

Universidad Nacional de Ingeniería
Facultad de Ingeniería Geológica Minera y Metalúrgica



TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL

**Evaluación del modelamiento predictivo en la prospección
geológica, Mina Chipmo, Orcopampa, Arequipa, Perú**

Para obtener el título profesional de Ingeniero Geólogo

Elaborado por

Harold Haresh Perez Lazo

 [0009-0009-2328-8477](https://orcid.org/0009-0009-2328-8477)

Asesor

MSc. María Luz Marquina Robles

 [0009-0003-9145-2298](https://orcid.org/0009-0003-9145-2298)

LIMA – PERÚ

2025

Citar/How to cite	Perez Lazo [1]
Referencia/Reference	[1] H. Perez Lazo, “ <i>Evaluación del modelamiento predictivo en la prospección geológica, Mina Chipmo, Orcopampa, Arequipa, Perú</i> ” [Trabajo de suficiencia profesional de pregrado]. Lima (Perú): Universidad Nacional de Ingeniería, 2025.
Estilo/Style: IEEE (2020)	

Citar/How to cite	(Perez, 2025)
Referencia/Reference	Perez, H. (2025). <i>Evaluación del modelamiento predictivo en la prospección geológica, Mina Chipmo, Orcopampa, Arequipa, Perú</i> . [Trabajo de suficiencia profesional de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio institucional Cybertesis UNI.
Estilo/Style: APA (7ma ed.)	

Dedicatoria

*Dedico este trabajo a Dios, mi familia, así como también a
mis líderes laborales de
Compañía de minas Buenaventura*

Agradecimientos

A los Ing. José Aquino Aquino y Ing. Fernando Remigio Julian por el aprendizaje a lo largo de mi carrera laboral. De igual manera, a las Ing. Nora Revollé Alvarez y Ing. María Marquina Robles por las observaciones y recomendaciones realizadas durante el desarrollo y finalización del presente trabajo.

Resumen

La Mina Chipmo es productora de oro, está ubicada en la provincia Castilla, región Arequipa. Es un depósito mineral epitermal asociado a telururos, emplazado en los volcánicos del complejo Sarpane (composición dacítica principalmente). La mineralización data de 18.1 Ma. Los principales sistemas estructurales asociados a la mineralización son: sistema N60°E (Prometida, Nazareno y Pucara), sistema N20°E (María Isabel y Sistema R4) y sistema N30°W (Ocoruro). La producción histórica es 5.1 millones de onzas de oro al 2023.

Chipmo inició actividades en el 2000, como parte de las actividades de exploración se buscan nuevos targets con diversas técnicas con el fin de darle continuidad a la operación minera. Los modelos predictivos nacen como solución a la necesidad de ampliar la prospección geológica en las cercanías de la mina Chipmo, con las guías de mineralización estructural, alteraciones hidrotermales y mineralógica, junto con el apoyo de las operaciones difusas con las diversas capas geológicas realizadas en ArcGis Pro, se ha logrado generar un plano predictivo en el cual se ha logrado identificar cuatro nuevos targets de exploración, los cuales generan oportunidades de poder ampliar la vida útil de la mina y darle continuidad a las operaciones mineras.

Palabras clave — Yacimiento hidrotermal, target de exploración, modelamiento predictivo, prospección geológica.

Abstract

The Orcopampa Mine, is a gold producing mine, located in the Castille province, Arequipa region. It is an epithermal mineral deposit associated with tellurides, located in the Subvolcanics of the Sarpane complex (mainly dacitic composition). Mineralization dates to 18.1Ma. The main structural systems associated with the mineralization are System N60°E (Prometida, Nazareno and Pucara), system N20°E (María Isabel and System R4) and system N30°W (Ocoruro). Historical production is approximately 5.1 million ounces of Gold until 2023.

Chipmo began operations in 2000, seeking new targets using various techniques as part of its exploration activities to ensure continued mining operations. Predictive models were created as a solution to the need to expand geological prospecting in the vicinity of the Chipmo mine, with mineralization guides like structural, hydrothermal alterations and mineralization together with the support of diffuse operations with the various geological layers carried out in ArcGis Pro, a predictive plan has been generated in which four new exploration targets have been identified, which generate opportunities to extend the useful life of the mine and give continuity to mining operations.

Keywords — Hydrothermal deposit, exploration target, predictive modelling, geological prospecting.

Tabla de Contenido

	Pág.
Resumen	v
Abstract	vi
Introducción	xii
Capítulo I. Parte introductoria del trabajo	1
1.1 Generalidades	1
1.2 Descripción del problema de la investigación	2
1.3. Objetivos del estudio	3
1.3.1 Objetivo general	3
1.3.2 Objetivos específicos.....	3
1.3.3 Variables	4
1.4. Hipótesis	4
1.5 Antecedentes investigativos	4
1.5.1 Antecedentes nacionales	4
1.5.2 Antecedentes internacionales.....	6
Capítulo II. Marcos teórico y conceptual.....	8
2.1 Marco teórico.....	8
2.1.1 Prospección geológica	8
2.1.2 Modelamiento predictivo.....	8
2.2 Marco conceptual	9
2.2.1 Yacimiento epidermal	9
2.2.3 Target de exploración.....	9
Capítulo III. Desarrollo del trabajo de investigación	10
3.1 Marco geológico	10
3.1.1 Geomorfología.....	10
3.1.2 Estratigrafía.....	11
3.1.3 Rocas ígneas	20

3.1.4	Geología estructural	21
3.2	Geología de la mina Chipmo	23
3.2.1	Controles estratigráficos	23
3.2.2	Controles estructurales	25
3.2.3	Alteraciones hidrotermales	31
3.2.4	Geoquímica	33
3.2.5	Geometría y texturas de mineralización	41
3.3	Modelamiento predictivo	44
3.3.1	Metodología de trabajo	46
3.3.2	Definición de variables geológicas	46
3.3.3	Generación de modelos y operaciones difusas en ArcGis Pro	51
3.3.4	Operaciones difusas para la generación de predictores	59
3.3.5	Generación del modelo predictivo	65
	Capítulo IV. Análisis e interpretación de resultados	67
4,1	Validación del modelo predictivo y propuestas de ingeniería	67
4.1.1	Validación del modelo predictivo	67
4.2	Propuesta de ingeniería	67
4.2.1	Nuevos Target's de exploración	67
4.3	Inversión	73
	Conclusiones	75
	Recomendaciones	76
	Referencias bibliográficas	77
	Anexos	80

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1: Pesos finales de subcapa de lineamiento	52
Tabla 2: Pesos finales de subcapa de RQD.....	52
Tabla 3: Pesos finales de subcapa de alteraciones hidrotermales	55
Tabla 4: Inversión de proyectos	74

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1 : Plano de ubicación y accesibilidad.....	1
Figura 2 : Clima y vegetación del distrito de Orcopampa	2
Figura 3 : Aspectos geomorfológicos del distrito de Orcopampa.....	11
Figura 4 : Aspectos geomorfológicos de la mina Chipmo.....	11
Figura 5 : Plano geológico del distrito de Orcopampa.....	22
Figura 6 : Columna estratigráfica	24
Figura 7 : Veta Prometida R1, Nv.3540.....	26
Figura 8 : Veta Nazareno, Nv. 3440.....	28
Figura 9 : Veta Pucara Sur, Nv. 3690	30
Figura 10: Principales sistemas estructurales Orcopampa – Nv.3540.....	30
Figura 11: Limpieza estadística de terraspec	31
Figura 12: Limpieza estadística probability split	32
Figura 13: Box plots Au, Ag, Te, Sb, Bi con arcillas asociadas a la mineralización	33
Figura 14: Distribución aurífera de los sistemas Prometida, Nazareno y Pucara	34
Figura 15: Fotomicrografías del sistema R4.....	35
Figura 16: Firma geoquímica sistema Prometida, display xy plot.....	36
Figura 17: Firma geoquímica sistema Nazareno, display xy plot.....	38
Figura 18: Firma geoquímica sistema Pucara (sistema R4), display xy plot.....	40
Figura 19: Geometrías y texturas de mineralización en mina Chipmo.....	43
Figura 20: Proceso de generación de un plano predictor	45
Figura 21: Capas geológicas para el modelo predictivo con sus pesos correspondientes..	46
Figura 22: Proceso para la generación del plano de lineamientos Nv.3540	48
Figura 23: Plano del RQD Nv. 3540.....	49
Figura 24: Plano de alteraciones hidrotermales Nv. 3540	50
Figura 25: Plano mineralógico porcentaje de cuarzo Nv. 3540	51
Figura 26: Lineamientos estructurales reclasificado con pertenencia difusa Nv. 3540.....	53

Figura 27: Plano RQD reclasificado con pertenencia difusa Nv. 3540	54
Figura 28: Análisis estadístico de la presencia de Au > 5 gr/t por tipo de ensamble de arcillas.....	55
Figura 29: Alteraciones hidrotermales reclasificado con pertenencia difusa Nv. 3540.....	56
Figura 30: Plano mineralógico reclasificado con pertenencia difusa Nv. 3540	58
Figura 31: Plano predictor estructural Nv. 3540	60
Figura 32: Plano predictor alteraciones hidrotermales Nv. 3540	62
Figura 33: Plano predictor mineralógico Nv. 3540.....	64
Figura 34: Plano predictor final Nv. 3540	66
Figura 35: Comparativo del plano predictor final con el plano de leyes Au Nv. 3540	67
Figura 36: Targets de exploración Nv. 3540	68
Figura 37: Exploración Prometida NE, sección longitudinal	69
Figura 38: Exploración Prometida SW, planta Nv. 3540.....	70
Figura 39: Exploración Prometida SW, Sección transversal AA'	71
Figura 40: Exploración Ocoruro NW, Sección longitudinal composito Ocoruro 2	72
Figura 41: Exploración Ariana SW, Sección longitudinal Ariana.....	73

Introducción

El Perú es un país minero por excelencia, la minería formal aporta el 14% del PBI nacional (Benavides, 2023). La economía tiene un gran soporte en el rubro minero, debido a ello es importante mantener gestiones que aporten el crecimiento de la minería, por otro lado, es necesario tener una cartera de proyectos geológicos sólidos, con el fin de desarrollar unidades mineras y así seguir fortaleciendo la economía peruana.

En la actualidad la gran mayoría de proyectos geológicos con potencial en convertirse en unidades mineras se han descubierto con evidencias superficiales muy notorias, quedando así proyectos con poca evidencia o con anomalías muy ligeras, es por eso la importancia del modelamiento predictivo como herramienta para las exploraciones geológicas y generación de nuevos targets.

No solo es importante en la generación de proyectos sino también en la predictividad de nuevos sectores dentro de una unidad minera; conociendo el comportamiento y los patrones que generaron sectores económicos dentro de una estructura mineralizada se puede realizar con estas diversas capas un modelo predictivo con el fin de encontrar nuevos targets e incrementar la vida útil de la unidad minera y así contribuir al crecimiento económico del Perú.

Capítulo I. Parte introductoria del trabajo

En este apartado se detallan aspectos generales de la unidad minera Orcopampa, tales como ubicación y accesibilidad, vegetación y clima.

1.1 Generalidades

Ubicación y acceso

Políticamente el distrito Minero de Orcopampa, se sitúa en la provincia de Castilla; región de Arequipa alrededor de las siguientes coordenadas, véase figura 1:

Longitud = 72 20' 40" W

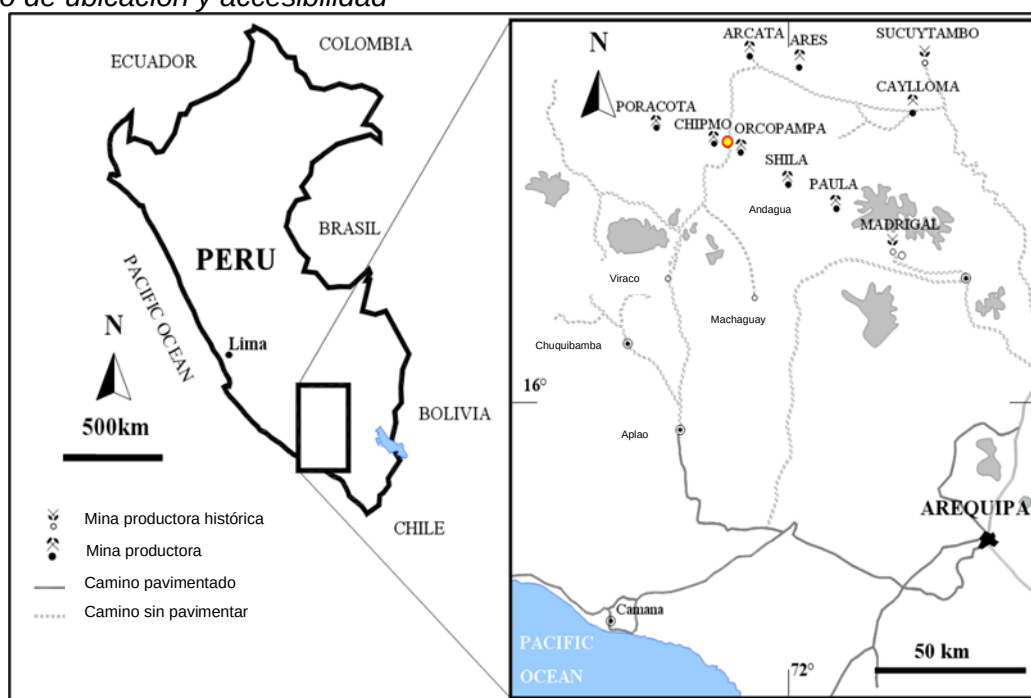
Latitud = 15 15' 30" S

Altitud = 3,800 m.s.n.m.

abarca una extensión aproximada de 30 km².

Figura 1

Plano de ubicación y accesibilidad



Nota: El acceso al distrito de Orcopampa se puede realizar por vías terrestre como aéreo. Adaptado de Gamarra (2010),

Por carretera se tienen dos accesos:

Por la carretera Arequipa – Aplao – Viraco – Orcopampa, o por Arequipa – Aplao – Chuquibamba – Orcopampa: 370 km y una segunda ruta, menos transitada es la que

partiendo de Arequipa pasa por Sibayo – Caylloma – desvío Mina Arcata – Orcopampa: 320 km.

Clima y vegetación

El clima es árido y seco, típico de la región costanera del país, que da lugar a zonas desprovistas de vegetación, salvo algunas cactáceas y arbustos temporales que se desarrollan con ocasionales precipitaciones o cuando existen condiciones húmedas necesarias. En el resto del área se tiene el clima característico de la región cordillerana; precipitaciones intensas en el invierno y sequía en el verano. La vegetación se reduce al “ichu”, yareta y aislados quenuales en las nacientes de las quebradas, véase en la Figura siguiente:

Figura 2

Clima y vegetación del distrito de Orcopampa



Fuente: Elaboración propia.

1.2 Descripción del problema de la investigación

La exploración dentro de una unidad minera es de gran importancia para la continuidad de las operaciones. Menciona Samaniego (2021) que muchas unidades mineras en el Perú se encuentran en su última etapa de explotación, o en su defecto, se

encuentran en etapa de cierre debido a resultados negativos en las exploraciones y la falta de targets. La zona de estudio corresponde a la mina Chipmo, la cual se ubica en la franja metalogenética XXI-A de epitermales de Au-Ag y es la sexta mina en el distrito de Orcopampa que ha operado Buenaventura.

En el año de 1996 finalizó las operaciones mineras la mina Calera (5° Mina en el distrito de Orcopampa), que producía principalmente Ag, pero en sus últimos años empezó a producir Au. El descubrimiento de las vetas Prometida y Nazareno (1991) en el sector oeste del valle de Orcopampa trajo el inicio de una nueva mina, conocida como mina Chipmo. El producto principal de la mina Chipmo es el Au y tiene como subproducto la Ag, llegando a tener una producción anual promedio de 175 mil onzas de Au entre los años 2014 al 2017, a partir del año 2018 la producción comienza a disminuir, en el año 2022 la mina tiene un programa de 70 mil onzas anuales.

La disminución en la producción se debió básicamente a la falta de nuevas zonas cercanas a la operación para poder reponer los recursos explotados. Es por lo que se necesita utilizar nuevas técnicas de exploración tales como el modelamiento predictivo y así poder dar más años de vida a la mina.

De lo mencionado en los párrafos anteriores se desprende la pregunta de investigación:

¿Cómo la evaluación del modelamiento predictivo en la prospección geológica en mina Chipmo afectara la generación de nuevos targets?

1.3. Objetivos del estudio

1.3.1 Objetivo general

Evaluación del modelamiento predictivo en la Prospección Geológica, Mina Chipmo. Orcopampa, Arequipa – Perú

1.3.2 Objetivos específicos

- Identificar las capas geológicas asociadas a la mineralización económica de Oro
- Generación del modelo predictivo con métodos matemáticos
- Validación de las zonas minadas con el modelo predictivo

1.3.3 Variables

Variable dependiente:

Generación de nuevos targets de exploración.

Variables independientes:

- Capas geológicas asociadas a la mineralización económica de Oro.
- Modelamiento predictivo con métodos matemáticos.
- Validación del modelamiento predictivo

1.4. Hipótesis

Hipótesis general:

Al evaluar del modelamiento predictivo en la Prospección Geológica en mina Chipmo, se encontrarán beneficios al generar nuevos targets

Hipótesis específicas:

- Al Identificar las capas geológicas asociadas a la mineralización económica de Oro se generan datos para el modelo predictivo que identificaran nuevos targets de exploración
- Al generar modelo predictivo con métodos matemáticos se encontrarán nuevos targets de exploración
- Al validar las zonas minadas contrastándolo con el modelo predictivo incrementa la certeza de los nuevos targets

1.5 Antecedentes investigativos

1.5.1 Antecedentes nacionales

Aquino, Quispe, Perez y Meza (2016) en su trabajo de investigación titulado “Caracterización geológica del sistema de vetas Lucia y su relación con el potencial económico del proyecto Quello-Quello de la mina Chipmo, Orcopampa-Arequipa, Perú”, indican que las características estructurales, geoquímicas y mineralógicas del sistema Lucia (Sistema de vetas epitermales de sulfuración intermedia de Au-Ag) son similares a las del proyecto Quello-Quello, ubicado al noreste de la mina Chipmo. Estas similitudes

geológicas en ambos sectores sirven como guía de exploración hacia el sector noreste de la mina.

Ayala, Perez, Aquino, Salazar y Remigio (2021) en su trabajo de investigación titulado “Vectorización estructural, geoquímica y de alteraciones hidrotermales en las exploraciones del Sistema R4 en la Mina Chipmo, Orcopampa, Arequipa, Perú”, identifican los patrones estructurales, geoquímicos y de alteraciones hidrotermales en el sistema R4 para vectorizar la exploración en el sistema R4 y generar nuevos targets de exploración con las mismas características; la vectorización se centra en la búsqueda de sistemas estructurales transtensivos de movimiento sinistral-inverso asociado a anomalías de alteración ácida (dickita y caolinita de alta cristalinidad) y teluro.

Reed y Cannel (2018) en su trabajo de investigación titulado “Implicit modelling of the Las Bambas Deposit, Peru” emplean un modelo geológico implícito 3D el cual se generó de la reclasificación de los registros geológicos y otros datos en categorías apropiadas para el modelo y la aplicación de métodos numéricos para el modelamiento, con el fin de validar y predecir la geometría del depósito en zonas con menor información, lo cual se logró en el pórfido y skarn de Las Bambas.

Salazar (2008) en su tesis titulada “Epithermal gold-telluride mineralization in the Chipmo deposit, Orcopampa district, Arequipa Perú” caracterizó las alteraciones hidrotermales, la geoquímica y los estilos de mineralización en las principales vetas de la mina Chipmo, tales como la veta Nazareno. Llegando a encontrar una relación entre la alteración ácida (dominadas por arcillas tales como, dickita y caolinita), la presencia de teluro y la mineralización económica de Au.

Billa, Lips, Bouchot, Tourliere, Stein y Guillou-Frottier (2004) en su trabajo de investigación titulado “Predicting gold-rich epithermal and porphyry systems in the central Andes with a continental-scale metallogenic GIS” a través de la interacción matemática de la litoestratigrafía de la roca madre, contactos litoestratigráficos, discontinuidades estructurales y la profundidad e inclinación de la zona Wadati-benioff modelada a partir de datos sísmicos genera una herramienta predictiva para identificar los depósitos minerales

en los Andes centrales, se llegó a verificar en el plano predictivo dentro del Perú dos tercios de los depósitos epitermales y pórfidos auríferos conocidos y además delinea nuevas áreas auríferas potencialmente favorables.

Corbett (2014) en su trabajo de investigación titulado “Comments on exploration projects in the Orcopampa, Tantahuatay y La Zanja districts, Perú”, estudia el potencial geológico del distrito minero de Orcopampa. Explica la caracterización geológica de la veta Nazareno, y define 03 estadios de mineralización que están asociadas por componentes de movimiento de “strike-slip”. Además, en este estudio, se explica la geología de otras vetas o estructuras con potencial exploratorio aledañas a la mina.

1.5.2 Antecedentes internacionales

Ayorinde, Tega, Obaigbena y Winston (2024) en su trabajo de investigación titulado “A review of predictive analytics in the exploration and management of U.S. geological resources” evalúa herramientas matemáticas de análisis predictivo con inteligencia artificial a los datos geológicos para incrementar las áreas de interés minero, los resultados de este trabajo muestra que estos métodos permiten crear capas predictivas probabilísticas que ofrecen una comprensión más matizada de los procesos geoquímicos y geológicos en Estados Unidos.

Feltrin (2008) en su trabajo de investigación titulado “Predictive modelling of prospectivity for Pb–Zn deposits in the Lawn Hill Region, Queensland, Australia” combina el mapeo de potencial mineral, modelamiento geodinámico y lo interrelacionan con técnicas matemáticas para predecir el potencial mineral en la región de Lawn Hill, llegando a identificar un prospecto en el sector norte del área de estudio.

Rodriguez, Sanchez y Chica (2015), en su trabajo de investigación titulado “Machine learning predictive models for mineral prospectivity: An evaluation of neural networks, random forest, regression and support vector machines” usan los criterios de la precisión en la delimitación de áreas prospectivas, la sensibilidad a la estimación de hiperparámetros, la sensibilidad al tamaño en el entrenamiento de datos y la interpretabilidad de los parámetros del modelo para la predicción de prospectividad, con lo

cual se generaron algunas zonas de interés en el yacimiento epitermal de Rodalquilar, España.

Capítulo II. Marcos teórico y conceptual

2.1 Marco teórico

2.1.1 Prospección geológica

Según Torres (2020) la prospección es la etapa donde se buscan minerales aprovechables en una zona determinada, basándose en estudios geológicos y otras técnicas como la geofísica, geoquímica, interpretación de imágenes satelitales y otras de carácter regional, que sirven para determinar los principales blancos prospectivos donde se realizarán los trabajos de exploración. Para Bazan (2021), en la actualidad se usan diversas herramientas para las exploraciones geológicas tales como la prospección geoquímica combinando el índice de enriquecimiento relativo local (LREI) de elementos indicadores de mineralización, el coeficiente de rango correlacional y el análisis de componentes principales a través de superposiciones difusas (fuzzy modelling) y el uso de aprendizaje profundo (deep learning) no supervisado, para generar mapas de prospectividad geoquímica y la espectroscopia de arcillas para determinar el ensamble y características de las arcillas asociadas a la mineralización económica de Au.

2.1.2 Modelamiento predictivo

Para Brooks (2017) el modelamiento predictivo es un grupo de técnicas utilizadas para hacer inferencias sobre eventos futuros, es una rama de análisis avanzado que hace predicciones sobre resultados futuros utilizando datos históricos combinados con modelado estadístico, técnicas de extracción de datos y aprendizaje automático.

El modelamiento predictivo en el ámbito geológico tiene como fin generar un modelo 2D o 3D a partir de capas geológicas relacionadas a la mineralización de los yacimientos. Dichos modelos son una superposición de estas capas con el fin de generar un modelo predictivo a partir de la información existente. Para la generación de estos modelos predictivos se pueden utilizar las capas de lineamientos estructurales, litológicas, metalogénicas, geofísicas, geoquímicas, alteraciones hidrotermales, mineralógicas y diversas características geológicas, siempre y cuando estén relacionadas a la

mineralización. Para poder superponer las capas se usan los operadores difusos And Difusa, Or Difusa, Producto Difuso, Summa Difusa y Gamma Difusa.

El modelo predictivo en 2D puede generarse en el software ArcGis Pro-versión 2.8, ya que en este software se puede realizar las operaciones difusas a partir de las capas geológicas ya interpretadas.

2.2 Marco conceptual

2.2.1 Yacimiento epitermal

Camprubí (2006) considera un yacimiento epitermal cuando las temperaturas de formación están entre <150 y $\sim 300^{\circ}\text{C}$, y a profundidades desde la superficie hasta 1 o 2 km, con presiones de hasta varios centenares de bares. Estos yacimientos se originan a partir de fluidos hidrotermales y se caracterizan por la presencia de oro y plata; y se dividen en yacimientos epitermales de baja, intermedia y alta sulfuración.

2.2.3 Target de exploración

Echeverría (2021) considera que los targets de exploración son zonas con potencial geológico económico que son considerados para una posible fase de exploración que incluya de ser necesario perforaciones y diversos estudios geológicos para la confirmación de mineralización económica.

No es necesario que todas las anomalías existan, basta con una o dos anomalías para poder mencionar que se tiene un nuevo Target de exploración, el cual es un nuevo sector que tiene el potencial de presentar mineralización económica de algún metal precioso.

Capítulo III. Desarrollo del trabajo de investigación

3.1 Marco geológico

3.1.1 Geomorfología

La zona de trabajo en Orcopampa presenta un relieve bastante accidentado, desde su límite occidental parte final de la planicie costera, hasta las proximidades de la divisoria continental límite oriental del área, dentro de estos límites las cotas varían entre 800 y 5300 m.s.n.m.

En la región se han diferenciado cinco unidades geomorfológicas:

- Frente Occidental de los Andes
- Cañón de Majes- Colca
- Zona de Volcanes del Barroso
- Lomas y Altas Cumbres
- Cubeta y Volcanes Andagua

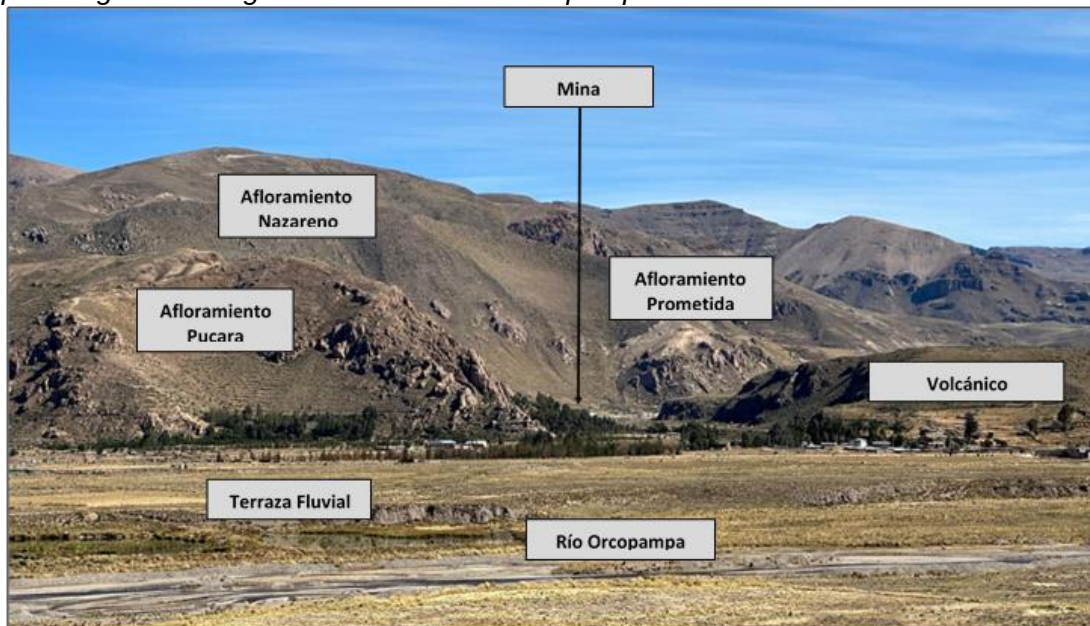
Localmente el yacimiento de Chipmo se encuentra al lado oeste del valle del río Chilcaymarca, por lo que se presentan varias terrazas fluviales. En los valles de los ríos de Orcopampa y Chilcaymarca es notorio la presencia de volcanes de cenizas de forma cónica y con derrames lávicos a su alrededor.

Los cerros presentan drenajes dendríticos, por donde escurre el agua de las lluvias y llegan a los ríos. En lo alto de los cerros existen morrenas como vestigios de erosión glaciaria, además de escarpas causadas por movimientos de fallas en la zona. En la zona son apreciables crestones que en su mayoría correlacionan con estructuras silicificadas que en profundidad podrían desarrollarse como vetas. Los agentes actuales de meteorización de las rocas es principalmente el agua, y en segundo lugar el viento, que le han dado una forma redondeada y suavizada a los cerros.

El cambio de temperatura (calor en el día y frío en la noche) juega un rol importante en la geodinámica actual como meteorización esferoidal de las rocas, véase en las figuras siguientes:

Figura 3

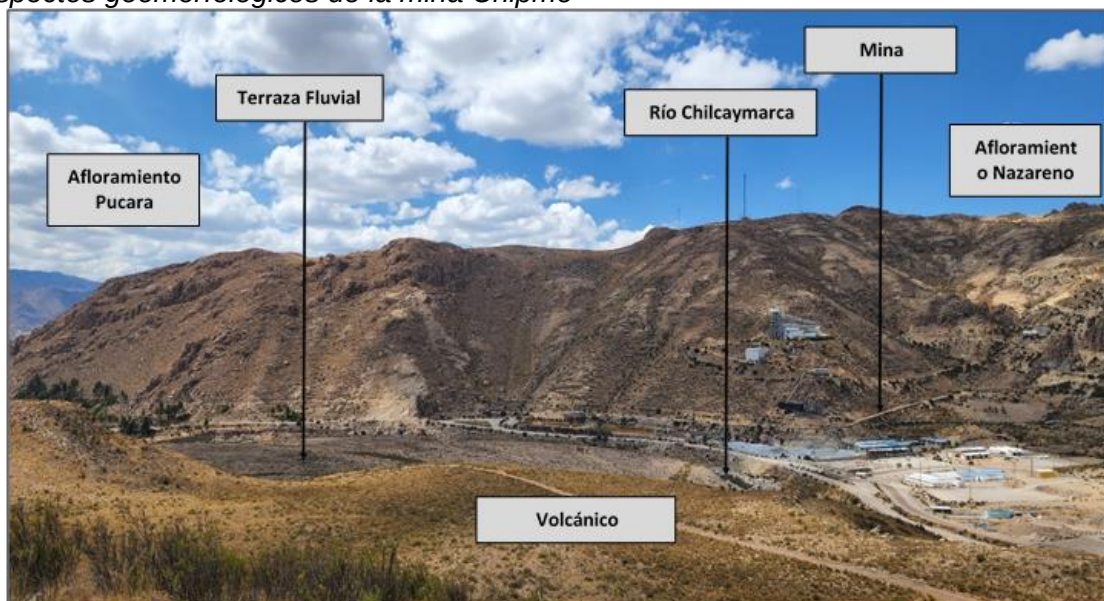
Aspectos geomorfológicos del distrito de Orcopampa



Fuente: Elaboración propia.

Figura 4

Aspectos geomorfológicos de la mina Chipmo



Fuente: Elaboración propia.

3.1.2 Estratigrafía

La información descrita líneas abajo ha sido tomada del Boletín del Ingemmet, titulado: Geología del cuadrángulo de Orcopampa (hoja 31r1, 31r2, 31r3, 31r4) del 2021.

3.1.2.1 Mesozoico. Seguidamente se describe los principales Grupos y Formaciones presentes en el área de trabajo.

Grupo Yura

Este Grupo ha sido identificado en el Cuadrángulo de Arequipa. Estas secuencias sedimentarias se encuentran restringidas al suroeste del Cuadrángulo de Orcopampa (31r), específicamente en la hoja 31r3. Destacan las Formaciones Cachíos, Labra, Gramadal y Hualhuani, correspondientes a la parte media a superior del Grupo Yura.

En general, el Grupo Yura no aflora en continuidad con todas sus Formaciones en los alrededores de la localidad de Chapacoco, SO de la Chilcaymarca, donde afloran las Formaciones Labra y Hualhuani, y en los alrededores de la localidad de Chachas, Quebrada Arhuaya y Anexo de Tauca, donde afloran las Formaciones Cachios y Labra. Al este del Cerro Puca Mauras, se encuentran afloramientos de las Formaciones Labra y Hualhuani. En el Cerro Anta Turia, afloran las Formaciones Labra, Gramadal y Hualhuani. En los alrededores del Anexo Anuro, se encuentran (relictos) afloramientos de la Formación Hualhuani. En los alrededores del Anexo Pucacasa, se encuentran afloramientos de la Formación Hualhuani.

Formación Cachíos

Esta Formación aflora típicamente en la quebrada Cachios y margen derecha del río Yura, cerca de la localidad de la Calera. En el cuadrángulo de Orcopampa la Formación Cachios aflora en la localidad de Chachas, específicamente en las quebradas Arhuaya y Tauca. A dicha unidad, le sobreyace concordante la Formación Labra. Litológicamente, se ha observado la presencia de lutitas carbonosas bien fisibles, de colores gris verdosos a negras, intercaladas con areniscas cuarzosas de grano fino gris claras en estratos delgados, en la que predomina la presencia de lutitas. Sobreyace en concordancia a la Formación Labra. A esta unidad, se le considera del Jurásico medio a superior (Caloviano – Oxfordiano).

Formación Labra

Esta Formación fue identificada en el valle del río Yura, región Arequipa, específicamente en las laderas del Cerro Labra. En el cuadrángulo de Orcopampa, la Formación Labra aflora en las localidades de Chachas en las quebradas Arhuaya y Tauca,

al norte de la Quebrada Anuro, al este del Cerro Puca Mauras, entre los alrededores de Chapacoco, oeste de Chilcaymarca (Cerro Huanaco Punco) y este del Cerro Paiche Loma.

Litológicamente, está constituida por areniscas de grano fino a medio de color gris claro que en superficie tiene coloraciones amarillentas con tonos rojizos por meteorización, se presentan en estratos medianos a delgados en algunos sectores gruesos; ocasionalmente se ha observado estructuras sedimentarias internas planas, paralelas y estratificación sesgada; se intercalan con niveles de lutitas gris oscuras delgadas en estratos medianos, estos adelgazan hacia el techo disminuyendo en comparación con las areniscas. Se encontraron restos de tallos. Sobreyace e infrayace en concordancia a las Formaciones Cachios y Gramadal respectivamente. Tienen un grosor aproximado de 750 m. Se le asigna una edad del Jurásico superior (Kimmeridgiano – Titoniano).

Formación Gramadal

Aflora en el valle del río Yura, región Arequipa, en los cerros Hualhuani y Labra. La Formación Gramadal se ha diferenciado de la Formación Labra al oeste del Cerro Anta Turia, donde se ha medido una columna litológica de 140 m.

Litológicamente, se encuentra constituida por areniscas cuarzosas de grano fino a medio, intercalada con niveles de areniscas calcáreas gris pardas con presencia de karstificación. Asimismo, en algunas zonas, presenta intercalaciones de calizas arenosas en estratos delgados de color gris pardusco a amarillento y niveles ferruginosos. Se presentan bien estratificadas con estratos que varían de 10 a 40 cm de grosor; asimismo, presentan muy buena estratificación. Sobreyace e infrayace en concordancia a las Formaciones Labra y Hualhuani respectivamente. Tiene un grosor aproximado de 140 m. Se le asigna una edad de Jurásico superior (Titoniano).

Formación Hualhuani

Esta Formación fue identificada en la localidad típica del valle del río Yura, específicamente en los Cerros Hualhuani, en la región de Arequipa.

En el cuadrángulo de Orcopampa, existen afloramientos en las quebradas Arhuaya y Tauca, norte de la quebrada Anuro, este del cerro Puca Mauras, y se extienden

ampliamente con rumbo noreste desde el Cerro Paiche Loma, los alrededores de la localidad de Chapacoco, hasta los cerros Huanaco Punco y Chilcane. Esta Formación se caracteriza por presentar zonas escarpadas. En el sector sur del cerro Anta Turia, se levantó una columna litológica de 300 metros de grosor aproximadamente.

Litológicamente, se encuentra constituida por una monotonía de areniscas cuarzosas de grano medio a grueso, gris claras a grises en fractura fresca, y con pátnas amarillentas y pardas en superficie meteorizada. Se observan estructuras sedimentarias internas como estratificación cruzada y ondulitas. Se presenta en estratos gruesos a medios formando farallones sub verticales. Se le asigna una edad del Cretácico inferior (Berriasiano – Hauteriviano).

Formación Murco

Esta Formación fue estudiada inicialmente en el pueblo de Murco, distrito de Huanca, provincia de Caylloma, región Arequipa. En la zona de estudio, aflora en las inmediaciones de los cerros Anta Turia, Quilcane, Sora y Apacheta y las quebradas Chaupiapa, Sayaccaca, Ancasi y el río Ajaña. Litológicamente, se describe de la base al techo con una alternancia de lutitas y areniscas abigarradas rojizas, intercaladas con areniscas de grano fino rojizas, predominando estas hacia la zona media y superior, en donde se puede apreciar también niveles de calizas delgadas centimétricas de hasta 20 centímetros. Hacia el techo, se observa que las areniscas rojizas tienen matriz calcárea y, en algunos sectores, se han observado conglomerados finos de guijarros con clastos polimícticos bien redondeados en una matriz arenosa. Suprayace e infrayace concordante a las Formaciones Hualhuani y Arcurquina respectivamente.

A falta de evidencias fósiles que indiquen la edad de esta Formación, se determina por su posición estratigráfica sobre la Formación Hualhuani, se le considera del Cretácico inferior (Berramiano – Aptiano)

Formación Arcurquina

Inicialmente, esta Formación fue estudiada en la región Arequipa, valle del río Yura y valles adyacentes al cerro Arcurquina.

En el Cuadrángulo de Orcopampa 31r, se tiene afloramientos en los cerros Quilcane – Anta Turia; en la zona baja de los cerros Pichihua – Chaupiapa, Ceñiga – Shupalle – Camaujache y Sora. En el sector este del cuadrángulo, se tiene afloramientos restringidos como en los cerros Chirpe, Pishaca rolongándose hacia el norte hasta el cerro Antahuilcaña. Suprayace en concordancia a la Formación Murco e infrayace en discordancia a secuencias del Grupo Tacaza, como la Formación Jallua hacia el oeste, así como la zona central y este con la Formación Santa Rosa. Litológicamente, se encuentra constituida por gruesas capas monótonas de calizas gris claras a gris azuladas con presencia de cherts y nódulos marrones y negros. En ocasiones, se puede intercalar con capas de areniscas de grano fino de matriz calcárea en bancos gruesos. También presenta niveles de calizas con apariencia brechada. Por su posición estratigráfica sobreyacente en concordancia a la Formación Murco, se le asigna una edad Albiana.

3.1.2.2 Cenozoico. Seguidamente se describe los principales Grupos y Formaciones presentes en el área de trabajo.

Grupo Tacaza

Los Volcánicos Tacaza fueron estudiados en el sector del paraje Tacaza, Santa Lucía, Puno. Son descritos como derrames de basaltos andesíticos, brechas, aglomerados y tobas gris verdosas a chocolate, con algunas intercalaciones de aglomerados color rojizo. Esta unidad se ha prolongado a lo largo de todo el sur del Perú.

El vulcanismo en el Cuadrángulo de Orcopampa se evidencia desde el Paleógeno y se prolonga intermitente hasta la actualidad. En la zona de estudio, representa el mayor evento volcánico abarcando los cuadrángulos aledaños. Estas etapas eruptivas en el Cuadrángulo de Orcopampa se evidencian gracias a la presencia de las tobas de la Formación Jallua, que son las más antiguas, seguidas por las Formaciones Santa Rosa y Manto, que corresponden a etapas eruptivas muy grandes en el sur del Perú.

Formación Pichu

La Formación Pichu fue descrita por primera vez en el Cuadrángulo de Ichuña. En el presente estudio, han sido reconocidas en los cerros Pallaclla y Negro Apacheta, donde

existen afloramientos de rocas ígneas volcánicas de andesitas porfíricas, compuestas por plagioclasas, piroxenos y biotita. En una matriz vítrea de grano fino alterada a arcillas con débiles impregnaciones de óxidos de hierro, las plagioclasas prismáticas tienen bordes de reabsorción. Alterándose a arcillas, las biotitas tabulares, anhedrales, microfracturadas y con bordes corroídos, alteradas a óxidos de hierro, presentan cuarzo secundario en sus microfracturas y oquedades. La matriz está conformada por material criptocristalino de vidrio. Infrayacen a etapas eruptivas del vulcanismo perteneciente al Grupo Barroso.

Formación Santa Rosa

En el área de estudio, esta Formación es reconocida por presentar diferentes litologías desde andesitas hasta tobas. En el cuadrángulo de Orcopampa, aflora ampliamente en el sector central. Esta unidad se encuentra en discordancia sobre unidades sedimentarias del Grupo Yura, específicamente con las Formaciones Labra y Hualhuani; y en el sector del río Sillque y del cerro Pishacca estos volcánicos se encuentran en discordancia sobre la Formación Arcurquina.

Al noroeste de Umachulco, se observan afloramientos de etapas eruptivas de esta Formación a manera de intercalación de aglomerados y brechas polimícticas y monomícticas en matriz volcánica andesítica porfírica, seguida de flujos de lava porfíricas de composición andesítica; no se le reconoce el piso, e infrayace en discordancia a la Formación Alpabamba. En el cerro Pishaca, existen secuencias de lavas de composición andesítica infrayaciendo en discordancia sobre las calizas de la Formación Arcurquina.

Formación Manto

Está conformada por una gruesa secuencia de tobas reconocidas regionalmente en el sector central hacia el sureste de la hoja. Se encuentran en discordancia sobre la Formación Santa Rosa y, en ocasiones, con secuencias sedimentarias del Grupo Yura, como en el sector de la quebrada del río Miña, e intrusivos del Batolito de la Costa, como en el Cerro Quello. Con un grosor aproximado de 2 150 metros desde las cercanías de Miña hasta la cima del cerro Casiri, esta unidad es la que alberga en su mayoría las vetas

explotadas por las diferentes compañías mineras. En el sector del Cerro huamancuri, se observa la Formación Manto a la base seguida de la Formación Alpabamba en ligera discordancia, como las lavas del Grupo Barroso.

Formación Alpabamba

Esta unidad está conformada por flujos de cenizas y pómez, constituyendo tobas poco soldadas, de color gris blanquecino característico, con un grosor aproximado de hasta de 150 m. Dispuesta subhorizontalmente, se caracteriza por su color y la presencia de pómez. Al sur de Jullacasa, sector de la quebrada Collpa, hay una datación de 17.2 ± 0.5 Ma, según el método K-Ar realizado por Swanson (1998).

Otra datación en el cerro Tadiuyoc, realizada por Swanson et al. (2004), obtiene una edad de 14.6 ± 0.025 Ma según el método Ar-Ar, aunque este resultado crea controversia, confirma la edad de esta unidad en la localidad tipo (San Javier de Alpabamba-Paucar del Sara Sara-Ayacucho) con datos recientemente obtenidos (inéditos) de 14 Ma. En el presente informe, aún se considera las edades de 20.04 ± 0.27 y 20.08 ± 0.14 Ma, ambos por el método Ar-Ar realizados en los cerros Chanchaclla y sur de Chollohuire respectivamente.

Formación Sarpane

En los cerros de Pucara, Huañacagua y este de Tintaymarca afloran secuencias volcánicas de composición dacítica y andesítica porfídica gris púrpura y gris oscura en coladas lávicas y diques; están conformados por fenocristales de plagioclasa y hornblenda variando su contenido de acuerdo con el tipo de roca, también se observan cuarzo, biotita óxidos de hierro.

Se realizaron dataciones radiométricas con edades que varían entre 17.4 ± 0.4 por el método Ar-Ar en un dique y 18.6 ± 0.6 en una dacita por el método K-Ar.

Esta unidad se encuentra sobreyaciendo a la Formación Manto e infrayace disconforme a la Formación Alpabamba, en muchos sectores sobreyace material aluvial y algunos coluviales no cartografiados. La mineralización en la zona de Chipmo se le atribuye a esta Formación.

Grupo Barroso

El Grupo Barroso está conformado por intercalaciones de lavas porfiríticas procedentes de diversos centros volcánicos de naturaleza estratovolcanes. En ocasiones, no se reconoce el centro de emisión. El Grupo Barroso se encuentra sobreyaciendo en ocasiones directamente a las Formaciones Alpabamba y Umachulco en discordancia angular. En sectores tales como la quebrada del río Soncopalca, el Grupo Barroso se encuentra cubierto por la Formación Umachulco. Tales flujos del Barroso son interpretados como los primeros flujos de edades estimadas entre 8 y 10 Ma. En otros sectores, tales como al este de la laguna Arcata, se encuentra sobreyaciendo directamente a la Formación Alpabamba.

Grupo Andagua

El Grupo Andagua está conformado por flujos de lavas afaníticas vesiculares. En su mayoría, son únicos en la zona, pues, aparecen en algunos centros de emisión, mientras que otros están cubiertos por depósitos glaciares. Muchos de estos centros volcánicos monogénicos constan de alturas aproximadas de 300 m de la base hasta el cráter.

Están conformados por lavas afaníticas y vesiculares, Asimismo, muchos de ellos se prolongan por varios kilómetros en dirección a las quebradas preexistentes. En algunos de ellos, también se han reconocido sus etapas previas y posteriores conformando depósitos de caídas. En el cuadrángulo de Orcopampa, se han reconocido principalmente en la zona norte del cuadrángulo formando mesetas en los cerros Quellancha, Mesani, Chaco, Tanca, Aymaña, Amayani, Antapuna, Tanca, Tacna y el cerro Humajala.

Grupo Barroso

Evento perteneciente al Grupo Barroso se caracteriza por presentar una secuencia de flujos lávicos de composición andesítica y dacítica; en forma de domos y coladas lávicas. Se extiende de norte a sur en los cerros Mojona, Occocucho, Pucapuca, Jama, Japo, Huayllahuaylla, Condorcacha, Caurijata, Manzanilla y Quelloquello.

Litológicamente está conformado por secuencia de lavas grises porfídicas con cristales de plagioclasa englobados en una matriz afanítica; por sectores se intercala lavas gris claras con plagioclusas, cuarzo y feldespatos potásicos en una matriz afanítica gris.

Deposito Aluvial

Ubicados en las márgenes de los principales ríos como en los ríos Umachulco, Orcopampa – Andahua, quebrada Aychamara y otros; están conformados por depósitos de arenas, gravas, limos y arcillas poco seleccionados, conformado terrazas semiplanas que son utilizadas como terrenos agrícolas, como en el sector entre Orcopampa y Andahua que forman extensas planicies (donde se ubica el campo de aterrizaje de la compañía minera Buenaventura); en las zonas altas son usadas como pastizales.

Deposito Glaciar

Están ubicados en las zonas altas evidenciando la existencia de antiguos glaciares y algunos cubren coladas de depósitos de lavas del Grupo Barroso, formando morrenas laterales y centrales como los que se observan en los cerros Casho Cotana, Huamani Loma, Jamuco, Alcohalco, Panti, Colorado, Calacollo, alrededores de la laguna Machucocha y otros depósitos menores; litológicamente están conformados por bloques polimícticos, arenas, arcillas; varios son usados como pastizales.

Deposito Fluvioglaciar

Son depósitos reabajados tienen como origen a depósitos glaciares; estos se ubican en los cauces de quebradas como las que se tienen entre las quebradas Quellomayo y Challhuapuquio; litológicamente están conformados por bloques subredondeados mal seleccionados englobados en matriz de limos y arenas; muchos de ellos sirven como pastizales.

Deposito Coluvial

Estos depósitos forman las laderas de algunos cerros, se forman por la meteorización y fracturamiento de las rocas superiores que por efectos de la gravedad van formando conos los cuales tienen una composición litológica de bloques subangulosos en una matriz de limos y arcillas tienen pendientes suaves.

3.1.3 Rocas ígneas

Las rocas plutónicas en el Cuadrángulo de Orcopampa formarían parte del Batolito de la Costa, constituidas tanto en su forma y dimensiones por plutones (granodioritas), cuerpos subvolcánicos (pórpidos andesíticos y dacíticos) que intruyen a secuencias sedimentarias del Grupo Yura y secuencias volcánicas del Grupo Tacaza y de la Formación Alpbamba, por lo que su emplazamiento se considera desde el Cretácico superior hasta finales del Mioceno.

Super unidad Tiabaya

En el cerro Quello, se ha cartografiado un cuerpo intrusivo de composición granodiorítica que intruye a la Formación Labra (Grupo Yura) y está cubierto por depósitos piroclásticos de la Formación Manto (Grupo Tacaza). Estas granodioritas presentan un color mesocrata y tienen grano medio equigranular de plagioclasas, feldespatos, cuarzo y hornblenda.

Pórfido andesítico

A partir del reconocimiento de cuerpos subvolcánicos en el cuadrángulo se ubica en el cerro Chilcane un cuerpo subvolcánico, que intruyen al Grupo Yura, a la Formación Hualhuani, y la Formación Murco, y de diques asociados a estos cuerpos en el sector del río Sora al sur de la Loma Carhuacirca, la composición corresponde a un pórfido andesítico gris oscuro con textura porfirítica, compuesto por cristales de plagioclasas, con impregnaciones de óxidos de hierro, en una matriz afanítica, con magnetismo débil.

Pórfido dacítico

En los cerros de Sandoalcalde y Pillune, se han reconocido varios cuerpos subvolcánicos que intruyen al flujo piroclástico de la Formación Manto del Grupo Tacaza y están muy relacionados al sistema de mineralización de la Unidad Minera Shila.

En el sector de los cerros Pillune y Sandoalcalde, se han realizado varias dataciones a estos cuerpos subvolcánicos; obteniéndose las siguientes edades 7.2 ± 0.1 , 10.1 ± 0.2 y 13.2 ± 0.3 Ma, por el método K-Ar se obtuvo una edad de 10.56 ± 0.12 Ma, por el método K-Ar en la Veta Pillune. Al sureste del caserío de Collpa, en la base del cerro

Pampa Jache, se observaron afloramientos de tobas blanquecinas de cenizas, pómez y líticos, asignados a la Formación Alfabamba, cortados por diques andesítico-basálticos afaníticos, con piritita diseminada, con rumbo este – oeste con un buzamiento de 75° al norte. Estos cuerpos producen alteración argílica a las tobas de la Formación Alfabamba. Estos diques estarían relacionados con la mineralización en el sector de Orcopampa.

3.1.4 Geología estructural

La información descrita líneas abajo ha sido tomada del Boletín del Ingemmet, titulado: Geología del cuadrángulo de Orcopampa (hoja 31r1, 31r2, 31r3, 31r4) del 2021.

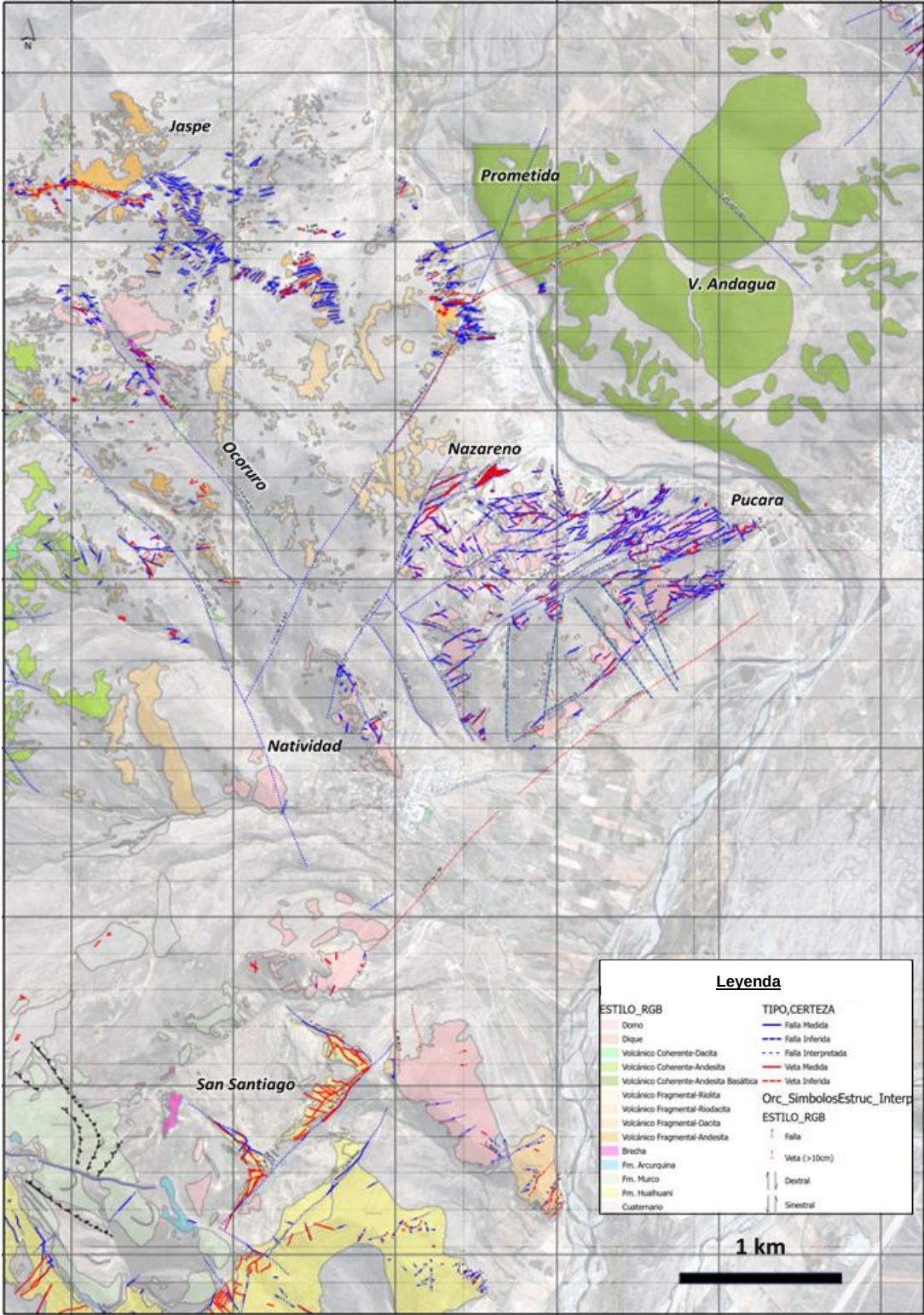
El sistema estructural en el Cuadrángulo de Orcopampa es variado, puesto que se presentan varios sistemas. Predominan los antiandinos con rumbo NE a SO, y se manifiestan principalmente en rocas del Mesozoico especialmente en las Formaciones Cachios, Labra, Gramadal y Hualhuani (Grupo Yura). En el área, la estructura más relevante es el sinclinal del Cerro Pichihua que afecta a secuencias sedimentarias calcáreas de la Formación Arcurquina cubierta en discordancia por los depósitos de flujos piroclásticos de la Formación Jallua.

En el sector de Chapacoco, se presenta un anticlinal asimétrico en las rocas sedimentarias de las Formaciones Labra y Hualhuani, así como un sistema de fallas normales con dirección noreste que posiblemente sean los formadores del Valle Orcopampa – Andagua. Al este de Chapacoco y Chilcaymarca, se presenta un sinclinal en el Cerro Huanaco Punco, cuyo eje tiene una dirección N-S y afecta a rocas de las Formaciones Hualhuani y Murco. Todo este sistema de fallas tiene una edad aproximada desde el Jurásico hasta el Paleógeno, ya que estas fallas no se evidencian en los depósitos de los volcánicos del Cenozoico. En el sistema de fallas con rumbo andino, en ambos flancos de la cubeta (valle de Orcopampa – Andagua), las fallas normales que se han podido observar tienen buzamientos hacia el eje central del valle con una dirección NE buzando al SO. El sistema de fallas y pliegues en los depósitos del Cenozoico posee rumbo andino. La mayoría de ellos son interpretados como lineamientos, pues es difícil

reconocerlos en campo. Estas estructuras mayores han sido aprovechadas por intrusiones menores que formaron la mineralización del distrito minero de Orcopampa.

Figura 5

Plano geológico del distrito de Orcopampa



Fuente: Modificado de Ayala (2024), reporte interno mina Orcopampa, Arequipa, Perú.

3.2 Geología de la mina Chipmo

3.2.1 Controles estratigráficos

El yacimiento de Chipmo se encuentra emplazado sobre rocas de composición dacítica y andesítica pertenecientes a rocas volcánicas del Terciario principalmente pertenecientes al Volcánico Sarpane (19 Ma), regionalmente corresponderían al Grupo Tacaza en esta zona sur del Perú, véase figura 6.

Volcánicos Santa Rosa (Mioceno Inferior)

Localmente aflora al este del yacimiento, flujos de lavas intercalados con lentes de lahares y flujos de brechas de composición andesítica-piroxénica.

Toba Manto (Mioceno Inferior)

Aflora al norte del yacimiento de Chipmo, es una roca de composición riolítica de textura toba de cristales, presentando fiames alargados. Tiene un color morado característico.

Toba La Lengua (Mioceno Inferior)

Consiste en delgadas unidades muy bien interestratificadas entre rocas volcanoclasticas sedimentarias y depósitos volcánicos, con lentes locales de calizas.

Volcánicos Sarpane (Mioceno inferior)

Corresponden a un complejo de domos, flujos de lavas, toba de cristales, brechas y diques de composición andesítica a dacítica de color gris oscuro a gris purpura. Tiene como mineral accesorio a la pirita que puede variar como disseminación de 1% hasta 20%. Hay veces donde la pirita fina reemplaza parcialmente a la matriz de la roca formando pseudobrechas.

Tobas Chipmo (Mioceno Medio)

Consiste en una ignimbrita de composición riolítica que contiene abundantes fenocristales de cuarzo, sanidina, plagioclasa, micas de biotita y óxidos de Fe y Ti. Sobreyace a los Volcánicos Sarpane cubriendo gran parte del norte del yacimiento de Chipmo.

Volcánicos Andagua (Plioceno a Cuaternario)

Reconocido al este del yacimiento de Chipmo, específicamente en el volcán Mauras, es una roca de composición andesítica y andesitas basálticas, formando flujos de lavas y conos de escoria.

Figura 6

Columna estratigráfica

<u>UNIDAD</u>	<u>DESCRIPCIÓN</u>		<u>POTENCIA</u>	<u>EDAD</u>
Depósitos Aluviales (Cuaternario)	Depósitos aluviales		± 50m	
Volcánico Andagua (Plioceno – Cuaternario)	Flujos de lava de composición andesítica		± 50m	0.27 ± 0.02 Ma
Depósitos Aluviales (Cuaternario)	Depósitos aluviales		± 50m	
Volcánico Barroso (Mioceno Superior)	Tobas de composición dacítica		± 100m	6.3 ± 0.2 Ma
Toba Chipmo (Mioceno Medio)	Tobas de cristales de composición Riolítica		± 100m	14.16 ± 0.025 Ma
Complejo Sarpane (Mioceno inferior)	Complejo de domos, flujos de lavas, tobas, brechas y diques de composición andesítica a dacítica.		± 800m	18.6 ± 0.6 Ma
Toba La Lengua (Mioceno inferior)	Tobas con lentes de calizas		± 100m	
Toba Manto (Mioceno inferior)	Tobas de cristales de composición Riolítica		± 300m	19.7 ± 0.6 Ma
Volcánico Santa Rosa (Mioceno inferior)	Flujos de lava andesíticas		± 400m	20.1 ± 0.6 Ma
Toba Pisaca (Mioceno inferior)	Tobas de composición andesítica		± 400m	22.9 ± 0.7 Ma
Formación Acurquina Formación Murco Grupo Yura (Cretácico - Jurásico)	Secuencias sedimentarias calcáreas y clásticas			

Fuente: Adaptado de C. Villón (2011).

3.2.2 Controles estructurales

3.2.2.1 Sistema de fallas principales. Seguidamente se describen las 3 fallas principales.

Falla Julissa

La Falla Julissa es una estructura de rumbo N35°E y buzamiento 80°NW. Su cinemática es dextral-normal. Las tensionales al piso son las estructuras del sistema de la veta Nazareno, Lucy Piso, Prosperidad. En superficie, la traza de la Falla Julissa está ubicada en una quebrada al oeste de la veta Nazareno-Lucy Piso. Esta falla correspondería al sistema N 60°E.

Falla Lucia

La Falla Lucia es una estructura de rumbo N55°E y buzamiento 80°SE. Su cinemática es dextral-normal. Las tensionales al piso de esta falla son las vetas del sistema Prometida.

En interior mina, en el área de Prometida, la Falla Lucia tiene un buen desarrollo estructural. En el Nivel 3170, presenta un rumbo de N60°E y buzamiento 80°SE. Tiene una potencia de 4.40 m de ancho y presenta panizo y roca molida. Algunas venillas de anhidrita y sílice gris. Cajas argilizadas. En el Nivel 3110, presenta un rumbo de N60°E y 80° de buzamiento al SE. Tiene una potencia de 2.50 m y presenta panizo, bandas de anhidrita en cajas argilizadas. Esta falla correspondería al sistema N 60°E.

Falla July

La Falla July es una estructura de rumbo N55°E y buzamiento 80°SE. Desplaza dextralmente la veta Nazareno y al dique andesítico hornbléndico. Su cinemática es dextral-normal. En interior mina, tiene una extensión reconocida de 0.5 km.

En interior mina, en el área de Nazareno, la Falla July tiene un buen desarrollo estructural. En el Nivel 3230, presenta un rumbo de N60°E y buzamiento 85°SE. Tiene una potencia de 1.00 m de ancho y presenta panizo y roca molida. Cajas argilizadas. En el Nivel 3110, presenta un rumbo de N65°E y 80° de buzamiento al SE. Tiene una potencia

de 0.50 m y presenta panizo, bandas de arcillas en cajas argilizadas. Esta falla correspondería al sistema N 60°E.

3.2.2.2 Sistema de vetas principales. Seguidamente se describen los cuatro sistemas de vetas principales.

Sistema de vetas Prometida

Ubicadas al piso de la Falla Lucia. La principal veta es Prometida de rumbo N60°E y buzamiento 75°- 80°SE. Presenta una cinemática dextral, está cerrada y forma estructuras tensionales entre ella y la Falla Lucia. Las estructuras tensionales son las vetas Prometida R-1, Prometida R-2, Prometida R-3, Melissa, Keyla, Angie, Jimena, Lía, Valeria, Lucía, Fanny, Rubí, Esperanza Ramal Norte, Mónica, Ramal 1 Ramal, Almendra y Yamila. Buzan tanto al N como al S. Estas vetas tienen por lo general rumbos N50°-80°E y alto buzamiento tanto al SE como al NW. Esta celda hidrotermal es muy productiva en Au.

La veta Prometida R-1 está ubicada al techo y tensional a la veta Prometida, tiene una cinemática dextral. Como ganga presenta cuarzo granular y cuarzo gris, rellenando espacios abiertos. El mineral de mena es el electrum, oro nativo, telurios y sulfosales de cobre. La potencia de la mineralización en esta veta varía de 0.8 m a 1.0 m, véase en la figura 7.

Figura 7

Veta Prometida R1, Nv.3540



Fuente: Elaboración propia

La veta Lucía, es una componente a la Falla Julissa en los niveles bajos. Presenta relleno de cuarzo sacaroide, cuarzo gris, anhidrita, tetraedrita y pirita fina. La veta Lucía Centro es una tensional entre la veta Lucía y la Falla Julissa. Compuesta por anhidrita en un 70%, son cortadas por venillas de cuarzo blanco y núcleos de pirita, La mineralización está en el cuarzo y sílice gris, cortando a la anhidrita. En Lucía Centro y Lucía Centro Ramal la potencia de la mineralización varía de 3 a 8 m, y en el resto de las vetas Lucías la potencia varía de 1 a 2 m. El horizonte mineralizado de las principales vetas del sistema Prometida tiene un “plunge” de 12° al NE. Estas estructuras corresponderían al sistema N 60°E.

Sistema de vetas Nazareno

Ubicadas al techo de la Falla Julissa. Las principales vetas son Lucy Piso, Lucy Piso Sur, Nazareno, Prosperidad, Prosperidad Techo y Ramal 411. Estas vetas forman una cuña con la Falla Julissa y buzanan al SE. Esta celda hidrotermal es muy productiva en Au. En la veta Nazareno, debajo del Nivel 3540, se forman 3 conductos mineralizados a manera de raíces y están referidos a las estructuras tensionales a Nazareno.

El primer conducto mineralizado está emplazado en la intersección de las vetas Nazareno, Lucy Piso, Prosperidad, Prosperidad Techo y Ramal 411. Tiene un “plunge” de 60° al NE. Los anchos de las estructuras varían entre 5.00 m a la cota 3540 hasta 1.50 m en los niveles inferiores. El segundo conducto mineralizado está emplazado en la intersección entre la veta Nazareno con la veta Ramal 850. Tiene un “plunge” de 50° al NE. Con anchos que van de 3.50 a 5.00 m en la parte central, con un borde y en profundidad de 1.00 a 1.50 m. El tercer conducto mineralizado está emplazado en la intersección de la veta Nazareno con la veta Nazareno Este y la veta Concepción. Tiene un “plunge” de 75° al NE. Con anchos que van de 3.50 a 5.00 m en la cota 3540 hasta anchos que varían entre 3.50 a 1.50 m en profundidad.

La veta Nazareno tiene un “plunge” del horizonte mineralizado 15° al SW. Las vetas del sistema Nazareno tienen rumbo N50°- 80°E y altos buzamientos tanto al SE como al NW.

La veta Nazareno presenta como mineral de mena la calaverita y oro nativo, sulfosales de cobre y otros telurios en forma subordinada. El cuarzo es el principal mineral de ganga, baritina y dickita ocurren en forma subordinada. La mineralización de mena de Nazareno se encuentra asociada a ensambles argílico-avanzados, principalmente sílice-dickita, pirofilita-diáspora. La alunita está en las partes altas del sistema. Estas estructuras corresponderían al sistema N 60°E, véase en la figura 8.

Figura 8

Veta Nazareno, Nv. 3440



Fuente: Elaboración propia.

Sistema de vetas Pucara

Ubicado a 700 m al sur de la veta Nazareno, está conformado por las vetas Pucara Sur, Pucara Sur Piso, Pucara Sur Piso 2 y sus tensionales.

Estas vetas tienen un rumbo N65°E, las cuales están constituida principalmente por yeso, anhidrita, venillas y brecha de cuarzo, disseminación de pirita y núcleos de dickita como arcilla predominante, en cuanto al mineral de mena se encuentra telurios de Au,

cobres grises y en algunos casos hay presencia de Au en estado nativo, véase en la foto siguiente:

La veta Pucara Sur presenta un plunge mineralizado en sentido NW, con emplazamientos horizontales producto de estructuras tensionales a esta veta que constituyen a su vez zonas de apertura para el relleno de mineral.

Se tiene también la presencia del sistema R4 (Veta R4, Veta R5 y Veta R6) como vetas tensionales a la veta Pucara Sur en su extensión W. Presenta como mineral de mena sulfosales de cobre, telurios de manera subordinada y en algunos casos concentraciones de oro libre, dentro de una mineralogía de ganga constituida por fragmentos y clastos de cuarzo, con núcleos de dickita.

Hacia la extensión este de la veta Pucara Sur se tiene a la veta Fátima como una estructura tensional estructural, la cual tiene afloramiento superficial y cuyo muestreo geoquímico ha reportado algunos valores de Au, que si bien es cierto son relativamente bajos, sin embargo, por las interpretaciones geofísicas realizadas se evidencia que el mineral económico estaría en cotas más profundas. Estas estructuras corresponderían al sistema N 60°E.

Sistema de vetas María Isabel – N20°E

Ubicadas al extremo W del yacimiento, constituida por las vetas María Isabel, María Isabel 1, María Isabel 2 y estructuras tensionales a estas, como las vetas María Isabel 3 y 4. El sistema María Isabel está controlado estructuralmente por fallamientos de rumbo N20 – 25° E y Buzamiento 80° NW.

Este sistema se encuentra constituido por vetas y fallas con relleno principalmente de anhidrita, clastos de cuarzo, cobres grises, y como mineral de mena por Telurios y cobres grises con contenido aurífero.

En la proyección hacia el NE de estas vetas se encuentra las vetas Beatriz, Prometida y soledad las cuales están controladas por fallas de rumbo casi E-W.

Veta Pucara Sur, Nv. 3690

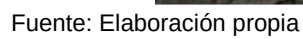


Figura 10

This geological map illustrates the tectonic structure of the Pucara area. It features several labeled zones: Zona Prometida, Zona Nazareno, Zona Pucara Sur, and Zona Ariana. Major faults are depicted as lines with arrows indicating movement, including the F. de Ocooro, F. de Pucara, F. de Nazareno, F. de Ariana, F. de Pucara Centro, F. de Pucara Sur, F. de Pucara Norte, F. de Pucara Este, F. de Pucara Oeste, F. de Pucara Sur Este, F. de Pucara Sur Oeste, F. de Pucara Norte Este, F. de Pucara Norte Oeste, F. de Pucara Este Este, F. de Pucara Este Oeste, F. de Pucara Oeste Este, and F. de Pucara Oeste Oeste. The map also shows the Sistema N 20° E and Sistema Ocooro. A scale bar indicates 1,000 m. The map is bounded by coordinates 781000 to 784000 on the x-axis and 8309000 to 8310500 on the y-axis. A north arrow is located in the top left corner.

30

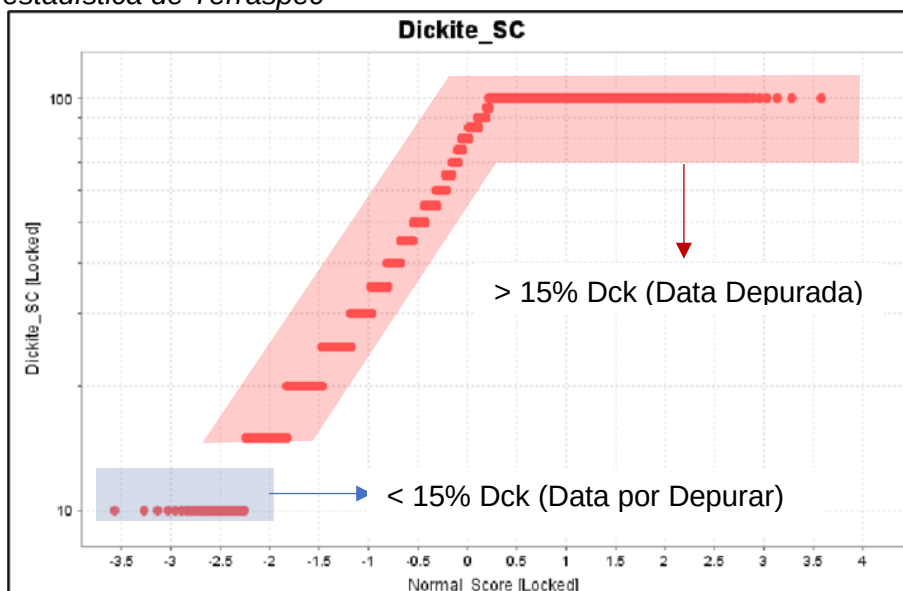
3.2.3 Alteraciones hidrotermales

Las alteraciones principales asociadas a la mineralización son la argílica (caolinita – illita) y la argílica avanzada (dickita – alunita – pirofilita – caolinita). Los halos de alteración asociados a las estructuras mineralizadas pueden tener desde 0.50 m hasta decenas de metros como en el Sistema R4. Se tiene una asociación ácida dickita – caolinita asociada a las vetas. Gracias a los resultados de Terraspec se ha podido validar dicha asociación de las arcillas ácidas a las zonas económicas. De los análisis geoquímicos de las diversas muestras de mina Orcopampa se ha determinado la asociación del Au a telururos.

Para definir las arcillas asociadas a las zonas mineralizadas, se extrajeron muestras para Terraspec de todos los sondeos de exploración desde el año 2021 hasta la actualidad, dichas muestras fueron analizadas por la empresa Auspec, con el fin de realizar un análisis estadístico en el software logas. Para dicho análisis se partió por el sistema R4 (20,356 datos), realizando la limpieza de los datos mediante el Probabilty Plot para cada una de las arcillas principales, véase la siguiente figura .

Figura 11

Limpieza estadística de Terraspec



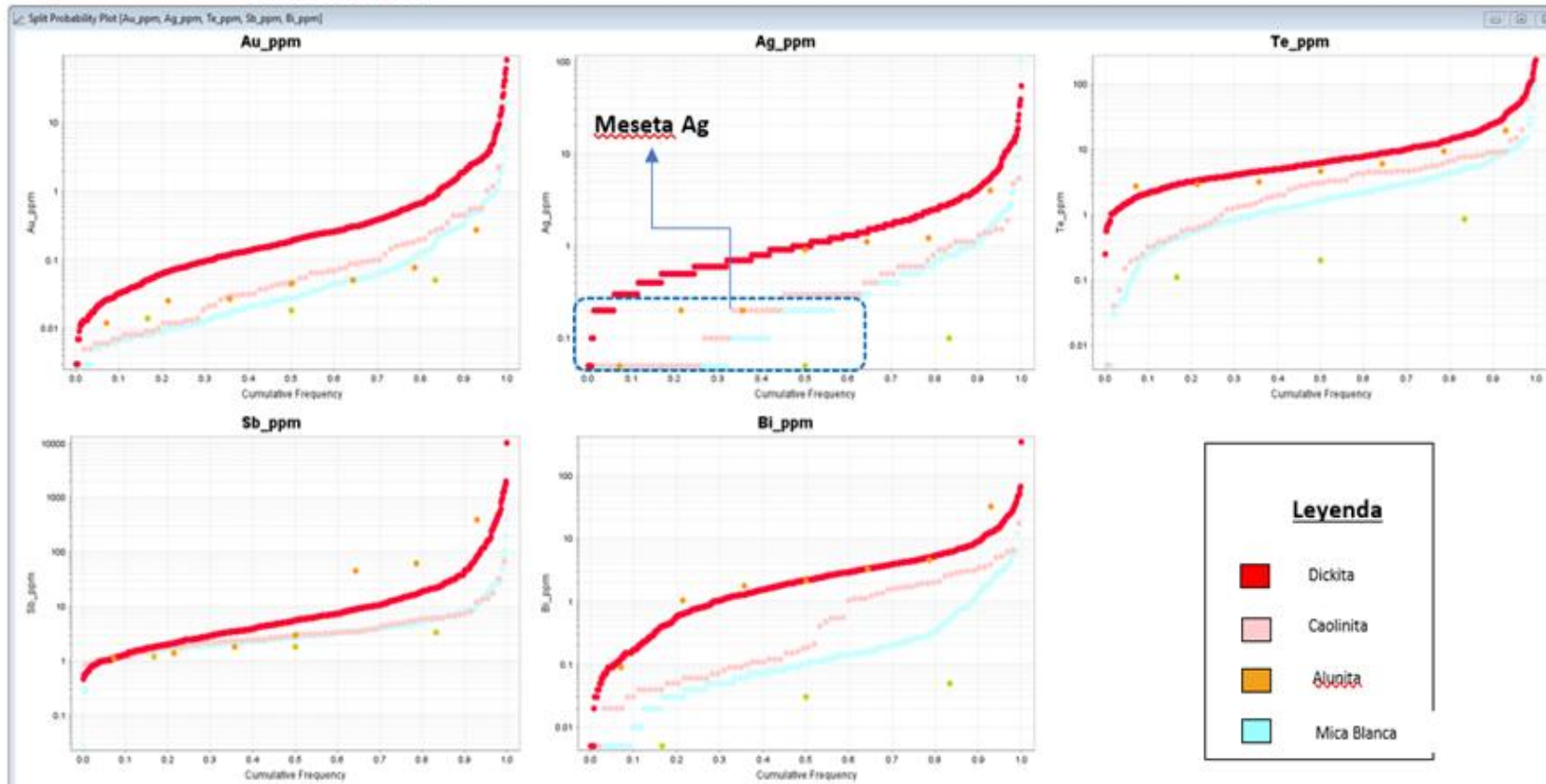
Fuente: Elaboración propia

Con la limpieza de los datos de Terraspec se trabajaron los Probability Split para ver el comportamiento por arcillas relacionados a los principales elementos tales como Au, Ag, Te, Sb y Bi, realizando una segunda limpieza de datos (mesetas), véase figura

siguiente:

Figura 12

Limpieza estadística probability split

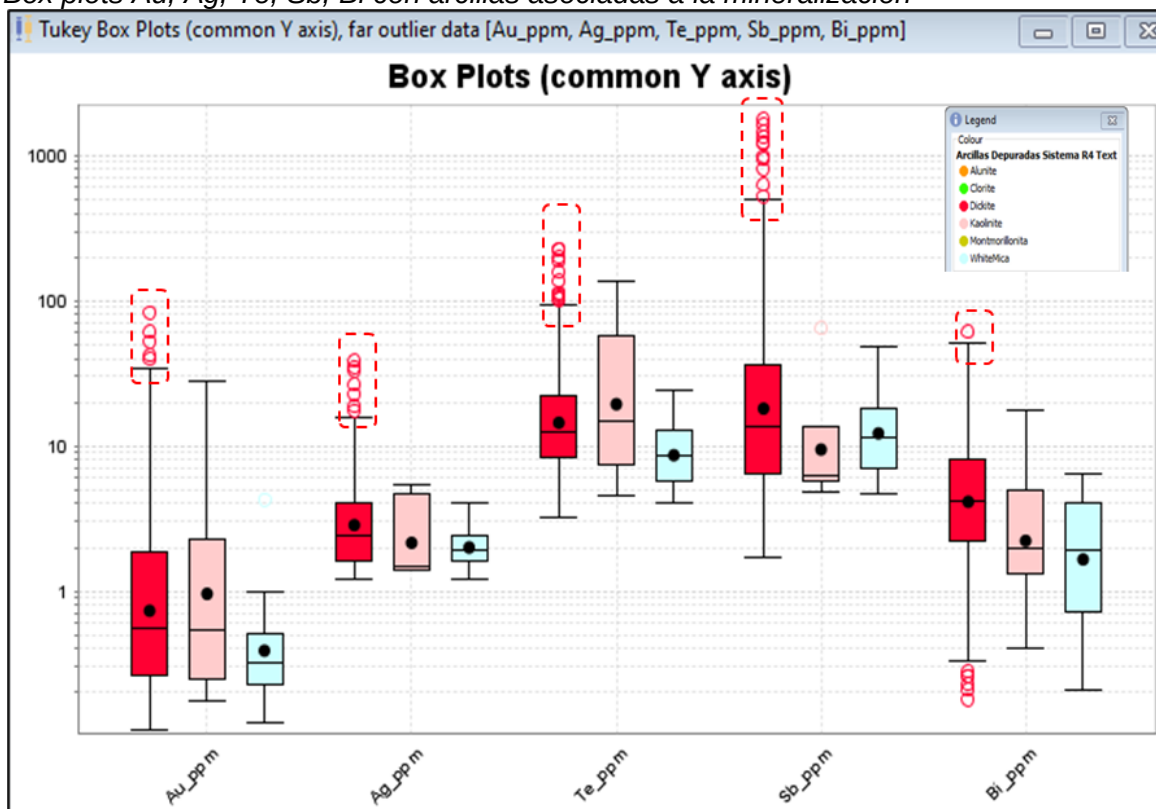


Fuente: Elaboración propia

Una vez que se tiene la data limpia se realizó box plots, en los cuales se evidencio la relación directa de la dickita con los valores anómalos de Au, Ag, Te y Sb. Con dicha evidencia se puede concluir que la dickita es un vector de exploración, el cual puede ser usado para la identificación de nuevos targets, véase figura siguiente.

Figura 13

Box plots Au, Ag, Te, Sb, Bi con arcillas asociadas a la mineralización



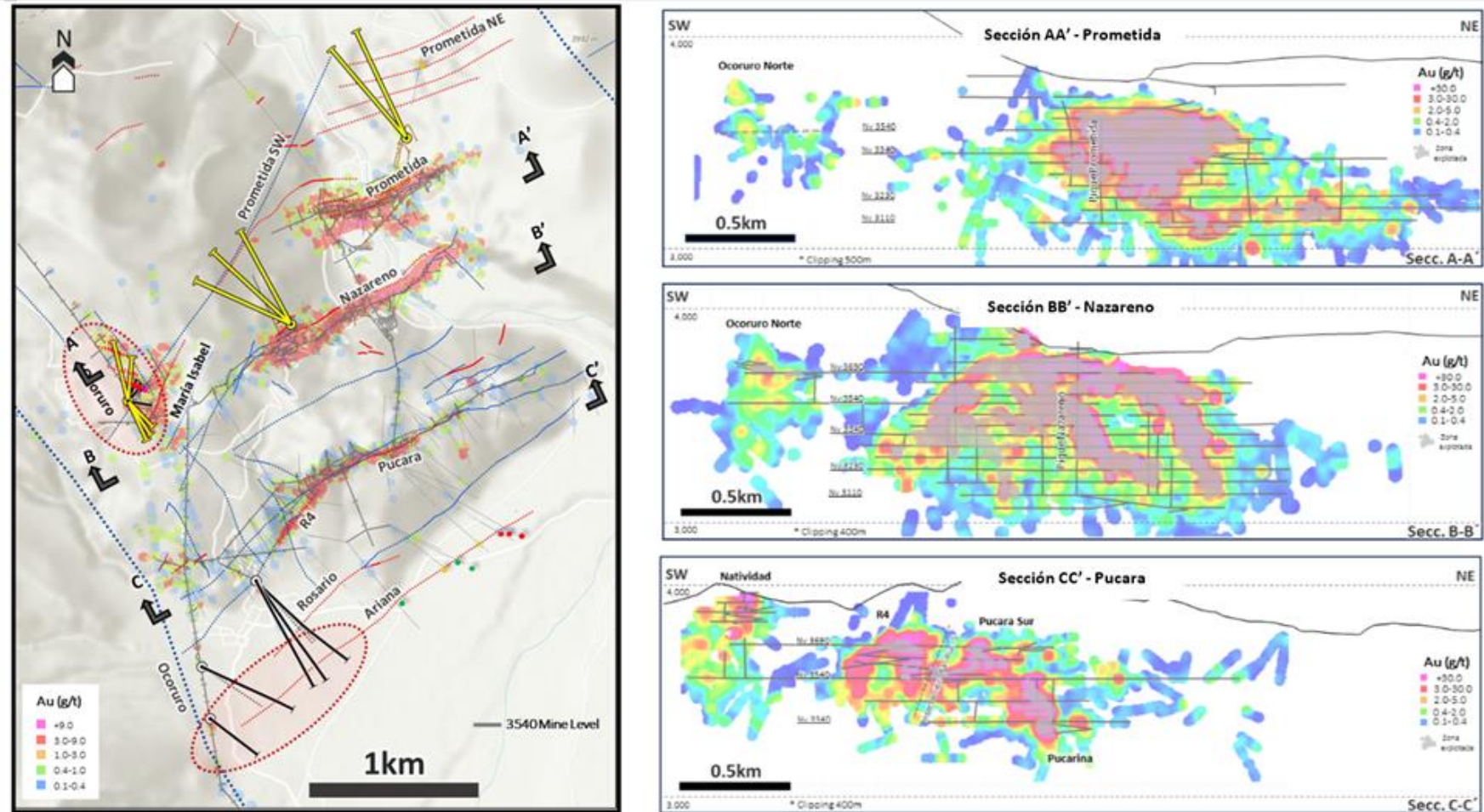
Fuente: Elaboración propia

3.2.4 Geoquímica

En Orcopampa se tiene 3 sectores principales que aportan a la producción aurífera, Sistema Prometida, Sistema Nazareno y Sistema Pucara, que presentan 2 plunge de mineralización (1° Plunge asociado al sistema Estructural N60°E y 2° Plunge asociado al sistema Estructural N20°E), en la siguiente figura se pueden ver los clavos asociados a la mineralización aurífera.

Figura 14

Distribución aurífera de los sistemas Prometida, Nazareno y Pucara

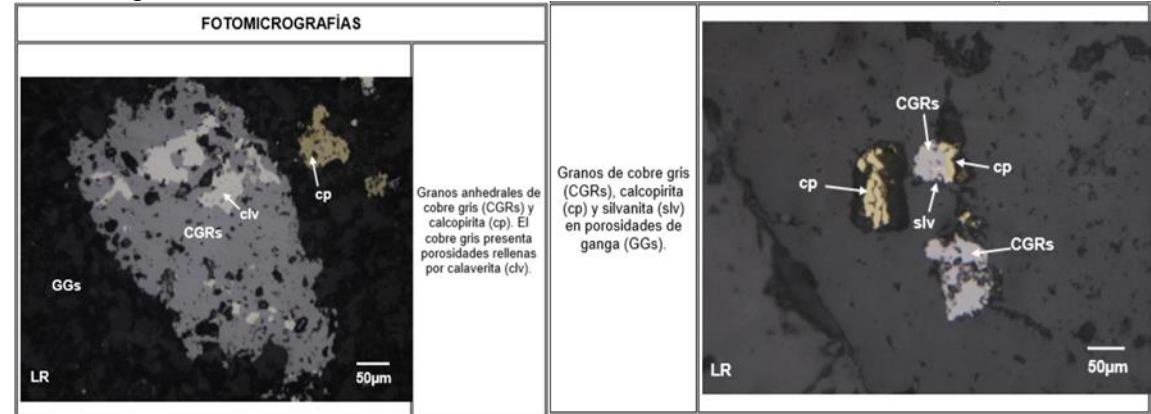


Fuente: Elaboración propia

Se realizó el análisis en loGas para ver las firmas geoquímicas de los principales sistemas en Orcopampa, si bien es cierto cada sistema tiene una firma singular, también se puede observar una firma característica en todos los sistemas Au-Te, evidenciándose en las muestras de microscopía realizadas, se puede identificar que el Au se encuentra asociado a los telururos Au-Ag que se encuentran en las oquedades de los cobres grises, véase en la figura 15.

Figura 15

Fotomicrográficas del sistema R4



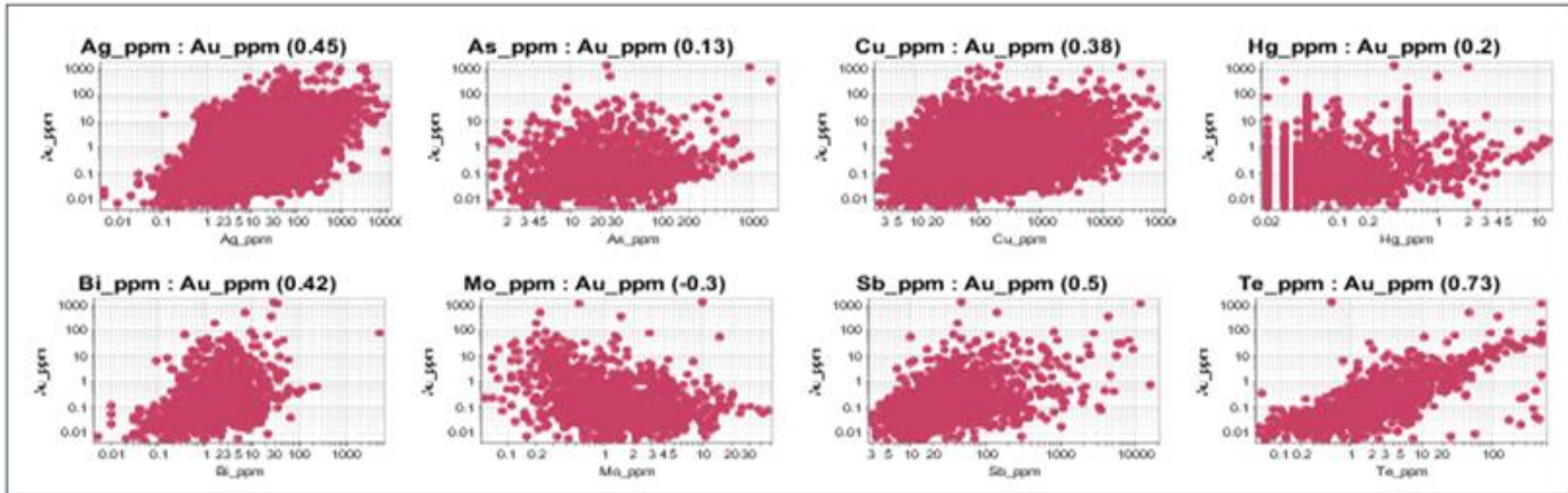
Fuente: Elaboración propia.

Geoquímica – Sistema Prometida

Se analizaron 1,482 datos, utilizando el índice de correlación de Pearson logarítmico, identificándose la firma geoquímica Au-Te (0.73), véase figura 9.

Figura 16

Firma geoquímica sistema Prometida, display xy plot



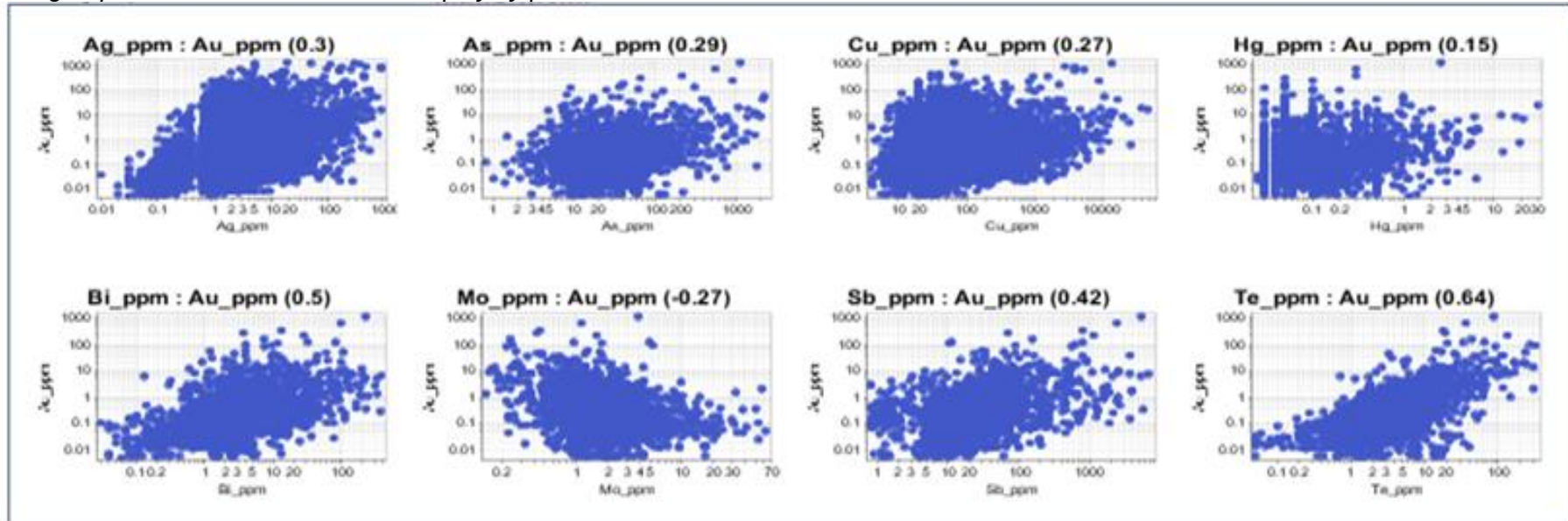
Fuente: Elaboración propia

Geoquímica – Sistema Nazareno

Se analizaron 1,641 datos, utilizando el índice de correlación de Pearson logarítmico, identificándose la firma geoquímica Au-Te-Bi, véase figura 17.

Figura 17

Firma geoquímica sistema Nazareno, display xy plot



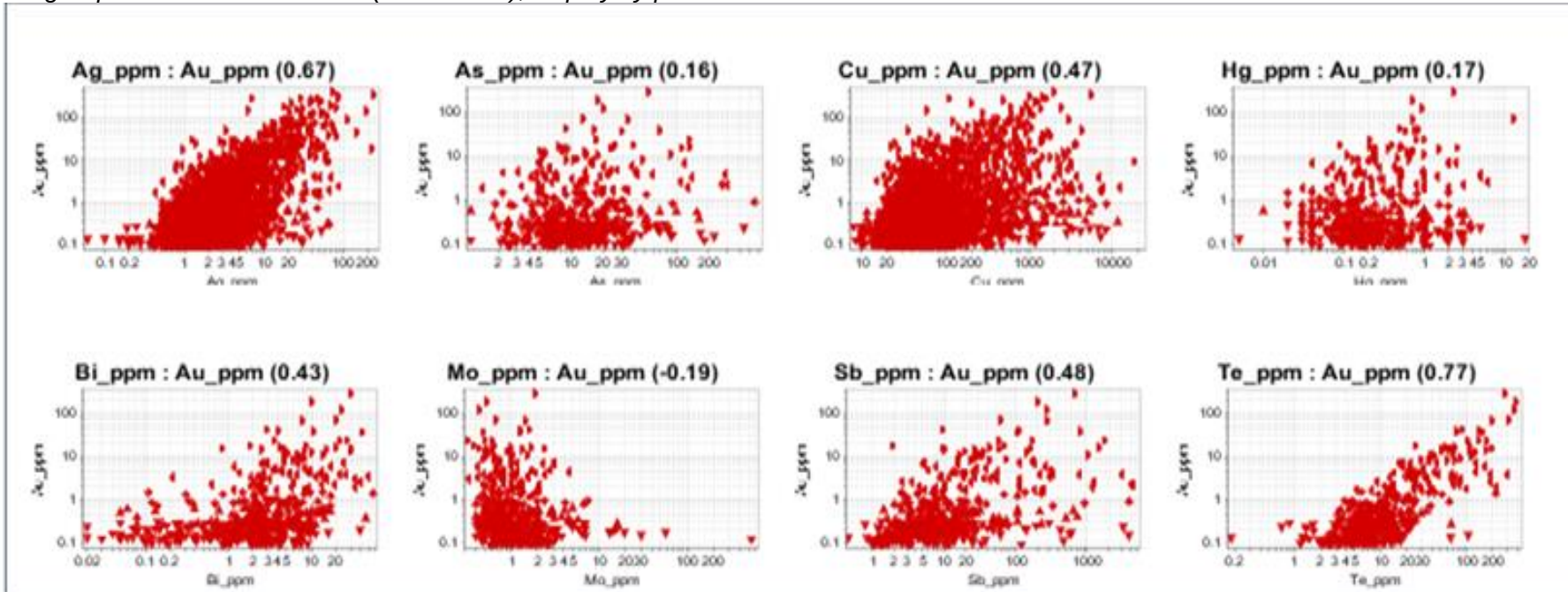
Fuente: Elaboración propia

Geoquímica – Sistema Pucara (Sistema R4)

Se analizaron 825 datos, utilizando el índice de correlación de Pearson logarítmico, identificándose la firma geoquímica Au-Te-Ag, véase la siguiente figura.

Figura 18

Firma geoquímica sistema Pucara (sistema R4), display xy plot



Fuente: Elaboración propia

3.2.5 Geometría y texturas de mineralización

Las estructuras en el yacimiento de Chipmo son vetiformes con anchos variables. En las zonas de brechas estas estructuras llegan a su máximo ancho alrededor de 20 metros.

La mineralogía está compuesta principalmente por cuarzo en texturas de brecha y de reemplazamiento. El oro que es el mineral de mena se presenta como oro libre, electrum y telururos. Además, se tiene pirita, tetraedrita, tenantita, estibina y otros sulfosales de bismuto y plomo, baritina, yeso, anhidrita y calcita. Como minerales de alteración se tiene a la alunita, dickita, pirofilita, diáspora, caolín, illita, esmectitas, cloritas, pirita.

Entre los telururos reconocidos en el yacimiento de Chipmo son mayormente telururos de plata o de plata–oro: cervellita, hessita, petzita y calaverita, además de un mineral telur Ag-Bi.

Entre las texturas de mineralización se destacan las texturas de brecha, de reemplazamiento y las bandeadas:

3.2.5.1 Textura de brecha. La textura de brecha se presenta en las rocas andesíticas, se pueden describir como brechas compuestas por fragmentos de roca andesítica silicificada de formas angulosas a subangulosas que van desde milímetros hasta metros, la matriz está compuesta por cuarzo. En algunas muestras se observan los bordes de los fragmentos corroídos lo que les da una apariencia redondeada.

Las diferentes generaciones de cuarzo forman texturas bandeadas y de brecha. Se puede encontrar este tipo de brecha con fragmentos angulosos de cuarzo blanco y gris envueltos por un cuarzo sacaroide.

Las brechas en Chipmo están más extendidas en la roca andesítica. Su formación se puede explicar por fracturamiento hidráulico de las rocas. Estas ocurren en la mayoría de los casos entre dos fallas, que pueden ser tensionales que se encuentran entre la falla piso y techo de la estructura principal. Por esta falla fluye el fluido hidrotermal, como el agua no puede ser disuelta por la roca andesítica se producen fracturas hidráulicas entre estas fallas, las cuales son rellenadas por cuarzo. Estas fracturas hidráulicas pueden tener

relación con la etapa de la segunda ebullición en Chipmo. Varias de estas brechas están relacionadas a la mineralización de oro. En las dacitas y riolitas casi no hay presencia de brechas por la razón que estas disuelven mejor el agua que las andesitas, esto podría ser una razón también por lo cual las dacitas y riolitas tiene mayor halo de alteración.

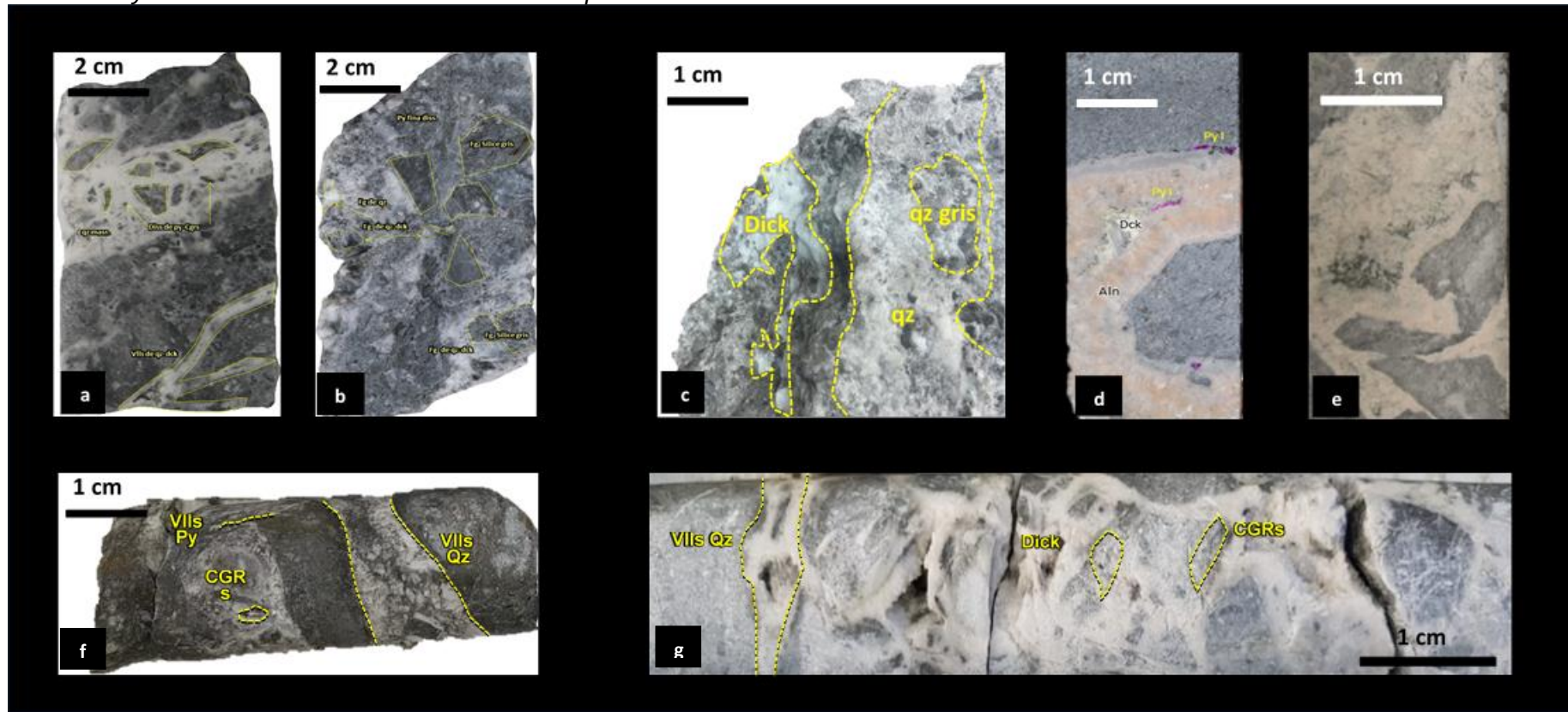
3.2.5.2 Textura de reemplazamiento. Las texturas de reemplazamiento se observan en los cuarzos blanco y gris, lo cual podría explicarse que anteriormente ya existían cristales de baritina y calcita, las cuales fueron reemplazadas por cuarzo blanco o gris. Esto se ha reconocido porque existen estructuras solo de baritina, calcita o anhidrita que no fueron reemplazadas. Se observa en la última etapa con cuarzo, puede explicarse como el reemplazamiento del cuarzo por la calcita o anhidrita, igualmente que la textura anterior la calcita o anhidrita ya tenía que existir para ser reemplazada.

Al parecer en el yacimiento de Chipmo se han dado varias etapas con el cambio de pH en la precipitación de los minerales. En un pH neutro a básico precipitaron la baritina, calcita o anhidrita, luego el pH disminuye y precipita el cuarzo. Esto se repite de manera cíclica dando como resultado estas texturas de reemplazamiento superpuestas. Actualmente existe precipitación de yeso/anhidrita.

3.2.5.3 Textura bandeada. Las texturas bandeadas se muestran en las vetas que están emplazadas en las rocas más ácidas del yacimiento de Chipmo (dacitas y riolitas), se explica por el mecanismo de cristalización. En una primera etapa cuando ya se han formado las vetas de cuarzo blanco estas se fracturan. El fluido hidrotermal ingresa por las fracturas formado el cuarzo gris que al cristalizar amplía los espacios abiertos permitiendo que fluya más fluido, engrosando la fractura. El fracturamiento continuo paralelo a la estructura forma esta apariencia bandeada, véase en la figura siguiente:

Figura 19

Geometrías y texturas de mineralización en mina Chipmo



Nota: a) Brecha hidrotermal de cuarzo lechoso con fragmentos subangulosos de dacita, cemento Silíceo; b) Brecha hidrotermal de cuarzo lechoso con fragmentos subangulosos de dacita; c) Brecha hidrotermal de cuarzo, relleno de dickita y fragmentos subangulosos de dacita; d) Veta con textura bandeada, rellena de Alunita masiva, relleno de dickita en oquedades y presencia de pirita diseminada; e) Veta con textura bandeada, rellena de Alunita masiva, relleno de dickita en oquedades y presencia de pirita diseminada; f) Veta con textura bandeada, rellena con venillas de cuarzo y presencia de cobres grises diseminados; g) Veta con textura de reemplazamiento, venillas de cuarzo reemplazando calcita (lattice blanded) con presencia de cobres grises diseminado.

3.3 Modelamiento predictivo

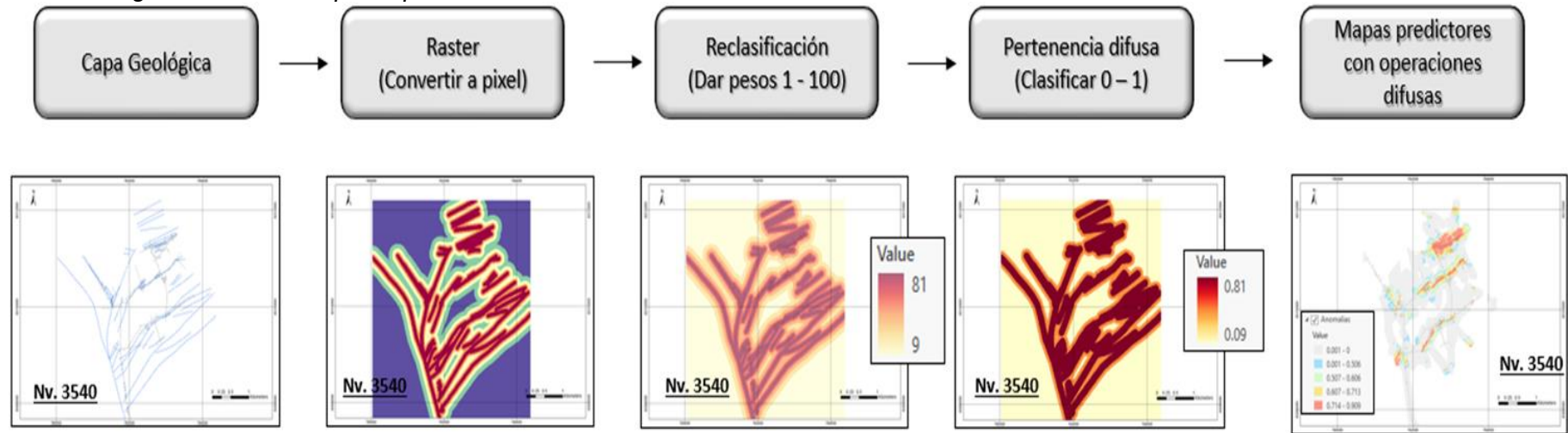
El modelamiento predictivo es una herramienta de exploración que parte como necesidad de buscar nuevos targets de exploración. Esta herramienta tiene como objetivo llegar a una capa de anomalías a partir de capas geológicas asociadas a la mineralización económica. La definición de las capas geológicas a interactuar viene del conocimiento que se pueda tener del yacimiento.

Para poder realizar estas interacciones matemáticas entre las capas geológicas se ha recurrido al software ArcGIS Pro, con el cual se ha podido dar un valor numérico a las capas geológicas y poder operarlas.

El proceso consiste en convertir cada capa geológica a un ráster (generación de pixeles), reclasificarlas (generación de valor numérico a cada capa), pertenencia difusa (clasificación de 0 – 1) y usar las operaciones difusas para generar el plano predictor, véase la siguiente figura.

Figura 20

Proceso de generación de un plano predictor



Fuente: Elaboración propia

3.3.1 Metodología de trabajo

En los ítems 3.2.2, 3.2.3 y 3.2.5 se han descrito las guías de exploración geológica, tales como la estructural, las alteraciones hidrotermales y la mineralogía.

Se han cargado los planos estructurales y de alteraciones hidrotermales por niveles en el software ArcGIS Pro, adicional se cargó la data de RQD y mineralogía, luego se realizó una limpieza de la data y posteriormente se procedió a realizar el análisis de variables. Estas 4 variables se trabajaron de una forma distinta según el tipo de información para generar 3 capas predictoras (estructural, alteraciones hidrotermales y mineralógica)

El nivel base para desarrollar el modelo predictivo fue el nivel 3540, con un clipping de 100 m.

Se definió un peso por capa (1 al 10) según la importancia en la vectorización y por cada capa se definió subcapas (1 al 10) obteniendo una puntuación final máxima por capa de 100, con dicho valor numérico se realizaron las operaciones difusas. La capa que no tiene calificación numérica es la mineralógica, ya que el mismo porcentaje del mineral es su valor numérico, véase la siguiente figura.

Figura 21

Capas geológicas para el modelo predictivo con sus pesos correspondientes

		<u>Pesos de capa</u>
➤ Lineamientos estructurales	-----➔	9
➤ Alteración	-----➔	8
➤ RQD	-----➔	7
➤ Mineralogía (%qz)	-----➔	

Fuente: Elaboración propia

Con las 4 capas geológicas se han definido 3 capas predictoras: Capa estructural (Lineamientos estructurales + RQD), Capa de alteraciones (Tipo de ensamble) y Capa mineralógica (Porcentaje de cuarzo).

3.3.2 Definición de variables geológicas

3.3.2.1 Variable estructural. La geología estructural es el principal vector de exploración como se ha visto en el capítulo 3.2.2, los sistemas N60°E y N20°E están

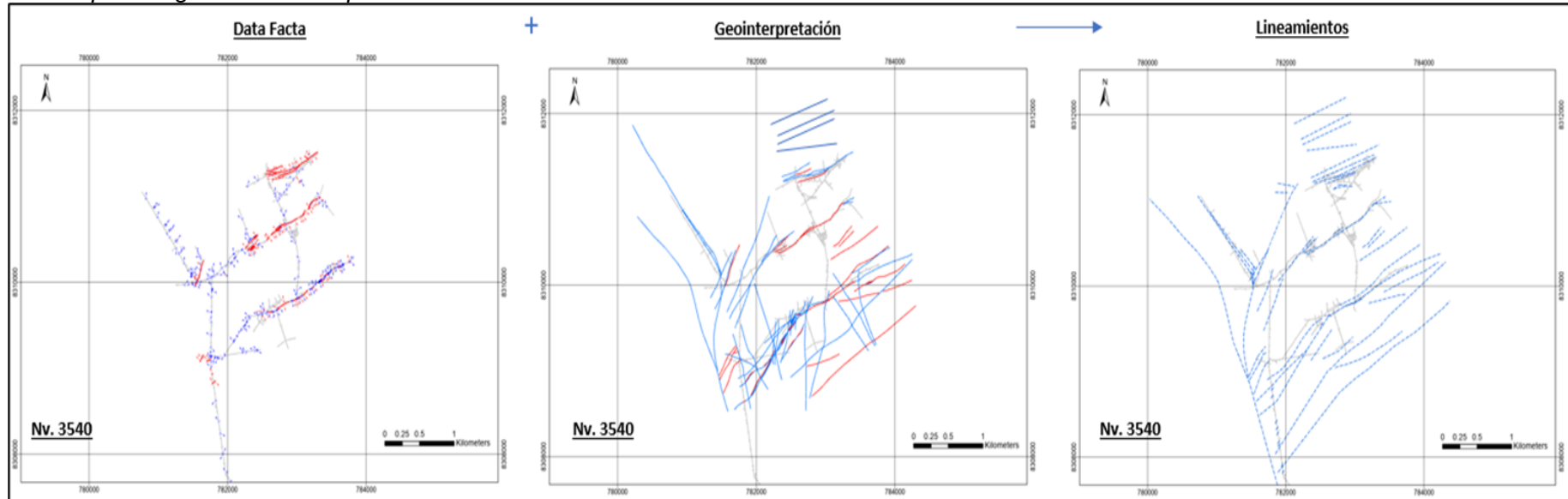
asociados a la mineralización económica en mina Chipmo. Para definir la capa estructural se trabajó la data del RQD como puntos y el mapeo estructural se manejó como lineamientos.

Para llegar al plano de lineamiento, se trabajó con una geointerpretación procedente la toma de datos del Nv. 3540; en dicho plano se limpió las estructuras principales, véase figura 22.

La data del RQD se ploteo en puntos de la información registrada en los logueos y se dividió en 5 cuantiles para posteriormente valorizar cada subdivisión, véase la siguiente figura.

Figura 22

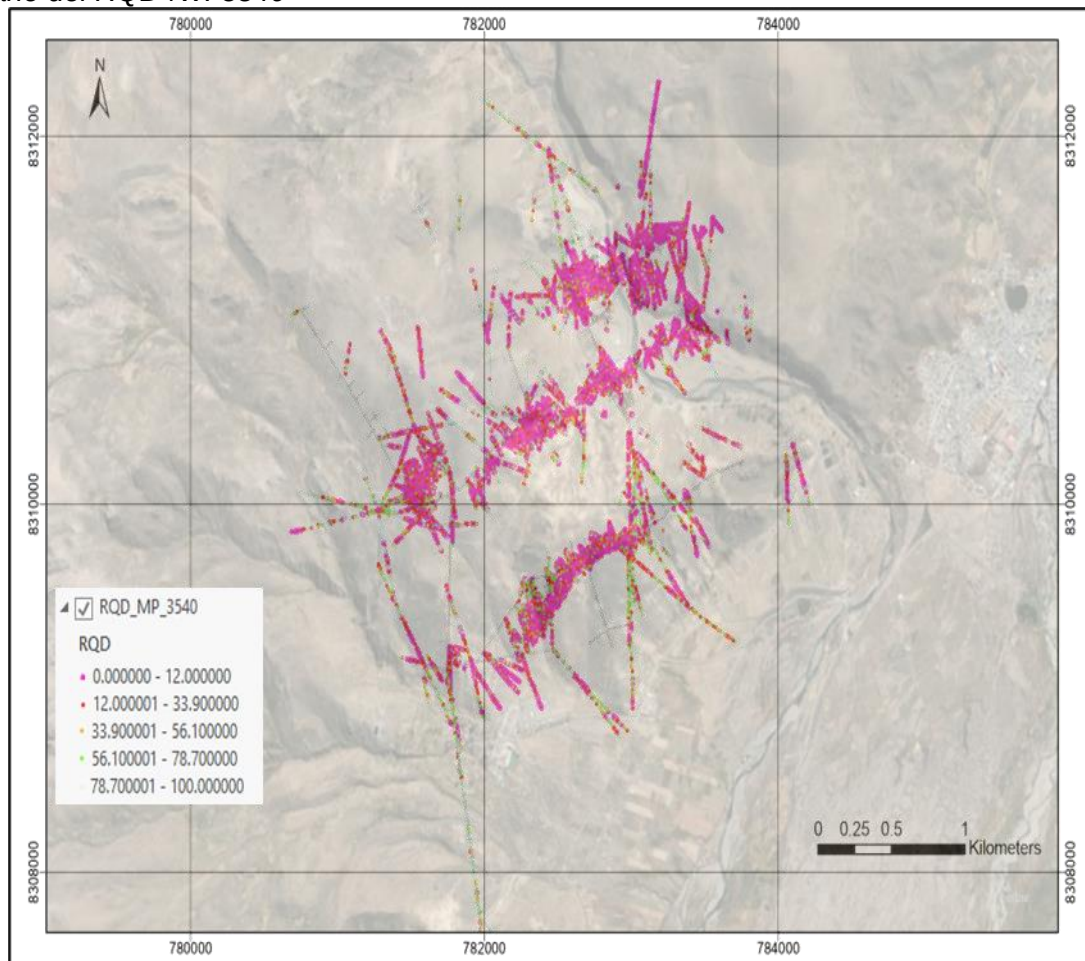
Proceso para la generación del plano de lineamientos Nv.3540



Fuente: Elaboración propia

Figura 23

Plano del RQD Nv. 3540

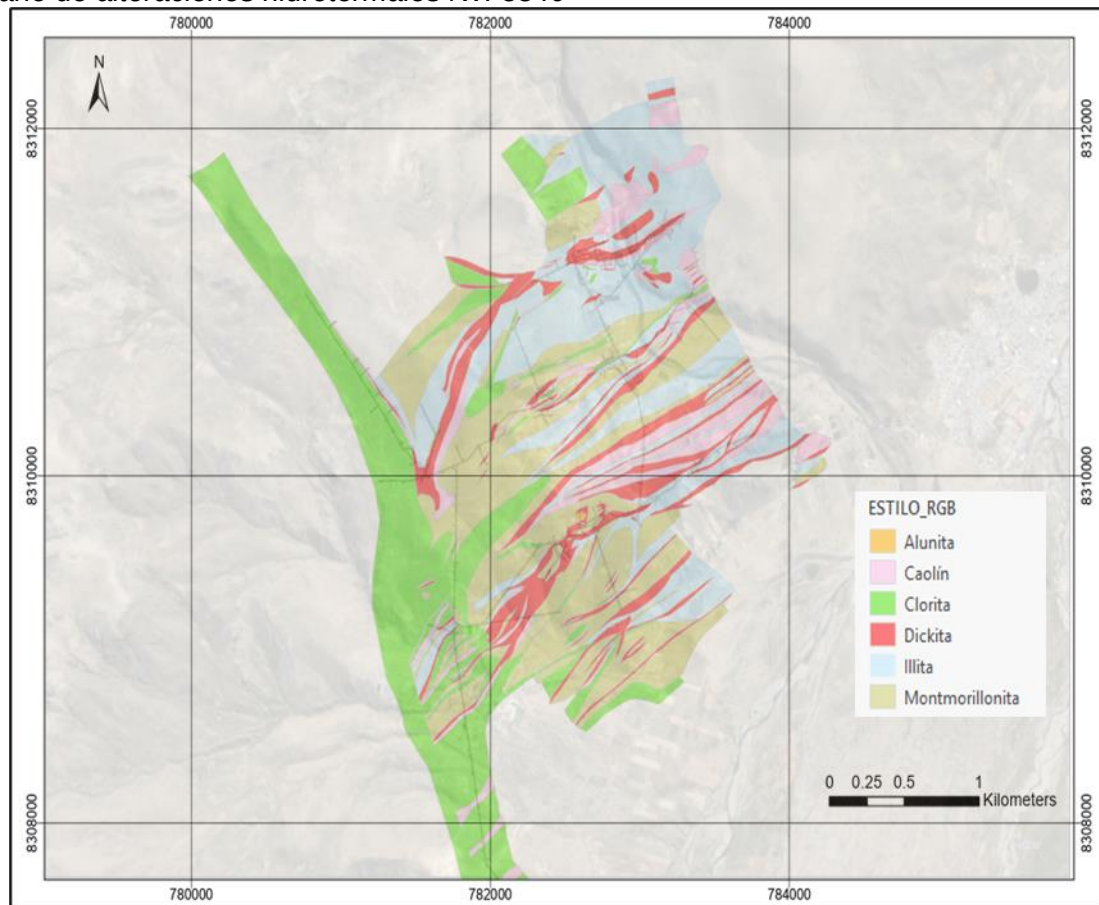


Fuente: Elaboración propia

3.3.2.2 Variable alteración hidrotermal. Las alteraciones hidrotermales son el segundo vector más importantes en las exploraciones, para este trabajo se ha realizado un plano de alteraciones por ensamble mineralógico, siendo el principal mineral asociado a la mineralización económica de oro la dickita y en segundo lugar la caolinita, véase la siguiente figura.

Figura 24

Plano de alteraciones hidrotermales Nv. 3540

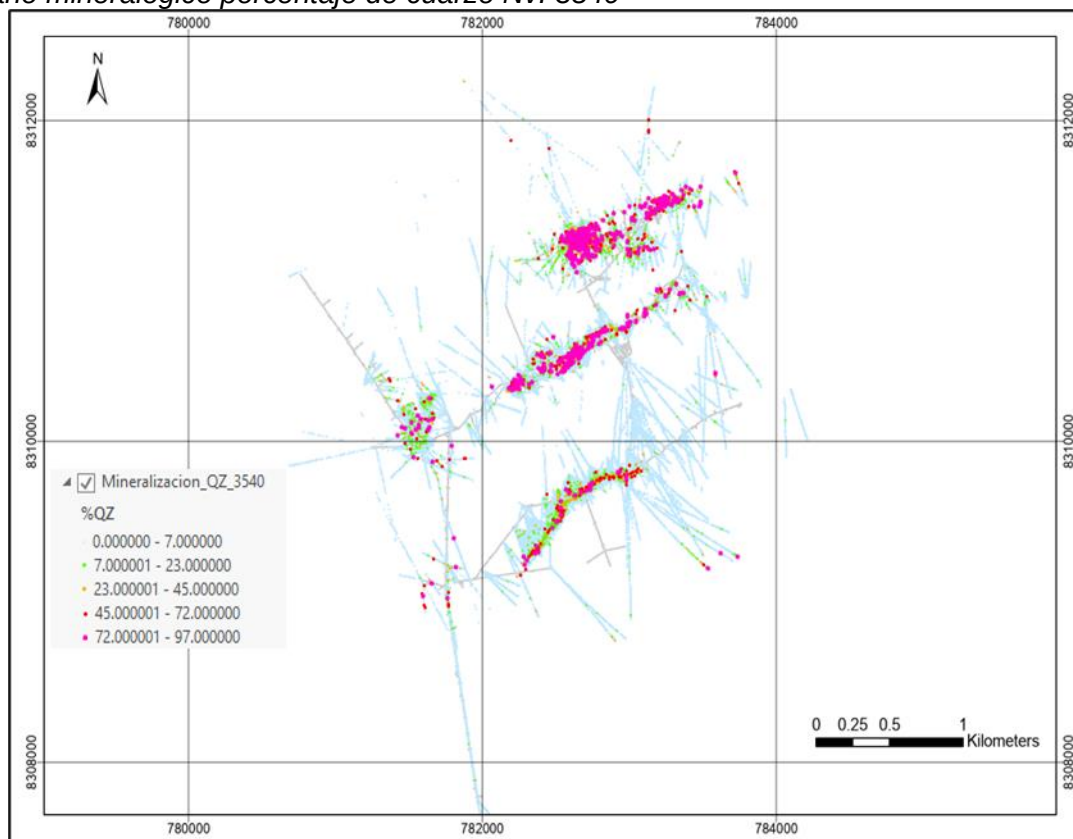


Fuente: Elaboración propia

3.3.2.3 Variable mineralógica. En mina Chipmo se tiene como ganga principal al cuarzo, se procedió a plotear la cantidad de cuarzo registrada en los logueos y se subdividió en 5 cuantiles, véase la figura siguiente.

Figura 25: Plano mineralógico porcentaje de cuarzo Nv. 3540

Plano mineralógico porcentaje de cuarzo Nv. 3540



Fuente: Elaboración propia

3.3.3 Generación de modelos y operaciones difusas en ArcGis Pro

3.3.3.1 Geoprocesos estructurales. Para definir el predictor estructural se ha utilizado 2 capas: los lineamientos estructurales (líneas) y el % RQD (puntos).

La capa lineamiento presentan un peso de 9, y se subdividió en 5 subcapas según el distanciamiento a estos lineamientos principales cada 40 m, debido a que las estructuras principales tienen una influencia de 40 m en la generación de estructuras tensionales, véase tabla 1.

Bajo estos buffers espaciados cada 40 m se procedió a generar el plano raster de lineamientos con la herramienta Euclidian distance, posterior a eso se procede a dar el valor numérico a cada subcapa de con la herramienta Reclassify y finalmente se pasa a un rango entre 0-1 con la herramienta Fuzzy membership, véase tabla 1 y figura 26.

Tabla 1*Pesos finales de subcapa de lineamiento.*

Lineamiento (m)	Subpeso	Peso final
0 – 40	9	81
40 – 80	7	63
80 – 150	5	45
150 – 250	3	27
> 250	1	9

Fuente: Elaboración propia

La capa del RQD presenta un peso de 7, y se subdividió en 5 subcapas aplicando una subdivisión por quintiles, donde los valores más bajos en el RQD reciben un mayor valor numérico debido a que representan un mayor grado de apertura estructural y eso es favorable para la mineralización económica, véase tabla 2.

Tabla 2*Pesos finales de subcapa de RQD*

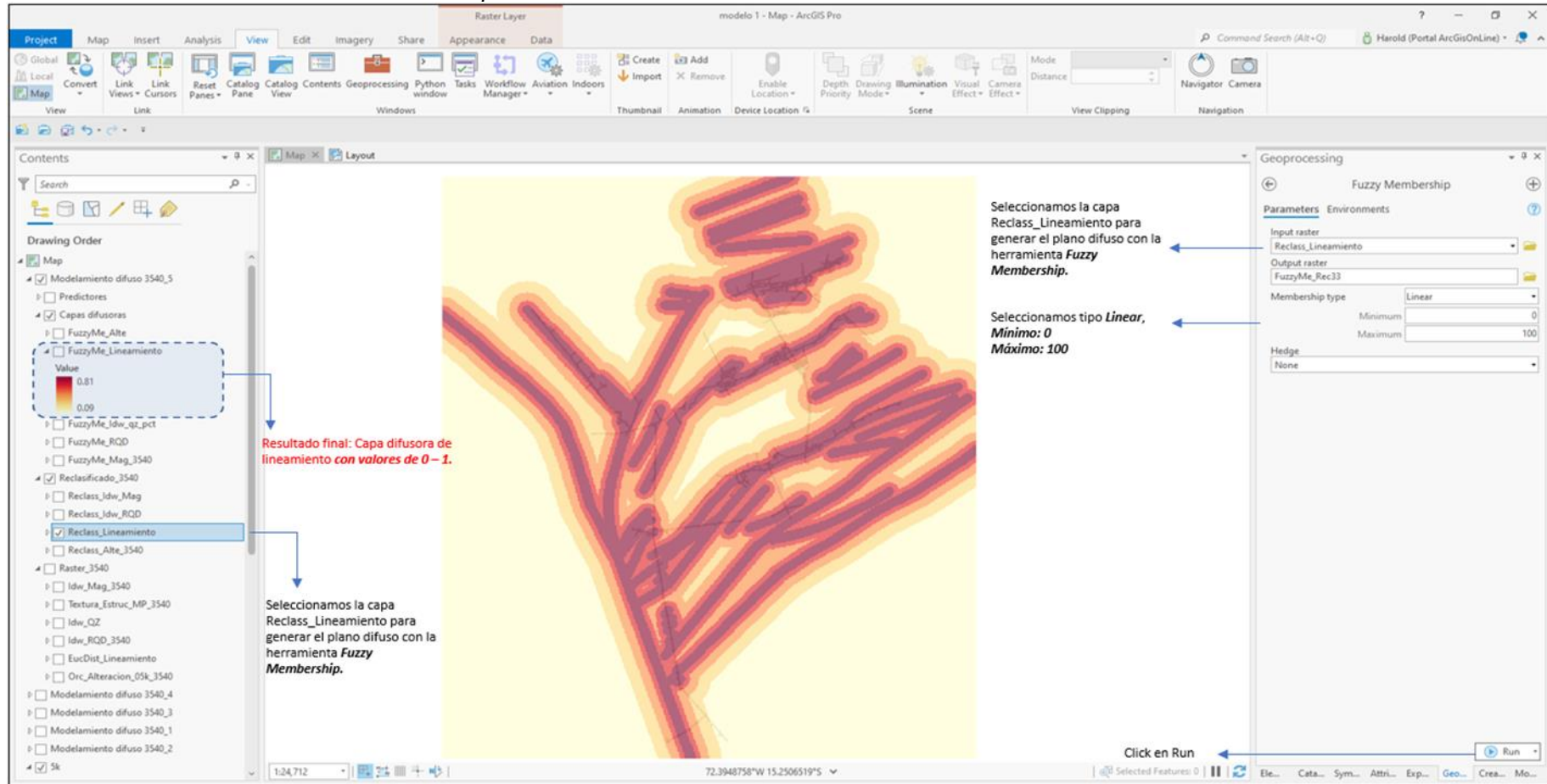
RQD (%)	Peso	Peso Final
0 -12	9	63
12 -34	7	49
34 – 56	5	35
56 -785	3	21
78 – 100	1	7

Fuente: Elaboración propia

Debido a que la data del RQD son puntos, se generó una interpolación utilizando la herramienta IWD (Inverso a la distancia) posterior a eso se procede a dar el valor numérico a cada subcapa del cuadro 2 con la herramienta Reclassify utilizando los quintiles y finalmente se pasa a un rango entre 0-1 con la herramienta Fuzzy membership, véase las siguiente figura.

Figura 26

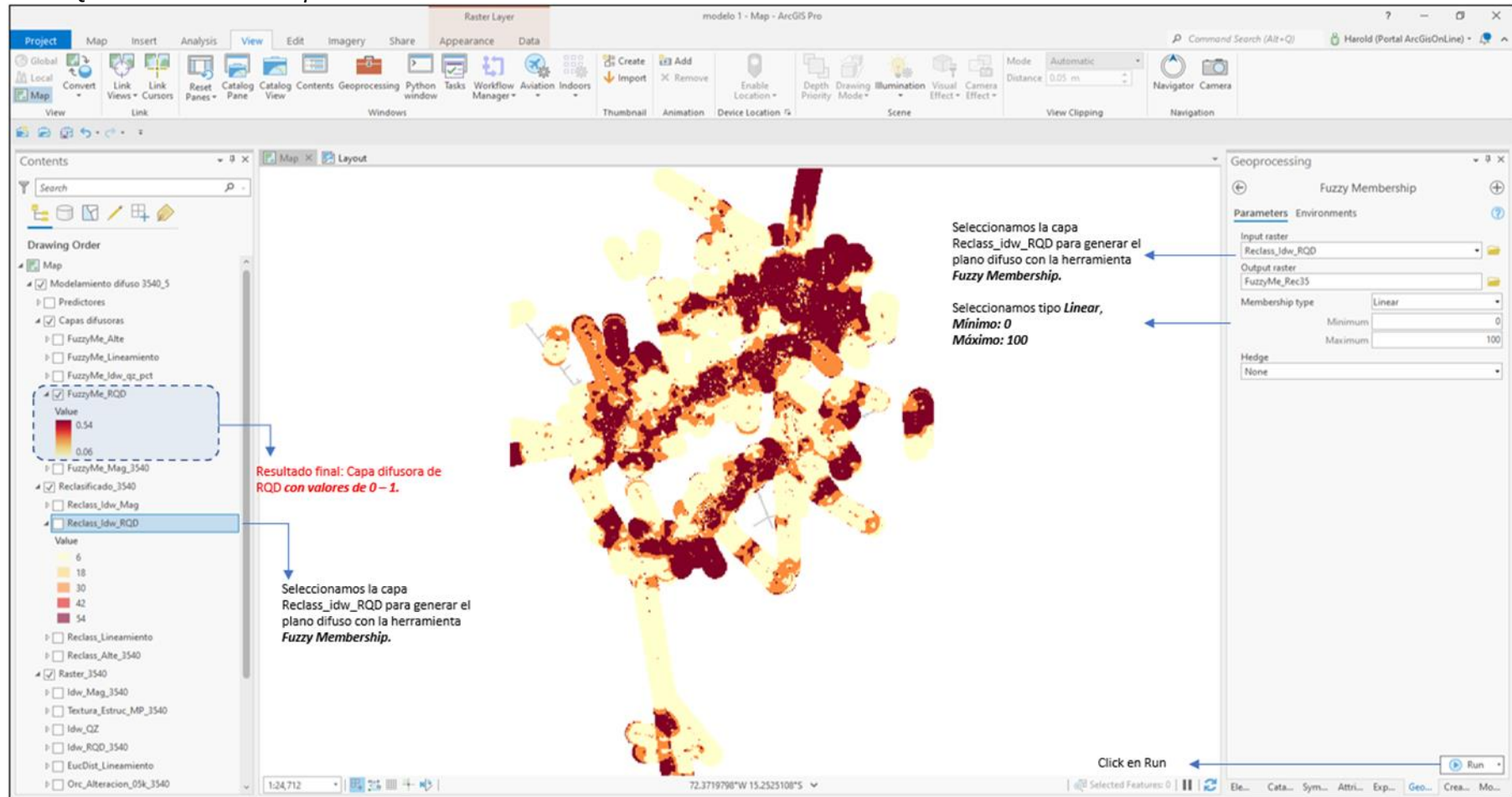
Lineamientos estructurales reclasificado con pertenencia difusa Nv. 3540



Fuente: Elaboracin propia

Figura 27

Plano RQD reclasificado con pertenencia difusa Nv. 3540



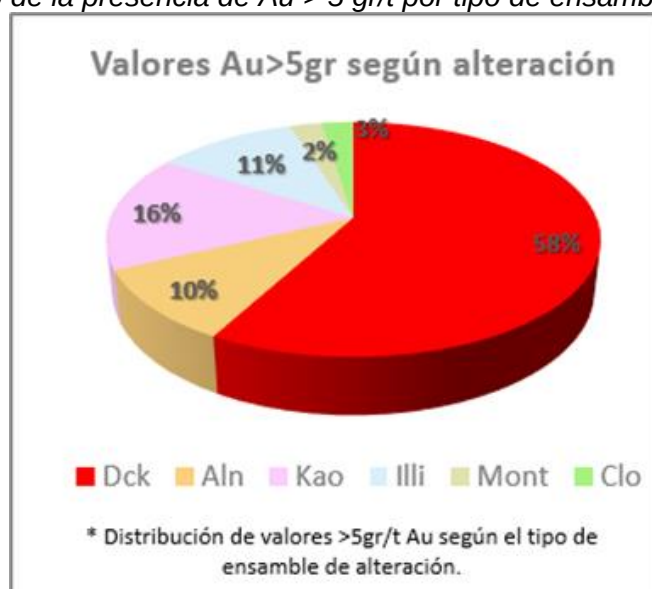
Fuente: Elaboración propia

3.3.3.2 Geoproceso alteraciones hidrotermales. La capa alteraciones hidrotermales presentan un peso de 8, y se subdividió en 6 subcapas según el tipo de ensamble de arcilla y su importancia con la mineralización económica de oro, véase figura 20 y tabla 3.

Debido a que las capas de ensambles son polígonos, se procede a dar el valor numérico a cada subcapa con la herramienta Polygon to raster, se reclasifico con el peso obtenido de la tabla 3 con la herramienta Reclassify y finalmente se pasa a un rango entre 0-1 con la herramienta Fuzzy membership, véase figura 28.

Figura 28

Análisis estadístico de la presencia de Au > 5 gr/t por tipo de ensamble de arcillas



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3

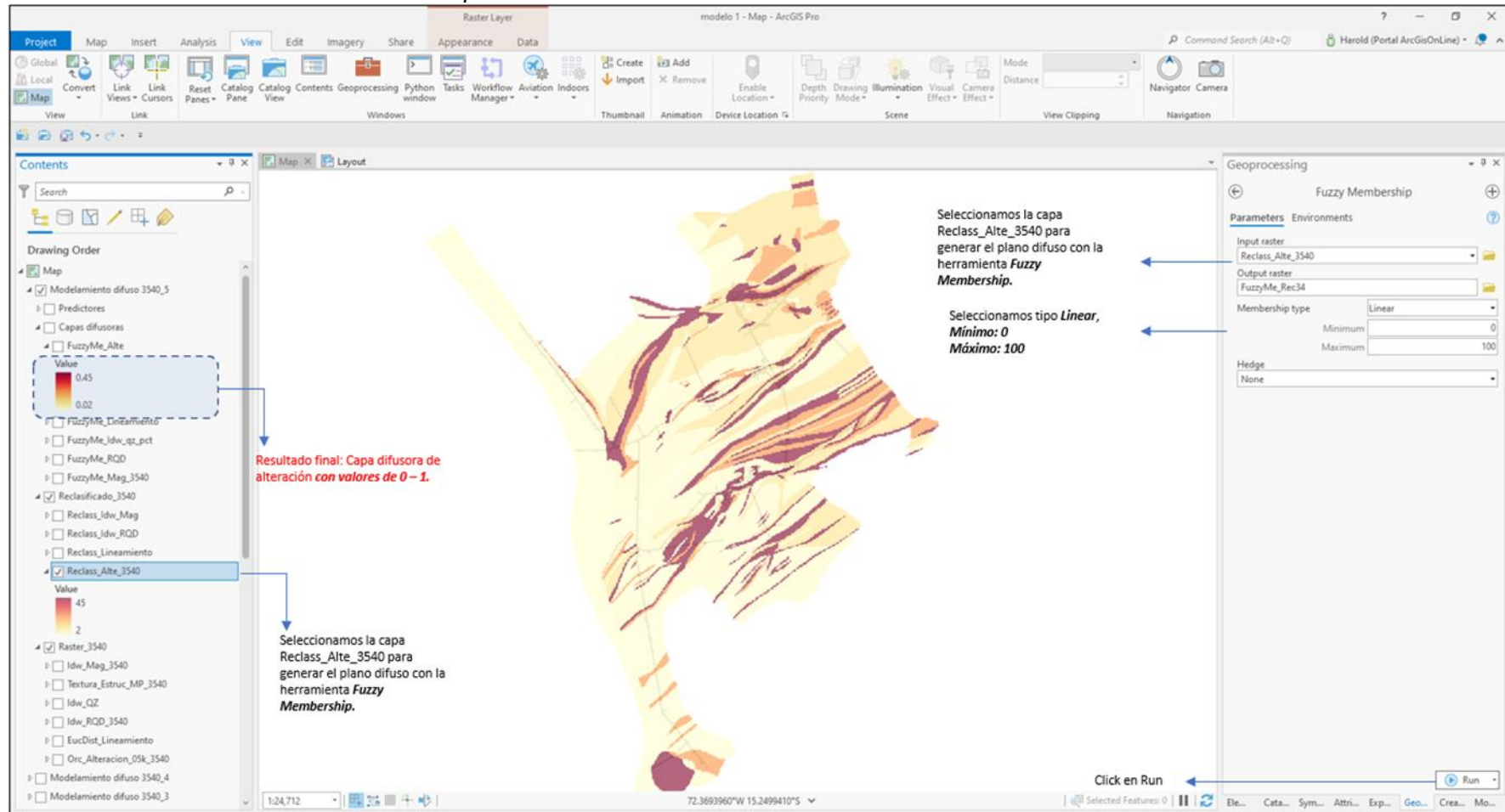
Pesos finales de subcapa de alteraciones hidrotermales.

Alteración	Subpeso estadístico /10	Peso final	Peso final ajustado
Dck	5.8	46.4	45
Aln	0.1	0.8	5
Kao	1.6	12.8	20
Illi	1.1	8.8	9
Mont	0.3	2.4	3
Clo	0.3	2.4	2

Fuente: Elaboración propia

Figura 29

Alteraciones hidrotermales reclasificado con pertenencia difusa Nv. 3540

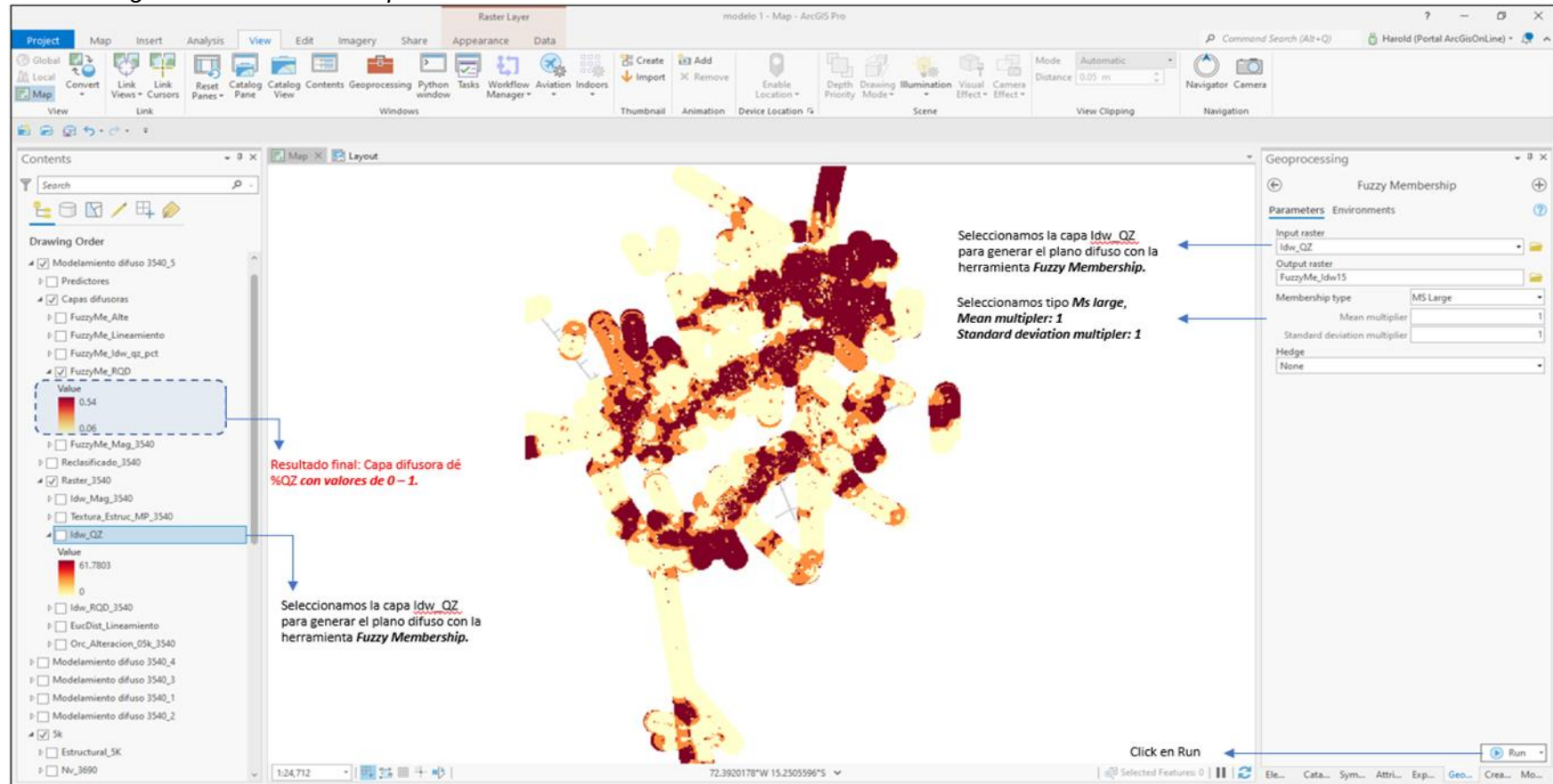


Fuente: Elaboración propia

3.3.3.3 Geoproceso mineralógico. La capa mineralógica presenta un peso según el porcentaje de cuarzo que presente cada punto. Debido a que la data del porcentaje de cuarzo son puntos, se generó una interpolación utilizando la herramienta IWD (Inverso a la distancia) posterior a eso se pasa a un rango entre 0-1 con la herramienta Fuzzy membership, véase la figura 30.

Figura 30

Plano mineralógico reclasificado con pertenencia difusa Nv. 3540



Fuente: Elaboración propia

3.3.4 Operaciones difusas para la generación de predictores

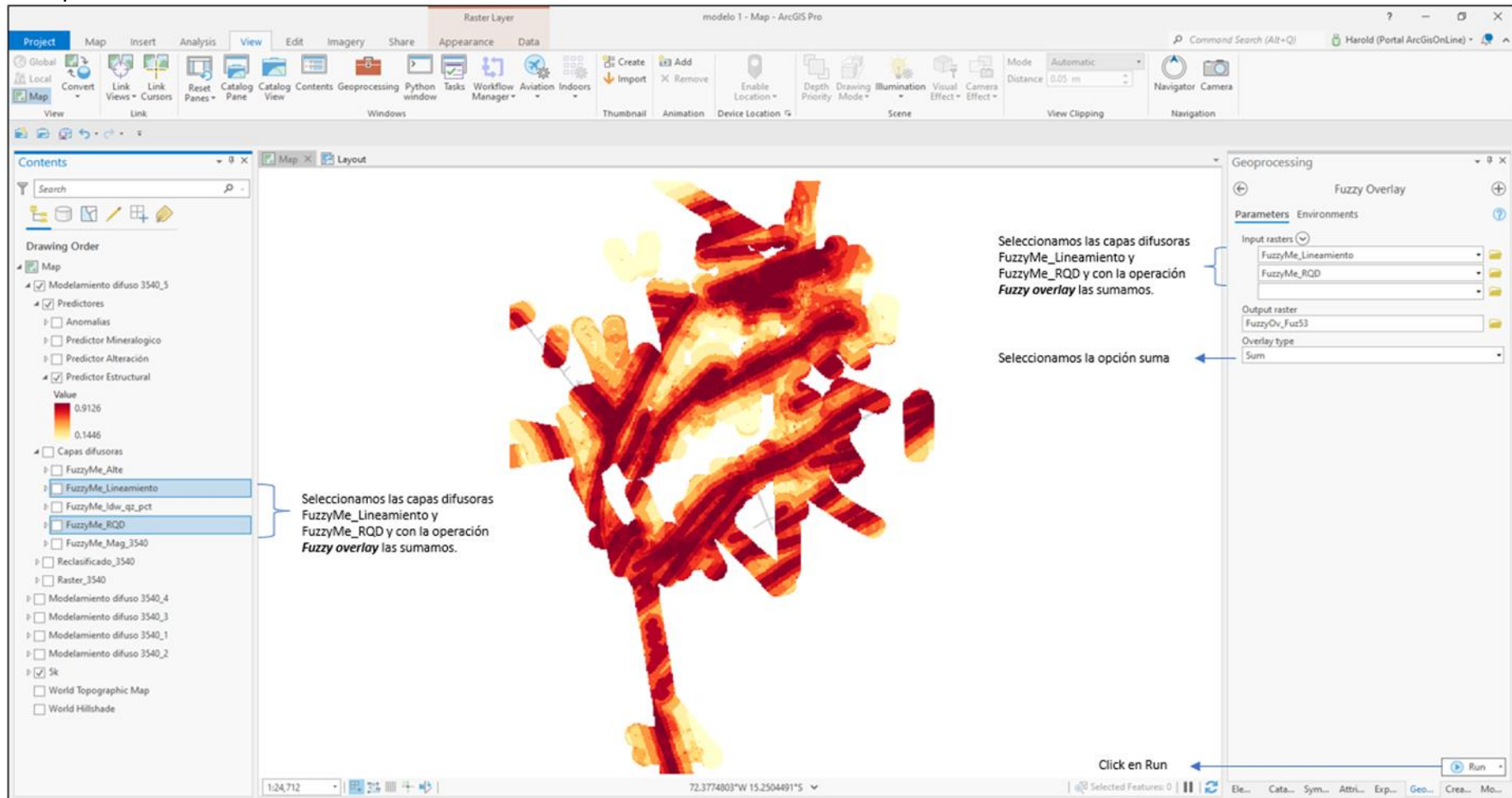
Para la generación de los planos predictores se utilizaron las operaciones sumas, producto y gamma difuso según sea conveniente en cada caso.

Predictor estructural

En el caso del predictor estructural, se utilizó la herramienta suma difusa sobre las capas de lineamientos y RDQ, ya que al sumarlas se obtuvo las zonas de apertura asociadas a los principales sistemas estructurales, para esto se usó la herramienta Fuzzy overlay donde los colores más cálidos están asociados las zonas de apertura estructural, véase la figura 31.

Figura 31

Plano predictor estructural Nv. 3540



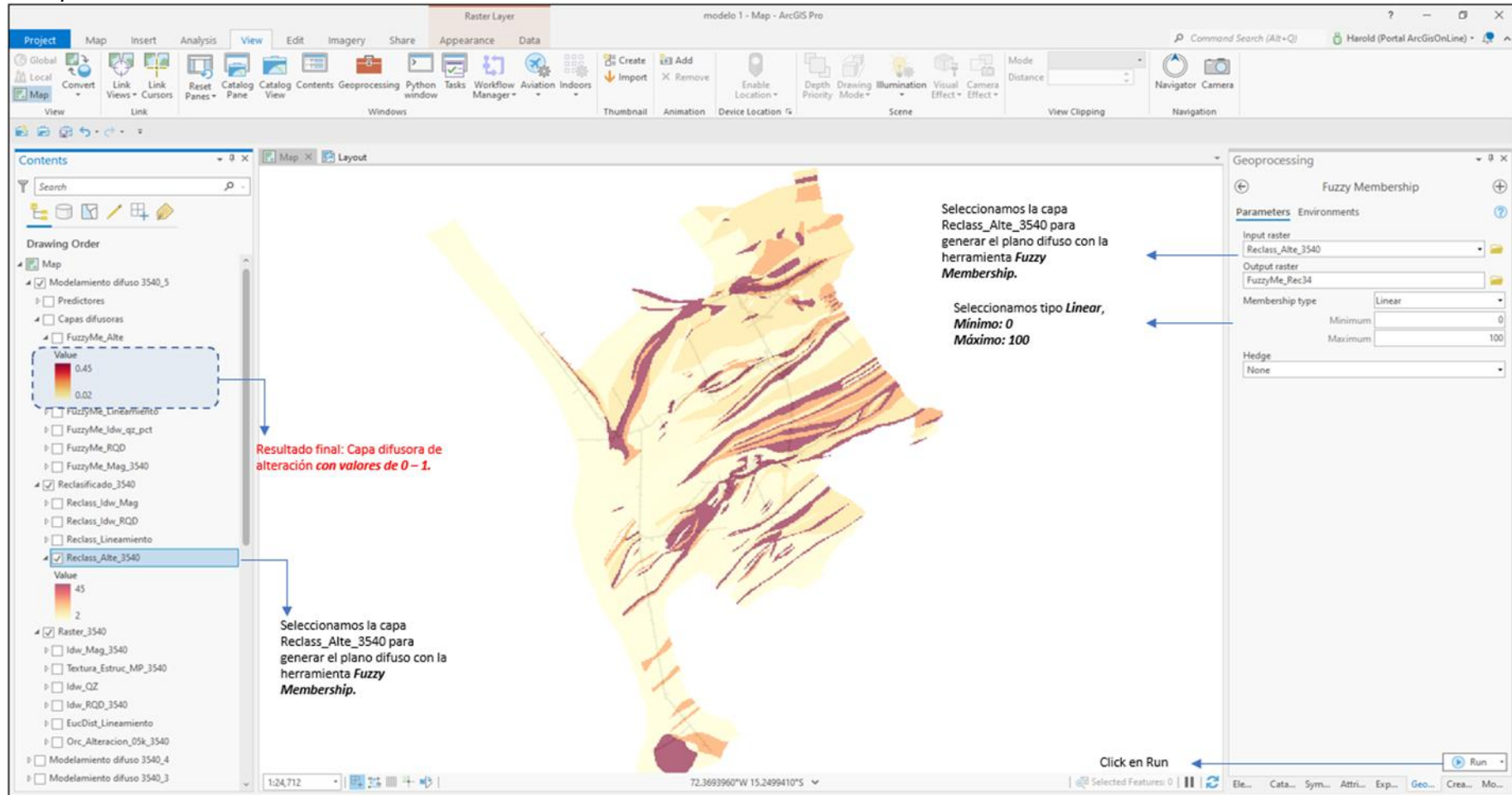
Fuente: Elaboracin propia

Predictor alteraciones hidrotermales

En el caso del predictor de alteraciones solo se usó la capa final de ensambles de arcillas, véase la figura 32.

Figura 32

Plano predictor alteraciones hidrotermales Nv. 3540

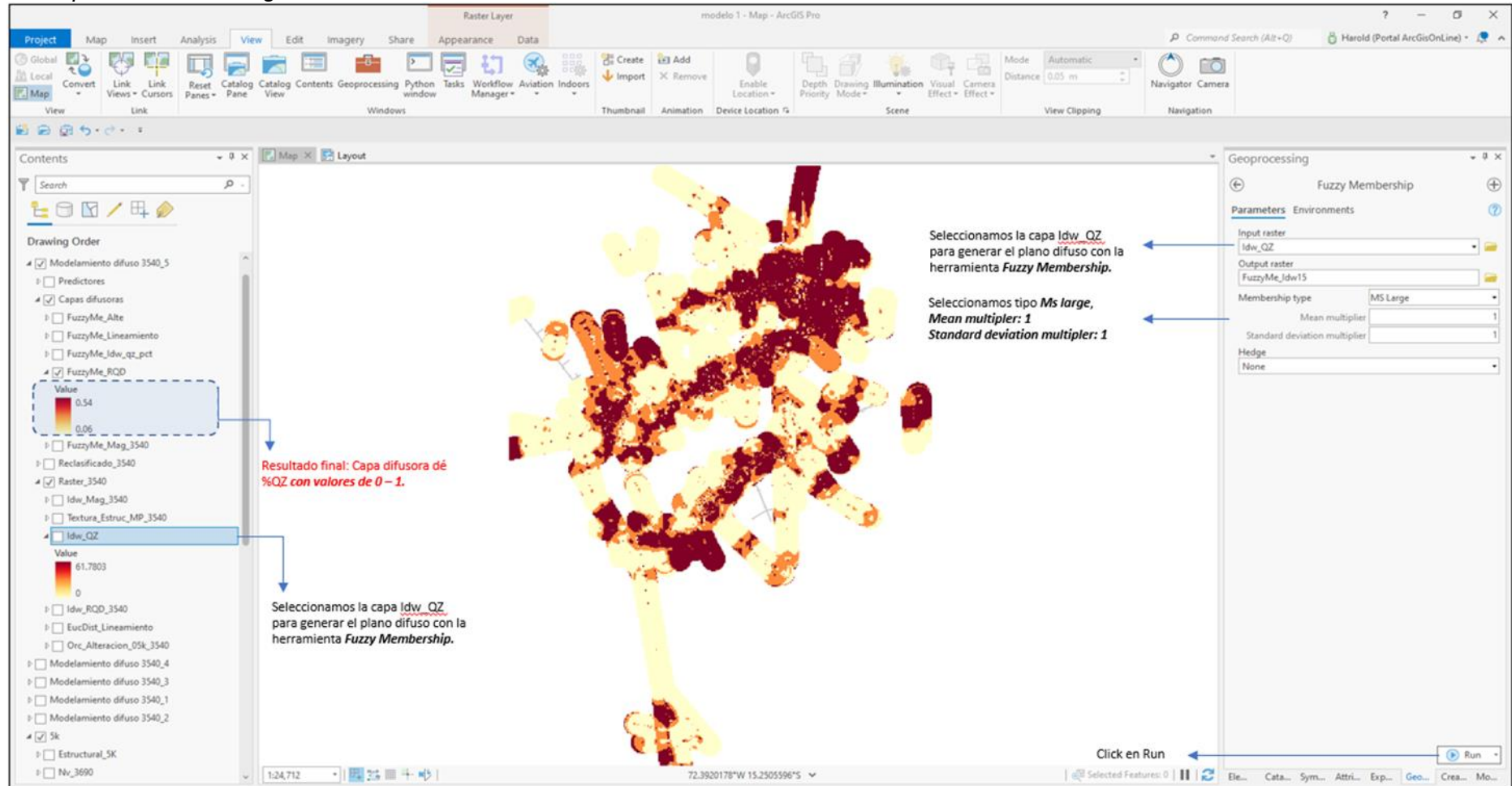


Fuente: Elaboración propia

Predictor mineralógico: En el caso del predictor mineralógico solo se usó la capa final porcentaje de cuarzo, véase la figura 33.

Figura 33

Plano predictor mineralógico Nv. 3540



Fuente: Elaboración propia

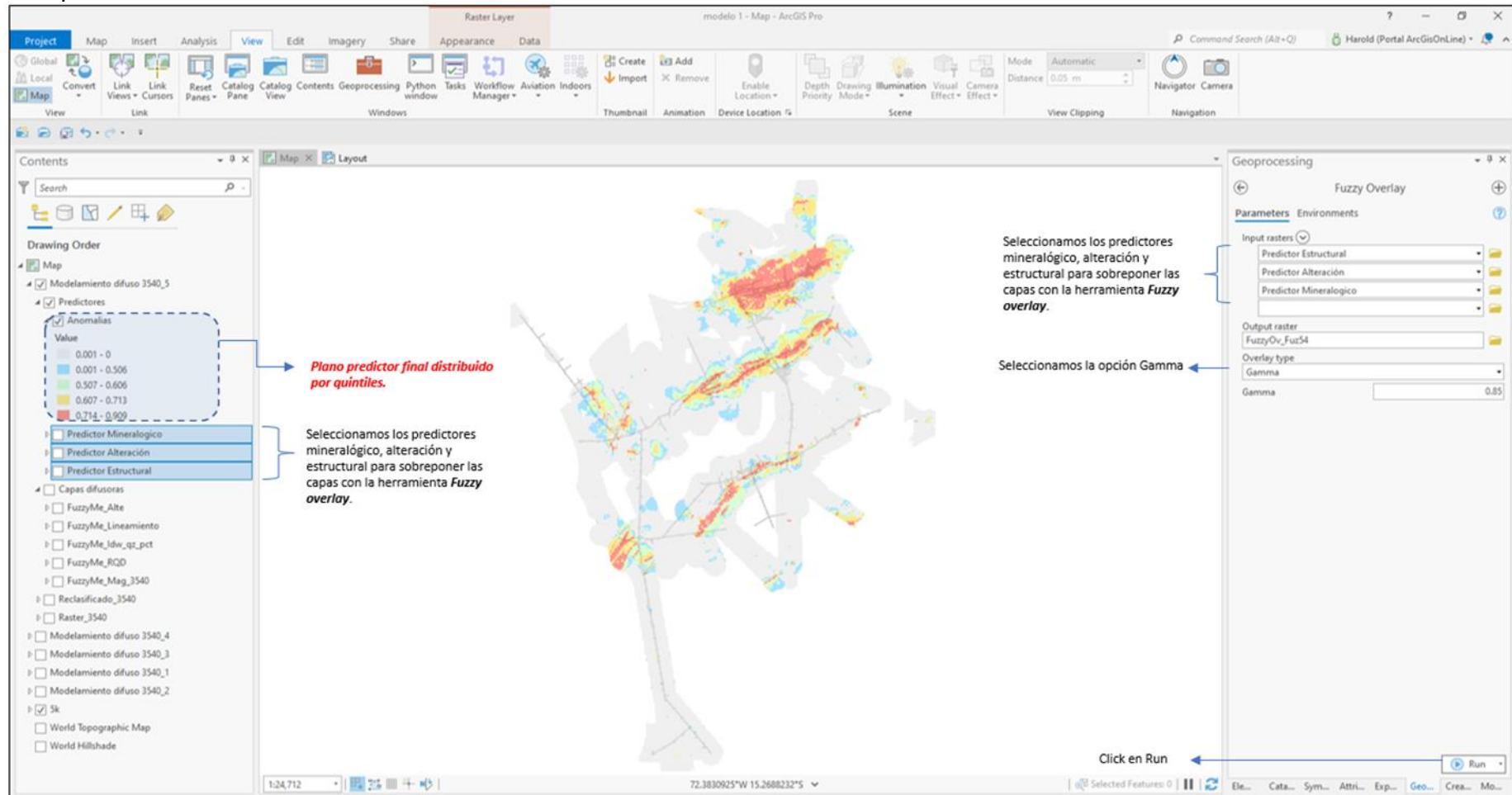
3.3.5 Generación del modelo predictivo

Al definir los 3 planos predictores, se procedió a generar la interacción matemática entre los 3 planos utilizando la herramienta gamma de las operaciones difusas, posterior a ello se procedió a generar una subdivisión de valores por quintiles para así obtener un plano de anomalías resultante, véase la figura 34.

Los sectores de colores cálidos en el plano predictor final representan las zonas mineralizadas.

Figura 34

Plano predictor final Nv. 3540



Fuente: Elaboración propia.

Capítulo IV. Análisis e interpretación de resultados

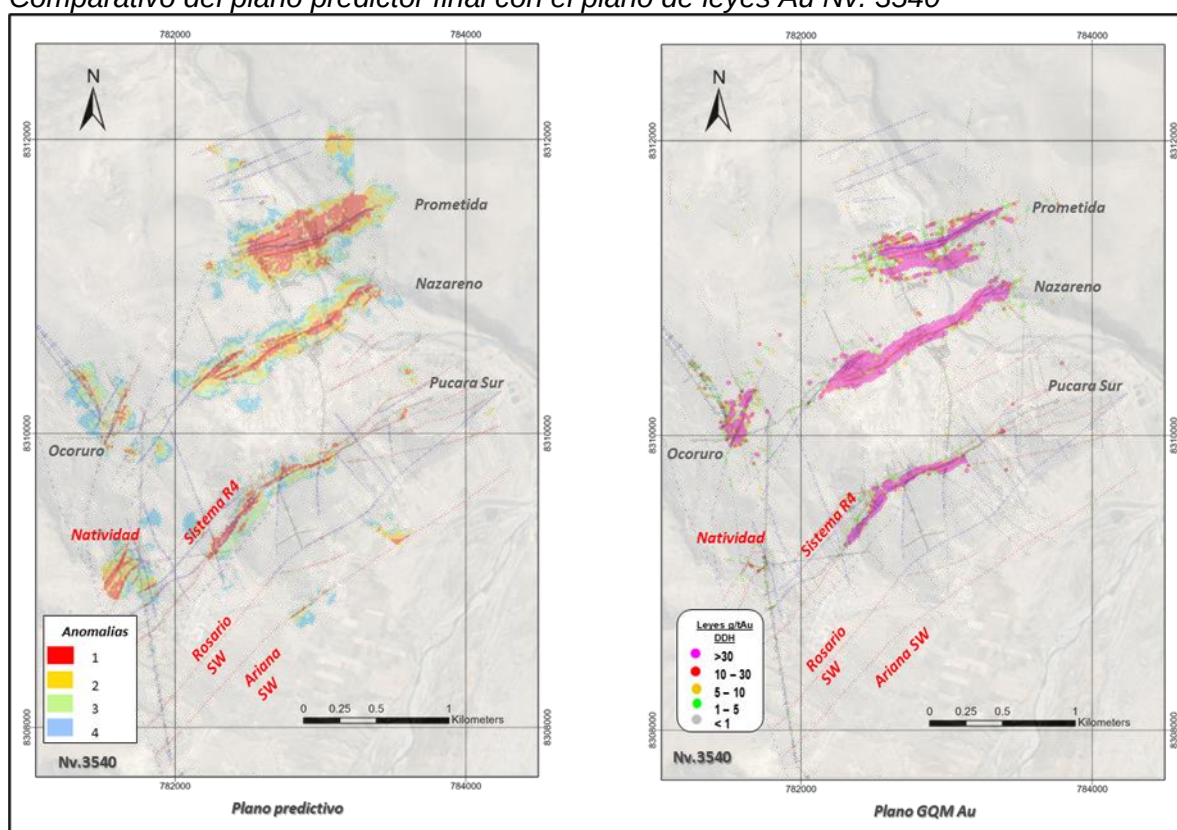
4,1 Validación del modelo predictivo y propuestas de ingeniería

4.1.1 Validación del modelo predictivo

Para poder validar el modelo se realizó un comparativo del plano predictor final con el plano de leyes Au del Nv. 3540, llegando a verificar la similitud entre las zonas anómalas del plano predictor con las zonas explotadas en Prometida, Nazareno, Pucara y Ocoruro, véase la figura 35.

Figura 35

Comparativo del plano predictor final con el plano de leyes Au Nv. 3540



Fuente: Elaboración propia

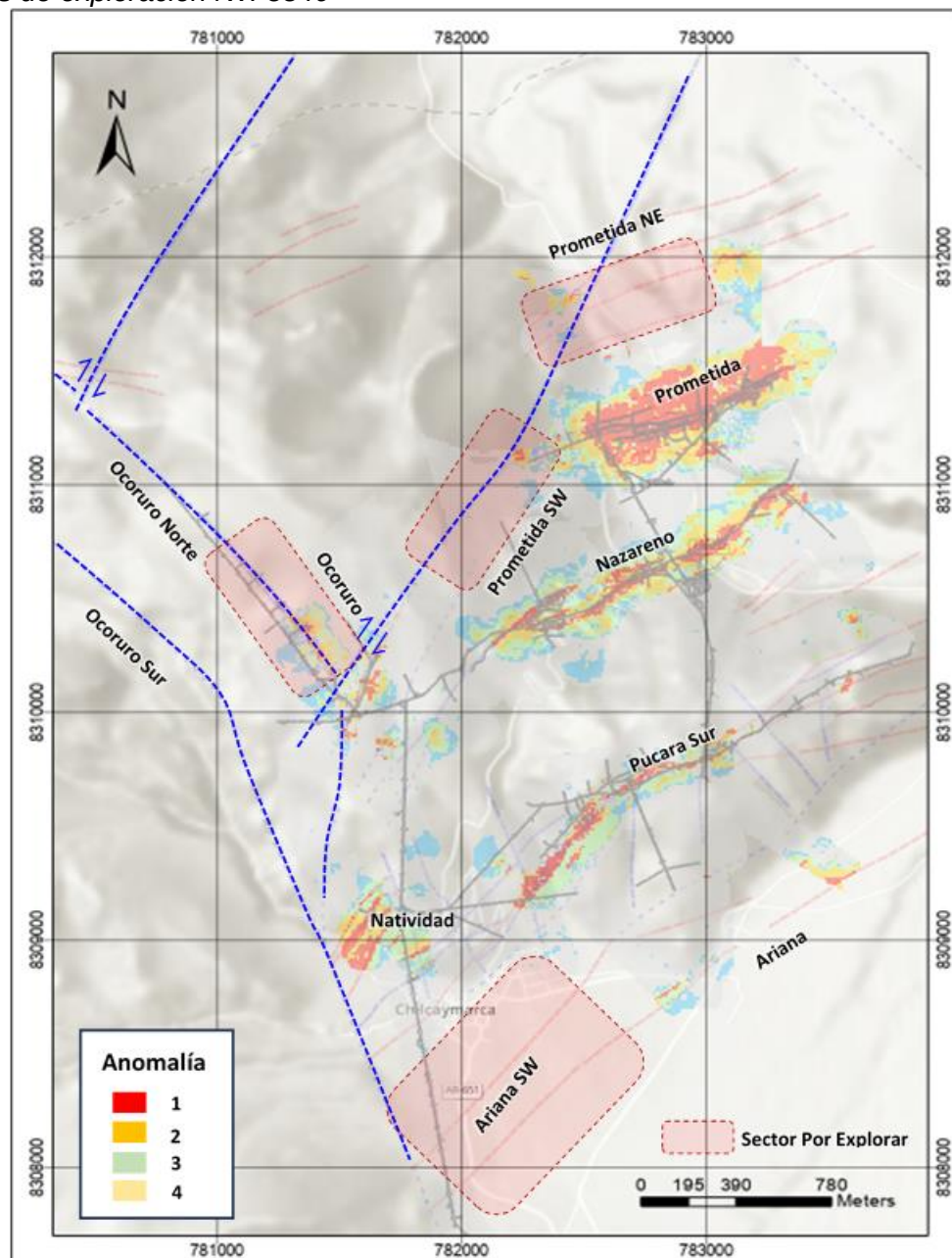
4.2 Propuesta de ingeniería

4.2.1 Nuevos Target's de exploración

El plano predictor final no solo verifica las zonas explotadas, sino que genera algunos sectores potenciales para la mineralización económica de oro, tales como: Prometida NE, Prometida SW, Ocoruro NW y Ariana SW, véase figura 36.

Figura 36

Targets de exploración Nv. 3540

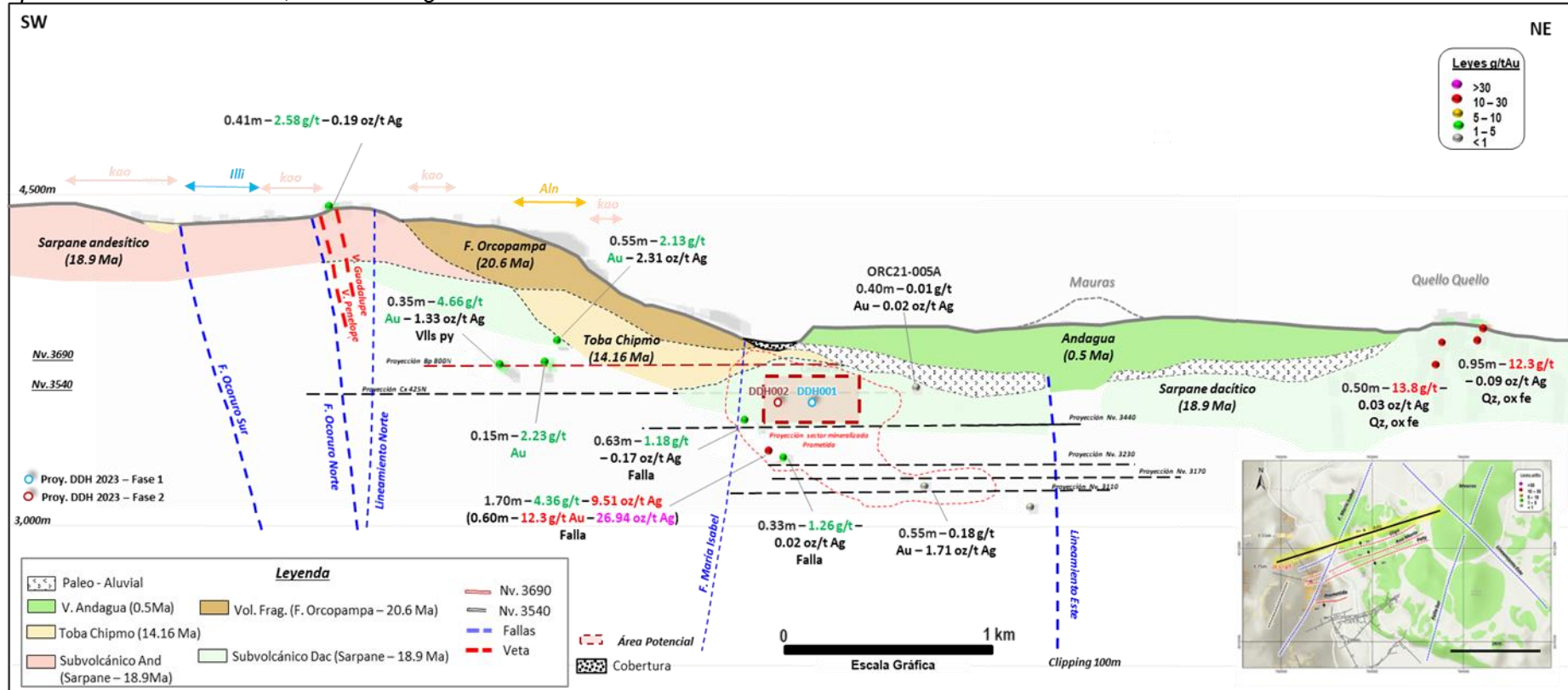


Fuente: Elaboración propia

4.2.1.1 Prometida NE. Sector anómalo al norte de Prometida, se busca encontrar mineralización económica de oro del sistema $N60^{\circ}E$, similar a Prometida, Nazareno y Pucara. Se propone explorar dicho sector entre las cotas 3,540 y 3,600 (Cotas favorables de mineralización), véase la figura 37.

Figura 37

Exploración Prometida NE, sección longitudinal

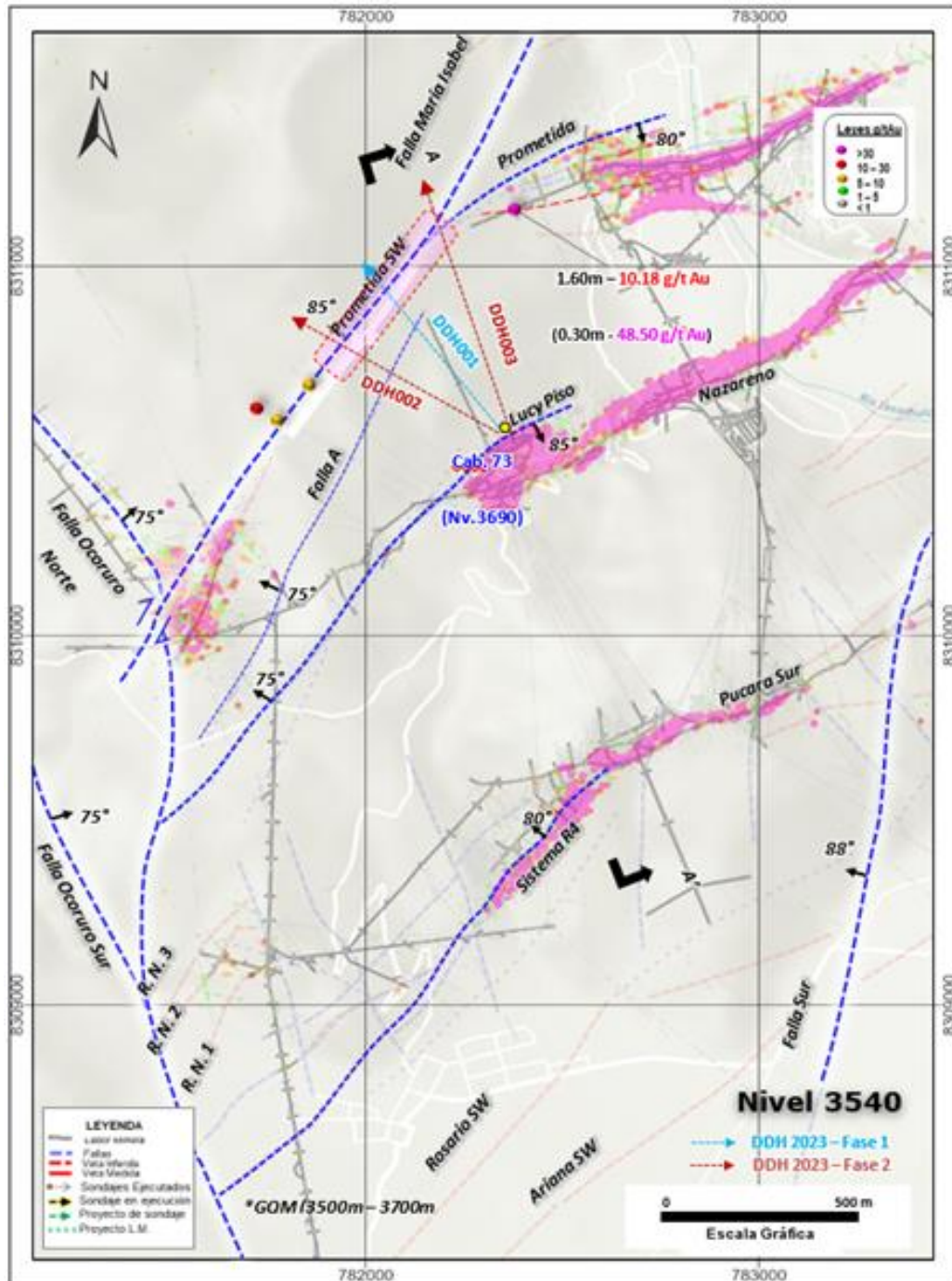


Fuente: Elaboración propia

4.2.1.2 Prometida SW. Sector anómalo al extremo W del sistema Prometida, se busca encontrar mineralización económica de oro del sistema N20°E, similar a Lucy Piso y al sistema R4 (150,000 onzas Au). Se propone explorar dicho sector por debajo de la cota 3,600, véase figuras 38 y 39.

Figura 38

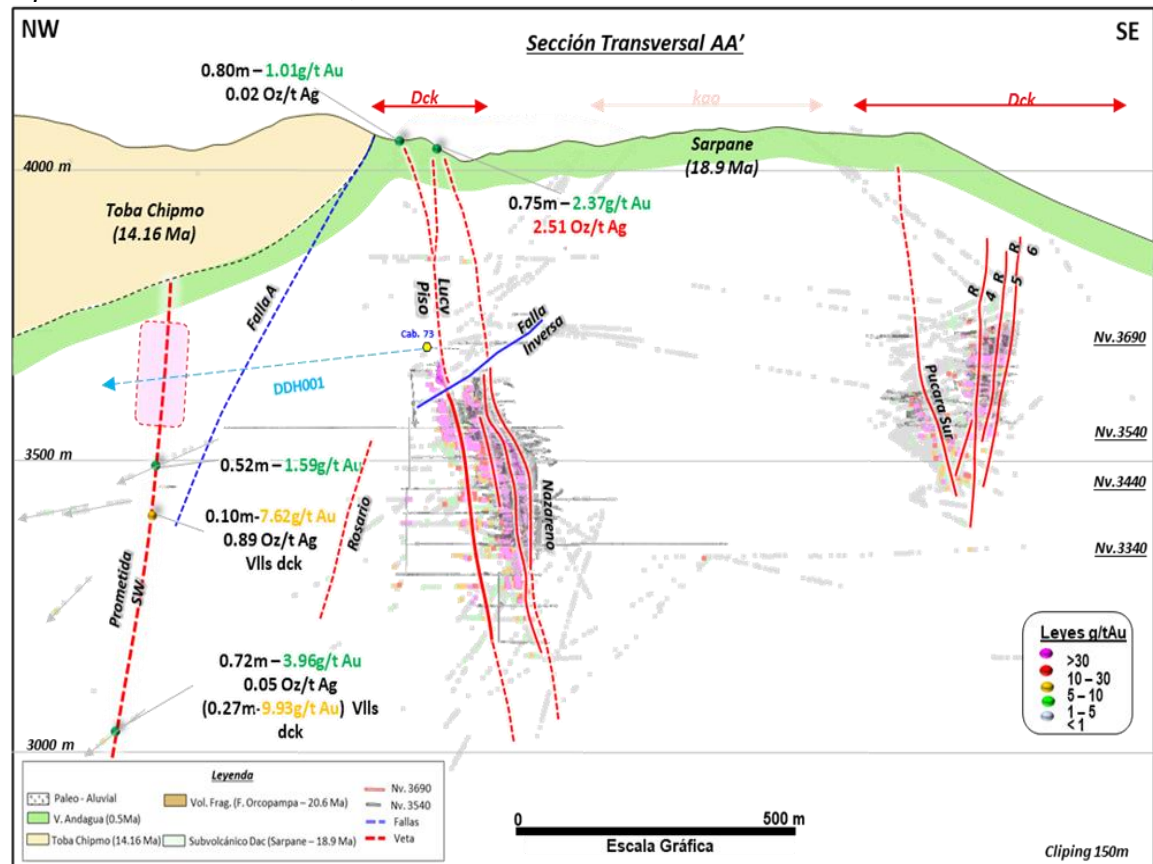
Exploración Prometida SW, planta Nv. 3540



Fuente: Elaboración propia

Figura 39

Exploración Prometida SW, Sección transversal AA'

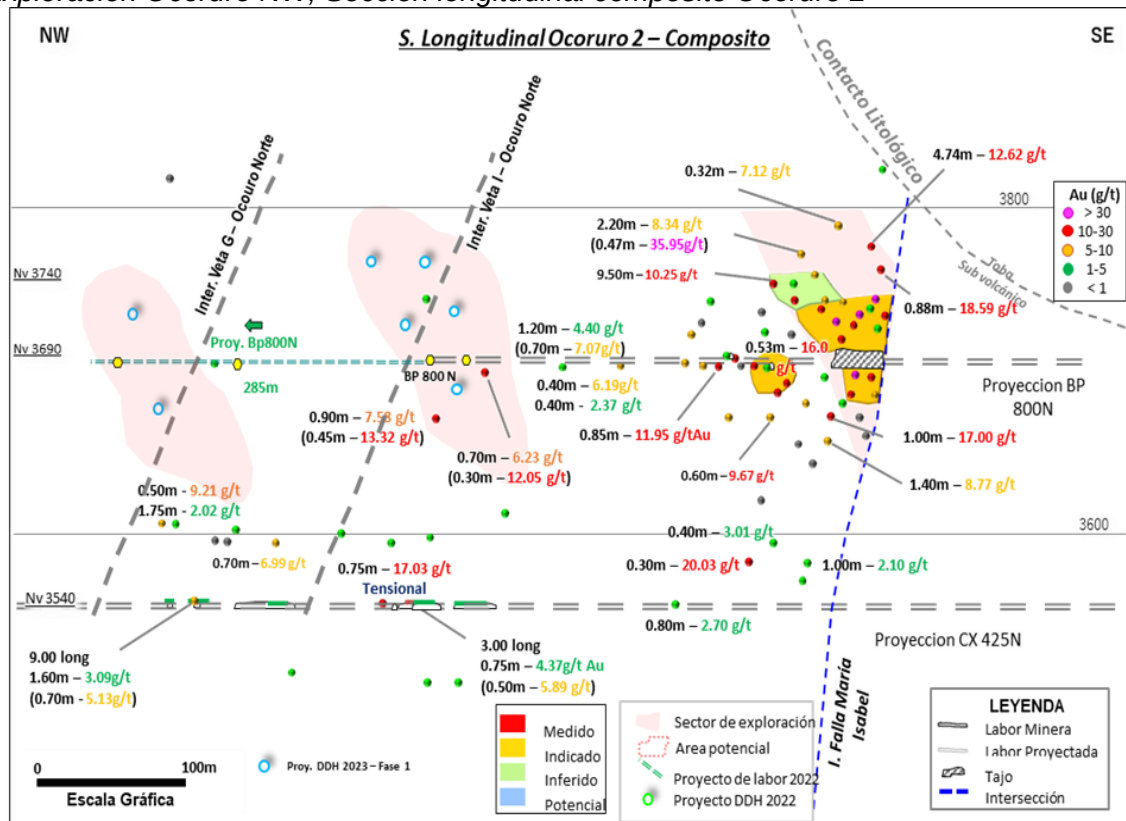


Fuente: Elaboración propia

4.2.1.3 Ocoruro NW. Sector anómalo al extremo NW del sistema Ocoruro, se busca encontrar mineralización económica de oro del sistema N30°W. Se propone explorar dicho sector por encima de la cota 3,690, véase la figura 40.

Figura 40

Exploración Ocoruro NW, Sección longitudinal compoito Ocoruro 2

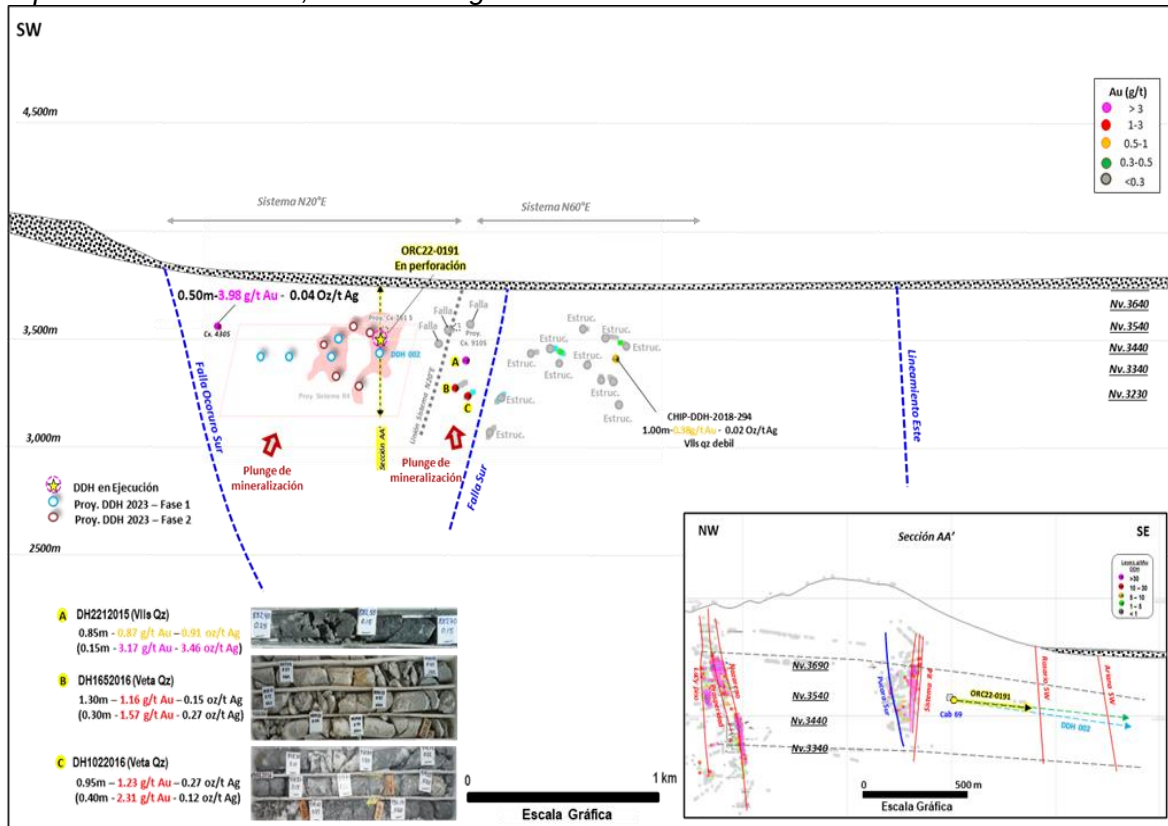


Fuente: Elaboración propia

4.2.1.4 Ariana SW. Sector anómalo al extremo SW del sistema Ariana, se busca encontrar mineralización económica de oro del sistema N20°E. Se propone explorar dicho sector por debajo de la cota 3,540, véase figura 41.

Figura 41

Exploración Ariana SW, Sección longitudinal Ariana



Fuente: Elaboración propia

4.3 Inversión

La exploración para cada uno de los targets propuestos consta de perforación diamantina y laboreo minero, véase tabla 4. El P.U DDH incluye la perforación diamantina a todo costo y la mano de obra, el P.U L.M. incluye el avance de laboreo minero a todo costo y la mano de obra.

Tabla 4

Inversión de proyectos

Métricas			Precios Unitarios		Inversión	
Target	Perforación Diamantina (m)	Laboreo Minero (m)	P.U DDH (\$/m)	P.U. L.M. (\$/m)	Costo DDH (\$)	Costo Laboreo Minero (\$)
Prometida NE	1,600		180		288,000	
Prometida SW	2,400		180		432,000	
Ocoruro NW	3,500	500	160	2,200	560,000	1,100,000
Ariana SW	6,500		180		1,170,000	
Total	14,000	500			2,450,000	1,100,000
Costo Total (\$)					3,550,000	

Fuente: Elaboración propia

Conclusiones

La exploración en mina Chipmo ubicada en Arequipa, necesita de nuevos métodos para la generación de nuevos targets, uno de ellos es el modelamiento predictivo.

El modelamiento predictivo en el ámbito geológico tiene como fin generar un modelo 2D o 3D a partir de capas geológicas relacionadas a la mineralización de los yacimientos. Dichos modelos son una superposición de estas capas con el fin de generar un modelo predictivo a partir de la información existente. Para la generación de estos modelos predictivos se pueden utilizar las capas de lineamientos estructurales, litológicas, metalogénicas, geofísicas, geoquímicas, alteraciones hidrotermales, mineralógicas y diversas características geológicas, siempre y cuando estén relacionadas a la mineralización.

Mina Chipmo se encuentra hospedada en las rocas volcánicas del complejo Sarpane, los sistemas estructurales principales son el N60°E, N30°W y N20°E. La mineralización aurífera se encuentra asociado a la alteración argílica avanzada y los telururos de oro y plata, en un yacimiento epitermal asociado a telururos.

Las principales guías de exploración en mina Chipmo son el vector estructural, el vector de alteraciones hidrotermales y el vector mineralógico.

El modelamiento predictivo se realizó usando como base el nivel 3540, el cual presenta mayor desarrollo en la mina, para dicho modelamiento se utilizaron 3 planos predictores (predictor estructural, predictor de alteraciones hidrotermales y predictor mineralógico).

El plano de anomalías resultante se validó con la geoquímica de Au del mismo nivel 3540.

El plano de anomalías resultante generó 4 targets de exploración (Prometida NE, Prometida SW, Ocoruro NW y Ariana SW), que tienen un presupuesto de exploración de 3,550,000 \$.

Recomendaciones

Generar los planos predictores para los niveles 3690, 3440,3340 y 3230 de mina Chipmo y completar el modelo predictivo 2D para poder tener una visión más amplia en la generación de targets, debido a que podrían generarse mayores zonas de interés en las diversas cotas de mina Chipmo.

Generar un modelo predictivo en 3D con modelo de bloques, incluyendo pesos a los principales sistemas estructurales y delimitando la influencia del contenido de cuarzo, para ello es necesario un software de tratamiento estadístico y un software para generar un modelo predictivo en 3D con alta resolución, para poder ampliar la generación de targets en mina Orcopampa considerando el alcance vertical y lateral en todo el distrito minero.

Referencias bibliográficas

- Altamirano, D. (2022). *Análisis espectral y estructural para la caracterización geológica en la exploración de depósitos epitermales de oro de alta y baja sulfuración, en el sureste de la provincia de Antofagasta, Chile*. (Tesis de pregrado). Universidad Andrés Bello, Chile. <https://repositorio.unab.cl/items/96bac371-2fb8-4b9b-8766-20075eb67193>
- Aquino, J., Quispe, L., Perez, H. y Meza, J. (2016). *Caracterización geológica del sistema de vetas Lucia y su relación con el potencial económico Del proyecto Quello-Quello de la mina Chipmo, Orcopampa-Arequipa, Perú*. En XVIII Congreso Peruano de Geología, Lima. <https://app.ingemmet.gob.pe/biblioteca/pdf/CPG18-101.pdf>
- Ayala, R. (2024). *Reporte interno mina Orcopampa, Arequipa, Perú*
- Ayala, R., Perez, H., Aquino, J., Salazar, J. y Remigio, F. (2021). *Vectorización estructural, geoquímica y de alteraciones hidrotermales en las exploraciones del Sistema R4 en la Mina Chipmo, Orcopampa, Arequipa, Perú*
- Ayorinde, M., Sunday, J., Tega, M., Obaigbena, A. & Winston, P. (2024). *A review of predictive analytics in the exploration and management of U.S. geological resources*. Engineering science & technology journal, Volume 5, Issue 2, 313-337. www.fepbl.com/index.php/estj
- Bazan, O. (2021). *Innovaciones estadísticas y redes neuronales artificiales aplicadas a la prospección geoquímica en los cuadrángulos de Chaparra y Atico, Caravelí – Arequipa*. Revista del Instituto de investigación de la Facultad de minas, metalurgia y ciencias geográficas, 24(48), 35-44. <https://doi.org/10.15381/iigeo.v24i48.19212>
- Billa, M., Cassard, D., Lips A., Bouchot, V., Tourliere, B., Stein, G. & Guillou-Frottier, L, (2004). *Predicting gold-rich epithermal and porphyry systems in the central Andes with a continental-scale metallogenic GIS*. Ore geology reviews, volume 25, Issues 1-2, 39-67. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2004.01.002>

- Blomhøj, M. (2008). *Modelización matemática-una teoría para la práctica*. Revista de Educación Matemática (RevEM), 23(2), 2. <https://doi.org/10.33044/revem.10419>
- Brooks, C., & Thompson, C. (2017). *Predictive modelling in teaching and learning*. Handbook of learning analytics, 61-68.
- Camprubí, A., Albinson, T. (2006). *Depósitos epitermales en México: actualización de su conocimiento y reclasificación empírica*. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 58(1), 27-81. <https://dx.doi.org/10.22201/igl.14053322p.BSGM560102>
- Cervantes, J., Marchena, A., Iquiapaza, E. y Castillo, L. (2021). *Geología del cuadrángulo de Orcopampa* (hojas 31r1, 31r2, 31r3, 31r4). INGEMMET, Boletín, Serie L: Actualización Carta Geológica Nacional (Escala 1: 50 000), 36-44.
- Chen, S., Plouffe, A., Hattori, K. (2019). *A multivariate statistical approach identifying the areas underlain by potential porphyry-style Cu mineralization, south-central British Columbia, Canada*. Journal of Geochemical Exploration. (Vol. 202, p.13–26). <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2019.03.016>
- Corbett, G. (2014), *Comments on exploration projects in the Orcopampa, Tantauatay y La Zanja districts*, Perú.
- Echevarría, C. (2021). *Definición de targets de exploración relacionados con pórfidos de Cu-Mo-Au mediante mapeo geológico y evaluación geoestadística de resultados geoquímicos de sedimentos fluviales, suelos y rocas del área Kashai en la concesión Cascas 1, provincia de Zamora Chinchipe*. Quito: UCE. <http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/22808>
- Echeveste, H., López, L., Rodríguez, M. y Recio, C. (2016). *Alteración hidrotermal en el yacimiento epitermal Manantial Espejo, macizo del deseado, Santa Cruz, Argentina*. Revista de la Asociación Geológica Argentina 73 (3), 369 – 387. <https://www.scielo.org.ar/pdf/raga/v73n3/v73n3a06.pdf>
- Feltrin, L. (2008). *Predictive modelling of prospectivity for Pb–Zn deposits in the Lawn Hill Region, Queensland, Australia*. Ore geology reviews, volume 34, Issues 3, 399-427. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2008.05.002>

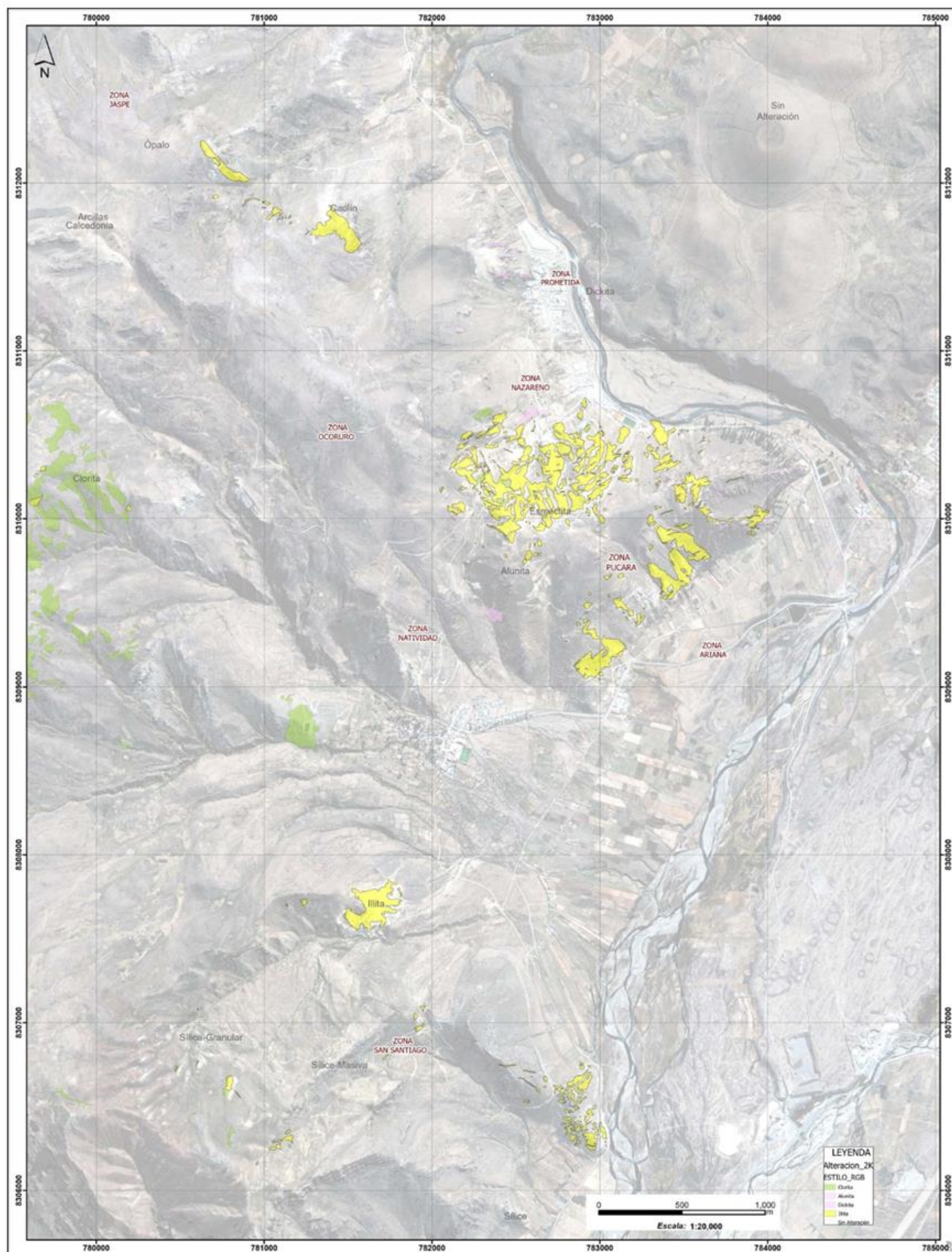
- Gamarra, R. (2010). *Cambio del sistema de explotación convencional al mecanizado en la mina Orcopampa* [Tesis, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio UNI.
- Oyarzun, R. (2011). *Introducción a la geología de minas*. Ediciones GEMM.
https://www.aulados.net/GEMM/Libros_Manuales/Libro_Geologia_Minas.pdf
- Reed, A. & Cannel, J. *Implicit modelling of the Bambas deposit, Peru*. ASEG Extended Abstracts, 2018:1, 1-6. https://doi.org/10.1071/ASEG2018abM3_2D
- Rodriguez, V., Sanchez, M., Chica, M. (2015). *Machine learning predictive models for mineral prospectivity: An evaluation of neural networks, random forest, regression trees and support vector machines*. Ore geology reviews, volume 71, 804-818.
<https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2015.01.001>
- Salazar, J. (2008). *Epithermal gold-telluride mineralization in the Chipmo deposit, Orcopampa district, Arequipa, Peru*. The University of Western Australia.
- Samaniego, J. (2021). *Caracterización de estructuras no aflorantes en la prolongación de una veta epitermal para prolongar la vida productiva de una mina*. [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de Ingeniería].
- Sarmiento, J. (2008). *Menas auríferas epitermales en Chipmo y Poracota, Arequipa-Perú. Inclusiones fluidas e isótopos de Plomo y Estroncio, aplicaciones para la exploración*. [Tesis de Maestría, Universidad Politécnica de Madrid y Universidad de São Paulo]. <https://app.ingemmet.gob.pe/biblioteca/pdf/TE0092.pdf>
- Sillitoe, R., Hedenquist, J. (2005). *Linkages between volcanotectonic settings, ore-fluid compositions, and epithermal precious metal deposits*.
<https://doi.org/10.5382/SP.10.16>
- Villón, C. (2011). *Geología del yacimiento Chipmo* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio UNI.

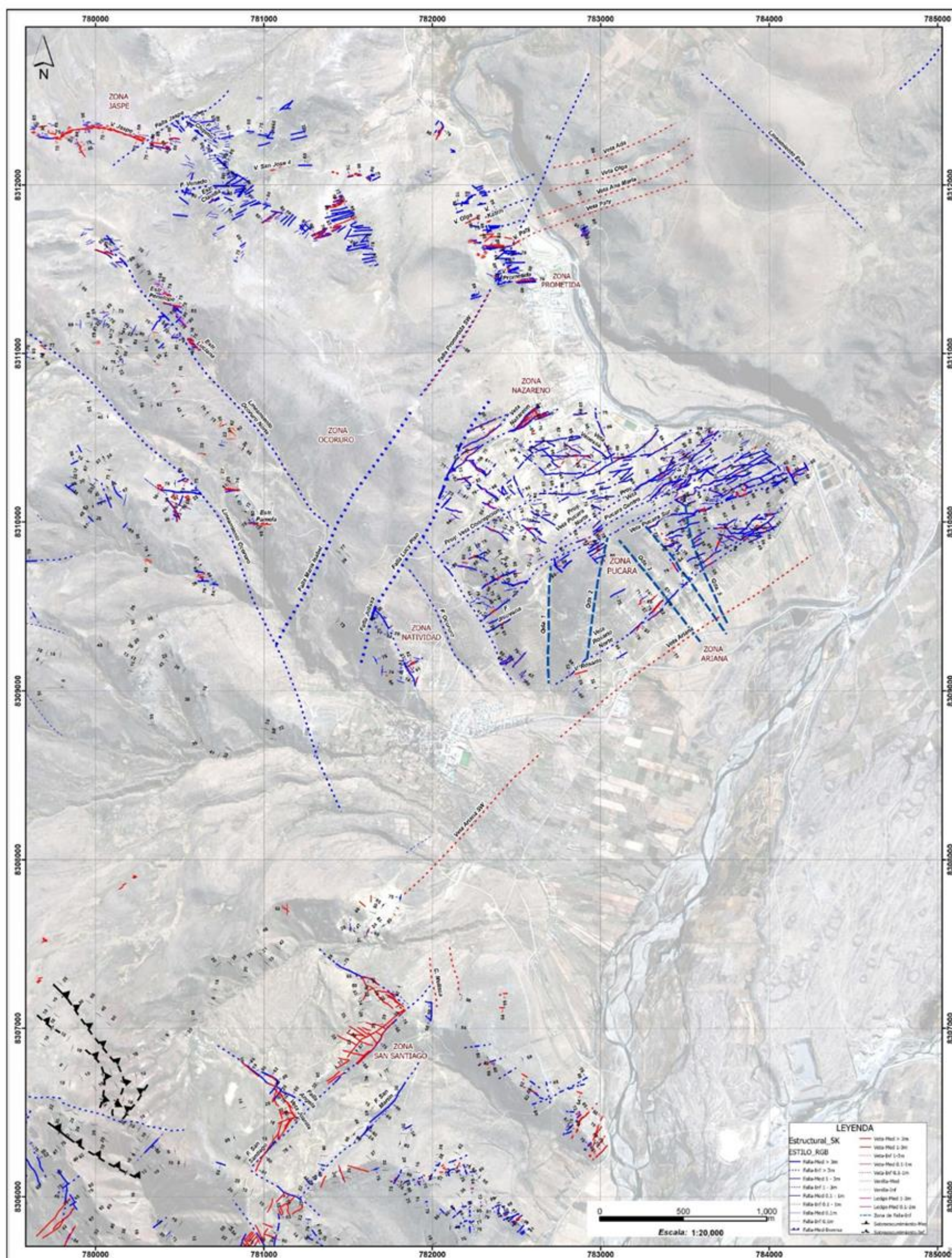
Anexos

	Pág.
Anexo 1: Plano litológico superficie.....	1
Anexo 2: Plano alteraciones hidrotermales superficie.	2
Anexo 3: Plano estructural superficie.....	3
Anexo 4: Plano de arcillas superficie.	4
Anexo 5: Plano geoquímica_Au superficie.....	5
Anexo 6: Plano geoquímica_Ag superficie.....	6
Anexo 7: Plano geoquímica_Te superficie.	7

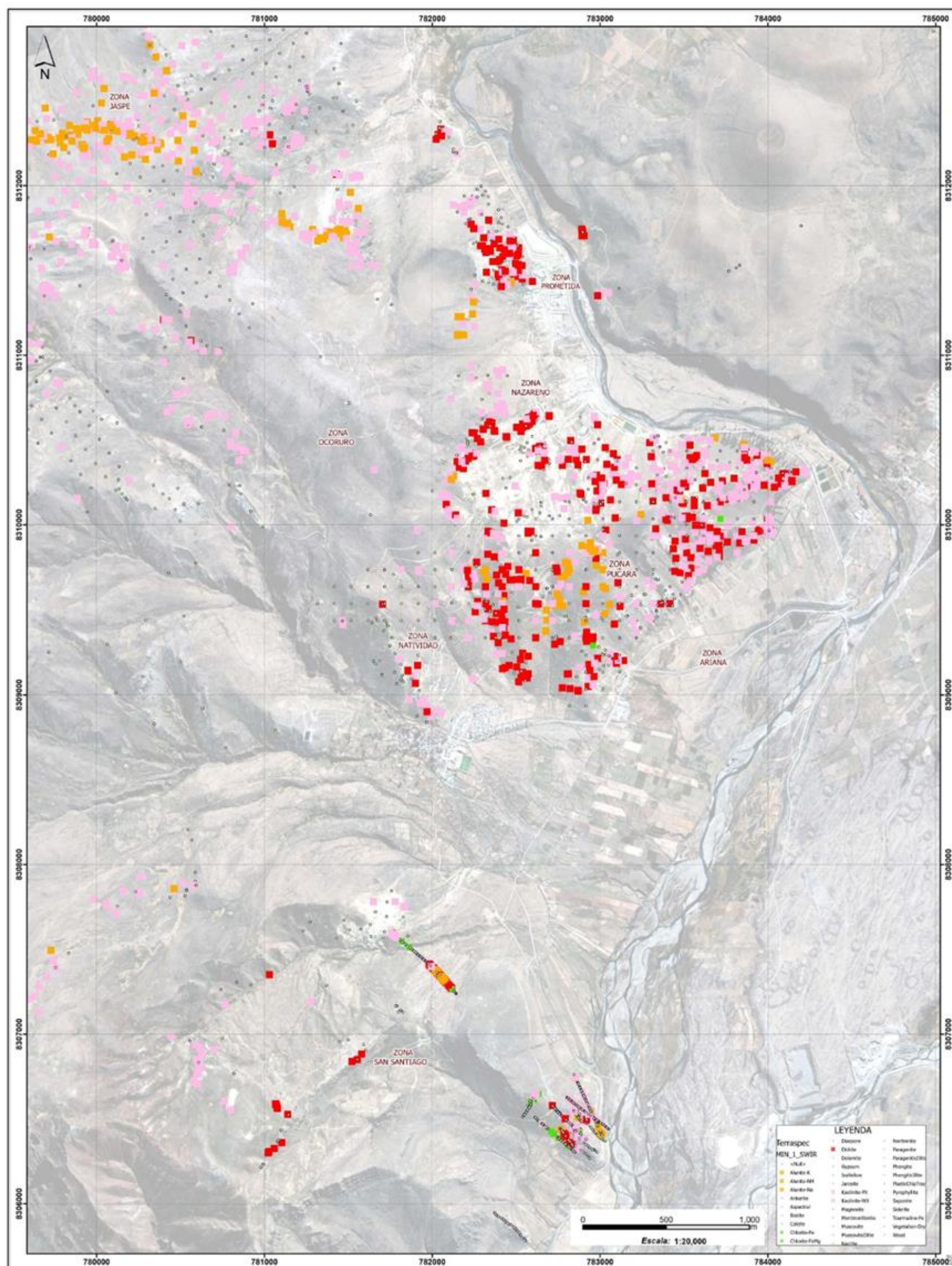
[illegible]

Anexo 2: Plano alteraciones hidrotermales superficie.





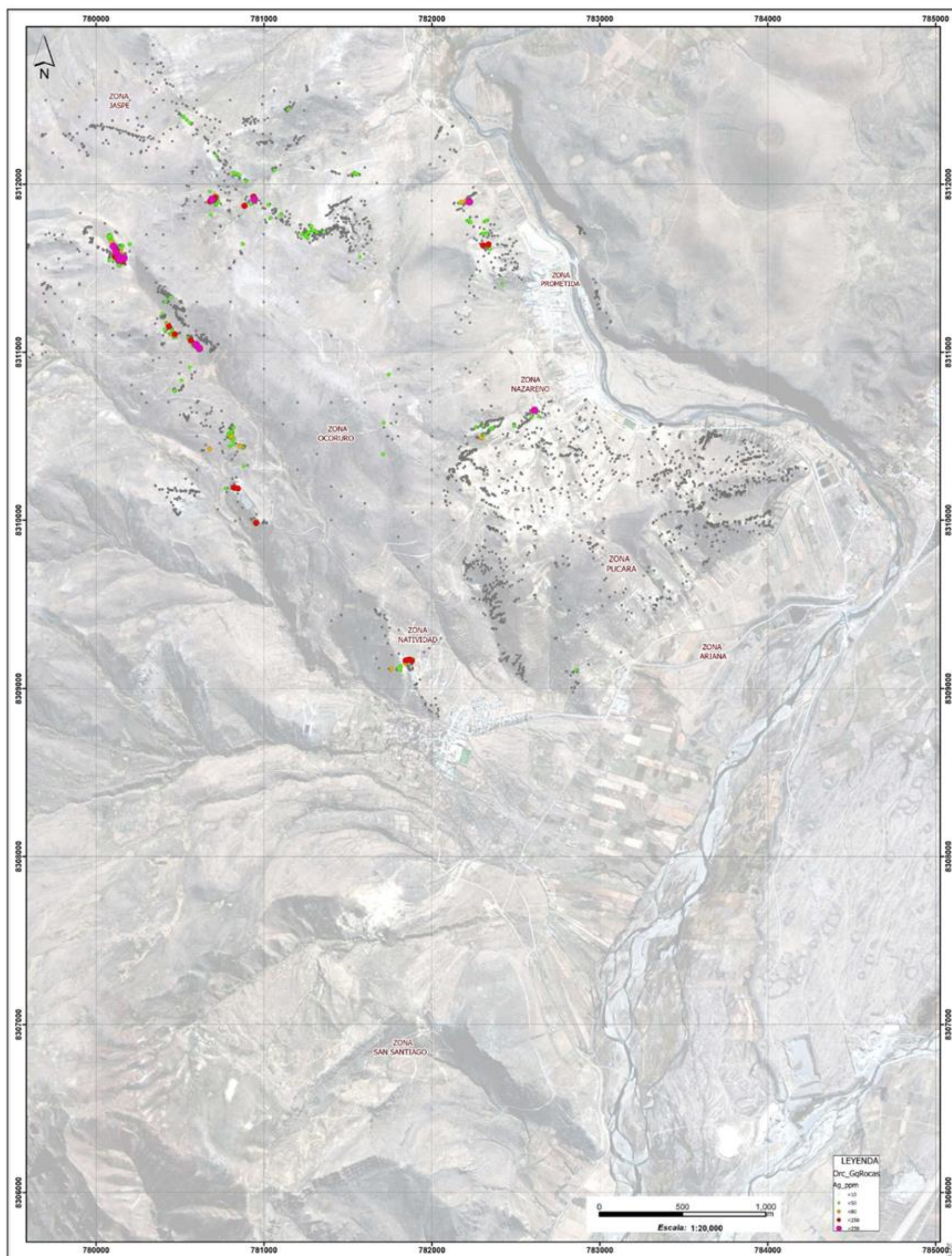
Anexo 4: Plano de arcillas superficie.



5



Anexo 6: Plano geoquímica_Ag superficie.



Anexo 7: Plano geoquímica_Te superficie.

