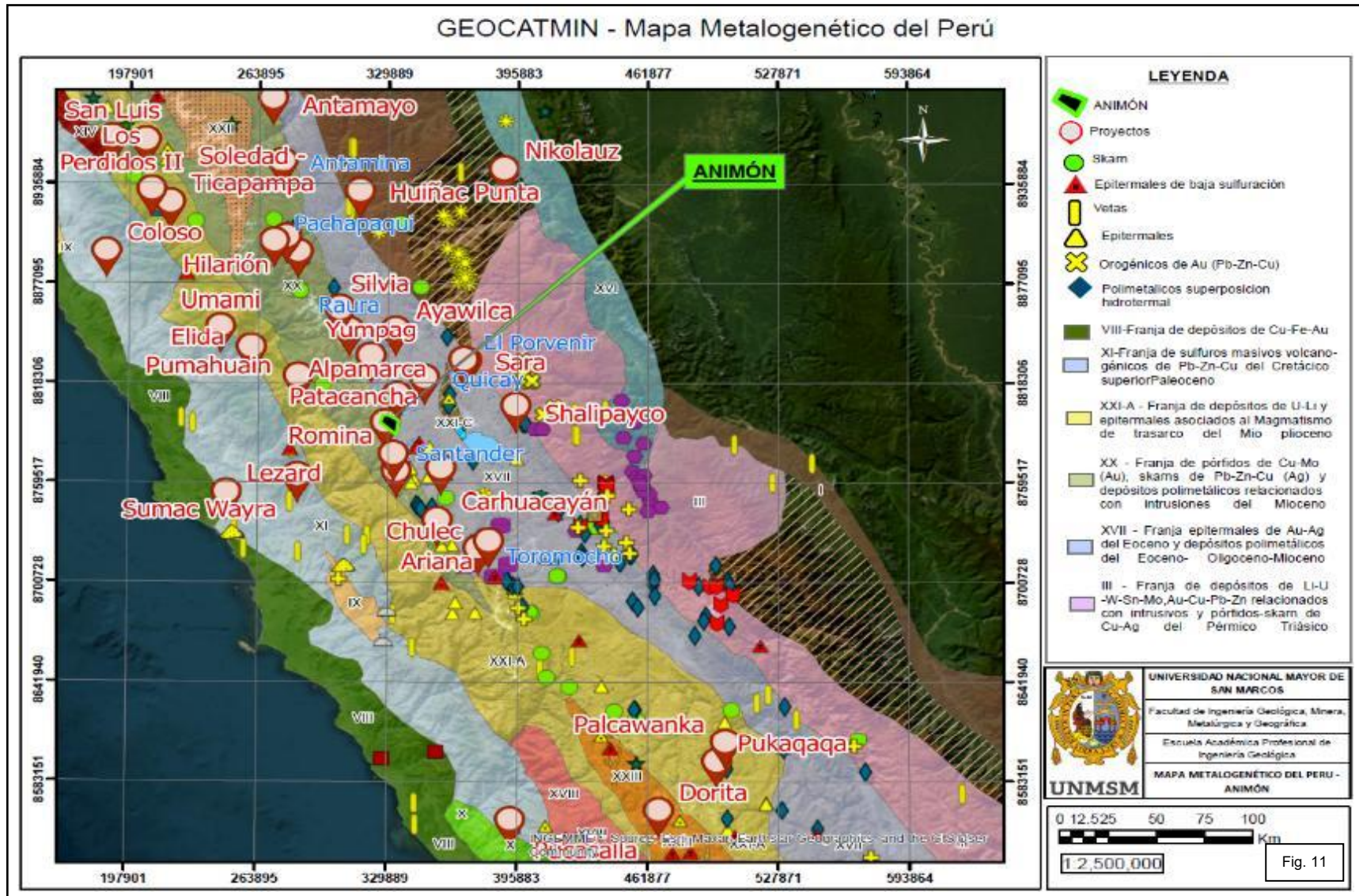
Mapa Metalogénico (Incluye zona Animón), Perú.



Nota: INGEMMET-Geocatmin.

Figura 11

Mapa Metalogénico con proyectos mineros, Perú.



Nota: INGEMMET-Geocatmin.

5.2.1. Estratigrafía

Las rocas estratigráficas de la región se depositaron durante el Cretácico dentro de la Fosa Peruana Occidental (WPT) en el centro de Perú. La mayor parte de la deposición significativa dentro de esta depresión regional comenzó durante el Jurásico Superior y continuó hasta el Cretácico Superior. En la cuenca de arco posterior oriental del WPT, generalmente se reconoce un adelgazamiento hacia el este de las facies sedimentarias, representadas por secuencias de carbonato marino y rocas clásticas continentales. El WPT puede subdividirse en muchas cuencas más pequeñas y, como tal, los espesores de las unidades de estratos son muy variables en toda la región.

5.2.1.1. Formación Pariatambo (Ki-pt). Las rocas más antiguas de la región pertenecen a la formación Pariatambo (Cretácico Inferior: Albiano) que comprende lutitas margosas de color gris oscuro intercaladas, variablemente bituminosas, y capas delgadas de caliza de color gris oscuro, con nódulos de pedernal cerca del límite superior. La formación Pariatambo se considera equivalente al miembro superior de la formación Machay (en otros lugares); sin embargo, también se describe como suprayacente concordantemente a la formación Chúlec. Los lechos de piedra caliza son más continuos y estratificados en el este que en el oeste, en general esta formación puede alcanzar hasta 250 m de espesor. La presencia de ammonites y la litología indican un ambiente marino relativamente profundo y condiciones anóxicas en la base. A partir de suposición estratégica y del contenido fósil, principalmente ammonites, se le asigna una edad Albiana media a superior. Más hacia el este, en la cuenca del Marañon, la formación Pariatambo se correlaciona con la porción superior de la formación Crisnejas.

5.2.1.2. Formación Jumasha (Ks-ju). La formación Jumasha (Cretácico Superior: Albiano a Turoniano) está constituida principalmente por calizas masivas de tonalidades gris a marrón, dispuestas en estratos de espesor moderado a grueso y que suprayacen en forma concordante a la formación Pariatambo. Las calizas varían desde micríticas hasta biomicríticas (60%-75%), con presencia de granos de cuarzo terrígeno de 0.1 a 0.3 mm de diámetro (2%-10%), intraclastos (5%-10%) y microfósiles (5%-15%). La fauna fósil indica que los sedimentos de Jumasha se depositaron en un ambiente epicontinental de plataforma carbonatada somera. De acuerdo con su posición estratigráfica y las especies de ammonites registradas, a esta formación se le asigna una edad que va desde el Albiano medio/superior hasta el Turoniano superior. Se observa un incremento de espesor desde el este hacia el oeste, pasando de casi 1000 m en las proximidades de Margos a más de 2000 m cerca de Iscaycruz. En la región de estudio, la formación Juamasha presenta alta resistencia a la intemperie y afloran en la Cordillera de Puagjanca, donde suele definir los picos montañosos.

5.2.1.3. Formación Celendín (Ks-ce). La formación Celendín (Cretácico superior: Coniaciano a Santoniano) se superpone de manera concordante a la formación Jumasha y comprende secuencias de lutitas y carbonatos, que incluyen calizas y margas grises, azul verdosas y marrones, que están intercaladas de manera delgada y pueden contener capas de yeso. Esta unidad presenta a un color amarillo cremoso. La presencia de evaporitas y anélidos fosilizados indica un ambiente de depósito de Sabkha. A la formación Celendín se le asigna una edad de Coniaciense a Santonian, con base en el diagnóstico de especies de ammonites y su correlación

con estratos del norte de Perú. Localmente la formación Celendín puede tener hasta 120 m de espesor. Al este, las formaciones Celedin y Vivian se correlacionan.

5.2.1.4. Formación Casapalca (Kp-ca). La formación Casapalca (del Cretácico Superior al Paleoceno), también conocida como formación Pocobamba, se superpone discordantemente a la formación Celendín. Esta formación comprende secuencias de margas rojizas, verdosas a violáceas cerca de la base, que transitan hacia arriba a capas variables de arenisca rojiza, con lutitas rojizas esporádicas con menor cantidad de material bituminoso, conglomerados polimícticos, lentes de calizas grises con nódulos de pedernal y secuencias volcanoclásticas. Los lechos de arenisca presentan gradación y exhiben una estratificación cruzada que contiene una matriz calcárea variable. Las unidades de conglomerado comprenden clastos subangulares de piedra caliza, arenisca roja, esquisto, intrusivos y nódulos de pedernal dentro de una matriz/cemento de piedra caliza. La presencia de lechos rojos clásticos marca la transición a la deposición en el medio terrestre, y se considera coincidente con el inicio de la orogénesis andina. A la formación Casapalca se le ha asignado una edad del Paleoceno o antes con base en la edad de los volcanes Calipuy suprayacentes. El espesor total de la formación es variable, superior a 1.000 m y estimado en más de 2.300 m.

La formación Casapalca se subdivide en los Miembros Inferior (Cacuán), Shuco y Calera.

Miembro Inferior: El miembro estratigráficamente inferior o Cacuán puede variar de 300 a 1500 m de espesor y comprende lutitas rojas y areniscas verdes a rojas

parcialmente consolidadas, con capas variables de conglomerados y lentes de piedra caliza.

El miembro inferior (es decir, Cacuán) de la formación Casaplaca se divide en 3 unidades: inferior, media y superior.

- La unidad inferior comprende margas y areniscas de más de 800 m de espesor, observadas en la parte más profunda y central del anticlinal de Huarón.
- La unidad media presenta un espesor aproximado de 485 m, aflora en el flanco oriental del anticlinal de Huarón y se divide en tres subconjuntos: basal, central y superior. El nivel basal corresponde al conglomerado Bernabé, que alcanza hasta 40 m de espesor y contiene clastos de cuarcita se hasta 10 cm de diámetro inmersos en un matriz areniscosa. El nivel central está constituido por areniscas rojas y margas, con un espesor acumulado cercano a 420 m. Finalmente, el nivel superior incluye alrededor de 25 m de pedernal calcáreo y sedimentos lacustres masivos de color púrpura o violeta claro, conocidos como de Sevilla y Córdoba.
- La unidad superior comprende 5 unidades de conglomerados que suman cerca de 80 m de espesor, seguidas de secuencias de areniscas moradas con capas calcáreas que suman más de 300 m.

Miembro Shuco: De 800 a 900 m de espesor, comprende predominantemente conglomerados que contienen clastos subangulares de caliza, cuarcita, pedernal, arenisca roja, filita, dentro de una matriz calcárea. El tamaño del clasto varía considerablemente desde centímetros hasta casi 1,5 m de diámetro. El

Conglomerado Shuco forma un litoestrato resistente entre 150 a 200 m de espesor.

El miembro superior (es decir, Shuco) de la formación Casapalca, denominado Secuencia Abigarrada, es continuo en ambos flancos del anticlinal de Huarón. La parte inferior de este miembro es el Conglomerado San Pedro que comprende conglomerados que contienen clastos de cuarcita y caliza de mayor tamaño. Este conglomerado presenta un espesor de aproximadamente 20 a 50 m y se considera una unidad estratigráfica favorable para el alojamiento de mineralización, especialmente mediante reemplazo masivo de sulfuros en los clastos calizos. Por encima del conglomerado San Pedro se presenta secuencias de areniscas con escombros volcánicos, conglomerados de características variables, areniscas margosas y niveles de pedernal calcáreo que pueden alcanzar hasta 30 m de espesor.

Miembro Calera: Está integrado por margas y lutitas de capas delgadas que pasan gradualmente a calizas y dolomías con nódulos de pedernal, alcanzando un espesor total estimado entre 60 y 65 m. La porción media de la formación está dominada por calizas y margas interestratificadas con delgados niveles de lutitas, con un espesor aproximado de 53 m.

La Tabla 4 presenta de manera esquemática la distribución y características de las principales unidades estratigráficas reconocidas en el área de estudio

Tabla 4

Unidades Litoestratigráficas del área de estudio.

UNIDADES CRONOESTRATIGRÁFICAS				UNIDADES LITOESTRATIGRÁFICAS							SUCESO GEOLOGICO		MILLONES AÑOS	ROCAS INTRUSIVAS
ERATEMA	SISTEMA	SERIE	EDAD	GRUPO	FORMACIÓN	UNIDAD	LITOLOGÍA	SIMBOLOGÍA	GROSOR mts	DESCRIPCIÓN				
CENOZOICO	CUATERNARIO	RECIENTE						Q-Dep-R	10	Depósitos fluvio-glaciares limo-arcilla-gravosos	EROSIÓN GLACIAR ELEVACIÓN ANDES 4,000		1	MONZONITA
		PLISTOCENO						Q-Pi-mo	20	Morrenas con clastos angulosos a subredondeados en matriz arenosa				
		SUPERIOR	PLIOCENO		HUAYLAY			Ts-Fm-H	200	Tobas, ignimbritas, riolitas y andesitas	PLEGAMIENTO QUICHUANO		13	
		MEDIO	MIOCENO	CALPUY				Tm-Vca	1000	Volcánicos, piroclásticos, lavas de andesitas y dacitas porfíricas	PENEPLANIZACIÓN FRACTURA PUNA		25	
	INFERIOR	OLIGOCENO					Ki-ca			MINERALIZACIÓN FRACTURA INTRUSIÓN		36		
		EOCENO						Ki-ca						
								Ki-ca						
								Ki-ca						
								Ki-ca						
								Ki-ca						
								Ki-ca						
	PALEOCENO							Ki-ca						
							Ki-ca							
							Ki-ca							
							Ki-ca							
							Ki-ca							
							Ki-ca							
MESOZOICO	CRETÁCEO	SUPERIOR						Ki-ca						
								Ki-ca						
	JURÁSICO	MEDIO						Jm-Pu	550	Calizas masivas de colores oscuros				
								Jm-Pu						

COLUMNA ESTRATIGRÁFICA	
MINA ANIMÓN	Q-Dep-R
	Q-Pi-mo
	Ts-Fm-H
	Tm-Vca
	Ki-ca
	Jm-Pu
LEYENDA	Mina ANIMÓN

Fuente: Volcan.

5.2.2. Rocas Intrusivas Regionales

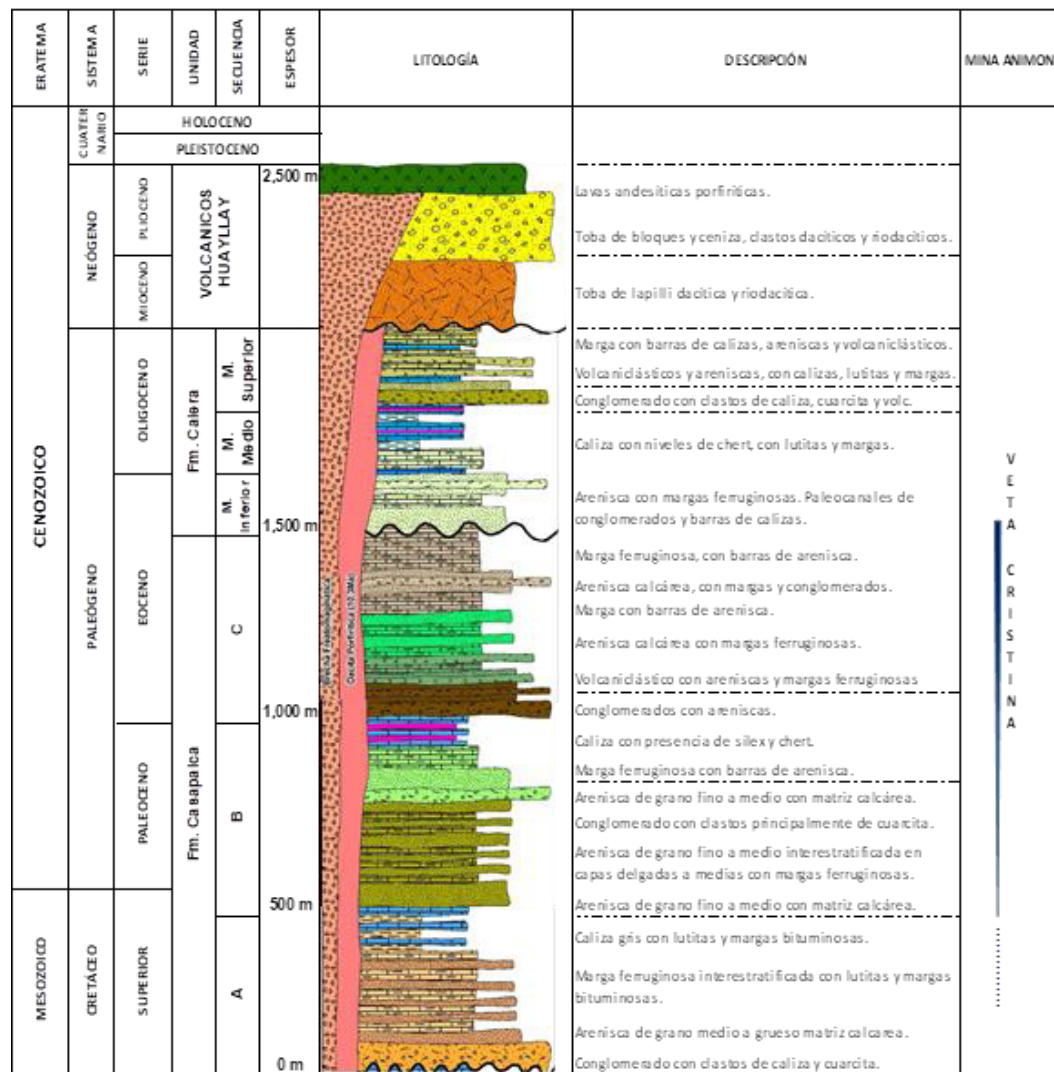
Las rocas ígneas del Batolito de la Cordillera Blanca (Neógeno) fueron intruidas en una tendencia de 250 km de largo, paralela a la tendencia noroeste-sureste de los Andes, y de casi 15 a 20 km de ancho, dentro de la parte occidental de la Fosa Peruana Occidental (canal intra-arco occidental).

La composición de la roca intrusiva es principalmente granodiorita leucocrática de alto contenido de sílice (>70 % en peso), granodiorita menor y monzodiorita de tonalita-cuarzo, y define una tendencia calco-alcalina aproximada (Petford y Atherton, 1996). La mineralogía comprende principalmente plagioclasa, feldespato K, cuarzo, anfíbol y/o biotita. La geoquímica de estas rocas intrusivas varía de peraluminosas a metaluminosas y son ricas en Na. El origen del magma de la Cordillera Blanca ha sido discutido; uno de los modelos plantea que se generó mediante fusión parcial de corteza basáltica subyacente y/o aporte de material mantélico reciente. El magmatismo de la Cordillera Blanca duró desde el Eoceno hasta el Mioceno, respaldado por una variedad de fechas de edad radiométrica que van desde 16 a 2,7 Ma. de varias suites. El emplazamiento de magma estuvo fuertemente controlado por una extensión regional orientada de noreste a suroeste.

Cinco (5) pulsos magmáticos, manifestados por stocks de granito a diorita, intrusiones hipabisales y volcánicas (Soler y Bonhomme, 1988) han sido identificados a lo largo de la región de la Cordillera Occidental; al este del magmatismo de la Cordillera Blanca y son al menos parcialmente coetáneos: (1) Eoceno tardío a Oligoceno temprano (41-34 Ma.), (2) Oligoceno medio, (3) Oligoceno tardío a Mioceno temprano (24-19 Ma.), (4) Mioceno medio a tardío (18-7 Ma.) y (5) Plioceno. La Formación Casapalca se puede ubicar mejor en la Tabla 5.

Tabla 5

Columna Estratigráfica a detalle de Fm. Casapalca de Rocas Intrusivas.



Fuente: Volcan.

5.2.3. Geología estructural regional

El rifting asociado con una zona de cizalla sinistral con tendencia noroeste-sureste en el centro de Perú comenzó durante el Triásico, formando la depresión peruana occidental, que se subdivide en la depresión interior del arco occidental y la depresión del arco posterior oriental (Rosas et al., 2007; Scherrenberg et al., 2012). Luego del hundimiento y la sedimentación asociada dentro del WPT, los estratos en la depresión del arco posterior oriental fueron posteriormente deformados por una compresión predominantemente orientada de este a oeste que formó el Cinturón Plegado-Corrido del Marañón (MFTB) como parte de la orogénesis andina. El depósito de rocas clásticas continentales de antepaís (por ejemplo, lechos rojos) marca el final de la sedimentación de la cuenca marina y el comienzo de la orogenia andina.

La tectónica regional de la orogénesis andina durante el Mesozoico y el Cenozoico se conoce colectivamente como el Ciclo Andino, que comprende múltiples eventos de sedimentación y deformación. El Ciclo Andino se subdivide en al menos siete fases deformacionales (Ellison et al., 1989; Michalak, 2013; y sus referencias):

- Peruana o Peruano (Cretácico Superior, 85-70 Ma.): asociado a intenso vulcanismo y emplazamiento del Batolito Costero;
- Incaica I y II (Paleoceno-Eoceno): principalmente concentrado en la Cordillera Oriental, produciendo el cinturón plegado y corrido del Marañón, la fase principal de acortamiento de la corteza en el centro-norte de Perú, levantamiento si está marcado por superficies erosivas;
- Quechua 1 (Oligoceno temprano, 21,5-12,5 Ma.): pliegues monoclinales y fallas inversas;

- Quechua 2 (Oligoceno tardío a Mioceno temprano, 10-8 Ma.): migración de la deformación hacia el este, fallas de dirección noroeste-sureste con desplazamiento dextral;
- Quechua 3 (Mioceno medio, 7-4 Ma.): cinturón plegado y corrido subandino debido a una compresión orientada de este a oeste;
- Quechua 4 (Mioceno tardío); y
- Quechua 5 (Mioceno tardío).

Se reconocen tres episodios de plegamiento regional que ocurrieron durante el Paleógeno y posiblemente antes, y están separados por períodos de tensión. En toda la región, durante la segunda fase de deformación andina (Incaico), desde el Eoceno hasta el Oligoceno, la tectónica se caracteriza por una compresión con orientación noreste-suroeste a este-oeste. Gran parte del plegamiento de los estratos del Mesozoico al Paleógeno inferior ocurrió durante esta fase de deformación. Las rocas estratigráficas se pliegan concordantemente formando generalmente una serie de anticlinales y sinclinales, paralelos a la tendencia andina principal, con un eje de pliegue orientado de norte-noroeste a sur-sureste, hundiéndose hacia el sur. La mayoría de los pliegues descritos a lo largo de la región tienen extremidades de suave a moderadamente inclinadas ($<60^\circ$).

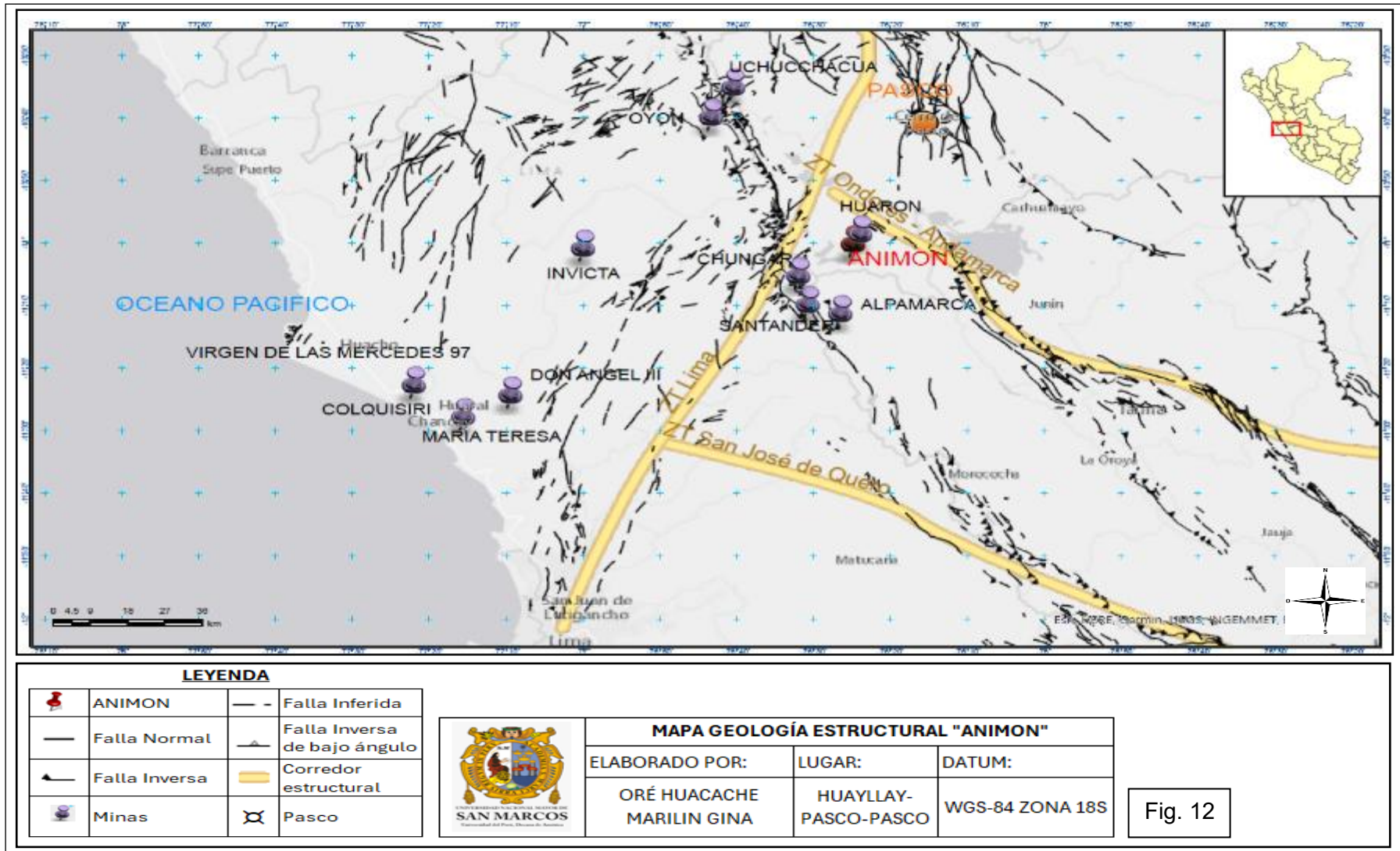
En el área de estudio se reconocen pliegues y fallas de cizalla de gran escala que configuran un patrón en “X”. Dos sistemas de fallas de escala tectónica de tendencia norte-noroeste – sur-sureste subparalelos, denominados Sistema 14 y Sistema 16, limitan aproximadamente el lado oeste y este de la región respectivamente (como se identifica en el mapa metalogénico de Perú). El Sistema de fallas 14 parece coincidir con el límite occidental del

dominio estructural Alto Condoroma-Caylloma y la parte occidental de la Cordillera Occidental.

La estructura regional está controlada principalmente por fallas de rumbo norte-noroeste a sur-sureste, entre las que destacan el Sistema de Corrimientos del Marañón y el sistema de fallas de Huayllay (Rodrigues et al., 2011). Se considera que estas estructuras ejercen un control significativo sobre el emplazamiento de los cuerpos magmáticos y la concentración del flujo hidrotermal en la zona. El área de estudios se sitúa dentro de una gran estructura regional representada en la Figura 12, mientras que en las Figuras 13 y 14 se establece la relación entre dicha estructura y la litología.

Figura 12

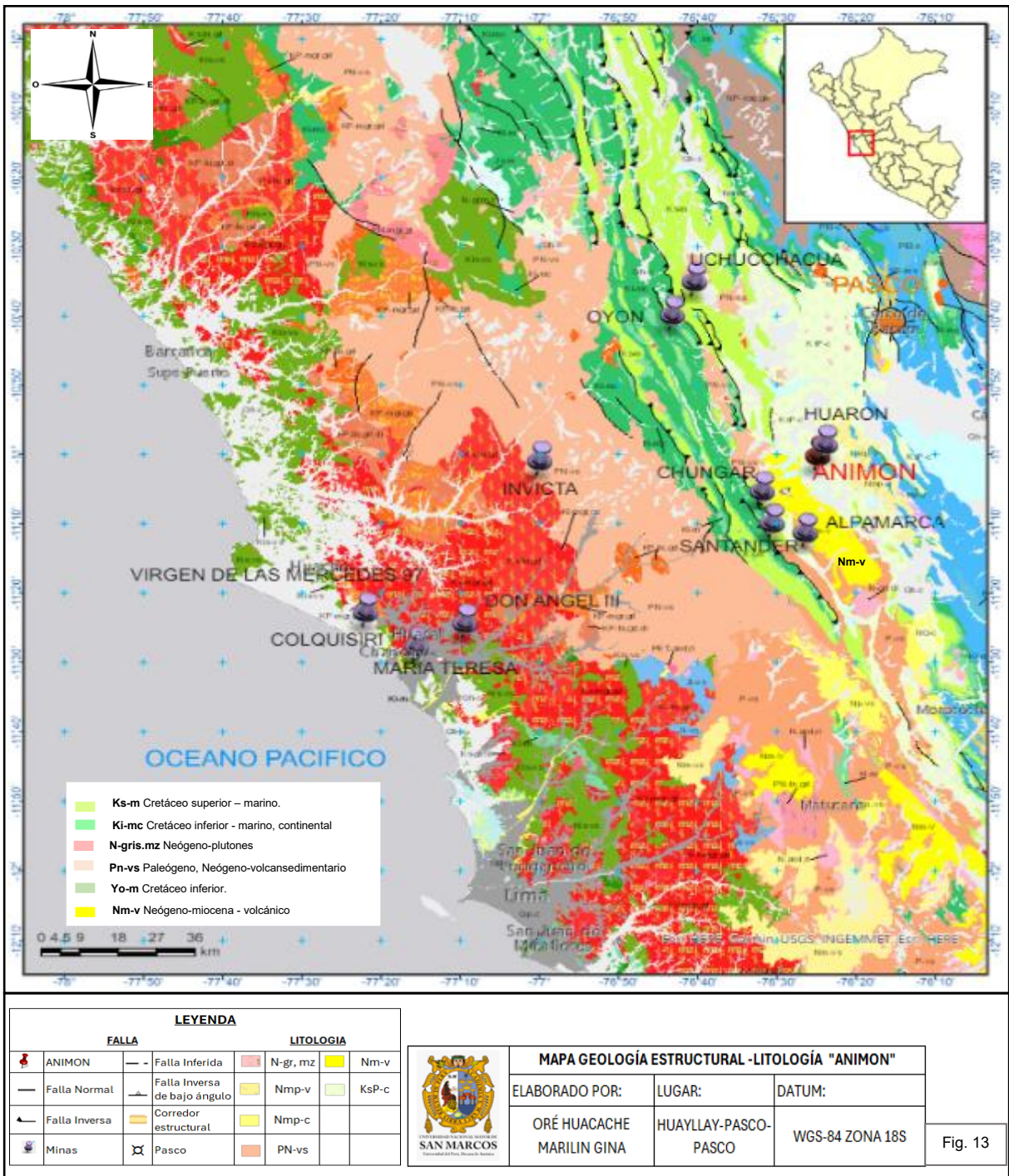
Estructura Regional de la Mina Animón, Suroeste de Pasco, Perú.



Nota: Propia.

Figura 13

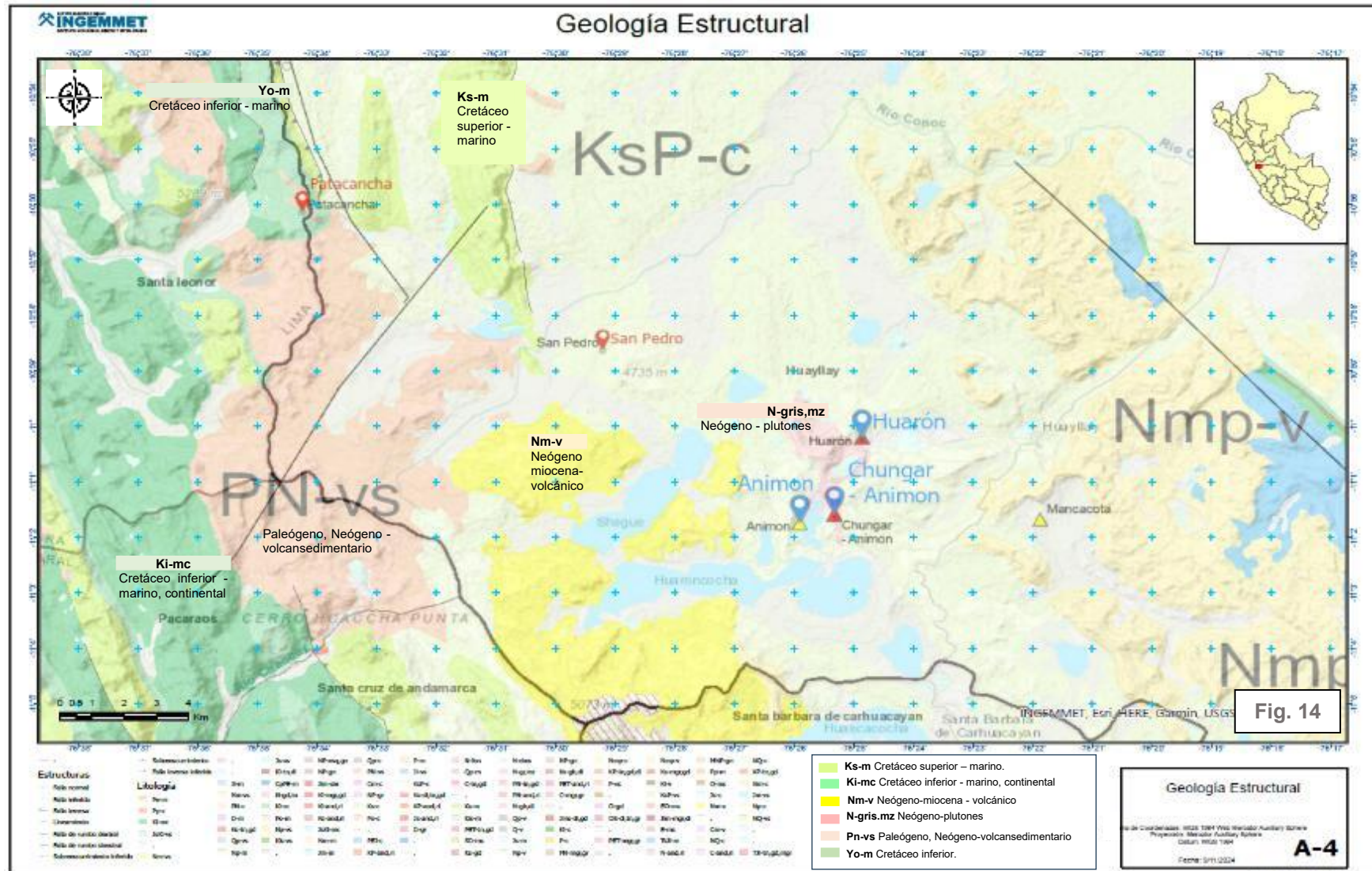
Mapa Regional de la Mina Animón, Suroeste de Pasco, Perú.



Nota: Propia.

Figura 14

Mapa Regional de la Mina Animón, Suroeste de Pasco, Perú.



Nota: INGEMMET-Geocatmin.

5.3. Geología Local

Gran parte del área de la zona Chungar (Distrito Minero Chungar-Huarón) se encuentra dentro de la esquina noroeste de la hoja de mapa INGEMMET 23-K: Ondores a escala 1:100,000, y dentro del cinturón polimetálico del Eoceno al Mioceno y el cinturón metalogénico epitermal Au-Ag del Eoceno (XVII).

La estratigrafía dentro del área comprende predominantemente areniscas clásticas a lutitas y rocas calcáreas, con rocas volcánicas de la formación Casapalca (también conocida como Red Beds, o la formación Pocobamba) y rocas volcánicas del Plioceno medio. La mineralización polimetálica en el área de Chungar está alojada principalmente en la formación Casapalca. Las rocas volcánicas cubren discordantemente la formación Casapalca, que comprende desde cenizas andesíticas a dacíticas/riolíticas hasta tobas en bloques, tobas lapilli y flujos.

Las unidades sedimentarias cuaternarias están presentes de forma variable, incluidos los depósitos lacustres que comprenden limo no consolidado y arena fina, y capas ricas en materia orgánica que exhiben pseudoestratigrafía. Se muestra en la Figura 15 dentro del área de estudio.

MINA ANIMÓN

5.3.1. Rocas Intrusivas

Una serie de 6 diques de cuarzomonzonita (o enjambre de diques) con tendencia NNW-SSE ocurren en un área de hasta 1,4 km de ancho y parecen haberse formado dentro de zonas preexistentes de debilidad estructural asociadas con el plegamiento regional. Individualmente, los diques tienen hasta 350 m de ancho en la parte central, con buzamiento abrupto (85° a 88°) hacia el oeste. En la parte oriental del anticlinal de Huarón, se observan

una serie de 3 diques con rumbo aproximadamente E-O, dentro de una zona de casi 300 m de ancho en una longitud de 400 m.

Una cantidad de diques intrusivos y stocks están expuestos en la superficie dentro y alrededor del área de la propiedad. La mejor exposición intrusiva es una monzonita equigranular rojiza a cuarzomonzonita, con una edad media de 7,4 Ma (Thouvenin, 1983), en el área de la mina Huarón adyacente.

5.3.2. Geología estructural Local

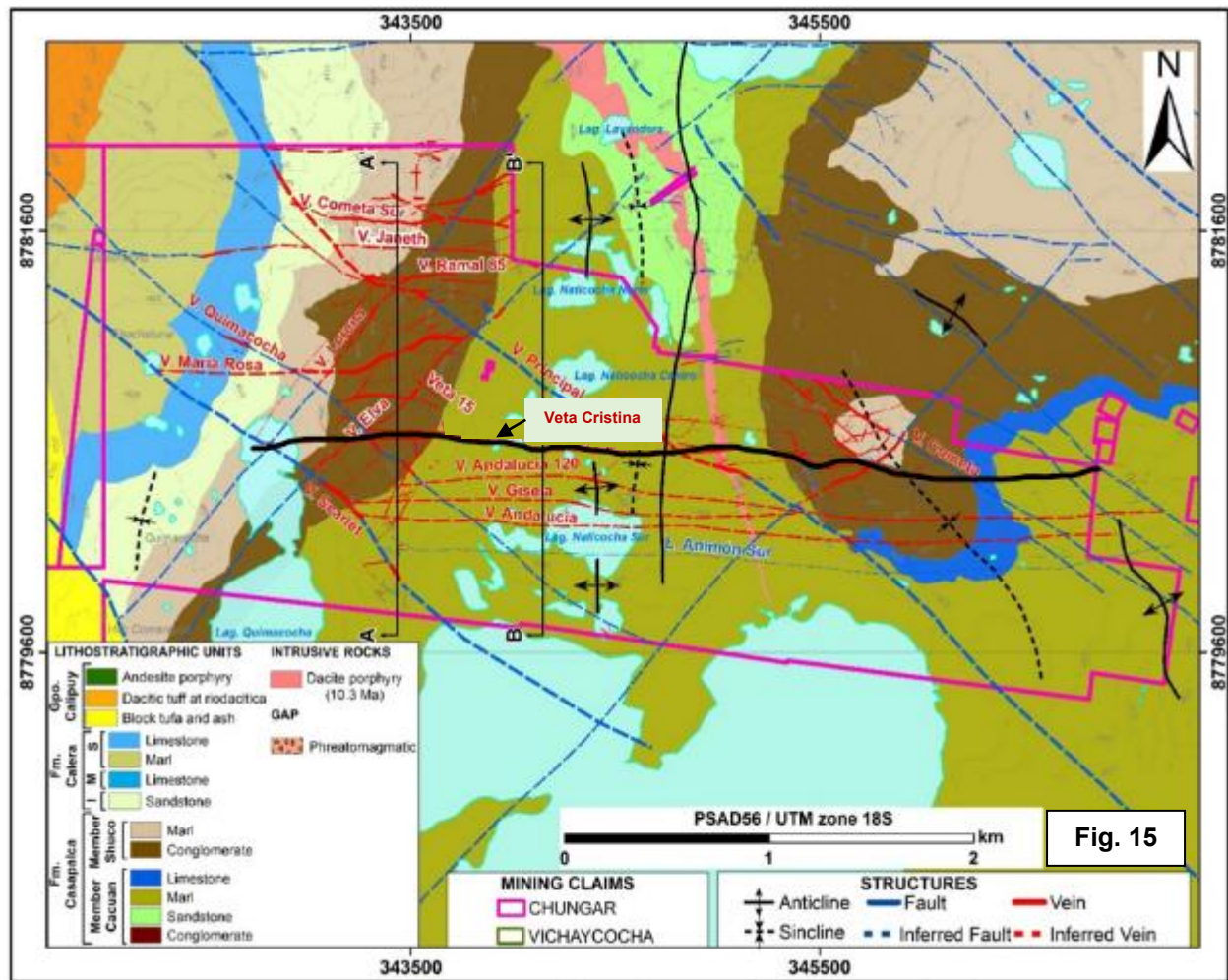
La compresión orientada este-oeste durante la fase orogénica (deformacional) Incaica (Paleógeno/Eoceno) resultó en un plegamiento regional, con una traza axial orientada aproximadamente NNW-SSE (335°), que afectó a los estratos preterciarios, aunque es anterior a las rocas intrusivas de la región. Durante este evento inicial, las fuerzas tectónicas actuaron en un régimen de compresión en dirección Este-Oeste (E-W), produciendo fallas inversas y pliegues que establecieron la estructura base de la región, creando zonas de debilidad que posteriormente influirían en eventos posteriores. Alrededor del área de la mina, el pliegue principal es el anticlinal asimétrico de Huarón, con un buzamiento del brazo este de 50° a 60° hacia el este, y un buzamiento del brazo occidental de 35° a 42° hacia el oeste. Su plano axial, orientado entre 330° y 335°, presenta una ligera curvatura convexa hacia el este en la parte central del distrito. Además, el eje de plegado parece estar ligeramente doblado, hundiéndose de 15° a 20° NNW en el norte y de 5° a 8° hacia el sureste. Este anticlinal se extiende a lo largo de casi 20 km y tiene un ancho de aproximadamente 6 km. A 3,5 km al oeste del eje del pliegue de Huarón se encuentra el sinclinal paralelo de Quimacocha (asimétrico) (Thouvenin, 1983).

Posteriormente, se desarrollaron eventos de mineralización asociados a diferentes regímenes tectónicos. Durante el Mioceno Medio-Superior, un régimen compresivo en dirección Noreste-Suroeste (NE-SW) generó estructuras como fallas, fracturas y pliegues que cortaron a un intrusivo datado en 10.3 Ma (según Thouvenin, 1984). Estas estructuras permitieron la deposición de minerales en las zonas de mayor debilidad (SYN Mineralización 1 y 2). Más tarde, durante el Mioceno Inferior, un nuevo régimen compresivo en dirección Noroeste-Sureste (NW-SE) generó estructuras adicionales que favorecieron otro pulso de mineralización (SYN Mineralización 3), permitiendo la circulación de fluidos hidrotermales que enriquecieron las estructuras existentes con nuevos minerales.

Finalmente, durante el Plioceno, un régimen compresivo en dirección Norte-Sur (N-S) generó nuevas estructuras que cortaron los depósitos de mineralización y los materiales volcánicos datados en 5.5 Ma. Este evento tectónico fue responsable de deformaciones posteriores a la mineralización, modificando la geología estructural final de la región. Ver la descripción en la Figura 16.

Figura 15

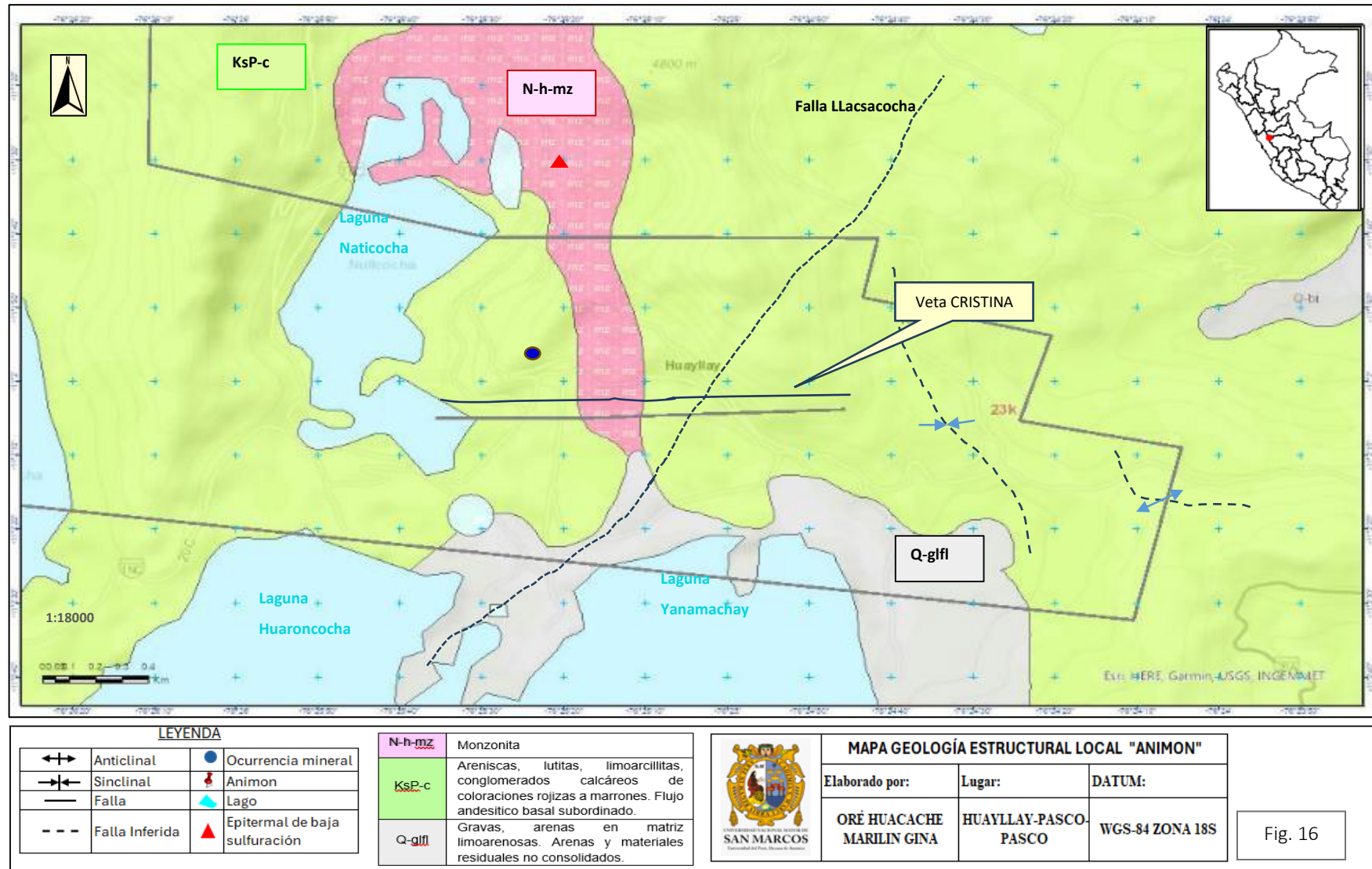
Mapa Genético de la Mina Animón, Suroeste de Pasco, Perú.



Nota: Geología del lecho rocoso superficial de la propiedad Animón. Fuente: Volcán.

Figura 16

Estructura Local de la Mina Animón, Suroeste de Pasco, Perú.



Nota: Propia.

5.3.3. Mineralización Animón

Se han identificado más de 50 vetas polimetálicas en la mineralización en el área de Chungar que comprende cuarzo, carbonatos variables, pirita y clorita en menores proporciones como el conjunto ganga. Los minerales metálicos se componen predominantemente de esfalerita, con galena común, y los sulfosales argentíferos menores se presentan como variablemente masivas, irregulares o diseminadas.

Según los conjuntos y estilos minerales, la mineralización parece estar zonificada verticalmente y se ha dividido en 5 tipos (Internal report: Acosta Ale, 2016):

- **Tipo 1 / Zona alta**

El Tipo 1 / Zona Alta se ha reconocido principalmente entre elevaciones 4400 y 4600 msnm. La mineralización se caracteriza por sulfuros diseminados (y sulfosales) dentro de carbonatos masivos a lamelares/laminados con fluorita.

- **Tipo 2 (A y B)**

El tipo 2 se ha subdividido en 2 subtipos; (2A) mineralización caracterizada predominantemente por rodocrosita (carbonatos) con una textura granular, asociada con menor cantidad de cuarzo y menor cantidad de pirita diseminada; y (2B) mineralización caracterizada por carbonatos/rodocrosita y cuarzo con esfalerita diseminada y sulfosales argentíferas menores asociadas (basado en los grados Ag). La mineralización tipo 2 generalmente ocurre entre 3900 y 4400 msnm.

- **Tipo 3**

La mineralización se caracteriza por esfalerita masiva de color marrón claro (rubia), con bolsas de galena, calcopirita, con sulfosales argentíferas menos diseminadas. La mineralogía de ganga es volumétricamente menor que la de los sulfuros masivos y está dominada por carbonatos, que pueden ser reemplazados de manera variable por cuarzo. El tipo 3 se reconoce exclusivamente dentro del área de Animón entre 4100 y 4250 msnm.

- **Tipo 4 (A y B)**

El tipo 4 se ha subdividido en 2 subtipos. El tipo 4A comprende una mineralización de estilo de reemplazo caracterizada por una ganga predominantemente de cuarzo y carbonatos menores con bandas de esfalerita, galena y calcopirita localmente masivas, con sulfosales menores que contienen plata. El Tipo 4B se caracteriza por un predominantemente cuarzo con menor conjunto de carbonato, pirita y clorita. Un conjunto de alteración argílica y clorita con pirita está asociado con la mineralización Tipo 4; que se reconoce entre 3950 y 4100 msnm.

- **Tipo 5**

El tipo 5 se caracteriza por un conjunto de alteración que comprende cuarzo localmente masivo, clorita con pirita menor. Se reconocen sulfuros menores que contienen Cu, y se infiere que la esfalerita está asociada con grados de Zn. Este conjunto se reconoce en las partes más profundas del sistema/estructura mineralizada, entre los 3950 y 4100 msnm. Los cinco niveles de mineralización reconocidos en la

mina Animón se presenta en la Tabla 6, a partir de dicha información se ha construido la Figura 17.

Tabla 6

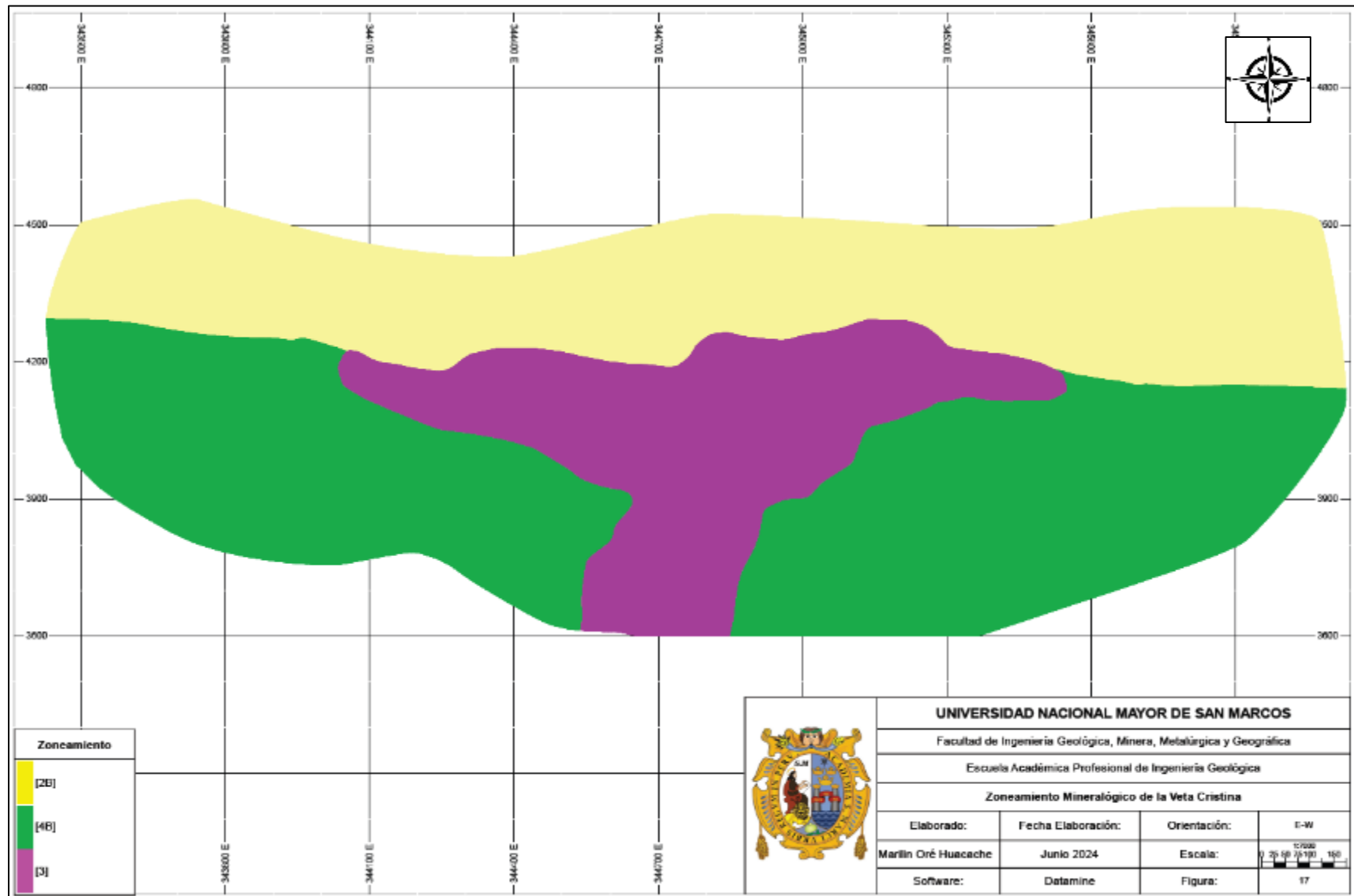
Niveles de mineralización en la Mina Animón.

VETA							VETA	CAJA		
NIVEL VETA	DOMINIO VETA	ENSAMBLE EN LA VETA POR EVENTO	ESTILO MINERAL VETA	TEXTURA GANGA	ANIMÓN Avg. Zn (%)	LEY Ag (Oz)	NIVEL VETA	ALTERACIONES HIDROTERMALES		
								ARGÍLICA	FÍLICA	PORPILÍTICA
Alto	1	Carbonatos (calcita)-Oxs. Mn ± Fluorite	Diseminado (anómalo)	Massive, carbonate bladed (lamellar).	0.05-1.00	0.10-2.00	ALTO	Haloisita-Caolinita ± esmectita-carbonatos	Esmectita-Illita ± Carbonatos	Clorita-Carbonatos
Zona Mineralizada	2A	Carbonatos (rodocrosita) > cuarzo	Venillas (marginal)	Lattice bladed, moss, granular.	1.00-5.00	2.00-5.00	ZONA MINERALIZADA	Caolinita-Dickita-Cuarzo-Carbonatos ± Illita	Illita-Sericita-Cuarzo-Carbonatos	Clorita-Cuarzo-Carbonatos
	2B	Carbonatos (rodocrosita)-cuarzo, sulfuros/Sulfosales Plata (*)	Venillas + diseminado (económico)	Lattice, granular.	5.00-12.00	5.00-12.00				
	3	Mineralización masiva de sulfuros/Sulfosales Plata (*)	Bandas+ venillas + diseminado (alta ley)	Granular, lattice.	> 12	> 12				
	4A	Cuarzo > carbonatos (rodocrosita) ± rodonita ??- Sulfuros/Sulfosales Plata (*)	Venillas + diseminado (económico)	Cuarzo granular a sub-cristalizado.	5.00-12.00	5.00-12.00				
	4B	Cuarzo > carbonatos (rodochrosita) ± rodonita??	Venillas (marginal)	Cuarzo cristalizado, crustiforme, comb, cocada.	3.00-5.00	3.00-5.00				
Raiz	5	Cuarzo-pirita-sulfuros cobre± clorita	Venillas (marginal)	Cuarzo cristalizado crustiforme, brechada.	< 3.00	< 3.00	INFERIOR	Pirofilita-Dickita-Caolinita-Cuarzo.	Sericita-Fengita-Cuarzo	Epidota-Albita-Cuarzo-Clorita-Carbonatos.

Nota: Mina Animón

Figura 17

Niveles de mineralización de la Mina Animón en la Veta Cristina



Nota: Propia (Vista planta).

5.3.3.1. Área de la mina Animón. Las principales estructuras mineralizadas en el área de la mina Animón pertenecen al sistema estructural de tendencia E-W (azimut promedio: 090°), con anchos variables de 0.8 m a 8.0 m de ancho, e incluyen Principal, Cristina, Andalucía 120, Carmen y venas Gisela. También las vetas con buzamiento S incluidas en este grupo son las vetas Janeth, Split Janeth, María Rosa, Elva y Elva Piso. Las vetas secundarias incluyen: Split NW 01 Carmen (345°/70°) y Lourdes (040°/70°) (Internal report: Acosta Ale, 2016).

Veta CRISTINA

La veta Cristina está ubicada proximal a la veta Principal, y comprende una mineralización diseminada a masiva predominantemente de esfalerita y galena con tetraedrita menor. El ancho promedio de la veta es de 2,0 m y se ha rastreado durante casi 900 m de longitud con 600 m de extensión vertical, que se ha definido principalmente mediante perforación diamantina y desarrollo subterráneo. El límite superior aproximado de la veta parece estar controlado por una secuencia de margas; mientras que el límite inferior está definido por una secuencia de capas de margas y lutitas (Internal report: Acosta Ale, 2016).

CAPÍTULO VI: MODELAMIENTO GEOLÓGICO 3D

La construcción de modelos tridimensionales en Leapfrog Geo constituye una tarea clave dentro de la evaluación geológica, ya que permite integrar de manera coherente la información de sondajes, mapeos y estructuras principales. Estos modelos facilitan la comparación de escenarios a largo, mediano y corto plazo y proporciona una representación espacial continua de la mineralización y de las unidades hospedantes, lo que resulta fundamental para la planificación y optimización de la operación minera.

6.1. Modelo Genético del Yacimiento Animón

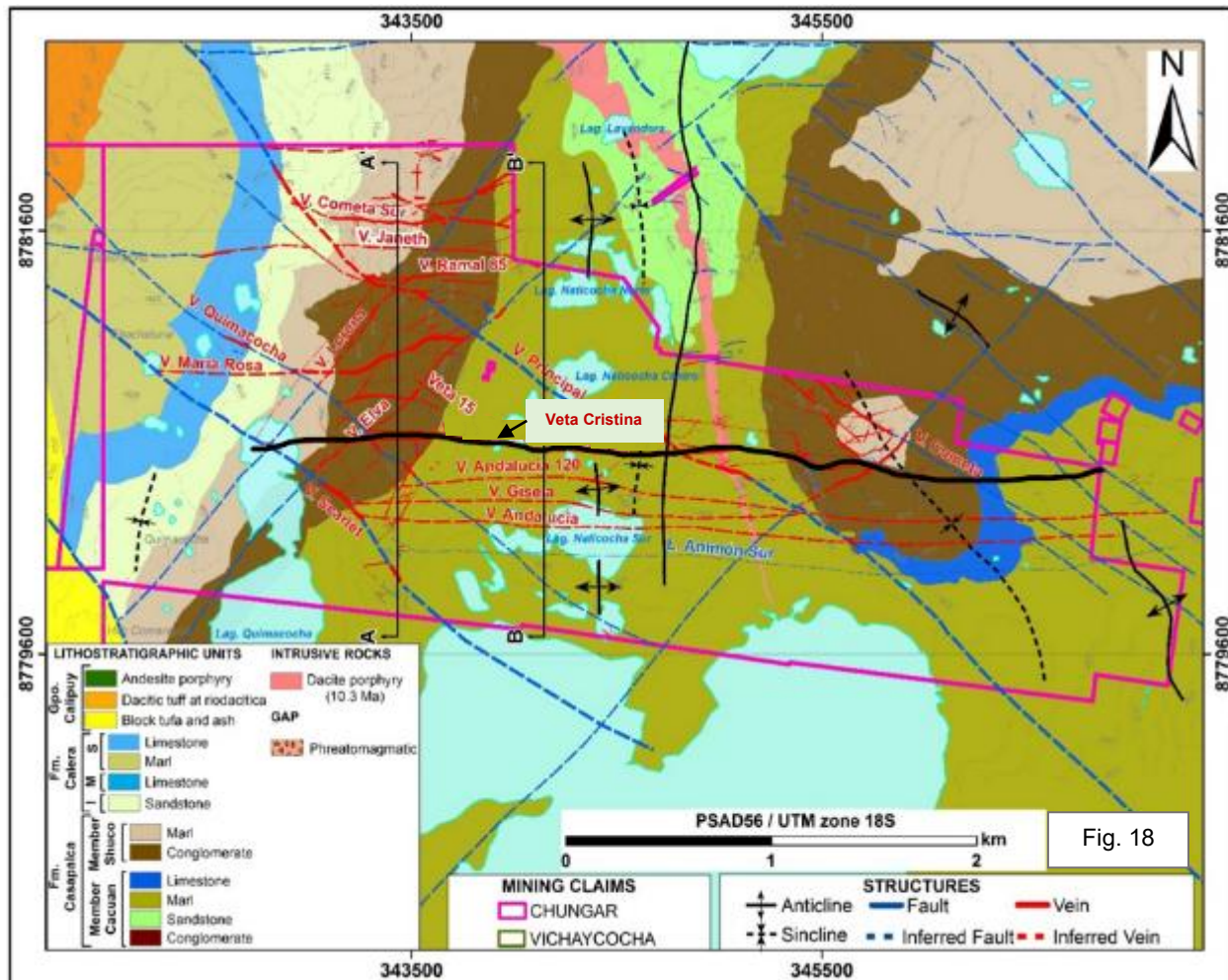
Inicialmente Animón producto de la actividad tectónica forma un yacimiento que desde una perspectiva geocronológica se describen tres características estructurales: 1) Dique intrusivo NW-SE (Una serie de estructuras orientadas NW-SE, con un buzamiento de 50° a 70°SW). 2) Lineamiento estructural E-W de Animón (sistema E-W, con un buzamiento de 70° a 85°N) y 3) Falla de Llacsacocha NE-SW (sistema NE-SW, se interpretan como una serie de estructuras tensionales). Este conjunto estructural, cuyo origen se remonta a la orogenia andina en la era del Terciario (mioceno), habría experimentado su formación con la mineralización procedente de dos núcleos sub paralelos. El núcleo más destacado se encuentra en Huarón, mientras que el núcleo secundario está situado en el lineamiento estructural Este-Oeste de Animón.

El distrito Huarón-Animón corresponde a un sistema hidrotermal polimetálico, en el que la mineralización se aloja en vetas y cuerpos de reemplazo controlados estructuralmente. Predominan las asociaciones de zinc (Zn), plomo (Pb), plata (Ag) y cobre (Cu), que se

distribuyen en diferentes niveles y tipos de vetas, de acuerdo con la evolución del sistema hidrotermal (Internal report: Acosta Ale, 2016). Ver Figura 18.

Figura 18

Mapa Genético de la Mina Animón, Suroeste de Pasco, Perú.



Nota: Geología del lecho rocoso superficial de la propiedad Animón. *Fuente:* Volcán.

En el sector Animón-Huarón (Internal report: Acosta Ale, 2016) afloran principalmente secuencias sedimentarias de edad Cretácico superior-Terciario inferior, con espesores que alcanzan del orden de 2000 m. Estas unidades incluyen calizan, margas y areniscas

dispuestas en paquetes potentes, que constituyen el principal hospedaje de la mineralización y forman parte de la columna estratigráfica regional del distrito.

En discordancia sobre la formación Casapalca de edad Cretácica se reconoce una sucesión volcánica integrada por flujos y cuerpos intrusivos de composición andesítica, dacítica y riolítica, asignados al Grupo Calipuy. Esta secuencia volcánica marca un cambio en el régimen tectono-magmático regional y constituye el techo de las unidades sedimentarias hospedantes de la mineralización.

A escala regional se observa un relieve fuertemente modificado por procesos de erosión y meteorización diferencial, que han esculpido formas rocosas singulares. Uno de los ejemplos más representativos de este modelado es el Bosque de Rocas de Huayllay, donde las unidades volcánicas y sedimentarias han desarrollado formas columnares.

La mina Animón se encuentra alojada en una secuencia de rocas sedimentarias pertenecientes a la formación Casapalca, dentro de la cual se reconocen dos grandes miembros principales, Inferior y Superior, además del miembro Shuco. Estos miembros agrupan distintas unidades de margas, areniscas y conglomerados que constituyen los principales horizontes hospedantes de la mineralización vetiforme.

- **Miembro Inferior:** Está conformado por tres unidades litoestratigráficas:
 - Unidad Inferior: Compuesta por margas y areniscas, ocupa la región central y profunda del anticlinal con una extensión de 800 m de grosor.
 - Unidad Media: Aflora principalmente en el flanco oriental del anticlinal de Huarón y está integrado por tres estratos diferenciados, con un espesor total cercano a 485 m. Estos niveles incluyen alternancias de conglomerados, areniscas y margas, que constituyen horizontes favorables para el desarrollo de estructuras mineralizadas.

Está unidad se descompone en los siguientes estratos principales:

- Horizonte Base: Formado por el conglomerado Bernabé, que alcanza una potencia aproximada de 40 m y se caracteriza por clastos gruesos soportados en matriz arenosa.
 - Horizonte Central: Lo conforman areniscas rojas y margas ferruginosas, potencia 420 m.
 - Horizonte Techo: Integrado por un nivel de chert calcáreo con un espesor cercano a 25 m. que marca el límite superior de la unidad media.
- Unidad Superior: Aflora de manera más continua en el flanco oriental del anticlinal y puede seguirse lateralmente por varios kilómetros. En su base se reconocen alrededor de cinco niveles de conglomerados que suman cerca de 80 m de espesor, sobre los cuales se disponen areniscas de tonalidades moradas y niveles calcáreos, alcanzando un espesor acumulado del orden de 300 m.
- **Miembro Superior:** Tiene un grosor de 800 m, es la única masa rocosa presente en ambos flancos del anticlinal.
 - **Miembro Shuco:** De aproximadamente 900 m, conglomerado resistente y es continuo en ambos flancos del anticlinal.

En Animón se desarrolla una mineralización polimetálica hospedada principalmente en vetas y cuerpos de reemplazo que siguen la estructura regional. Se distinguen vetas principales y sistemas secundarios que, en determinados sectores, configuran arreglos

sigmoideos y zonas de intersección estructural, que favorecen la concentración de sulfuros metálicos.

La estructura seleccionada para el presente estudio es la veta Cristina, considerada una de las vetas de interés dentro de la mina Animón por sus contenidos favorables de plomo y plata (Pb-Ag), descritos en los trabajos previos de exploración y explotación (Internal report: Acosta Ale, 2016).

6.2. Modelamiento Geológico Empleando el Software Leapfrog Geo 3D.

El modelado geológico 3D en Leapfrog Geo consiste en generar una representación espacial continua de la estructura mineralizada, integrando datos de sondajes, mapeos y secciones geológicas. De esta manera, es posible visualizar y analizar la geometría de la veta tanto en sentido longitudinal como lateral, identificando cambios en potencia, buzamiento y continuidad.

Para la construcción del wireframe se emplea la base de datos de taladros, los mapeos de labores y las secciones interpretadas, con el propósito de definir sólidos coherentes que representen la veta y las unidades encajantes. Este modelo volumétrico es el insumo principal para efectuar una estimación consistente de los recursos minerales contenidos en la estructura.

Para lograr un modelo geológico 3D eficiente en Leapfrog Geo, es necesario seguir una secuencia que incluye la organización de la base de datos, la importación de topografía, la incorporación de mapeos y secciones, y finalmente la construcción y ajuste del sólido de la veta. En los apartados siguientes se describen de manera detallada los pasos aplicados para obtener el wireframe definitivo.

6.2.1. Elaboración del modelo de la estructura (veta).

Para el desarrollo el modelo litológico es indispensable contar con la topografía actualizada, los límites del proyecto y las interpretaciones geológicas en planta y secciones maestras. Esta información sirve como base para ajustar los sólidos en 3D, de modo que la geometría modelada produzca fielmente la configuración de la veta y de las unidades encajantes.

6.2.2. Recepción de la Base de Datos.

Esta etapa comprende la compilación y revisión de la información de sondajes diamantinos, incluyendo las tablas de collar, survey y assay. Una vez verificados los datos, se importan al software para obtener una visualización 3D preliminar de la distribución de las trazas de taladros y de las muestras, tal como se resume en las Tablas 7, 8 y 9.

Tabla 7

Datos Collar.

Nombre de Taladro	Este	Norte	Elevación	Profundidad
200-080458	343425.348	8780734.1	4238.527	169.35
200-080464	343421.36	8780739.12	4237.5	164.9
200-080461	343427.162	8780732.71	4237.219	148.35
200-090494	343516.404	8780731.33	4238.676	122
200-090496	343513.334	8780732.99	4239.939	141.5
200-090495	343516.444	8780730.66	4238.37	132.3
200-090505	343617.285	8780786.04	4222.185	221

200-090507	343618.394	8780782.71	4220.272	150.1
175-100722	343675.558	8780939.65	4179.205	145.2
175-100725	343680.35	8780938.87	4178.899	115.6
175-100726	343668.558	8780940.86	4179.072	130.5

Tabla 8

Datos Survey.

Nombre de Taladro	Profundidad	Azimut	Dip
175-100726	169.35	51.63	-43
175-100722	164.9	330.58	-34
175-100725	148.35	3.77	-49
200-090494	122	176.52	7
200-090496	141.5	206.6	0
200-090495	132.3	166.95	-24
200-090505	221	138.21	-11
200-090507	150.1	166.8	-4
200-080458	145.2	153.98	-7
200-080461	115.6	154.62	13
200-080464	130.5	352.97	-75

Tabla 9

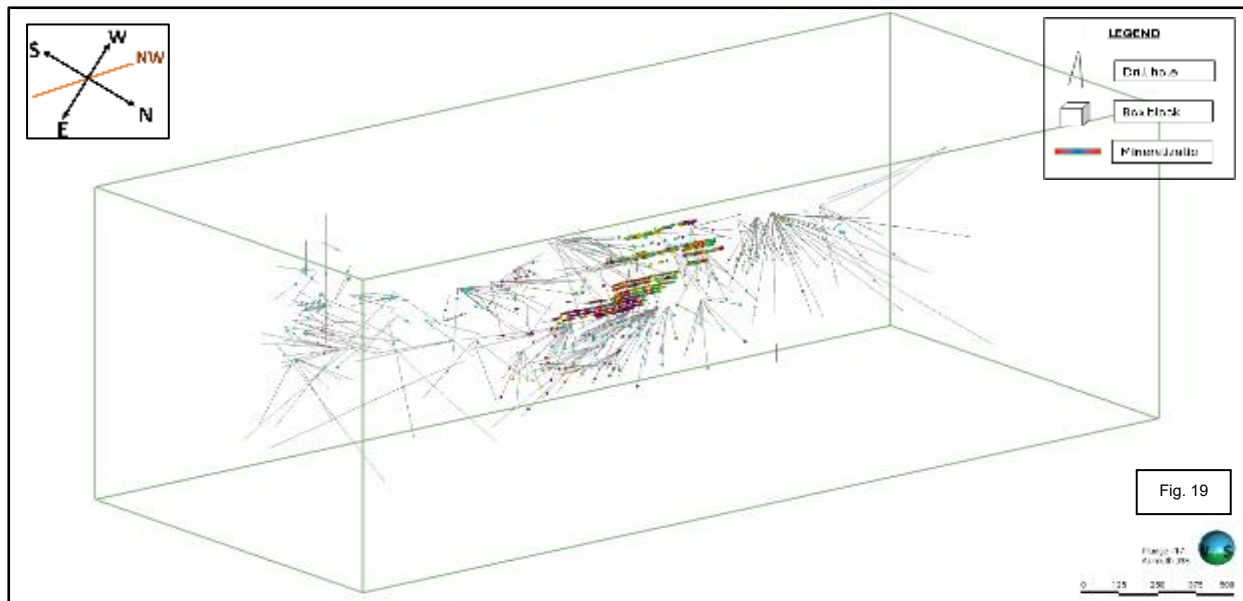
Datos Assay.

Nombre de Taladro	FROM	TO	Cu (%)	Pb (%)	Zn (%)	Ag (Oz)
200-080458	121.05	121.4	0.01	0.07	0.93	0.0322
200-080458	136	136.75	0.01	0.09	0.15	0.0322

200-080458	136.75	137.25	0.06	0.25	13.4	0.7395
200-080458	138.2	139.75	0.01	0.06	0.61	0.0322
200-080458	141.3	142.7	0.01	0.11	0.73	0.2251
200-080458	147.2	147.42	0.01	0.07	2.57	0.4823
200-080458	147.6	148.45	0.01	0.39	0.81	0.0965
200-080458	151.55	152.4	0.08	3.5	6.27	1.1253
200-080458	154.55	155.95	0.03	1.03	3.7	0.5466
200-080458	120.05	120.55	0.02	0.46	2.51	0.0965
200-080458	120.55	121.05	0.01	0.09	0.17	3.2794
200-080458	137.25	137.9	0.01	0.16	1.74	0.2572
200-080458	139.75	140.9	0.01	0.08	0.16	0.0322
200-080458	142.7	143.25	0.03	0.1	16.48	1.0931
200-080458	144.45	144.65	0.05	0.33	25.76	1.9933
200-080458	150.5	151.55	0.01	3.9	0.65	1.9933
200-080458	152.4	153.3	0.18	7.8	14.51	6.5266
200-080458	153.3	153.9	0.06	1.04	4.49	0.3215

Figura 19

Vista 3D de los datos.



La Veta Cristina tiene rumbo NW, se aprecia los taladros mineralizados. *Nota:* Propia.

6.2.3. Recepción de la Topografía y Límites de Proyecto.

Es necesario disponer de la topografía actualizada y de los límites vigentes del proyecto para construir un sólido que represente el contorno de trabajo en el modelo 3D. Estos límites se definen a partir de la información cartográfica y de las coordenadas resumidas en la Tabla 10, y se ilustran en forma de sólidos en la Figura 20.

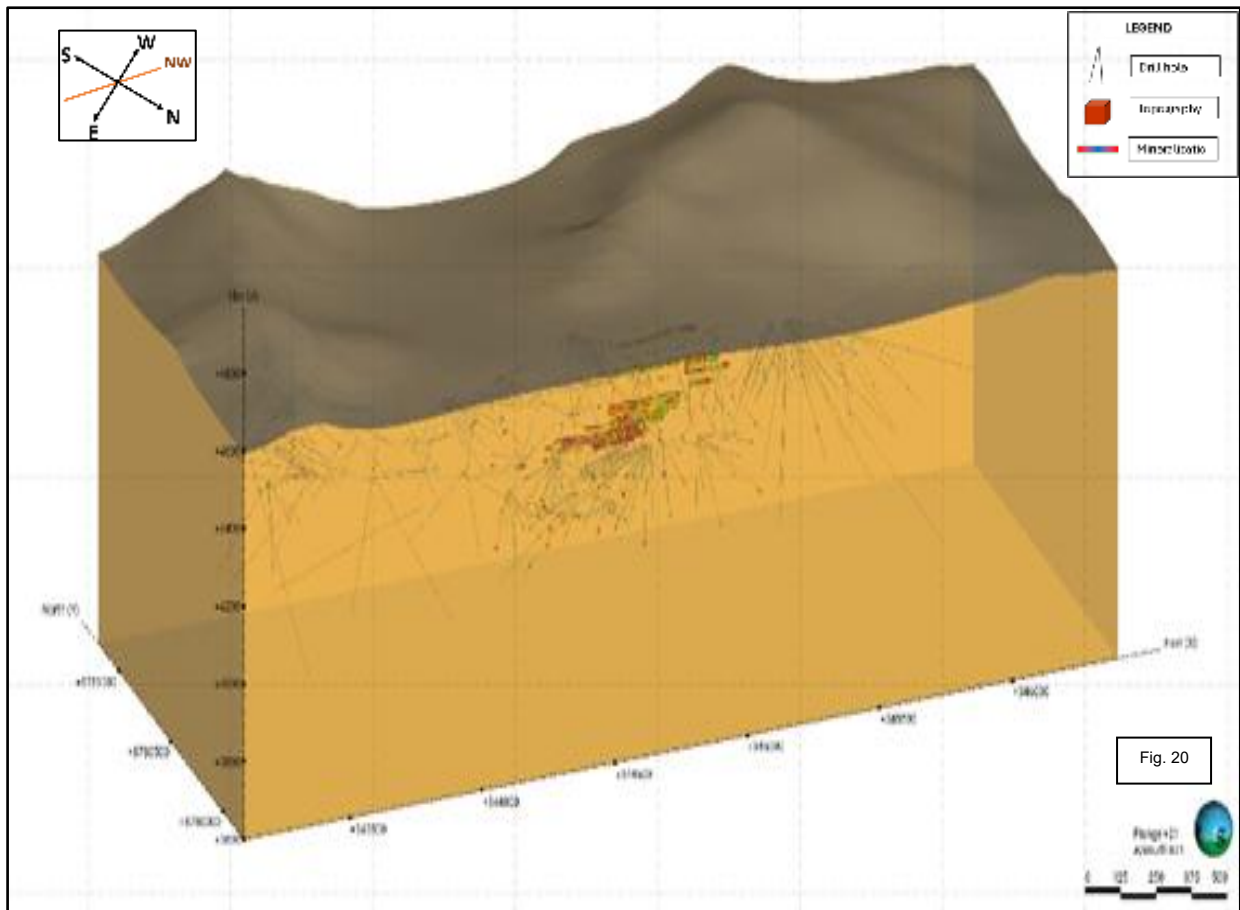
Tabla 10

Límites.

	Mínimo	Máximo
Este	343100	346400
Norte	8779800	8781200
Elevación	3600	4917

Figura 20

Límites del proyecto.



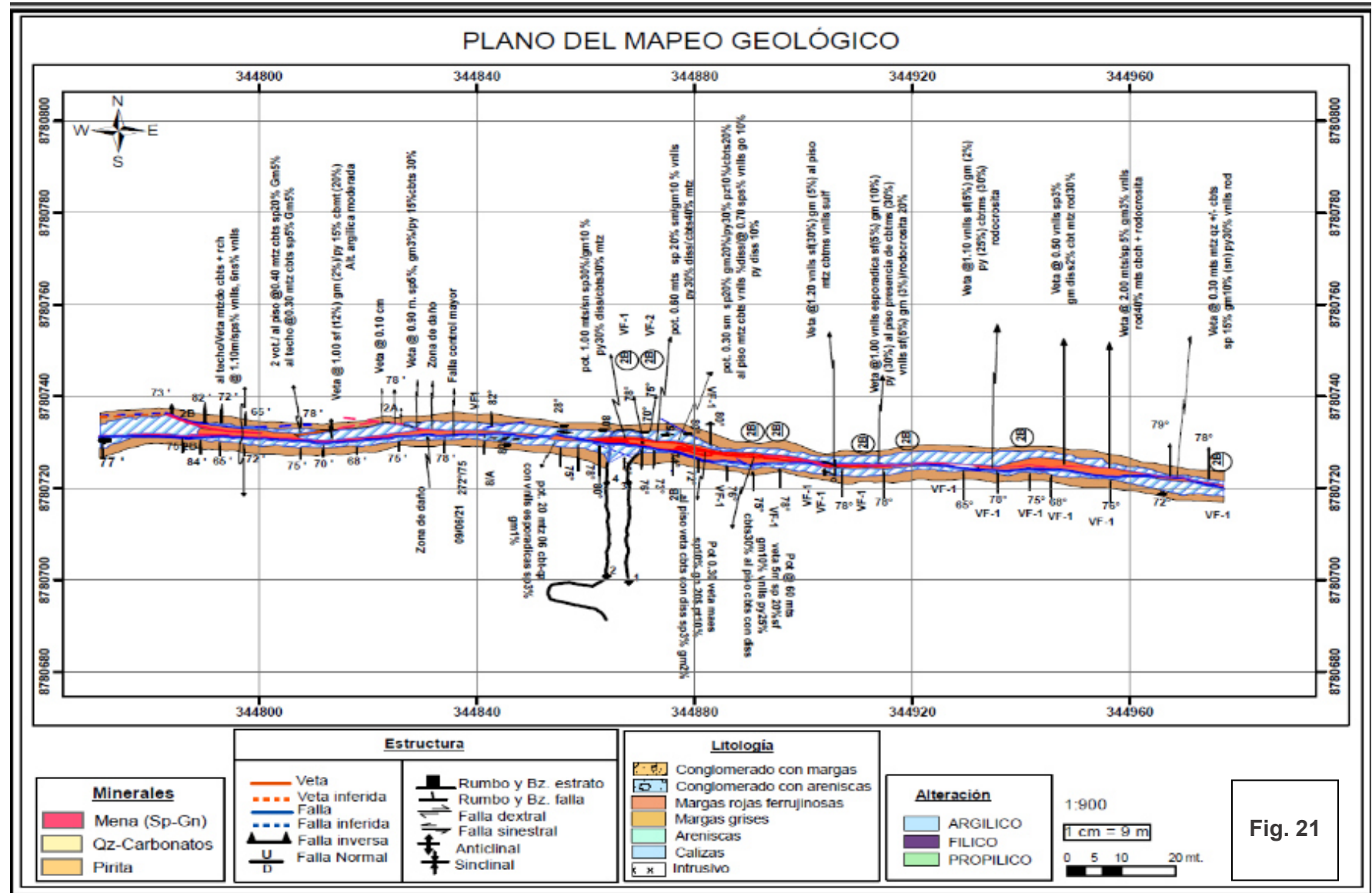
Nota: Propia

6.2.4. Recepción de las Interpretaciones Geológicas en 2D

Es indispensable contar con interpretaciones de la geometría de la veta en 2D, realizadas en planta y secciones, a partir del mapeo geológico de labores subterráneas y de información de superficie. Estas interpretaciones sirven de guía para el modelamiento 3D y se sintetizan en el plano de mapeo geológico mostrado en la Fig. 21.

Figura 21

Interpretación de la Veta Cristina en base al mapeo de campo.



Nota: Propia.

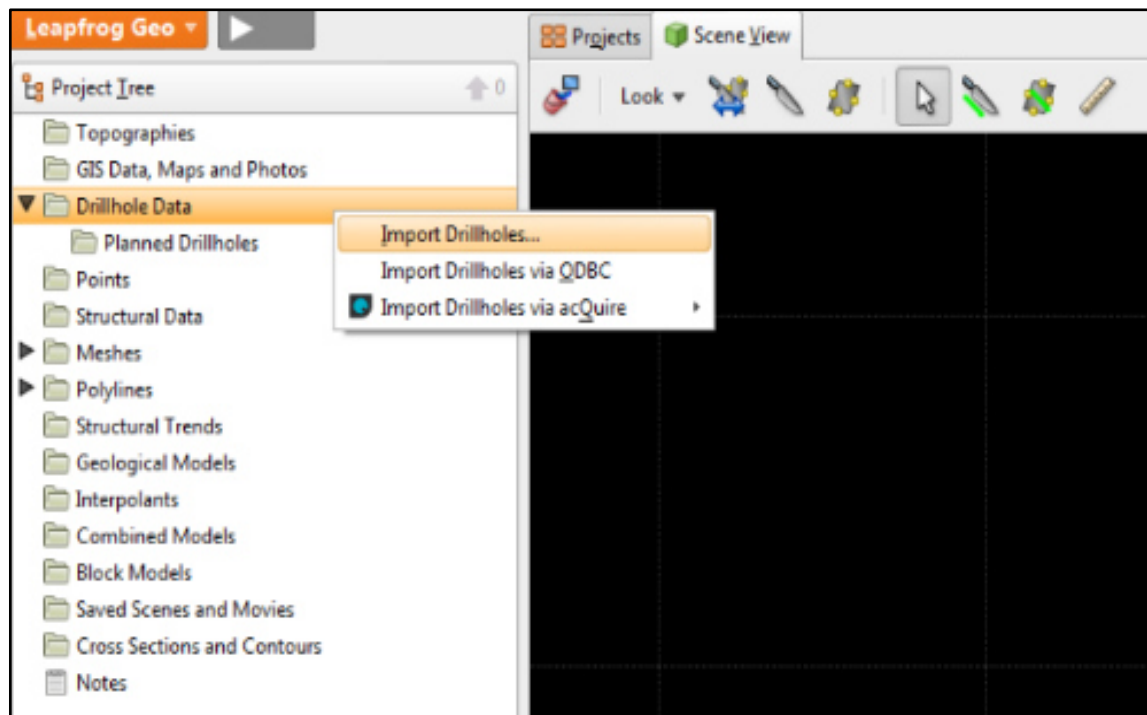
6.2.5. Elaboración e Interpretación Geológica en 3D usando Leapfrog Geo.

6.2.5.1. Importación y Validación de Datos de Taladros Diamantinos y Canales.

En esta fase se importan el proyecto de Leapfrog Geo los archivos de sondajes diamantinos, verificando la consistencia entre las tablas de collar, survey y assay (longitudinales, profundidades finales y continuidad de intervalos). Esta validación asegura que la ubicación espacial de los taladros y de cada muestra sea correcta antes de integrarlos al modelo geológico.

Figura 22

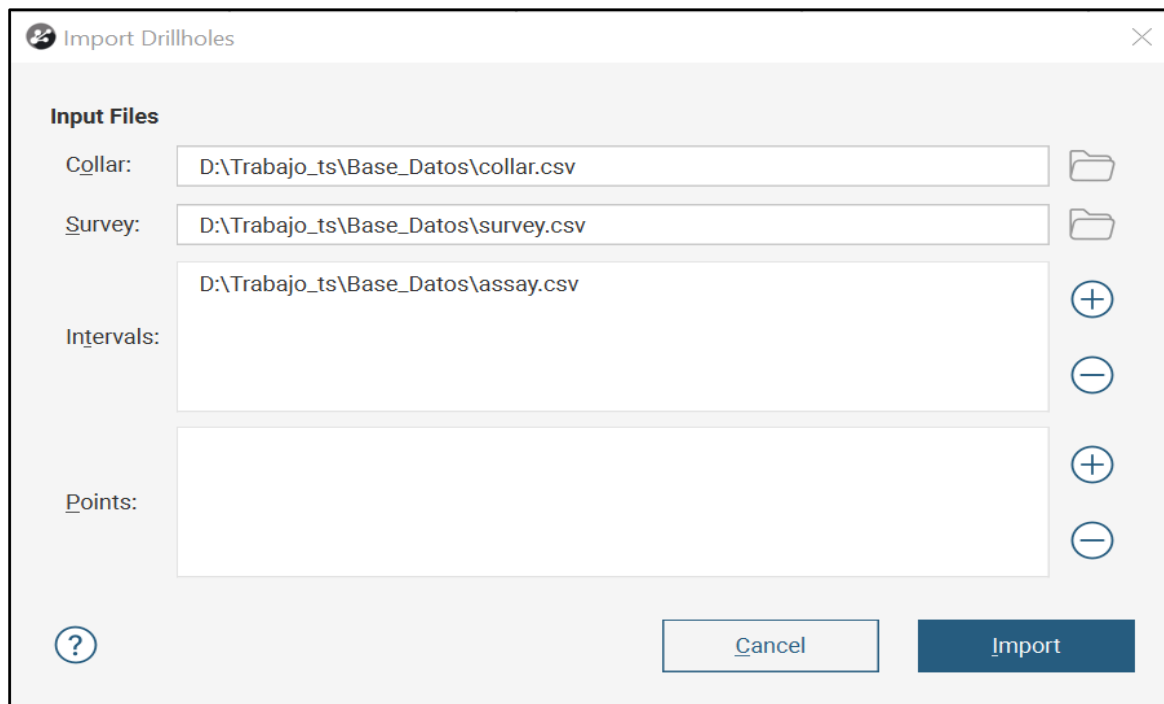
Importar los drillholes al Leapfrog Geo.



Nota: Leapfrog Geo-Propia.

Figura 23

Se selecciona los archivos CSV de los datos Collar, Survey y Assay.



Nota: Leapfrog Geo-Propia.

6.2.5.2. Importando Mapeos y Secciones Base. Cada uno de los mapeos y secciones interpretadas por los geólogos es importado en el Leapfrog Geo, lo cual nos permitirá realizar nuestro modelamiento en el software en base a la interpretación geológica de cada una de las estructuras. Esta interpretación debe ajustarse fielmente a la información y criterios geológicos existentes.

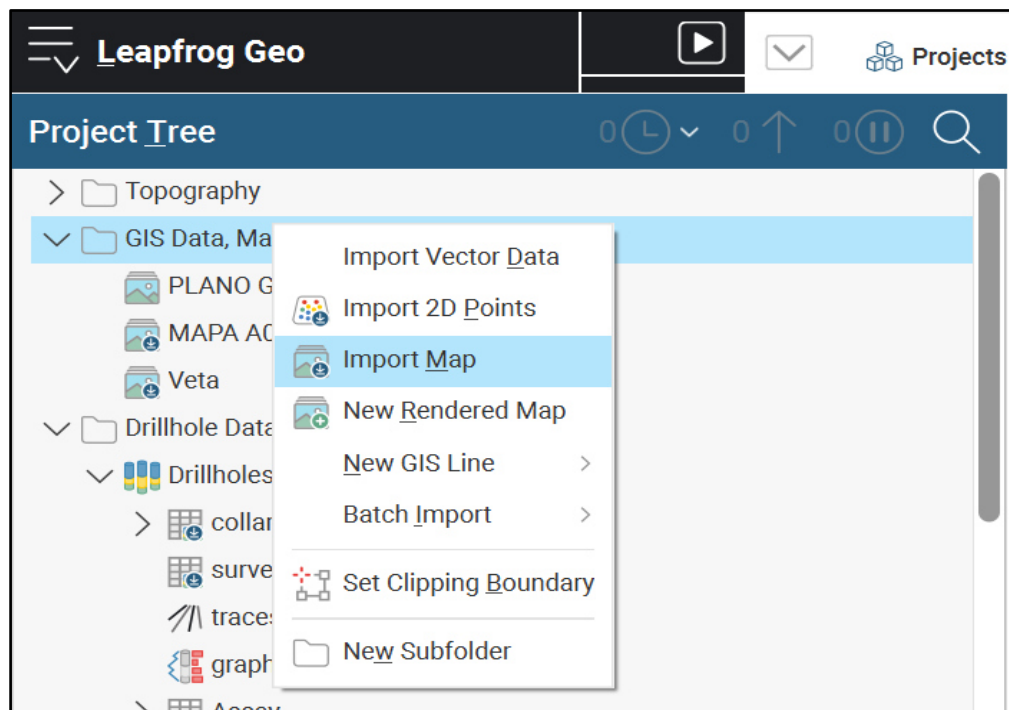
A partir de estos mapeos se reconstruyen en el modelo de Leapfrog Geo las vetas principales, sus ramales, los segmentos sigmoideos y las fallas relevantes, incluyendo cabalgamientos y otras estructuras que condicionan la continuidad de la veta Cristina.

La interpretación geológica del modelo debe realizarse con la participación del geológico responsable de la zona, a fin de garantizar que la geometría definida en 3D sea coherente con las observaciones de campo y con la experiencia local en el yacimiento.

En la carpeta “**GIS Data, Maps and Photos**” se almacenan los planos georreferenciados, mapeos y topografías de labores, los cuales se incorporan al proyecto mediante la opción “**Import Map**”.

Figura 24

Iconos para importar imágenes a un proyecto de Leapfrog Geo.

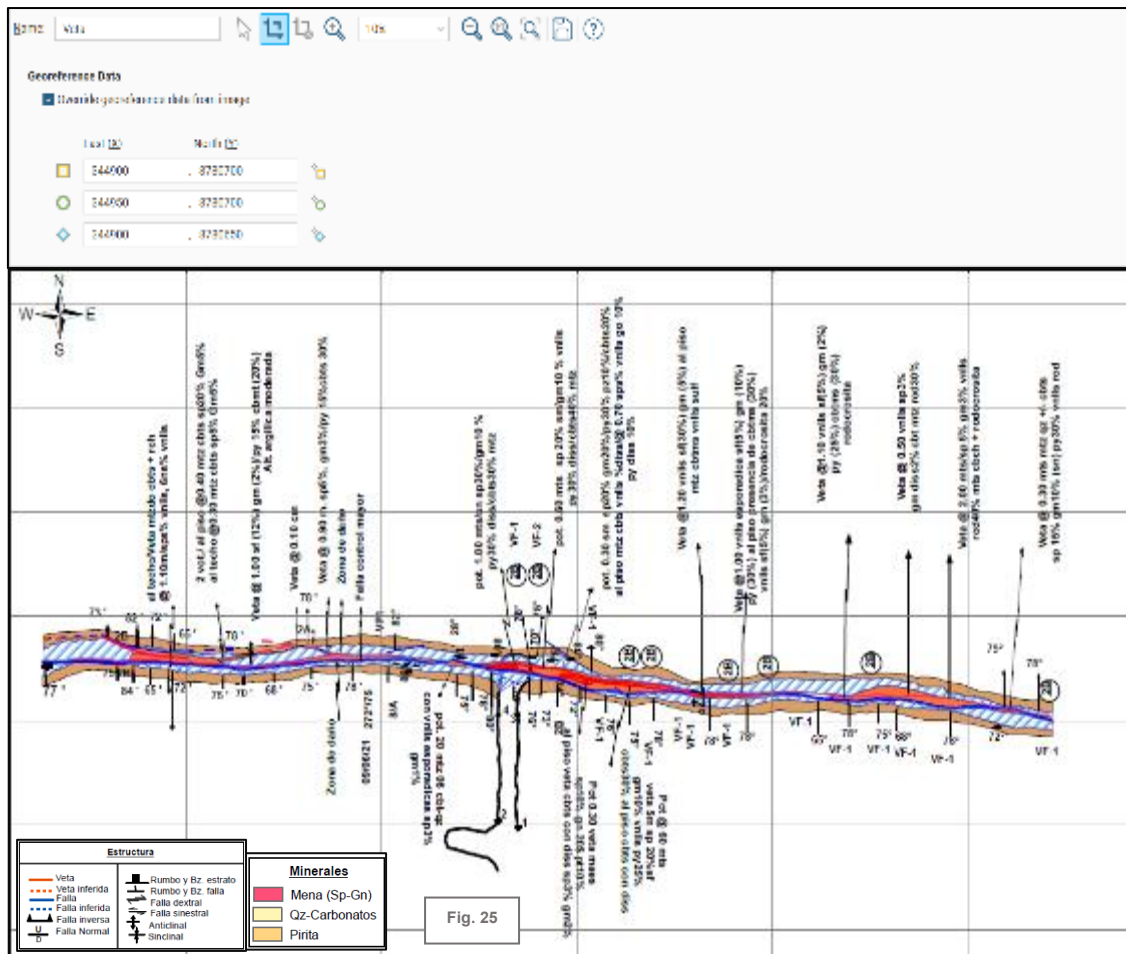


Nota: Leapfrog Geo-Propia.

Continuando, se selecciona el plano a importar, luego en la ventana de **Import Imagen** se debe georreferenciar con 03 puntos no colineales (ver Figura 25).

Figura 25

Georreferenciar una imagen en Leapfrog Geo.

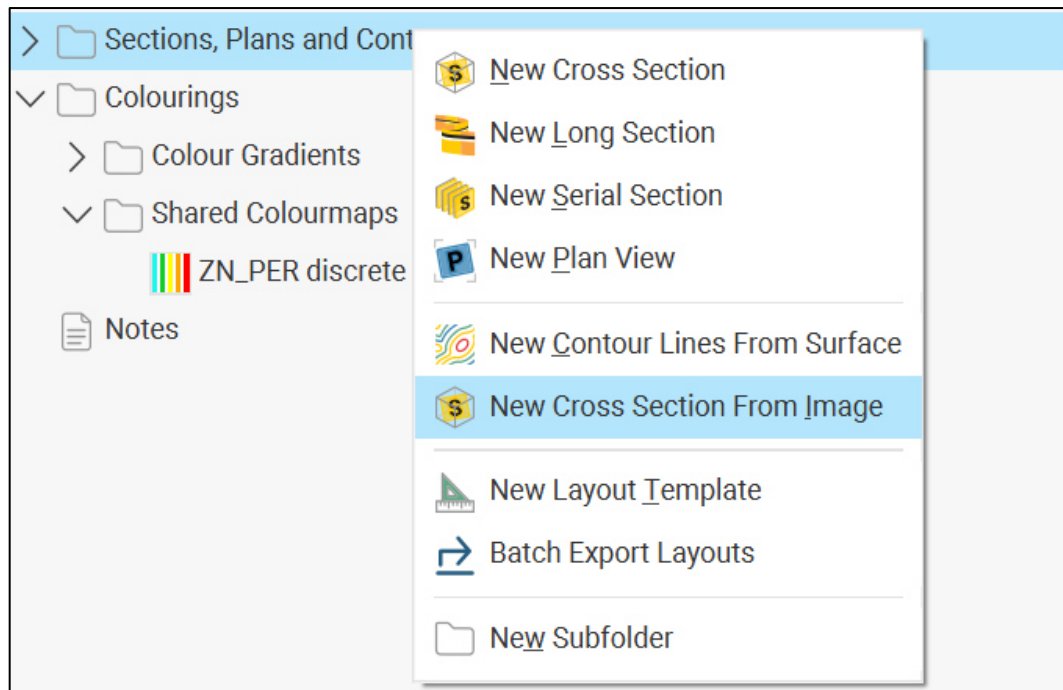


Nota: Leapfrog Geo-Propia.

Las interpretaciones de secciones geológicas se importan en la carpeta **“Cross Section and Contours”**, mediante la opción **“New Cross Section From Image”** como se observa en la Figura 26; y se realiza el mismo procedimiento de mapeos.

Figura 26

Importación de Secciones al Leapfrog Geo.

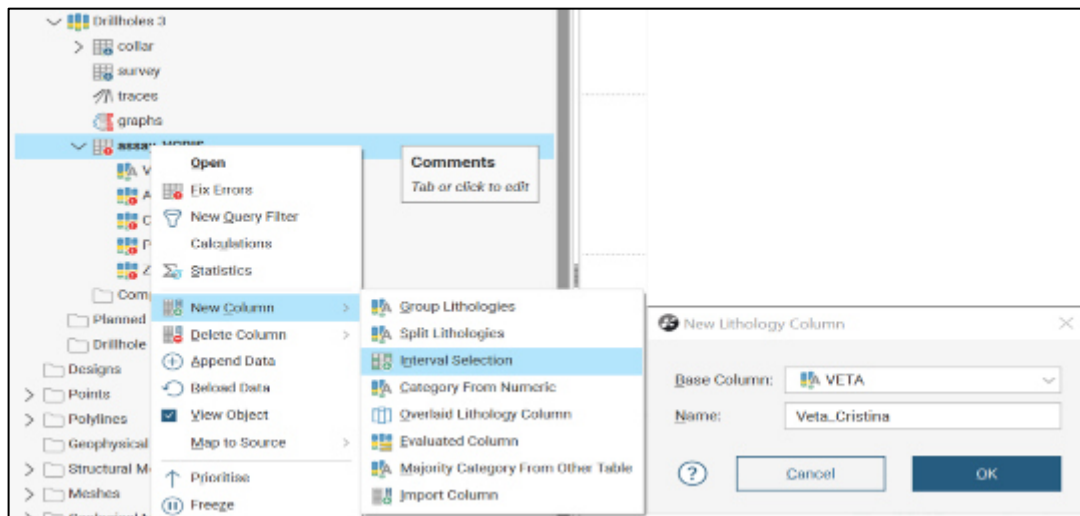


Nota: Leapfrog Geo-Propia.

6.2.5.3. Selección de datos geológicos para modelar la veta. En la carpeta Assay de los Drillholes Data, se creará un archivo con el nombre respectivo de la zona (Ejm: Veta).

Figura 27

Crear el archivo de selección para la Veta Cristina.

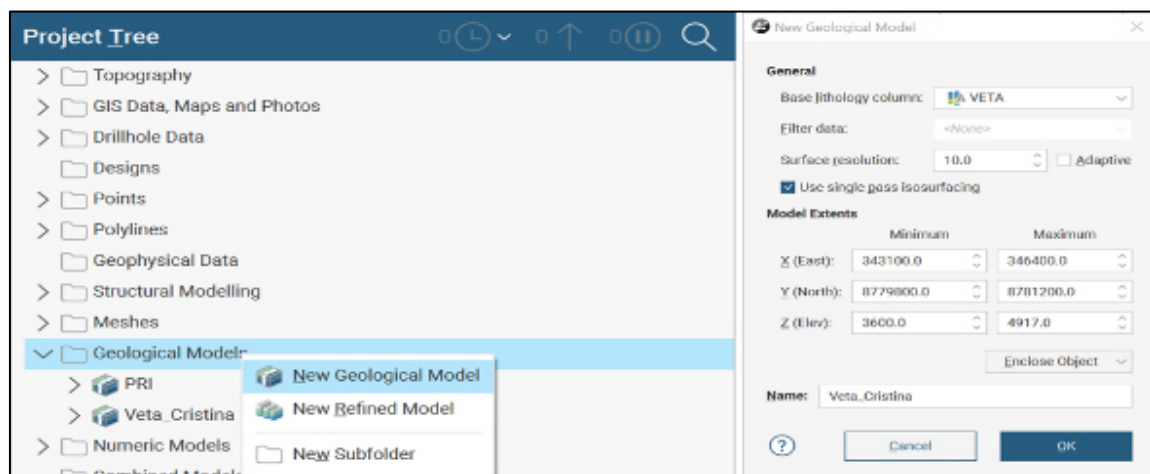


Nota: Leapfrog Geo-Propia.

6.2.5.4. Elaboración de la geometría de la Veta Cristina. En la carpeta Geological Models, se creará un archivo con el nombre respectivo de las estructuras o dominios a modelar (Por Ejm: Veta_Cristina).

Figura 28

Crear el archivo para la elaboración de los modelos.

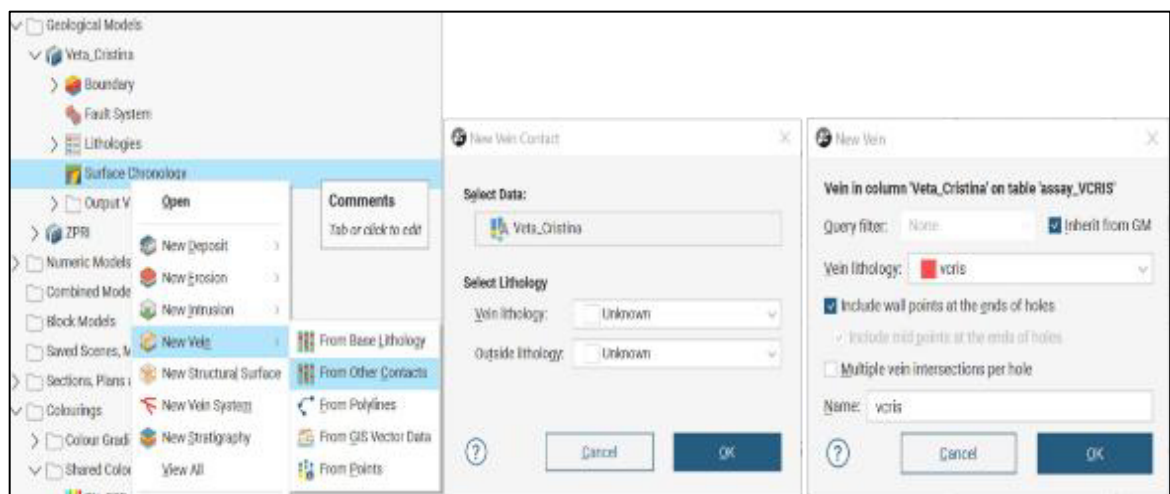


Nota: Leapfrog Geo-Propia.

Para la elaboración de los modelos de estructuras a través de los archivos de selección debemos utilizar la opción **Surface Chronology / New Vein / From Other Contacts**; y para crear un modelo mediante polylíneas usaremos **Surface Chronology / New Vein / From Polyline** (ver Figura 29).

Figura 29

Elaboración de modelos de Estructuras utilizando archivos de selección.

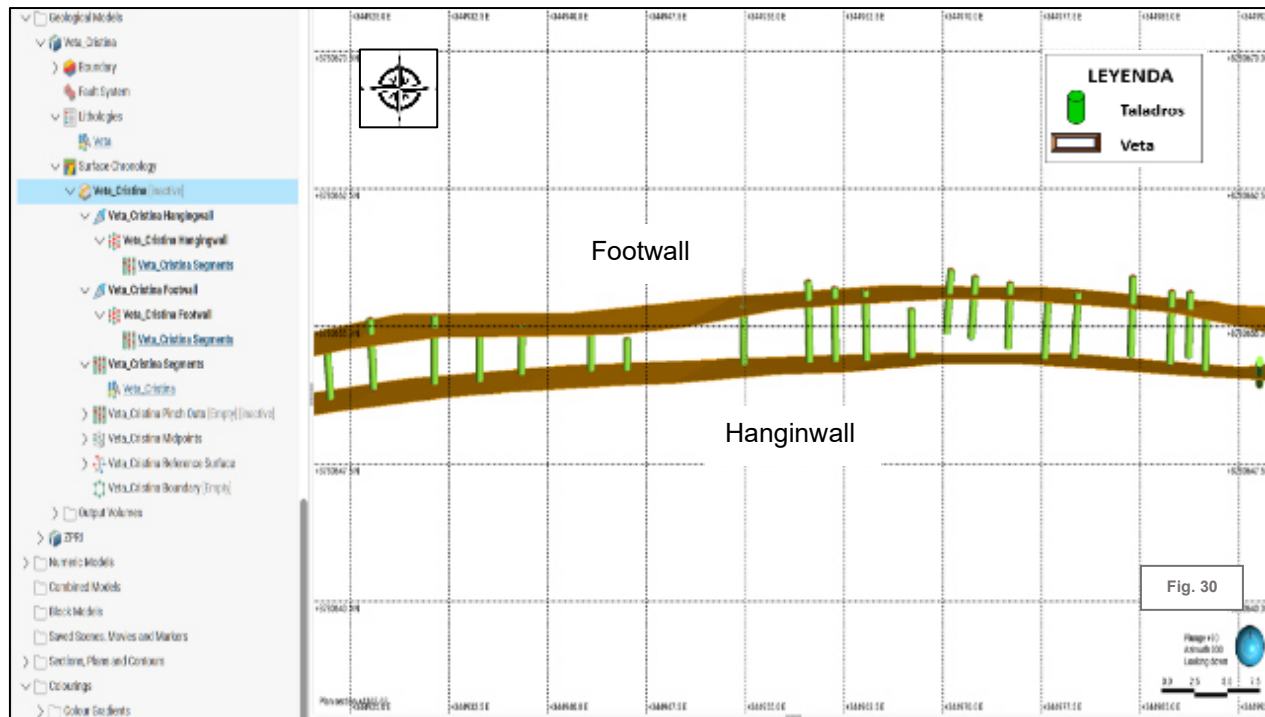


Nota: Leapfrog Geo-Propia.

Luego se genera las superficies de control tanto el techo (hanging wall) como el piso (footwall) de la veta. En la Figura 30 se observa las superficies de control de la veta para la geometría.

Figura 30

Generación de la superficie de control para la geometría.

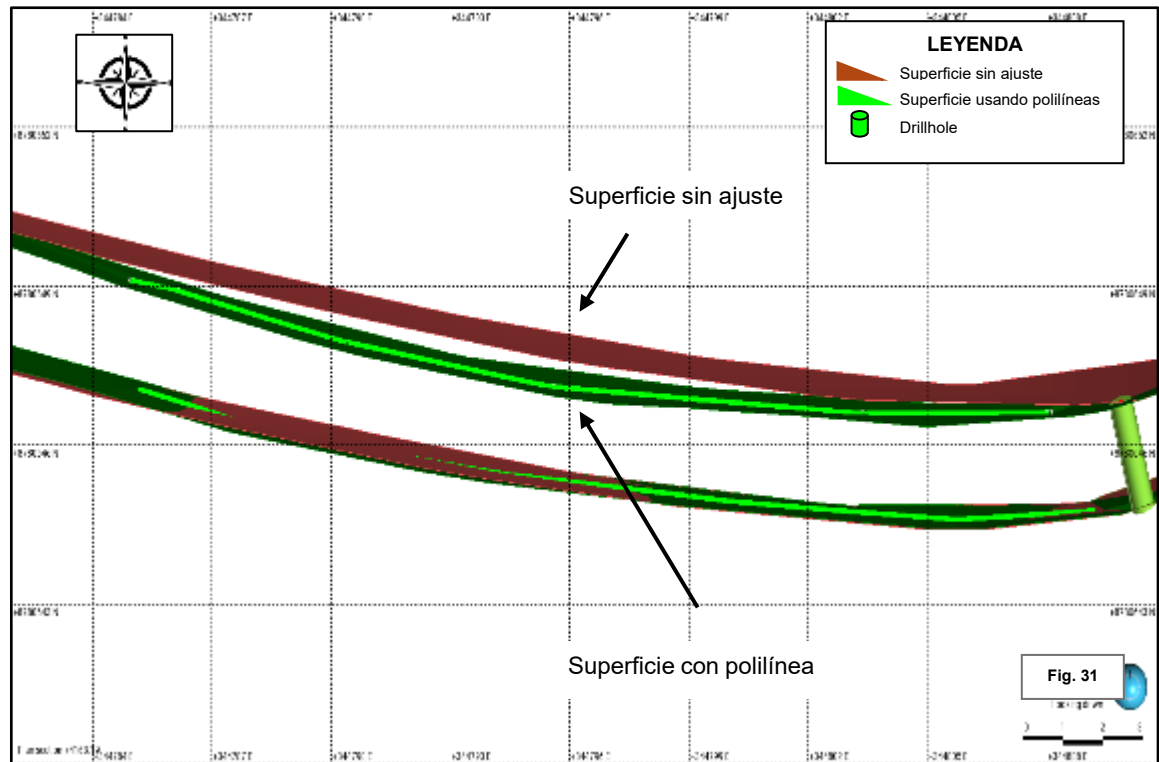


Nota: Leapfrog Geo-Propia.

6.2.5.5. Ajuste de geometría usando polilíneas. Para poder ajustar la geometría al mapeo y secciones, se usan polylines y puntos, estos deben realizarse dentro de la superficie que se quiere modelar. La Figura 31 indica las polilíneas utilizadas para el ajuste de la geometría de la Veta Cristina.

Figura 31

Ajuste que se ha hecho usando polilíneas.



Nota: Leapfrog Geo-Propia.

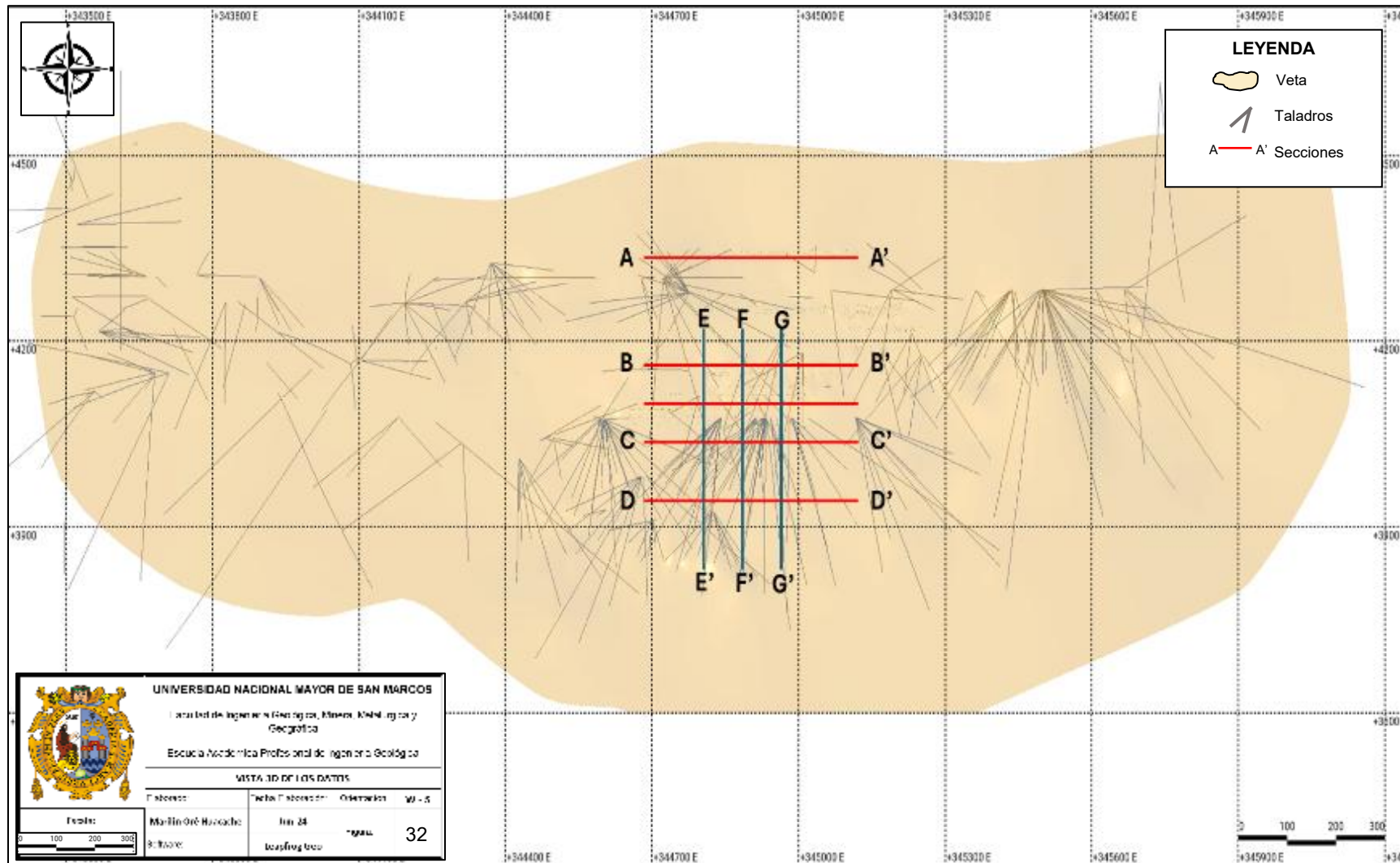
6.2.5.6. Validación de modelo Geológico. La validación del Modelo Geológico se realiza a través de los siguientes procedimientos:

- **Validación Visual.**

En la validación visual se revisa que los sólidos de la veta reproduzcan adecuadamente la ubicación de los impactos de sondajes y la geometría interpretada en planta y en secciones. En la Figura 32 se ilustra la disposición de los cortes longitudinales comprendidos entre las secciones A–A' y G–G', cuyos perfiles geológicos detallados se encuentran en las Figuras 33 a 39.

Figura 32

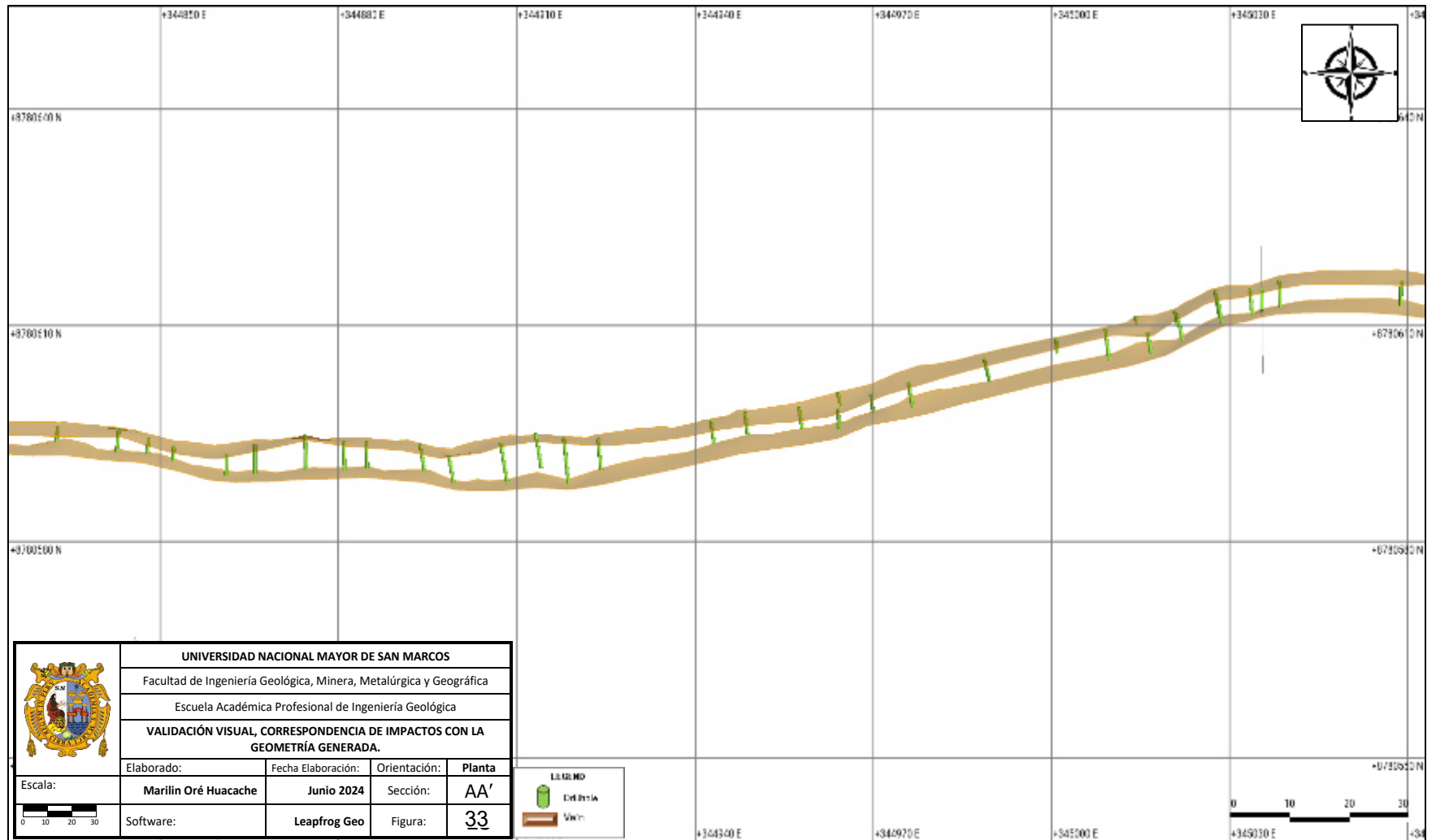
Vista longitudinal de la Veta Cristina.



Nota: Leapfrog Geo-Propia (Vista planta).

Figura 33

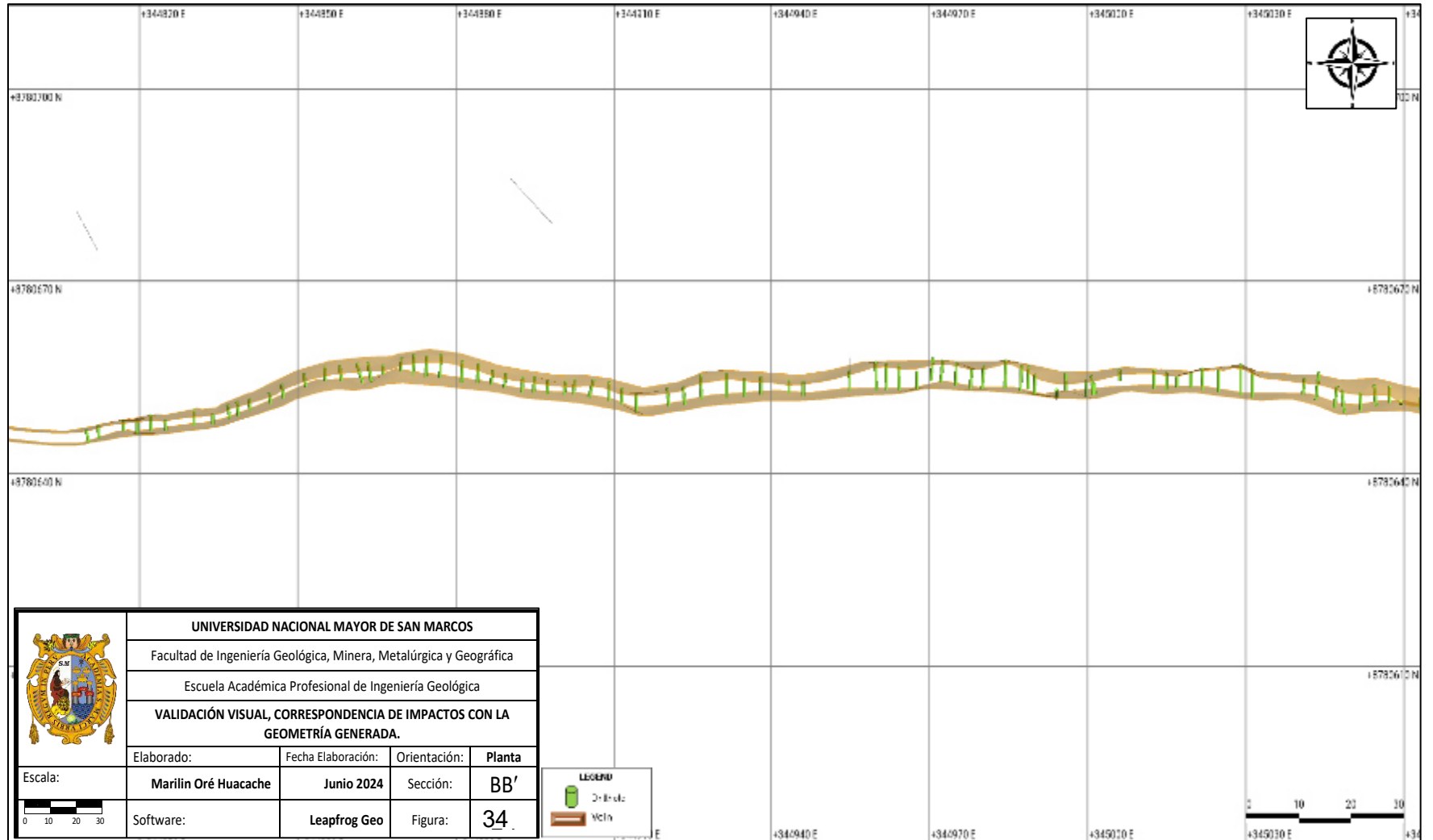
Sección AA', se muestra la validación visual; hay correspondencia de los impactos con la geometría generada.



Nota: Leapfrog Geo-Propia (Vista planta).

Figura 34

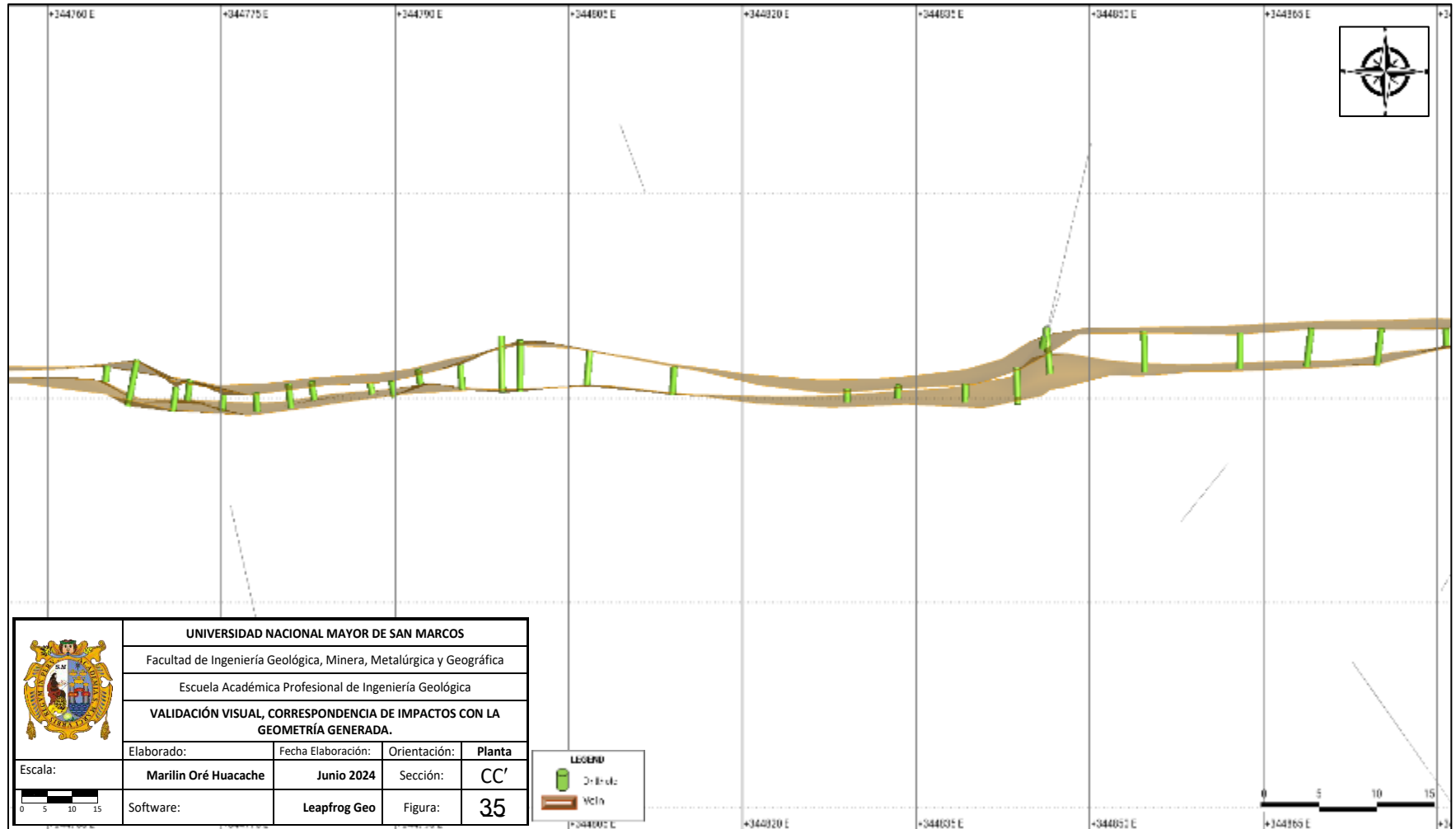
Sección BB', se muestra la validación visual; hay correspondencia de los impactos con la geometría generada.



Nota: Leapfrog Geo-Propia (Vista planta).

Figura 35

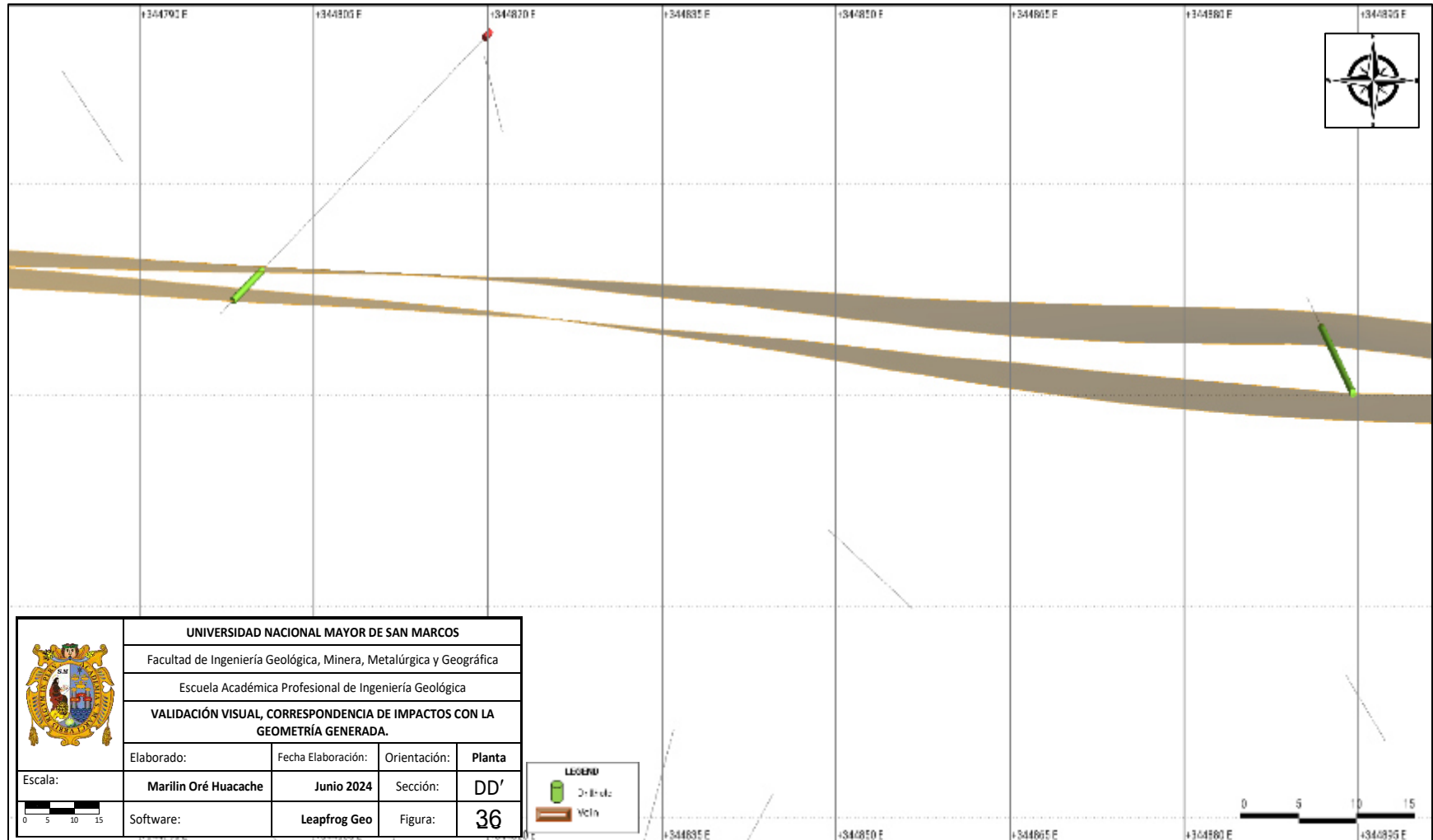
Sección CC', se muestra la validación visual; hay correspondencia de los impactos con la geometría generada.



Nota: Leapfrog Geo-Propia (Vista planta).

Figura 36

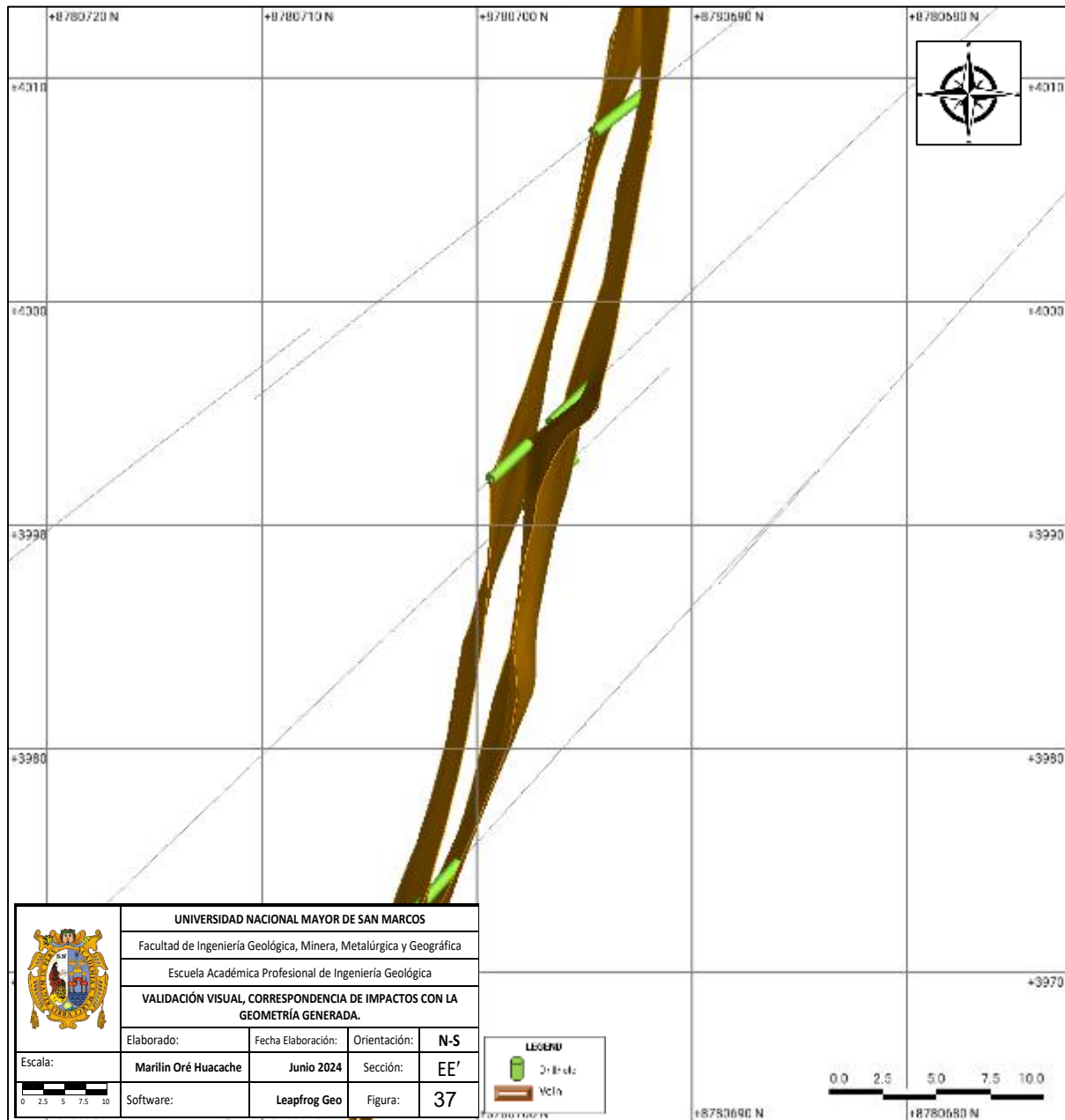
Sección DD', se muestra la validación visual; hay correspondencia de los impactos con la geometría generada.



Nota: Leapfrog Geo-Propia (Vista planta).

Figura 37

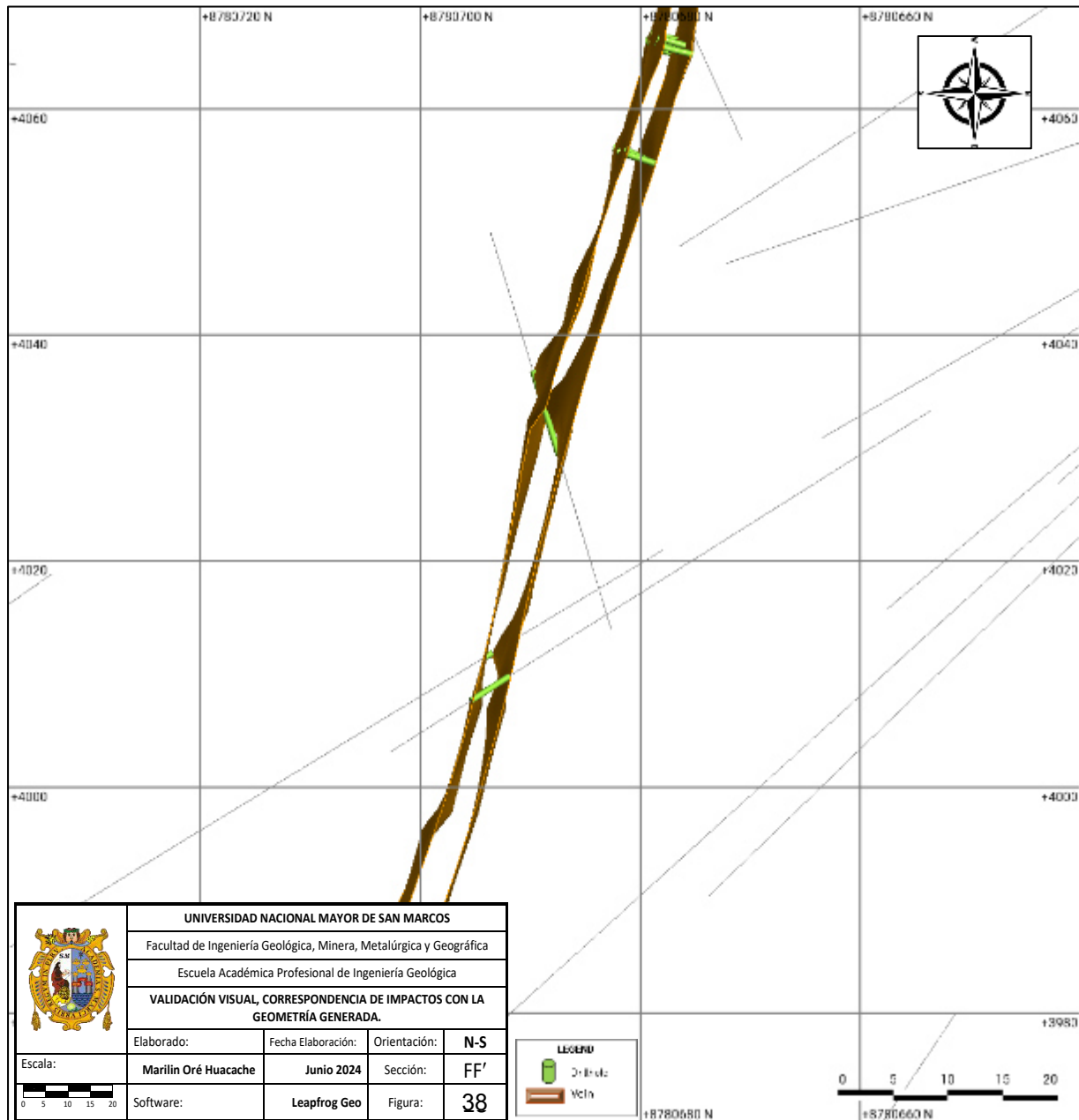
Sección EE', se muestra la validación visual; hay correspondencia de los impactos con la geometría generada.



Nota: Leapfrog Geo-Propia (Vista perfil).

Figura 38

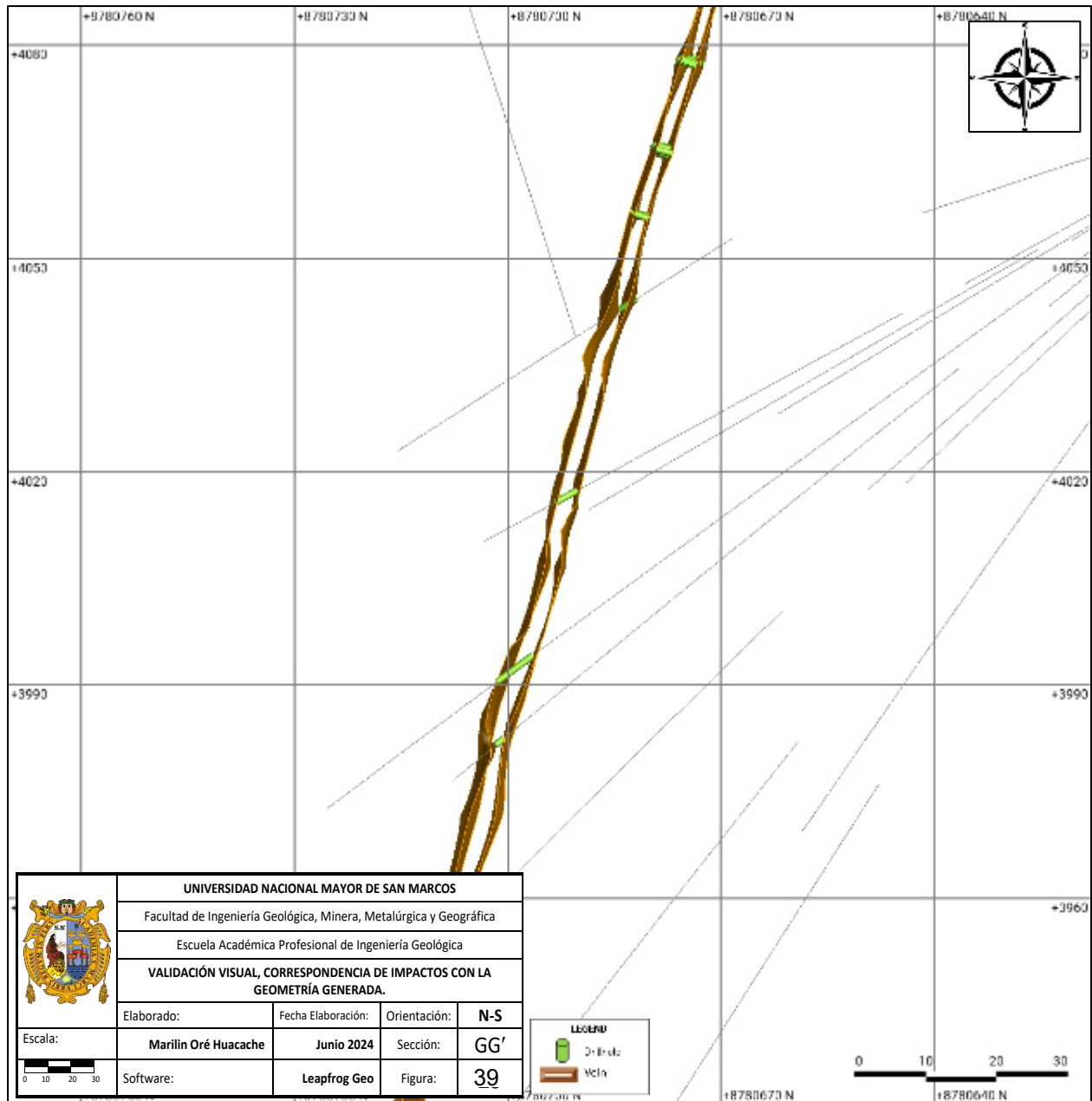
Sección FF', se muestra la validación visual; hay correspondencia de los impactos con la geometría generada.



Nota: Leapfrog Geo-Propia (Vista perfil).

Figura 39

Sección GG', se muestra la validación visual; hay correspondencia de los impactos con la geometría generada.



Nota: Leapfrog Geo-Propia (Vista perfil).

CAPÍTULO VII: ESTIMACIÓN DE RECURSOS MINERALES

7.1. Introducción.

Esta sección describe la metodología y los puntos claves para realizar el modelo geológico y la estimación de recursos minerales para la Veta Cristina, la evaluación de recursos aquí reportada es una representación razonable de los recursos minerales globales de zinc, plomo, plata y cobre. Los recursos minerales se han estimado de conformidad con las directrices de las mejores prácticas de estimación de recursos minerales y se informan de acuerdo con el código NI 43-101.

7.2. Pasos para la estimación de recursos minerales.

La metodología aplicada para la evaluación de recursos comprendió las siguientes etapas principales:

- Compilación y verificación de bases de datos.
- Elaboración del modelo geológico.
- Análisis exploratorio de datos (EDA).
- Análisis variográfico.
- Estimación de leyes.
- Validación de la estimación de leyes.
- Clasificación de recursos minerales.
- Evaluación de “perspectivas razonables de extracción económica” y selección de leyes de corte apropiadas.
- Elaboración de la Declaración de Recursos Minerales.

7.2.1. Base de datos de recursos.

La base de datos incluye un total de 1,481 taladros diamantinos con una longitud acumulada de 85,623.9 m y 10,687 canales con una longitud acumulada de 3,285.38 m totalizando 88,909.28 m.

Tabla 11

Resumen de los datos utilizados en la estimación de Recursos Minerales.

Tipo de muestras	# Sondajes/ Canales	# Muestras	Metros(m)
Muestras DDH	358	1,481	85,623.9
Muestras de Canales	1,237	10,687	3,285.38
Total		12,168	88,909.28

Nota: Propia

7.2.2. Elaboración del modelo de la estructura en Leapfrog Geo.

La estimación de recursos minerales en la veta Cristina se apoya en la interpretación geológica de cada cuerpo mineralizado, realizada a partir de los datos de muestreos de canales y sondaje diamantinos. En este proceso se han considerado los controles mineralógicos y estructurales observados en planta, secciones en tres dimensiones, integrando la información dentro del entorno de modelamiento del software Leapfrog Geo.

La mineralización de la Veta Cristina comprende galena, esfalerita y sulfosales que contienen plata (es decir, tetraedrita, proustita) con cuarzo, rodocrosita y pirita, también en zonas en forma de clavos estructuralmente controlados; con dimensiones de hasta 150 m de largo, con una extensión vertical de hasta 350 m.

Tabla 12

Abreviatura y nombre del sólido de la Veta Cristina.

Nombre veta	Abreviatura	Código	Nombre Wireframe
VETA CRISTINA	VCRIS	1020	Wf_vcris

Nota: Propia

7.2.3. Análisis Exploratorio De Datos (EDA).

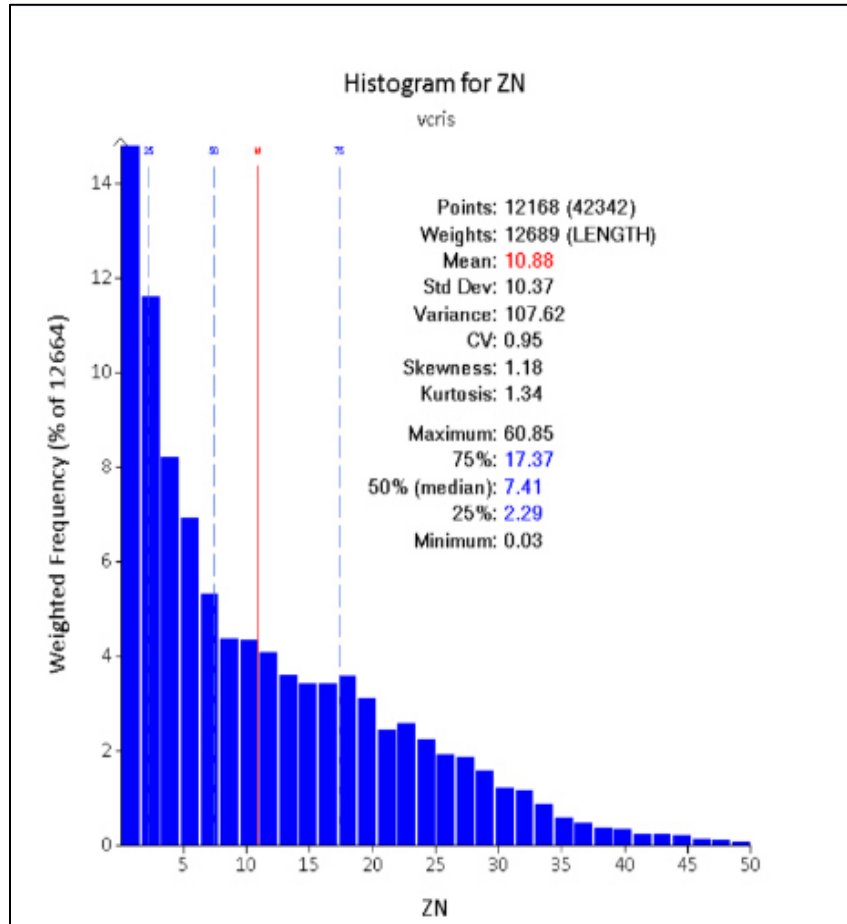
El análisis exploratorio de datos (EDA) se efectuó aplicando estadística descriptiva a las leyes de Zinc (Zn), Plomo (Pb), Plata (Ag) y Cobre (Cu). Para ello se generaron histogramas, curvas de probabilidad acumulada y diagrama de cajas (box plots), herramientas que permiten reconocer la forma de la distribución, la presencia valores atípicos y posibles subpoblaciones en los datos.

1. Elaboración de Histogramas.

El histograma es un gráfico de frecuencias relativas donde los datos se aseguran en clases de igual amplitud; a partir de él es posible obtener medidas de posición y de dispersión como la media, la mediana y el coeficiente de variación (CV), así como identificar la existencia de una o más poblaciones y la presencia de valores altos erráticos. En las Figuras 40, 41, 42 y 43 se representan los histogramas correspondientes a los elementos Zn, Pb, Ag y Cu, respectivamente.

Figura 40

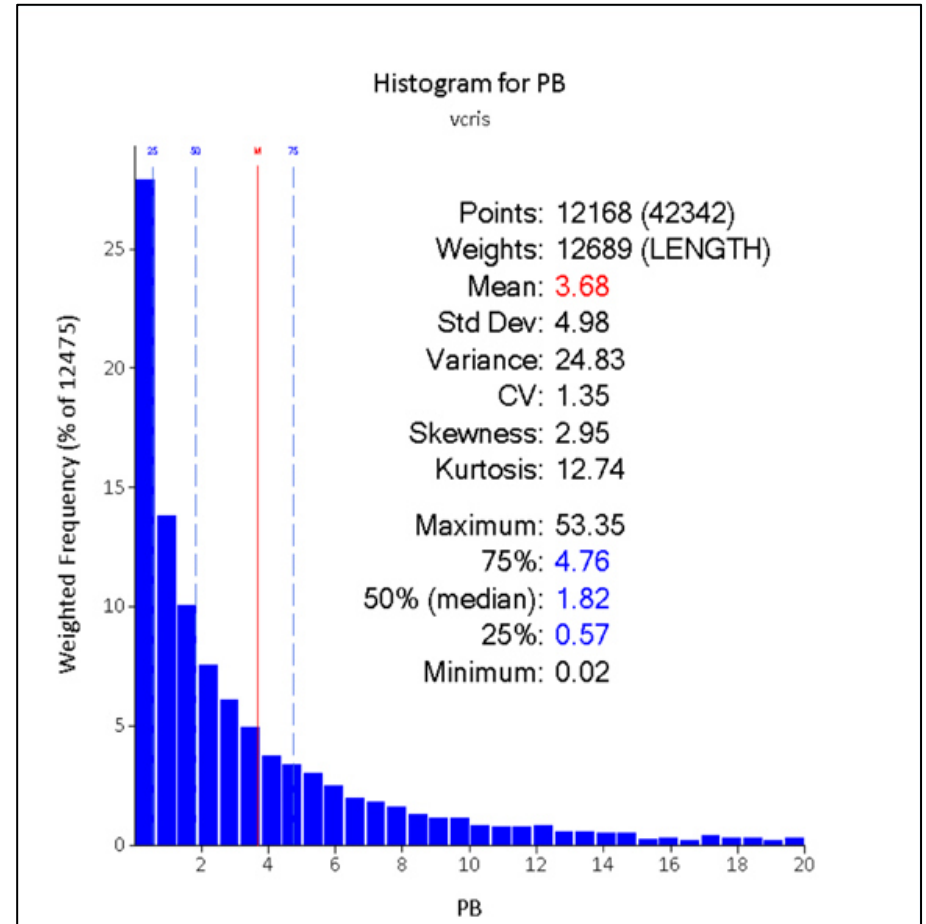
Histograma de las leyes de Zn.



Nota: Supervisor© Software-Propia.

Figura 41

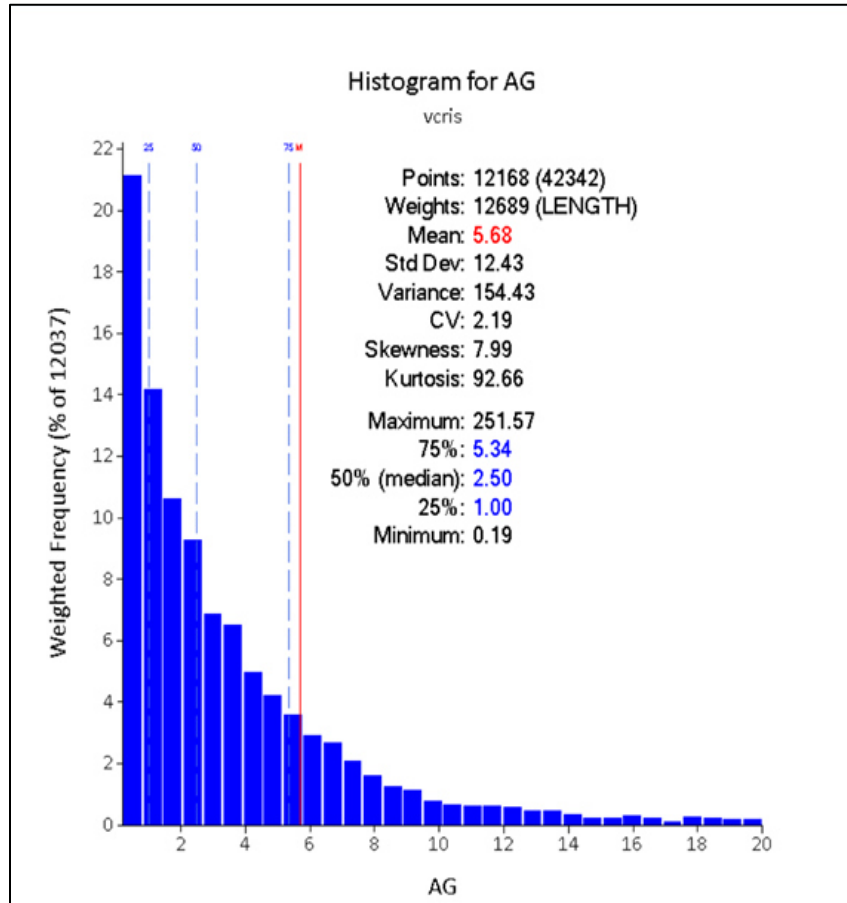
Histograma de las leyes de Pb.



Nota: Supervisor© Software-Propia.

Figura 42

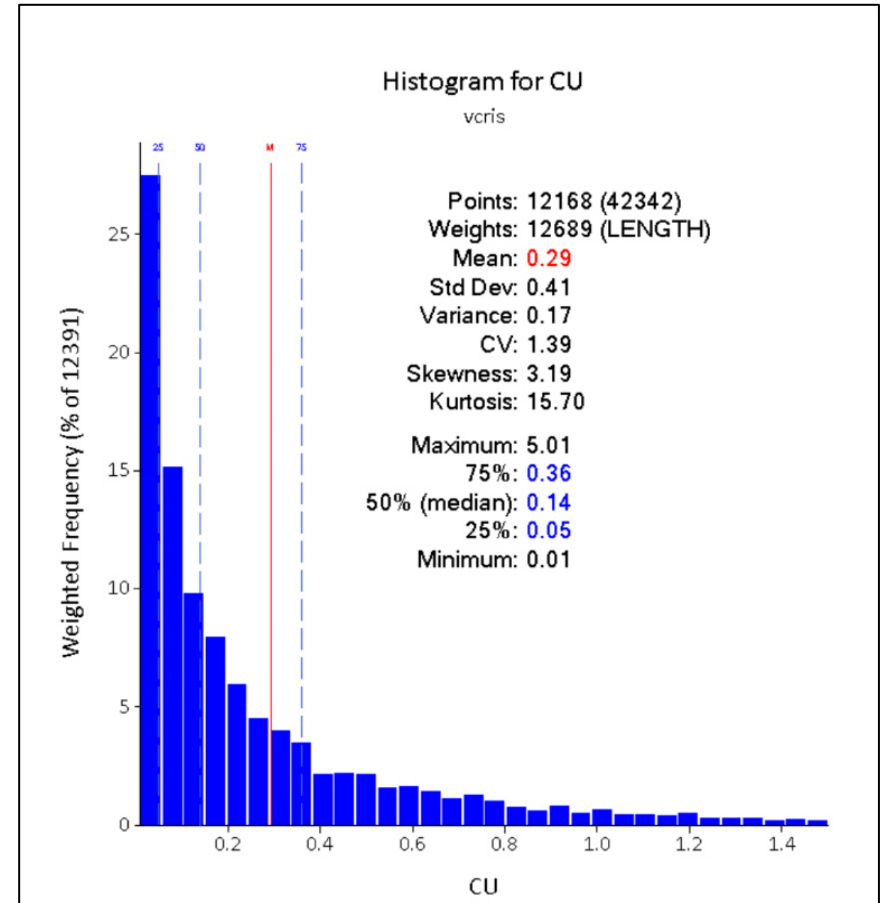
Histograma de las leyes de Ag.



Nota: Supervisor© Software-Propia.

Figura 43

Histograma de las leyes de Cu.



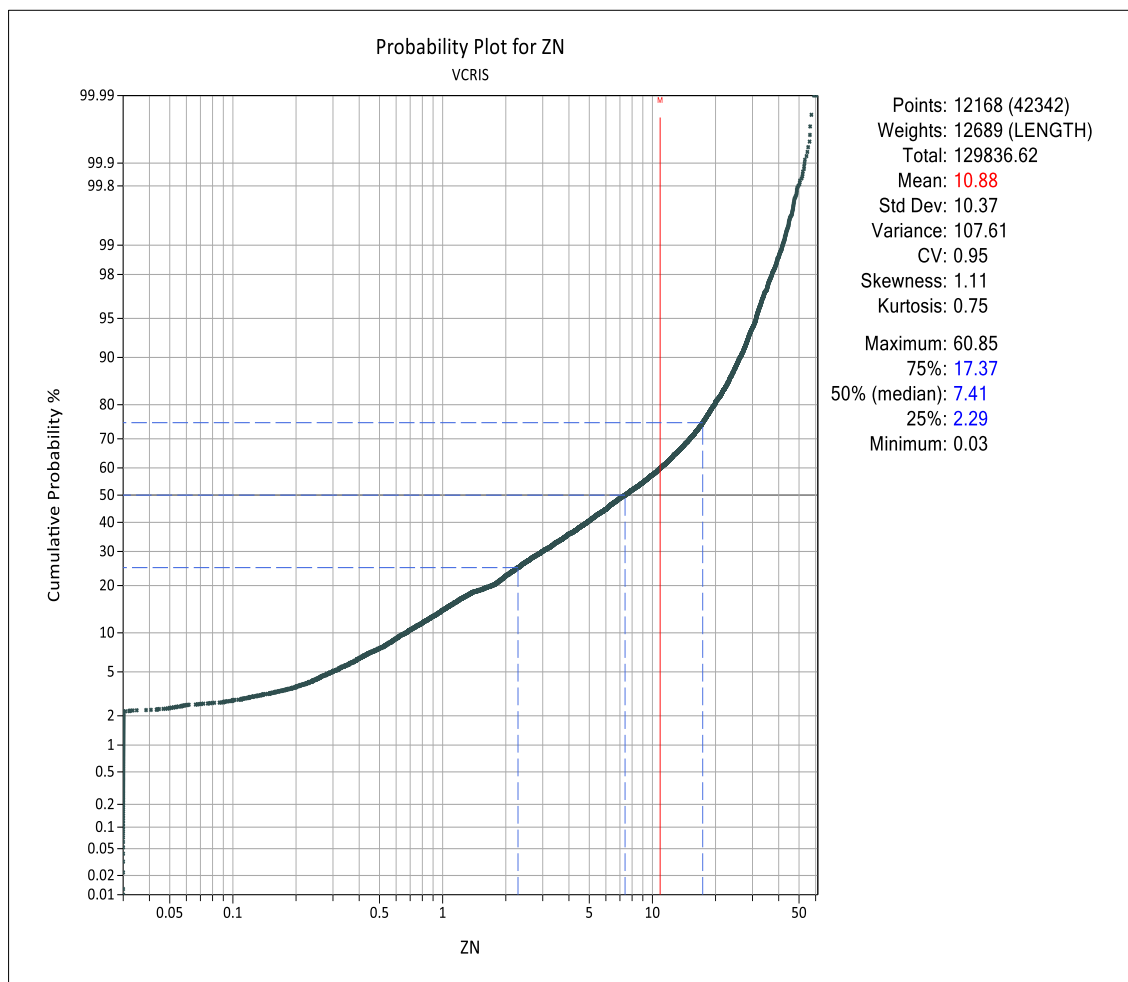
Nota: Supervisor© Software-Propia.

2. Curvas de Probabilidad Acumulada.

Estas gráficas nos permiten ver las distribuciones de las poblaciones dentro un dominio geológico. Inflexiones en la curva pueden deberse a mezcla de poblaciones. Es muy útil usar esta gráfica para determinar los valores de capping u outliers (se considera a partir del quiebre de la curva).

Figura 44

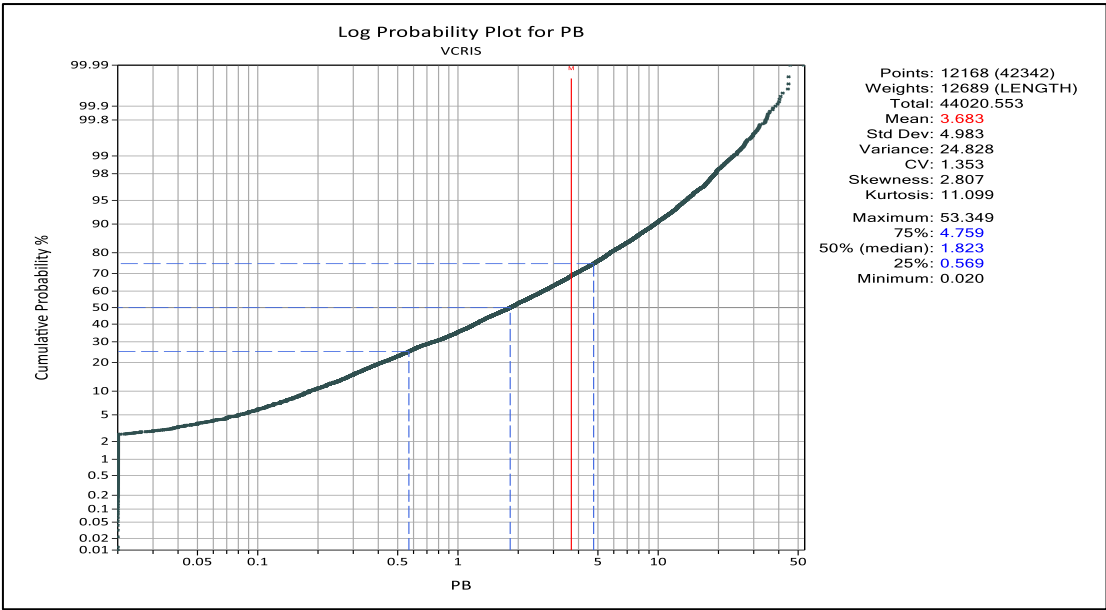
Curva de probabilidad acumulada de las leyes de Zn.



Nota: Supervisor© Software-Propia

Figura 45

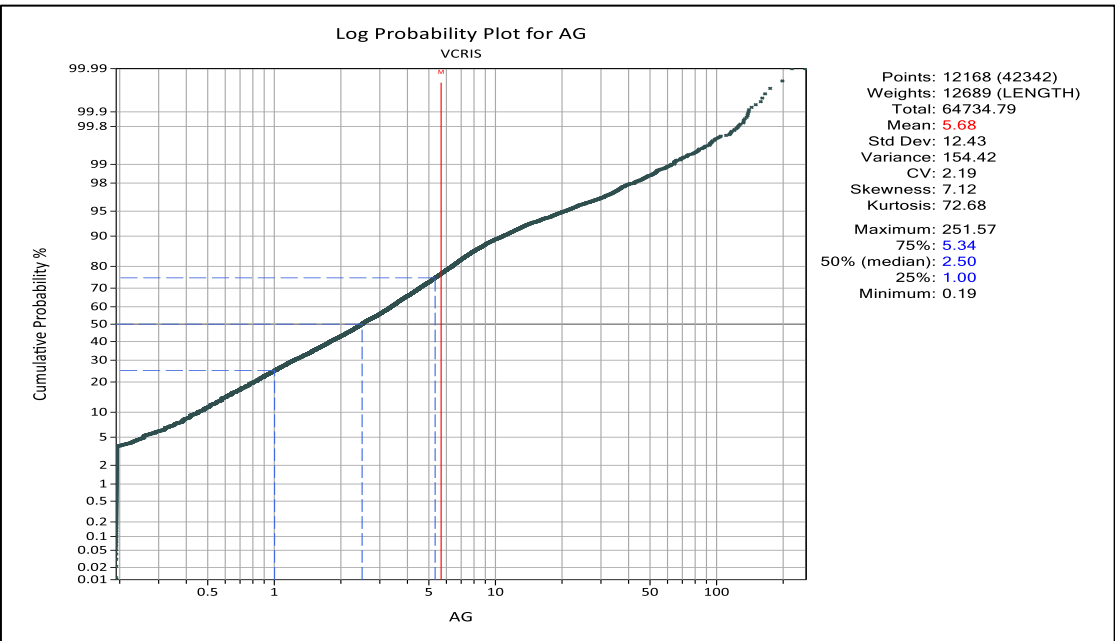
Curva de probabilidad acumulada de las leyes de Pb.



Nota: Supervisor© Software-Propia.

Figura 46

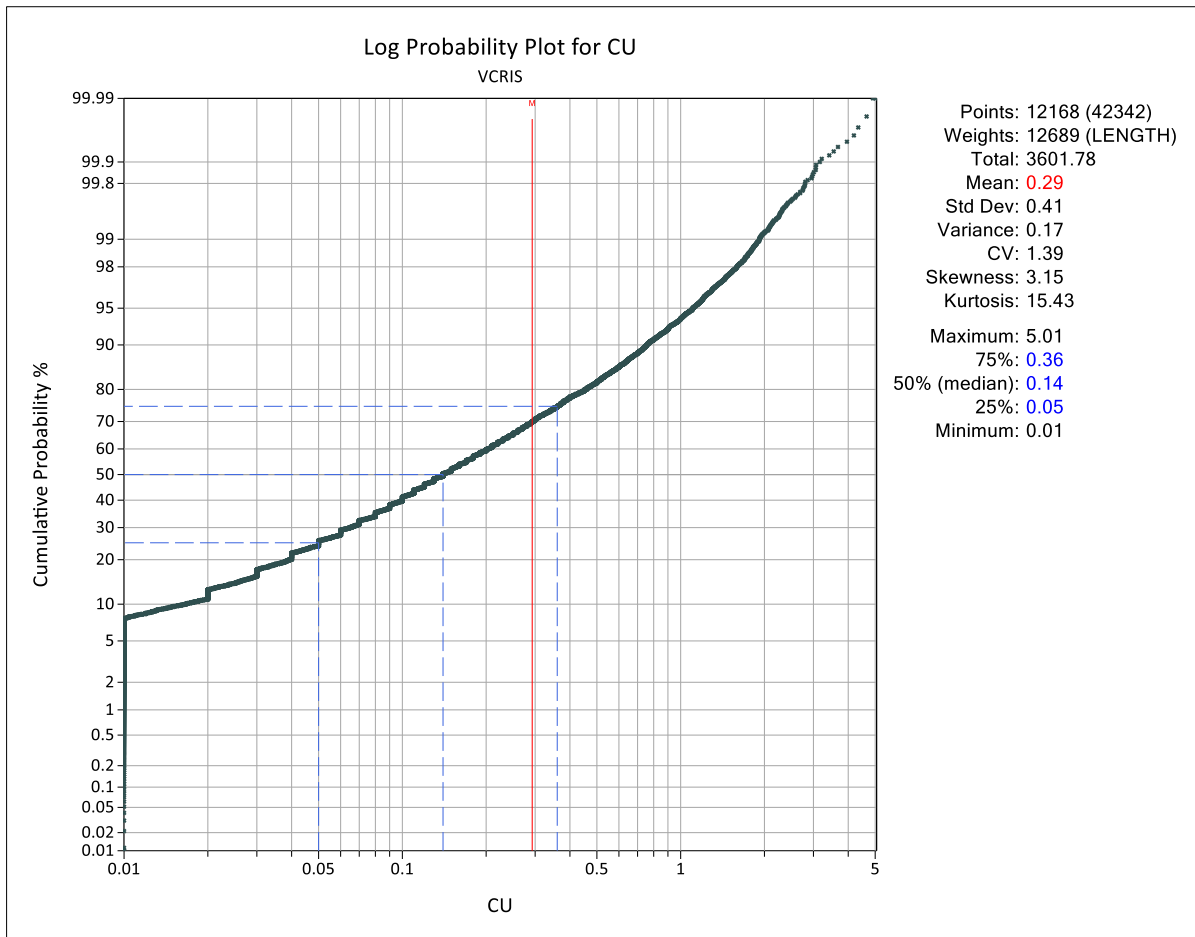
Curva de probabilidad acumulada de las leyes de Ag.



Nota: Supervisor© Software-Propia.

Figura 47

Curva de probabilidad acumulada de las leyes de Cu.



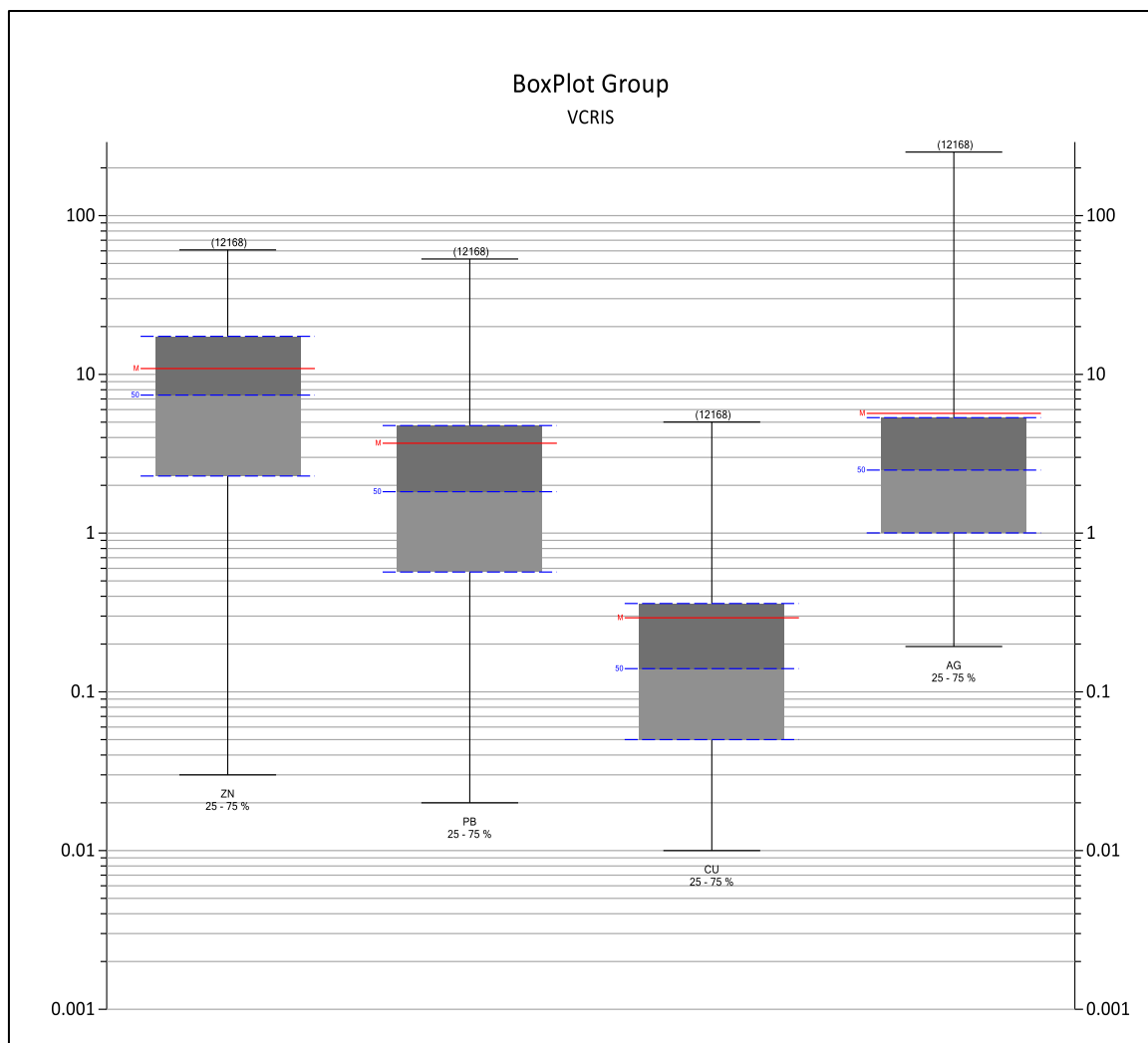
Nota: Supervisor© Software-Propia.

3. Diagrama Box Plot.

Los gráficos de Box Plot o Cajas, permiten representar de manera visual la distribución de un conjunto de datos y mostrar de manera gráfica la mediana, los cuartiles, los valores atípicos y el rango intercuartílico.

Figura 48

Box plot de las leyes de Zn, Pb, Cu y Ag.



Nota: Supervisor© Software-Propia.

7.2.4. Análisis y Tratamiento de Altos Erráticos (CAPPING).

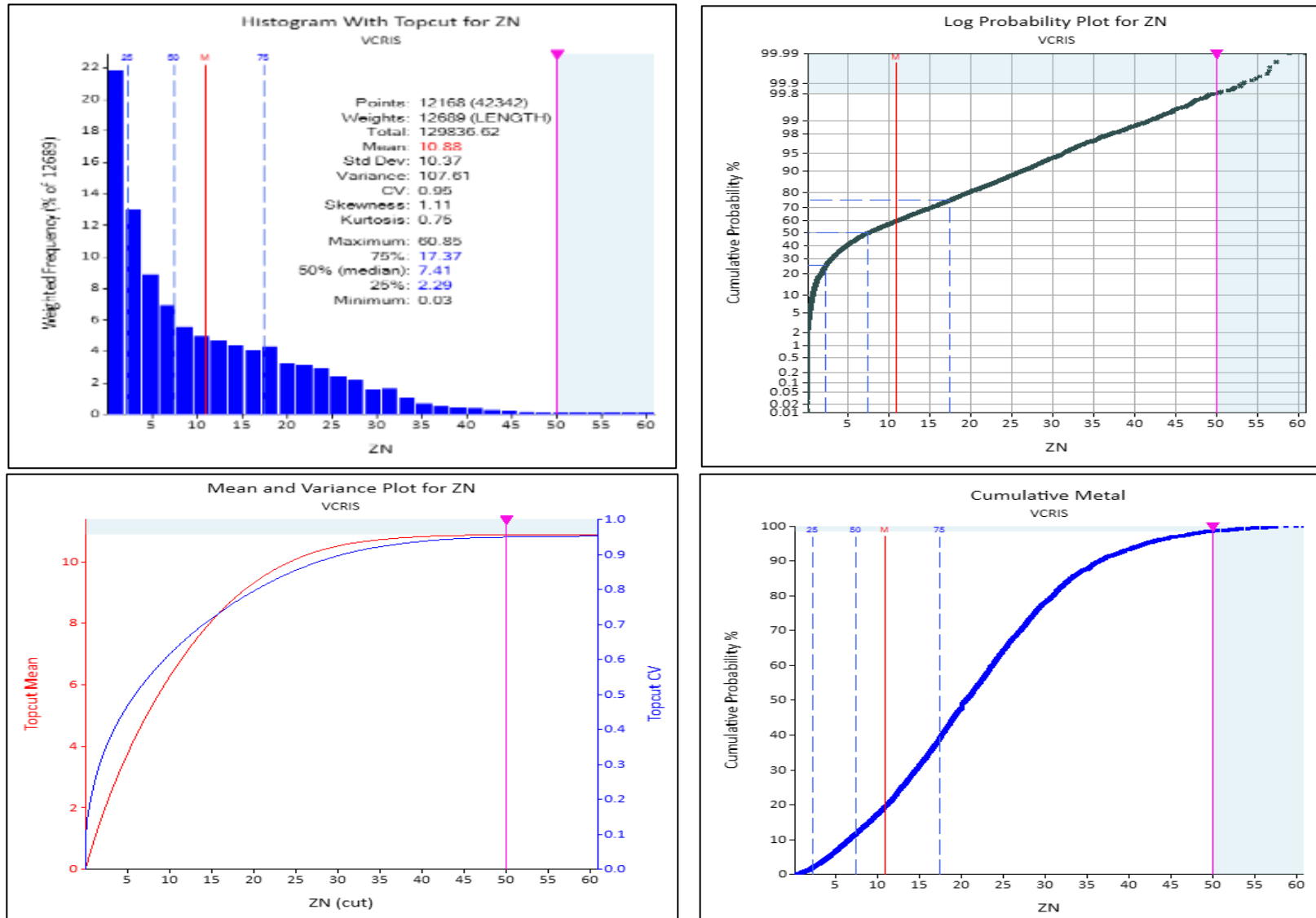
Se efectuó un estudio específico para definir el acotamiento de los valores erráticos de la ley en cada elemento, trabajando sobre los datos sin compositor. El propósito de este análisis fue limitar la influencia de leyes extremadamente altas en el proceso de interpolación, ya que podrían conducir a una sobreestimación de los recursos minerales, procurando al mismo tiempo no generar una disminución significativa del contenido metálico. La definición de los valores de corte para leyes altas se sustentó en la revisión de las curvas de probabilidad acumulada, tomando como umbral de recorte aquellas rupturas observadas en dichas curvas. Como criterio de control, se verificó que la pérdida de metal asociado a este tratamiento no superada el 5%.

1. Análisis del alto errático del Zinc.

Se consideró como valor máximo 50, esto debido al quiebre pronunciado de la curva de probabilidad acumulada, además, la pérdida de contenido metálico es 0.1%. La Figura 49 muestra el análisis con gráficas de histograma, gráficas de probabilidad acumulada, grafica de la media y variancia y contenido metálico para encontrar el valor del alto errático para el Zn.

Figura 49

Análisis para encontrar el valor del alto errático para el Zn.



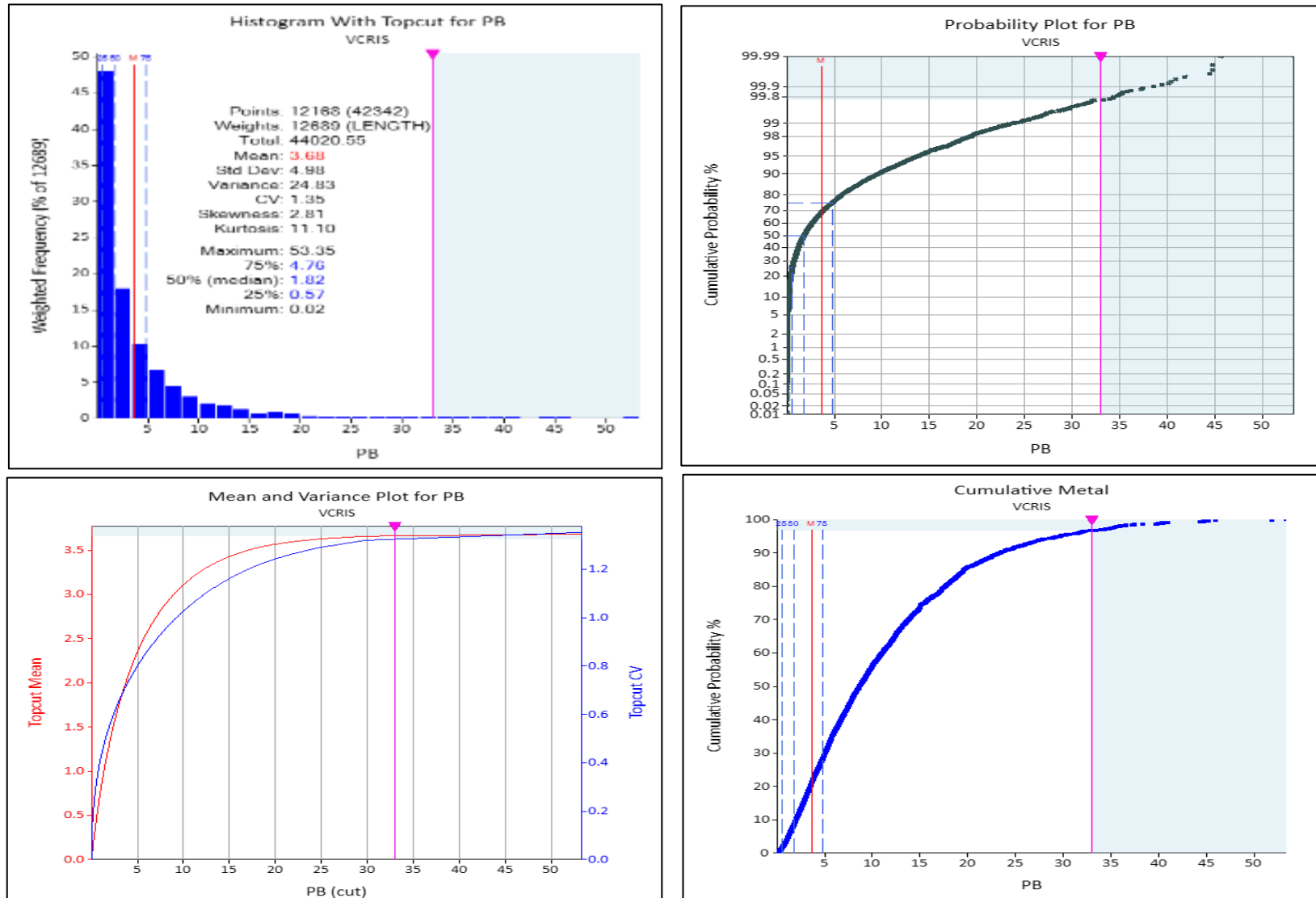
Nota: Supervisor© Software-Propia.

2. Análisis del alto errático del Plomo.

Se consideró como valor máximo 33, esto debido al quiebre pronunciado de la curva de probabilidad acumulada, además, la pérdida de contenido metálico es 0.4%. La Figura 50 muestra el análisis con gráficas de histograma, gráficas de probabilidad acumulada, grafica de la media y variancia y contenido metálico para encontrar el valor del alto errático para el Pb.

Figura 50

Análisis para encontrar el valor del alto errático para el Pb.



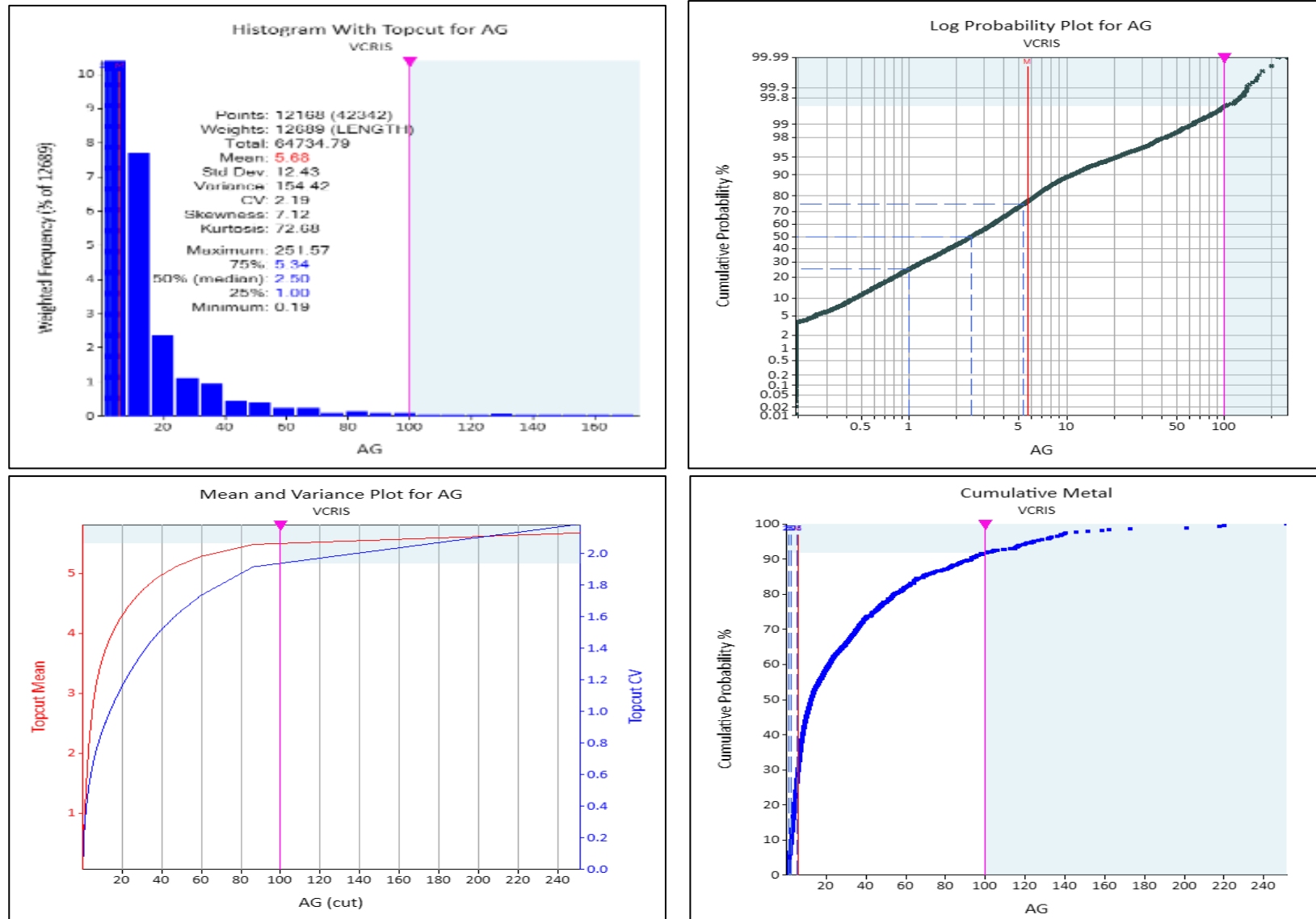
Nota: Supervisor© Software-Propia.

3. Análisis del alto errático de la Plata.

Se consideró como valor máximo 100, esto debido al quiebre pronunciado de la curva de probabilidad acumulada, además, la pérdida de contenido metálico es 2.3%. La Figura 51 muestra el análisis con gráficas de histograma, gráficas de probabilidad acumulada, grafica de la media y variancia y contenido metálico para encontrar el valor del alto errático para el Ag.

Figura 51

Análisis para encontrar el valor del alto errático para la Ag.



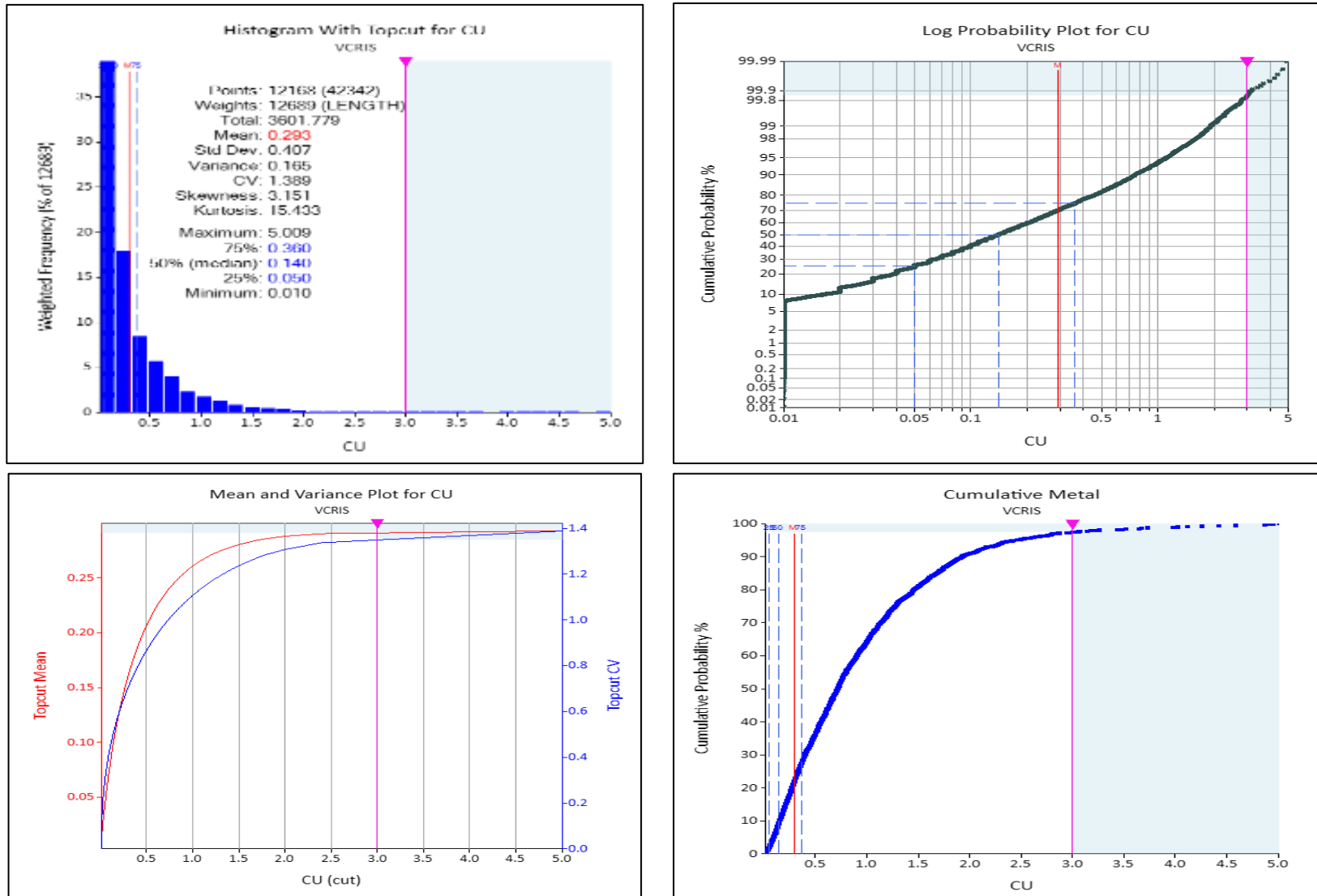
Nota: Supervisor© Software-Propia.

4. Análisis del alto errático del Cobre.

Se consideró como valor máximo 3.0, esto debido al quiebre pronunciado de la curva de probabilidad acumulada, además, la pérdida de contenido metálico es 2.3%. La Figura 52 muestra el análisis con gráficas de histograma, gráficas de probabilidad acumulada, grafica de la media y variancia y contenido metálico para encontrar el valor del alto errático para el Cu.

Figura 52

Análisis para encontrar el valor del alto errático para el Cu.



Nota: Supervisor© Software-Propia.

Tabla 13*Muestra los valores de Capping.*

Valores de capping				
VETA	ZN_CAP	PB_CAP	AG_CAP	CU_CAP
Veta Cristina	50	33	100	3.0

Tabla 14*Muestra la estadística básica data cruda.*

Resumen estadística básica data cruda							
Elemento	Samples	Minimum	Maximum	Mean	Std. Dev.	Coef. Var.	Variance
ZN	12168	0.03	60.85	10.88	10.37	0.95	107.62
PB	12168	0.02	53.35	3.68	4.98	1.35	24.83
CU	12168	0.01	5.01	0.29	0.41	1.39	0.17
AG	12168	0.19	251.57	5.68	12.43	2.19	154.43

Tabla 15*Muestra la estadística de las leyes de Zn, Pb, Ag y Cu después de Capear.*

Estadística Básica data Capeada							
Elemento	Samples	Minimum	Maximum	Mean	Std. Dev.	Coef. Var.	Variance
ZN_CAP	12168	0.03	50	10.88	10.34	0.95	106.96
PB_CAP	12168	0.02	33	3.67	4.92	1.34	24.16
CU_CAP	12168	0.01	3.0	0.29	0.4	1.36	0.16
AG_CAP	12168	0.19	100	5.55	11.02	1.98	121.34

7.2.5. Composición

Los datos después de ser capeados se procedieron a la composición o regularización de la longitud de las muestras, se realizó el análisis de los datos del elemento principal que es el zinc para identificar el tamaño del compósito que mejor se adapta al yacimiento. Se encontró que a 1 m hay menos variabilidad y es un submúltiplo de las dimensiones del bloque (4x4x4). Ver tabla 16.

Se realizó estadísticas comparativas antes y después de realizar la composición. La comparación entre los datos brutos pesados por la longitud y la data compositada muestran las diferencias de ley media entre estos dos grupos de datos, cuya variación está entre $\pm 5\%$, lo cual es una buena práctica en la estimación de recursos minerales.

Tabla 16

Muestra la estadística de las leyes de Zn, Pb, Ag y Cu después de Compositar.

Veta	Elem.	Estadística básica de data capeada						Estadística básica de datos compositados						Dif. (%) Mean
		Count	Min	Max	Mean	Std. Dev.	Coef. Var.	Count	Min	Max	Mean	Std. Dev.	Coef. Var.	
	Zn	12168	0.03	50	10.88	10.34	0.95	9259	0.03	50	11.12	9.01	0.81	-4.2%
Veta	Pb	12168	0.02	33	3.61	4.92	1.34	9259	0.02	33	3.72	4.40	1.18	-3.0%
Cristina	Cu	12168	0.01	3	0.29	0.4	1.36	9259	0.01	3	0.30	0.37	1.22	-3.4%
	Ag	12168	0.19	100	5.55	11.02	1.98	9259	0.19	100	5.47	9.88	1.81	-5.1%

Fuente: propia

7.2.6. Análisis de continuidad espacial (variografía)

Se usó el software Supervisor®, para desarrollar el análisis variográfico para las leyes de Zinc (Zn%), Plomo (Pb%), Plata (Ag Oz), Cobre (Cu%) de las muestras regularizadas y acotadas.

Para el cálculo de los variogramas experimentales se utilizaron bandwidths horizontales y verticales de 30 m, con una tolerancia angular (tolerance angle) de 15° y un espaciamiento (lag) comprendido entre 10 y 25 m. Adicionalmente, se generaron variogramas a la escala de muestreo de canales (4 m) con el fin de estimar el efecto pepita de cada elemento analizado.

Los modelos del variograma ajustados fueron estandarizados dividiendo sus valores por la varianza de los datos, de modo que el sill o meseta del modelo alcance un valor de 1.

Para modelar los variogramas se realizó la transformación "Normal Score", este proceso se realizó con el fin de reducir el efecto de los valores extremos "ruidos en el variograma", después fueron retransformados a los datos originales para que pudieran ser utilizados en la estimación.

Tabla 17

Parámetros de modelos de variogramas ajustados para las leyes de Zn, Pb, Ag y Cu.

Elem.	Rotación			Co	A1			C1	A2			C2	A3			C3
	Z Left	Y Left	X Left		X	Y	Z		X	Y	Z		X	Y	Z	
Zn	162.86	47.73	112.63	0.30	4.0	3.3	1.0	0.40	12.0	27.3	3.0	0.12	303.0	372.0	10.0	0.19
Pb	144.58	65.19	128.08	0.29	3.0	4.7	1.7	0.40	16.7	5.7	3.0	0.08	199.0	303.0	10.0	0.23
Cu	144.58	65.19	128.08	0.022	5.0	1.7	0.7	0.47	12.0	7.3	3.0	0.05	213.0	257.0	10.0	0.26
Ag	144.58	65.19	128.08	0.36	4.7	3.0	0.7	0.45	20.0	18.0	3.0	0.08	142.0	207.0	10.0	0.12

Fuente: propia

1. Variografía de las leyes de Zinc

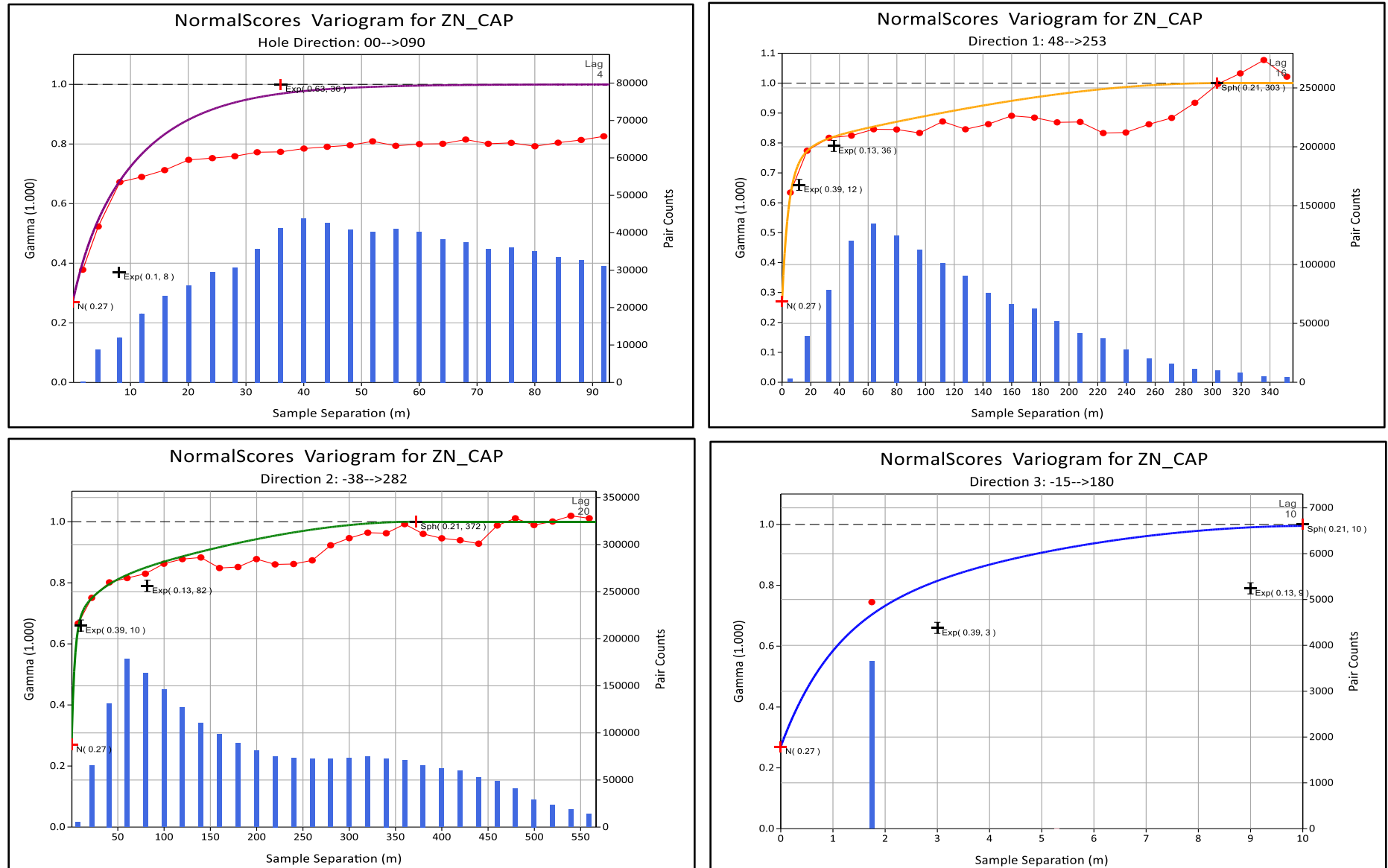
Los parámetros de los modelos de variogramas ajustados para las leyes de Zinc se presentan en la Tabla 17, y tienen las siguientes características:

- El efecto pepita varía de 2% a 3% de la meseta total.
- Se ajustaron, usando tres estructuras exponenciales.
- Para encontrar el efecto pepita se usó los datos de canales a una distancia de 4 m.
- Los alcances ajustados son: para la primera dirección es de 80 m, para la segunda dirección el alcance es de 140 m y para la tercera dirección el alcance es de 10 m debido a que esta última es perpendicular a la veta.

La Figura 53 presenta los variogramas experimentales y el modelo ajustado para la ley de Zn en las tres direcciones analizadas.

Figura 53

Gráfica de los variogramas para la ley de Zn.



Nota: Supervisor© Software-Propia.

2. Variografía de las leyes de Plomo

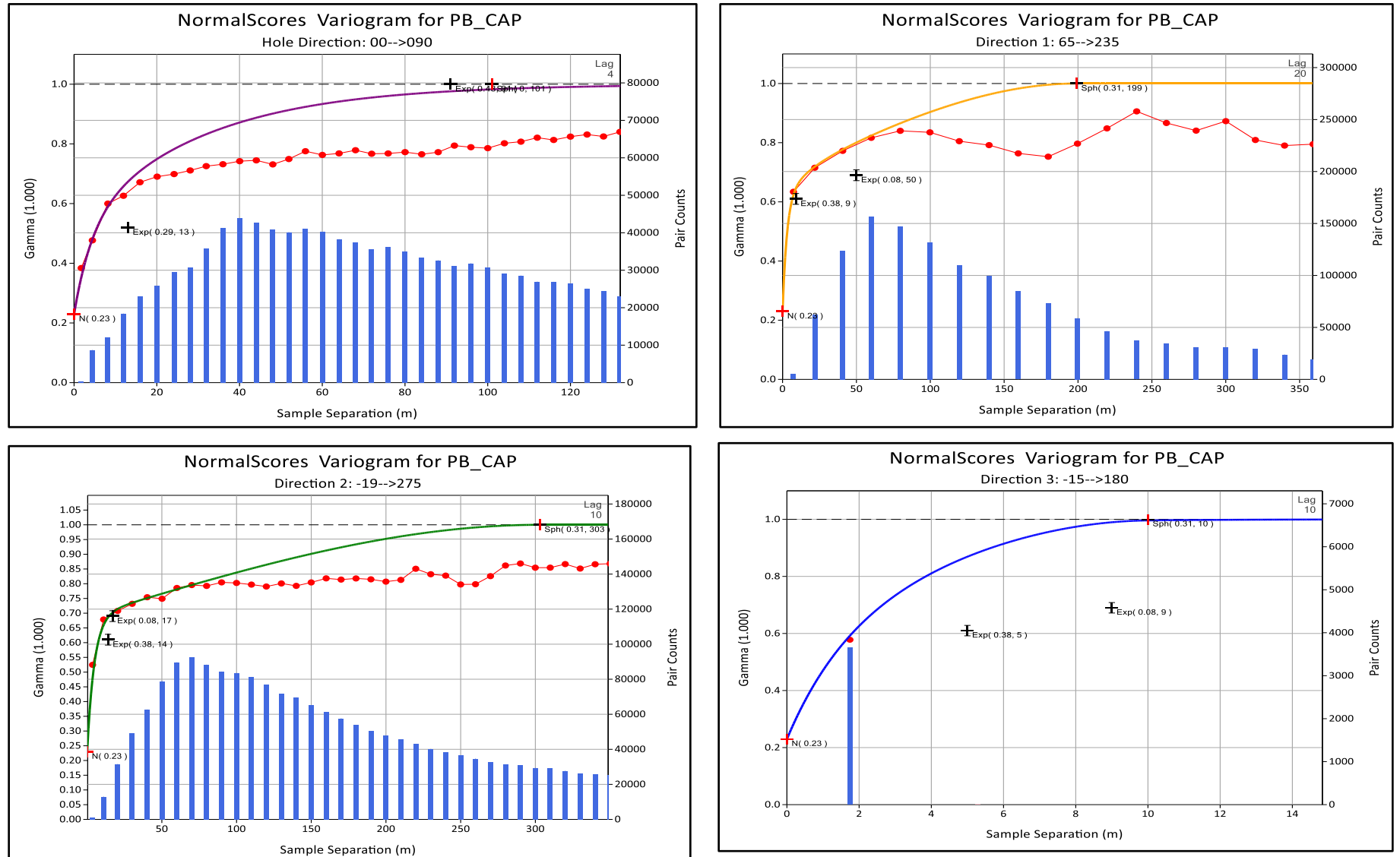
Los parámetros de los modelos de variogramas ajustados para las leyes de plomo se presentan en la Tabla 17, y tienen las siguientes características:

- El efecto pepita varía de 2% a 3% de la meseta total.
- Se ajustaron, usando tres estructuras exponenciales.
- Para encontrar el efecto pepita se usó los datos de canales a una distancia de 4 m.
- Los alcances ajustados son: para la primera dirección es de 80 m, para la segunda dirección el alcance es de 90 m y para la tercera dirección el alcance es de 10 m debido a que esta última es perpendicular a la veta.

En la Figura 54 se ilustran los varigramas experimentales y el modelo teórico para la ley de Pb en las tres direcciones consideradas en el estudio.

Figura 54

Gráfica de los variogramas para la ley de Pb.



Nota: Supervisor© Software-Propia.

3. Variografía de las leyes de Plata

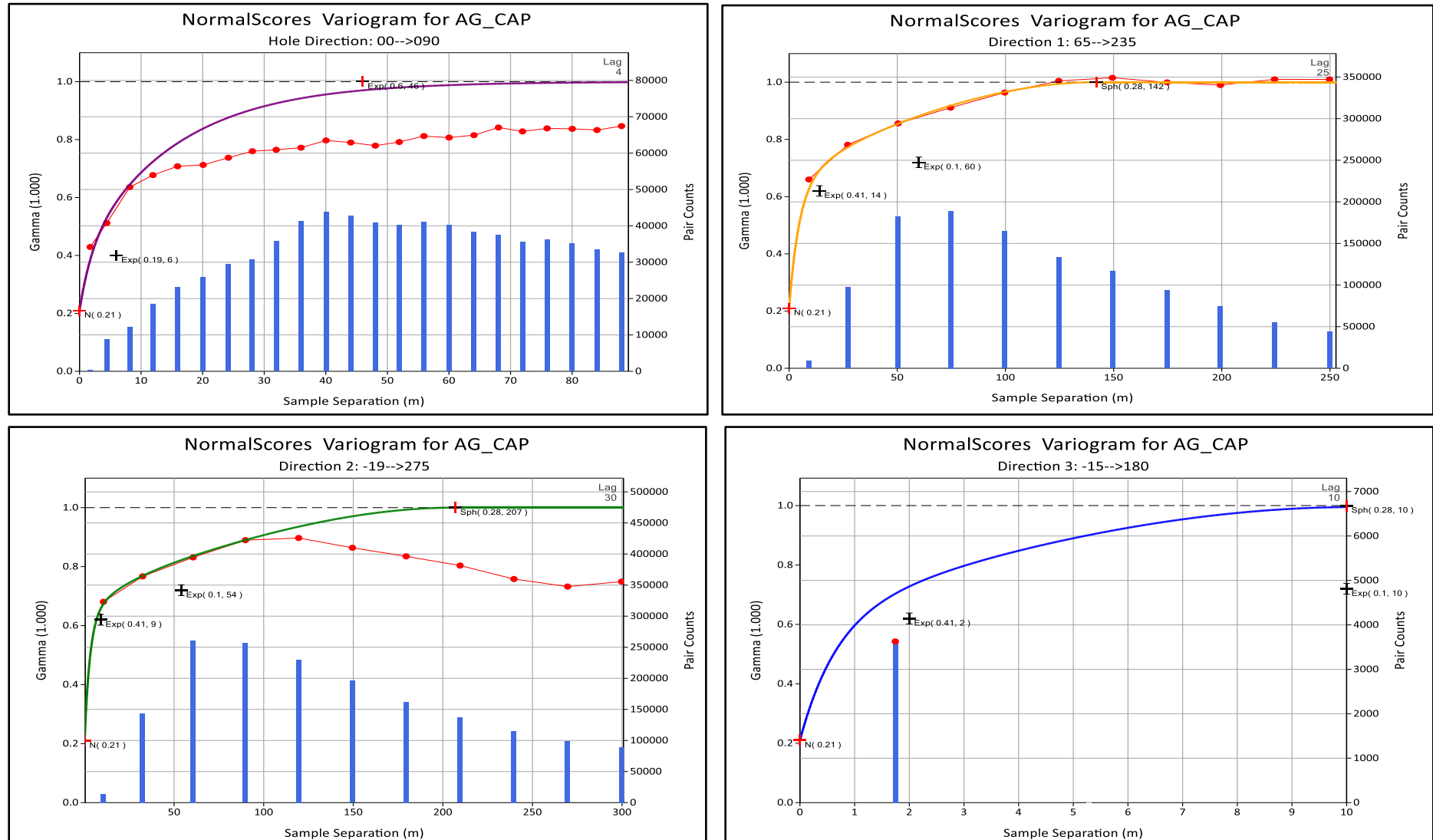
Los parámetros de los modelos de variogramas ajustados para las leyes de plomo se presentan en la Tabla 17, y tienen las siguientes características:

- El efecto pepita varía de 2% a 3% de la meseta total.
- Se ajustaron, usando tres estructuras exponenciales.
- Para encontrar el efecto pepita se usó los datos de canales a una distancia de 4 m.
- Los alcances ajustados son: para la primera dirección es de 130 m, para la segunda dirección el alcance es de 90 m y para la tercera dirección el alcance es de 10 m debido a que esta última es perpendicular a la veta.

En la Figura 55 muestra los variogramas experimentales junto con el modelo ajustado para la ley de Ag en las tres direcciones estudiadas.

Figura 55

Gráfica de los variogramas para la ley de Ag.



Nota: Supervisor© Software-Propia.

4. Variografía de las leyes de Cobre

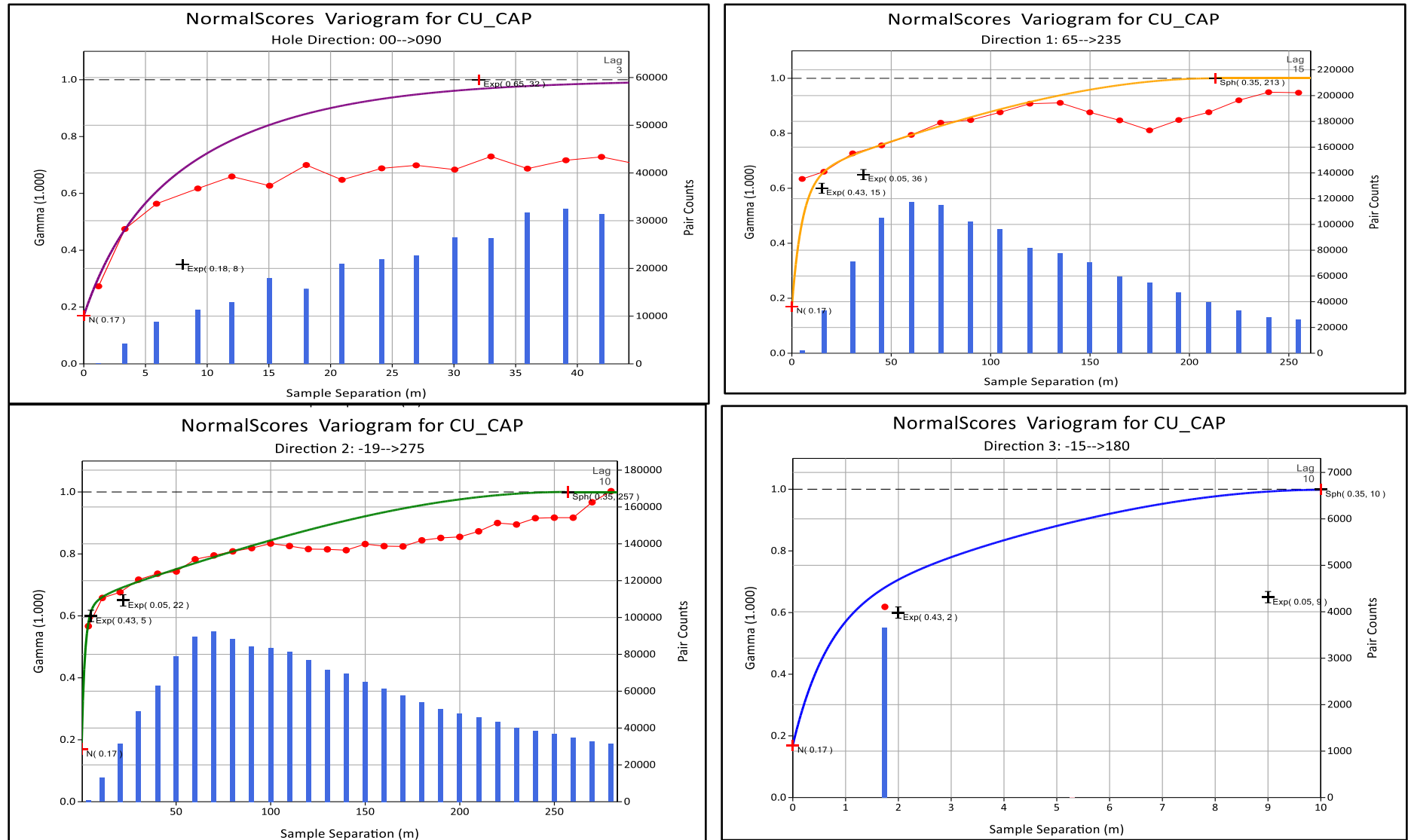
Los parámetros de los modelos de variogramas ajustados para las leyes de plomo se presentan en la Tabla 17, y tienen las siguientes características:

- El efecto pepita varía de 17% a 2% de la meseta total.
- Se ajustaron, usando tres estructuras exponenciales.
- Para encontrar el efecto pepita se usó los datos de canales a una distancia de 3 m.
- Los alcances ajustados son: para la primera dirección es de 70 m, para la segunda dirección el alcance es de 100 m y para la tercera dirección el alcance es de 10 m debido a que esta última es perpendicular a la veta.

La Figura 56 incluye la representación gráfica de los variogramas experimentales y el modelo teórico para la ley de Cu en las tres direcciones analizadas.

Figura 56

Gráfica de los variogramas para la ley de Cu.



Nota: Supervisor© Software-Propia.

7.2.7. Modelo de Bloques

Se generó el modelo de bloques para la interpolación de leyes en el software Datamine©. El modelo de bloques se basó en el modelo de la Veta Cristina. El modelo de bloques tiene un tamaño de celda de 4 m x 4 m x 4 m. No se considera ningún tipo de rotación.

El tamaño de bloque seleccionado corresponde al método de minado (corte y relleno).

Tabla 18

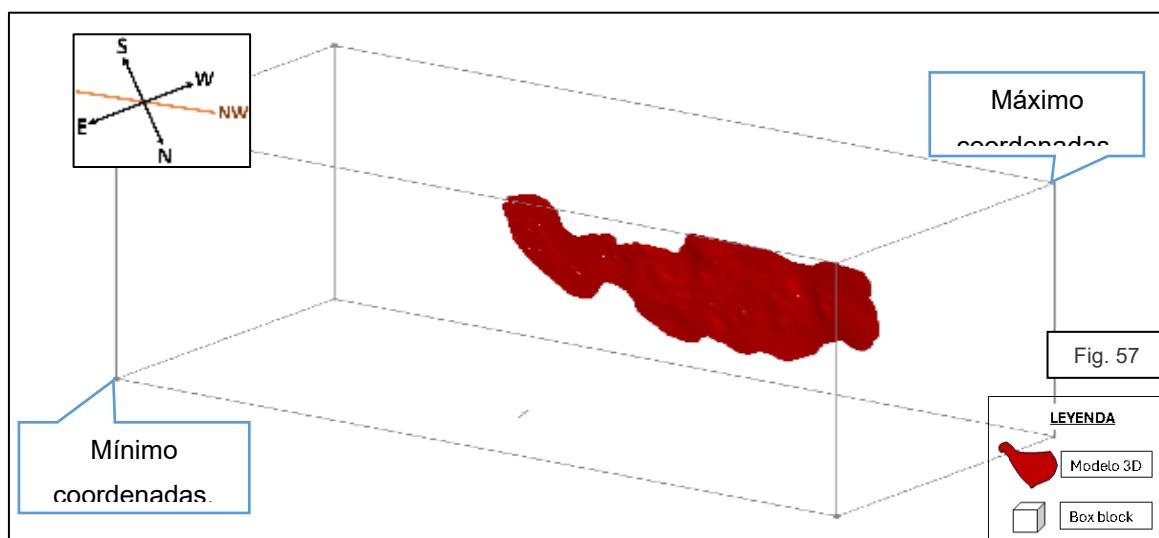
Parámetros del Modelo de Bloque Animón Subterráneo.

Dirección	Mínimo	Máximo	Tamaño	N° Bloques
X	341509	346305	4	1199
Y	8779802	8781810	4	502
Z	3000	48068	4	452

Fuente: propia

Figura 57

Muestra la vista 3D de los límites del modelo.



Nota: Leapfrog Gro Software-Propia.

7.2.8. Análisis de los parámetros de estimación

En base a los modelos de variogramas y las muestras regularizadas y acotadas se procedió a evaluar los diferentes parámetros de estimación, incluyendo las distancias de búsqueda, el número mínimo y máximo de compósitos y el máximo número de compósitos por sondaje.

La estimación de leyes se realizó en tres pasadas consecutivas, aplicando los métodos de Kriging Ordinario (OK), Inverso de la Distancia al cuadrado (IDW) y, adicionalmente, el interpolador del Vecino más Cercano (NN-nearest neighbour), este último utilizado principalmente como referencia para la validación de los resultados.

La herramienta QKNA del software Supervisor fue empleada para el análisis de los parámetros de estimación. Este análisis incluyó la sensibilidad de la estimación al máximo número de muestras con el fin de evitar el suavizado excesivo de los estimados y el efecto de pantalla, el cual aumenta el número de pesos negativos asignados a los datos.

Los parámetros utilizados para la interpolación se presentan en la Tabla 19; donde: Min1/Max1 son muestras mínimas y máximas para la primera pasada, Min2/Max2 son muestras mínimas y máximas para la segunda pasada, Min3/Max3 son muestras mínimas y máximas para la tercera pasada, SVOLFAC2 es el factor de búsqueda para la segunda pasada, y SVOLFAC3 es el factor de búsqueda para la tercera pasada.

Se definió la dirección de los volúmenes de búsqueda con base en los ejes de anisotropía del variograma y la geometría de los cuerpos minerales.

Tabla 19*Parámetros de estimación de la Veta Cristina.*

Veta	Elem.	Rango (metros)			Nro.Comp.		SVOLFAC 2	Nro.Comp.		SVOLFAC 3	Nro.Com.		Máx comp. por sondaje
		X	Y	Z	Mín	Máx		Mín	Máx		Mín	Máx	
Veta Cristina	Zn	30	20	10	4	25	2	3	20	3	3	15	3
	Pb	30	20	10	4	25	2	4	20	3	3	15	3
	Cu	30	20	10	4	25	2	4	20	3	3	15	3
	Ag	30	20	10	4	25	2	4	20	3	3	15	3

7.2.9. Validación de la estimación

Para evaluar la calidad del modelo se aplicaron tres enfoques de validación: 1) validación visual, 2) verificación del sesgo global y 3) análisis del sesgo local mediante gráficos de franjas.

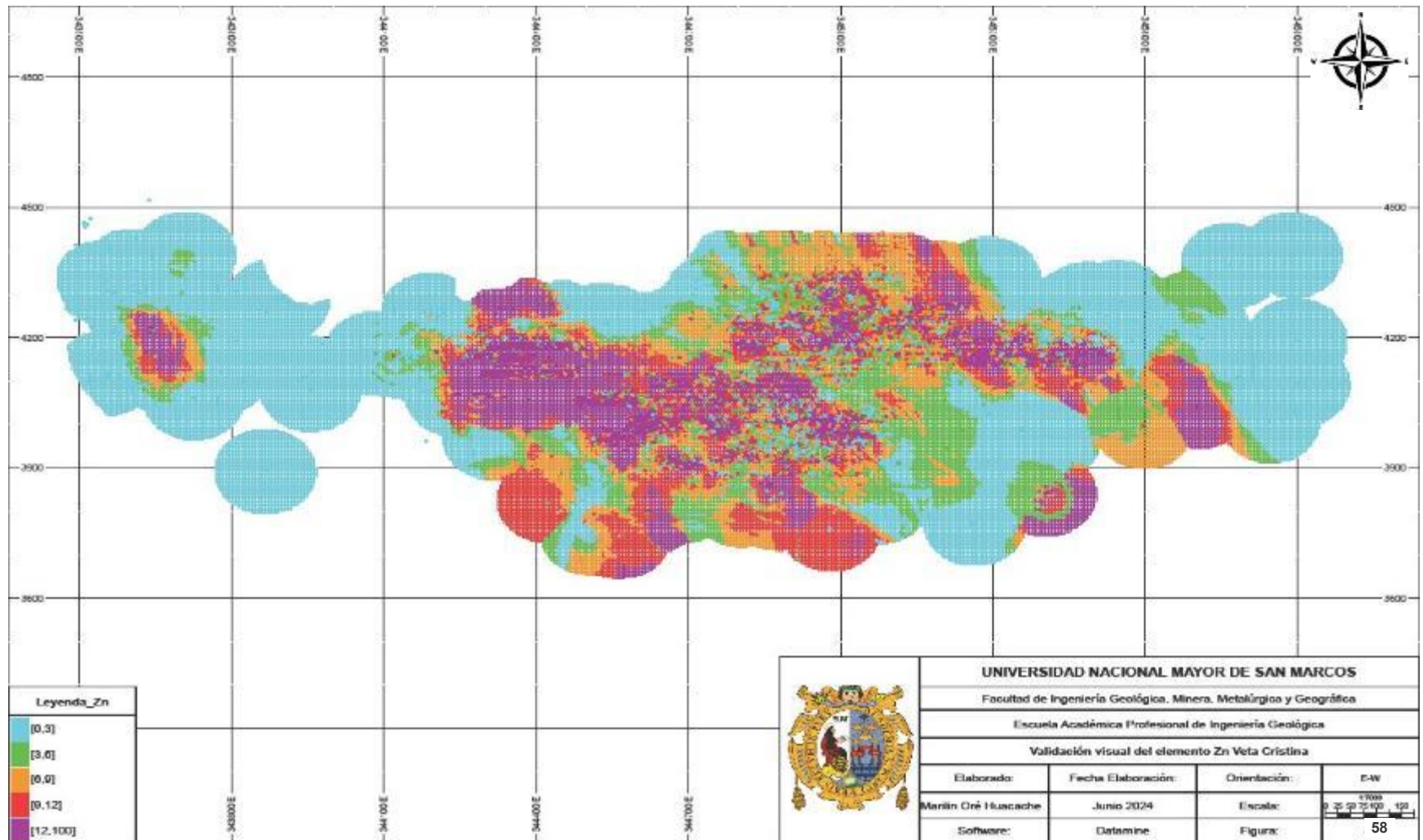
1. Validación visual

Para la validación visual se verifica los compósitos versus los valores del modelo de bloque de las estimaciones de las leyes de Zinc (Zn%), Plomo (Pb%), Plata (Ag Oz), Cobre (Cu%).

Los resultados observados en los bloques muestran una buena comparación con las leyes de los compósitos. En la Figura 58, Figura 59, Figura 60 y Figura 61 se aprecia la leyenda del Zn, Pb Ag y Cu respectivamente.

Figura 58

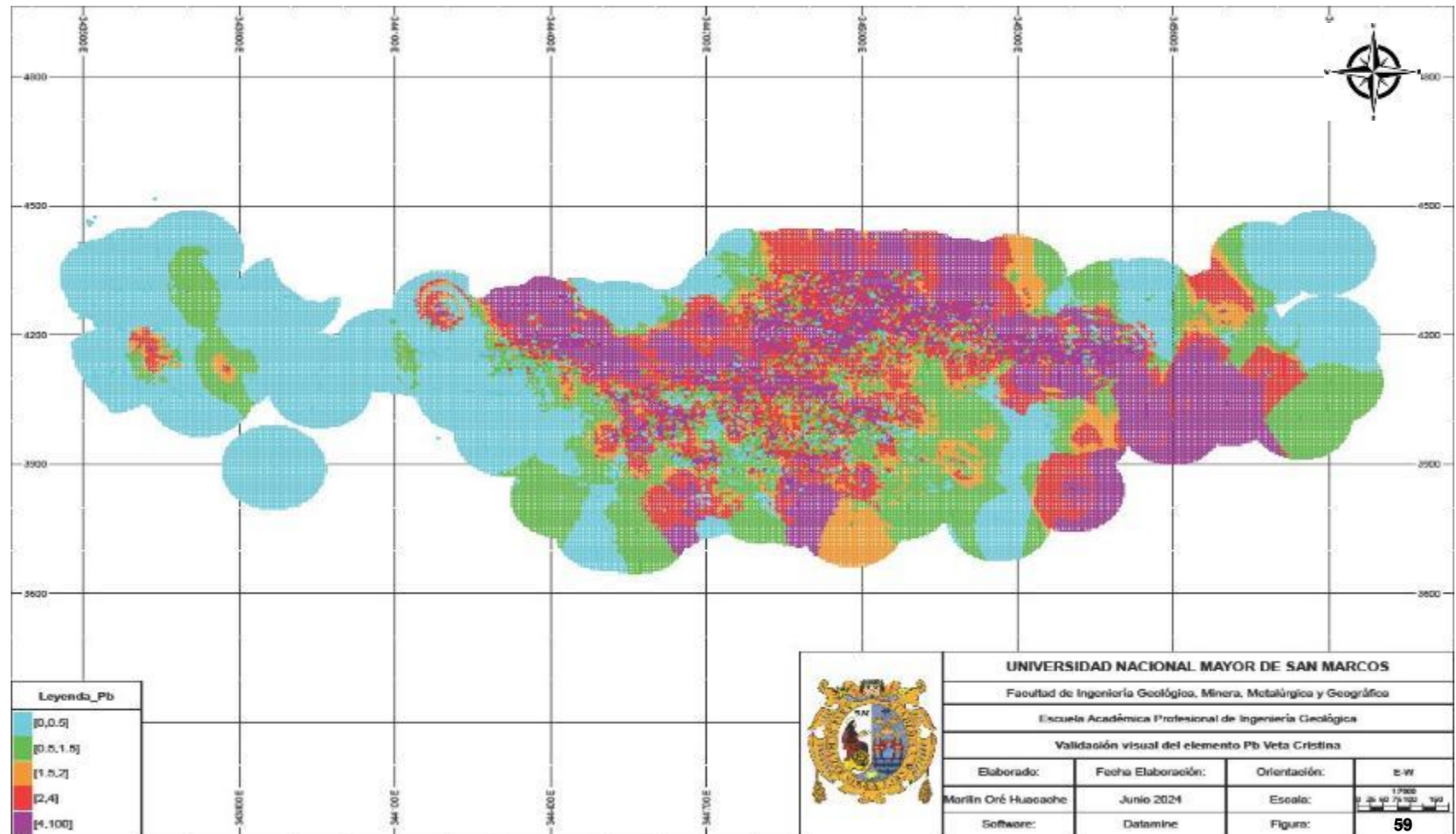
Validación visual del elemento Zn, Veta Cristina.



Nota: Datamine© Software-Propia (Vista planta).

Figura 59

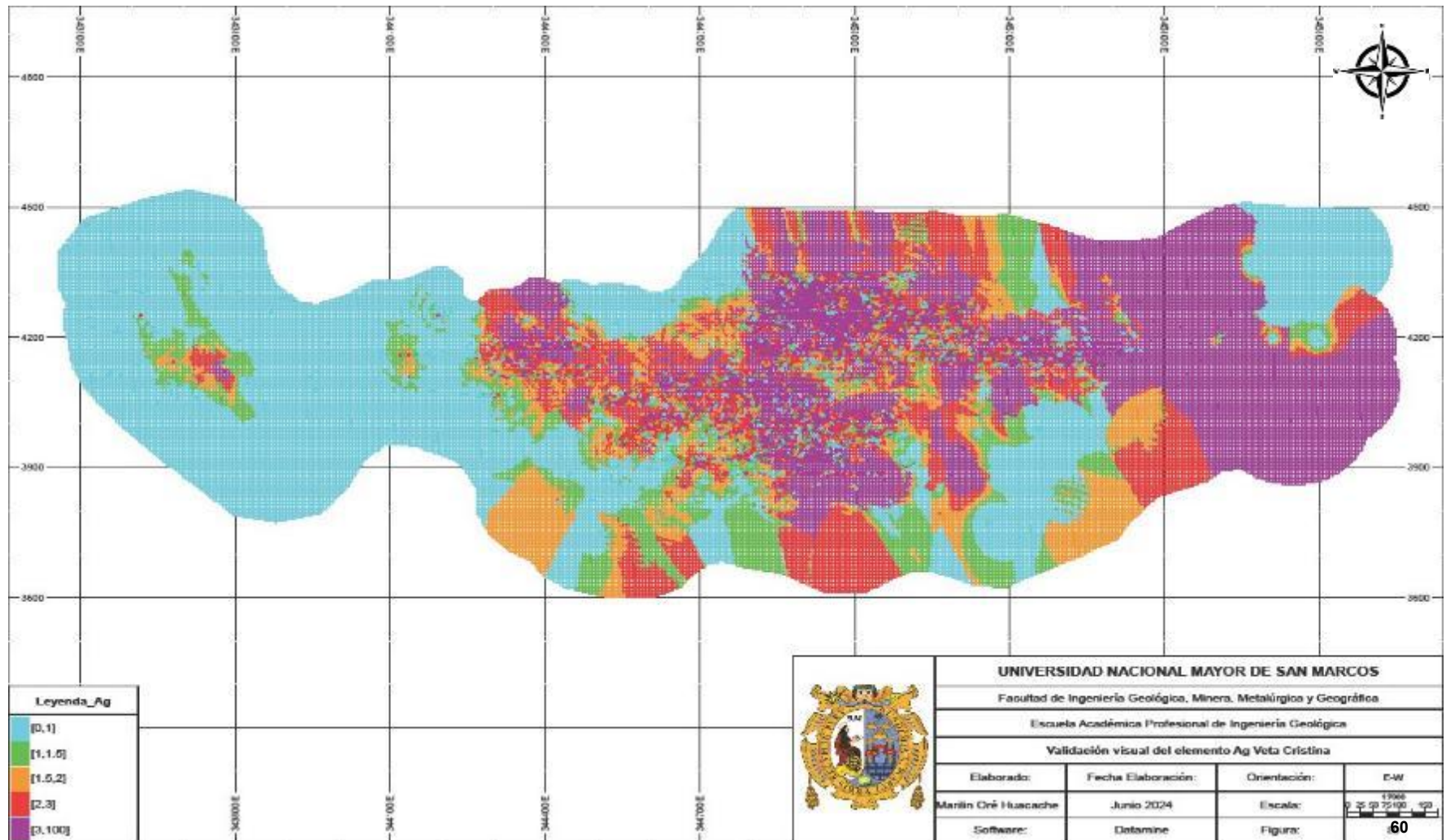
Validación visual del elemento Pb, Veta Cristina.



Nota: Datamine© Software-Propia (Vista planta).

Figura 60

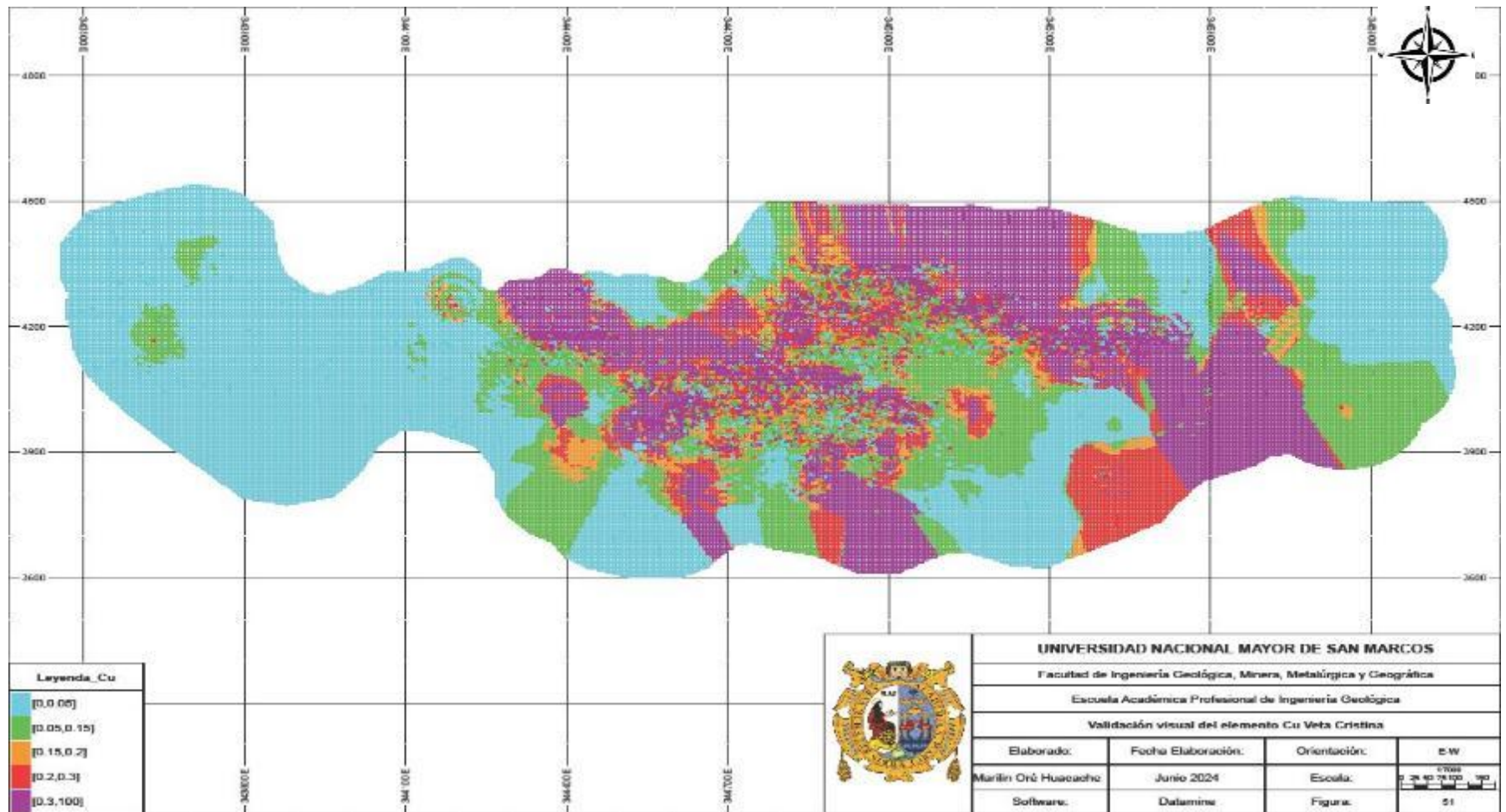
Validación visual del elemento Pb, Veta Cristina.



Nota: Datamine© Software-Propia (Vista planta).

Figura 61

Validación visual del elemento Pb, Veta Cristina.



Nota: Datamine© Software-Propia (Vista planta).

2. Validación de las medias globales

Para verificar la reproducción de las medias globales, las leyes estimadas por kriging ordinario (OK) e inverso a la distancia (IDW), fueron comparadas con las medias globales resultantes de la interpolación por vecino más cercano (NN).

La comparación muestra que el error porcentual entre las estimaciones está dentro del $\pm 5\%$ en la mayoría de los dominios para cada elemento. En general, la comparación muestra que los métodos utilizados son válidos.

Tabla 20

Comparación de medias globales de Kriging Ordinario (OK), Inverso a la distancia (IDW) y Nearest Neighbour (NN) para la Veta Cristina.

Pasada	Número de Bloques	ZN_NN		ZN_OK		Diferencia Relativa	ZN_IDW2		Diferencia Relativa
		Media	Cv	Media	Cv		Media	Cv	
1	35111	10.790	0.774	10.721	0.515	0.64%	10.516	0.554	2.57%
2	28529	5.962	1.212	6.212	0.895	-4.11%	5.978	0.965	-0.26%
3	19122	4.168	1.246	4.511	0.984	-7.90%	4.130	1.031	0.93%
Total	82762	7.596	1.035	7.732	0.767	-1.78%	7.476	0.817	1.59%

Pasada	Número de Bloques	AG_NN		AG_OK		Diferencia Relativa	AG_IDW2		Diferencia Relativa
		Media	Cv	Media	Cv		Media	Cv	
1	35719	4.676	1.783	4.680	1.079	-0.08%	4.520	1.149	3.41%
2	19455	2.286	2.455	2.633	1.492	-14.11%	2.489	1.857	-8.51%
3	28794	3.026	2.920	2.720	2.196	10.66%	2.895	2.474	4.43%
Total	83968	3.557	2.261	3.534	1.487	0.65%	3.492	1.690	1.83%

Pasada	Número de Bloques	PB_NN		PB_OK		Diferencia Relativa	PB_IDW2		Diferencia Relativa
		Media	Cv	Media	Cv		Media	Cv	
1	35719	3.604	1.183	3.575	0.746	0.81%	3.486	0.792	3.33%

2	19455	2.146	1.845	2.276	1.208	-5.86%	2.174	1.409	-1.27%
3	28794	1.692	1.678	1.651	1.319	2.48%	1.614	1.432	4.74%
Total	83968	2.611	1.478	2.614	1.022	-0.13%	2.540	1.110	2.75%

Pasada	Número de Bloques	CU_NN		CU_OK		Diferencia Relativa	CU_IDW2		Diferencia Relativa
		Media	Cv	Media	Cv		Media	Cv	
1	35719	0.312	1.224	0.311	0.789	0.09%	0.304	0.839	2.38%
2	19455	0.187	1.657	0.205	1.141	-9.25%	0.193	1.241	-3.06%
3	28794	0.166	1.539	0.162	1.259	2.44%	0.161	1.327	3.51%
Total	83968	0.233	1.432	0.236	1.015	-1.15%	0.229	1.076	1.62%

3. Validación local, gráficos de franjas (Swath Plots)

Para evaluar los sesgos locales se generó una serie de cortes o swaths en las direcciones Este, Norte y Elevación, en los cuales se graficaron las leyes estimadas por Kriging Ordinario (OK), Inverso a la Distancia (IDW), Vecino más Cercano (NN) y los valores de los compósitos, comparando sus comportamientos a lo largo de cada franja.

En términos generales, los resultados obtenidos indican una buena correlación entre las estimaciones del modelo y los datos muestreados.

Figura 62

Validación Swath Plot en dirección Este, Norte y Elevación, elemento Zn.

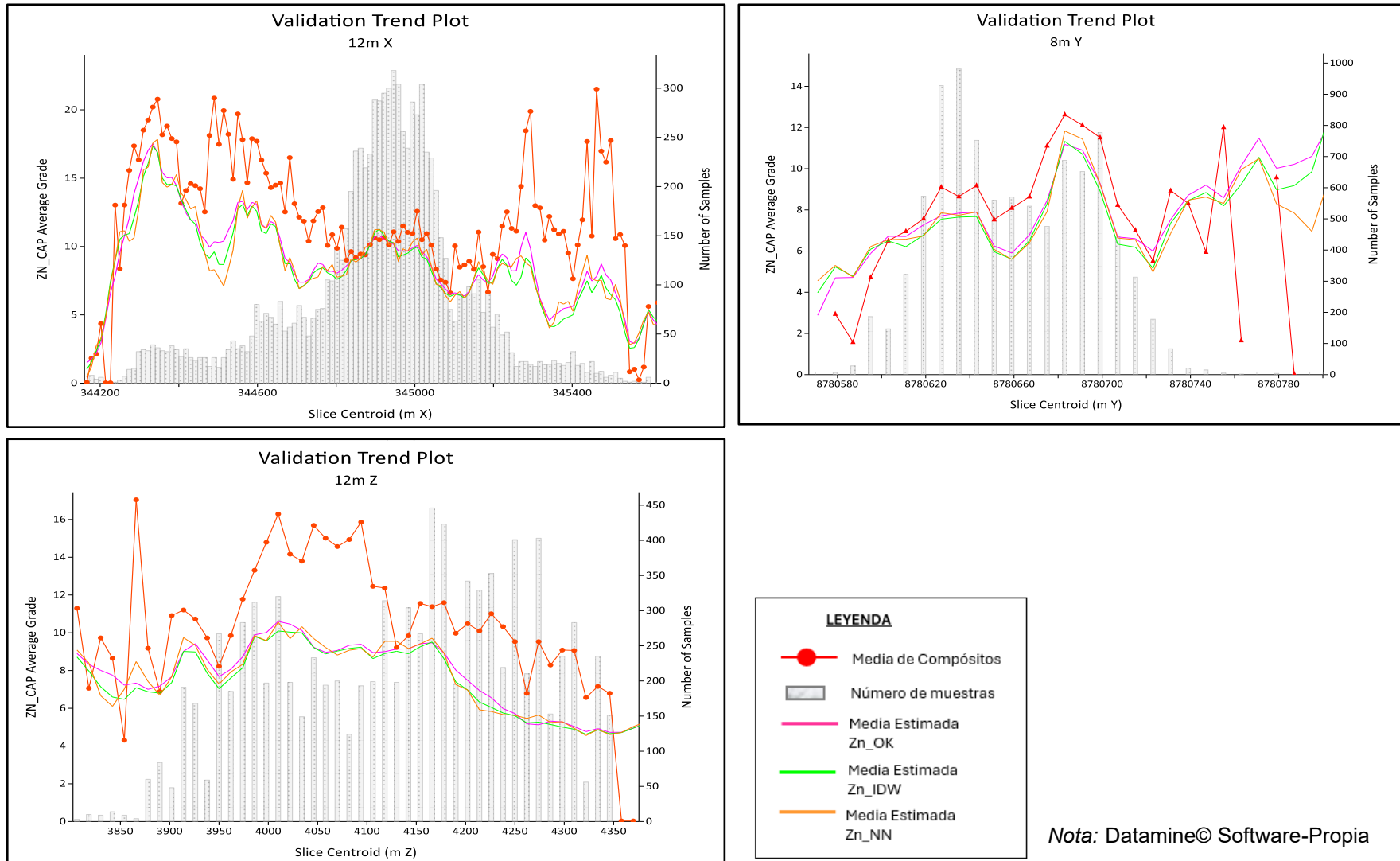
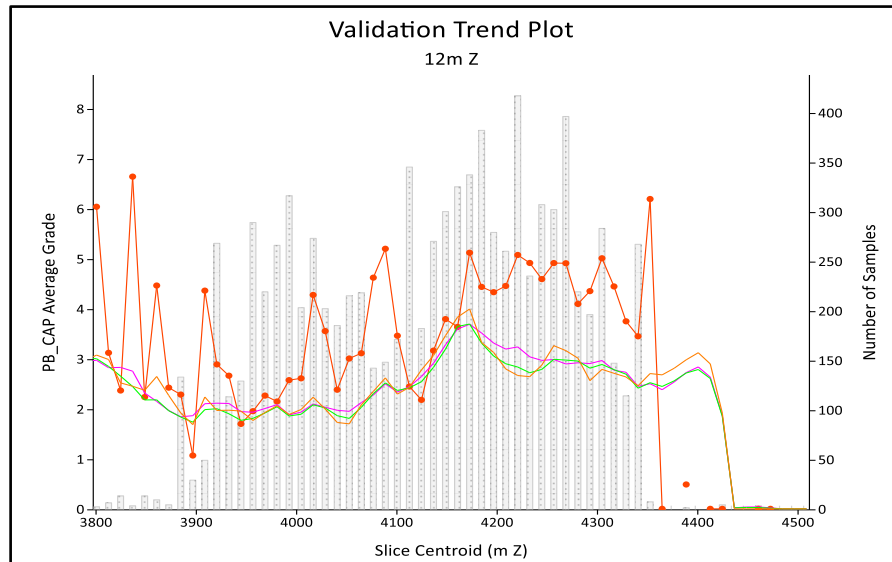
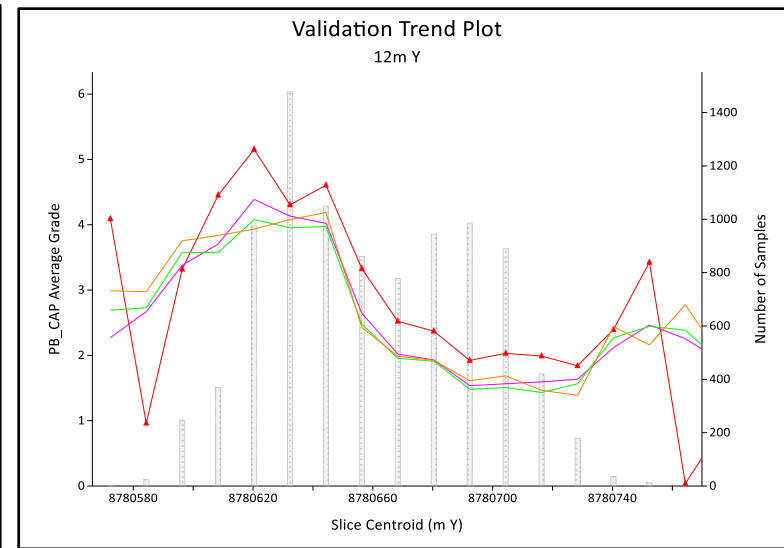
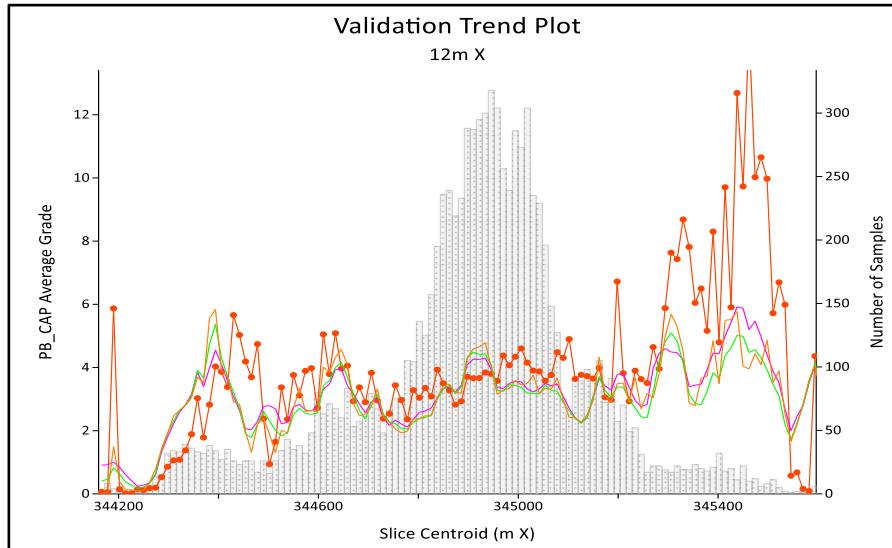


Figura 63

Validación Swath Plot en dirección Este, Norte y Elevación, elemento Pb.



Nota: Datamine© Software-Propia

Figura 64

Validación Swath Plot en dirección Este, Norte y Elevación, elemento Ag.

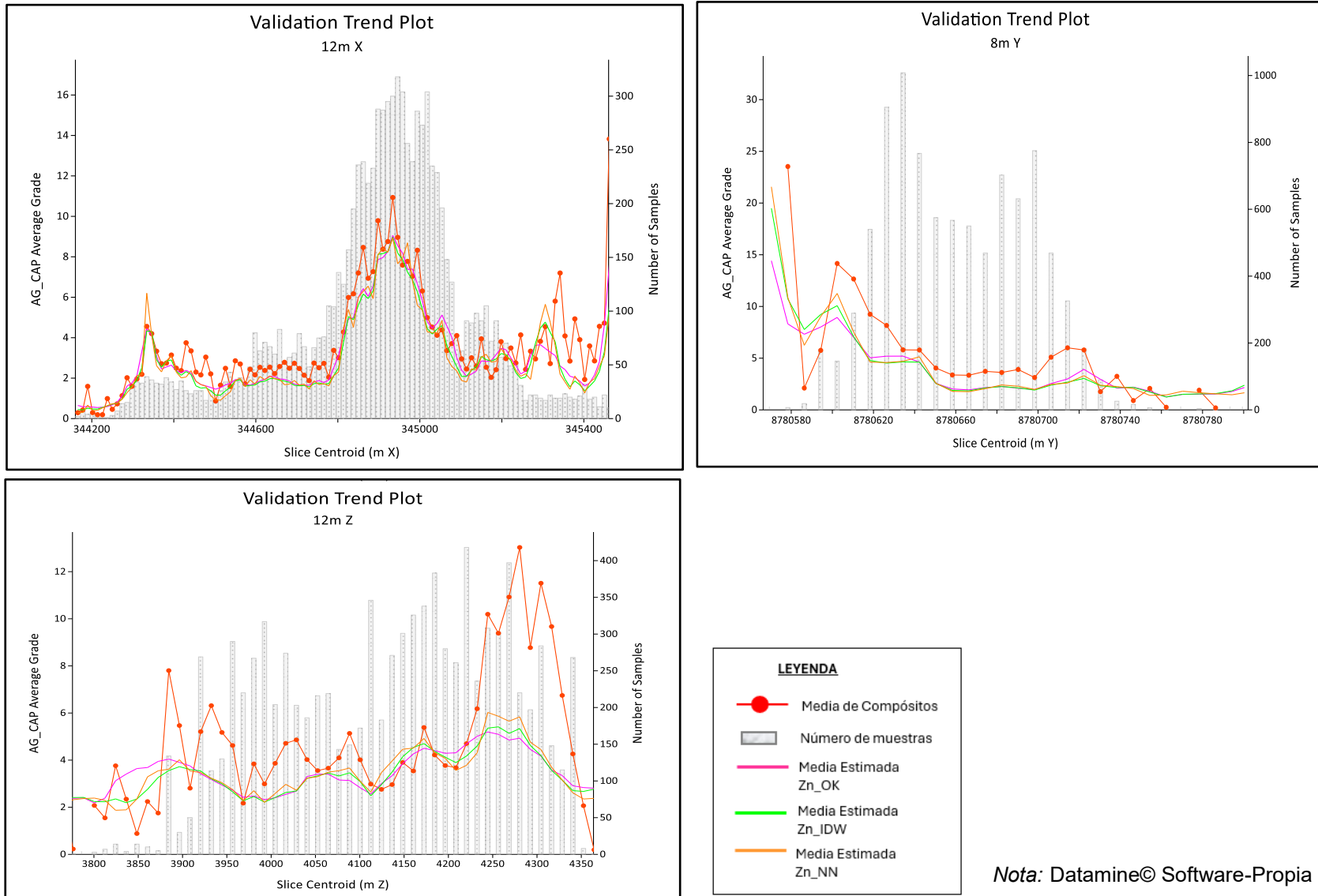
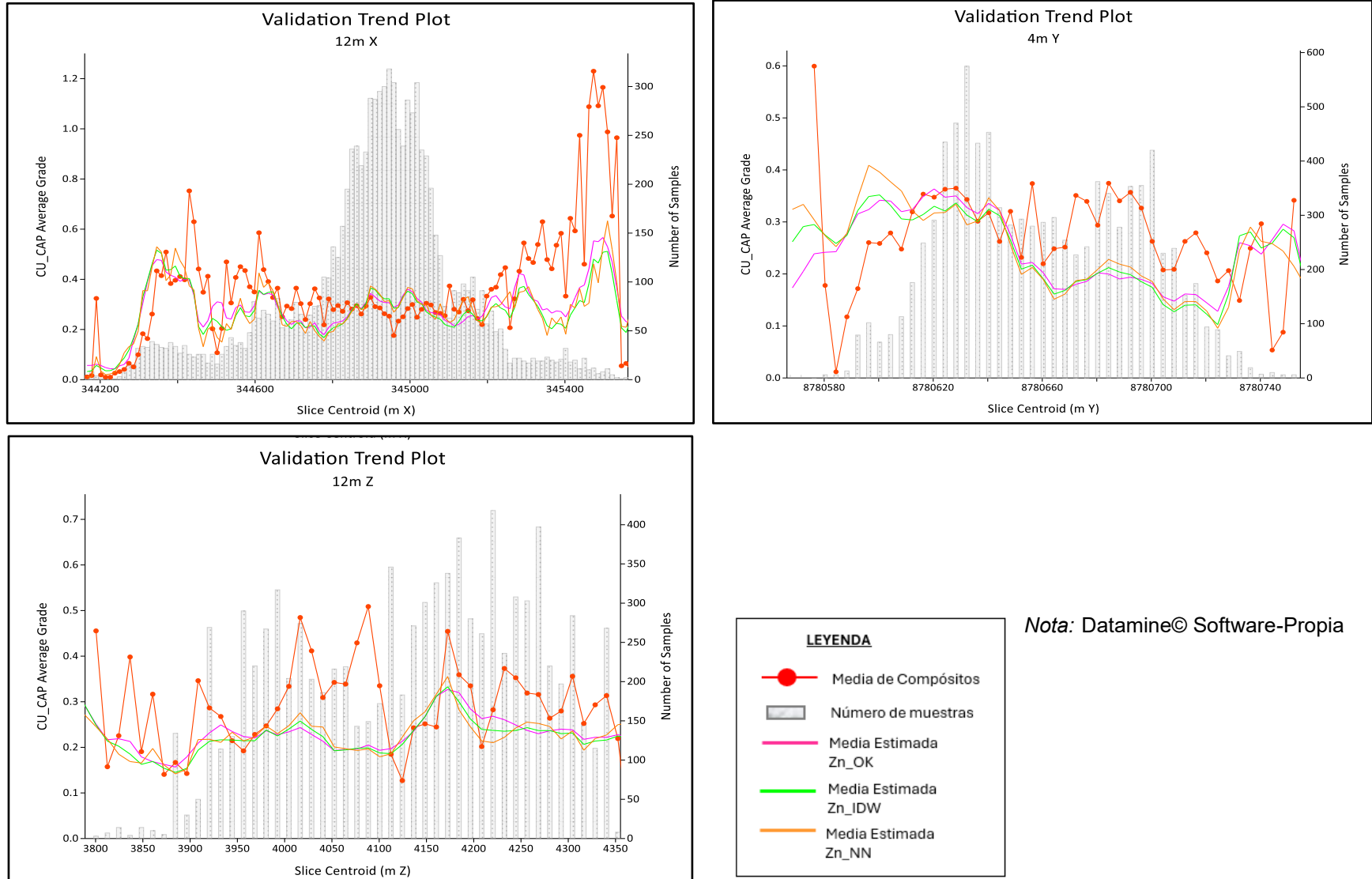


Figura 65

Validación Swath Plot en dirección Este, Norte y Elevación, elemento Cu.



7.2.10. Asignación de la densidad.

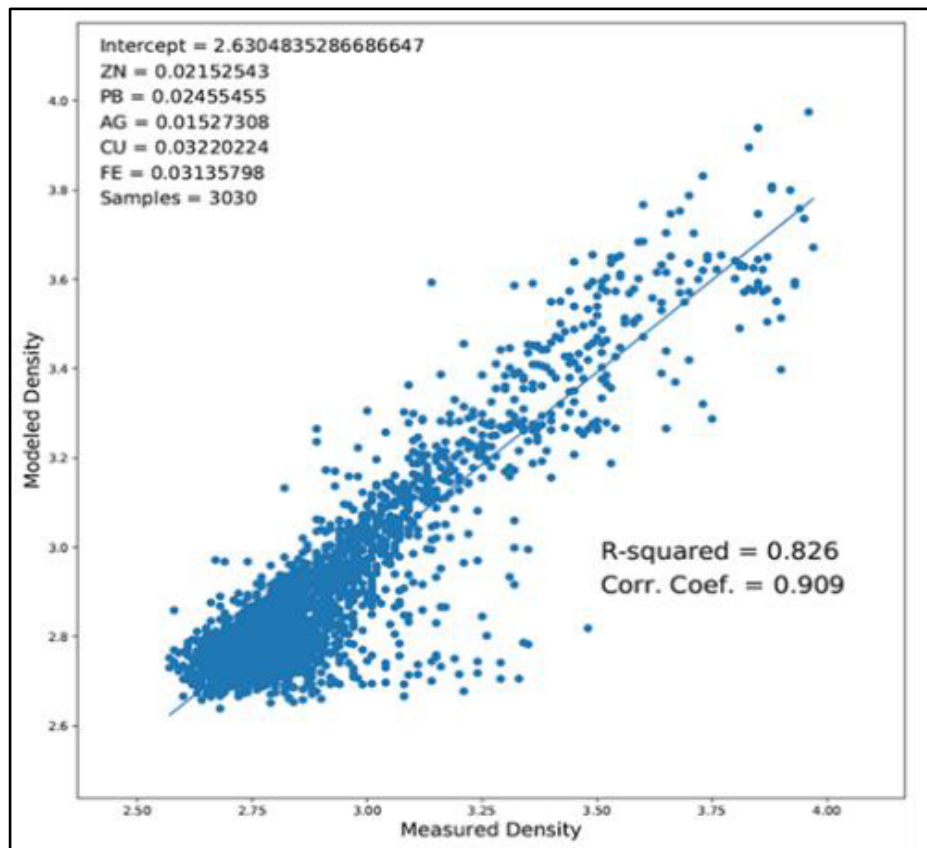
Los valores de densidad se estimaron utilizando una fórmula de regresión multineal de la densidad vs las leyes de Zn, Pb, Ag y Cu y Fe se calculó utilizando las 3,030 muestras de densidad obtenidos por el método de picnometría. Figura 66 describe el comportamiento de la ecuación asignando la densidad.

Se obtuvo la siguiente ecuación para el cálculo de la densidad:

$$\text{Densidad} = 2.6305 + (0.0215) * (\text{Zn}) + (0.0246) * (\text{Pb}) + (0.0322) * (\text{Cu}) + (0.0152) * (\text{Ag}) \\ + (0.0314) * (\text{Fe})$$

Figura 66

Regresión multineal de la densidad vs. leyes de Zn, Pb, Ag, Cu y Fe.



Nota: Datamine© Software-Propia.

7.2.11. Clasificación de Recursos Minerales.

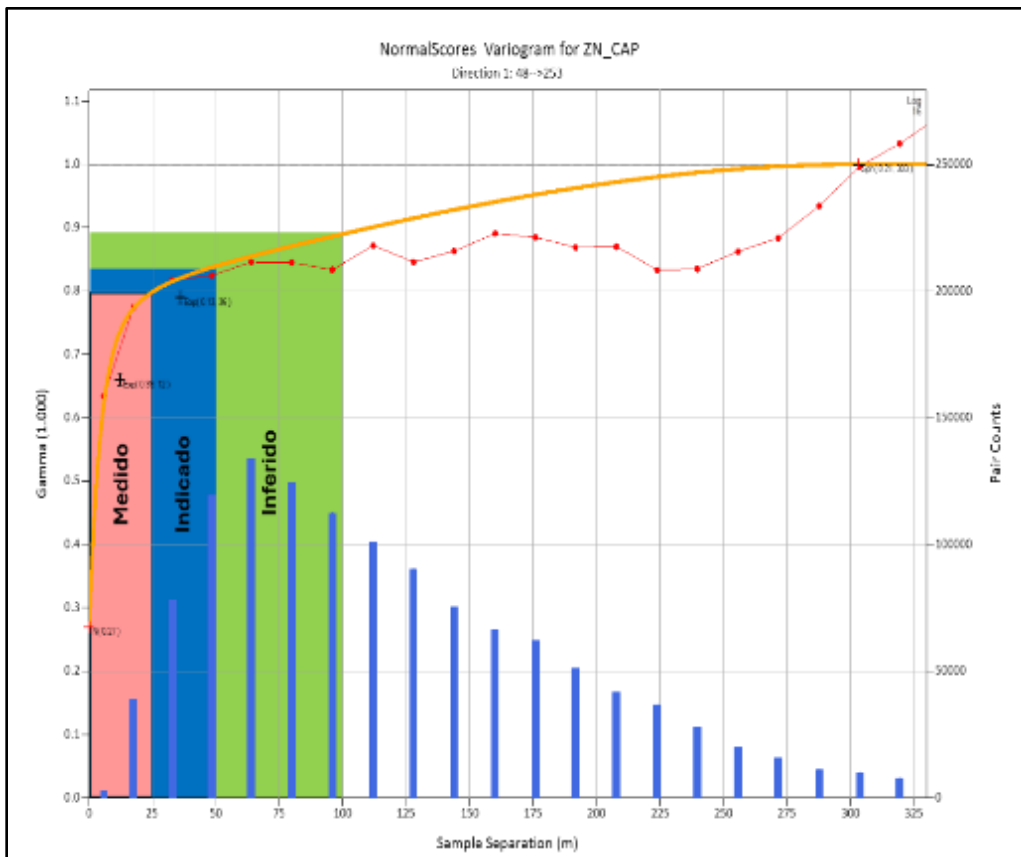
La clasificación de los recursos minerales es un proceso subjetivo; no obstante, las buenas prácticas de la industria recomiendan que dicha clasificación se basa en la confianza en la continuidad geológica de las estructuras mineralizadas, en la calidad y cantidad de la información de exploración que sustenta las estimaciones y en el nivel de confianza geoestadística asociado al tonelaje y a las leyes estimadas.

Para la Veta Cristina, el modelado geológico 3D se ha realizado respetando la información y el conocimiento geológico actualmente disponibles. La posición de las muestras y los datos de ensayo se consideran suficientemente confiable para respaldar la evaluación de recursos minerales.

La clasificación de los recursos se efectuó aplicando un criterio principalmente geométrico basado en el alcance del variograma (ver Figura 67), un número mínimo de taladros que contribuyen a la estimación y las distancias promedio de dichos taladros respecto al bloque.

Figura 67

Rangos del variograma del Zn usados para la clasificación de recursos.



Nota: Datamine© Software-Propia

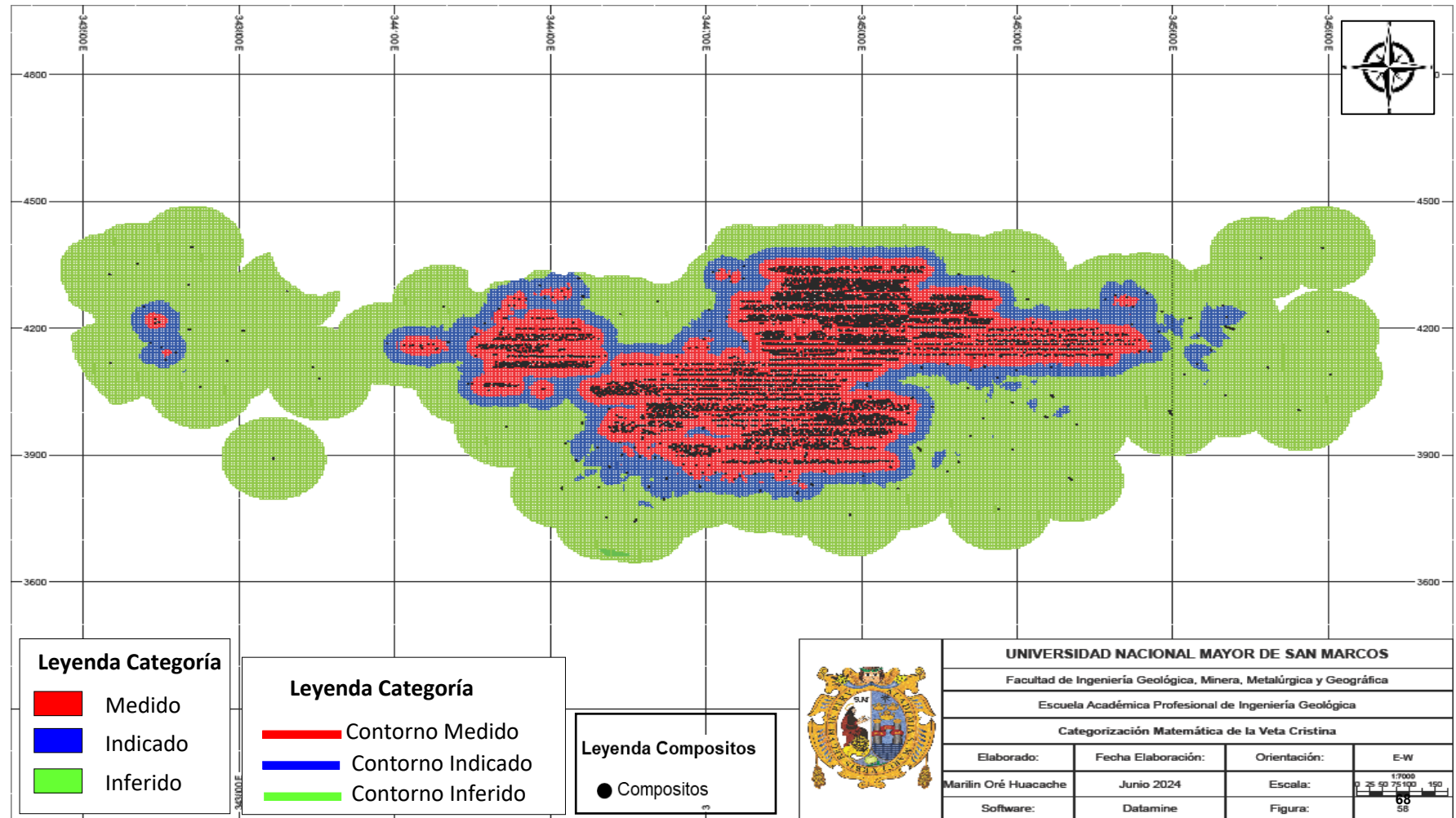
A continuación, se detallan los criterios:

- **Recurso Medido:** Se estableció un mínimo de tres sondajes diamantinos ubicados a una distancia promedio de 25 m desde el centroide del bloque.
- **Recurso Indicado:** Se requirió un mínimo de tres sondajes diamantinos dentro de 50 m de distancia promedio desde el centroide del bloque.
- **Recurso Inferido:** Se requirió un mínimo de un sondaje diamantino dentro de 100 m de distancia promedio desde el centroide del bloque.

Los resultados obtenidos se suavizaron manualmente para proporcionar una clasificación geológicamente coherente y prevenir un efecto de "perro moteado" (Figura 68 y Figura 69).

Figura 68

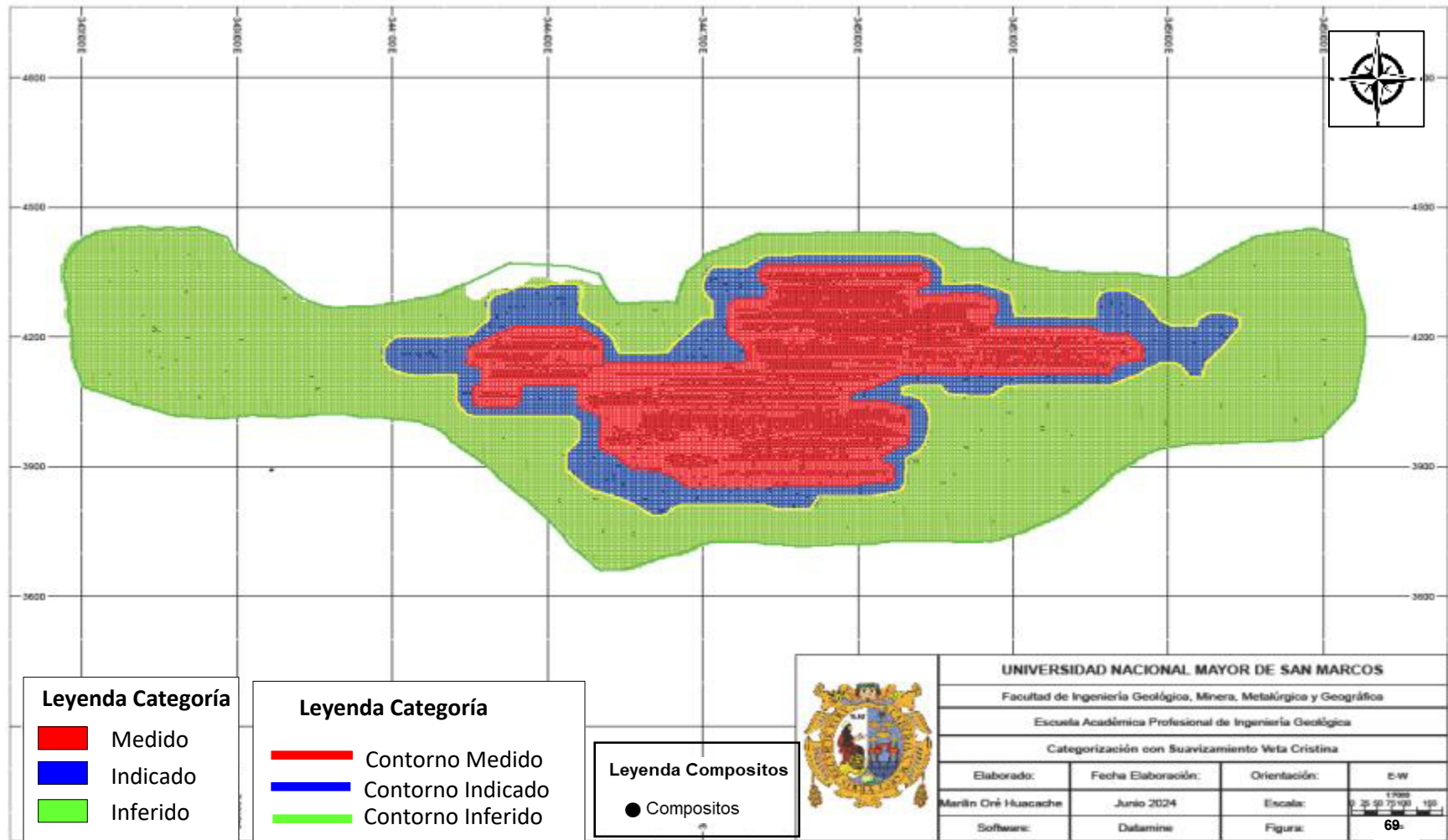
Vista en sección del modelo de recursos minerales antes del suavizado.



Nota: Datamine© Software-Propia (Vista planta).

Figura 69

Vista en sección del modelo de recursos minerales después del suavizado



Nota: Datamine© Software-Propia (Vista planta).

7.2.12. Perspectivas Razonables para la Eventual Extracción Económica

Para demostrar la probabilidad razonable para una eventual extracción económica (RPEEE), se consideró los factores modificadores proporcionados por el área de reservas minerales. La Tabla 21 muestra los precios metales usados, mientras que en la Tabla 22 describe la recuperación metalúrgica y calcular el Zn Eq.

Tabla 21

Precios de los metales usados para calcular el Zn Eq.

Metal	Precios	
	Valor	Units
Zinc	2,300	USD/t
Cobre	5,500	USD/t
Plomo	2,100	USD/t
Plata	18.00	USD/oz

Tabla 22

Recuperaciones metalúrgicas usadas para el cálculo de Zn Eq.

Producto	Recuperación metalúrgica			
	Zn	Pb	Cu	Ag
Bulk. Plomo	2.38%	90.79%	64.29%	71.18%
Conc. Zinc	92.98%	3.26%	21.69%	8.67%

- **Cálculo de Zinc equivalente (Zn Eq)**

La ley de Zinc equivalente (Zn Eq) se calculó considerando los precios de venta de los metales, los costos asociados y las recuperaciones metalúrgicas de Zinc, Plomo y Plata.

La fórmula para calcular la ley de Zinc equivalente (Zn Eq) es:

$$ZnEq = Zn + \frac{(\text{Precio Pb} * \text{RecPb} * \text{PbPagable}) * \text{Pb}}{\text{Precio Zn} * \text{RecZn} * \text{Zn_pagable}} + \frac{(\text{Precio Ag} * \text{RecAg} * \text{AgPagable}) * \text{Ag}}{\text{Precio Zn} * \text{RecZn} * \text{Zn_pagable}}$$

$$ZnEq = Zn + Pb + 0.58 * Ag$$

7.2.13. Declaración de los Recursos Minerales

Los Recursos Minerales de la Veta Cristina han sido reportados considerando un Cutoff marginal de 0.2% de Zn Eq (Zinc Equivalente). Tabla 23 describe el reporte de recursos minerales de la Veta Cristina.

Tabla 23

Reporte de recursos minerales de la Veta Cristina.

Categoría	Volumen	TM Recursos	Densidad	Ancho veta(m)	% Zn	% Pb	% Cu	Oz Ag	ZnEq
Medido	85,343	280,073	3.28	1.72	12.58	2.93	0.31	4.03	17.80
Indicado	328,506	1,033,924	3.15	1.99	7.05	2.70	0.25	4.80	12.54
Inferido	586,280	1,779,524	3.04	1.48	4.75	2.10	0.19	3.74	9.02
Total	1,000,128	3,093,521	3.10	1.67	6.23	2.38	0.22	4.12	10.99

Condiciones de reporte:

- Solo se reporta mineral in situ, es decir, quitando el tonelaje minado.
- Se reporta sobre un Cutoff de Zn Eq $\geq 2\%$.
- Se considera la siguiente fórmula para calcular en valor del Zinc equivalente:

$$ZnEq = Zn + Pb + 0.58 * Ag$$

7.2.14. Resultados de Reconciliación - Modelo Largo Plazo versus Mineral

Ejecutado

La reconciliación constituye una herramienta clave para comprobar la precisión y la confiabilidad del modelo de estimación de recursos minerales desarrollado en este trabajo. Este proceso consiste en comparar las proyecciones de tonelaje y ley del Modelo de Largo Plazo (MLP) con los resultados obtenidos durante el proceso de explotación (mineral ejecutado, EJEC) en el primer semestre del año 2021.

En la Figura 70 se presenta un gráfico de barras que detalla las toneladas extraídas de mineral proyectadas en el MLP y las obtenidas (EJEC) mes a mes, facilitando la visualización de las variaciones en el tonelaje. Además, la Figura 70 incluye un gráfico de líneas que muestra el cambio de la ley de Zn estimada y la ley para el mismo periodo, permitiendo identificar desviaciones y tendencias.

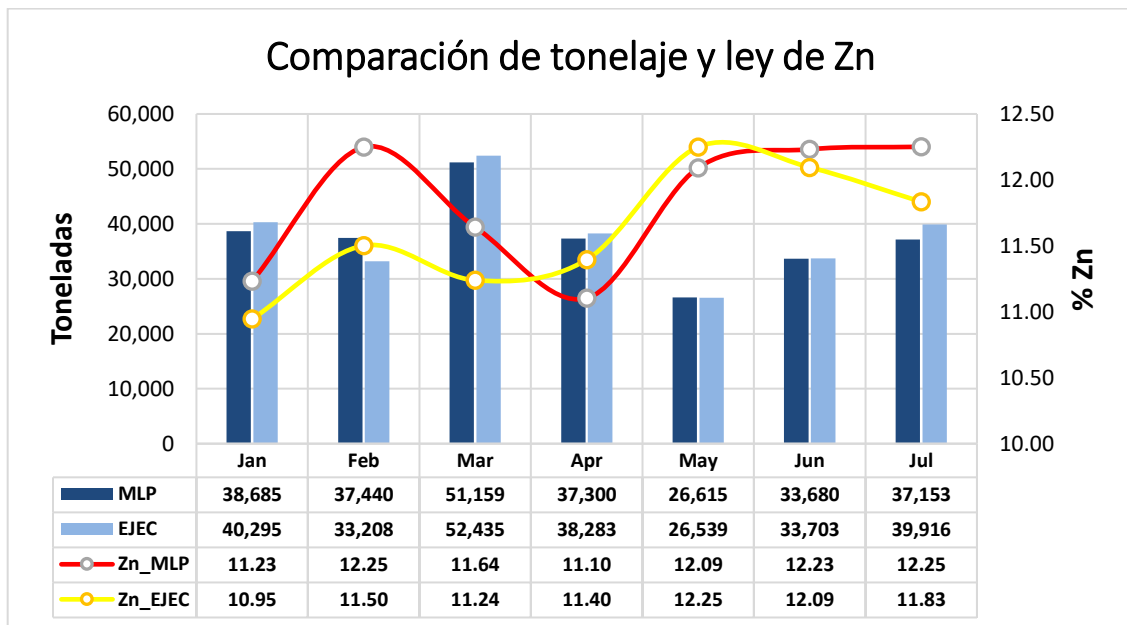
La variación porcentual del tonelaje y de la ley de Zn también se representa en la Figura 71. Este indicador cuantifica la diferencia entre las estimaciones del MLP y los resultados obtenidos, expresándola en porcentaje.

En la industria minera, se considera que una diferencia de $\pm 15\%$ es un rango aceptable para asegurar la confiabilidad del modelo y mantener la viabilidad técnica y económica de la operación minera.

<u>Abreviatura</u>	<u>Descripción</u>
MLP	Modelo de largo plazo
EJEC	Ejecutado

Figura 70

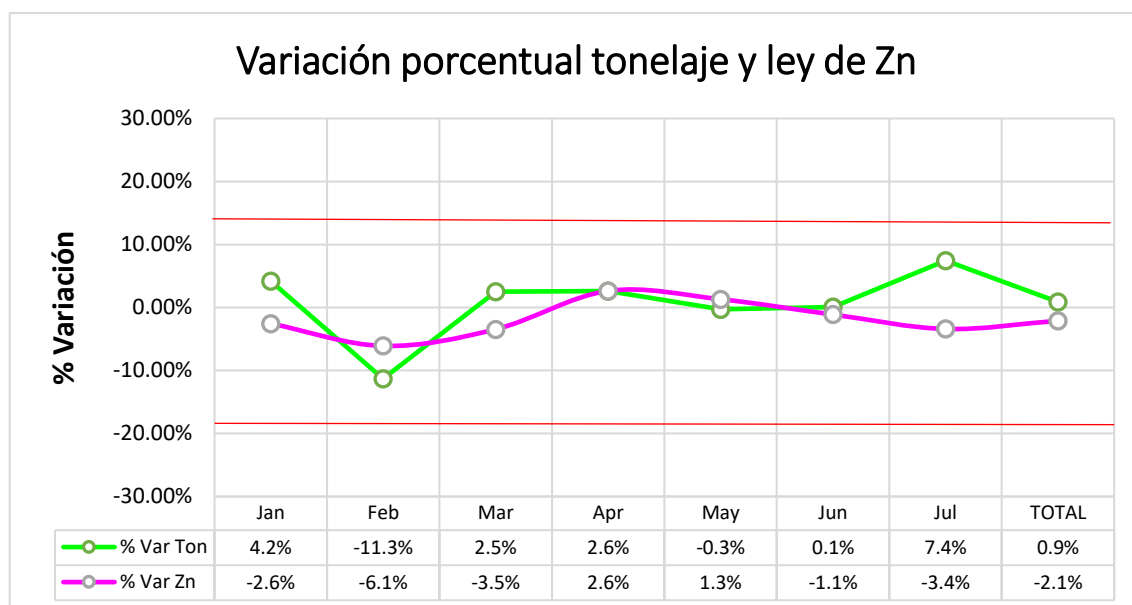
Gráfico de barras comparación de tonelaje y ley de Zn.



Nota: Propia

Figura 71

Gráfico de líneas de variación porcentual tonelaje y ley de Zn



Nota: Propia.

CAPÍTULO VIII: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

8.1. Conclusiones

- ❖ La interpretación 3D del modelo de la Veta Cristina mejora de manera notable la estimación de recursos minerales.
- ❖ El modelo en 3D de la estructura permite definir mejor la geometría.
- ❖ El uso del software Leapfrog Geo permite realizar la interpretación 3D de forma dinámica y con gran certeza.
- ❖ La estimación de recursos está bien soportada por la interpretación de la geometría de la veta.
- ❖ El tratamiento de altos erráticos permitió controlar la influencia de las leyes altas, y con ello tener una estimación confiable.
- ❖ El análisis de la variografía muestra una buena correlación a un alcance de 80 m aproximadamente, a esta distancia se tiene buenas estimaciones de ley.
- ❖ Las validaciones de la estimación muestran valores que están dentro de las buenas prácticas, dando así una certeza aceptable de ley en los bloques estimados.
- ❖ La asignación de la densidad mediante la fórmula de la regresión multivariable permite predecir la densidad en función de las leyes de Plomo, Zinc, Fierro, Cobre y Plata.
- ❖ Los parámetros considerados para la categorización de recursos son razonables con el conocimiento geológico y dan la suficiente confiabilidad para realizar planes de minado.
- ❖ Los resultados de reconciliación entre el modelo geológico de largo plazo y el mineral ejecutado durante el primer semestre evidencian que las estimaciones de tonelaje y

ley se mantienen dentro de los rangos aceptables. Este comportamiento valida la consistencia y confiabilidad del modelo geológico y del proceso de estimación de recursos minerales, reforzando su utilidad como herramienta de soporte para la planificación minera.

8.2. Recomendaciones

- ❖ Realizar mayor interpretación de secciones 2D para ajustar mejor la geometría de la Veta Cristina en sectores donde no se tenga información de sondajes diamantinos o canales.
- ❖ Realizar seguimiento de la producción tanto en tonelaje como ley para ajustar los valores de capping.
- ❖ Implementar el análisis de riesgo dentro de la estimación aplicando técnicas de Simulación condicional.
- ❖ Realizar la categorización de recursos minerales usando el estudio del espaciamiento de sondajes (Drill Hole Spacing).
- ❖ Definir un modelo estructural del yacimiento que permita definir planos de fallas, dominios estructurales y la cinemática de las discontinuidades. El conocimiento estructural del yacimiento ayudará a mejorar el modelamiento de las vetas, la estimación y los programas de exploración.
- ❖ Generar programas de perforación Infill y brownfield basados en la última interpretación de la Veta Cristina, proyectando leyes, potencia y tonelaje.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agterberg, F. (2003). *Toward a new paradigm for data analysis (No. 2003-01)*. Geological Survey of Canada.
- Alfaro, M. (2006). *Estimación de Recursos Mineros*. Depto. Ingeniería en Minas, Universidad de Santiago, 2006.
- Alfaro, M. (2007). *Estimación de Recursos Mineros*.
- Alfaro, M. (2002). *Introducción al Muestreo Minero*. IIMCh, Santiago.
- Álvarez, G. (2014). *Estadística Descriptiva*.
- Carlotto, V., Quispe, J., Acosta, H., Rodríguez R., Romero, D., Cerpa, L., Mamani, M., Díaz-Martínez, E., Navarro, P., Jaimes, F., Velarde, T., Lu, S., and Cueva, E. (2009). *Dominios Geotectónicos y Metalogénesis del Perú: INGEMMET*. Boletín Sociedad Geológica del Perú, v. 103, p. 1-89.
- Carpio, M., Torre, J., & Fuentes, J. (2018). *Prospección de Recursos de Rocas y Minerales Industriales en la Región Pasco*. Boletín Serie B: Geología Económica N° 52 Lima, Perú 2018. INGEMMET.
- Cerpa, L.; Cereceda, C.; Torres, D.; Muñoz, L.; Aguilar, R., & Rodríguez, F. (2011). *Geología del cuadrángulo de Condoroma, hoja 31-t, escala 1: 50 000*. INGEMMET. Boletín, Serie A: Carta Geológica Nacional, 143, 83 p., 4 mapas.
- Chatterjee, C. (2019). *Geostatistical Ore Reserve Estimation*.
- Cobbing, J., Quispesivana, L., & Paz, M. (1996). *Geología de los Cuadrángulos de Ambo, Cerro de Pasco y Ondores (Boletín No. 77, Serie A: Carta Geológica Nacional)*. Instituto Geológico Minero y Metalúrgico. Lima, Perú.
- Cobbing, J., Sánchez, A., Martínez, W. y Zárate, H. (1996). *Geología de los cuadrángulos de Huaraz, Recuay, La Unión, Chiquian y Yanahuanca*. Bol. Carta Geológica Nac. Serie A, INGEMMET, N° 76, 300p12.
- CRIRSCO (Committee for Mineral Reserves International Reporting Standards). (2019). *International reporting template for the public reporting of exploration targets, exploration results, mineral resources and mineral reserves* (November 2019) (p. 19). International Council on Mining & Metals (ICMM).
- Cuevas, L. (2013). *Modelamiento del Efecto de soporte en un contexto multivariable*.

- Díaz A. (2002). *Geoestadística Aplicada*. Instituto de Geofísica, UNAM, Instituto de Geofísica y Astronomía, CITMA, Cuba
- Ellison, A., Klinck, A. & Hawkins, M., (1989). *Deformation events in the Andean orogenic cycle in the Antiplano and Western Cordillera, southern Perú*. J. South American Earth Sciences, 2: 263-710.
- Estevez, E. (2010). *Apuntes sobre estimación de recursos y reservas*.
- Giraldo, R. (2009). *Introducción a la Geoestadística: Teoría y Aplicación*. Bogotá, Colombia: Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias, Departamento de Estadística.
- Guillermo P. (2008). *Ponencia: Curso Introducción a la Geoestadística para la Estimación de Recursos Minerales*. Antamina y la empresa AMEC. Doctor Senior Geostatistician Mining & Metals.
- Hernández, H. (2018). *Fundamentos de la estimación de recursos minerales*.
- Jacay H., Jaillard, E., Marocco, R., & Mascle, H. (2000). *Evolución tectono-sedimentaria de la margen andina: el Cretáceo superior de los Andes del Perú Central y Septentrional*. Boletín, 90, 43-68. Lima: Sociedad Geológica del Perú.
- Jacay, J. et al. (2000). *Estilo estructural de la Cordillera Occidental de los Andes del Perú central*. Boletín de la Sociedad Geológica del Perú.
- Jara, E. (2017). *Estimación por métodos Geoestadísticos*.
- Mallet, J. (2004). *Geomodeling*. Oxford University Press.
- Marín, A. (2004). *Estimación de recursos de cobre, plomo, zinc y plata del Proyecto Toromocho*. Biblioteca de Dataroom de Centromin Perú.
- Mathéron, G. (2008). *Las variables regionalizadas y su estimación*. Tesis para obtener el Grado de Doctor en Ciencias Aplicadas en la Universidad de París.
- Matheron, G. 1962. *Traite de Geostatistique Appliquee, Tome I*. Memoires bureau de Recherches Geologiques et Minieres, N 24. Editions Bureau de Recherche et Minieres, Paris.
- Matta, V., Luis S. (2013). *Controles de mineralización del yacimiento filoniano argentífero Islay - mina Chungar, Pasco – Perú*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio Institucional de la Universidad Nacional de Ingeniería. <http://hdl.handle.net/20.500.14076/10481>.

- Matta, V., Luis S. (2013). *Mina Islay - Depósito polimetálico de vetas y cuerpos* (Informe técnico). Universidad Nacional de Ingeniería.
- McCarter, M. (2018). *Mineral Resource Estimation: Principles and Applications*.
- Michalak, M. (2013). *Exhumación de los Andes peruanos: perspectivas a partir de cronómetros minerales*. Universidad de California Santa Cruz, tesis doctoral, págs. 177.
- Moncayo, C., Díaz-Pardo, E., & Ángeles, M. (1995). *Diatomeas epilíticas como indicadores de la calidad del agua en la cuenca alta del río Lerma, México*. Hidrobiológica, 22(1), 16-273.
- Naranjo, Ó. (2017). *Modelamiento geológico y estimación de recursos, Yacimiento La Niña, Tongoy, Cementos Melón S.A.* [Tesis de pregrado, Universidad de Chile]. Repositorio de la Universidad de Chile. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/148670>.
- Palacios, M., Sanchez, F., and Herrera, R. (1995). *Geolgia del Peru: Seria A: Carta Geológica Nacional, Instituto Geologico Minero Y Metalurgico*. Boletin No. 55.
- Petford, N. & Atherton, M. (1992). *Granitoid emplacement and deformation along a major crustal lineament: the Cordillera Blanca, Peru*. Tectonophysics, 205(1-3): 171-185. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(92\)90425-6](https://doi.org/10.1016/0040-1951(92)90425-6).
- Petford, N., y Atherton, M. (1996). *Fundidos parciales ricos en sodio de corteza basáltica recién cubierta: el batolito de la Cordillera Blanca, Perú: Journal of Petrology*. v. 37, p. 1491-1521.
- Rodríguez R. & Cueva E. (2011) – Geología del Cuadrángulo de Cerro de Pasco – hoja 22k - 1:100 000 INGEMMET.
- Rosas, S., Fontboté, L., & Tankard, A. (2007). *Tectonic evolution and paleogeography of the Mesozoic Pucará Basin, central Peru*. Journal of South American Earth Sciences, v. 24.
- Rossi, M., & Haus, R. (2017). *Mineral Resource Estimation*.
- Royer, J., Mejía, P., Caumon, G., Collon, P. (2015). *Geomodelación 3D y 4D aplicada a la exploración de recursos minerales: una introducción*. En: Weihed, P. (eds) 3D, 4D y modelos predictivos de los principales cinturones minerales en Europa. Revisiones de Recursos Minerales. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-17428-0_4.

- Scherrenberg, A.; Jacay, J.; Holcombe, R. & Rosenbaum, G. (2012). *Stratigraphic variations across the Marañon Fold-Thrust belt, Peru: implications for the basin architecture of the West Peruvian Trough*. Journal of South American Earth Sciences, v. 38: 147-158. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2012.06.006>.
- Soler, P., & Bonhomme, M. (1988). *Oligocene magmatic activity and associated mineralization in the polymetallic belt of central Peru*. Economic Geology, 83(3), 657–663
- Thouvenin, J. (1983). *Les minéralisations polymétalliques a Zn-Pb-Cu-Ag de Huaron (Pérou central), minéralographie des minerais et pétrographie des altérations des éponges* (Tesis). Paris.
- Tumialan, P. (2003). *Compendio de Yacimientos de Minerales del Perú*. Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico – INGEMMET.
- Villanueva, Núñez. (2001). *Geoestadística*, Lima, Perú, Recursos Naturales y Medio Ambiente S.R.L.