

Peñasquito: crónica del descubrimiento, características del depósito y criterios de exploración

Álvaro López Picos¹, Roberto Yza Guzmán²

Resumen

Peñasquito es un sistema mineral de oro-plata-plomo-zinc de clase mundial relacionado a un intrusivo localizado en el distrito minero Concepción del Oro. La historia de la exploración del proyecto Peñasquito comienza en el año 1992 al reconocerse el potencial del área para contener un depósito mineral importante. Kennecott realizó la exploración de Peñasquito en el periodo 1992-1997 y después de un periodo de poca actividad, Western Silver retomó la exploración en el periodo 2002-2006. Fueron catorce años de intenso trabajo que culminaron con el descubrimiento del depósito polimetálico más importante en la historia de México y el mayor descubrimiento en su tipo de los últimos años. La construcción de la mina comenzó en el año 2007, en octubre de 2009 se produjeron los primeros concentrados y en el año 2010 se dio inicio a la producción comercial. La exploración de Peñasquito continuó después de la apertura de la mina aumentando las reservas de mineral y con el descubrimiento de nuevos cuerpos mineralizados a profundidad. El sistema de alteración-mineralización en Peñasquito tiene más de 12 km² y estaba bajo 30-40 metros de cobertura aluvial por lo que fue mayormente explorado por técnicas geofísicas y un programa de barrenos RAB para llevar a cabo mapeo geológico y muestreo de roca del lecho rocoso bajo el aluvión.

Entre los años 1996-2006 se perforaron 291433 metros en 592 barrenos principalmente de diamante. Las alteraciones hidrotermales principales incluyen (de más débil a más fuerte)pirita-carbonato, débil a fuerte cuarzo-sericita-

pirita-carbonato y cuarzo-sericita-pirita+/-tremolita+/-grosularita. Los diferentes estilos de mineralización incluye Au-Ag-Pb-Zn diseminado en dos grandes brecha-pipes, cuerpos de sulfuros en stockworks de Ag-Pb-Zn-Au tipo Chile Colorado, estructuras de alta ley de Au y Ag-Pb-Zn-Au, sulfuros masivos en mantos, mineralización tipo skarn y un pórfido de Cu.

Introducción

El descubrimiento del sistema mineral polimetálico de clase mundial Peñasquito ha despertado un enorme interés en la exploración por este tipo de yacimientos, principalmente en la región que rodea al distrito minero Concepción del Oro.

Diversos artículos e informes técnicos han sido escritos sobre Peñasquito donde se detalla principalmente la geología local del depósito, el amplio sistema de alteración-mineralización, las enormes reservas de oro-plata-plomo-zinc, el sistema de minado y la producción anual y vida estimada de la mina, pero hasta hoy la crónica detallada del descubrimiento del depósito mineral polimetálico más importante en la historia de México sigue siendo un enigma, así como las características y respuestas geológicas, geoquímicas y geofísicas que presentan cada uno de los diferentes estilos de alteración- mineralización y que llevaron al descubrimiento de los cuerpos minerales que incluye el depósito y que constituyen los criterios de exploración que de manera directa pueden ser usados para la exploración de nuevos proyectos estilo Peñasquito en la región y a lo largo de toda la Provincia Geológica de la Mesa Central en México.

¹Geólogo consultor, Guadalajara, Jalisco, México

²Geólogo consultor, Chihuahua, Chihuahua, México



Figura 1. Localización de Peñasquito

Peñasquito se localiza en el distrito minero Concepción del Oro, en la porción noreste del Estado de Zacatecas, aproximadamente a 200 km en línea recta al noreste de la ciudad de Zacatecas, a 12 km al oeste del poblado de Mazapil, centrado en 24° 45' Latitud Norte y 101° 30' longitud Oeste, a una elevación entre 1950 y 2000 metros sobre el nivel del mar. El acceso principal es por una carretera pavimentada que parte desde la carretera número 54 aproximadamente a 25 km al sur de Concepción del Oro con rumbo a Nieves pasando por los poblados de Mazapil y Cedros (Figura 1).

Peñasquito está situado en un amplio valle limitado al norte por la Sierra El Mascarón y al sur por la Sierra Las Bocas. En general el terreno es plano con suaves colinas hacia los extremos norte y sur.

Breve historia del descubrimiento

“El Peñasco” era un afloramiento rocoso de unos 250 m² de área y unos 5 metros de altura que junto con otros pequeños afloramientos distribuidos a lo largo de una zona irregular de unos 100 X 50 metros constituían las únicas rocas in-situ localizadas en la parte centro-norte de un amplio valle orientado este-oeste (Valle de Mazapil) con más de 6 km de ancho el cual, excepto por estas rocas, estaba cubierto completamente por sedimentos recientes con espesores promedio de 30 a 40 metros en esta zona. En el Peñasco existía una pequeña obra minera desarrollada a lo largo de una delgada estructura con altos

valores de plata-plomo-zinc y pequeños terreros estaban en los márgenes del tiro. El Peñasco estaba localizado justo al lado sur del camino de terracería que comunicaba los poblados de Mazapil y Cedros. Por muchos años numerosos geólogos pasaron a lo largo de dicho camino y el Peñasco fue siempre una parada obligada aunque en su mayor parte nunca despertó el interés de ninguno de ellos.

En 1992 los geólogos de Kennecott Richard Leveille y Adrián Robles Salazar, en una visita de campo a esta zona se detuvieron en el Peñasco y al analizar el tipo de roca del afloramiento y encontrar entre los terreros fragmentos de pórfido cuarzo-feldespático y de brecha hidrotermal mineralizados con pirita, así como fragmentos de sulfuros masivos, reconocieron el potencial de dicho lugar para hospedar un prospecto tipo pórfido de cobre, un skarn o los tradicionales mantos y chimeneas de reemplazamiento de carbonatos de la región. En junio de 1992 Kennecott negocia los pequeños lotes que rodeaban el Peñasco y posteriormente obtiene los lotes Alfa y Beta, con el objetivo de explorar la zona buscando un sistema de pórfido de cobre oculto bajo la cobertura aluvial de este valle.

Kennecott Canadá Explorations Inc. (Minera Kennecott S.A. de C.V.) comenzó su exploración a pequeña escala en Peñasquito en 1992 y 1993 con los Geólogos Nick Hawkes como Jefe de Proyecto y Roberto Yza Guzmán como su asistente, realizando en este tiempo mapeo geológico, muestreo de rocas y estudios geofísicos de Magnetismo Terrestre, Polarización Inducida y CSAMT. En 1994 continúa con geoquímica de suelos y estudios geofísicos de CSAMT, Polarización Inducida de Reconocimiento (RIP tradicional en exploración por pórfidos) así como estudios Aeromagnéticos y Radiométricos, para poco después hacer el primer barrenos exploratorio (PÑ1) en dos etapas, Circulación Inversa hasta 211 metros y Diamante hasta 860 metros.

Durante los años 1995-1997 Kennecott lleva a cabo una intensa exploración que incluyó mapeo geológico y muestreo de suelos, sedimentos de arroyos y rocas; estudios geofísicos que incluyeron Magnetismo Terrestre, Gravimetría, CSAMT y diferentes tipos de Polarización Inducida, muestreo geoquímico tipo TRAC IV Barringer (experimental), un programa de barrenación tipo RAB

▶ A PROFUNDIDAD

(Rotary Air Blast) de 250 barrenos (9314 metros) que permitió muestrear la roca bajo el aluvión y hacer planos geológicos, de alteraciones y geoquímicos, seis facies de barrenación para totalizar 13935 metros de diamante y 9560 metros de Circulación Inversa (2349 metros totales en 71 barrenos), mapas superficiales (bajo el aluvión) y subterráneos de arcillas usando el Espectrómetro PIMA, amplios estudios petrográficos, estudios metalúrgicos y algunas dataciones de las rocas. Los resultados de esta etapa de exploración pueden resumirse como sigue:

- Se descubrió un sistema de alteración-mineralización de más de 9 km² bajo la cobertura aluvial.
- Se descubrieron y delinearón dos grandes diatremas mineralizadas en forma irregular.
- Se observó un fuerte zoneamiento geoquímico con un centro rico en cobre entre las diatremas
- Se identificaron diferentes estilos de mineralización que incluyen skarn, CRD-stockwork, diseminada y estructuras de alta ley.
- Se delineó parcialmente un cuerpo mineral tipo CRD stockwork (Chile Colorado) con un potencial inferido de 25 Mton @ 80 g/t Ag, 0.43 g/t Au, 1.17% Pb y 1.43% Zn (0.35 Moz Au y 65 Moz Ag).

Western Copper Holdings Ltd. (Western Copper) firmó una alianza con Kennecott para la exploración y desarrollo de depósitos minerales en México en enero de 1998 y terminada esta en mayo de 1999 Western Copper conservó los derechos del proyecto. En 1998 Western Copper llevó a cabo un programa de nueve barrenos de diamante (3185 metros) y estudios geofísicos de CSAMT Tensor. Esta etapa de exploración fue mayormente enfocada en la zona mineralizada Chile Colorado. No hay resultados relevantes que comentar de esta etapa de exploración.

Mauricio Hochschild & Cia. Ltda. (Hochschild) firmó un acuerdo con Western Copper para explorar y desarrollar Peñasquito en el año 2000 y realizó un programa de catorce barrenos a diamante (4601 metros) enfocados principalmente en Chile Colorado. Hochschild dio por terminado el acuerdo en junio de 2001. No hay resultados relevantes que comentar de esta etapa de exploración.

Western Copper retoma la exploración de Peñasquito en marzo de 2002 con los Geólogos Tom Turner como Gerente de Exploración en México y Álvaro López Picos como Jefe del Proyecto y cambió su nombre a Western

Silver Corporation (Western Silver) en 2003. En el periodo 2002-2006 Western Silver llevó a cabo una intensa exploración que puede ser subdividida en dos etapas.

Durante la etapa de exploración realizada en los años 2002-2003, Western Silver realizó una reinterpretación de los datos y un profundo cambio en el concepto y sistema de trabajo que se utilizaba hasta ese momento. La exploración completa fue enfocada a la zona mineral Chile Colorado con 34400 metros de barrenación a diamante en 93 barrenos y 12090 metros adicionales en 57 barrenos de Circulación Inversa y realizó un estudio tipo scoping-level del proyecto.

Al final de esta etapa de exploración las reservas totales del cuerpo mineral Chile Colorado incluyendo probadas, probables, medidas e indicadas son:

Reservas Totales de Chile Colorado: 173.6 Millones de Toneladas con:

- 0.31 g/t Au --- 1.73 Moz Au
- 31.6 g/t Ag – 176.4 Moz Ag
- 0.28% Pb ----- 0.486 Mtons (1071.6 Mlibras) Pb
- 0.76% Zn ----- 1.32 Mtons (2910 Mlibras) Zn

En la etapa de exploración realizada en los años 2004-2006 y habiendo terminado la exploración del cuerpo mineral Chile Colorado, Western Silver hace un estudio completo y reinterpretación del núcleo de barrenación y de toda la información dejada por Kennecott, lo que origina cambios drásticos en los objetivos de exploración. La exploración ahora es enfocada a las dos grandes diatremas existentes en el sistema, así como a otras anomalías tipo Chile Colorado.

Se llevan a cabo nuevos estudios geofísicos de Polarización Inducida y Gravimetría, se intensifica el programa de barrenación llegando a totalizar 171215 metros en 290 barrenos de diamante en esta etapa. Se llevan a cabo programas de barrenación para estudios metalúrgicos (4016 metros en 13 barrenos), se hacen 11 barrenos (4126 metros) de núcleo orientados con fines geotécnicos y se realizan estudios de Polarización Inducida y 11 barrenos de diamante (4559 metros) en áreas de condeñación. En el año 2004 se hace un estudio de pre-factibilidad y en el año 2005 se hace el estudio de factibilidad, el que es actualizado en el año 2006. En esta etapa se descubren los nuevos y enormes cuerpos mineralizados de oro-plata-plomo-zinc llamados la Brecha del Peñasco, la

Brecha azul (Luna Azul y Azul-NE) y los cuerpos de plata-oro-plomo-zinc tipo Chile Colorado llamados La Gobernadora y Azul NE-La Palma entre otros, se reconocen las características del sistema mineral y los diferentes estilos de mineralización y se realiza la codificación de todo ello para el trabajo digital de la información. Al final de esta etapa de exploración las reservas totales de Peñasquito incluyendo probadas, probables, medidas e indicada son:

Reservas Totales de Peñasquito en el año 2006: 872.5 Millones de Toneladas con:

- 0.46 g/t Au --- 12.8 Moz Au
- 29.3 g/t Ag --- 821.9 Moz Ag
- 0.32% Pb ----- 2.4 Mtons (5291 Mlibras) Pb
- 0.71% Zn ----- 5.3 Mtons (11685 Mlibras) Zn

Glamis Gold Corporation (Glamis) compró a Western Silver en mayo de 2006 y continuó con los programas de exploración-barrenación ya establecidos por un corto tiempo. Goldcorp Inc. (Goldcorp) compró a Glamis en noviembre de 2006 y comenzó la construcción de la mina en 2007. En octubre de 2009 se produjeron los primeros concentrados de plomo y zinc. Las instalaciones incluyen una planta de lixiviación con capacidad de procesar 25000 t/d de mineral oxidado y una planta de flotación con capacidad de procesar 130000 t/d de sulfuros. Cuando la producción alcance su nivel óptimo Peñasquito producirá anualmente 0.5 Moz Au, 28 Moz Ag, 200 Mlibras de Pb y 450 Mlibras Zn.

Las reservas totales de Peñasquito incluyendo probadas, probables, medidas e indicadas en 2009 son: 1436.5 Millones de Toneladas con:

- 0.49 g/t Au --- 22.75 Moz Au
- 30.22 g/t Ag -- 1396.73 Moz Ag
- 0.33% Pb ----- 4.1 Mtons (9039 Mlibras) Pb
- 0.73% Zn ----- 8.9 Mtons (19621 Mlibras) Zn

Goldcorp ha continuado con una intensa exploración de Peñasquito, tanto para incrementar las reservas minerales como buscando nuevos objetivos de exploración. El descubrimiento de mantos de sulfuros tipo CRD adyacentes a la brecha El Peñasco, skarn de pirita-calcopirita entre las dos diatremas y el hallazgo de un pórfido de cobre con oro y molibdeno en el extremo NE del sistema, todos ellos a profundidades mayores a 800 metros, ofrece la posibilidad de que estas zonas sean suficiente-

mente económicas para soportar una posible explotación subterránea de estos minerales en el futuro.

Las reservas totales actuales de Peñasquito reportadas por Goldcorp el 31 de diciembre de 2012 son: 1784.78 Millones de Toneladas con:

- 0.33 g/t Au --- 19.16 Moz Au
- 20.29 g/t Ag -- 1164.04 Moz Ag
- 0.19% Pb ----- 3.41 Mtons (7514 Mlibras) Pb
- 0.47% Zn ----- 8.37 Mtons (18454 Mlibras) Zn

Resumen geológico y características del sistema

Geología regional

Peñasquito es un sistema mineral de oro-plata-plomo-zinc relacionado a un intrusivo localizado en el extremo occidental del distrito minero Concepción del Oro, en el noreste de Zacatecas. El distrito se localiza en la Sierra Madre Oriental, en la parte Sur del Cinturón de pliegues orientados E-W, justo donde los pliegues se curvan hacia el Sur para formar el cinturón de pliegues orientados N-S (Curvatura Monterrey) (Figura 2).

La Sierra Madre Oriental es una secuencia de sedimentos marinos de 2.5 km de potencia, depositados durante el periodo Jurásico-Cretácico. Consiste de una potente secuencia de sedimentos terrígeno-calcáreos turbidíticos subyacida por una gruesa secuencia de rocas calcáreas. Esta secuencia marina fue deformada y plegada en una serie de anticlinales-sinclinales orientados NW-SE a E-W durante la Orogenia Laramide. Las rocas más antiguas en la zona del proyecto son las calizas masivas de la Formación Zuloaga sobreyacidas por calizas arenosas de la Formación La Caja del Jurásico superior. Sobre éstas se encuentra la secuencia de calizas Cretácicas formada por las Formaciones Taraises, Cupido, La Peña y Cuesta del Cura.

Sobre esta secuencia calcárea están las lutitas calcáreas de la Formación Indidura, sobreyacidas a su vez por una secuencia de lutitas-areniscas calcáreas de la Formación Caracol, ambas del Cretácico superior. Las últimas están cubiertas por el Conglomerado Mazapil del Terciario.

El distrito Concepción del Oro se encuentra en la intersección de un trend de intrusivos magnéticos ENE que incluyen a Pico de Teira, Nuevo Rodeo, Rocamontes y Saltillito, con otro trend de intrusivos WNW que se ex-

A PROFUNDIDAD

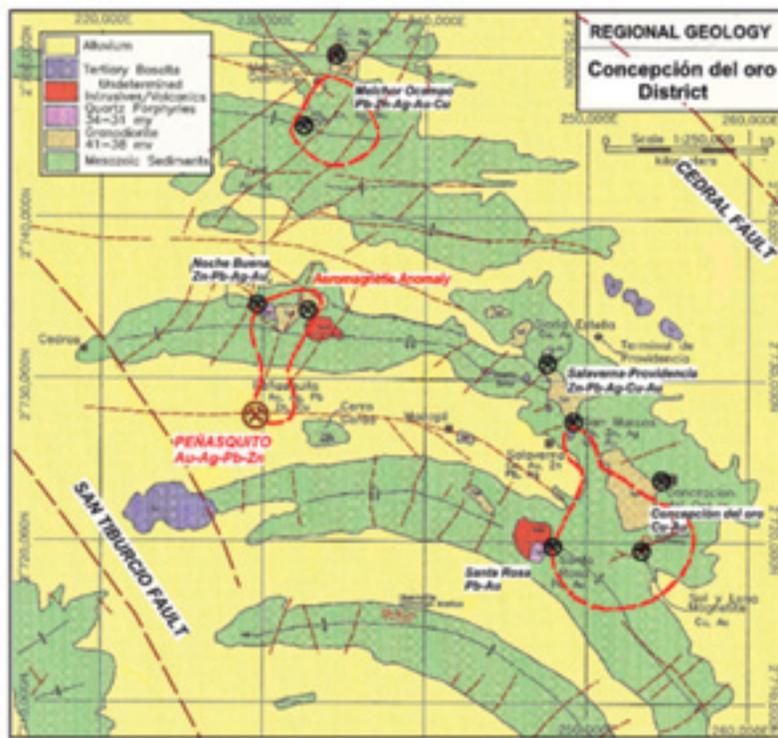


Figura 2. Geología regional del distrito minero Concepción del Oro

tiende del sur de Torreón hacia Tamaulipas (N. Hawkes, 1997). Grandes stocks granodioríticos del Eoceno superior al Oligoceno medio intrusionan a los sedimentos en el distrito minero y todos los depósitos minerales conocidos en el distrito están espacialmente relacionados a dichos cuerpos intrusivos. En Concepción del oro y en Noche Buena (norte de Peñasquito) el núcleo del anticlinal fue intrusionado por stocks de Granodiorita de biotita de 41 m.a.

Los depósitos minerales en el distrito incluyen skarns de oro-cobre en Concepción del Oro y Aranzazú y ricos mantos y chimeneas de plata-plomo-zinc de gran extensión vertical (>1000 metros) en Providencia-Salaverna y Noche Buena.

Geología local

Peñasquito se encuentra ubicado en el Valle de Mazapil, entre dos prominentes anticlinales orientados este-oeste formados por sierras calcáreas. La Formación Caracol subyace el piso del valle, con una estratificación subhorizontal, y es la roca huésped de la mayor parte del sistema mineral.

El sistema mineral Peñasquito era casi completamente ciego. La geología local de Peñasquito incluía un conjunto de pequeños afloramientos y un peñasco de unos 250 m² en un área de 100 X 50 metros rodeado por sedimentos recientes. Estos afloramientos correspondían a una brecha hidrotermal de fragmentos de la Formación Caracol y algunos fragmentos de intrusivo en una matriz molida mixta compuesta de sedimentos y roca ígnea cuarzo-feldespática. Las únicas unidades litológicas que se cortaron durante la barrenación 1994-2006 fueron la Formación Caracol que subyace al valle

bajo la cobertura aluvial hasta una profundidad de 830 metros; Indidura con espesores de hasta 180 metros y la parte superior de Cuesta del Cura.

Se piensa que un cuerpo mayor de granodiorita de unos 40 m.a. subyace la zona de Peñasquito a una profundidad mayor a 1.5 km. Esta interpretación se basa en un gran alto magnético que domina la respuesta magnética de la región desde el valle de Mazapil (Peñasquito) hasta la zona minera Noche Buena, donde aflora. Este cuerpo intrusivo a su vez fue intrusionado por uno o más stocks de pórfido cuarzofeldespático de 32 m.a. cuyo emplazamiento formó un amplio halo de alteración hidrotermal filica que varía de una zona exterior de piritita diseminada y vetillas de calcita-piritita de baja temperatura, a una zona interior de cuarzo-sericita-piritita-tremolita-grosularita.

Existen en Peñasquito dos grandes brecha-pipes/ diatremas que se cree está relacionadas a uno o más stocks de pórfido cuarzo-feldespático y actividad freatomagmática. Estas brecha-pipes penetraron en forma explosiva los sedimentos mesozoicos y se piensa que alcanzaron la paleo-superficie. Las brechas El Peñasco y Azul, ubicadas al noroeste y sur del sistema mineral tienen forma

▶ A PROFUNDIDAD

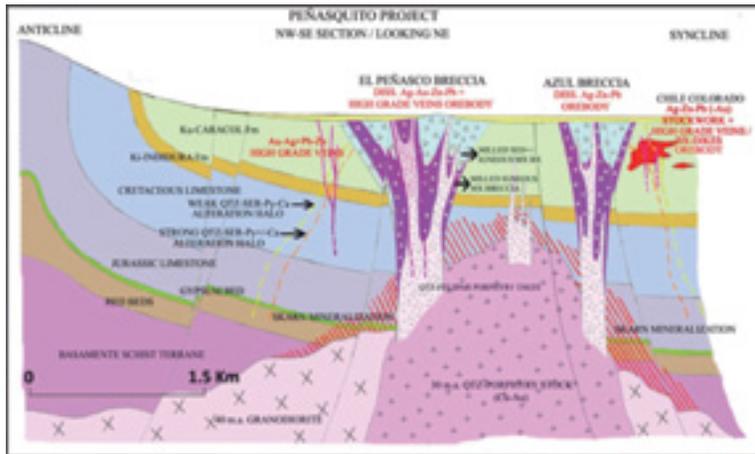


Figura 3. Sección transversal y modelo geológico de Peñasquito.



Figura 4. Mapa Geológico-Estructural y Minas Mayores de la Mesa Central (Modificado de Nieto et al, 2005).

de embudo y son de dimensiones en superficie de 1000 X 900 metros y 750 X 600 metros respectivamente y están separadas en sus centros 1.5 km. Las brecha-pipes están separadas por una falla este-oeste, presentan diferente grado de complejidad y parecen tener un diferente nivel de erosión. Las dos brechapipes en su parte más profunda parecen estar completamente constituidas por pórfido cuarzo-feldespático (QFP) el que se proyecta hasta la superficie actual (bajo el aluvión) en forma de diques y

pequeños stocks a lo largo de los embudos que forman las diatremas. Estos diques y stocks están comúnmente rodeados por una brecha hidrotermal compuesta por fragmentos redondeados de sedimentos y pórfido soportados por una matriz ígnea cuarzo-feldespática molida (Bxi). Una segunda brecha hidrotermal compuesta de fragmentos redondeados de sedimentos y ocasionales de pórfido con matriz mixta de roca ígnea y sedimentos molidos (Bxm) comúnmente se encuentra envolviendo tanto a la brecha de matriz ígnea como parcialmente a los diques de pórfido. La brecha de matriz mixta se hace más abundante cuando se acerca a la superficie mientras la brecha de matriz ígnea que es mucho mayor a profundidad reduce su volumen cerca de la superficie. La brecha-pipe El Peñasco aflora en la superficie (bajo el aluvión) como una brecha de matriz mixta rodeando a diferentes diques, mientras que la brecha-pipe Azul presenta parcialmente en la cima una última brecha compuesta por fragmentos y bloques de sedimentos (Caracol) mayormente autosoportada (Bxs), donde se conservan todavía evidencias de estratificación y pueden verse extensas capas horizontales de tobas félsicas que parecen haber sido depositadas en lagunas superficiales posiblemente formadas en el cráter de erupción de esta diatrema. Ambas brecha-pipes a lo largo de sus contactos sub-verticales con la roca encajonante usualmente presentan una brecha de bloques de sedimentos sin matriz de varios metros de espesor (Figura 3).

Las brecha-pipes El peñasco y Azul presentan un grado muy diferente de complejidad. Mientras la Brecha Azul es un embudo de composición muy simple, compuesta en su gran mayoría por brecha hidrotermal y sólo uno o dos pequeños stocks de pórfido cuarzo-feldespático y felsita (Fi), la Brecha El Peñasco es una brecha hidrotermal cruzada por un enjambre de diques y stocks de pórfido cuarzo-feldespático (QFP), diques-brecha cuarzo-feldespáticos (lbx), diques de felsita (Fi) y diques pofidíticos tardíos (Gpd).

Estructura

Peñasquito está situado entre dos prominentes anticlinales, en el valle que forma la zona del sinclinal, donde la Formación Caracol presenta estratificación sub-horizontal con ligera inclinación al oeste. Existen al menos tres sistemas mayores de fallas-fracturas afectando la zona. El primero y mayor de ellos tiene una orientación NW-SE

▶ A PROFUNDIDAD

al parecer inclinado al NE. Está principalmente representado por dos fallas mayores que bordean a la región de Concepción del Oro a lo largo de sus flancos oeste (Falla de San Tiburcio) y este (Falla de Cedral) separadas una de la otra unos 40 km.

Las dos brecha-pipes del sistema Peñasquito se alinean a lo largo de fallas y fracturas con esta orientación. Un segundo sistema de fallas-fracturas está orientado NE-SW y conecta al sistema mineralizado Peñasquito con la zona minera Noche Buena. El tercer sistema estructural es E-W y está representado entre otras por la falla que se extiende a lo largo del valle de Mazapil entre las dos brecha-pipes.

Nieto Samaniego (2005) extiende el sistema de fallas Taxco-San Miguel de Allende hacia el norte rumbo a la Sierra de Catorce y grandes depósitos auríferos como Cerro San Pedro, Charcas, Santa María de la Paz y Real de Catorce se alinean aproximadamente a lo largo de su traza. Los sistemas de fallas mayores NW-SE San Tiburcio y Cedral que bordean al distrito Concepción del Oro podrían representar la extensión más al noroeste de este sistema estructural (Figura 4).

Alteración

El sistema de alteración-mineralización en Peñasquito tiene dimensiones aproximadas de 4.5 km este-oeste por 3.5 km norte-sur y yacía bajo 30-40 metros de cobertura aluvial.

Existe un amplio halo de alteración hidrotermal filica incluyendo diferentes niveles de intensidad rodeando ambas brecha-pipes en este sistema. Dicha alteración gradúa a arreglo de retro-skarn a profundidad y cerca de los cuerpos intrusivos.

La zona de alteración más débil del sistema consiste de un halo externo de vetillas de calcita-pirita y pirita diseminada (PC) la que gradúa a un halo de alteración de cuarzo-sericita- pirita-carbonato (QSPC) que puede ser QSPC-débil presentando moderada a fuerte silicificación con menor blanqueamiento-sericitización, a QSPC-fuerte con fuerte silicificación-blanqueamiento-sericitización de la roca, la que es la alteración más ampliamente extendida en superficie. Esta alteración gradúa a zonas irregulares de cuarzo-sericita-pirita (QSP), cuarzo-sericita-pirita-tremolita (QSPT) y cuarzo-sericita-pirita-tremolita-grosularita (QSPTG) siendo estas cada vez más

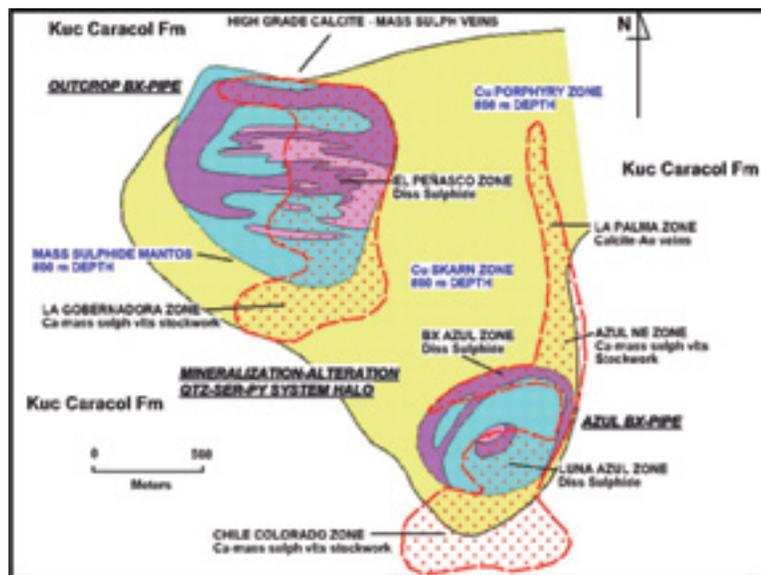


Figura 5. Croquis del halo de alteración – estilos de mineralización de Peñasquito

comunes y extensas en zonas profundas y cercanas a los cuerpos intrusivos (Figura 5).

Otras alteraciones locales en el sistema incluyen argilización tardía sobrepuesta y propilítica adyacente a diques de composición intermedia. La Formación Indidura presenta alteración tipo skarn, mientras las calizas de la Formación Cuesta del Cura presentan recristalización, marmolización y alteración de skarn. La oxidación se extiende desde la superficie hasta aproximadamente 80 metros de profundidad.

Mineralización

La complejidad litológica y de alteraciones hidrotermales en Peñasquito también está reflejada en múltiples estilos de mineralización, los cuales ocurren dentro y en los bordes de la zona de alteración. Los diferentes estilos de mineralización en Peñasquito incluyen: Mineralización diseminada de Au-Ag-Pb-Zn en las diatremas; Stockworks de Ag-Pb-Zn- Au tipo Chile Colorado; Estructuras de alta ley de Au y de Ag-Pb-Zn-Au; Sulfuros masivos tipo manto; Mineralización tipo skarn; Pórfido de Cu-Mo.

Las brecha-pipes presentan mineralización diseminada, en fracturas y relleno de cavidades de pirita-esfalerita-galena-sulfosales +/- argentita +/- fluorita. Todos los tipos de brechas hospedan mineralización de este tipo así como todas las variedades de diques pueden igualmente estar mineralizados. Incluye mineralización de sulfuros en fracturas +/- vetillas +/- irregularmente diseminados en los diques de QFP.

Los cuerpos tipo Chile Colorado se presentan en forma de stockworks de vetillas y fracturas de sulfuros masivos, así como sulfuros diseminados en zonas más arenosas y diques brecha parcialmente cementados por sulfuros masivos. Se presentan en dos estilos diferentes: stockworks de pirita- esfalerita-galena+/-calcita-sulfosales ricos en Ag/Pb/Zn localizados en zonas con alteración débil en el borde del halo de alteración (solo en Chile Colorado); y stockworks de pirita-esfalerita-tetraedrita ricos en Au-Zn con valores bajos de Ag-Pb localizados en zonas de alteración fuerte (en Chile Colorado, La Gobernadora y Azul NE-La Palma Sur).

Estructuras de calcita con alta ley de oro, de sulfuros masivos con alta ley de oro-plata-plomo-zinc, diques-brecha cementados por sulfuros masivos y fallas mineralizadas ricas en sulfuros-óxidos molidos y en fragmentos existen tanto dentro de las brecha-pipes como en los stockworks, en la zona norte bordeando al sistema de alteración y en La palma al este del sistema mineralizado.

Mantos de sulfuros masivos habían ya sido reportados durante la barrenación anterior al año 2006, pero en trabajos de exploración posteriores Goldcorp descubrió cuerpos sub-horizontales (mantos) y sub-verticales (chimeneas) de esfalerita-galena-pirita bajo zonas de sulfuros diseminados adyacentes a la brecha El Peñasco con altos valores de zinc-plomo-plata con cobre y oro.

Mineralización tipo skarn había sido intersectada antes del año 2006 por barrenos exploratorios profundos en las Formaciones Indidura y Cuesta del Cura en la zona central del halo de alteración-mineralización. En los últimos años Goldcorp ha descubierto un skarn de cobre en zonas profundas entre las dos brecha-pipes, lo que confirma el enriquecimiento geoquímico de cobre en esta zona reportado por Kennecott.

El hallazgo de un pórfido de cobre-molibdeno descubierto por Goldcorp en el extremo noreste del sistema de alteración-mineralización confirma el modelo que se viene presentando desde los inicios de la exploración en Peñasquito.

Modelo geológico y génesis del sistema mineralizado Peñasquito

Las diatremas son características comunes en ambientes de pórfidos de cobre, pero es muy común que sean posteriores al cuerpo mineral por lo que no están mineralizadas o pueden llegar a ser parte del mineral de un depósito sólo cuando tienen una alta concentración de clastos mineralizados transportados de zonas mineralizadas profundas. Sin embargo, en algunas ocasiones, como es en Peñasquito, las diatremas se pueden formar antes que la mineralización y entonces llegan a ser parte de las rocas huésped del sistema mineralizado.

Peñasquito es un sistema mineral que consiste de dos grandes brecha-pipes/diatremas desarrolladas como resultado de la actividad hidrotermal relacionada con un intrusivo. La mayor parte del mineral en Peñasquito se hospeda en estas brecha-pipes, por lo que resulta indudable que éstas fueron formadas antes que la mineralización tuviera lugar. El inicio del sistema mineralizado Peñasquito ocurre hace unos 40 m.a. con el emplazamiento de varios stocks granodioríticos intrusionando a la secuencia de rocas calcáreas plegadas que conforman una serie de anticlinales sinclinales en dicha región. Estos stocks granodioríticos fueron a su vez intrusionados por pórfidos cuarzo-feldespáticos de unos 32 m.a. La intrusión de estos cuerpos ígneos tuvo lugar en la región aprovechando la zona de debilidad ocasionada por la curvatura que presenta aquí la secuencia calcárea plegada y el cruce de al menos dos grandes sistemas estructurales.

Grandes sistemas mineralizados tipo skarn y mantos y chimeneas de reemplazamiento de carbonatos fueron formados en el eje de algunos anticlinales de la región.

Uno o más de estos stocks de pórfido intrusionaron a la granodiorita y rocas calcáreas que subyace el centro del sinclinal que forma el Valle de Mazapil formando extensas zonas de mineralización tipo skarn. Dos grandes diatremas penetraron en forma explosiva los sedimentos mesozoicos desde el pórfido hasta alcanzar la paleosuperficie, siendo posteriormente penetradas por diques y pequeños stocks. El emplazamiento del pórfido y las brecha-pipes y la intensa actividad hidrotermal relacionada formaron un amplio halo de alteración fílica en los sedimentos terrígenos que sobreyacen a la secuencia calcárea ocasionando al mismo tiempo grandes zonas de intenso fracturamiento. La intensa actividad hidrotermal

▶ A PROFUNDIDAD

que tuvo lugar ocasionada por el calor de los intrusivos causó que los fluidos mineralizantes tomaron como canales alimentadores grandes fallas y fracturas de la zona y los contactos de diques con las rocas sedimentarias y las brecha-pipes depositando mineralización de alta temperatura en forma de stockworks de vetillas y vetas de sulfuros masivos tipo reemplazamiento en los sedimentos alterados, y mineralización diseminada y en fracturas en las brechapipes y diques relacionados. Finalmente una falla E-W dislocó el centro del valle entre las brecha-pipes y ocasionó que ambas brechas presenten hoy un nivel diferente de erosión (Figura 3).

Técnicas de exploración

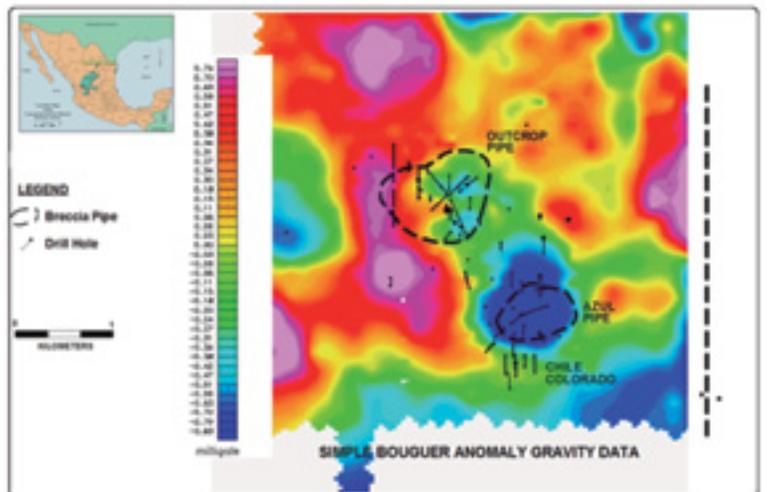
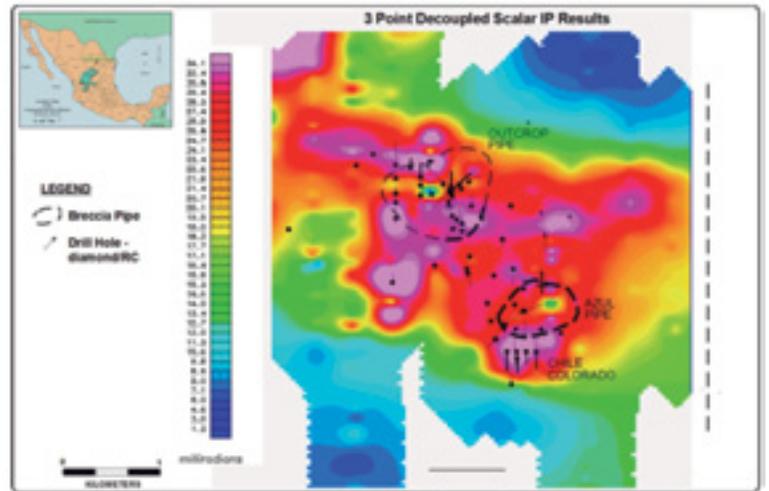
Geofísica

Peñasquito está situado en el Valle de Mazapil y por su naturaleza plana y carente de afloramientos de roca la exploración inicial fue llevada a cabo en gran medida por métodos indirectos. Técnicas geofísicas aéreas y terrestres fueron ampliamente utilizadas, incluyendo gravimetría, magnetometría, radiometría, polarización inducida y CSAMT. En resumen, una anomalía gravimétrica localizó la brecha azul; una anomalía de CSAMT localizó Chile Colorado que también es bien delineado por la polarización inducida; el estudio de RIP mostró un sistema de gran tamaño rico en sulfuros; la polarización inducida (escalar) delineó aproximadamente los límites del sistema. La lista adjunta muestra los resultados de los estudios geofísicos y su utilidad (N. Hawkes, 1998; H. J. Rasmussen, 2000):

Geoquímica

Un programa de 250 barrenos RAB (Rotary Air Blasting) fue llevado a cabo por Kennecott durante la exploración de Peñasquito. Los barrenos cruzaron la cobertura aluvial y se tomaron muestras de esquirlas del lecho rocoso bajo el aluvión, lo que permitió la elaboración de un excelente set de mapas geoquímicos de la roca bajo el aluvión.

El análisis de las esquirlas de roca indicó claramente un fuerte zoneamiento geoquímico que existe en Peñasquito, con un centro más rico en cobre entre ambas brecha-pipes y aumentando logarítmicamente con la profundidad. Rodeando a este centro de cobre hay un halo de zinc-oro y finalmente un halo externo de plomo-plata rodeando al de zinc-oro. El zoneamiento existe tanto en planta como a profundidad (N.Hawkes, 1998).



Otras características geoquímicas notadas por Hawkes son:

- Una fuerte correlación en Au-Ag-Pb (AS-Sb-Zn-Cd-Cu) la que claramente es la suite mineralógica de Peñasquito
- El aluminio y magnesio así como el estroncio, el níquel y el vanadio están empobrecidos sobre las brechapipes.
- La brecha El Peñasco presenta un lineamiento E-W a NW a lo largo de su centro con valores altos de Cd, Sb, Cr, P y Na que reflejan la traza de los diques de pórfido que la cortan.

Figura 6. Peñasquito: Polarización Inducida y Gravimetría (Rasmussen et al, 2000).

RIP (Reconnaissance IP)	Detectó anomalías de 25-63 ms en un background de 5-7 ms. El área de la anomalía corresponde aproximadamente con el sistema de alteración-mineralización
Polarización Inducida (Escalar)	Delimitó el área del sistema de alteración-mineralización, muestra la zona Chile Colorado y en la porción sur de la brecha El Peñasco
Magnetometría	Una gran anomalía magnética cubre desde Peñasquito hasta Noche Buena. Representa un intrusivo granodiorítico profundo y oscurece la respuesta magnética local en Peñasquito
Gravimetría	Un bajo gravimétrico delimita la zona de las brecha-pipes. El bajo gravimétrico más intenso es la Brecha Azul, mientras El Peñasco tiene una respuesta menor por el complejo sistema de diques. Un débil alto gravimétrico señala a Chile Colorado.
CSAMT	En general los pórfidos son resistores y los stockworks de sulfuros conductores. Zonas con más de 15% de pirita diseminada también son conductores. La anomalía puntual más fuerte es Chile Colorado y otro La Gobernadora. Señala el halo de alteración-mineralización.
Radiometría	No refleja al sistema. Los lineamientos siguen los arroyos.

Conclusiones

Es claro que además de la compleja historia geológica de la formación del sistema mineral Peñasquito, existe también una compleja historia de exploración para su descubrimiento. Catorce años de intensos trabajos de exploración fueron necesarios para el éxito de este proyecto. La importancia del trabajo realizado durante el desarrollo de la exploración de Peñasquito por las compañías mineras Kennecott y Western Silver es indudable. Numerosos geólogos y técnicos conformaron el equipo de exploración desde 1992 hasta 2006 y la participación de cada uno de ellos es muy valiosa, pero es indudable la importancia de la visión que tuvieron los geólogos Richard Leveille y Adrián Robles para recomendar el proyecto y de los geólogos Nick Hawkes y Roberto Yza de Kennecott y Tom Turner y Álvaro López de Western Silver para desarrollar la intensa exploración que llevó finalmente al descubrimiento del depósito polimetálico de clase mundial que es hoy la mina en producción Peñasquito.

Referencias bibliográficas

- Busek, P.R., 1966. Contact Metasomatism and Gold Deposition Concepción del Oro, México: Economic Geology v. 61, p. 97-163.
- Consejo de Recursos Minerales, Monografía Geológico-Minera del Estado de Zacatecas, SEMIP, Subsecretaría de Minas e industria Básica, 1992.
- Glamis Gold Limited, M3 Engineering and Technology Corp., 2006. Peñasquito Feasibility Study, 100,000 MTPD (NI 43-101 Technical report, July 2006).
- Goldcorp, 2012. Annual information form for the financial year ended December 31, 2011.
- Goldcorp, 2012. One Company, Thousands of Stories, Annual Report 2012.
- Hawkes, N., 1997. Peñasquito case history, a chronology of events (1992 to February 1997), informe privado de Minera Kennecott S.A. de C.V., Guadalajara, Jalisco, México.
- Hawkes, N., 1997. Peñasquito Project Exploration Summary, Diciembre de 1997. Informe privado de Minera Kennecott S.A. de C.V., Guadalajara, Jalisco, México.
- Nieto-Samaniego, A.F., Alaniz-Álvarez, S.A., and Campubi, A., 2005. La Mesa Central de México: estratigrafía, estructura y evolución tectónica cenozoica. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, Tomo LVII, núm. 3, p. 285-318.
- Rasmussen, H.J., Hawkes, N., and Robles, A., 2000. Peñasquito, Zacatecas: A Geophysical Case Study. PG III Northwest Mining Association's 1998. Practical Geophysics Short Course Selected Papers.
- Silver Wheaton, Peñasquito Polymetallic Operation, Zacatecas State, México (NI 43-101 Technical Report, 2010).
- Turner, T., 2009. La geología y los depósitos minerales del proyecto Peñasquito, Zacatecas, México. Geología Económica de México, SGM y AIMMGM, 2009.
- Turner, T., López, A., and Guerrero, J., 2003. Proyecto Peñasquito: un depósito de plata con potencial de gran tonelaje. XXV Convención AIMMGM, Memorias Técnicas, Acapulco, Guerrero, 2003.
- Western Silver Corporation, M3 Engineering and Technology Corp., 2005. Peñasquito Feasibility Study, Volume I, (NI 43-101 Technical Report November 2005).
- Western Silver Corporation, 2004. Better Living Through Silver, Annual Report 2004.