

CORRELACIÓN DE LOS ÍNDICES GEOTÉCNICOS (IS - UCS) CON LA LITOLOGÍA Y ALTERACIONES EN TINTAYA

Lytman S. Jordán G., Jorge Vargas Z., Edward Sánchez V. & Luís M. Tejada C.

Xstrata Tintaya S.A. - Campamento Minero, Espinar - Cusco - Perú
ljordan@xstratacopper.com.pe, jvargas@xstratacopper.com.pe, esanchez@xstratacopper.com.pe,
ltejada@xstratacopper.com.pe

INTRODUCCIÓN

El yacimiento tipo skarn de Cu-(Au, Ag) de Tintaya (Lat. 14°54' S, Long. 71° 20' W) está ubicado en el distrito de Yauri, provincia de Espinar en el departamento del Cusco, sobre los 4000 m.s.n.m., en el extremo SE del Cinturón de Cobre Andahuaylas – Yauri en el sur del Perú; a 256 Km. al SE de la Ciudad del Cusco.

Xstrata Tintaya S.A. opera el yacimiento a tajo abierto y procesa el mineral en dos plantas: Planta Concentradora de Sulfuros y Planta de Lixiviación de Óxidos.

La naturaleza del yacimiento (metasomático de contacto tipo skarn) presenta una marcada disarmonía litológica y de alteraciones con sus respectivas variaciones en sus propiedades físicas e índices geotécnicos, esto sumado a la disposición espacial de las mismas, genera serios problemas en los procesos de fragmentación de rocas (blasthole) y estabilidad de los taludes.

En agosto del 2005 se generó el proyecto Six Sigma denominado Mine To Mill cuyo objetivo fue optimizar el proceso de tratamiento de mineral desde mina hasta los procesos en las plantas, este proyecto fue muy amplio y entre los objetivos en mina estuvo la optimización del proceso de fragmentación de rocas con la voladura primaria.

La presente investigación de “Correlación de los Índices Geotécnicos (IS¹ – UCS²) con la Litología y Alteraciones en Tintaya”, es un aporte a la optimización de los procesos de fragmentación de rocas y reducción del daño a los taludes que repercute directamente en la reducción de costos en las operaciones mineras. Esto se materializa mediante la entrega de información sistemática y oportuna, de las características geotécnicas – geológicas de los macizos rocosos, y coadyuva a tomar decisiones en el terreno.

MARCO GEOLÓGICO

GEOLOGÍA REGIONAL Y LOCAL

Tintaya está situado en la elongación SE de las rocas sedimentarias mesozoicas que se extienden por más de 300 Km. desde Yauri hasta Andahuaylas, las cuales están correlacionadas con sus equivalentes en el centro y sur del Perú y están formados por secuencias deposicionales de procesos transgresivos - regresivos que se inician en el Cretácico inferior hasta fines del Cretácico medio. Regionalmente el paquete cretácico sedimentario aflora desde el N- NE de Tintaya (Cerro Hunicunca) hasta el Sur del proyecto cuprífero de Quechuas (Cerro Quinsa Puquio), y se presenta con una potente secuencia de areniscas cuarzosas y ortocuarcitas de coloración blanca pardusca de la Formación Soraya/ Hualhuani. Suprayaciendo a esta formación tenemos una secuencia de areniscas y lutitas de coloración marrón rojiza de la Formación Mara/ Murco. La secuencia cretácica finaliza con las calizas de coloración gris a gris blanquecina (tipo cebrá) de la formación Ferrobamba/ Arcurquina, la que alberga a los yacimientos tipo skarn de cobre y hierro en la franja metalogénica de Andahuaylas – Yauri (Terrones, 1958; Bellido, 1962; Santa Cruz et al., 1979).

Intruyendo a la secuencia sedimentaria mesozoica, tenemos plutones y stocks del Eoceno – Oligoceno que forman el Batolito de Andahuaylas - Yauri el que consiste de múltiples fases magmáticas. Regionalmente afloran dioritas y microdioritas como plutones de gran dimensión en los cerros

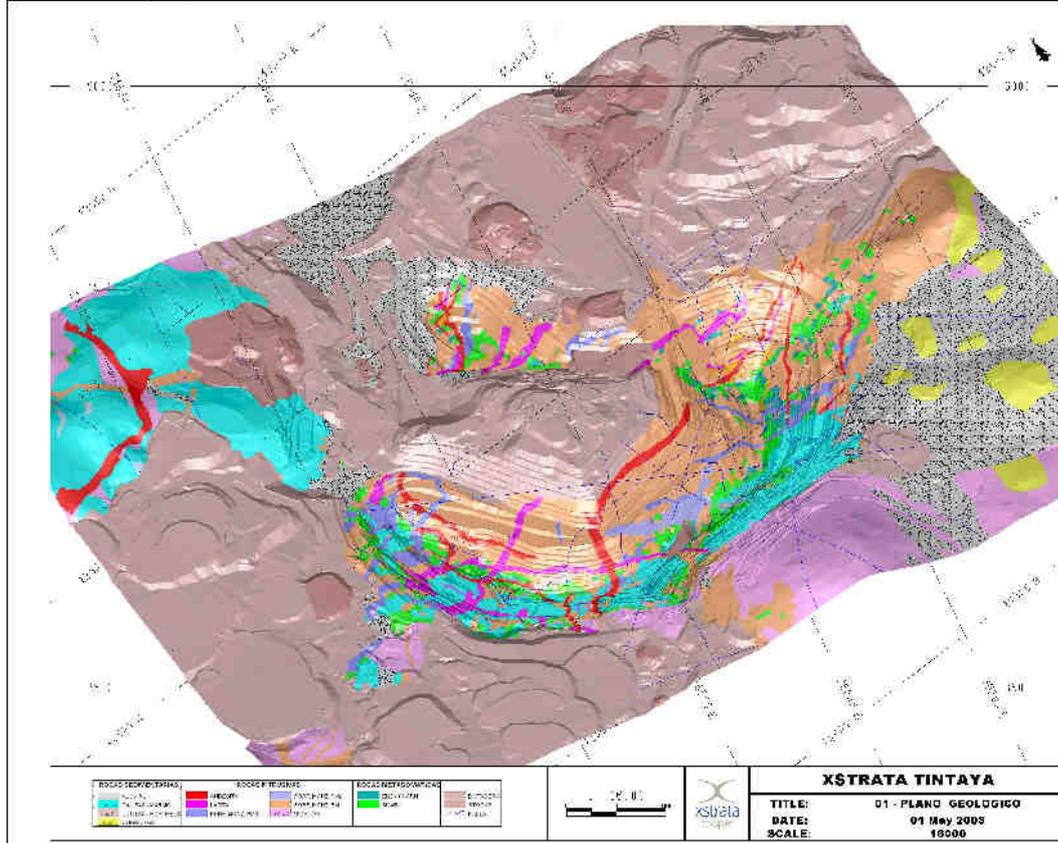
¹ IS : Índice Geotécnico de Carga Puntual

² UCS: Uniaxial Compressive Strength (Resistencia a la Compresión Uniaxial)

Choquechampe y Chabuca Sur. Los stocks monzoníticos al instruir a las calizas Ferrobamba han dado origen al anillo de skarn.

Posterior a los eventos de skarn se tienen diques de latitas y andesitas porfiríticas del Mioceno – Plioceno, correlacionados con los volcánicos del Grupo Barroso que se ubican al SO de Tintaya (Dávila 1988)

Cubriendo grandes áreas en la cuenca tenemos sedimentos de origen lacustre – aluvial de la Formación Yauri del Pleistoceno. En el cuaternario reciente tenemos depósitos fluvio-glaciares y aluviales que se depositaron en las cuencas de los ríos y quebradas. (De la Cruz, 1995). (Ver plano 01: Plano Geológico)



GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

A escala regional las deformaciones estructurales más relevantes son los pliegues de la secuencia sedimentaria cretácica con franjas kilométricas plegadas de dirección Andina (NO – NNO), cuyos afloramientos incluyen areniscas y cuarcitas (Fm. Soraya), lutitas – areniscas (Fm. Mara) y calizas (Fm. Ferrobamba). (A. Maldonado, 2006)

Las estructuras de fallas de mayor extensión en el distrito ocurren en el sistema NE a ENE, seguido por los sistemas NO y NS, los que controlan el emplazamiento de los intrusivos de la región. Los emplazamientos de los pulsos monzoníticos en Tintaya están controlados por el sistema de fallas NE a E-NE. En los tajos prevalecen las fallas de movimiento normal, indicando una actividad reciente (neotectónica).

YACIMIENTO TINTAYA

Tintaya corresponde a un yacimiento metasomático de contacto Tipo Skarn de Cu-(Ag,Au), (P. Zweng, 1996), ubicado en el Distrito Minero de Tintaya donde se presentan los yacimientos de Antapaccay, Corocohuayco, Quechuas y Hatún Pucara. Regionalmente pertenece al Metalotecto Ferrobamba, caracterizado por la ocurrencia de yacimientos de Skarn asociados a las calizas de la Formación Ferrobamba intruidas por los pórfidos monzoníticos cupríferos. En los últimos años se han

descubiertos yacimientos con mineralización económica en los pórfidos cupríferos (Antapaccay, Chancas, Las Bambas, Katanga, Antillas y otros).

ALTERACIONES HIPÓGENAS Y SUPÉRGENAS

En Tintaya ocurren dos grupos marcados de alteraciones, la primera asociada a la actividad tardimagmática - hidrotermal denominada Alteración Hipógena y la segunda como producto de la oxidación por eventos superficiales de agua y aire denominada Alteración Supérgena. (Ver Plano 02: Plano de Alteraciones)

ALTERACIONES HIPÓGENAS

Alteración Potásica

Esta alteración corresponde a un intercambio catiónico (cambio de base) con la adición de K a las rocas y está asociada a la fase tardimagmática (400 a 550 °C); ocurre predominantemente en el stock monzonítico y está representado por venas Tipo A de cuarzo - calcopirita – bornita con halos de feldespato potásico y alteración de ortosa en la matriz; varía de débil -moderada alteración en la parte central del stock monzonítico, a fuerte en el contacto con el skarn, donde se presenta mayor profusión de venas de cuarzo.

Alteración Prógrada (Skarn –Endoskarn)

Ocurre como producto del metasomatismo de contacto del intrusivo monzonítico hacia las calizas. La alteración prógrada del skarn se relaciona con la alteración potásica de la monzonita y está zonada con respecto al núcleo potásico; los granates varían de más andradíticos a más grosularíticos desde el contacto hacia fuera; los piroxenos varían desde diópsido a hedenbergita, desde el contacto hacia afuera. La razón granate/ piroxeno disminuye desde el contacto hacia afuera.

En Tintaya la mineralogía de la ganga está representada por el skarn y endoskarn de calcosilicatos (granate y piroxenos) y magnetita; la mena de sulfuros primarios presenta calcopirita y bornita, y la pirita es muy escasa en el yacimiento.

Alteración Propílica

Esta alteración de baja temperatura se encuentra en las partes periféricas del yacimiento y está representada por clorita, epidota, calcita y pirita. Se observa en los intrusivos dioríticos que afloran aledaños a los tajos; también como débil alteración en las calizas (marmolizadas con débil propilitización) y diques post mineralización.

Alteración por silicificación

Esta alteración hidrotermal se presenta en la zona de inflexión como una fuerte silicificación de las monzonitas y skarn; ocurre como venas de cuarzo con sulfuros de calcopirita >> pirita y una fuerte silicificación en la matriz del pórfido monzonítico PM1; está relacionada al emplazamiento de los diques PM2B en la zona.

Alteración argílica

Ocurre en zonas muy aisladas o locales en el yacimiento y está asociada a fluidos hidrotermales tardíos; las arcillas son el resultado de la alteración de los feldespatos en los intrusivos y la alteración de los calcosilicatos en el Skarn. Esta alteración se presenta en Tintaya de débil a moderada en las zonas de emplazamiento de los diques de pórfidos andesíticos y latíticos.

ALTERACIÓN SUPÉRGENA

La alteración Supérgena es un proceso de reequilibrio de la mineralogía hipógena (hidrotermal) a las condiciones oxidantes cerca de la superficie terrestre (sobre el nivel de las aguas freáticas). La mayoría de las asociaciones de minerales silicatados, carbonatados y sulfurados son inestables en estas condiciones y se descomponen o intemperizan para originar una nueva mineralogía estable de en estas condiciones.

En Tintaya es muy frecuente este tipo de alteración y se observa en las partes altas de los tajos actuales, como producto tenemos:

- Alteración supérgena en zonas de skarn – endoskarn: Arcillas, óxidos de Cu (malaquita, crisocola, tenorita y cuprita) y limonitas (gohetita y hematina)
- Alteración supérgena en zonas de intrusivos: Arcillas de montmorillonita muy deleznales asociadas a limonitas (gohetita y hematita).
- Alteración supérgena en zonas de rocas carbonatadas (calizas): En estas el intemperismo es débil con presencia limitada de arcillas y limonitas (gohetita)

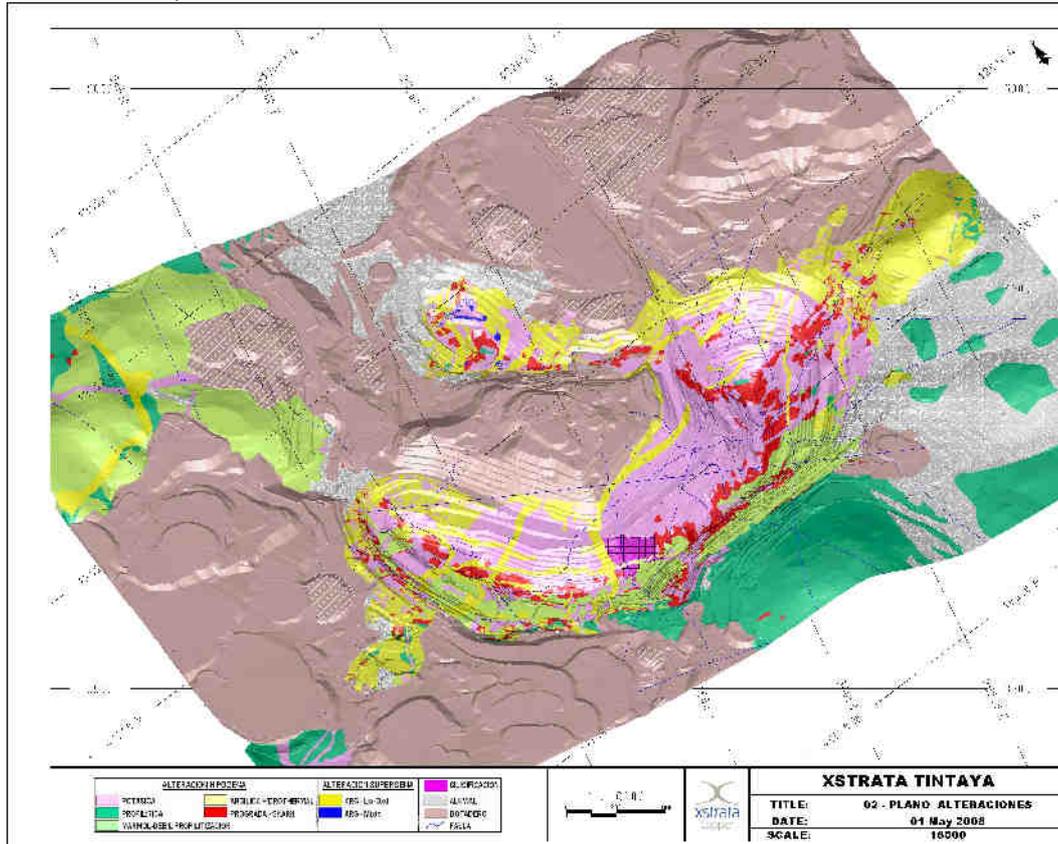
Debido a la escasa mineralización de pirita en el yacimiento, las zonas de enriquecimiento secundario son escasas; la zona de Chabuca Norte es la más representativa de este enriquecimiento y está definida por la zona de mixtos donde la mineralogía es muy variada con presencia de cobre nativo, calcosita, óxidos de cobre, sulfuros de calcopirita y bornita.

Para un mayor entendimiento en Tintaya se ha delimitado las zonas en: Lixiviada, oxidada, mixtos y sulfuros primarios. (Ver Plano 02: Plano de Alteraciones)

DISCUSIONES DE LAS ALTERACIONES Y MINERALIZACIÓN EN TINTAYA

Por los argumentos descritos en la investigación la formación del yacimiento de Tintaya estaría asociada a la fase tardimagmática, donde predomina la alteración potásica en el pórfido cuprífero, que es contemporánea a la alteración prógrada del skarn; por lo que podemos inferir que el nivel de emplazamiento de la formación del yacimiento fue profundo (Aprox. entre 4 a 5Km), debido a esto, la alteración filica está casi ausente y por ende también la alteración retrograda del skarn.

Otro factor peculiar en Tintaya es la escasa mineralización de pirita que nos induce a pensar que por la profundidad de formación del yacimiento, esta corresponde a un ambiente de Potasio (K) con bajo azufre (S), y el poco S que hubo, generó la mineralización de sulfuros como Calcopirita>Bornita>>>pirita. La escasa presencia de pirita favorece a la estabilidad química de los botaderos de Tintaya, que desde el punto de vista ambiental no generan drenaje ácido (DAR). (Ver plano 02: Plano de Alteraciones).



MARCO GEOTÉCNICO E INVESTIGACIÓN

ALCANCES DE LA ESTIMACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE LA ROCA INTACTA Y CLASIFICACIÓN ISRM (1981)

El ensayo de carga puntual es entendido como una prueba índice utilizada para la correlación de la resistencia a la compresión uniaxial para la caracterización geomecánica de las rocas. Este ensayo se basa en el esfuerzo aplicado en un punto del cuerpo de prueba cilíndrico con respecto al diámetro del cuerpo de prueba, para posteriormente afectarlo a un factor de corrección obtenido mediante la comparación del diámetro inicial y final. Se obtiene un valor índice I_s , este valor se multiplica por una constante obteniéndose un σ_c correlacionado (Hoek, 1998).

La prueba de compresión uniaxial de la roca tiene como objetivo medir la resistencia de una muestra cilíndrica de roca intacta de una forma no confinada. El ensayo es utilizado para la clasificación de resistencia de la roca intacta. Este valor es utilizado para clasificar el macizo rocoso a través de los sistemas RMR³, Q⁴ y GSI⁵ por mencionar algunos (Wyllie & Mah., 2004).

La ISRM⁶ (1981) propone sugerencias técnicas de caracterización geotécnica de macizos rocosos donde menciona una forma cualitativa y rápida de clasificación donde establece intervalos de resistencia con rangos incrementales entre R0 y R6.

CARACTERIZACIÓN DE MUESTRAS E ÍNDICES GEOTÉCNICOS EN TINTAYA

Para el muestreo fue muy importante identificar muestras representativas de las litologías con el tipo y grado de alteración en el yacimiento. Se realizaron ensayos geotécnicos de resistencia para 31 muestras, para los cuales fueron estimados los índices I_s , y I_{s50} , resistencia a la compresión uniaxial (σ_c) y resistencia a la tracción (σ_t).

Las muestras colectadas, ensayadas y analizadas son descritas como mármol intemperizado, skarn de magnetita, skarn de piroxenos, skarn de granate, monzonita aguilizada, latita, hornfels de piroxenos y andesita. Al mismo tiempo, estas muestras fueron catalogadas en función de su dureza y de su grado de alteración como muy débil, débil, moderado, fuerte y muy fuerte.

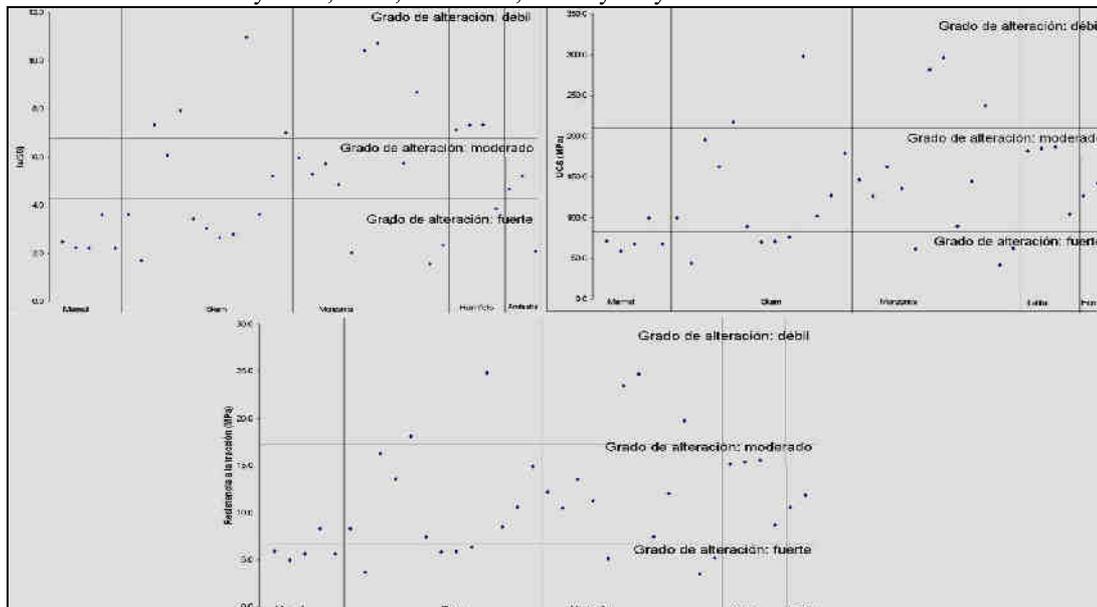


Figura 1 – Comparación I_{s50} , UCS, σ_t , Litología y Grado de Alteración en Tintaya.
ÍNDICES GEOTÉCNICOS DE I_s Y UCS EN TINTAYA

³ RMR: Rock Mass Rating (Índice del Macizo Rocoso)

⁴ Q: Índice de Calidad del Macizo Rocoso

⁵ GSI: Geological Strength Index (Índice Geológico de Resistencia)

⁶ ISRM: International Society of Rock Mechanics (Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas)

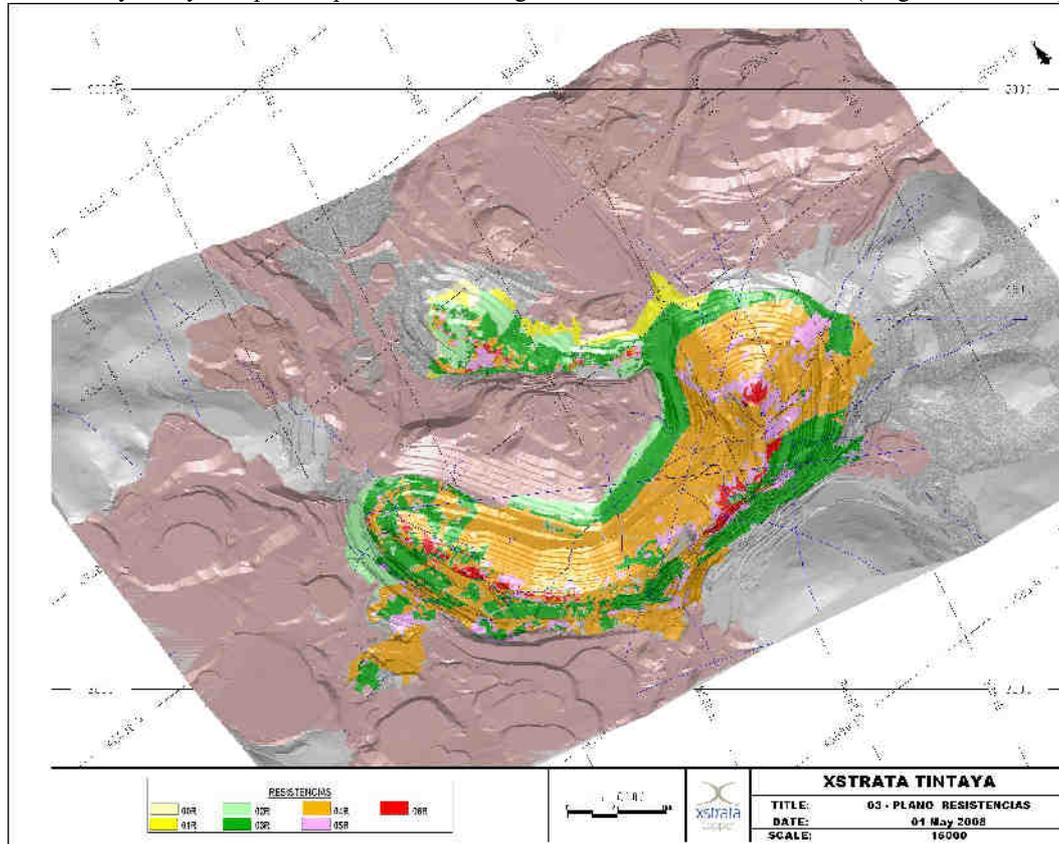
En la Figura 1, se puede apreciar la relación directa entre los valores obtenidos en el ensayo de carga puntual (Is50)⁷, la resistencia a la compresión uniaxial (UCS) y la resistencia a la tracción, con la litología predominante en las muestras ensayadas y el grado de alteración simplificado, que en conjunto reflejan la litoestratigrafía disarmonica presente en Tintaya.

CORRELACIÓN DE LOS ÍNDICES GEOTÉCNICOS CON LA LITOLOGÍA Y ALTERACIONES EN TINTAYA

Basado en los resultados de estas muestras, presentados en el ítem anterior, se buscó simplificar y/o correlacionar con la metodología ISRM ya descritas párrafos arriba. De esta manera fueron ajustadas las definiciones de R0-R6 a los ensayos y valores obtenidos de las muestras caracterizadas del yacimiento de Tintaya. La Tabla 1 muestra el resumen de las correlaciones respectivas por tipo de roca, grado y tipo de alteración asociados al UCS.

Cabe destacar que estos valores fueron ajustados paulatinamente, con el objetivo de que las correlaciones sean representativas a la geomecánica de los macizos rocosos de Tintaya. Esta mejora es continua conforme se generan las fases de minado. (Ver plano 03: Plano de Resistencias).

Los equipos utilizados en la determinación de los parámetros geotécnicos son los siguientes: prensa de carga uniaxial para el UCS y el equipo de carga puntual para el Is50, las muestras cilíndricas utilizadas y ensayadas para el presente estudio guardan relaciones de 2.5L:1D (longitud-diámetro).



⁷ Is50 : Índice de Carga Puntual Ajustado

--

Tabla 1 – Cuadro de Correlación Índices Geotécnicos – Litología – Grado de Alteración

APLICACIONES DE LA CORRELACIÓN DE LOS ÍNDICES GEOTÉCNICOS – GEOLÓGICOS EN LAS OPERACIONES DE MINA

Las principales aplicaciones de la presente investigación se encuentran focalizadas en las siguientes actividades dentro de las operaciones de mina:

Optimizar el proceso de fragmentación de rocas.- Durante el proceso de logueo de blasthole se realiza el primer contacto directo de estimación de la resistencia de la roca intacta en las áreas a disparar, de esa forma, el cálculo del factor de carga se realiza de una forma más precisa para lograr una buena fragmentación.

Minimizar el daño de la voladura en los taludes.- Mediante este estudio se incorpora información adicional para la verificación de la calidad de roca, la que es definida en una evaluación geomecánica previa. Este punto es de importancia geotécnica ya que ayuda a conservar la integridad de los macizos circundantes ajustando el modelo geotécnico a una zonificación de detalle que permite dar confiabilidad a los análisis de estabilidad de taludes.

Fragmentación adecuada de mineral.- Para optimizar el proceso del chancado en las plantas, como se mencionó en el primer punto del presente ítem, una óptima fragmentación por voladura del mineral en mina, es un factor clave en la reducción de costos operativos por chancado, además facilita el cumplimiento de los KPIs de tonelaje tratado, % de recuperación y por ende en la producción de cobre fino. En desmonte la fragmentación adecuada influye directamente en la operatividad y eficiencia de los equipos de mina.

CONCLUSIONES

Se ha identificado una correlación directa de la litología, tipo y grado de alteración con los índices geotécnicos de IS y UCS, y la clasificación de los macizos rocosos en Tintaya con la metodología ISRM caracteriza a las rocas desde la más débil hasta la más resistente (R0- R6).

Es recomendable la implementación de diferentes ensayos no solamente en la determinación de parámetros de resistencia sino también de deformabilidad y permeabilidad con un mayor número de muestras, para así afinar ciertos parámetros útiles en la fragmentación y procesamiento de materiales.

Las alteraciones hipógenas más representativas son la potásica en las monzonitas (R3-R4), prógrada del skarn (R4-R5), propilítica en las dioritas (R3-R4) y calizas (R3-R4).

La alteración de silicificación se presenta en la zona de Inflexión de Chabuca Este al Tajo Tintaya y está asociada al emplazamiento de la Monzonita PM2B. Esta afecta a la monzonita PM1 y al skarn donde las resistencias son altas y varían entre R5 y R6.

La alteración Supérgena ha originado por la oxidación y el intemperismo zonas argilizadas con baja calidad del macizo rocoso (R1-R2).

La implementación de esta investigación nos ha permitido optimizar el grado de fragmentación de mineral y desmonte, optimizar el diseño de ángulos de taludes por la reducción del daño en el macizo rocoso y reducción de costos por buenas prácticas operacionales.

Se puede concluir que el principal alcance de este trabajo es la dependencia de los diferentes grados de alteración en diversas litologías a ciertos rangos de valores de resistencias geomecánicas o viceversa.

La principal limitación de este trabajo es en el análisis y correlación de diferentes grados de intemperismo en litologías diferentes a las presentadas en el presente artículo, siendo las correlaciones presentadas aquí solamente aplicadas al caso puntual del yacimiento de Tintaya.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

De la Cruz, N., 1995. Geología de los cuadrángulos de Velille, Yauri, Ayaviri, y Azangaro: Instituto Geológico Inero y Metalúrgico, Boletín 58, Serie A, p. 144.

Hoek, E., 1998. Rock Engineering-The Application of Modern Techniques to Underground Design, Notes From a Short Course. ABMS-CBMR-CBT, São Paulo, SP, p. 268.

ISRM, 1981. Rock Characterization Testing and Monitoring-ISRM Suggested Methods. E.T. Brown (ed), pergamon, Oxford, England, p. 211.

Maldonado, A. 2006. Caracterização das estruturas geológicas e estimativas da resistência ao cisalhamento das descontinuidades na mineração de cobre de Tintaya, Perú. Tesis de Maestría en Geología, UnB – Brasília – Brasil, p. 65-88.

Myers, G., 2001. Geologic report of the Tintaya mine area, Cusco department, Peru. Geology

Terrones, L., A.J., 1958. Structural control of contact metasomatic deposits in the Peruvian cordillera: American Institute Mining Metall. Petroleum Engineers, v. 211, p. 365-372.

Wyllie, D.C. & Mah, C.W., 2004. Rock Slope Engineering, Civil & Mining based on the 3rd edition (1981) by E. Hoek & J.W. Bray, 4th Edition, Spon Press, London, UK, p. 431.