

PATRÓN GEOQUÍMICO COMO DISCRIMINANTE DEL SKARN Y LAS ROCAS ENCAJONANTES
MEDIANTE ANALIZADOR PORTÁTIL DE XRF EN ANTAMINA

Para: Comisión Evaluadora de Trabajos Técnicos – Categoría: Exploraciones y Geología –
Código: TT – 338 - PERUMIN 35 Convención Minera.

De: Ing. Jimy Sánchez Mayuntupa
Geólogo Staff
Compañía Minera Antamina S.A.
Telf. 01-2173000, anexo 4649
jsanchezm@antamina.com

Ing. Raúl Parra Solórzano
Geólogo Jefe de Core Shack
Compañía Minera Antamina S.A.
Telf. 01-2173000, anexo 3776
rparra@antamina.com

Resumen

El yacimiento de Antamina es un depósito tipo skarn que produce concentrados de cobre, zinc, molibdeno, plata y plomo, formado por la intrusión de stocks, principalmente cuarzo - monzoníticos, emplazados en rocas sedimentarias que incluyen calizas, margas y limolitas de las formaciones Jumasha y Celendín. Como resultado de este proceso se ha generado un skarn gigante de aproximadamente 3 km de largo por 1.5 km de ancho.

En cuanto a la litología, el yacimiento skarn tiene rocas de distintas variedades por su complejidad en el proceso de alteración hidrotermal, lo que hace difícil el reconocimiento visual durante el logueo geológico del Endoskarn y Exoskarn. Los resultados de la interpretación geoquímica permitieron definir el patrón geoquímico como discriminante del skarn y las rocas encajonantes mediante el analizador portátil de XRF, diferenciar la roca Endoskarn y Exoskarn en el yacimiento, usando elementos de baja movilidad, como el Ti y Zr (Figura 9), y relacionar el Ti y Zr en las rocas carbonatadas de las formaciones Jumasha y Celendín para definir el metalotéctico favorable (Figura 7).

El estudio se inicia con el analizador portátil de fluorescencia de rayos X (XRF) calibrado por el fabricante; luego se realiza pruebas con muestras del yacimiento en diferentes tiempos, lo cual permitió elegir un tiempo entre 20 y 45 segundos para Endoskarn y Exoskarn, con mejores resultados de Ti y Zr (Figura 2 y 3). Las lecturas en las muestras son tomadas en un área de 10 cm a 15 cm en una cara plana, con círculo de 2 cm de radio, siendo necesario tomar cuatro lecturas, aunque para el proceso se considera el valor promedio (Figura 4).

La investigación permitió identificar dos elementos, Ti y Zr, cuya baja movilidad durante la alteración hidrotermal y formación de calcosilicatos les permite jugar el rol de discriminantes geoquímicos. Estos elementos suelen mostrar valores más altos en los intrusivos y el Endoskarn (mayores a 1000 ppm y 60 ppm, respectivamente, con lecturas entre 20 y 45 segundos, mientras que en el Exoskarn los valores tienden a ser menores a 1000 ppm y 60 ppm, respectivamente (Figura 9).

Se ha observado que valores de Ti mayores a 1000 ppm y de Zr mayores a 60 ppm, con lecturas entre 20 a 45 segundos, se correlacionan mejor con las rocas clásticas de la Formación Celendín, mientras que valores bajos menores a 1000 ppm de Ti y 60 ppm de Zr tiene buena correlación con las calizas de la Formación Jumasha (Figura 7).

En conclusión, se definió que el Endoskarn tiene menor extensión, con valores altos de Ti y Zr, mientras que el Exoskarn tiene mayor extensión con valores bajos de Ti y Zr (Figura 13).

I. Introducción

Antamina está ubicada en el distrito de San Marcos, provincia de Huarí, en la Región Ancash, a 200 km de la ciudad de Huaraz y a una altitud promedio de 4,300 m snmm¹.

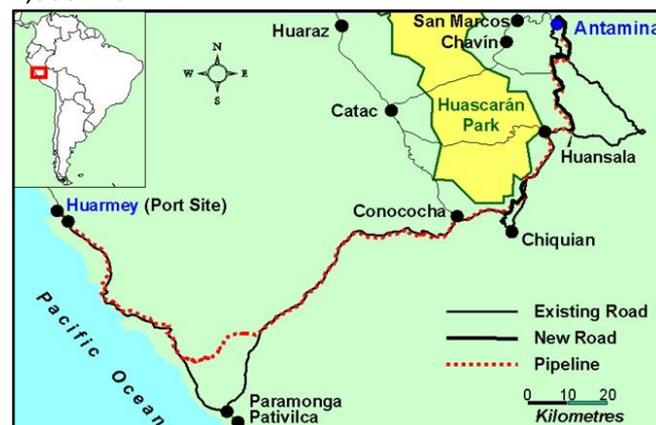


Figura 1: Plano de ubicación del yacimiento Skarn de Antamina
Fuente: Departamento de Geología de CM Antamina (2008)

El presente trabajo se basa en la interpretación geoquímica de los datos obtenidos mediante un analizador portátil de XRF para definir elementos químicos que puedan ser utilizados como guías geoquímicas para la identificación confiable de las variedades de skarn durante el logueo geológico.

Durante la formación de skarn se presenta alteración parcial o total de las rocas preexistentes, lo cual dificulta su identificación visual, porque no se aprecian diferencias mineralógicas y texturales significativas para su reconocimiento. Según Meinert et al., (2005), la mayoría de los depósitos de skarn están dominados por Exoskarn, con solo cantidades minoritarias de Endoskarn.

El uso del analizador portátil de XRF permitió obtener de manera rápida datos geoquímicos del Ti y Zr confiables para la interpretación, ya que los datos obtenidos en el laboratorio no son suficientemente representativos, porque son parcialmente reportados al utilizar el método de digestión por agua regia, que no disuelve por completo a los minerales que los contienen.

Según Maher. K, (2019) Los ensayos dan una idea de diferencias de geoquímica entre intervalos de rocas

¹ snmm: sobre el nivel medio del mar.

en testigos de perforación. El uso de ensayos del laboratorio en el análisis de la geoquímica de rocas en Antamina es limitado por varios factores: 1) el método de digestión, 2) efecto de alteración hidrotermal, 3) precisión del análisis del laboratorio, y 4) aspectos de composición/variación litológica en intervalos de ensayos.

Según, Meinert, 1997; Meinert et al, 2005; Chang y Meinert, 2008b. El Endoskarn es una parte integral del patrón de zonificación, y su identificación precisa tiene importantes implicancias prácticas para la exploración, la geología de la mina y la metalurgia, para lo cual los patrones mineralógicos de zonificación alrededor de la intrusión son las herramientas más importantes

II. Objetivos

2.1 Generales

Demostrar el patrón geoquímico Ti-Zr como discriminante del skarn y las rocas encajonantes mediante el analizador portátil de XRF.

2.2 Específicos

1.- Diferenciar la roca Endoskarn y Exoskarn del yacimiento Antamina, mediante el patrón geoquímico Ti y Zr.

2.- Relacionar el Ti y Zr con las rocas carbonatadas de las formaciones Jumasha y Celendín para definir el metalotécto favorable.

3.- Obtener resultados geoquímicos de las zonas Endoskarn y Exoskarn en menor tiempo.

4.- Definir el tiempo necesario para las mediciones con el equipo portátil de XRF.

III. Metodología

La mayor incertidumbre durante el logueo geológico se presenta con el cambio litológico entre el Endoskarn y el Exoskarn, porque no se aprecian diferencias mineralógicas y texturales significativas que permitan su identificación segura.

Al tener la dificultad en la identificación visual de las rocas de Endoskarn y Exoskarn durante el logueo geológico, con ciertas discrepancias entre geólogos, se decidió revisar los datos geoquímicos del análisis por el método de digestión de agua regia reportados

por el laboratorio, los cual notamos que no se consideran adecuados para su interpretación debido a que la digestión es parcial para los minerales que contienen los elementos de interés Ti y Zr.

En el presente trabajo se hizo la interpretación de los datos geoquímicos obtenidos mediante un analizador portátil de XRF VANTA – L SERIES - SN 801928, de marca OLYMPUS (Figura 5), con el fin de encontrar elementos que puedan ser utilizados como patrones geoquímicos para la definición confiable de las variedades del skarn durante el logueo geológico.

La unidad de muestras está constituida por taladros del yacimiento de Antamina en los cuales se observaban características similares difíciles de distinguir macroscópicamente, para definir el Endoskarn y Exoskarn. (Figura 4)

La población incluyó 3,872 muestras provenientes de 55 taladros; las incluyen: Intrusivo (645), Endoskarn (1642), Exoskarn (1333), Mármol (135), caliza (22) y Hornfels (95), según el logueo geológico realizado. (Figura 6, 7 y 9).

3.1 Técnica de recolección de datos

Para la investigación se utilizaron muestras de testigos de roca de la perforación diamantina de intervalos de 3 m en promedio, aunque respetando los cambios de los contactos litológicos importantes. Las lecturas con el analizador portátil de XRF se realizaron en la cara plana, de preferencia sin venilleo ni alteración y muestras secas de taladros logueados con anterioridad (Figura 4). Se realizaron las pruebas de tiempo con el analizador portátil de XRF calibrado anticipadamente por el fabricante; luego se eligieron muestras de diferentes rocas del yacimiento (Intrusivos, Endoskarn, Exoskarn, Mármol, Hornfels y Calizas), se eligió un solo punto de manera aleatoria en la muestra y se midió en tiempos entre 10 y 60 segundos, para elegir un tiempo óptimo.

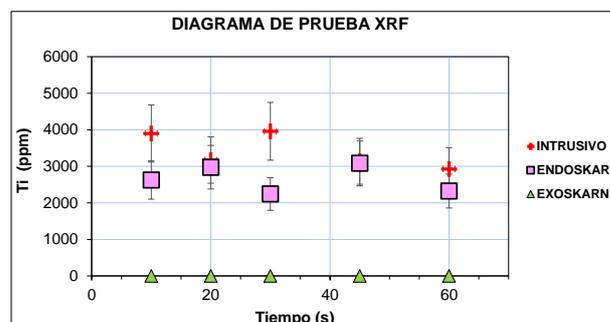


Figura 2: Diagrama de prueba con el analizador portátil XRF y el tiempo, para el elemento Ti.

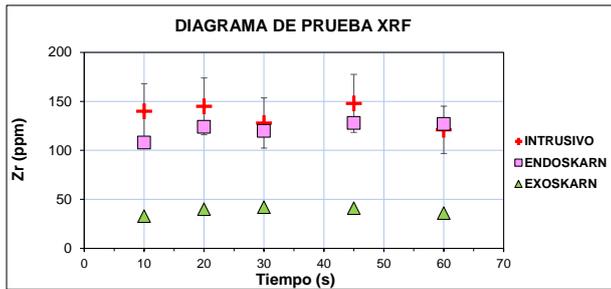


Figura 3: Diagrama de prueba con el analizador portátil XRF y el tiempo, para el elemento Zr.

El analizador portátil XRF utilizado mostró una correlación directa entre el tiempo de medición y los resultados, de modo que estos tienden a ser más confiables en la medida en que aumenta el tiempo de medición. Se emplearon muestras de testigo cortados por la mitad, y en la cara plana se dibujó cuatro círculos secuenciales de 2 cm de radio por el tamaño

de la ventana de medición del analizador portátil de XRF en un área de 10 cm. Las distancias variaban de acuerdo a expectativa del geólogo (de 2 cm a 5 cm). Los ensayos se realizaron de preferencia en zonas sin presencia de venillas, superficies rugosas ni húmedas, con la finalidad de evitar interferencias durante la lectura con el analizador portátil de XRF.

Cada análisis estuvo conformado por cuatro ensayos en la misma muestra (uno en cada círculo), con un tiempo de duración de 45 segundos para cada ensayo. El tiempo empleado se estableció mediante ensayos previos a diferentes tiempos, a fin de obtener concentraciones por encima del límite de detección del analizador con una aceptable precisión analítica.

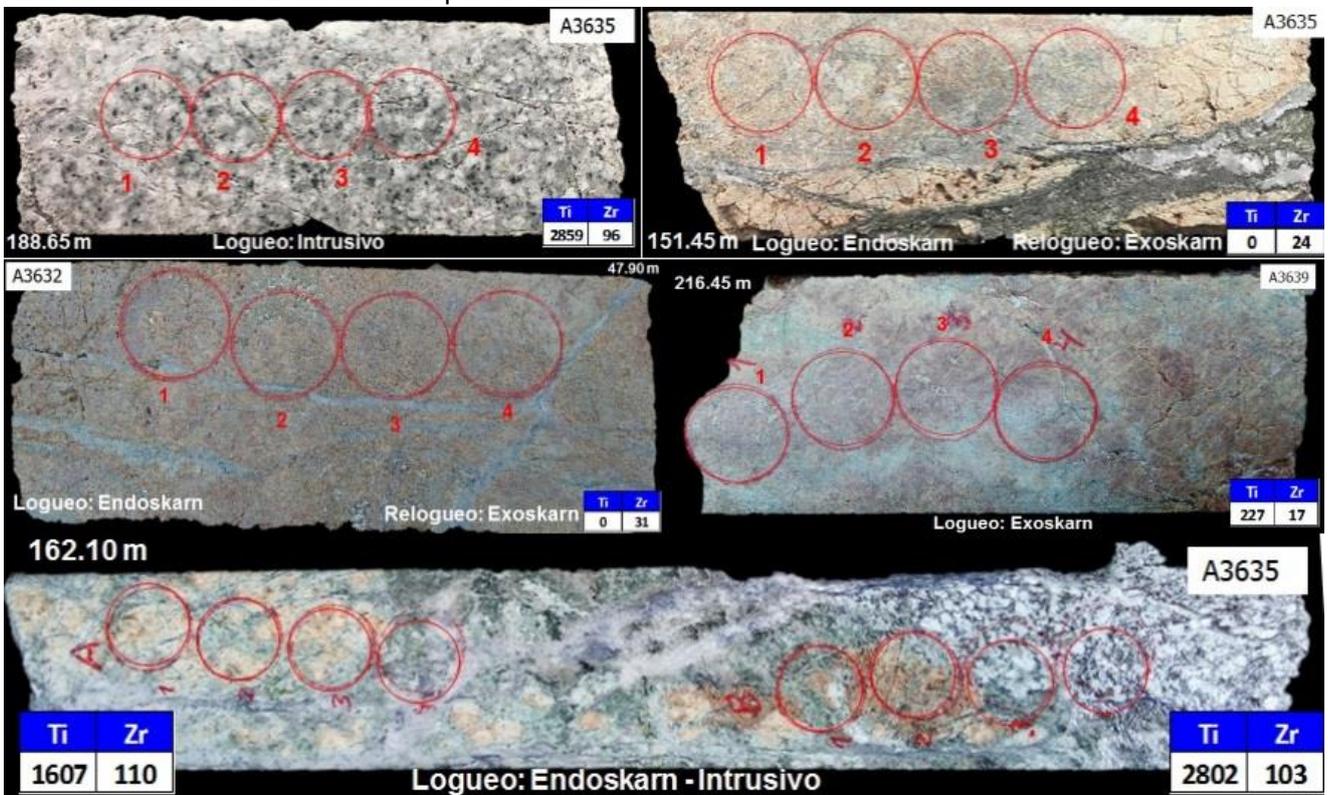


Figura 4: Método de obtención del Ti y el Zr con el equipo portátil de XRF, se dibujaron 4 círculos del radio del foco del XRF (2cm), de las 4 lecturas se utilizó el promedio y se observó que las rocas logueadas como Endoskarn, eran Exoskarn por su contenido de Ti y Zr.



Figura 5: Izquierda: Se está dibujando los 4 círculos para realizar las mediciones con el analizador portátil XRF en las rocas. Derecha: Se está utilizando el analizador portátil XRF en las muestras de los taladros de perforación logueados con anterioridad.

3.2.- Análisis e interpretación de los datos de XRF entre Endoskarn y Exoskarn

Se obtuvieron 3,872 datos con el equipo portátil de XRF y se realizaron diagramas de dispersión entre Ti y Zr, diferenciando el Endoskarn con el Exoskarn. Al realizar la interpretación de los datos obtenidos por el equipo portátil de XRF en los gráficos de dispersión, se observó que numerosas muestras logueadas como Endoskarn tienen contenidos de 0

ppm a 3000 ppm de Ti y de 0 ppm a 130 ppm de Zr, mientras que en Exoskarn varían de 0 ppm a 1,900 ppm y de 0 ppm a 100 ppm, respectivamente se observaron discrepancias entre el Endoskarn y el Exoskarn, ya que la mayoría de testigos logueados como Endoskarn se encontraban en la zona de Exoskarn, y eso mostró una incongruencia al identificar las variedades de skarn durante el logueo geológico.

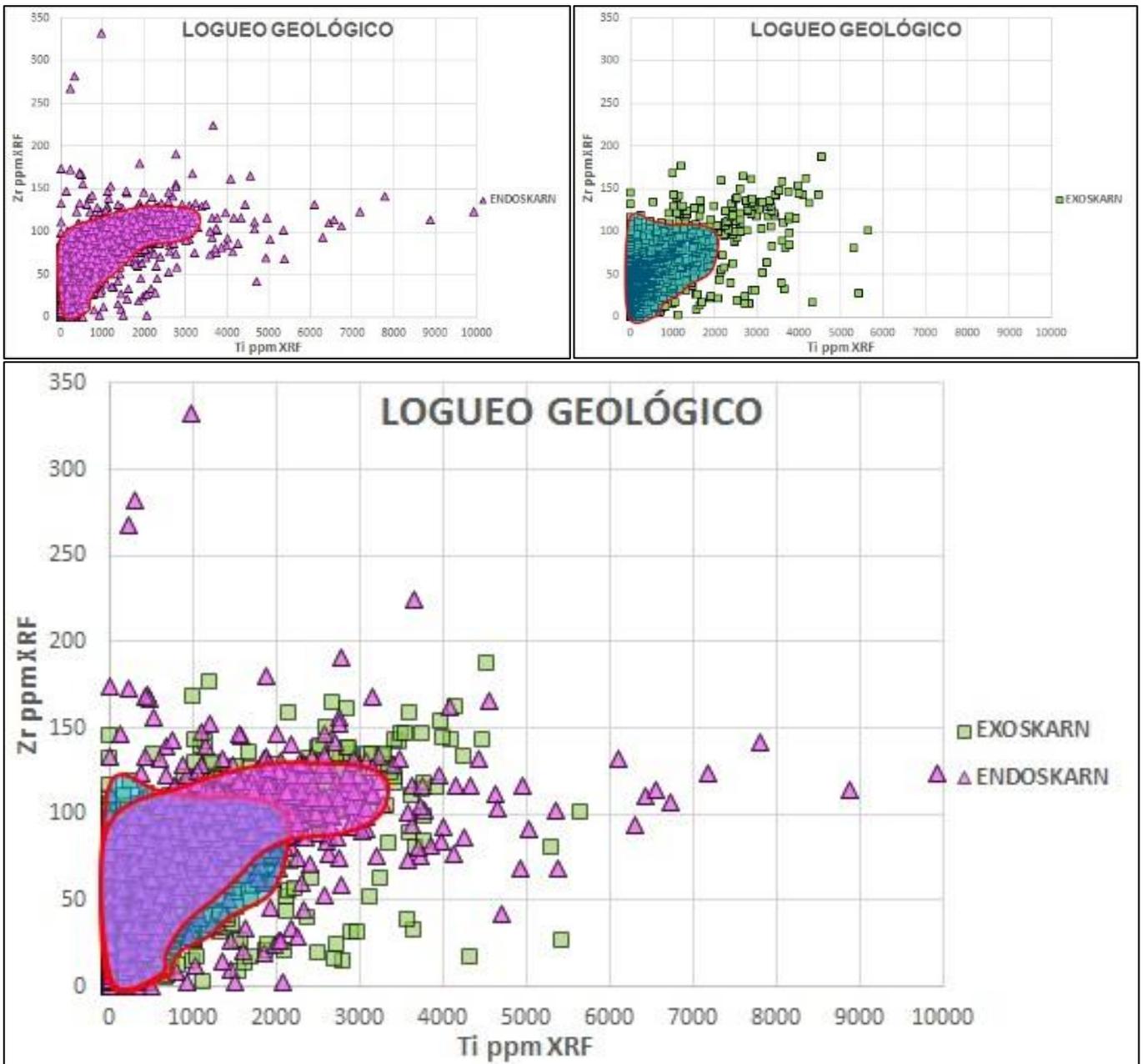


Figura 6: Gráficos de dispersión del Ti y Zr en el Endoskarn y Exoskarn, según el logueo geológico. Donde se observa que la población mayor de muestras del Endoskarn y el Exoskarn se posicionan en la misma zona con una ligera diferencia.

3.3.- Análisis e interpretación de los datos de XRF entre la formación Jumasha y la formación Celendín.

El skarn está formado por la reacción de los carbonatos de las formaciones Jumasha y Celendín en contacto con el intrusivo. Este metamorfismo produce alteraciones en las que las rocas no son fácilmente distinguibles entre sí, especialmente en el contacto. Utilizando el equipo portátil de XRF en las rocas encajonantes, se ha determinado que las rocas carbonatadas de estas formaciones presentan variaciones geoquímicas debidas a su diferente contenido clástico. Se ha observado que valores altos de Ti mayores a 1000 ppm y de Zr mayores a 60 ppm, con lecturas de 45 segundos, se correlacionan mejor con las rocas clásticas de la Formación Celendín, mientras que los valores menores a 1000 ppm de Ti y menores a 60 ppm de Zr se correlacionan mejor con las calizas de la Formación Jumasha.

Hay un grupo de rocas de la formación Jumasha (calizas) que tienen alto contenido de Ti (>2,000 ppm), por ser rocas clásticas. Posiblemente sea la zona de transición entre la formación Jumasha y Celendín.

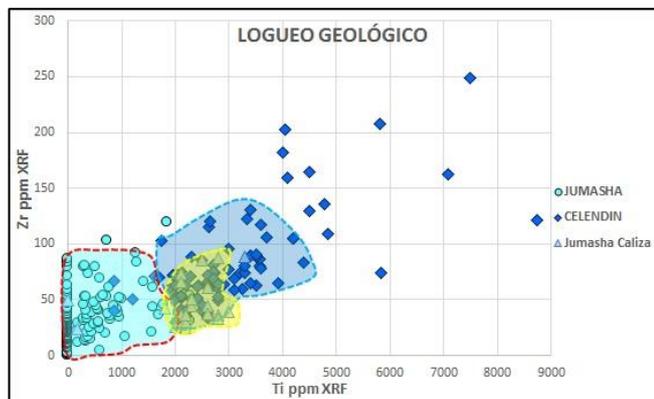


Figura 7: Diagrama de dispersión del Ti vs Zr de las rocas logueadas como Mármol (Formación Jumasha), Hornfels (Formación Celendín) y Calizas clásticas de la Formación Jumasha.

IV. Resultados y Discusiones

4.1.- Resultados

La investigación permitió identificar dos elementos como patrones geoquímicos, que son Ti y Zr, cuya baja movilidad durante la alteración hidrotermal y formación de calcosilicatos les permite jugar el rol de

discriminantes geoquímicos. Estos elementos suelen mostrar valores más altos en los intrusivos y el Endoskarn, Ti mayor a 1000 ppm y Zr mayor a 60 ppm, con lecturas entre los 20 a 45 segundos, mientras que en el Exoskarn los valores tienden a ser menores a 1000 ppm de Ti y 60 ppm de Zr (Figura 9). Se definieron los elementos de interés para el presente estudio. (Ti y Zr).

Según, Maher, K., (2019). Cuando el granate está presente en el Exoskarn, la alteración retrógrada con relación al piroxeno suele afectar menos mineralógicamente a la roca, pero también puede generar una roca desagregada con granos de granate. El verdadero Exoskarn se ve mucho más afectado por la alteración retrógrada de todos los tipos en relación con el verdadero Endoskarn. Esta alteración está fuertemente asociada con la deposición de sulfuro.

4.2.- Titanio y Zircón

Se consideran Ti y Zr debido a que son elementos de baja movilidad geoquímica durante la alteración hidrotermal o el metasomatismo.

Las características de minerales pesados (durante la erosión y transporte) como el zircón hacen que sea un buen indicador de contaminación detrítica en rocas carbonatadas; el Ti, principalmente en anfíboles y la titanita, también brindan información del grado de contaminación en rocas carbonatadas.

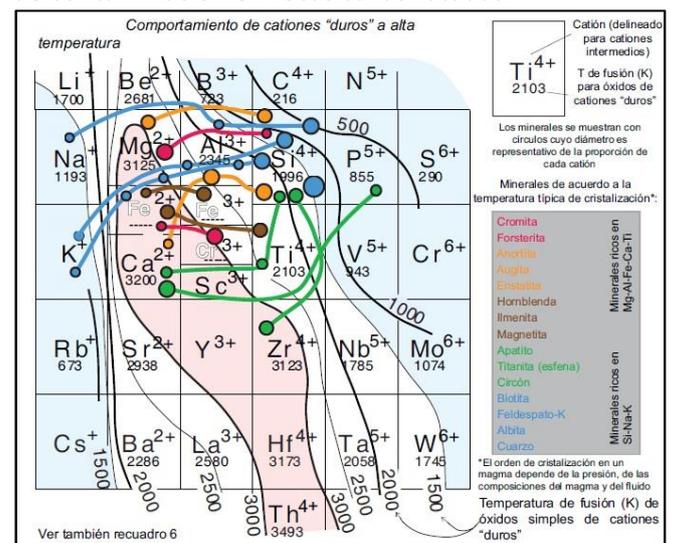


Figura 8: Grafico del comportamiento del Ti y Zr como cationes duros a alta temperatura son resistentes en el orden de cristalización del magma (Juan Pablo Bernal1,* y L. Bruce Railsback2 - Introducción a la Tabla Periódica de los Elementos y sus Iones para Ciencias de la Tierra).

El rutilo, que es fuente del Ti en la roca fresca, no está sujeto al método de digestión de agua regia.

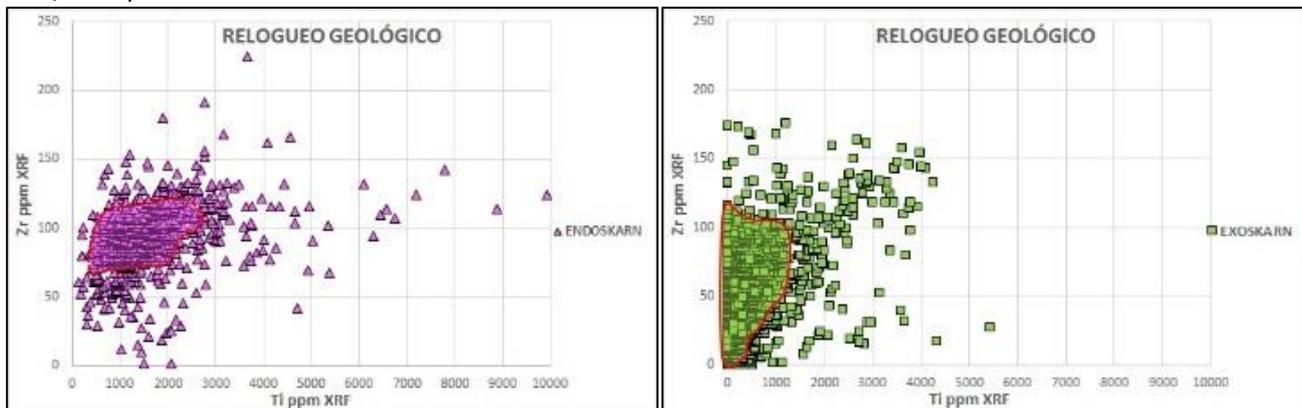
La titanita y el rutilo son minerales accesorios comunes en diversos tipos de rocas, y particularmente el rutilo es la forma más frecuente de dióxido de titanio y está ampliamente distribuido entre los diferentes tipos de roca de la corteza terrestre (Rabbia y Hernández, 2012).

En Antamina, solamente granate rosa y granate verde corresponden fuertemente con Endoskarn y Sin embargo, los códigos de roca denominados Endoskarn de granates de color café y verde no se identifican adecuadamente durante el logueo geológico (Figura 10). La consecuencia de esta identificación errónea es que hay un volumen significativamente excesivo de Endoskarn en el depósito de Antamina en relación con el Exoskarn (Maher, 2019).

Exoskarn, respectivamente; el granate rojo y el marrón se observan tanto en Endoskarn y Exoskarn (Stephanie Mrozek, 2018).

Una observación consistente en la revisión de los testigos de perforación es que ciertos tipos de Endoskarn de color rosa son identificados de manera consistente como Endoskarn por los geólogos de Antamina, probablemente porque hay una textura ígnea residual en gran parte de este tipo de material (Figura 11).

Revisando los datos de la toma de lecturas con el analizador portátil de XRF, se realizó el relogueo de las rocas que tenían códigos logueados como Endoskarn, por lo cual pasarían a ser reclasificadas como Exoskarn por el contenido de Ti y Zr.



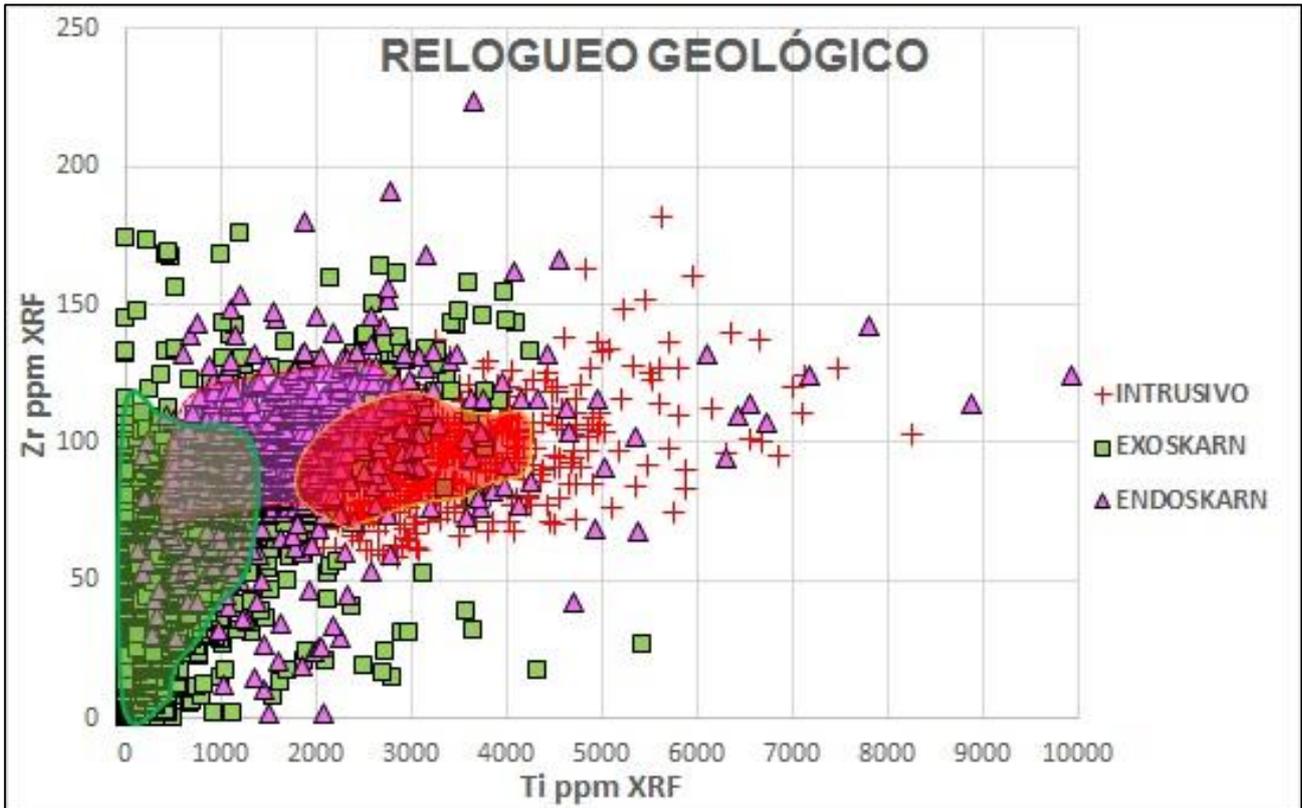


Figura 9: Diagrama de dispersión del reloj geológico del Endoskarn y Exoskarn en el que se aprecia la distribución que tienen del Exoskarn de 0 ppm a 1,000 ppm de Ti y de 0 ppm a 100 ppm de Zr; en el Endoskarn se observa de 800 ppm a 3000 ppm de Ti y de 60 ppm a 130 ppm de Zr; en el intrusivo, de 2,000 ppm a 4100 ppm de Ti y de 70 ppm a 120 ppm de Zr.

Las muestras que están ligeramente dispersas alrededor del grupo mayor de cada dominio litológico (Endoskarn, Exoskarn e Intrusivo) tienen variedades de minerales y grado de alteración, y es por ello que hay diferentes contenidos de Ti y Zr.

Según, Maher, K, (2019), la alteración retrógrada de piroxeno (como lo indican los códigos litológicos de Endoskarn actuales) es localmente muy intensa, lo que resulta en (anfíbol) + clorita ± esmectita ± alteración por sulfuros. Esta alteración comúnmente produce la desagregación de la roca competente. Cuando el granate está presente en el Exoskarn, esta alteración retrógrada en relación con el piroxeno suele afectar menos mineralógicamente, pero también puede resultar en una roca desagregada de granos de granate. El verdadero Exoskarn se ve mucho más afectado por la alteración retrógrada de todos los tipos en relación con el verdadero Endoskarn. Esta alteración está fuertemente asociada con la deposición de sulfuro. El volumen de Endoskarn, codificado como NGCV, NGC1 y NGC2, está sobrestimado significativamente, y en realidad en su mayoría es Exoskarn.

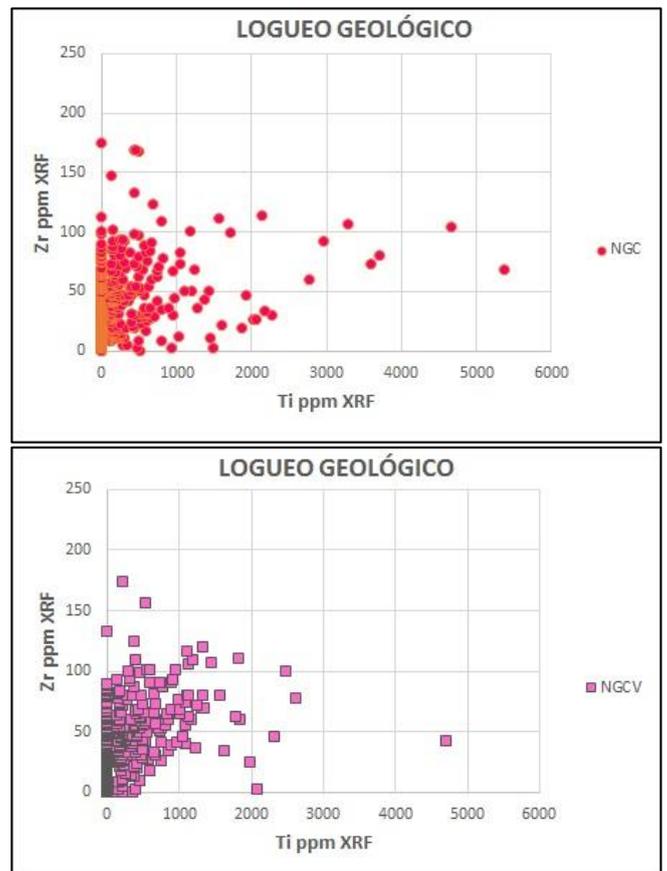


Figura 10: Diagrama de dispersión del logeo geológico del Endoskarn de granate café y café verde.

Una observación en estas figuras es que los campos de roca codificados como Endoskarn NGCV, NGC1, y NGC2 caen en los campos de protolitos carbonatos (puros o clásticos), así como lo logueado como Endoskarn de granate café y Endoskarn de granate café verde, donde la gran mayoría de datos se posicionan en la zona del Exoskarn según el contenido de Ti y Zr.

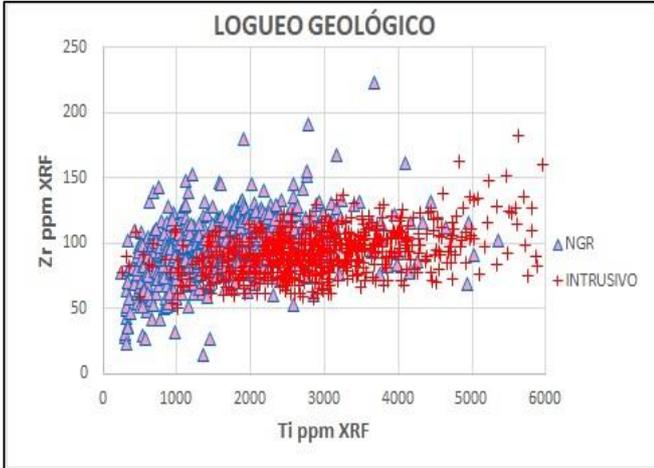


Figura 11: El Endoskarn codificado como Endoskarn de granate rosa (NGR) se posiciona en la zona de la roca ígnea.

El yacimiento Skarn de Antamina presenta las zonas de Endoskarn y Exoskarn de similar extensión.

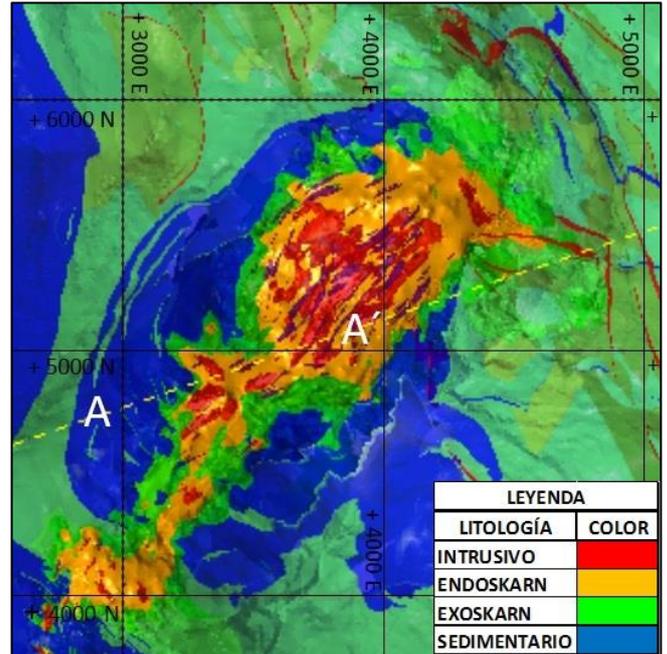


Figura 12: Plano geológico del yacimiento Skarn, Antamina

Al realizar una sección de un taladro y relogueando los tramos con los datos del Ti y Zr, se puede observar que hay algunas zonas que pasarían a ser Exoskarn por la interpretación geoquímica de los contenidos de Ti y Zr. Lo cual hace que el Exoskarn sea más extensa que el Endoskarn.

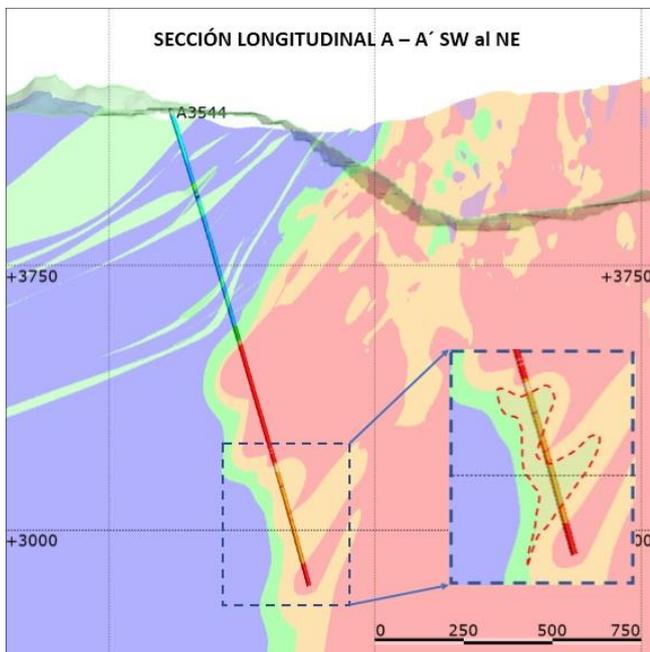


Figura 13: Sección donde según la interpretación geoquímica de los datos obtenidos mediante el analizador portátil XRF del Ti y Zr, la zona del Exoskarn sería más extensa que el de la zona del Endoskarn, lo que ayudaría a tener definido el contacto litológico entre el Endoskarn y Exoskarn.

Es importante definir confiablemente el contacto entre el Endoskarn y Exoskarn, debido a las características e implicancias que tienen para el modelo geológico, la producción económica y la geometalurgia del yacimiento tipo skarn de Antamina.

De las 1,642 muestras logueadas como Endoskarn, en el relogueo se definieron 972 muestras como Exoskarn, tomando los resultados del Ti y Zr, indicada en la siguiente tabla:

LITOLOGÍA	LOGUEO	RELOGUEO
ENDOSKARN	1,642	670
EXOSKARN	1,333	2,305

4.3.- Discusión

La fuente del Titanio considerado el rutilo hidrotermal en el depósito pórfido Cu-Mo El Teniente es formado a partir de fases ígneas ricas en titanio (titanita, biotita, Ti-magnetita e ilmenita) por reequilibrio y/o descomposición bajo condiciones

hidrotermales a temperaturas entre 400°C y 700°C (Rabbia y otros, 2009). La titanita a menudo coexiste con otras fases portadoras de Ti, como el rutilo y la ilmenita (Hayden y otros, 2008)

Los minerales accesorios, y entre ellos la esfena, están siendo cada vez más utilizados como marcadores de las condiciones físico-químicas de los sistemas magmáticos en los que aparecen (Poitrasson et al., 2002; Anderson et al., 2008). Están disponibles para rocas ígneas como sigue: Zr en rutilo y esfena, Ti en zircón, entre otros (Anderson et al., 2008).

El Ti se encuentra en el intrusivo y en el Endoskarn y sus fuentes son titanita, magnetita, biotita y rutilo (Maher. K, (2019).

V. Conclusiones

- 1.- Se determinó que el Ti tiende a presentar concentración mayor a 1,000 ppm y el Zr mayor a 60 ppm en la zona de Endoskarn.
- 2.- Se observó buena correlación del Ti y Zr en las calizas de la Formación Celendín.
- 3.- Con el uso del equipo de XRF se determinó que el Ti y Zr muestran respuestas efectivas después de 20 segundos en la zona de Endoskarn y Exoskarn.
- 4.- Con los estudios hechos en zonas nuevas, fue posible definir zonas de Endoskarn con valores altos en Ti y Zr, los mismos que están relacionadas con los metales bases en mayor volumen.

VI. Recomendaciones

- Evaluar áreas antiguas que no han sido estudiadas usando el equipo portátil de XRF, para incorporar potencialmente nuevas áreas de interés económico.
- Reloqu coastigos antiguos para mejorar la geometría del modelo geológico y geometalúrgico, apuntando a nuevas zonas de mineral potencialmente económico.
- Adquirir un equipo portátil de XRF que obtenga datos de P, Ca, Mg y Al, para realizar interpretaciones que ayudarían a diferenciar las zonas de Endoskarn, Exoskarn, Caliza y Hornfels.

VII. Agradecimientos

A compañía Minera Antamina, por permitirme realizar el presente trabajo de investigación; a la

gerencia de Geología PDN, la Superintendencia de Estrategia de Procesos Geológicos y al Área del Core Shack; al consultor Kierran Maher por sus enseñanzas, a William Mata Rímac, ex practicante del área de Core Shack por su apoyo en la recolección de datos, al Ing. Favio Mena Osorio Maestro de la UNDAC por su apoyo técnico, y al Dr. Armando Simón Mendez por su apoyo en la revisión del documento.

VIII. Referencias

- Anderson, A. J., Wirth, R., & Thomas, R. (2008). The alteration of metamict zircon and its role in the remobilization of high-field-strength elements in the Georgeville granite, Nova Scotia. *The Canadian Mineralogist*, 46(1), 1-18.
- Antamina (2008). Geología del Depósito tipo Skarn de Cobre-Zinc de Antamina - Informe realizado por el Departamento de CM Antamina.
- Bernal, J. P., & Railsback, L. B. (2008). Introducción a la Tabla Periódica de los Elementos y sus Iones para Ciencias de la Tierra. *Revista mexicana de ciencias geológicas*, 25(2), 236-246.
- Chang, Z. (2003). *Magmatic-hydrothermal transition, skarn formation, and mineralization at the Empire Mine, Idaho*. Washington State University.
- Chang, Z., & Meinert, L. D. (2008). Zonation in skarns—complexities and controlling factors. In *PACRIM Congress* (pp. 303-306).
- Díaz Quezada, C. B. (2021). Transformación rutilo-titanita durante el hidrotermalismo como un marcador de las condiciones redox en el pórfido Cu–Mo El Teniente.
- Barrón, R. E. F., & Gómez, E. G. (2020). Zonamiento mineralógico con difracción de rayos X para la optimización del tratamiento metalúrgico en el Yacimiento Toromocho. *Revista del Instituto de investigación de la Facultad de minas, metalurgia y ciencias geográficas*, 23(46), 121-129.
- Hayden, LA; Watson, EB; Wark, DA (2008). "Un termobarómetro para esfena (titanita)". *Contribuciones a la mineralogía y la petrología*. 155 (4): 529–540.
- Maher, K. C. (2010). Skarn alteration and mineralization at Corocochuayco, Tintaya district, Peru. *Economic Geology*, 105(2), 263-283.
- Maher, K. C. (2019). Informe Reclasificación de litologías en Antamina. pp. 3-5, 18-31.
- Mrozek, S. A. (2018). *The giant Antamina deposit, Peru: Intrusive sequence, skarn formation, and mineralisation* (Doctoral dissertation, James Cook University).
- Meinert, L. D., Dipple, G. M., & Nicolescu, S. (2005). World skarn deposits.
- Meinert, L.D. (1997) Application of Skarn Deposit Zonation Models to Mineral Exploration. *Exploration and Mining Geology*, 6, 185-208.

Paz, A. (2015). Presentación: Caracterización litogeoquímica de las formaciones Jumasha – Celendín, metalotectos relacionados a la mineralización de Cu-Zn cercanos al yacimiento minero de Antamina.

Poitrasson, F., Hanchar, J. M., & Schaltegger, U. (2002). The current state and future of accessory mineral research. *Chemical Geology*, 191(1-3), 3-24.

Rabbia, O. M., Hernández, L. B., French, D. H., King, R. W., & Ayers, J. C. (2009). The El Teniente

porphyry Cu–Mo deposit from a hydrothermal rutile perspective. *Mineralium Deposita*, 44(8), 849-866.

Rabbia, O. M., Hernandez, L. B., Cabrera, J. M., Ulrich, T., Bissig, T., & Parra, A. (2012). Evidencias de movilidad de las REE en depósitos tipo pórfido de cobre durante la alteración hidrotermal. In *Congreso Geológico Chileno* (Vol. 13, pp. 90-92).

Rodríguez, J., Vegas, N., Esteban, J. J., & Tubía, J. M. (2009). Caracterización química de esfenas ígneas y aplicación del geotermómetro de Zr en esfena a procesos tardimagmáticos.