

Reconstrucción estratigráfica del depósito Antamina usando geoquímica, Machine Learning, drones y modelamiento implícito

Categoría: Investigación y Tecnología Minera

Ángel Ríos Espinoza¹, David Velazco Infante², Rosa Palacios Ancajima³

¹ Compañía Minera Antamina, Av. EL Derby 055, Surco, Lima, Perú (arios@antamina.com, ariosgeo@gmail.com)

² Compañía Minera Antamina, Av. EL Derby 055, Surco, Lima, Perú (dvelazco@antamina.com, da_velazco@hotmail.com)

³ Compañía Minera Antamina, Av. EL Derby 055, Surco, Lima, Perú (ropalacios@antamina.com, rosapalacios.ancajima@gmail.com)

RESUMEN

Antamina es un depósito polimetálico de cobre, zinc, plata, plomo, molibdeno y oro ubicado en el departamento de Ancash, Perú, sobre 4,000 m de elevación. El depósito se formó por la intrusión de stocks, de composición principalmente cuarzo-monzonítica, en las formaciones Jumasha y Celendín, lo que generó el desarrollo de un skarn gigante de aproximadamente 3.0 km de largo por 1.5 km de ancho.

La formación Jumasha está compuesta principalmente por calizas, mientras que la formación Celendín está compuesta por calizas, margas y limolitas, además de múltiples gradaciones entre estas rocas, por lo que diferenciarlas en el proceso de logeo resulta frecuentemente difícil.

Se han perforado más de un millón de metros de sondajes diamantinos, habiéndose obtenido cerca de 400,000 muestras analizadas por ICP, entre cuyos elementos se encuentra el calcio.

El 18% de estas muestras presentan leyes de calcio truncadas en 15%, 20%, 25% y 30%, que son los límites superiores de los rangos de lectura establecidos por los diferentes métodos y laboratorios empleados en la historia de Antamina, métodos cuya configuración de digestión de las muestras solo afectan a los carbonatos y sulfatos, mas no a los silicatos.

Tomando en consideración que las rocas encajonantes de Antamina son calizas, margas y limolitas, es de esperarse que las leyes de calcio puedan alcanzar e incluso superar el valor de 40%. Sin embargo, más del 60% de las muestras obtenidas de estas rocas, y sus equivalentes metamórficos, reportan leyes truncadas en alguno de los valores indicados líneas arriba.

Se recurrió a técnicas de Machine Learning para predecir estas leyes, empleándose la técnica de

clasificación llamada árbol de decisiones. Se establecieron relaciones entre las leyes de calcio y las de los siguientes elementos: aluminio, bario, cobalto, cromo, hierro, potasio, magnesio, manganeso, sodio, níquel, fósforo, estroncio, titanio, vanadio y wolframio.

Analizando de forma espacial la información geoquímica, principalmente de calcio (leyes leídas y predichas), además de hierro y fósforo, resultantes de los ensayos de las muestras de sondajes y pozos de voladura, junto a las mallas texturadas 3D generadas fotogramétricamente a partir de las imágenes tomadas con un dron, los autores han logrado diferenciar los variados niveles estratigráficos utilizando técnicas de modelamiento implícito.

Adicionalmente, para el modelo de recursos, se ha podido estimar la ley de calcio utilizando en conjunto los valores leídos y los predichos.

1. Introducción

Antamina es una de las minas de cobre zinc más grandes del mundo, cuyo inventario de recursos minerales está basado en la correcta interpretación del modelo geológico, construido a partir de la descripción geológica de los testigos de los sondajes diamantinos.

A julio del 2019 se tenían más de un millón de metros de testigos de sondajes diamantinos, ensayados por 43 elementos, en los cuales se han descrito 179 variedades litológicas clasificadas según los componentes mineralógicos, tamaño de grano de los granates y grado de brechamiento. Con estas variedades hasta el año 2019 se habían interpretado 5 unidades litológicas principales, mostradas en la Figura 1, las cuales fueron divididas en 20 dominios litológicos usados en la estimación de recursos.

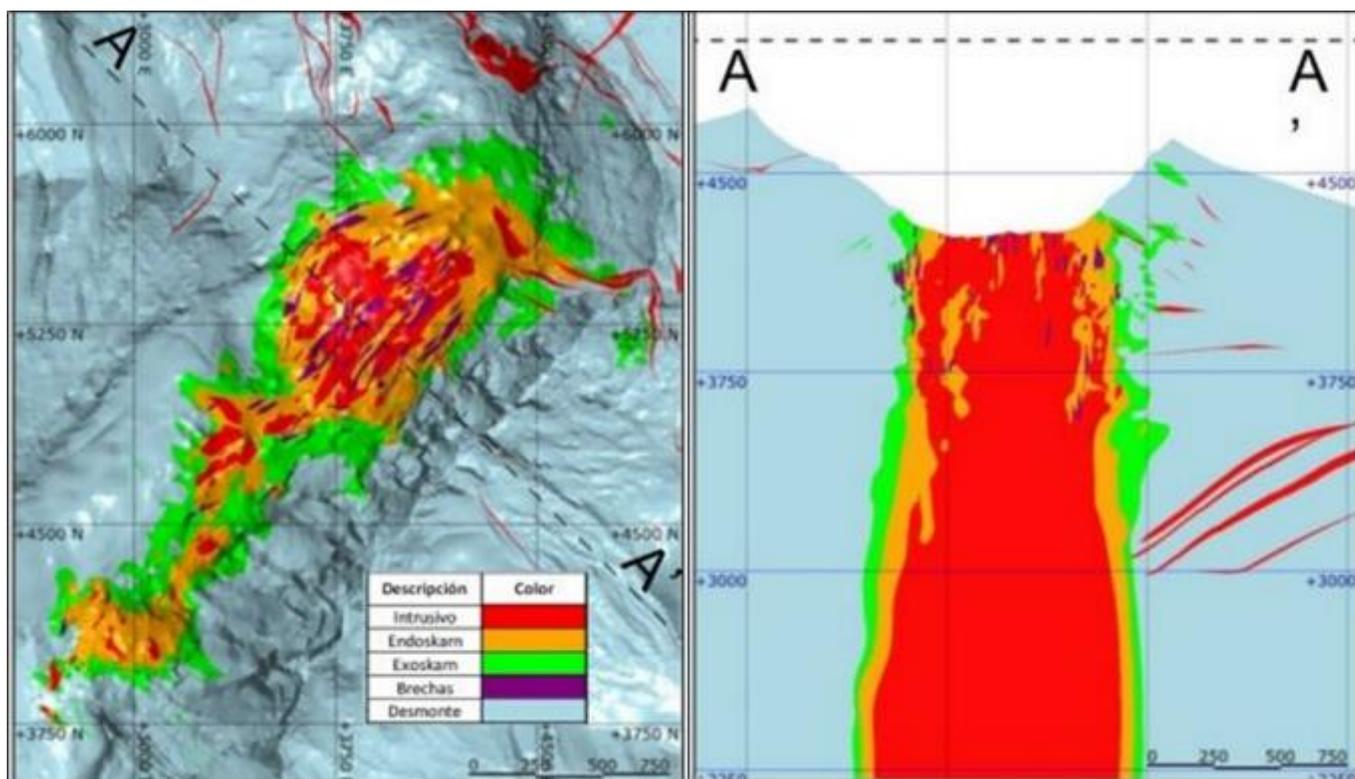


Figura 1: Vista en planta y sección vertical del Modelo Geológico 2019

Se han hecho varios estudios geológicos en el distrito de Antamina tratando de identificar la estratigrafía del área. Geólogos de BISA en el año 2015 hicieron un modelo geológico estructural sobre un área de 30 km de largo por 20 km de ancho con el tajo Antamina al centro. Este modelo, basado en mapeo geológico a escala 1:25,000, fotointerpretación y construcción de

secciones tipo ubicadas en diferentes puntos del distrito, incluía la división entre las diferentes formaciones.

La Figura 2, muestra la geología distrital de Antamina interpretada por BISA el 2015 y modificada por Rios el 2022.

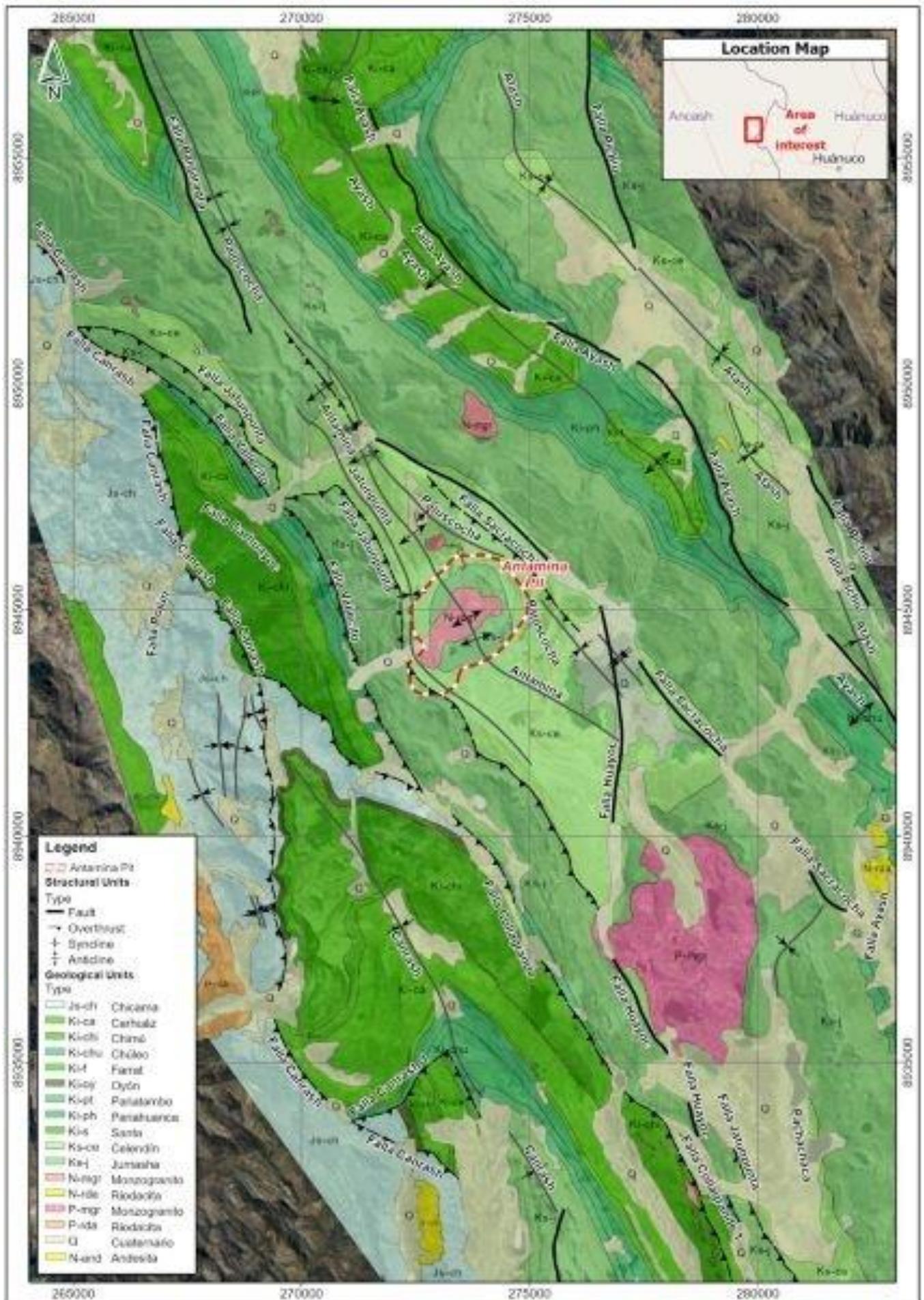


Figura 2: Vista en planta de la geología distrital de Antamina

2. Objetivos

Desarrollar un modelo estratigráfico a escala del tajo, inexistente hasta el año 2016, con la finalidad de que este sea usado para establecer los dominios geotécnicos y que posteriormente también sea usado en la estimación de recursos.

Incluir un nuevo dominio litológico, que represente a las margas y limolitas, para la estimación de recursos.

Mejorar la estimación de la ley de calcio en los recursos minerales de Antamina.

3. Datos

Mas de un millón de metros de sondajes con litología y leyes.

Mas de un millón de pozos de voladura con litología y leyes.

Mas de mil hectáreas de mallas texturadas 3D de los bancos de minado.

Imágenes LIDAR tomadas el año 2012 del área de Antamina.

Medidas de estratificación tomadas en campo.

Desde el punto de vista litológico el intervalo menor de logueo es un metro y contiene una roca primaria y podría contener una roca secundaria.

Los intervalos litológicos culminan cuando hay un cambio de roca primaria o roca secundaria.

El intervalo de muestreo puede ser como mínimo un metro y máximo tres metros dentro de una única roca primaria. Las muestras son enviadas a un laboratorio externo cuyos resultados son reportados aproximadamente tres semanas después.

Se ha utilizado un software de modelamiento geológico para hacer el análisis espacial de cada uno de los 43 elementos, inicialmente sin discriminar por unidades litológicas y filtradas posteriormente por grupos de unidades litológicas. Para desplegar las leyes se usaron siempre leyendas continuas del tipo friocalor y muchas veces fue necesario cambiar los valores mínimos y máximos de alguna leyenda para resaltar los cambios en leyes por grupos de unidades litológicas.

Se ha utilizado un software de fotogrametría para procesar las imágenes tomadas con los drones.

Se ha utilizado un software de Machine Learning para la predicción de las leyes de calcio.

4. Desarrollo

Desde el año 2011, cuando se cambió el modelamiento explícito por el modelamiento implícito como procedimiento para construir el modelo geológico de Antamina, numerosas mejoras se han implementado de manera continua para mejorar la calidad de este.

La Figura 3 muestra cómo se desarrolló este proceso a través del tiempo.

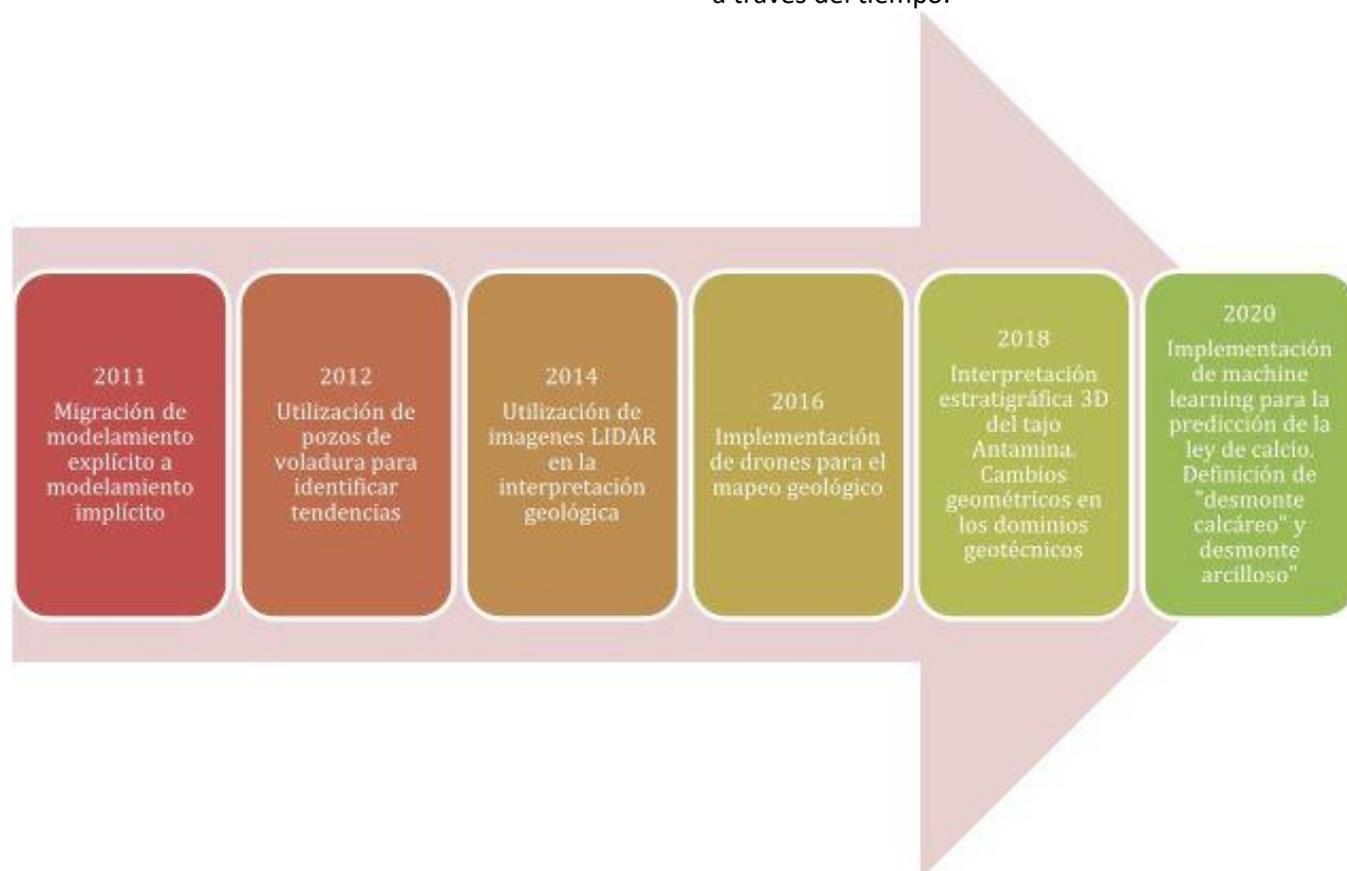


Figura 3: Evolución del modelo geológico de Antamina

3.1. Diferenciación entre calizas y margas

Para poder identificar el posible contacto entre las formaciones Jumasha y Celendín fue necesario reevaluar los tipos de rocas sedimentarias mapeadas en Antamina, ya que, si bien se tenían muchos metros de testigos registrados como caliza en diferentes variedades, no se disponía de testigos registrados como marga. Esto hizo necesario desarrollar un procedimiento basado en leyes para poder diferenciar entre estas dos rocas, teniendo en cuenta la gradación que incluye caliza margosa, caliza arcillosa y marga calcárea. Se usaron principalmente las leyes de calcio, hierro y fósforo, provenientes del análisis geoquímico ICP que se practica en todas las muestras provenientes de los taladros de perforación.

Se ha considerado la propuesta hecha por Füchtbauer en 1959 para la división ternaria de las rocas sedimentarias según la proporción de carbonatos, arcillas y arenas.

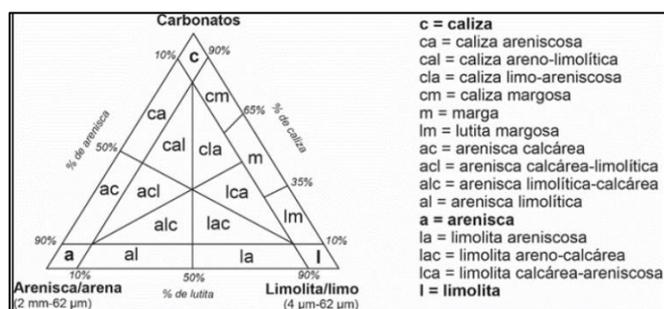


Figura 4: Clasificación de rocas (Füchtbauer 1959)

Debido a esta situación, se usaron las leyes provenientes del análisis geoquímico ICP que se practica en todas las muestras provenientes de los taladros de perforación diamantina como datos objetivos para identificar y diferenciar las gradaciones entre calizas, margas, limolitas y lutitas.

Considerando que hay poca dolomita (bajos valores de magnesio) en las rocas sedimentarias, se ha utilizado el calcio (Ca) como indicador de la cantidad de calcita y ausencia de arcillas bajo las consideraciones descritas en la Figura 5.

Roca	CaCO ₃	Arcillas	ICP Calcio
Caliza	100%	0%	40%
Marga	65%	35%	26%
Limolita/Lutita	35%	65%	14%
	0%	100%	0%

Figura 5: Ley de calcio por roca sedimentaria

Con estas proporciones podemos concluir que los intervalos con leyes de calcio sobre 25% corresponden a caliza o su equivalente metamórfico, mármol; mientras que los intervalos con leyes de calcio bajo 25% corresponden a margas, limolitas, lutitas o sus equivalentes metamórficos, hornfels.

3.2. Predicción de la ley de calcio

Aproximadamente el 20 % de las muestras analizadas hasta julio 2020 tienen valores de calcio truncados en 4 límites de rango que son 15%, 20%, 25% y 30% establecidos por diferentes métodos de análisis y laboratorios. Sin embargo, este porcentaje de valores truncados es de 66% en muestras correspondientes a unidades litológicas del desmonte.

Se han desarrollado árboles de decisiones estableciendo relaciones entre el calcio y los elementos aluminio, bario, cobalto, cromo, hierro, potasio, magnesio, manganeso, sodio, níquel, fósforo, estroncio, titanio, vanadio y wolframio.

Un árbol de decisiones es un modelo de predicción utilizado en diversos ámbitos que van desde la inteligencia artificial hasta la economía. Dado un conjunto de datos se fabrican diagramas de construcciones lógicas, muy similares a los sistemas de predicción basados en reglas, que sirven para representar y categorizar una serie de condiciones que ocurren de forma sucesiva para la resolución de un problema.

Se desarrollaron cuatro árboles de decisiones. El primero fue desarrollado estableciendo la relación entre los valores de calcio leídos sobre 30% y los elementos indicados anteriormente. Con este árbol se predijo aquellos valores truncados en 30%.

Para predecir los valores de calcio truncados en 25%, se desarrolló un segundo árbol de decisiones estableciendo la relación entre los valores de calcio leídos sobre 25% más los valores de calcio predichos con el primer árbol con los elementos indicados anteriormente. Con este segundo árbol se predijeron los valores de calcio truncados en 25%.

Para predecir los valores de calcio truncados en 20%, se desarrolló un tercer árbol de decisiones estableciendo la relación entre los valores de calcio leídos sobre 25% más los valores de calcio predichos con el primer y segundo árbol con los elementos indicados anteriormente. Con este tercer árbol se predijeron los valores de calcio truncados en 20%.

Para predecir los valores de calcio truncados en 15%, se desarrolló un cuarto árbol de decisiones estableciendo la relación entre los valores de calcio leídos sobre 25% más los valores de calcio predichos con el primer, segundo y tercer árbol con los elementos

indicados anteriormente. Con este cuarto árbol se predijeron los valores de calcio truncados en 15%.

La

Figura 6 muestra el flujo de trabajo para predecir los valores de calcio truncados.

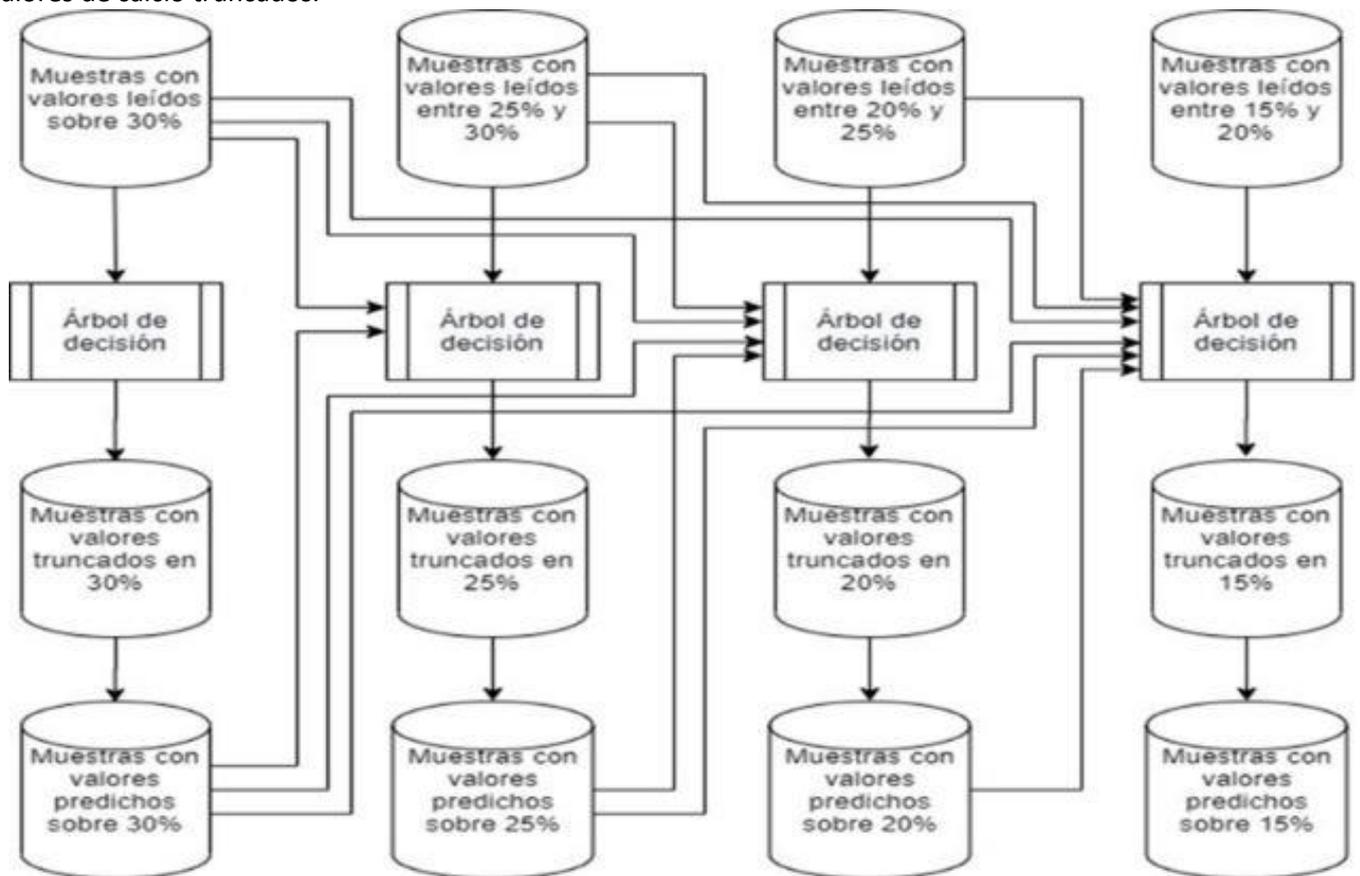


Figura 6: Diagrama de flujo en la predicción del calcio

La Figura 7 muestra en el eje X los valores reales de calcio leídos arriba del valor indicado mientras que en el eje Y se muestran los valores predichos según cada árbol de decisión construido.

3.3. Fotogrametría con drones

Desde el año 2016 Antamina utiliza drones para realizar el mapeo geológico de los bancos de minado. Para ello se han utilizado drones desde los cuales se tomaron fotografías a las caras de los taludes y mediante fotogrametría se generaron las mallas texturadas 3D (superficies tridimensionales con imágenes superpuestas) de los bancos del tajo.

Este proceso parte con la captura de varias imágenes traslapadas con sus respectivas coordenadas del punto de toma; en el software de fotogrametría se realiza la identificación y coincidencias automáticas de cientos de puntos clave en las imágenes a partir de la cual se genera una nube de puntos a partir de la cual se genera una malla texturada 3D georreferenciada.

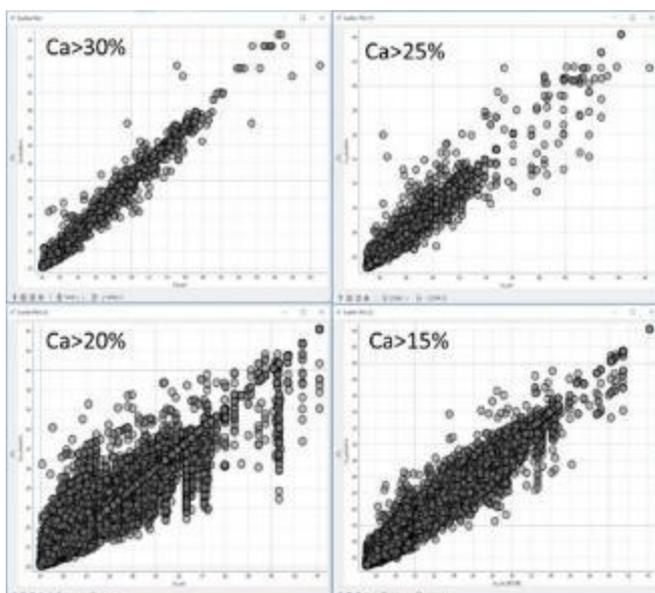


Figura 7: Gráficos de dispersión de la predicción de calcio a diferentes rangos

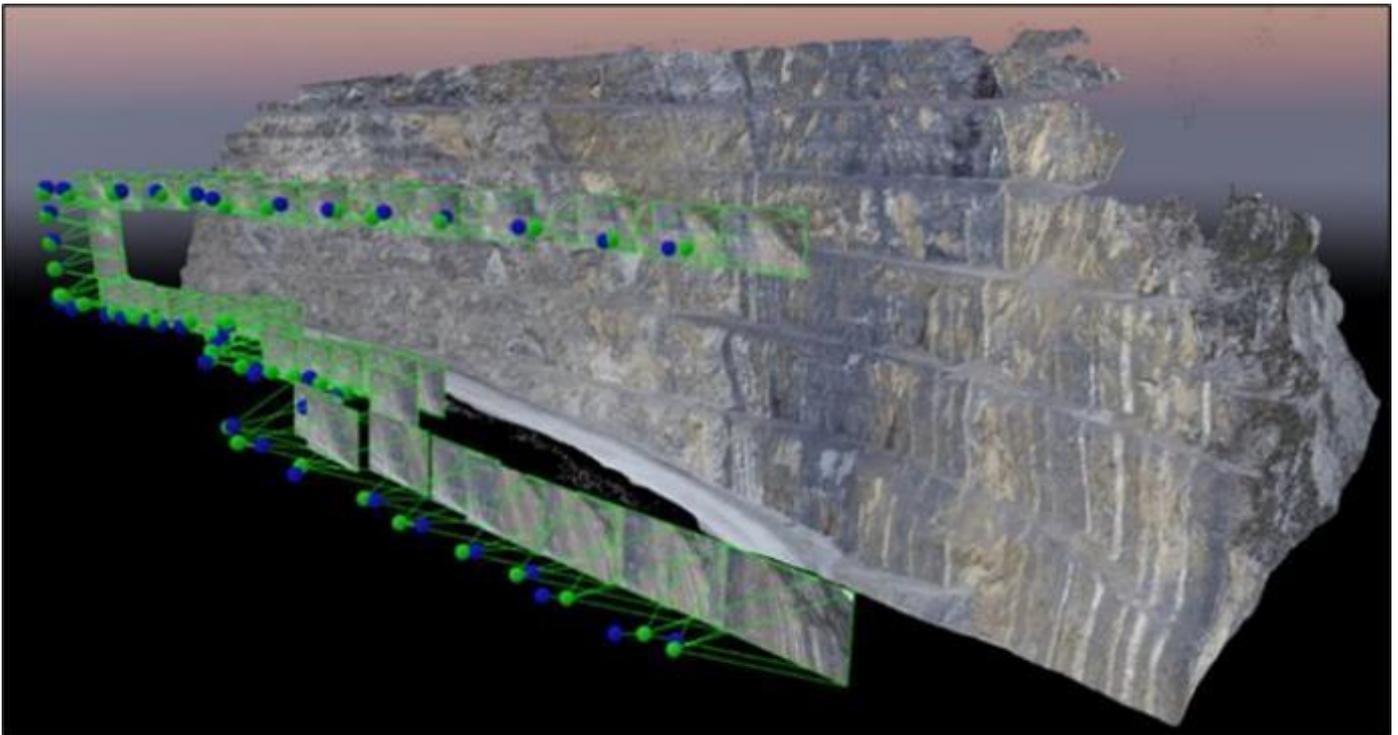


Figura 8: Generación de la malla texturada 3D georeferenciada a partir de fotografías tomadas con un dron

Este proceso de mapeo geológico con drones ha demostrado a través de los años ser más seguro, eficiente y rápido que el proceso empleado anteriormente que implicaba que un geólogo esté todos los días en el tajo mapeando de manera manual.

3.4. Modelamiento Implícito

El modelamiento implícito se refiere a la creación de superficies definidas por funciones matemáticas y reglas geológicas que tienen en cuenta las relaciones estructurales y estratigráficas.

El nombre se deriva del hecho de que las superficies modeladas, como contactos litológicos, superficies de falla esbozadas o superficies isovalóricas, representan isopotenciales de funciones volumétricas continuas. Por lo tanto, la superficie que se modela no se define explícitamente mediante la digitalización de todos los vértices de triangulación, sino que está implícita en la función volumétrica, que generalmente solo se define

mediante una pequeña cantidad de puntos de control. Las superficies simplemente se evalúan y guardan como triangulaciones de esta función de volumen.

Se utilizaron las leyes de hierro y calcio para interpretar el contacto entre las formaciones Jumasha y Celendín.

La Figura 9 muestra una vista al norte del tajo Antamina e ilustra: (a) la Formación Celendín que tiene en promedio 2% en hierro mientras que la formación Jumasha tiene en promedio 1.3% en hierro. (b) la formación Celendín contiene muchos intervalos con valores menores a 20% en calcio, lo que indica la presencia de margas y limolitas o lutitas mientras que en la formación Jumasha la gran mayoría de intervalos tienen valores de calcio superiores a 25% lo que corresponde a calizas. (c) interpretación de dos sobrescurrimientos que son parte de la falla Jatunpunta y la interpretación del contacto entre las formaciones Jumasha y Celendín.

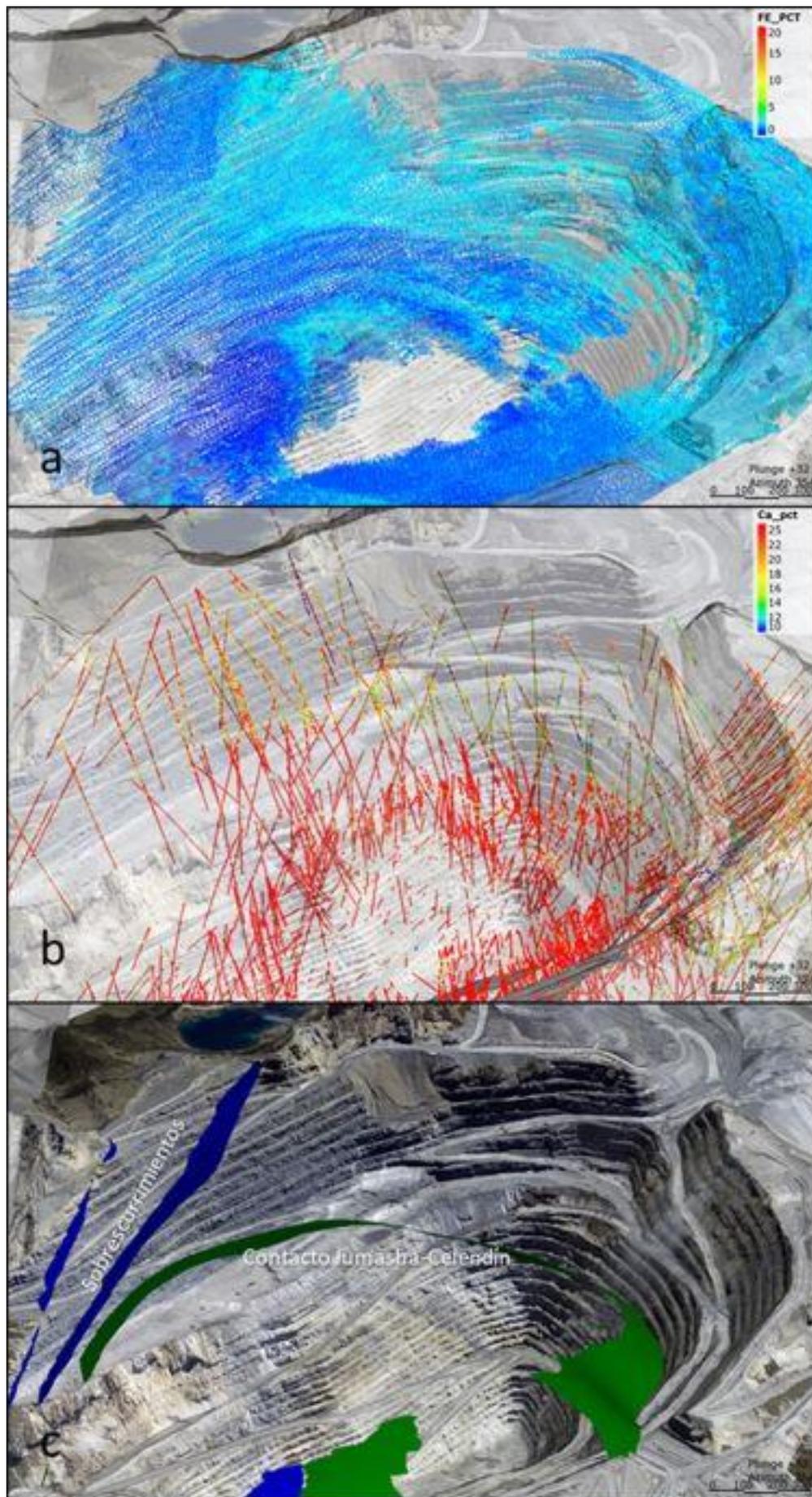


Figura 9: Vista al Norte del tajo. (a) Hierro en pozos de voladura; (b) Calcio en taladros; (c) Interpretación del contacto Jumasha-Celendín y sobrescurrimientos

Con los valores leídos y predichos para el calcio se interpretaron las secuencias de calizas dentro de la Formación Celendín y las secuencias de margas dentro de la Formación Jumasha tal como se puede ver en la Figura 10.

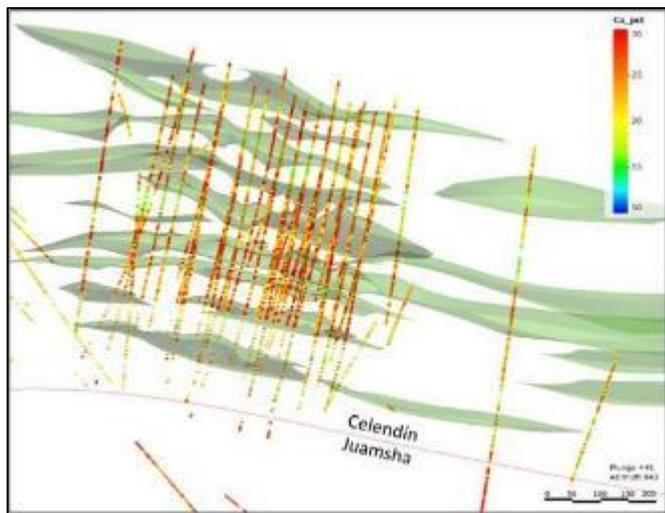


Figura 10: Estratos de caliza dentro de la Formación Celendín

Con este procedimiento se dividió la unidad geológica “desmorte” modelada hasta el año 2019 (Figura 1) en dos unidades: “desmorte calcáreo” y desmorte “arcilloso” tal como se puede apreciar en la Figura 11.

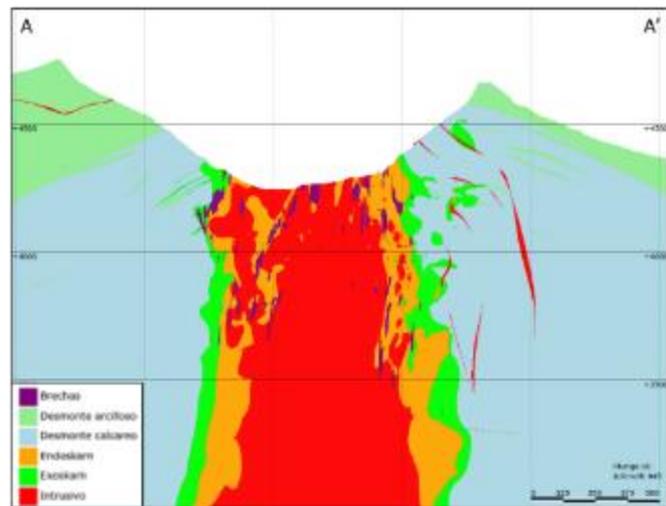


Figura 11: Sección vertical del Modelo Geológico 2020

4. Presentación y discusión de resultados

Con el uso de todas las herramientas descritas anteriormente se ha construido un modelo geológico mas robusto, acorde con la estratigrafía descrita en el área de Antamina y que además da mayor soporte en la estimación de recursos. La Figura 12 muestra como la disposición del exoskarn en el extremo NE del depósito es concordante con la disposición de los estratos de las formaciones Celendín y Jumasha. También puede verse que los cuerpos ígneos ubicados en el sector SW, zona conocida como Usupallares se disponen como hasta cierto punto siguiendo también la estratificación.

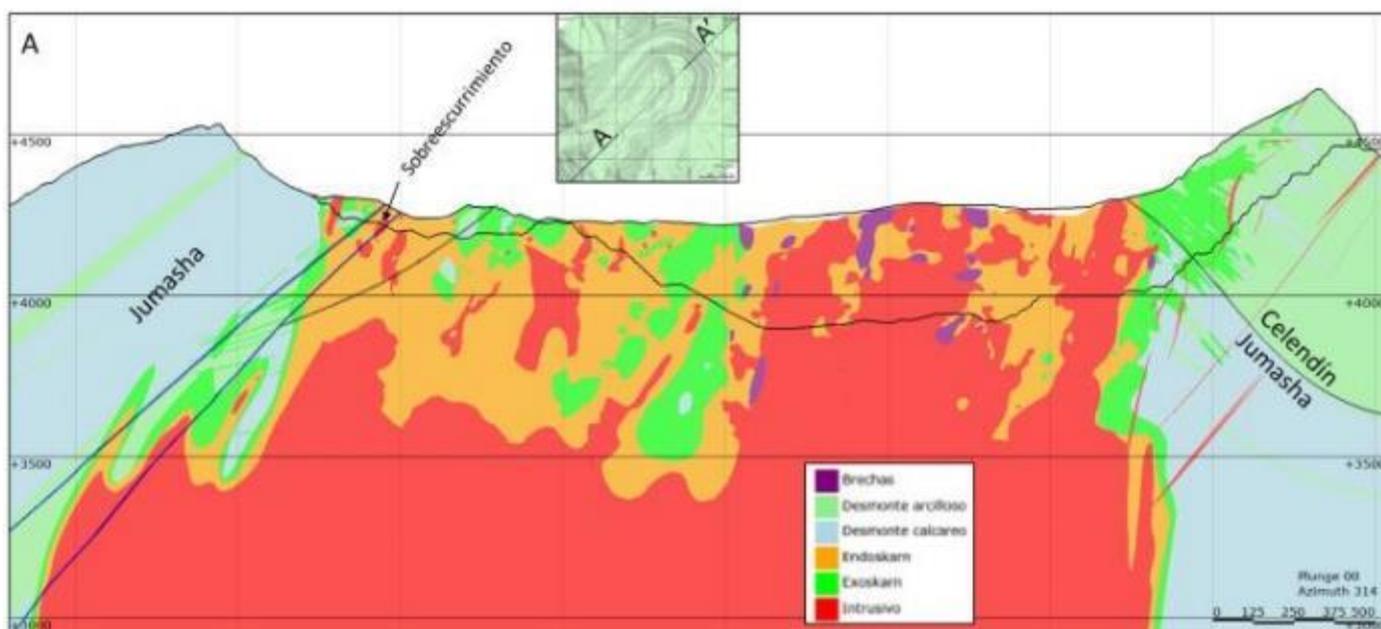


Figura 12: Sección longitudinal del depósito Antamina

5. Conclusiones

El desarrollo de este procedimiento para identificar las formaciones sedimentarias no implicó gastos adicionales ya que se usaron las leyes disponibles.

La interpretación de la secuencia sedimentaria generó una reinterpretación de los dominios geotécnicos del tajo.

La interpretación de la secuencia sedimentaria es usada para los nuevos proyectos de infraestructura de Antamina.

Las formaciones sedimentarias pueden ser usadas como dominios de estimación de recursos minerales.

Este procedimiento de identificar las formaciones mediante el uso de las leyes puede ser útil como herramienta de exploración para nuevos depósitos.

Agradecimientos

A Compañía Minera Antamina por permitirme difundir este trabajo

Referencias

Ríos, A. 2013. Modelo Geológico Implícito de Antamina. ProExplo 2013.

Perfil profesional

Geólogo (MAusIMM, CIP) con más de 20 años de experiencia en todo el ciclo minero, desde la exploración para oro, plata y metales básicos, modelamiento geológico implícito y estimación de recursos y reservas, hasta la planificación, desarrollo, producción y reconciliación de operaciones mineras. Reconocida experiencia en el desarrollo de innovadoras soluciones aplicadas en la geología y la minería.

Ángel Ríos Espinoza

Geólogo Sénior

Compañía Minera Antamina

arios@antamina.com

+51-998-491-101

Av. El Derby 055, Oficina 801, Surco, Lima, Perú

Perfil profesional

David Velazco Infante es titulado de la carrera de Ingeniería de Sistemas de la Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC) y cuenta con un MBA (PUCP). Además, ha cursado estudios de post grado en Perú, España y USA. Cuenta con más 15 años de experiencia laboral en el sector minero. Antes de Antamina, trabajó en la Compañía Minera Condestable, Petroperú, Pan American Silver, entre otras empresas.

David Velazco Infante

Administrador Sénior de Base de Datos

Compañía Minera Antamina

dvelazco@antamina.com

968003912

Av. EL Derby 055, Surco, Lima, Perú

Perfil profesional

Bachiller en Ingeniería Geológica, egresada de la Universidad Nacional de Piura. Con experiencia en mecánica de suelos, geotecnia, con conocimientos en estimación de recursos de elementos como el zinc, hierro, calcio y azufre

Rosa Palacios Ancajima

Practicante de Geología

Compañía Minera Antamina

ropalacios@antamina.com

+51-974-514-706

Av. EL Derby 055, Surco, Lima, Perú