MÉTODOS MODERNOS DE EXPLORACIÓN MINERA*

por

Alberto J. Terrones Langone

GENERALIDADES

La creciente demanda de metales y el paulatino agotamiento de las reservas conocidas en el mundo, ha ocasionado un notable incremento en las actividades de exploración minera encaminadas a descubrir nuevas fuentes de producción mineral, ya sea en áreas vírgenes o en zonas o distritos mineros ya conocidos. Por otra parte, es preciso reconocer que las manifestaciones superficiales que indiquen extensas zonas mineralizadas son cada vez más escasas, y se limitan a zonas económicamente inaccesibles o bien se encuentran en países políticamente inestables o en los cuales no existe un ambiente favorable para que la iniciativa privada arriesgue las grandes inversiones que demanda la apertura de toda operación minero metalúrgica. De aquí que el descubrimiento de minas, ya sean grandes o medianas, se

(*) Conferencia presentada ante los miembros de la Sociedad Geológica Mexicana y de la Asociación de Geólogos Petroleros. Original recibido en octubre de 1955.

(**) Geólogo Consultor.

vaya restringiendo cada vez más al estudio cuidadoso de zonas mineralizadas, con expresiones superficiales poco impresionantes, para que, previo análisis geológico detallado, induzcan a una exploración sistemática e inteligente encaminada a descubrir yacimientos importantes en profundidad.

Aún en países relativamente poco explorados como es el Perú, el descubrimiento de grandes distritos mineros con extensos afloramientos es cosa que prácticamente pertenece al pasado. En la actualidad, el descubrimiento de grandes yacimientos minerales que favorezcan, digamos, una operación de más de 500 toneladas diarias, radica esencialmente en áreas donde la erosión tan sólo ha puesto de manifiesto expresiones relativamente insignificantes y aparentemente intrascendentes de lo que puede ser gran tonelaje de mineral de alta o baja ley en profundidad. Mas no todas estas expresiones relativamente poco atractivas pueden significar grandes volúmenes de mineral a profundidad; es por esto que una de las principales características de la exploración minera moderna radica en la naturaleza metódica y sistemática de las investigaciones geológicas preliminares encaminadas a decidir cual de todas estas expresiones de mineralización o afloramiento relativamente insignificantes puede corresponder a manifestaciones de grandes tonelajes de mena en profundidad. De aquí las siguientes fases que deben servir de norma a toda organización o empresa minera moderna que se avoque a la exploración inteligente o de los recursos minerales de una nación:

1. Las exploraciones primero deben encauzarse, en forma sistemática a lo largo de provincias metalogénicas reconocidas. Esto implica levantamientos y estudios geológicos que abarquen áreas geográficas de considerable extensión. La meta debe ser encontrar zonas, dentro de estas provincias metalogénicas, que a juicio de los geólogos presenten características que permitan suponer la existencia de posibles yacimientos importantes en profundidad.
2. Por eliminación se procede a planear y ejecutar investigaciones geológicas detalladas en aquellas zonas francamente mineralizadas que geológicamente presenten características más favorables para la existencia de yacimientos de considerable volumen y económicamente aprovechables. El objetivo es determinar la naturaleza, posición, orientación, longitud y costo de los trabajos de exploración primaria, tales como socavones, sondajes diamantinos, trincheras, etc., encaminados a probar la existencia de mineralización comercial en profundidad, indicando al mismo tiempo la potencialidad que puede esperarse del yacimiento o yacimientos que se investigan.
3. Conjuntamente con los métodos geológicos detallados se emplea los métodos geofísicos y geoquímicos de exploración que aplicados con cautela y buen juicio pueden concretar aún más la posición, dimensiones y profundidad del objetivo, reduciendo a un mínimo el costo total de los trabajos de exploración primaria requeridos

para probar la existencia o no existencia de un yacimiento comercial.

4. La ejecución de los trabajos de exploración primaria requiere también la vigilancia y atención constante del geólogo. Es ésta la fase decisiva en todo proyecto de exploración para definir si la propiedad minera que se investiga responde en tonelaje y ley a las aspiraciones de la empresa que ejecuta las exploraciones. El geólogo o ingeniero a cargo de la ejecución del proyecto debe estar continuamente alerta a los resultados de todos y cada uno de los trabajos de exploración que se ejecutan, ya sea para pararlos o modificarlos según lo exijan las circunstancias.
5. Si los resultados de la cuarta fase del proceso exploratorio indican, sin lugar a dudas, la existencia de un yacimiento de importancia, entonces prácticamente se puede considerar que se da comienzo a la vida activa de la nueva mina. Antes de iniciar todo trabajo de explotación preciso es ampliar, ubicar y preparar las reservas indicadas por la exploración primaria, teniendo siempre como mira la explotación más eficiente y económica que garantice el máximo de rendimiento a la producción futura de la mina en ciernes. Esta fase, que pudiera llamarse propiamente de desarrollo y preparación, tiene la doble finalidad de ubicar las reservas o potencial indicados en la fase de exploración primaria y de preparar la mina, por medio de obras convenientemente planeadas, para una explotación eficiente, compatible con la forma y extensión del yacimiento o yacimientos recién descubiertos.

Como es fácil de suponer, esta secuela de actividades que deben preceder a la iniciación de toda actividad de explotación minera moderna, entraña un enorme esfuerzo y la erogación de fuertes sumas para la empresa que genuinamente esté interesada en crear nuevas fuentes de trabajo. De todo esto se puede colegir que en la actualidad la creación de nuevas fuentes de producción minera depende esencialmente de los siguientes factores:

1. De la vigencia de una legislación minera y de un sistema tributario minero que se adapte a la realidad netamente minera de una nación, basándose en amplias facilidades para alentar a la iniciativa privada a crear nuevas fuentes de riqueza, energía, progreso y trabajo.
2. Del interés que los altos dirigentes de empresas mineras muestren por la organización y ejecución de trabajos de exploración.
3. De la existencia, dentro de toda empresa minera, de departamentos de exploración o cuerpo de geólogos e ingenieros bien organizados; y dotados —cuando menos— de los elementos modernos más indispensables de investigación geológico-minera.
4. De la capacidad técnica y visión de los geólogos mineros para evaluar las posibilidades mineras de cada región que se investigue y sobre sus decisiones respecto al mínimo de trabajos de exploración

primaria requeridos para probar la existencia o no existencia de un yacimiento comercial.

5. De la coordinación técnica dentro de toda empresa minera, entre geólogos, ingenieros de minas y metalurgistas, para la evaluación y estudios resultantes de toda exploración primaria, para decidir sobre el monto de inversiones iniciales, métodos y costos de explotación, tratamiento metalúrgico, vías de acceso, fuerza motriz, etc., requeridos para dar la última palabra sobre la forma en que se va a ejecutar las operaciones en la nueva mina.

A raíz de la promulgación del vigente Código de Minería en el Perú, la Cerro de Pasco Corporation procedió a crear un departamento de exploraciones dentro de esta empresa, dándole una amplitud de acción que no había tenido antes el departamento geológico. Las funciones del actual departamento de exploraciones de la Cerro de Pasco se circunscriben esencialmente a las cuatro primeras fases de la secuencia exploratoria anteriormente resumidas. La ejecución de la quinta fase o sea la exploración secundaria encaminada a la cubicación y ampliación de reservas indicadas por la exploración primaria y a la preparación de la mina para su explotación, es de la incumbencia del departamento de minas de esta empresa.

A continuación se describe brevemente algunas de las prácticas modernas de exploración minera ejecutadas por el departamento de exploraciones de la Cerro de Pasco Corporation durante los últimos cuatro años y medio.

EXPLORACIÓN REGIONAL

La exploración sistemática de provincias metalogénicas se ha emprendido hasta ahora en dos áreas geográficas, una cubriendo una extensión aproximada de 3,000 km.² en el sur del Perú y otra abarcando 800 km.² en la región central del país.

En el sur del Perú se ha utilizado las hojas a escala 1:200,000 de la Carta Nacional del Perú como base para el levantamiento geológico del área que se investigaba. El levantamiento geológico se combinó con un muestreo geoquímico preliminar, y para este efecto, gran parte de los datos geológicos y muestras para investigación geoquímica se obtuvieron teniendo como base alineamientos levantados con tránsito, o bien usando como base poligonales con brújula Brunton, cinta y altímetro. El costo de este tipo de investigación regional, incluyendo el muestreo geoquímico, fué del orden de \$ 5.20 (*) por km.²

En el caso de la investigación regional en la región del centro del Perú se ha utilizado aerofotografías para preparar el plano base para el levantamiento geológico. Sin tener un mosaico, el plano topo-

(*) Dólares de los EE. UU.

gráfico se ha preparado cuidadosamente, haciendo ajustes estereoscópicos de las copias de contacto, aproximadamente a escala 1:20,000. El ajuste lo ha efectuado el mismo geólogo que se hizo cargo del proyecto. Al mismo tiempo que preparaba el plano base, el geólogo iba haciendo una serie de interpretaciones de fotogeología que simplificaron notablemente el trabajo de campo. De esta manera ha sido posible predecir y hasta ubicar con cierta precisión las zonas mineralizadas u objetivos que merecen investigaciones geológicas más detalladas. Igualmente, el análisis fotogeológico de aerofotografías ha permitido planear, con toda anticipación, la extensión y localización de áreas cubiertas por suelo y pastos para muestreos geoquímicos preliminares. No se dispone todavía de cifras de costo de este tipo de exploración regional, pero un cálculo aproximado permite suponer que, incluyendo aerofotografías y muestreo geoquímico, el costo no debe exceder de \$11.80 (*) por km.²

La interpretación de aerofotografías y su uso en la exploración de provincias metalogénicas es un auxiliar poderoso y económico que acorta considerablemente el costo y tiempo del trabajo de campo, particularmente si se tiene en cuenta lo accidentado de la topografía en la cordillera peruana. La escala del levantamiento que se use para este tipo de investigaciones depende en gran parte de las características del medio geológico que circunda el tipo de yacimiento que se espera descubrir. Si por ejemplo, se trata de yacimientos de reemplazamiento de tipo mesotermal, genéticamente relacionado a zonas de fracturas, la escala de trabajo no debe ser menor de 1:20,000. Por otra parte, si se trata de pórfidos cupríferos o de yacimientos en tacitas o de granates cupríferos, la amplitud de las masas de roca intrusiva que pueden estar vinculados a un yacimiento es tal que permite usar escalas del orden de 1:50,000 y hasta de 1:100,000.

Actualmente en el Perú, el costo de un levantamiento aerofotogramétrico a escala 1:20,000, incluyendo preparación de mosaicos y entrega de copias de contacto, fluctuaría entre \$13.50 o \$16.50 por km.²

Preciso es señalar y hacer hincapié en la trascendencia que ha tenido para alentar este género de investigaciones regionales la adopción de normas que rigen el denuncia de concesiones de exploración, como lo establece el nuevo Código de Minería del Perú. Sin las disposiciones vigentes, sería poco probable que la exploración minera en el Perú se encauzase en forma científica y sistemática tal como lo viene efectuando la Cerro de Pasco Corporation.

EXAMENES GEOLOGICOS DETALLADOS

El examen geológico detallado de una zona mineralizada que se pretende explorar con el objeto de decidir si existen posibilidades para yacimientos importantes, depende en gran parte del levantamiento geo-

(*) Dólares de los EE. UU.

lógico de las áreas más críticas que, a juicio del geólogo, ameriten trabajos más serios e inversiones de mayor cuantía. El levantamiento geológico debe ser lo suficientemente exacto y lo suficientemente rápido como para permitir planear y ejecutar a la brevedad posible el mínimo de trabajos de exploración primaria necesarios para obtener el máximo de información requerida para establecer conclusiones en el menor tiempo posible. El factor tiempo es de enorme importancia en propiedades que se toman bajo contratos de opción o compra.

El levantamiento geológico detallado debe definir con claridad los objetivos que se pretende alcanzar, ya sea por medio de perforaciones, socavones, tiros, contrapozos, trincheras, etc. Se debe precisar con un margen tolerable de error las dimensiones, profundidad y extensión posible de los cuerpos mineralizados que se pretende alcanzar con los trabajos de exploración que más convenga, según el caso. Por eso el mayor énfasis posible debe dársele al mapeo de los afloramientos de estructuras mineralizadas, a las estructuras geológicas que proyectadas en profundidad pueden estar mineralizadas, a los horizontes estratigráficos que pueden ser susceptibles de reemplazamiento en profundidad, a la distribución de la alteración, etc.

En el caso de la exploración de pórfidos cupríferos se requiere un mapeo que diferencie los distintos tipos de roca susceptibles de contener mineralización diseminada de sulfuros, así como también la distribución de los distintos afloramientos favorables reconocibles como derivados de sulfuros lixiviados.

Esta clase de levantamientos geológicos generalmente se efectúa con plancheta, previo control topográfico de triangulación de segundo orden o de poligonales con tránsito y cinta de acero. En áreas donde ya existen concesiones mineras de distintos dueños, conviene siempre dedicar el tiempo necesario para establecer una red de triangulación que también sirva para ligar los distintos puntos de partida de todos los denuncios ubicados dentro del área que se investiga.

Las escalas de estos levantamientos geológicos detallados varían según el problema, desde 1:500 hasta 1:5,000, siendo esta última la más comúnmente usada. El costo del levantamiento depende naturalmente de la escala del plano, del grado de detalle, cuidado con que se efectúe el mapeo, y de la extensión y dificultades del terreno que se estudia. Las siguientes cifras dan una idea del orden de magnitud de distintos costos unitarios de mapeo geológico superficial según experiencias del departamento de exploraciones de la Cerro de Pasco Corporation durante los últimos cuatro años:

<i>Escala</i>	<i>Costo Unitario</i>
1:500	\$ 2900 por km. ²
1:2000	\$ 365 " "
1:2500	\$ 290 " "
1:5000	\$ 95 " "

Es indudable el hecho de que se ha operado un grado notable de adelanto en la técnica empleada en los métodos geofísicos aplicables a la exploración minera. En reciente artículo, el Dr. Arthur A. Brant (1) de la Newmont Exploration Ltd., publicado en el Mining Guidebook de marzo de 1955, menciona los métodos magnéticos, los de autopotencial, los de resistividad, los electromagnéticos, y aún hasta los sísmicos, como método que han registrado un grado perceptible de adelanto en aplicaciones a la exploración minera durante la última década. Particularmente se ha registrado innovaciones en lo que respecta a la nueva técnica del empleo de equipo geofísico aerotransportado. De perfeccionarse, esta técnica indudablemente tendría innumerables aplicaciones en nuestro País y en el Perú, particularmente en la exploración sistemática de nuestra Sierra Madre Occidental o de escarpados flancos orientales de los Andes peruanos y en exploración de extensiones del complejo cristalino precámbrico del escudo brasileño en la región amazónica. Las cautelosas predicciones del Dr. Arthur A. Brant (1) indican que no son de esperarse cambios repentinos y espectaculares en la invención de métodos excepcionales. En todo se espera un progreso gradual en cuanto a equipo, interpretación y mejor comprensión de casos. Igualmente menciona el Dr. Brant que se hace esfuerzos para mejorar la efectividad de métodos con equipo aerotransportado, particularmente en vuelos bajos por medio de helicópteros.

En virtud de un convenio especial entre la Cerro de Pasco Corporation y la Newmont Mining Corporation, se han utilizado en el Perú los servicios de una cuadrilla de geofísicos de la Newmont Exploration Ltd. de Jerome, Arizona, que dirige el Dr. Brant. En el Perú, estos trabajos estaban a cargo del geofísico canadiense Robert W. Baldwin, quien coopera con el departamento de exploraciones de la Cerro de Pasco Corporation en la prosecución de algunos programas sistemáticos de exploración.

Hasta ahora la aplicación de métodos geofísicos se ha limitado a proyectos de exploración encauzados en la investigación de pórfidos cupríferos en el sur del Perú. En este tipo de exploración se ha hecho uso del método de Brant para la determinación del porcentaje de sulfuros por volumen a profundidad. Como lo indica el Dr. Brant (1) en su artículo, este método eléctrico tan sólo es aplicable a la exploración de yacimientos con sulfuros diseminados como son los yacimientos de pórfido cuprífero. Este novísimo método eléctrico proporciona al geólogo minero los siguientes datos, valiosos por todos conceptos, para planear la ubicación de las perforaciones primarias (wildcat drilling) en los yacimientos de este tipo.

1. Planos con curvas equivolumétricas indicando anomalías que muestran contenidos de sulfuros en profundidad representados en porcentajes de sulfuros por volumen.

2. Profundidades a las cuales se espera encontrar los sulfuros, ya sea debajo de la zona de oxidación en un yacimiento lixiviado o bien debajo de rocas estériles post-minerales.

En el curso de la exploración sistemática de determinadas áreas del sur del Perú, resaltaron algunas zonas que en la opinión del departamento de exploraciones de la Cerro de Pasco Corporation presentaron características peculiares a los pórfidos cupríferos. Estas zonas, una vez mapeadas geológicamente, se refirieron a la cuadrilla de geofísicos para su levantamiento. Los resultados geofísicos se compararon críticamente con la información geológica disponible, tal y como se verá más adelante en un caso hipotético que ilustrará la combinación de métodos de exploración.

De todo esto se desprende que el gran valor del método Brant radica principalmente en su aplicación para descubrir yacimientos diseminados bajo rocas estériles. Es bien conocido el hecho de que en nuestra Sierra Madre Occidental lo mismo que en el sur del Perú existen corrientes volcánicas post-minerales que cubren posibles zonas mineralizadas. Una vez reconocida una ventana de pórfido mineralizado dentro de un marco de rocas volcánicas estériles post-minerales, es muy posible con el método Brant determinar las extensiones de sulfuros bajo cubiertas estériles fuera de los límites de toda predicción basada exclusivamente en datos geológicos superficiales. Por consiguiente, se puede recomendar perforaciones basándose exclusivamente en las anomalías que indican contenido de sulfuros en profundidad. Por otra parte, es preciso reconocer las limitaciones del método en cuanto se refiere al contenido metálico de sulfuros representados por anomalías. Si bien es cierto que estas concentraciones de sulfuros pueden contener cantidades apreciables de cobre y molibdeno, también es muy cierto que estas anomalías pueden, simple y llanamente, representar solamente pirita estéril.

Desde julio de 1953 se invirtieron más de \$40,000 (*) en exploraciones geofísicas con el método Brant en programas sistemáticos de exploración regional. Costos unitarios en la aplicación de este método en áreas que se ha investigado con mayor detalle han fluctuado entre \$700 y \$1,500 por km.², según el detalle del levantamiento, condiciones de accesibilidad y topografía del terreno.

MÉTODOS GEOQUÍMICOS DE EXPLORACIÓN

Durante la década comprendida entre 1930 y 1940, rusos y escandinavos iniciaron la aplicación práctica de métodos de muestreo de suelos, rocas, aguas y vegetación, y de técnicas de laboratorio para determinar la distribución de trazas de elementos metálicos aplicables a la búsqueda de yacimientos minerales. A partir de 1946, la utilidad de los métodos geoquímicos de exploración fué ampliamente recono-

(*) Dólares de los EE. UU.

cida, particularmente en los Estados Unidos, el Canadá, y Australia, al grado de que durante el período de 1946 a 1950 algunas de las grandes empresas mineras en estos países invirtieron entre \$1.000,000 y \$1.500,000 en investigaciones geoquímicas.

En el Perú, la Cerro de Pasco Corporation, ajustándose a la política de encauzar y dotar a sus exploraciones mineras dentro de las técnicas más adelantadas, creó la sección geoquímica dentro del departamento de exploraciones. Un laboratorio geoquímico, el primero en el Perú, y tal vez único en su género en toda Latinoamérica, fué establecido en la Ciudad de Arequipa, en el Sur del Perú, dotándolo de todo lo necesario para determinar trazas de Cu, Pb, Zn, Mo, W, Ni, Co y Ag en muestras de suelos, de roca, de agua y de vegetación. La capacidad del laboratorio es para 1,000 ó 1,500 muestras por mes. Este laboratorio comenzó a funcionar en noviembre de 1952. Durante dos años y medio su organización, técnica de campo y la prosecución de los programas de exploración geoquímica estuvieron a cargo del geoquímico canadiense Dr. P. R. Eakins. La doctora norteamericana Sra. Hilda H. Heller ha secundado en el laboratorio los trabajos del Dr. Eakins y actualmente se encuentra al frente de él, siendo responsable no solamente de las labores de rutina sino que también continuamente desarrolla trabajos de investigación, ya sea para mejorar técnicas existentes o para descubrir características físico-químicas del medio en el cual se han dispensado los elementos metálicos cuya distribución se investiga.

Desde el punto de vista de la geoquímica aplicada, se entiende por trazas todo contenido metálico inferior al 0.01% por peso. El contenido metálico se expresa en términos volumétricos de partes por millón. Los resultados del conjunto de muestras obtenidas en una determinada área se ubica en planos a la misma escala de los levantamientos geológicos o geofísicos. Las muestras que indican igual contenido metálico se unen por curvas y el resultado es un plano que indica la distribución de trazas de elementos metálicos en forma de anomalías geoquímicas. Entiéndense por anomalías geoquímicas la existencia de elementos metálicos en cantidades superiores o inferiores al contenido normal de la roca encajonante del yacimiento que se supone da origen a la distribución anómala de metales ya sea en la misma roca, en los suelos, en la vegetación, en los depósitos de acarreo o en las aguas de la circunscripción del área que se investiga.

Las anomalías geoquímicas originadas por contenidos anómalos en las rocas, ocasionados por la introducción adicional de metales durante todo proceso de mineralización hidrotermal, reflejan halos o envolturas de trazas de elementos metálicos alrededor de los cuerpos mineralizados que en la mayoría de los casos pueden coincidir en la forma y distribución de las distintas envolturas de alteración hidrotermal. Este tipo de anomalías genéticamente vinculados con el origen de la mineralización que se investiga, recibe el nombre de anomalías primarias en contraste con las anomalías llamadas secundarias formadas por la destrucción y dispersión de los elementos metálicos de un yacimiento

por medio de los agentes comunes de intemperismo y erosión. Por la naturaleza misma de los procesos geológicos que intervienen en la desintegración de un yacimiento mineral y de la roca que lo circunda, las anomalías secundarias pueden ser residuales si los elementos metálicos que reflejan la anomalía se han concentrado ya sea en la regolita, encima de un afloramiento lixiviado de todo cuerpo mineralizado, o bien en los suelos que cubren el yacimiento. También estas anomalías pueden ser de dispersión si los elementos metálicos derivados de la denuncia del yacimiento han sido esparcidos mecánicamente en sus inmediaciones, concentrándose en suelos o en depósitos eluviales; aluviales, glaciales, eólicos, etc.

Hasta ahora, la técnica de campo de la sección geoquímica de la Cerro de Pasco Corporation se ha concentrado principalmente en la detección de anomalías primarias y secundarias de tipo residual. Solamente en algunos especiales, particularmente en reconocimientos geoquímicos regionales, se ha investigado la existencia de anomalías secundarias de dispersión.

El muestreo lo efectúan cuadrillas de campo que consisten en un supervisor y dos ayudantes, efectuándose sistemáticamente en cuadrículas con espaciamentos de 20, 50 y 100 metros, según el problema. El supervisor fija las esquinas de cada cuadrado de la cuadrícula por medio de alineamientos hechos con brújula Brunton y cinta. Estos alineamientos se ligan a puntos de control topográficos tales como vértices de triangulación, estaciones de plancheta o puntos de tránsito en los alineamientos geofísicos. Las muestras se obtienen en cada una de las esquinas de los cuadrados excavando unos 20 a 30 centímetros en el suelo, obteniéndose unos 200 gramos de material que se va coleccionando en sobres de papel manila convenientemente identificados y numerados. Para las muestras de roca bastan unas cuantas astillas, de las cuales una se guarda aparte para descripción megascópica y para preparación de láminas delgadas para estudios petrográficos cuando el caso lo merezca. Se ha probado que una sola cuadrilla puede coleccionar de 70 a 100 muestras de suelo (2) al día en cuadrículas de 100 metros y hasta más de 150 muestras en cuadrículas de 20 metros.

La trituración y molienda se efectúa en el laboratorio. Las muestras de suelo se tamizan en cedazos de 2 mm. antes de molerlas en morteros de porcelana. Las muestras de roca se trituran en un mortero de acero tipo Plattner. La molienda se pasa por un cedazo de tela, de 80 mallas, para evitar contaminación. Dos hombres pueden preparar 130-150 muestras de suelo diarias y 70-90 muestras de roca (2).

Antes de proceder a efectuar las determinaciones, se toma 25 centigramos de muestra y se mezcla en un tubo de ensaye con un gramo de bisulfato de potasio. La mezcla se funde sobre una estufa de gasolina durante 10 minutos. Hay dos sistemas en práctica para las determinaciones de trazas de contenido metálico. Uno es el de tratar la muestra en soluciones de pigmentos orgánicos, como la difeniltiocarbazona o ditiozona, en tetracloruro de carbono, que reacciona con trazas de metales como cobre, plomo, zinc, etc., para formar ditiozo-

natos metálicos. Al reaccionar con la solución de ditiozona, el color verde esmeralda original de la solución cambia al rojo o morado según el contenido metálico de la muestra. La coloración se compara con standards ya establecidos o se mide en un fotómetro la intensidad de la transmisión de luz a través de la solución metálica. La coloración identifica al contenido metálico, indicando al mismo tiempo la cantidad en que se presenta. El método es extremadamente sensible a los efectos de luz y calor; además, es costoso y poco práctico dado el carácter tóxico del tetracloruro de carbono.

El método más comúnmente usado en Arequipa, particularmente en determinaciones de cobre, es un método cromográfico que consiste en pruebas de mancha en papel filtro impregnado de di-tioxamida, reactivo orgánico también conocido como ácido rubeánico. Para este objeto se emplea un sencillo instrumento, diseñado en los laboratorios de la United States Geological Survey, conocido como cromógrafo. Esencialmente, el instrumento consta de un soporte donde se sujeta una pequeña faja de papel filtro impregnada de ácido rubeánico, quedando un área restringida de papel filtro expuesta al paso de la solución que se prueba, la cual por medio de succión capilar de una columna de agua de 23 cm. de longitud, pasa por el papel filtro a una velocidad uniforme. La solución de prueba reacciona en el papel filtro produciendo en el caso del cobre una mancha circular de color gris a negro, según el contenido de cobre, y que representa un precipitado de rubeanato de cobre. Para otros metales, el papel filtro se impregna con otros reactivos, como por ejemplo la dimetilgliozina para el caso del nickel, con el cual se forman manchas de color rojo a rosado. El tono de la coloración de las manchas obtenidas en el precipitado se compara con los tonos de manchas producidas con soluciones standard de contenidos metálicos conocidos. Los resultados prácticos obtenidos (2) han demostrado que el método del cromógrafo es el más conveniente para el caso práctico de determinaciones en gran número de muestras.

Desde la iniciación de las actividades de la sección geoquímica en Arequipa, en noviembre de 1952, hasta principios de mayo de 1955, se completaron 21 proyectos geoquímicos en los cuales se obtuvo 42,247 muestras (3) con la siguiente distribución de determinaciones:

Análisis de cobre en suelos y rocas	35,038
Análisis de molibdeno en suelos y rocas	14,668
Análisis de cobre en plantas	292
Análisis de molibdeno en plantas	234
Análisis de nickel	91
Análisis de cobalto	50

Total: 50,373

Hasta el 31 de diciembre de 1954 la Cerro de Pasco Corporation invirtió poco más de \$48,000 (*) en investigaciones geoquímicas. Has-

(*) Dólares de los EE. UU.

la esa fecha el costo, incluyendo costos de trabajo de campo, costos de laboratorio, interpretación y costo de equipo en general, fué de \$1.64 por muestra.

COMPARACION DE METODOS DE EXPLORACION

Para dar una idea de la aplicabilidad, limitaciones y costos relativos a los métodos geológicos, geofísicos y geoquímicos en un caso práctico, a continuación se presenta un caso ideal, hipotético, en la exploración de pórfidos cupríferos, como se ilustra en la Fig. 1, en un lugar imaginario del sur del Perú. El orden de magnitud de los costos que se mencionan refleja las condiciones reales de una operación en un lugar un tanto aislado de las vías de comunicación y con clima desértico. El agua habría que transportarse por una distancia de varios kilómetros.

1er. Caso (Fig. 1).—Se trata de una porción de un área de 1,750 x 600 metros en una zona que presenta características que corresponden a las de un pórfido cuprífero con las siguientes peculiaridades:

1. Dos masas separadas de pórfido cuarcífero inyectadas en diorita. El pórfido presenta una diversidad de facies, sin contactos definido de unas a otras, que varían del tipo de riolita porfirítica a pórfido monzonítico con facies pegmatíticas caracterizadas por la abundancia de cuarzo y ortoclasa deutérica.
2. Dentro de esta zona y particularmente en el pórfido cuarcífero, se reconoció y mapeó una zona de alteración intensa que se identificó como la expresión superficial de un pórfido cuprífero lixiviado caracterizado por:
 - a) Intensa silicificación, sericitización y kaolinización de la roca encajonante.
 - b) Presencia de abundantes fracturas y zonas de brechas con limonita de coloración variada, principalmente del marrón claro al rojo lacre, y muy localmente con óxidos de cobre (crisocola, brochantita y tenorita) preferentemente localizados en zonas de intensa kaolinización.
 - c) Presencia de turmalina, particularmente cementando las brechas, pero cortada por fracturas rellenas de limonita.
 - d) Presencia de alunita porcelanácea de color rosado claro cuando fresca y amarillento y terroso al intemperizarse.
 - e) Abundantes granos de limonita diseminados en la roca alterada cubriendo pequeñas cavidades previamente ocupadas por sulfuros.
 - f) Silicificación y sericitización intensa en las zonas más fracturadas disminuyendo gradualmente a roca kaolinizada, y finalmente a la kaolinización desvaneciéndose en roca cloritizada en los límites de los afloramientos lixiviados.

- g) Abundancia de especularita en roca cloritizada y turmalinizada con fracturas rellenas de óxido de cobre.

Identificados y mapeados con más detalle los afloramientos con las características anteriores, se procedió a planear un mínimo de perforaciones con sonda de diamante para determinar la ley de los sulfuros diseminados en profundidad y estimar su posible tonelaje. El criterio (4) con que se fundamentó la ubicación de las perforaciones primarias fué el siguiente:

1. De preferencia se ubicó en las zonas más fracturadas y con abundante limonita, particularmente donde se presentaba la limonita favorable, color lacre, en más cantidad. Esta limonita se forma de minerales de cobre que originalmente tenían una alta relación de cobre a hierro. Se supone que en muchos casos esta limonita se forma por la oxidación de zonas de calcocita supergénica, elevadas por efectos diastróficos que al mismo tiempo ocasionan también la depresión del nivel freático local.
2. También se dió preferencia a la selección de zonas lixiviadas dentro de áreas con máxima silicificación y sericitización, apartándose de zonas kaolinizadas o de roca cloritizada en que ambas muestran la presencia de óxidos de cobre. El medio de roca intensamente silicificadas y sericitizada es inerte al paso de soluciones meteóricas descendentes que oxidan el yacimiento y que por consiguiente, bajo estas condiciones, acarrearán casi todo el cobre existente en la zona de oxidación hasta depositarlo debajo del nivel freático. En este caso es de esperarse que la ley de sulfuros en la zona de enriquecimiento sea mayor que bajo zonas kaolinizadas o de roca cloritizada más fresca donde las soluciones ácidas descendentes tropiezan con medios más alcalinos por la presencia de arcillas y de feldespatos más frescos, y que reaccionan al neutralizarse las soluciones precipitando parte del cobre recién lixiviado bajo la forma de óxidos de cobre. Esto hace esperar naturalmente que la zona de enriquecimiento secundario a profundidad sea más pobre en contenido de cobre.

Sobre estas bases se ubicaron nueve perforaciones, como se indica en la Fig. 1. El costo estimado para una exploración en estas condiciones, asumiendo una profundidad media de 200 m. para cada una de ellas, sería:

Levantamiento geológico y topográfico a \$100 por km². \$ 105*
Nueve perforaciones de 200 m. c/u a \$45 por metro. \$ 81,000*

Total: \$81,105\$

(*) Incluye \$4.00 por metro en costo de transporte de agua.

2o. *Caso*.—Después del mapeo geológico, se procedió al levantamiento geofísico del área utilizando el método Brant. El resultado mos-

(§) Dólares de los EE. UU.

tró una anomalía general de 5% en contenido de sulfuros por volumen, coincidiendo más o menos con la zona del pórfido cuprífero e incluyendo los afloramientos lixivados. Dentro de esta área anómala se presentaron dos áreas (A) y (B), Fig. 1, con máximos hasta de más de 8% de sulfuros por volumen.

Además de la distribución del contenido de sulfuros en profundidad, los geofísicos dan la profundidad (5) a la cual deben encontrarse los sulfuros debajo de la zona de oxidación con un margen tolerable de error. Este dato es de suma importancia para ubicar las perforaciones, en las mejores condiciones posibles en lo que se refiere a la longitud que más convenga perforar dentro de la zona de oxidación.

Correlacionando la información geológica con la geofísica (4) (5), se llega a la conclusión de que podría eliminarse las perforaciones 3, 5, 7 y 9 de la solución exclusivamente geológica. Se ha mantenido los huecos 1, 2, 4, 6 y 8 donde coinciden las zonas de máximo contenido en sulfuros con las zonas más favorables del afloramiento. El alto contenido en sulfuros en la porción norte de la anomalía (B) no tiene afloramiento favorable y puede inferirse que representa un lóbulo piritoso estéril. El costo de la exploración en este caso sería:

Levantamiento geológico y topográfico a \$100 por km ² .	\$ 105
Levantamiento geofísico de 1.05 km ² a \$1,500 por km ² .	1,575
Cinco perforaciones de 200 m. c/u a \$45 por metro.	45,000
Total:	\$46,680

Como se nota, esto significa un ahorro de \$34,425 o sea el 42% del costo en el primer caso.

3er Caso.—Conjuntamente con los levantamientos geológicos y geofísicos se practicó una investigación geoquímica del área que se explora, la cual mostró 3 zonas anómalas con contenido de cobre en suelos de más de 200 ppm (partes por millón). La anomalía (C) de la Fig. 1 coincide más o menos con la extensión del afloramiento lixiviado principal y con la anomalía geofísica (A); como se muestra en la misma figura. En la misma anomalía se presentan dos centros altamente anómalos con contenidos de cobre de más de 500 ppm en áreas inmediatas a los huecos 1, 2 y 6. Tratándose de zonas altamente lixiviadas, estos dos centros anómalos pueden representar zonas con alto contenido de limonita favorable (4).

La anomalía (E) que coincide con el borde sur del pequeño afloramiento favorable al este de la zona que se investiga, puede indicar pequeños contenidos de cobre en la limonita del afloramiento, o bien, tal vez mínimas cantidades de óxido de cobre dispersadas entre la limonita y precipitadas cerca del contacto con roca menos alterada.

La fuerte anomalía (D) donde no existen afloramientos favorables con alteración intensa, bien puede representar una zona con más abundante contenido en óxidos de cobre en vetillas o en películas, en diaclasas donde la roca contiene feldespatos poco alterados.

En este caso se ve que la perforación 4 también podría eliminarse y por tanto el mínimo de perforaciones requeridas para la exploración primaria de este proyecto quedaría reducido a las perforaciones 1, 2, 6 y 8. En estas condiciones, el costo quedaría también reducido como sigue:

Levantamiento geológico y topográfico a \$100 por km ² .	\$ 105
Levantamiento geofísico de 1.05 km ² a \$1,500 por km ² .	1,575
Investigación geoquímica de 1.05 km ² . en cuadrículado de 50 m. a \$730 por km ²	766
Cuatro perforaciones de 200 m c/u a \$45 por metro..	36,000

Total: \$38,446

Esto significa un ahorro de \$42,659 con respecto a la solución netamente geológica o sea una economía del 52% del costo estimado en el primer caso.

Precisa hacerse hincapié en el hecho de que el caso práctico anteriormente expuesto, aunque refleja la realidad, es un problema bastante simple comparado con complicaciones que pueden surgir. Para esto es necesario tomar muy en cuenta que la interpretación geológica debe predominar por todos conceptos. Los métodos geofísicos y geoquímicos son armas valiosas para concretar los objetivos que se trata de explorar, pero nunca podrían suplantar, por sí solos, la importancia decisiva y definitiva de la interpretación geológica. En pocas palabras, las anomalías indicadas por métodos geofísicos o geoquímicos deben aceptarse con cautela y analizarse críticamente (4) con un juicio predominantemente geológico. De todos modos, aún en circunstancias más desfavorables o en complicaciones aparentemente inexplicables, la utilización de estos métodos significa economías muy apreciables en la exploración minera que pueden traducirse en ahorros del orden del 25% al 30% del costo total de exploraciones, planeadas con un criterio exclusivamente geológico. La tendencia a aferrarse a soluciones basadas exclusivamente en resultados de un solo método puede dar margen a serios errores en decisiones emanadas de resultados obtenidos por la exploración.

CONCLUSIONES

La nueva legislación minera del Perú promulgada en 1950 y la política realista en materia minera del gobierno peruano han sido causas instrumentales en el gran desenvolvimiento de las medidas adoptadas por empresas como la Cerro de Pasco Corporation para intensificar la investigación sistemática de los recursos minerales del Perú.

Desde enero de 1951 hasta diciembre de 1954 el departamento de exploraciones de la Cerro de Pasco Corporation examinó e investigó 283 minas y prospectos mineros esparcidos principalmente en la Cordillera Peruana desde el valle del Chinchipe, en la frontera ecuatoriana, hasta el lago Titicaca en la frontera Boliviana o hasta el desierto de Atacama en la frontera con Chile.

Hasta ahora el departamento de exploración ha entregado al departamento de minas de la Cerro de Pasco Corporation tres distritos mineros para su exploración secundaria y para ponerlos en condiciones de producir.

De esta manera, paulatinamente, el esfuerzo constante de la libre empresa está creando en el Perú nuevas fuentes de trabajo, de riqueza y de producción. Asimismo, también se está fomentando el estudio integral de las reservas mineras de la nación peruana por el único medio posible, que es el de crearlas y de exponerlas metódicamente por medios científicos y técnicos adecuados. Las reservas mineras de una nación las crea la iniciativa privada cuando existe comprensión de lo que es la industria minera y de lo que ella significa para el desarrollo de la economía de los pueblos.

AGRADECIMIENTO

El autor desea expresar su agradecimiento a la Cerro de Pasco Corporation por alentar la preparación de este trabajo y por autorizar su publicación. También se agradece la autorización del Dr. A. A. Brant por permitir la reproducción de sus ideas referentes al método geofísico diseñado por él para determinar la distribución de sulfuros diseminados, tal como las expresara en su artículo publicado en el Mining Guidebook de marzo de 1955.

Igualmente el autor agradece a la Sociedad Geológica Mexicana y a la Asociación de Geólogos Petroleros la oportunidad que le brindaron de dar a conocer en México esta nueva técnica exploratoria.

México, D. F., octubre de 1955.

Alberto J. Terrones Langone.

BIBLIOGRAFIA

- (1) Arthur A. Brant. "The role of Geophysical Methods in Modern Exploration Programs". Engineering & Mining Journal, Mining Guidebook, marzo, 1955.
- (2) P. R. Eakins. Informes Privados de la Cerro de Pasco Corporation, 1953-1955.
- (3) Hilda H. Haller. Informes Privados de la Cerro de Pasco Corporation, 1955.
- (4) Alberto J. Terrones L. Informes Privados de la Cerro de Pasco Corporation, 1953-1955.
- (5) R. W. Baldwin. Informes Privados de la Cerro de Pasco Corporation y de la Newmont Exploration Ltd., 1953-1955.