GEOQUÍMICA APLICADA A LA PROSPECCIÓN MINERA

Nociones básicas para prospectores noveles

Eduardo Hugo Peralta

GEOQUÍMICA APLICADA A LA PROSPECCIÓN MINERA
Nociones básicas para prospectores noveles

Eduardo Hugo Peralta

Peralta, Eduardo Hugo
Geoquímica aplicada a la prospección minera : nociones básicas para prospectores noveles / Eduardo Hugo Peralta ; prólogo de Miriam Ysabel Cisternas. - 1a edición para el profesor - Catamarca : Editorial Científica Universitaria de la Universidad Nacional de Catamarca, 2023.
150 p. ; 22 x 16 cm.

ISBN 978-987-661-468-9

1. Geología. I. Cisternas, Miriam Ysabel, prolog. II. Título.
CDD 551.9

Diagramación de Interior y Portada: Juan José Salas (ECUUNCA)
ISBN: 978-987-661-468-9
Queda hecho el depósito que marca la ley 11.723.
E.C.U. 2023
Avda. Belgrano 300 - Pab. Variante I - Planta Alta - Predio Universitario - San Fernando del Valle de Catamarca - 4700 - Catamarca - República Argentina

Prohibida la reproducción, por cualquier medio mecánico y/o electrónico, total o parcial de este material, sin autorización del autor.
Todos los derechos de autoría quedan reservados por el autor.

Publicación en *Open Access* - Acceso abierto

Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional.

PRÓLOGO

El presente trabajo constituye un valioso aporte del Dr. en Geología Eduardo Hugo Peralta, destinado a estudiantes avanzados de las carreras de grado universitario de Geología, como así también a jóvenes profesionales que desean realizar tareas o resolver problemas relacionados con la prospección - exploración geológica minera, tomando como base la geoquímica.

El libro contiene extensas notas recopiladas por su autor en su vasta experiencia como geólogo de campo y gabinete. Gran parte de las mismas, han sido transmitidas a sus alumnos durante más de treinta años dedicados a la enseñanza universitaria, en las carreras Licenciatura en Geología e Ingeniería de Minas que se dictan en la Facultad de Tecnología y Ciencias Aplicadas de la Universidad Nacional de Catamarca.

Constituye una valiosa guía para encontrar e interpretar anomalías geoquímicas en terreno, que le ayudaran al joven profesional geólogo, a descubrir, identificar y evaluar yacimientos minerales, especialmente los de tipo metalíferos.

El estudio contiene conceptos básicos de geoquímica aplicada a las tareas de prospección minera definidos de manera sencilla, que alcanzan practicidad al entenderlos y visualizarlos mediante numerosos ejemplos recopilados por el autor durante su amplia experiencia profesional.

Muchas de las ilustraciones y gráficos, de gran valor práctico y didáctico, fueron confeccionadas a mano por el autor y adaptadas como complemento adecuado al texto. Mientras que, las fotografías son colecciones de extensas campañas realizadas en el campo, en distintas partes del país.

Colaboraron en las tareas de revisión y edición del presente manuscrito, las docentes universitarias, Dra. en Geología Nancy Eugenia Nieva y Lic. en Geología Ernestina Trinidad Vergara.

Como ex alumna y colega del Dr. Eduardo Hugo Peralta agradezco se me haya considerado para presentar esta importante contribución científica y ofrecerlo a nuestros estudiantes, como fuente de consulta bibliográfica.

SINTESIS DE LA TRAYECTORIA DEL DR. EDUARDO HUGO PERALTA

Eduardo Hugo Peralta egresó con el título de geólogo de la Universidad Nacional de Córdoba, en el año 1967, habiéndose graduado como Doctor en Geología en el año 1982 en esa misma universidad. Se especializó en geología de yacimientos, prospección geoquímica y geoquímica ambiental.

Desarrolló proyectos y ejecutó numerosas campañas de prospección y exploración minera en gran parte de la región andina de la República Argentina, desde Santa Cruz hasta Jujuy, como geólogo del Servicio Geológico Minero Nacional (SEGEMAR) y como consultor privado, durante más de 50 años, especialmente en el campo de los yacimientos metalíferos y de sales evaporíticas.

Se desempeñó por más de 30 años como profesor universitario, responsable del dictado de las asignaturas Yacimientos Metalíferos y Geoquímica de Prospección en las carreras Licenciatura en Geología e Ingeniería de Minas de la Facultad de Tecnología y Ciencias Aplicadas de la Universidad Nacional de Catamarca, contribuyendo en la formación de recursos humanos en esta área del conocimiento y en la consolidación de la mencionada carrera.

Lic. en Geología Miriam Ysabel Cisternas

REFLEXIONES Y AGRADECIMIENTOS

En los últimos 57 años tuve el privilegio de observar la evolución de la Geología desde una típica Ciencia Natural hacia ramas especiales, donde se destaca una impronta o "Cultura Geoquímica" generalizada. Así hoy, la vemos cumpliendo un papel vital en Agronomía, Suelos, Hidrogeoquímica, Petróleo, Minería, Urbanismo, Medio Ambiente y también en la Salud Humana. Su campo de acción es cada vez más intenso y profundo en la vida del hombre.

Las universidades argentinas han aceptado el desafío incorporando cada vez más conceptos, análisis y procedimientos relacionados con Geoquímica.

La presente contribución intenta incorporar en la nueva corriente, mi experiencia durante el ejercicio profesional, tanto en campo y gabinete, como en la docencia en la Universidad Nacional de Catamarca, esperando que también logre aceptación entre alumnos, docentes y profesionales.

Obviamente se ha necesitado ayuda que en mi caso especial lo brindó mi esposa Sarita Taullard, quien además de soportar las ausencias por mis campañas, tuvo a su cargo la ingrata tarea de estar noches casi enteras tipeando informes, planillas, apuntes y guías didácticas. Gratitud que se extiende a quienes fueron mis colaboradoras especiales, tales como la Doctora Eugenia Nieva, las Licenciadas en Geología Ernestina Vergara, Silvia Watkins, Ana Ingrid Ovejero, Marcela Varela, Adriana Vega, Fátima Vilches, Miriam Cisternas (quien se ocupó de la siempre pesada revisión total de este texto), Mary Almaraz de Secretaría de Estado de Minería de Catamarca y de tantos otros ex alumnos/as, que permanecerán conmigo en el mar de los recuerdos y los afectos.

Espero que sea útil a las nuevas generaciones.

Dr. Eduardo Hugo Peralta

ÍNDICE

CAPÍTULO 1. GENERALIDADES Y CONCEPTOS DE UTILIDAD
1.1 Introducción. 13
1.2 Cosmo geoquímica. Estrellas y Planetas. 13
1.3 Estructura geoquímica interna de la Tierra. Los elementos y sus afinidades litológicas. 14
1.4 Clasificación geoquímica de los elementos. Mayoritarios y Minoritarios. 15
1.4.1 Presencia y abundancia. 18
1.4.2 Diadocia y mineralización. 19
1.4.3 Elementos traza 20
1.4.4 Clasificación de los elementos traza según su comportamiento geoquímico 21
1.4.5 Elementos Trazas: Compatibles vs incompatibles 22
1.5 Herencia Metalogenética. Provincias y Periodos. 23
1.6 Ciclos geológico y geoquímico. 25
1.7 Evolución geoquímica - histórica de la Tierra. 26
1.8 Ciclos del Agua. Anhídrido carbónico. Sílice. Aluminio. Alcalino térreos. Álcalis. 28
1.9 Meteorización. Conceptos de inatacados. Hidrolizados. Precipitados. Evaporados. 30
1.10 Geoquímica general y aplicada. 32

CAPÍTULO II. AMBIENTES GEOQUÍMICOS Y PROSPECCIÓN MINERA
2.1 La Prospección Geoquímica en Argentina. Antecedentes. 39
2.2 Geoquímica de prospección. 42
2.3 Prospección geológico-económica. 43
2.4 Geoquímica minera y ambiente geoquímico. 43
2.5 Condiciones ambientales endógenas. 45
2.6 Condiciones ambientales exógenas. 46
2.7 Ambiente geoquímico y ciclo natural. 47
2.8 Factores que influyen en la dispersión geoquímica. 48
2.9 Los ambientes geoquímicos y la prospección. 49

2.10 Asociaciones paragenéticas, geoquímicas y rocas ígneas. 51
2.11 Indicadores geoquímicos. 55

CAPÍTULO 3: EXPRESIÓN GEOQUÍMICA MINERA
3.1 Expresión geoquímica. El caso regional. 59
3.2 Halos de dispersión. 59
3.3 Trenes de dispersión. 61
3.4 Elementos contenidos en trenes de dispersión y halos secundarios. 62
3.5 Trenes y anomalías falsas o accesorias. 63
3.6 Migración. Influencia del ambiente geoquímico regional 64
3.7 Muestreo geoquímico. 65
3.7.1 El material a muestrear. 66
3.7.2 Detalle y densidad de muestreo. 74
3.7.3 Plan de muestreo. 75
3.7.4 Diseño del muestreo. 75

CAPÍTULO 4. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS
PARTE 1
4.1 Pasado y presente. Ventajas y condicionamientos. 79
4.2 Interpretación por estadística. 80
4.3 Histogramas polimodales. 82
4.4 Graficación. Criterio tradicional y valores residuales. 83
4.5 Procesamiento por correlación. 85
4.6 Comportamientos de la correlación binaria. 86

CAPÍTULO 5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS
PARTE 2
5.1 El caso local. Muestreo geoquímico de detalle. 95
5.2 El muestreo por tipos geométricos de mineralización. 96
5.3 Correlación múltiple. Procesamiento de resultados. 97
Interpretación.
5.4 Valores Equivalentes. 100

CAPÍTULO 6: ALTERACIONES HIDROTERMALES Y METEÓRICAS
6.1 Alteraciones hidrotermales. Clasificación. 103
6.2 Alteración no es sinónimo de mineralización. 104
6.3 Limonitas “transportadas”. 108
6.4 Limonitas “indígenas”. 109
6.5 Variantes de limonitas. 110
6.6 Interpretación del proceso 111

CAPÍTULO 7. SULFUROS LIXIVIADOS, OTRO INTENTO DE INTERPRETACIÓN.
7.1 Introducción. 121
7.2 ¿Por qué Interpretación? 123
7.3 La historia de las Limonitas Indígenas. 125
7.4 Influencia de la roca encajante. 126
7.5 Sistemas Hidrotermales. Fértiles y Estériles. 128
7.6 Indicios de mineralización. 131
7.7 Difusión por permeabilidad de limonita transportada. Influencia de la roca de campo. 133
7.8 Cronología Estructural y Cronología Paragenética. Estilos de aparición más frecuentes. 135
7.9 Criterios básicos tradicionalmente aceptados. 138
7.10 Ambiente Geoquímico vs Proporción pirita / calcopirita. Interacción y Graficación. 141
7.11 Recomendaciones. 144

BIBLIOGRAFÍA 147

CAPÍTULO 1

GENERALIDADES Y CONCEPTOS DE UTILIDAD

1.1 Introducción

El objeto de la Geología es el estudio de los procesos naturales que se desarrollan en la corteza terrestre, su historia y evolución. De ella, derivaron especialidades como la Mineralogía, Petrografía, Estratigrafía, etc.
Sin embargo, pareciera que la Geoquímica no termina de ser aceptada como tal, pese a su importancia formativa y práctica para las nuevas generaciones de geólogos.
Geología y Geoquímica tienen el mismo objetivo: los procesos naturales y sus resultantes, pero la Geoquímica lo hace principalmente desde el punto de vista químico incluyendo los ciclos evolutivos de los elementos durante el ciclo geológico natural. Los principales objetivos de esta disciplina son responder las siguientes preguntas:

1. ¿Cómo se distribuyen los elementos químicos en los componentes de la Tierra?
2. ¿Por qué se distribuyen de esa manera?
3. ¿Cuáles son los principios que gobiernan dicha distribución?

La geoquímica aplica principios químicos a la solución de problemas geológicos.
En general, todas o casi todas las universidades argentinas incluyen Geoquímica en sus planes de estudio. Sin embargo, algunos egresados que desean incorporarse al ámbito público o a empresas de prospección minera, suelen confesar que los contenidos de Geoquímica recibidos en las universidades pueden resultar un tanto magros en la práctica. Esta contribución busca paliar en parte esa situación.

1.2 Cosmogeoquímica: Estrellas y planetas.

La cosmoquímica estudia el origen y distribución de los elementos en el cosmos y sistema solar.
La composición de la tierra es única y depende de procesos:

- Responsables de la creación de elementos (nucleosíntesis).
- Involucrados en la formación del sistema solar.

• Implicados en la formación y diferenciación de la tierra.

Pero y al principio... ¿Cómo se formaron los elementos?
Nuestro conocimiento sobre esta pregunta proviene de la observación de las estrellas y de los meteoritos.
Las estrellas están compuestas esencialmente por hidrógeno. A la manera de un horno nuclear, generan helio y otros elementos más pesados, aunque se ignora el proceso en detalle.
Los planetas se clasifican en “rocosos” (caso de la Tierra, Marte, Venus, Mercurio, Neptuno) y en “gaseosos”, también llamados “planetas jovianos”, como en el caso de Urano, Saturno y Júpiter. En estos últimos puede haber un núcleo rocoso pequeño, pero están compuestos mayoritariamente por fluidos gaseosos o líquidos (en general hidrógeno, agua, metano, anhídrido carbónico a alta presión). No tienen una superficie bien definida, por lo cual solo pueden estimarse parámetros como diámetro, área superficial, volumen, temperatura superficial o densidad.
Fuera del sistema solar se han descubierto numerosos planetas gaseosos, pero relativamente pocos del tipo rocoso al menos hasta ahora.

1.3 Estructura geoquímica interna de la Tierra. Los elementos y sus afinidades litológicas.

El estudio de las ondas sísmicas ha permitido esbozar la composición física interna de la Tierra que, a grandes rasgos, consiste en tres grandes capas concéntricas física y químicamente distintas. Figura 1.1.

Núcleo:
Es de naturaleza metálica, sólido, rígido, compuesto por Fe y Ni nativos, densidad media 10 a 11. Predominan los metales nativos con un grado de oxidación prácticamente nulo, es decir equivale a un medio geoquímico netamente reductor.

Manto:
Esta constituido principalmente por silicatos, pobres en Al, pero rico

en Fe y Mg. Litológicamente es similar a las rocas ígneas básicas-ultrabásicas (peridotitas en general), con predominio de olivinos, piroxenos y espinelos. Presenta un comportamiento dual sólido-plástico, con densidad 4 a 5.
La composición de silicatos ferro-magnesianos, acompañados por óxidos ferrosos-férricos (magnetita) indican un ambiente geoquímico moderadamente reductor.

Corteza:
Es sólida, de composición sílico-aluminosa-alcalina o alcalina térrea (granitoide en las áreas continentales, basáltica en las marinas). La densidad media es de 2,5 a 2,8. Corresponde a un ambiente geoquímico oxidante. El Fe se presenta en su mayor parte, en estado férrico (hematita dominante).

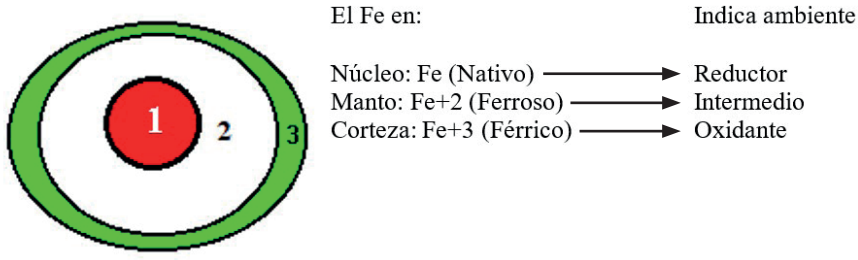


Figura 1.1: Estructura geoquímica interna de la Tierra y estado de oxidación del Fe.

La Corteza representa aproximadamente 2 a 3 % del volumen total de la Tierra, el Manto, 75 a 80 % y el Núcleo, 15 a 20%.

1.4 Clasificación geoquímica de los elementos. Mayoritarios, Minoritarios y Trazas

De los 92 elementos estables conocidos de la corteza terrestre, los más abundantes son: O, Si, Al, Fe, Ca, Na, K, Mg, Ti, H, P, Mn. Representan el 99,4 % del total y se los denomina Elementos Mayoritarios. Los restantes 80 elementos significan en conjunto, el 0,6 % y se los conoce como Elementos Minoritarios u Oligoelementos.

Ya sean Mayoritarios o Minoritarios, los elementos pueden aparecer como compuestos muy variados, aunque siempre existe un comportamiento predominante, en base al cual, se los puede clasificar dentro de cuatro grandes grupos (clasificación de Goldschmidt):

a) Siderófilos: elementos que se presentan en forma nativa. Ej. Au, Pt, Ag, etc.
b) Calcófilos: aparecen como sulfuros. Ej. Cu, Pb, Zn, Sb, etc.
c) Litófilos: constituyen silicatos u óxidos y en menor grado como carbonatos, sulfatos, boratos, haluros, etc. (Ej: Si, Al, Ca, Na, K, etc.).
d) Atmófilos: formados por gases (N_2, O_2, H_2, He, Ar, etc.).

Un elemento puede mostrar más de un carácter. Ej. el Fe puede ser litófilo (óxidos y silicatos), pero también calcófilo (pirita, pirrotina y otros sulfuros) o siderófilo-nativo (meteoritos).
Tomando el planeta en su totalidad, la mayor parte del Fe y Ni están concentrados en el núcleo de la Tierra y, por lo tanto, ambos serían elementos siderófilos. Sin embargo, poca importancia práctica tiene el núcleo terrestre porque no es accesible, ni sufre acción antrópica, de allí que la geoquímica, como la geología, se limita a los componentes de la corteza terrestre exclusivamente y, en consecuencia, en este ambiente, Fe y Ni son considerados litófilos**.**
Las rocas se clasifican por su génesis (ígneas, sedimentarias y metamórficas) con muchos subtipos. Desde un punto de vista geoquímico y prescindiendo del origen, casi todas las rocas, en especial las ígneas, pueden ser incluidas en un diagrama rectangular más simple basado en cuatro componentes esenciales, Figura 1.2:

- % SiO_2
- % Óxidos alcalinos (de Na en especial)
- % CaO
- % MgO

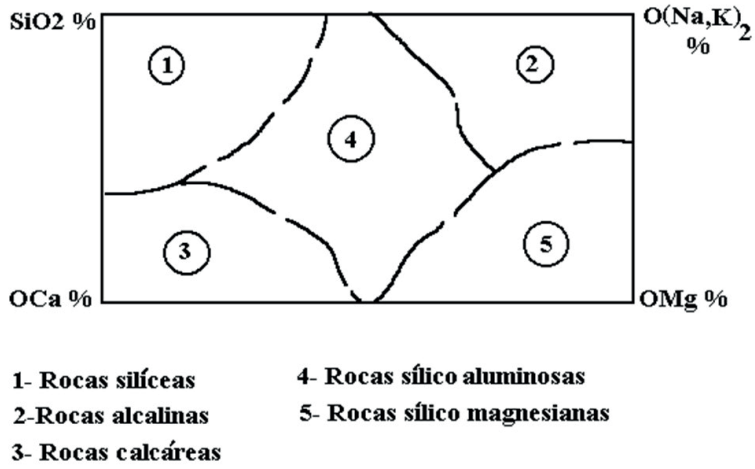


Figura 1.2: Clasificación de las rocas desde el punto de vista geoquímico

La mayoría de los oligolementos manifiestan afinidad o preferencia con algunos tipos rocosos. Si se tienen en cuenta los 36 elementos de mayor consumo o valor económico se observa que tienden a aparecer asociados o concentrados en 5 grupos o clanes (que no necesariamente están relacionados con tipos genéticos de rocas).

- Grupo 1: Rocas silíceas con 75 al 100 % de SiO_2. Por ejemplo, areniscas o cuarcitas, granitoides y pegmatitas. Elementos asociados: U / Pb / Ta / Rb / Au / Ag / W / Sn / Mo / Li / Be.
- Grupo 2: Rocas alcalinas. Subsaturadas en SiO_2, con Al_2O_3 y álcalis en exceso. Ejemplos: gabros, dioritas, monzonitas, sienitas, nefelinitas, ijolitas, etc. Elementos asociados: Nb / P / Th / Ba / F / REE ("Elementos de Tierras Raras" -16 elementos asociados).
- Grupo 3: Rocas calcáreas (calizas en general). Elemento asociado Sr.
- Grupo 4: Rocas sílicoaluminosas (las feldespáticas "saturadas" o con exceso de SiO_2). Elementos asociados: Ti / V / Mn / As / Bi / Cu / Zn / Cd / Ag / Sb.
- Grupo 5: Rocas silicático-magnesianas (menos de 45 % SiO_2, con escaso contenido de Al. Ejemplos, peridotitas y gabros, esquistos serpentínicos, talcíticos, piroxénicos, grafitosas, etc. Ele-

mentos asociados: Cr / Ni / Co / Fe / Zn / Pt / Pd / C.

Salta a la vista la escasez de elementos concentrados en las rocas calcáreas (sólo 1) pero, aunque las calizas resulten "geoquímicamente pobres" no son estériles desde el punto de vista minero, porque su reactividad actúa como trampa geoquímica para muchas soluciones hidrotermales.

1.4.1 Presencia y abundancia

La Tabla 1.1 indica el contenido medio de los elementos de la corteza terrestre en ppm ("partes por millón" o "gramos/Ton"). Se lo conoce como Valor "Clarke", en homenaje a Francis Clark, quien logró determinarlo por primera vez.

Elemento	ppm	%
Si	277200	27,7
Al	81300	8,13
Fe	50000	5
Ca	36300	3,63
Na	28300	2,83
K	25900	2,59
Mg	20900	2,09
Ti	4400	0,44
H	1400	0,14
P	1180	0,118
Mn	1100	0,11

Mayoritarios: 99,37%							
Elemento	ppm	**Elemento**	ppm	**Elemento**	ppm	**Elemento**	ppm
F	700	**Nd**	24	**Tb**	0,9	**Rh**	0,001
S	520	**Nb**	24	**Lu**	0,8	**Re**	0,001
Sr	450	**Co**	23	**I**	0,3	**Ir**	0,001
Ba	400	**La**	18	**Sb**	0,2	**Os**	0,001
C	320	**Pb**	15	**Bi**	0,2	**Ru**	0,001
Cl	200	**Ga**	15	**Tm**	0,2	**Hf**	5
Cr	200	**Th**	10	**Cd**	0,2	**Dy**	5
Zr	160	**Sm**	7	**Ag**	0,1	**Sn**	3
Rb	120	**Gd**	6	**In**	0,1	**B**	3
V	110	**Pr**	6	**Se**	0,09	**Yb**	3
Ni	80	**Sc**	5	**Hg**	0,07	**Er**	3
Zn	65	**W**	1	**A**	0,04	**Br**	3
N	46	**Mo**	1	**Pd**	0,01	**Ge**	2
Ce	46	**Cs**	1	**Pt**	0,005	**Be**	2
Cu	45	**Ho**	1	**Au**	0,005	**As**	2
Y	40	**Eu**	1	**He**	0,003	**U**	2
Li	30	**Tl**	1	**Te**	0,002	**Ta**	2

Tabla 1.1: Valores Clarke para la litosfera (Mason, 1966)

Este valor Clarke es un promedio teórico idealizado, calculado en base a:

1. Los tenores contenidos por las diversas litologías conocidas.
2. La proporción de corteza terrestre formada por cada litología tipo.

Esta tabla se modifica periódicamente debido a los avances de la química analítica. La mayoría de los elementos tienden a concentrarse en ciertas litologías, pero esa "abundancia preferencial" no siempre significa mineralización.
Así se pueden encontrar en rocas ultrabásicas, valores analíticos de Ni y Co entre 8 y 25 veces el "Clarke cortical" teórico, sin poder hablar aún de una mineralización de interés. Algunas de las concentraciones de abundancia necesarias entre Mena/Clarke para que los 36 principales elementos usados en la industria tengan interés económico-minero, se muestran en la Tabla 1.2:

Elementos	Veces que supera el Clarke
Fe	10 a12
Al	3 a 4
Mn	350
Ni	175
Co	215
Cr	1500
Cu	140
Pt	1000
Pb	2500
Ba	250
Sn	250
U	30
Cb	1000
P	50

Tabla 1.2: Valores de Clarke para algunos elementos químicos de interés económico - financiero

1.4.2 Diadocia y mineralización

Son bien conocidas las series isomorfas y sus cambios de composición química. Por ejemplo, la serie de las plagioclasas, de los olivinos, el sistema calcita-dolomita, el de la wolframita, etc.
Muchos minerales, con fórmula química definida, admiten hasta cierto

punto el reemplazo parcial de alguno de sus componentes por elementos foráneos, generalmente de igual valencia o radio iónico que el suplantado. Ese fenómeno, llamado Diadocia**,** no es infinito, pues una vez que se alcanza cierto "punto de saturación" o máximo de tolerancia ("Barrera de Diadocia"), el "sobrante" del elemento en cuestión comienza a formar sus propios minerales independientes y recién allí puede hablarse de una "mineralización" al menos incipiente. Figura 1.3.

Por ejemplo, el Pb y el Ba sustituyen parcialmente al K de la ortosa, el Li al Mg en diversas micas, el Ni al Mg de los olivinos, el Sr al Ca en las calizas, el Al al B o al Si en muchos silicatos.

El "Clarke" del Au es de 0,005 ppm (5 mg/Tn). Puede existir como reemplazo diadósico en minerales portadores de Fe y Mn, hasta alcanzar un valor límite de 0,05 (unas 10 veces el Clarke). A partir de allí comienza a formar cristales de oro nativo. Ejemplo: si el tenor contenido total fuera de 0,1 gr / Tn (o 0,1 ppm o 100 mg/Tn) se obtendría aproximadamente la mitad del Au como mineral independiente (mineralización incipiente) y otro tanto, en "estado diadócico" (50 y 50 mg/Tn respectivamente). Raramente este fenómeno alcanza a generar anomalías geoquímicas nítidas, pero sí difusas.

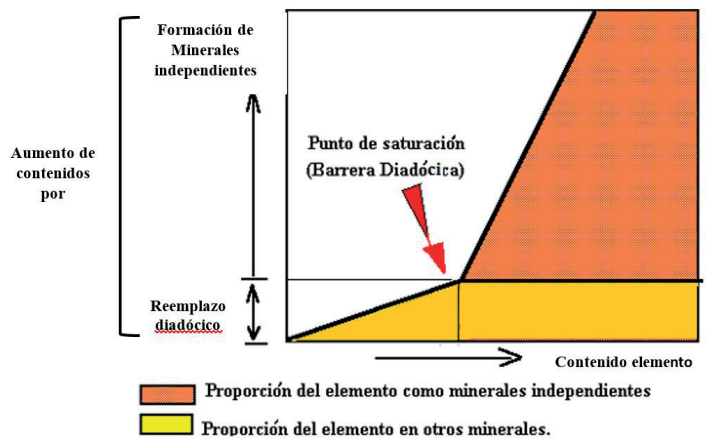


Figura 1.3: Concepto de diadocia

1.4.3 Elementos traza (Contribución especial de la Dra. Eugenia Nieva)

Un elemento traza se define como un elemento que está presente en

una roca en concentraciones menores al 0,1% (1000 ppm). La mayoría de los elementos traza si bien no forman especies minerales por si solos, son capaces de sustituir a los elementos mayores en los minerales formadores de roca.

1.4.4 Clasificación de los elementos traza según su comportamiento geoquímico

El criterio para establecer la clasificación de estos elementos es, ya sea su posición en la tabla periódica de los elementos o el comportamiento de éstos en sistemas magmáticos. Varios grupos de elementos en la tabla periódica son de particular interés geoquímico (Figura 1.4). El grupo más usado en este aspecto es aquel que contiene los elementos con número atómico entre 57 y 71, los lantánidos o también llamados tierras raras (REE: rare earth elements). Otro grupo es el PGE (platinum group elements), conocido como metales nobles. También cuenta el grupo de los metales de transición, que incluye elementos mayores tales como el Fe y Mg. Los elementos en cada uno de estos grupos tienen propiedades químicas similares y por ende, se espera que tengan un comportamiento geoquímico similar.

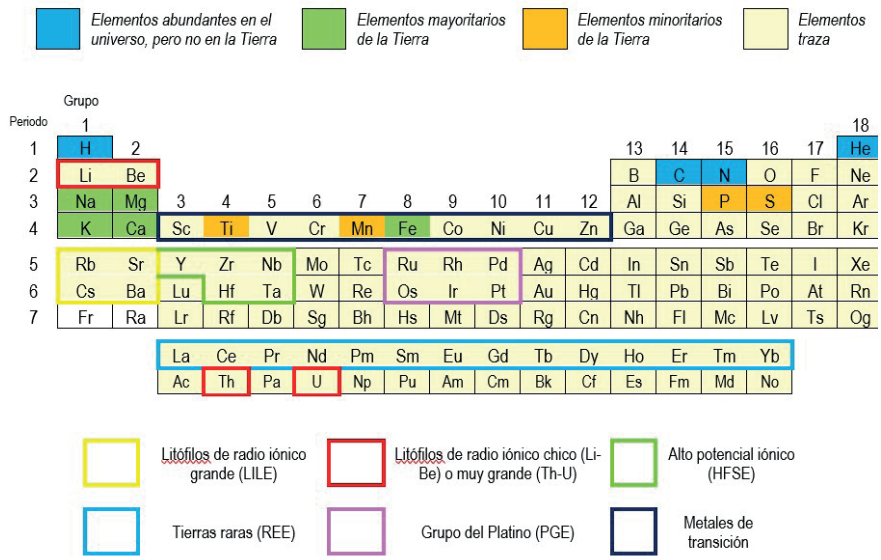


Figura 1.4. La tabla periódica de los elementos, que muestra los distintos grupos principales de elementos traza.

1.4.5 Elementos Trazas: compatibles vs incompatibles

Cuando el manto terrestre es fundido, los elementos traza pueden mostrar preferencia por ya sea la fase líquida o la fase sólida (mineral), por lo tanto, son llamados elementos incompatibles y compatibles, respectivamente.

Existen grados de compatibilidad e incompatibilidad y los elementos traza variarán en su comportamiento en fundidos de diferente concentración; por ejemplo, el fósforo (P) es incompatible en una mineralogía mantélica, pero en fundidos graníticos, aun estando concentrado como elemento traza, su comportamiento será el de un elemento compatible (concentrado en la estructura del apatito).

Es de gran ayuda subdividir los elementos incompatibles según su razón carga-radio, llamado potencial iónico. Los cationes pequeños y muy cargados son conocidos como Alto potencial iónico (high field strength elements, HFSE)' (potencial iónico > 2), y los cationes grandes de pequeña carga son denominados como Bajo potencial iónico (low field strength elements, LFSE) (potencial iónico < 2), o LILE (large ion lithophile elements). Los elementos con radio iónico pequeño y relativamente bajos en carga tienden a ser compatibles (elementos mayores y metales de transición). Con todo lo expuesto anteriormente, se puede afirmar que elementos de similar carga y tamaño tendrán un comportamiento geoquímico similar (Figura 1.5).

Los HFSE incluye a los lantánidos Sc e Y, y Th, U, Pb, Zr, Hf, Ti, Nb y Ta. Los pares de elementos Hf-Zr, y Nb-Ta son muy similares en carga y tamaño; por ende muestran comportamientos geoquímicos similares. Los elementos LILE incluyen Cs, Rb, K y Ba. A éstos hay que agregarle Sr, Eu divalente y Pb divalente (estos tres elementos con radio iónico y carga casi idéntica).

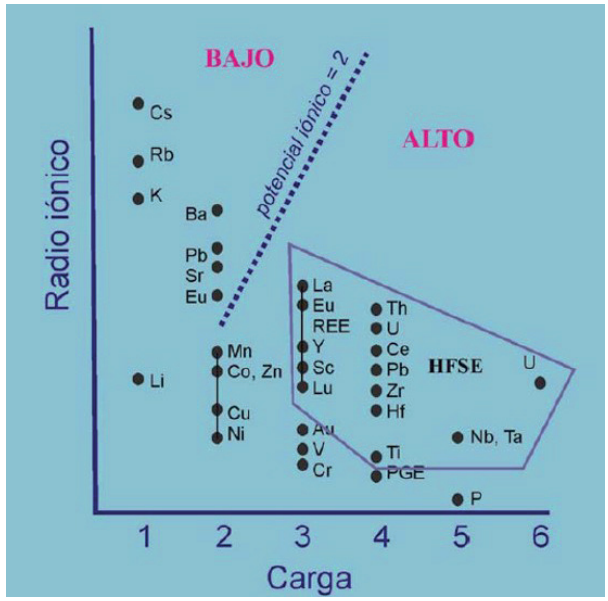


Figura 1.5. Gráfico que relaciona la carga vs radio iónico de los elementos traza de interés geológico

1.5 Herencia Metalogenética. Provincias y Períodos

Existen extensas regiones, incluso de magnitud subcontinental, con contenidos estadísticamente altos en uno o más elementos, asociados o no con mineralizaciones. Son las llamadas "Provincias Geoquímicas". Dentro de ellas, puede haber regiones menos extensas donde suele aparecer con llamativa frecuencia, algún tipo especial de mineralización característica de ciertos elementos. Son las "Provincias Metalogenéticas".

Estas manifestaciones minerales pueden a su vez agruparse a modo de distritos o sectores, conocidas como "Áreas Metalogenéticas" que, desde el punto de vista minero, empiezan a resultar mucho más importantes y/o atractivas para el geólogo prospector.

Puede darse el caso, que alguno de estos distritos o sectores contenga concentraciones importantes formando yacimientos explotables o recursos para el futuro. Figura 1.6.

Estos procesos de mineralización, pueden darse como episodio único o múltiple (incluso intermitentes) durante largos periodos de tiempo (a veces abarcan varios millones de años).

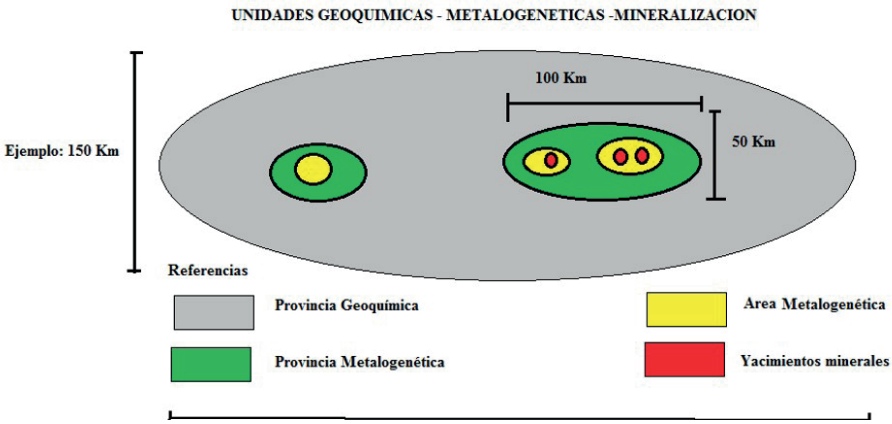


Figura 1.6:Provincia geoquímica, provincia metalogenética, área metalogenética y yacimientos minerales

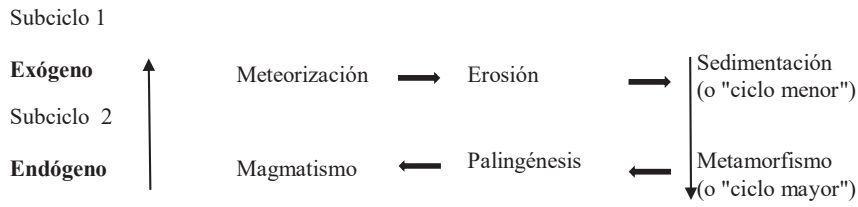
La reiteración de estos procesos de mineralización indica una "especialización" de ese sector de corteza terrestre que de alguna manera se propaga a los magmas y/o soluciones hidrotermales a modo de una "Firma Geoquímica". Por ejemplo, en los últimos 30 años se pudo comprobar que muchos fluidos hidrotermales pobres o estériles suelen enriquecerse "robando o lixiviando" selectivamente ciertos elementos (incluso prefiriendo algunos isótopos) de las rocas que atraviesan o impregnan y transportándolos hasta ser precipitados en lugares favorables (proceso conocido como "regeneración hidrotermal"). Hoy se acepta que estas soluciones "regeneradas" pueden ser tan eficientes para la formación de yacimientos como una solución hidrotermal "juvenil" de origen magmático clásico.

Así como hay rocas favorables para alojar una mineralización (factor litológico), hay edades de dichas rocas que son mejores que otras; es el concepto de "Época o Periodo Metalogenético".

En general se acepta que la mayor favorabilidad se encuentra en las coincidencias de litología y tiempo propicios. Según Laznicka P. (1999) la principal época favorable para la formación de yacimientos metalíferos, sobre todo hidrotermales, fue el Terciario inferior-medio, seguido por el Terciario superior, luego el Mesozoico superior-medio, el Carbonífero y el Paleo - Proterozoico, aunque permanentemente hay cambios por aparición de nuevos datos.

1.6 Ciclos geológico y geoquímico

El ciclo geológico clásico de la corteza terrestre se puede esquematizar de la siguiente manera:



El subciclo Exógeno y sus procesos se asemejan a una marcha analítica tradicional de laboratorio, donde las rocas silicatadas corticales son destruidas y sus componentes separados selectivamente.
En el laboratorio químico: Molienda =➔ Disgregación química =➔ Separación de SiO_2 + Solución residual =➔Precipitación sucesiva de R_20_3 =➔ Ba+ Ca +Mg =➔ Na + K, etc.
El subciclo Endógeno por contraste, asemeja un proceso de síntesis para regenerar nuevas rocas corticales mediante: Metamorfismo=➔ Fusión diferencial/eutéctica =➔ Magmatismo, bastante parecido a procesos industriales como la fabricación de cerámica, cemento Portland o vidrio.
De ese modo, durante el ciclo geológico la corteza terrestre es químicamente destruida y reconstruida en un proceso equilibrado conocido como ciclo geoquímico general o natural, que en realidad es el ciclo geológico clásico observado desde el punto de vista químico, solo varía la perspectiva del observador.
Algunos autores consideran que un ciclo geológico completo lleva en promedio unos 10 a 15 millones de años.
El ciclo geoquímico “es la sucesión de fenómenos químicos naturales que se producen en la corteza terrestre durante un ciclo geológico completo, así como el comportamiento de cada elemento involucrado en el mismo”. Tabla 1.3.

Punto de vista geológico	Ciclo Exógeno	Meteorización	Disgregación	Ciclo Analítico	Punto de vista químico
		Erosión	Separación – Solución		
		Sedimentación	Precipitación		
	Ciclo Endógeno	Metamorfismo	Sinterización	Ciclo Sintético	
		Palingénesis	Fusión Eutéctica		
		Magmatismo	Fusión total		

Tabla 1.3: Ciclo geológico y ciclo geoquímico

A su vez, el ciclo geoquímico de un elemento dado es la "historia" vivida por el mismo, durante el ciclo geológico completo.
Si bien la respuesta tiende a ser semejante para elementos de un mismo grupo de la tabla periódica (Ejemplo: los álcalis, los halógenos, los alcalinotérreos, etc.), varía la intensidad o tipo de respuesta ante el mismo fenómeno. Se puede decir que cada elemento tiene su propio ciclo.

1.7 Evolución geoquímica-histórica de la Tierra

El ciclo geológico no siempre fue el mismo durante la historia del planeta. La evolución de la corteza terrestre se produjo en dos grandes etapas, Figura 1.7:

1) Etapa Lineal o Primitiva

Comprende la formación de una corteza inmadura por la solidificación de magmas básico-ultrabásicos (con mayor proporción de mafitos que feldespatos), desde aproximadamente 4000 millones de años hasta 1500 millones de años atrás. Los mares son escasos y poco extensos. La atmósfera es reductora, con limitado contenido de O_2. Abundan el amoníaco, el metano y el dióxido de carbono. La meteorización es pobre, lenta y los procesos sedimentarios son incipientes. Los sedimentos clásticos (sobre todo conglomerados) y químicos sílico-ferruginosos son ricos en magnetita más que en hematita (Ejemplo: las

series ferríferas listadas). Las formas de vida son muy primitivas (algas cianófitas y bacterias anaerobias en especial) y la evolución biológica, lenta. Desde el punto de vista geoquímico es la gran época del Fe_2O_3, Fe_3O_4 y el MgO de los mafitos. Por otro lado, es escasa la participación de la SiO_2 + Al_2O_3 en el ciclo geológico.

2) Etapa Cíclica o Moderna

Formación de una corteza evolucionada, desde hace 1500 millones de años atrás hasta la actualidad, donde se puede diferenciar un magmatismo continental y otro oceánico (SIAL y SIMA). Predominan los magmas feldespáticos y por lo tanto, hay mayor participación de Al_2O_3, CaO y SiO_2. Prevalece el Fe^{+3} (mayor contenido de hematita que de magnetita). El agua se vuelve abundante. Los mares cubren 2/3 de la superficie terrestre. La atmósfera se convierte en un medio oxidante como en la actualidad, con gran aumento de la meteorización. Comienza el ciclo geológico tal como se lo conoce hoy, incluyendo la tectónica de placas. La vida es abundante, variada y en evolución.
La transición entre ambas etapas fue relativamente rápida a partir de los 1500 a 1600 millones de años de antigüedad. Rankama K.y T. Sahama (1962), Heuschmidt B. (1990).

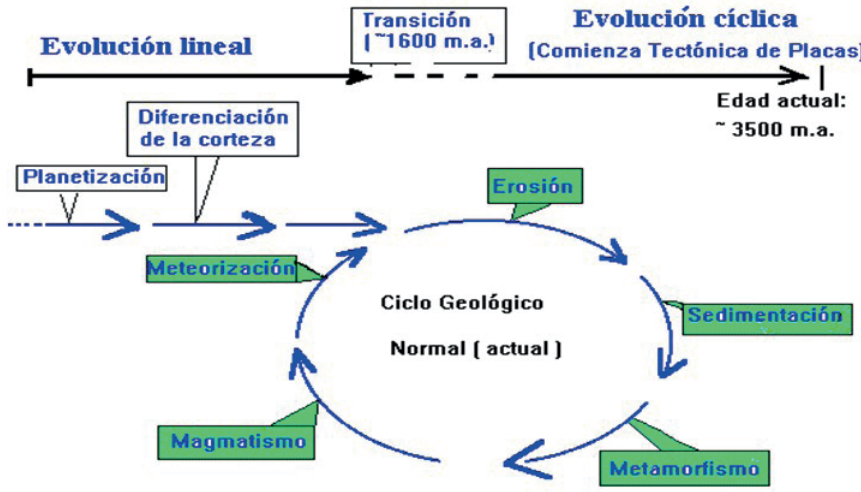


Figura 1.7: Evolución de los ciclos geológicos

1.8 Ciclos geoquímicos del Agua, Anhídrido Carbónico, Sílice, Aluminio, Alcalino térreos y Álcalis

Agua: La Tierra es un planeta excepcionalmente rico en agua, pero dicha abundancia es básicamente estable y se encuentra en equilibrio. Los principales aportes de agua "nueva" proceden de las fuentes juveniles, vapor de las erupciones volcánicas o la quema de hidrocarburos (acción antrópica actual) pero en gran parte se compensa por la retención en minerales hidratados, acuíferos fósiles confinados, oclusión en poros cerrados, etc.

Anhídrido Carbónico: Si bien parece haber un paulatino aumento por acción antrópica ("Efecto Invernadero"), en general atribuido al consumo de combustibles fósiles, hay quienes opinan que los principales aportes naturales de CO_2 a la atmósfera, proceden de emanaciones volcánicas e hidrotermales y que, cualquiera sea su origen, buena parte es inmovilizado como ácido húmico en los suelos, en la biomasa viviente, en los sedimentos organógenos y en la formación de calizas. Es tema de investigación.

Sílice: La corteza Siálica libera abundante sílice por meteorización de las rocas magmáticas ácidas (Ejemplo: SiO_2 coloidal, gránulos de cuarzo-arena), pero el mayor aporte es de sílice amorfa en suspensión coloidal procedente de los feldespatos meteorizados. Otros silicatos también pueden liberar sílice, aunque en menor medida.
En todas sus formas, la SiO_2 es arrastrada por las aguas de los ríos hacia las cuencas sedimentarias o al mar donde se redepositan.
Aunque el proceso no es bien conocido, se acepta que parte de la SiO_2 amorfa tiende a combinarse con alúmina para formar arcillas "nuevas" (o de "Neoformación"), que a su vez pasarán a integrar rocas sedimentarias (arcilitas y limolitas) o a consolidar el material clástico grueso como cemento de conglomerados y areniscas.
La Tabla 1.4 presenta contenidos medios típicos para diferentes litologías.

Al e Fe: En el ciclo endógeno, el Al es constituyente principal de los

feldespatos y el Fe de los mafitos, en las rocas ígneas o metamórficas (ciclo endógeno), pero una vez meteorizados (ciclo exógeno) tienden a separarse concentrándose en los hidrolizados como Al^{+3} (bauxitas, caolines) mientras que el Fe^{+3}, podrá formar hematita en los suelos lateríticos o "suelos rojos" en general, según la roca dominante y el clima.

Ca, Mg, Fe^{+2} y Mn: Durante el ciclo endógeno, el Ca^{+2} se incorpora a las plagioclasas de los magmas (se hace notar que todo átomo de Ca cualquiera sea el compuesto que está integrando en la actualidad, fue alguna vez parte de una plagioclasa). Otros elementos de la misma asociación, como Mg^{+2} y Fe^{+2} se integran a los mafitos como los olivinos y piroxenos, mientras que el Mn^{+2} lo hace con anfíboles y biotitas.
En el ciclo exógeno todo el grupo tiende a migrar en solución formando parte de la "dureza" de las aguas que luego serán precipitadas como costras ferruginosas (ferricretas), manganíferas ("wadd", o manganicretas en general) o "caliches travertínicos impuros" (calcretas, calcáreos ferrosos, manganosos, dolomíticos, etc.)

Na y K: Su abundancia en la corteza es muy similar (2,8 vs 2,6 %, casi en proporción 1/ 1). Durante el ciclo endógeno, ambos se concentran en los feldespatos de los magmas (plagioclasas albíticas y ortosa respectivamente) o en las micas en general.
En el ciclo exógeno, cuando la meteorización destruye los feldespatos, siendo Na^+ y K^+ metales alcalinos, con propiedades químicas bastante similares, se liberan y solubilizan juntos e inician su migración en las aguas de ríos. Sin embargo, las arcillas y coloides manganíferos tienen gran avidez por el K^+, que en su mayor parte es capturado y retenido en los sedimentos continentales, no así el Na^+ que permanece en solución y puede seguir su viaje hacia el mar.
De allí que, aunque ambos son abundantes en las aguas continentales, prácticamente en proporción 1/1, en el agua de mar, el Na^+ es casi 60 veces más abundante que el K^+.

Elementos	Rocas ígneas					Rocas sedimentarias		
	Ultrabásicas	Básicas	Intermedias	Ácidas	Alcalinas	Areniscas	Lutitas	Calizas
Cr	0,1 a 0,7	110 a 220	6 a 150	10 a 135	2 a 4	20 a 70	400 a 700	2 a 16
C	0,01 a 1	100 a 300	120 a150	vest.	0,1 a 1,1	0,2 a 0,6	0,8 a 20	9 a 12
Ni	0,2 a 0,3	130 a 160	5 a 55	5 a 20	4 a 30	2 a 8	25 a 50	15 a 20
Co	180 a 500	45 a 50	10 a 12	2,5 a 7	1 a 3	(*)	8 a 10	5 a 8
Ti	0,4 a 0,6	0,6 a 1	600 a 3000	0,15 a 0,2	0,2 a 0,3	600 a 950	0,1 a 04	(*)
V	40 a 50	67 a 240	<100	15 a 80	25 a 30	20 a 25	120 a 150	10 a 200
Fe	9 a 30	5 a 9	3 a 6	1,3 a 2	2.5 a 3	8 a 9	3 a 5	1 a 4
Mn	0,15 a 0,2	0,1 a 1,17	0,1 a 0,12	200 a 500	0,1 a 016	(*)	150 a 620	230 a 385
As	1 a 2	2 a 3	2 a 3	0,8 a 1,5	1,2 a 1,6	(*)	5	(*)
Sb	1 a 2	0,2 a 1,1	0,5 a 0,7	0,2 a 0,3	(*)	vest	3	vest
Bi	0,001	0,07 a 0,2	0,1	0,12	(*)	1	(*)	(*)
Sn	vest	2 a 3	3 a 4	4 a 5	vest	vest	40 a 45	vest
Mo	<0,25	0,1 a 0,15	<0,1	0,7 a 5	0,06	(*)	< 0,15	(*)
W	vest	0,4 a 0,8	0,4 a 1	0,5 a 2	1 a 1,3	vest. a 1	1 a 2	(*)
Nb	15 a16	10 a 20	4 a20	9 a 20	30 a 35	(*)	(*)	(*)
Ta	0,1 a 1	0,7 a 1	0,7 a 0,8	4a6	2,1 a 2,2	(*)	(*)	(*)
U	0,01	0,5 a 1	1,8 a 3	3,7 a 8	3 a 6	26 a 30	10 a 12	2 a 3
Th	<0004	2,4 a 3	6 a 8	18 a 52	13 a 15	3,5 a 3,8	0,01 a 0,1	1 a 1,2
Cu	10 a 15	86 a 110	35 a 50	13 a 25	5 a 7	< 30	70 a 190	20 a 23
Pb	vest. a 1	7 a 8	8 a 41	5 a 27	10 a 12	<20	<20	9 a 10
Zn	<40	72 a 120	70 a 80	60 a 82	<130	< 20	100 a 500	50 a 120
Cd	0,05	0,2 a 0,3	0,1 a 0,15	0,06 a 0,1	0,13	(*)	0,3	(*)
Ba	vest. a 1	200 a 300	202 a 1110	850 a1200	1600	170	300 a 460	120 a 6000
Sr	< 10	130 a 150	53 a 800	81 a 300	< 200	26	170 a 200	420 a 700
LI	< 0,5	12 a 16	20	24 a 40	28	(*)	(*)	vest. a 710
Ce	< 10	4,5 a 30	100	220 a 230	160	(*)	(*)	(*)
Rb	< 2	22 a 35	100	200 a 220	110	270	300	(*)
Be	< 0,2	0,8 a 1	1,8	3 a 4,5	1	(*)	3,6	(*)
Au	0,006	0,004	0,004	0,0045	0,003	0,06	0,008	0,005
Ag	0,05	0,1	0,07	0,05	(*)	<0,44	0,05	0,02
Pd	(*)	(*)	(*)	(*)	(*)	(*)	(*)	(*)
Pt	0,01	0,009	(*)	0,003	(*)	(*)	(*)	(*)
Hg	0,01	0,1	(*)	0,06	(*)	0,1	0,5	0,03
P	200 a 1200	600 a 3000	500 a1200	400 a 700	800 a 1000	350 a 500	< 740	175
F	100	250 a 380	500	550 a 800	1200	(*)	(*)	(*)
Zr	35	100 a 125	220 a 260	148 a 274	500	(*)	70	96

(*) Sin datos o con datos poco confiables. Vest. = Vestigios

Tabla 1.4: Contenidos normales para principales litologías (expresados en ppm o en %) Recopilación Peralta, H.

1.9 Meteorización: Conceptos de inatacados, hidrolizados, precipitados y evaporados

El ciclo exógeno comienza con la meteorización, especialmente intensa en las regiones continentales. Las rocas destruidas por el intemperismo inician su marcha “simil-analítica” generando cuatro tipos de

subproductos:

- Inatacados: minerales resistentes, casi no se alteran.
- Hidrolizados: se alteran y dan lugar a compuestos residuales (coloidales, arcillosos y clásticos).
- Precipitados: se generan compuestos solubles y suspensiones coloidales (susceptibles de precipitación química y/o de floculación).
- Evaporados: se forman soluciones iónicas acuosas, que cristalizan por evaporación.

Cada grupo tiene sus propias condiciones de concentración natural. Un perfil general del ciclo geológico exógeno, se muestra en la Figura 1.8.

Grupo de los Inatacados (o "resistatos" según algunos autores)
Minerales químicamente resistentes. Ejemplos cuarzo, circón, granates; en general se acumulan en "Placeres" (pesados, duros o maleables, etc.). Son transportados mecánicamente por el agua o el viento.

Grupo de los hidrolizados.
Arcilla, limo, sílice amorfa, derivan de la meteorización de feldespatos (por ejemplo, los feldespatos $SiO_2.nH_20$ + caolín + sales solubles de K^+, Na^+ o Ca^{+2}). La mayor parte de los subproductos (caolín, iones K^+) tienden a permanecer en el sitio retenidos por las arcillas, formando suelos residuales o cementando material clástico, mientras el resto migra hacia el mar en las aguas continentales, sea en solución, o por arrastre mecánico.

Grupo de los precipitados.
Cuando las aguas de los ríos llegan al mar, se encuentran con un ambiente geoquímico muy distinto, en el cual se producen cambios de pH y/o procesos de óxido-reducción y/o reacción con otras sales para formar compuestos insolubles y como consecuencia, diversos sedimentos químicos (ejemplos: calizas, fangos finos y organógenos, yacimientos oolíticos, cherts, ferricretas, manganicretas, etc.).

Grupo de los Evaporados (o "Evaporatos" de algunos autores)

Llevando la evaporación del agua hasta términos extremos, comienzan a precipitar sales solubles, para formar rocas evaporíticas. Puede suceder en cuencas continentales sin salida (salinas y salares) o directamente en cuencas marinas limitadas (mayormente golfos y bahías semi-aisladas).

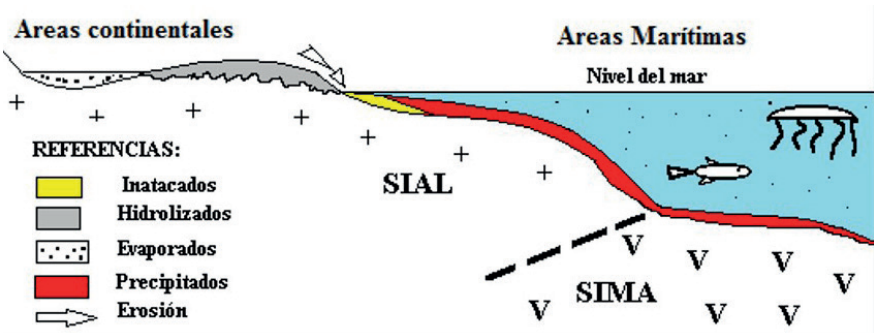


Figura 1.8: Zonificación esquemática de productos del intemperismo

1.10 Geoquímica general y aplicada

Como en la mayoría de las ciencias, en la geoquímica existe una rama general y otra aplicada.

La geoquímica general interviene como auxiliar en ramas clásicas de la Geología, tales como Petrografía, Mineralogía, Sedimentología o Metalogenia.

La geoquímica aplicada está relacionada más bien con su utilidad económico-industrial. Si bien comenzó con la minería, con el tiempo surgieron otras variantes de aplicación, entre las que se pueden mencionar:

- Hidrogeoquímica: búsqueda y exploración de recursos de agua superficial y /o subterránea. Estudio y análisis de fenómenos de contaminación que afectan al recurso hídrico.
- Edafogeoquímica: investigación de suelos de uso agrícola.
- Geoquímica Minera: búsqueda y exploración de los recursos minerales.
- Geoquímica Petrolera: búsqueda y exploración de recursos de

petróleo y gas natural.

- Ambiental**:** estudio de las fuentes, reacciones, transporte, efecto y distribución de especies químicas en el agua, suelo y aire, así como sus efectos sobre la salud humana y animal y sus implicancias tecnológicas

Está surgiendo también un interés creciente en su uso para investigar enfermedades endémicas regionales. Por ejemplo, regiones con arsenicismo crónico, fluorosis, saturnismo, etc. Es una tendencia incipiente, pero ya hay quienes hablan de "Geomedicina o Geología Medica" (o, tal vez más lógico: Geoquímica de la salud).

Ejemplos de geoquímica aplicada

Campo Minero: En la prospección regional se emplea para ubicar áreas anómalas ("targets"), en las cuales pueden existir nuevos yacimientos.

En la exploración minera (trabajos de detalle dentro de esas áreas de interés o "prospectos") se utiliza para localizar "blancos perforables", siempre con apoyo de la geología y a veces, de la geofísica. Figura 1.9.

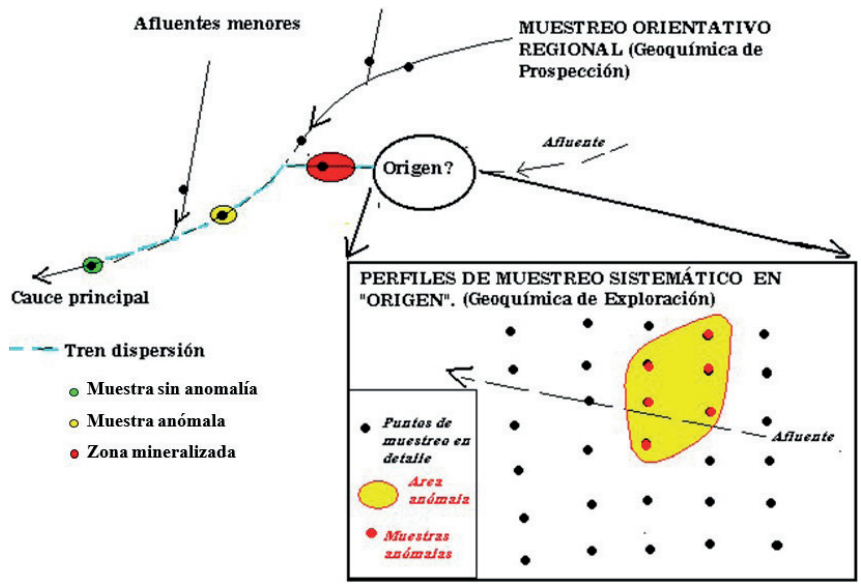


Figura 1.9: Geoquímica de prospección. La erosión hídrica provoca la migración aguas debajo de los elementos que tienden a acumularse en los sedimentos recientes.

Recursos de Petróleo y Gas: Aunque poco divulgado, se están encontrando aplicaciones también en el ámbito petrolero. Se sugiere consultar *Schumacher D., Malizia D. y G. Prestia (2003).*

Recursos de Aguas: Esencial para verificar tipos, calidad y volumen (acuíferos subterráneos o aguas superficiales) y "conexión" o "independencia" de (o entre) ambos.
El esquema mostrado en la Figura 1.10, ilustra la idea.

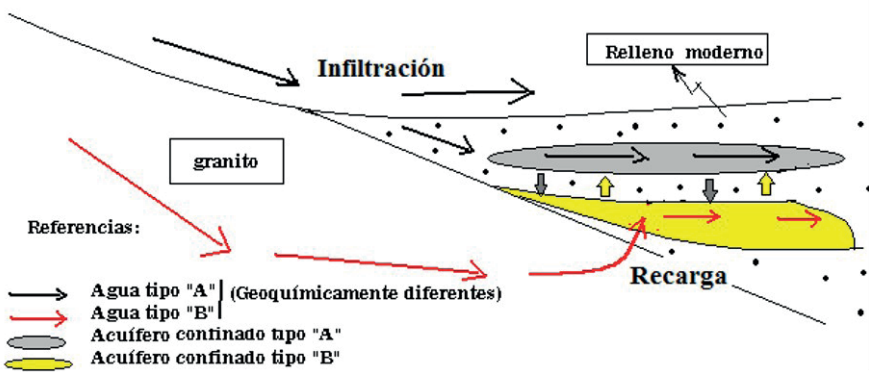


Figura 1.10: Relación simplificada entre acuíferos subterráneos y aguas vadosas.

Suelos: Importante como apoyo a la producción agropecuaria, tanto para tipificar suelos agrícolas y su aptitud, como el manejo del pH, el balance ganancia-pérdida de mejoradores y/o nutrientes, los procesos de salinización-alcalinización y las "enmiendas" a aplicar. Figura 1.11.

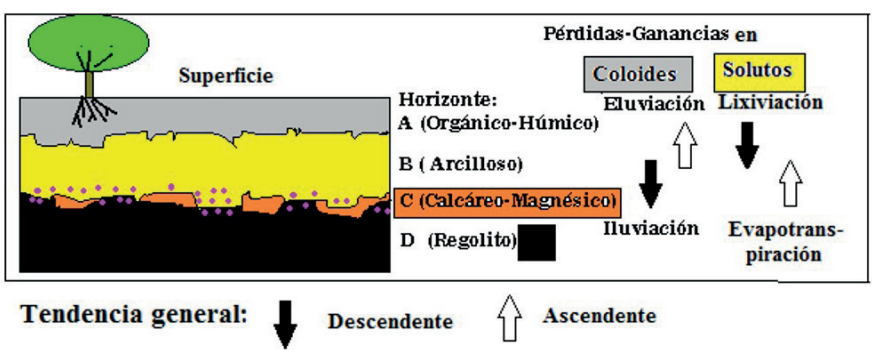


Figura 1.11: Esquema de los procesos de evolución químico – coloidal que se pueden generar en un suelo

Campo ambiental: Técnicas geoquímicas se emplean para realizar estudios ambientales previos, durante y después de cualquier tipo de explotación económica tanto para prevenir y mitigar impactos como para vigilar la evolución final del ambiente en el área afectada.

Galliski, M. (1996) afirma que "*El rápido agravamiento de los problemas ambientales, ha dado origen a partir de la década del 60, a una nueva rama de la geoquímica, llamada Geoquímica Ambiental. Su campo de estudio abarca las complejas interacciones químicas entre la litósfera, hidrosfera, atmósfera y biósfera, especialmente las que conducen a la degradación del ambiente causadas por la acción antrópica. En consecuencia, incluye el estudio de los numerosos factores que condicionan la fuente, distribución, dispersión, concentración y tiempo de residencia de los elementos y compuestos químicos en los sistemas del ciclo biogeoquímico. Está evidentemente vinculada con la salud humana, animal y vegetal y su tarea es por naturaleza multidisciplinaria.*

En la medida que los diagnósticos producidos en el marco de esta disciplina, detecten los problemas de contaminación de suelos, agua, aire y biota en zonas rurales y urbanas, mediterráneas y marítimas, desarrolladas o subdesarrolladas, se podrán iniciar acciones combinadas de corrección de los problemas y mitigación de los efectos nocivos. Paralelamente, la transferencia de esta información a las autoridades administrativas responsables y a la población, facilitará el proceso de mejoramiento de la calidad de vida y la aproximación paulatina a diseños económicos de desarrollo sustentable.

Las acciones tendientes a lograr estos objetivos, necesariamente implican la programación de servicios regionales destinados a establecer un Atlas Geoquímico, que constituya una Línea de Base con la cual se contrasten los controles periódicos posteriores establecidos para monitorear la evolución de los sistemas".

No hay límites estancos entre los diversos campos de aplicación y en todos ellos, participa la Geoquímica.

CAPÍTULO 2

AMBIENTES GEOQUÍMICOS Y PROSPECCIÓN MINERA

2.1 La Prospección Geoquímica en Argentina. Antecedentes

Aunque las culturas precolombinas tuvieron conocimientos de minería y metalurgia, lo que puede considerarse como el primer gran período de prospección minera en el continente americano, se inició con la llegada de los conquistadores a partir de 1492. Asimismo, es innecesario aclarar que, tanto españoles como portugueses, fueron excelentes prospectores y mineros, herederos de la tradición romana en la materia.

Estas actividades en el actual territorio argentino, fueron de poca monta y las que había, decayeron al comenzar la guerra de la independencia. Recién después de la organización nacional se inicia un modesto y nuevo período de actividad extractiva, que llega hasta la primera guerra mundial y la crisis de 1930. Durante la primera mitad del siglo XX y ante la aparente escasa reserva de recursos mineros, diversas instituciones se ocuparon de evaluar los recursos mineros conocidos en Argentina. La síntesis de esos resultados fue expresada por Angelelli (1950) en su clásico “Recursos Mineros de la República Argentina”. El panorama resultaba insuficiente para lograr un desarrollo industrial sostenido y llevó a las autoridades de la época a promocionar, años después, la ejecución de extensos programas de prospección, con pocos antecedentes en el mundo. En ellos, la prospección geoquímica jugaría un rol destacado.

Aunque estas técnicas se desarrollaron paulatinamente desde principios del siglo XX, recién con la segunda guerra mundial, adquirieron gran difusión. En el caso argentino, el primer antecedente oficial conocido es del Instituto Nacional de Geología y Minería, de la provincia de San Luis, año 1955. Poco después, la Comisión Nacional de Energía Atómica, la incorpora como táctica usual en áreas de Río Negro, Chubut, Córdoba y Salta.

Casi simultáneamente (1962) la Dirección General de Fabricaciones Militares (DGFM) inició en Neuquén, Mendoza, parte de San Juan y San Luis, su célebre “Plan Cordillerano” orientado a la búsqueda de los metales no-ferrosos, según la modalidad en boga de prospección de grandes áreas. Pronto se iniciaron proyectos similares como el de La Rioja, llevados a cabo por el Servicio Minero Nacional (SMN), el Plan

NOA1 (SMN - DGFM), o el Patagonia - Comahue (SMN). Menos extensos, pero respondiendo a criterios similares, pueden citarse los casos de Valcheta (Río Negro), Centro (San Luis), Misiones, etc. En todos ellos, la prospección geoquímica fue una herramienta de uso normal. El objetivo declarado en la mayoría de los casos, fue detectar áreas de interés minero, que pudieran ser atractivas para empresas privadas, en especial depósitos de Cu – Pb – Zn, acompañados ocasionalmente por Au – Ag – Mo u otros (Alderete, 1978).
La magnitud del esfuerzo realizado, se puede apreciar en la Tabla 2.1, tomado de Alderete (1978), en una lista no exhaustiva:

Proyecto	Institución responsable	Superficie (Km^2)	Cantidad de áreas de interés	Cantidad m. perforados	Cantidad de análisis químicos
NOA 1	DGFM - SNGM	255000	105	105000	373000
LA RIOJA	SNGM	65000	11	54000	156000
MENDOZA	SNGM	60000	14	20000	50000
CORDILLERA NO	DGFM	140000	55	58000	174000

Tabla 2.1: Planes de prospección estatal, Fuente: Alderete, 1978

En la Figura 2.1, se muestra el mapa elaborado por Villegas (1975), el cual presenta los grandes y ambiciosos operativos realizados por el Estado en nuestro país, entre 1958-66 y 1965-80, intentando desarrollar la industria minera. El mismo, respondía a una filosofía de la época en vista del escaso éxito de la actividad privada hasta entonces, tratando de repotenciarla bajo orientación estatal, generalmente con apoyo económico de Naciones Unidas. Aún sin incluir algunos planes más modestos como los referidos a Fluorita, Fosforitas, Magnesitas, etc., se advierte que la mayor parte del territorio argentino de interés o con perspectivas mineras ya fue cubierto por la prospección regional o panorámica, que es donde la geoquímica jugó un papel protagónico. Esto no significa que “ya no resta nada por hacer”, sino que “se acabó lo fácil”.

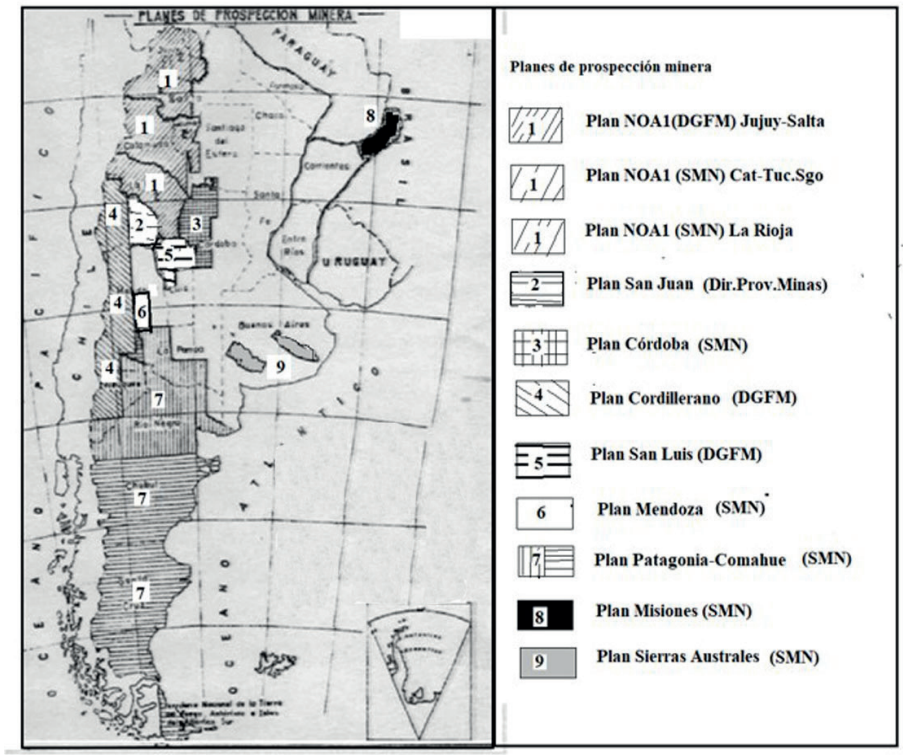


Figura 2.1: Planes de prospección minera. Fuente: Villegas, 1975

Los grandes "Planes" de prospección constituyeron un gran esfuerzo exitoso del estado nacional, porque permitieron detectar numerosas áreas con posibilidades ciertas de mineralizaciones importantes antes desconocidas, varias de las cuales son hoy productivas, están siendo investigadas o permanecen como áreas favorables a la espera de una oportunidad. El mismo caso es el de las investigaciones por Li-K, que nacieron como iniciativas estatales, sobre todo de la DGFM (Dirección de Fabricaciones Militares) y/o de la CNEA (Comisión Nacional de Energía Atómica).

Estos planes de prospección minera han generado las bases cartográficas necesarias y el material bibliográfico, así como de los muestreos, se encuentra en repositorios especiales, como los de la Ex- DGFM y el actual SEGEMAR o "Servicio Geológico Minero Argentino" (tuvo varios nombres en su historia).

Hasta ahora ha predominado la investigación analítica por Cu-Pb-Zn, ocasionalmente también otros elementos como Sb, Mo, Sn, W, U, etc., pero la lógica impone la necesidad de someter las muestras a nuevos análisis por otros elementos o asociaciones, para ampliar el espectro de las posibilidades. Lo mismo se puede decir respecto a las nuevas técnicas de interpretación.

Es innegable que la geoquímica "panorámica" o "regional" de aquel estilo clásico o histórico es una etapa superada. Queda una base de información valiosa como nuevo punto de partida para el futuro.

Las nuevas generaciones de profesionales tendrán que enfrentar problemas nuevos y/o diferentes que los del pasado. En el futuro predominarán los trabajos especializados y/o complejos, el uso generalizado de técnicas de informática, sensores remotos, equipos interdisciplinarios, etc. para la búsqueda de ferroaleaciones, elementos radioactivos, tierras raras, fertilizantes, etc. para los que se necesitará mejor preparación de los profesionales jóvenes.

2.2 Geoquímica de prospección

Esta rama de la geoquímica actúa como auxiliar en la prospección de yacimientos metalíferos no-ferrosos. En algunos casos, sin embargo, se adapta bien para prospectar minerales no metalíferos (ejemplo: boratos, fosforitas, magnesitas, carbonatos sódicos, Li y K en cuencas salinas, etc.).

Si se considera que en la vida de un yacimiento existen varias etapas clásicas (Prospección ➔Exploración ➔Desarrollo ➔ Producción), la Geoquímica se aplica sobre todo en las dos primeras (Geoquímica de Prospección y de Exploración).

El objetivo de esta ciencia se centra en los procesos geoquímicos de concentración y dispersión de elementos que se desarrollan en los ambientes primarios (depósitos producidos por procesos endógenos, como los ígneos y metamórficos) y secundarios (depósitos producidos por fenómenos exógenos, como los sedimentarios), y a partir de ahí en la aplicación de los métodos geoquímicos que permiten al profesional acotar blancos de exploración para la localización de cuerpos mineralizados.

Un depósito mineral es una anomalía geoquímica y por lo tanto, contiene uno o varios elementos en concentraciones anormales. La presencia de éstos en el subsuelo, en distintos tipos de material, se manifiesta en la superficie terrestre por una distribución anormal comparada con los contenidos "normales" de los mismos elementos en la roca. Este tipo de distribución ubicada geográficamente se denomina Anomalía Geoquímica.

2.3 Prospección geológico-económica

Dependiendo de los objetivos, la prospección admite el uso de varias técnicas clásicas de la geología, por ejemplo, teledetección satelital, geología de campo, microscopía, etc., o conexas, como la química analítica, estadística y geofísica (distintos métodos). Los laboreos mineros y las perforaciones corresponden también al campo de la geología aplicada.
Sus usos varían, pero en general se acepta la secuencia siguiente (Figura 2.2):

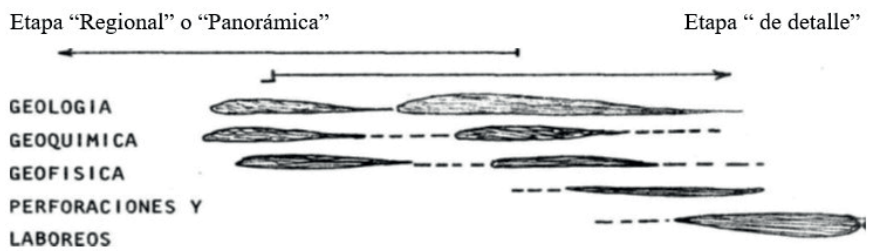


Figura 2.2: Uso de técnicas clásicas de geología según etapa de trabajo

2.4 Geoquímica minera y ambiente geoquímico

Un concepto poco divulgado, pero muy útil en prospección y del cual conviene tener clara conciencia, es el comúnmente llamado "Ambiente Geoquímico", resultado de la interacción de tres componentes:

- Roca que es atacada
- Fluido atacante (a veces pueden ser dos fases fluidas)

- Condiciones ambientales: potencial redox, temperatura, superficie de interacción (porosidad - permeabilidad), tiempo disponible, continuidad, concentración de las soluciones, etc.

Resulta muy sencillo deducir las consecuencias de la combinación de dos reactivos. Existe un tipo de lógica en los procesos químicos que se impone por su propia evidencia y que permite intuir o deducir el resultado de un ensayo químico.
Por ejemplo, si en un vaso de precipitado se coloca una solución de sulfato de cobre y un trozo de caliza, no causará mucha sorpresa la formación de carbonatos cupríferos recubriendo la roca. Figura 2.3. La intensidad de esta reacción dependerá de otros factores como el pH de la solución, la superficie de contacto, la permeabilidad de la roca, el grado de fracturación, la temperatura, etc., hasta que finalmente por ser un sistema "cerrado" se llega a un estado de equilibrio.

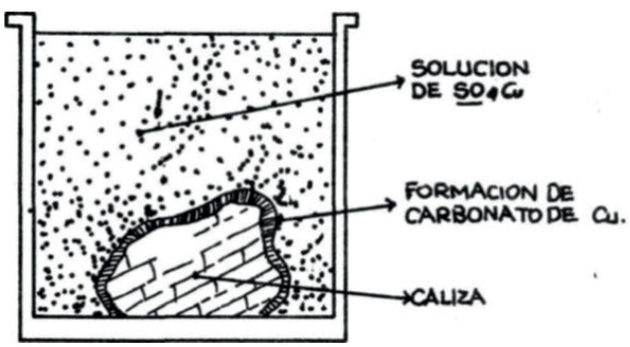


Figura 2.3: Ejemplo clásico: Interacción entre roca receptora y fluido atacante en laboratorio.

A diferencia del laboratorio, en la naturaleza predominan los sistemas "abiertos" donde intervienen también otros factores tale como el tiempo disponible, la intermitencia o continuidad o variedad de aportes y la eliminación de residuos.
Estos factores secundarios junto con la naturaleza de las rocas afectadas y el fluido de aporte circulante definen lo que se conoce como "Ambiente Geoquímico".
Al igual que el ciclo geológico natural, el ciclo geoquímico puede divi-

dirse en “Exógeno” y “Endógeno”.

2.5 Condiciones ambientales endógenas

Un aporte hidrotermal afectando litologías diferentes, puede originar mineralizaciones muy distintas. Figura 2.4.

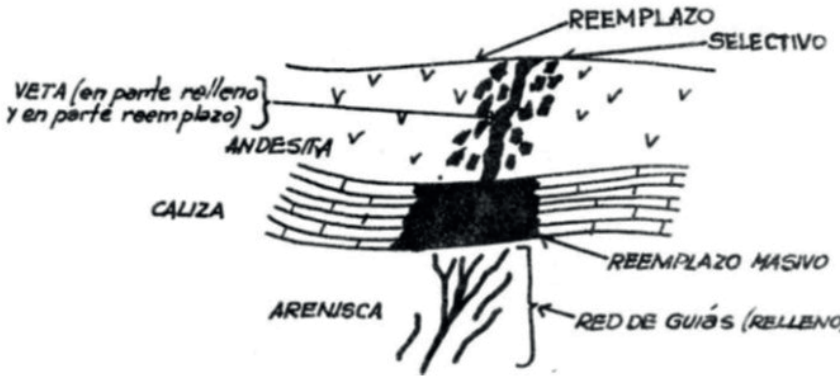


Figura 2.4: Efecto de la roca de campo sobre un fluido atacante. Mineralizaciones generadas por aporte hidrotermal en tres litologías diferentes: andesita, caliza y arenisca

Si afecta a una roca químicamente inerte y compacta (por ejemplo: cuarcita), que sólo admite relleno de fisuras abiertas, se desarrollarán mineralizaciones de relleno, tipo vetas, brechas, stockworks, etc.
En el extremo opuesto, si la afectada es una roca químicamente muy reactiva se puede producir un reemplazo metasomático (por ejemplo: Skarns).
En el caso de una andesita, con caracteres químicos y físicos intermedios, puede haber combinación de ambos fenómenos (por ejemplo: impregnación de la roca porosa, pero a la vez con reemplazo selectivo de anfíboles y plagioclasas).
En la Figura 2.5 se presentan fotos de mineralizaciones de relleno y reemplazo.

Figura 2.5: Aspectos clásicos de mineralización de relleno y de reemplazo.

2.6 Condiciones ambientales exógenas

La respuesta de los sulfuros y en especial la pirita en los afloramientos (casi siempre el sulfuro más abundante), orienta sobre el Ambiente Geoquímico dominante: **Dispersivo-Resistivo o Intermedio.** Figura 2.6.

Figura 2.6: Las áreas potencialmente mineralizadas por metales base pueden ser acompañadas por piritización, que al oxidarse genera H2SO4 el cual acciona sobre la roca de campo, resultando así un ambiente geoquímico local (interacción Fluido/ Roca) que permite por ejemplo, deducir si hay enriquecimiento supergénico o residual de elementos de interés económico

Si un depósito de sulfuros de Cu–Ag comienza a meteorizarse, las consecuencias más clásicas y conocidas son los procesos de **lixiviación y enriquecimiento supergénico**. Para ello, es condición indispensable la fuerte acidez del medio a expensas de la oxidación de pirita, cosa que no sucede si el depósito está alojado en calizas reactivas, o si tiene ganga calcárea.
Exactamente lo contrario sucede en una arenisca químicamente inerte donde la acidez se desarrolla sin barreras.

2.7 Ambiente geoquímico y ciclo natural

Así como la meteorización oxidante de un depósito mineral, en especial si son sulfuros, puede traducirse en procesos de lixiviación y enriquecimiento supergénico, con una zonación vertical característica, también se generan anomalías geoquímicas al oxidarse o disgregarse ciertos minerales.
Se liberan elementos o compuestos, que pueden escapar (migración química) en solución o por arrastre (migración mecánica) desde la zona mineralizada, ya sea siguiendo el flujo freático y/o las aguas vadosas.
Esos “escapes”, más conocidos como “Trenes de dispersión” representan uno de los fundamentos principales de la prospección geoquímica. Figura 2.7.

Existen dispersiones “químicas” y “mecánicas”.

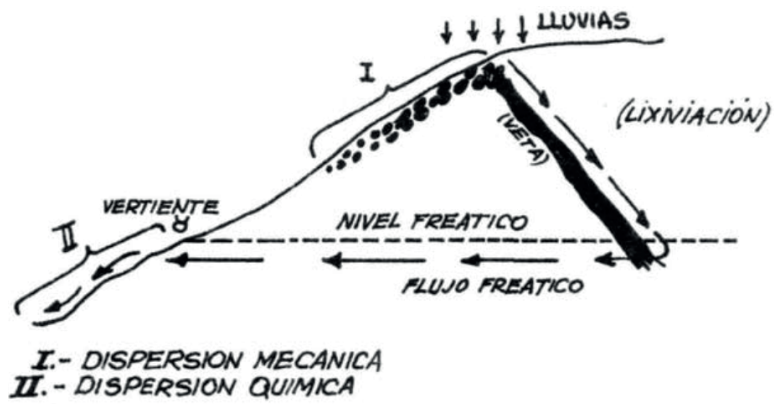


Figura 2.7: Trenes de dispersiones mecánicos y químicos

Las propiedades del elemento de interés (mayor o menor solubilidad, estabilidad ante la meteorización, pendiente regional y naturaleza de la roca de campo), definirán la distancia al punto de origen. En general, a igualdad de condiciones, las dispersiones "químicas" son más extensas que las mecánicas.
La Figura 2.8 esquematiza la influencia de la roca de caja en los trenes de dispersión aguas abajo.

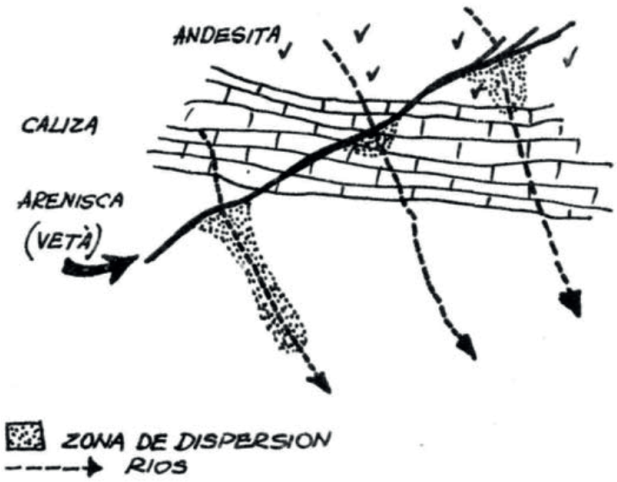


Figura 2.8: La roca de campo limita o facilita la magnitud de la dispersión rio abajo

La geología regional o semiregional actúa como el gran controlador de las soluciones acidas derivadas de oxidación de sulfuros (en especial, pirita). En general, los ambientes calcáreos o con plagioclasas cálcicas tienden a limitar la "dispersión química" de los metales solubles mientras que los "silicosos" (rocas poco reactivas) tienden a facilitarlas.
Existen dispersiones "Exógenas" y "Endógenas", siendo las primeras las más frecuentes y mejor estudiadas.

2.8 Factores que influyen en la dispersión geoquímica

En la dispersión geoquímica influyen diversos factores entre los que se pueden mencionar:

- Régimen hídrico y clima
- Pendiente y relieve

- Reactividad de la roca de campo y/o ganga
- Asociación paragenética

Un clima húmedo y cálido producirá meteorización más intensa que uno árido, favoreciendo la dispersión química.
Un régimen de lluvias torrenciales, en zonas secas, favorece las dispersiones mecánicas.
Ambos casos están influenciados por la pendiente y el relieve, así como por la existencia de una freática estable o fluctuante y el tipo o eficacia del drenaje.
Por último, cabe una mención a la Asociación Paragenética y en especial reiterar la importancia del balance pirita vs otros sulfuros; la primera generando reactivos naturales - H_2SO_4, $FeSO_4$, $Fe_2(SO_4)_3$- y los segundos consumiéndolos para poder disolverse.
Si bien el último factor es obvio en el caso de los sulfuros metálicos (que es el empleo más común hasta ahora de la Prospección geoquímica), es innegable que todos influyen, aunque en medida variable, en la dispersión de los demás elementos acompañantes.
Pueden imaginarse muchas combinaciones de los factores y hasta cierto punto "predecir el comportamiento de los metales" que se espera detectar (Blanchard, 1961).

2.9 Los ambientes geoquímicos y la prospección

Es un principio natural que "todo lo que aflora se meteoriza y erosiona". Lo mismo sucede con un yacimiento y en consecuencia habrá dispersión geoquímica secundaria (o "Exógena") de los elementos presentes, pero la importancia de esa migración (mecánica, química o mixta) es controlada por el conjunto de condiciones que forman el ambiente geoquímico regional.
El "ambiente geoquímico" comprende grandes regiones, sometidas a un determinado clima, régimen hídrico, pendiente y tipo de relieve. Su extensión es casi "infinita" si se las compara con el tamaño normal de un yacimiento, que es un fenómeno puntual y casi insignificante o local. Sin embargo, en el yacimiento hay una asociación paragenética, cuya presencia puede ser sospechada hasta por mera especulación

geológica (ejemplo: si existen cuerpos ultrabásicos es de esperar presencia de Cr-Co-Ni-Pt-Mg), o por existencia de manifestaciones minerales insignificantes, laboreos mineros y hasta leyendas regionales ("Quebrada de las Minas", "Puesto del cobre", "Co Cori" o sea "Co del oro", etc.).

De acuerdo a los minerales esperados y conociendo la geología regional se puede hacer una estimación del grado o tipo de dispersión que pueden tener esos elementos y hasta planificar cual sería la equidistancia de muestreo más adecuada.

En todos estos casos conviene evaluar la posible influencia del factor litológico en el ambiente geoquímico y en el grado de dispersión.

Al parecer la respuesta depende especialmente de las proporciones relativas de cuatro componentes fundamentales: SiO_2 – (Na, K) O - MgO - CaO, en la roca de campo. El resultado será rocas con una tendencia "Dispersiva", "Retentiva" o "Intermedia". Con los cuatro componentes mencionados la mayoría de las litologías, cualquiera sea su origen, cabrían en el esquema que se muestra en la Figura 2.9.

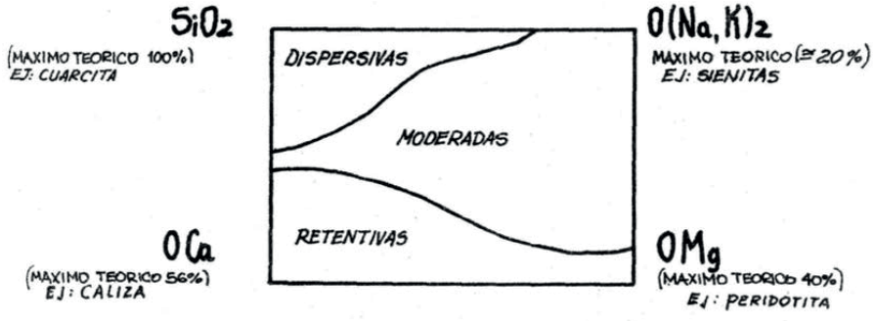


Figura 2.9: Tendencia "Dispersiva", "Retentiva" o "Intermedia" en distintos tipos de rocas y proporciones relativas de los cuatro componentes fundamentales: SiO2 – O (Na, K) - OMg - OCa.

Las rocas "dispersivas" son aquellas inertes ante los ácidos. Por ejemplo, casi todas las areniscas cuarzosas, cuarcitas, muchas metamorfitas (gneises, migmatitas) y las ígneas ácidas. En cambio, las "retentivas" son las calizas, dolomitas, margas, sedimentarias de cemento

calcáreo, muchas ultrabásicas, básicas y las mesosilíceas propilitizadas.
Las "moderadas" pueden serlo en sentido retentivo o dispersivo, por ejemplo, las ígneas alcalinas, muchas básicas, algunas de transición a ultrabásicas, las sedimentarias y metamórficas de tipo arcilloso (pizarras, lutitas) y casi todos los esquistos muy cloríticos o micáceos. Este último grupo es muy afectado por los factores exógenos, tales como el clima, lo cual puede hacer variar bastante su comportamiento en uno u otro sentido.

2.10 Asociaciones paragenéticas, geoquímicas y rocas ígneas

En la naturaleza muchos elementos tienden a formar grupos asociados: donde está alguno de ellos es de esperar muy razonablemente, la presencia de los otros. Ejemplos Pb-Zn-Ag.
El motivo de estas "simpatías" o afinidad no siempre es fácil de explicar. Son asociaciones geoquímicas naturales de elementos (Ginzburg, 1960).
De igual modo, existen asociaciones de minerales, formados bajo condiciones similares llamadas **asociaciones paragenéticas**. Ejemplo: galena-blenda-calcopirita.
No siempre la asociación geoquímica de elementos tiene correlato exacto en la paragénesis. Ejemplo clásico: la asociación geoquímica Mo-W-Sn es muy conocida.
Sin embargo, son raros los yacimientos de molibdenita- casiterita, aunque son frecuente las pequeñas manifestaciones de molibdenita-wolframita (sin casiterita) o wolframita-casiterita (sin molibdenita).
Hay algunos depósitos (ejemplo: Distrito Clímax EEUU) donde aparecen los tres minerales, pero formando cuerpos minerales independientes entre sí. Figura 2.10.

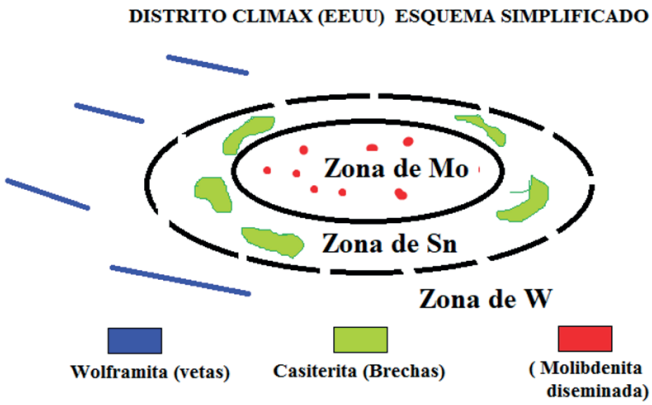


Figura 2.10: Esquema simplificado del distrito Climax (EEUU)

"Asociación geoquímica" y "Asociación paragenética" no son sinónimos.

a) Las "Asociaciones Geoquímicas" son asociaciones naturales de elementos. Ejemplo: Cu-Pb-Zn.
b) Las Asociaciones Paragenéticas son asociaciones naturales de minerales. Ejemplo: Calcopirita-Galena-Blenda con un origen común ("Firma Geoquímica").
c) Generalmente ambas tienden a coincidir y en general se comportan como "Termómetros Geológicos" muy confiables.

La Figura 2.11 es un gráfico ilustrativo de las asociaciones paragenéticas.

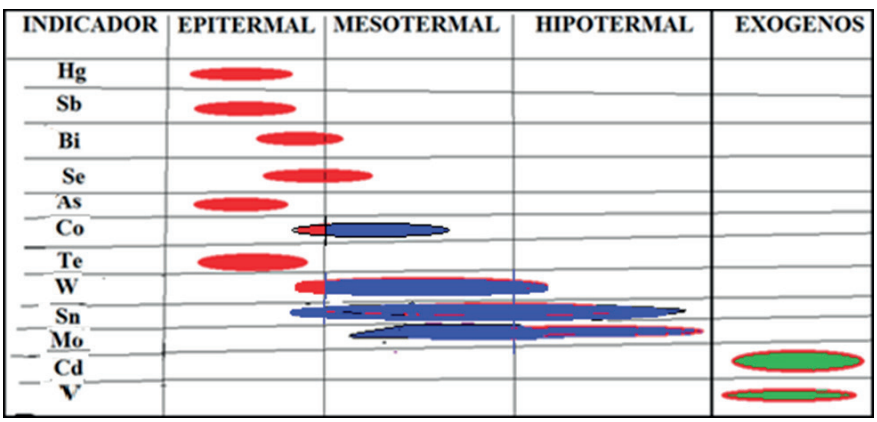


Figura 2.11: Indicadores paragenéticos más frecuentes

En yacimientos epitermales de tipo “Sulfato Ácido” (Alta Sulfidación) se da la máxima abundancia de “Elementos y Minerales Indicadores”. No necesariamente forman menas por sí mismos. Ejemplos: Cerro Potosí (Bolivia); Pirquitas (Jujuy).
Esta abundancia de indicadores tiende a asociarse con una mineralogía muy especial de sulfuros Dobles o Complejos, denominados comúnmente como “Cobres grises” o “Sulfosales”. Son sulfuros de Cu-Pb-Zn, que incorporan en su molécula, uno o más elementos “Indicadores”, sobre todo As-Sb-Bi-Sn-Ni-Co-Cd. Figura 2.12.

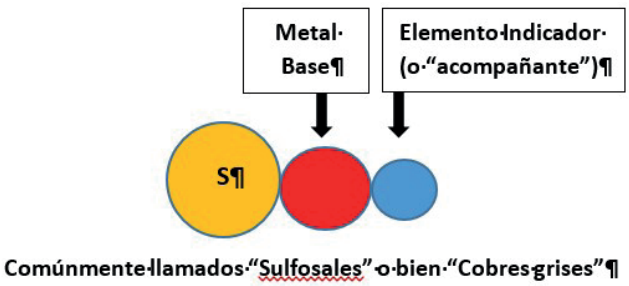


Figura 2.12: El esquema ilustra la presencia de Sulfuro (S), el Metal Base y el Indicador

En algunos artículos recientes hay tendencia a invertir o deformar estos nombres. Conviene evitar la ambigüedad.
La Figura 2.13 muestra los elementos indicadores más frecuentes.

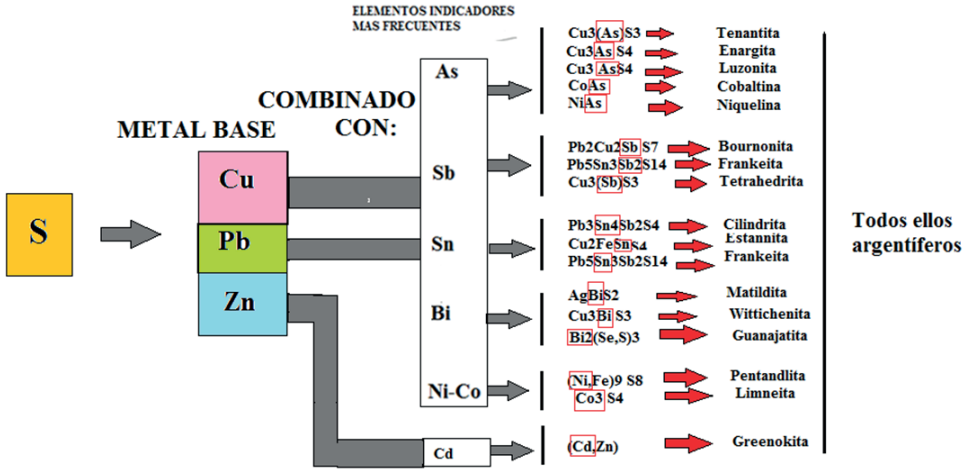


Figura 2.13: Relación entre indicadores y menas epitermales complejas.

Estos grupos de “Asociados paragenéticos” son excelentes “indicadores” del ambiente de formación, tanto desde el punto de vista “geoquímico” como desde el “mineralógico”.
Aparecen al microscopio como desmezclas en sulfuros más comunes, especialmente en galena y en calcopirita. Figura 2.14.

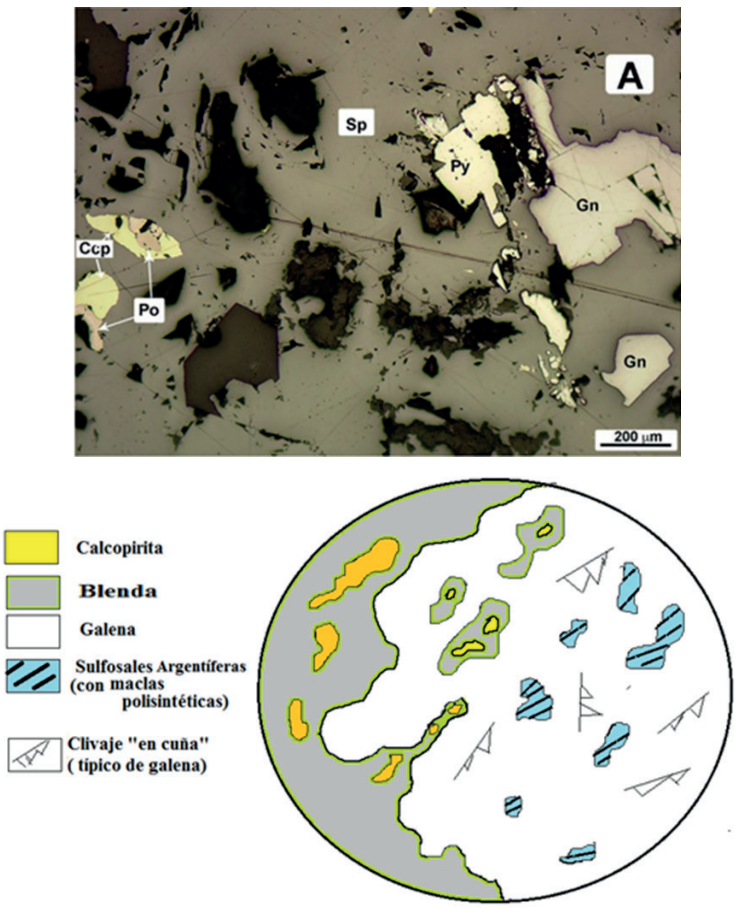


Figura 2.14: A. La blenda o esfalerita (Sp), ocupa la mayoría de la imagen. La pirita (Py) se distingue por su reflectividad alta y la tendencia a formar cristales idiomorfos. La calcopirita (Ccp) de color amarillo más intenso y menos brillante que la pirita, está acompañada de pirrotina (Po), de color beige a pardo y una reflectividad menor que la calcopirita. También hay un grano de galena (Gn) en la que se pueden observar las formas triangulares de color negro (triangular pits) que se origina en el pulido de la muestra y que son una de las propiedades que ayudan a identificarla.
B. Esquema de la vista al microscopio de sulfosales en menas polimetálicas

Normalmente existe una asociación geográfico-espacial de ciertas mineralizaciones con algún tipo especial de roca ígnea, que corresponden a cuatro grandes grupos, series o familias de magmas: **ácidas, mesosilíceas, alcalinas y básicas-ultrabásicas.**
Cada uno de ellos tiene vinculado algún tipo de yacimientos y/o asociaciones paragenéticas y/o asociaciones geoquímicas.
La Tabla 2.3 muestra algunos ejemplos clásicos:

Roca ígnea	Elementos	Asociación paragenética	Yacimiento
Granitoides	Sb-Hg-Au	antimonita-cinabrio-oro	Epitermales
	Sn–W-Bi	casiterita-wolframita-bismutina	Hipotermales
	Li-Be-Ta	lepidolita-berilo-tantalita	Pegmatíticos
Mesosilíceas	Cu-Mo	calcopirita-molibdenita	Pórfidos Cu
	Pb-Zn-Ag	calcopirita-oro-s.s.ag	Epit.polimetálicos
	Pb-Zn-Cu	galena-blenda-calcopirita	V.M.S (Volcanic Masive Sulphides)
Alcalinas	Cb-R.R.E.-P	pirocloro-monacita-apatita	Carbonatitas
Básicas-Ultrabásicas	Cr-Co-Ni	cromita-pentlandita-cubanita	Chipre

Tabla 2.3: Se muestran algunos ejemplos de la relación existente roca ígnea, elemento químico, asociación paragenética y tipo de yacimiento

2.11 Indicadores Geoquímicos

Son elementos que normalmente aparecen asociados a otros de mayor valor, pero por su sola presencia, abundancia o poca movilidad, advierten al prospector, la proximidad de una mineralización o de sus anomalías geoquímicas.
Permiten ubicar el “foco” o “centro” de anomalía y su probable tipo de mineralización (“Firma Geoquímica”).

Los indicadores pueden ser:

- Primarios (o Hipogénicos). Ejemplos: Mo (Re)-W-Sn-As-Au-Sb-Pb.
- Secundarios (o Supergénicos). Ejemplos: Hg-Cd-V-Th-U-Se-P-Bi-Ag-Cu

Un elemento indicador tiene que formar parte normal de la misma asociación geoquímica o paragenética con la cual se lo asocia.
Por ejemplo, la asociación galena-blenda-calcopirita por meteorización

tiende a formar los respectivos sulfatos. Se sabe que los de Cu y Zn son muy solubles en medio ácido y por lo tanto, en los procesos de lixiviación con frecuencia resultarán eliminados del afloramiento, como sulfatos en solución. En cambio, los sulfatos de Pb, virtualmente insolubles, pueden sobrevivir en la superficie meteorizada y hasta sufrir "enriquecimiento residual" por desaparición de acompañantes.
Resulta lógico entonces usar el Pb como indicador para depósitos lixiviados de sulfuros.
Asimismo, es muy común que elementos que se asocian para formar minerales típicos del ciclo endógeno, una vez meteorizados tienden a seguir ciclos diferentes.
El caso de los feldespatos donde K y Na son liberados por la meteorización y luego siguen caminos diferentes, es uno de los mejores ejemplos.
Los requisitos a cumplir para que un elemento químico sea considerado un indicador, son:

a) Que sus minerales o el mismo en estado de reemplazo diadócico, integren normalmente la asociación mineralógica buscada.
b) Tener cierto grado de dispersión, pero no excesiva (cientos de metros).
c) Tener poca movilidad en condiciones oxidantes (Elemento "Sedentario")
d) Ser detectable tanto con los métodos analíticos disponibles, como por el tipo de muestreo utilizado (de poco o nada sirve analizar un elemento si el tipo de muestreo no es el adecuado o el laboratorio no cuenta con el método analítico apropiado).

CAPÍTULO 3

EXPRESIÓN GEOQUÍMICA MINERA

3.1 Expresión geoquímica. El caso regional

La captación de anomalías geoquímicas requiere comprender su utilidad, significado y comportamiento.
La experiencia argentina en materia de prospección y exploración geológico económica se basaba sobre todo en el comportamiento de ciertos metales durante el ciclo exógeno, en otras palabras, a partir del comienzo de la meteorización.
Con las dispersiones endógenas, aún no existe experiencia de campo similar, al menos durante la prospección, aunque hay grandes avances en el rubro ambiental y en la investigación académica.

3.2 Halos de dispersión

Los yacimientos minerales suelen estar rodeados por un "halo de dispersión primaria", producto de los mismos procesos mineralizantes que formaron el depósito, solo que 2 o 3 veces más extensos.
La dispersión primaria generada bajo superficie, está relacionada a las rocas frescas, no meteorizadas.
La movilidad de los elementos en ambientes profundos (ambiente primario) está influenciada por la temperatura y presión alta, restringida a la circulación de fluidos y bajo contenido de oxígeno libre.
Los datos obtenidos pueden suministrar información adicional a la historia geológica del área y constituirse en una ayuda para la búsqueda de minerales de interés económico. Al estudiar las rocas es importante identificar el contenido de los elementos químicos presentes, los cuales se dispersan y generan aureolas indicadoras de alteración hidrotermal y zonación alrededor del depósito mineral. Figura 3.1.

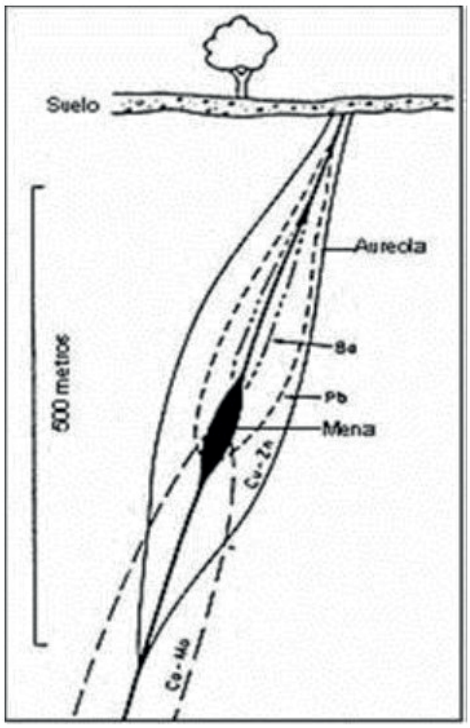


Figura 3.1. Anomalía y Halos de Alteración en un Ambiente Primario

Como respuesta a la meteorización, las rocas tienden a producir suelos autóctonos cuya conservación depende de la velocidad de la erosión. Si los suelos derivan de rocas con mineralización, aunque sea pobre, aparecerán "enriquecidos" en los metales asociados, en comparación con los que derivan de rocas "normales" o "estériles".

Este halo raramente es simétrico respecto al depósito pues tiende a "reptar" o deformarse cuesta abajo, según la pendiente del terreno y generalmente se lo conoce como "halo de dispersión secundario".

La movilidad de los elementos químicos en ambientes superficiales (ambiente secundario) está relacionado directamente con los procesos de meteorización, erosión y sedimentación en la superficie de la tierra. Está caracterizada por baja temperatura, constante presión, movimiento libre de soluciones y abundante oxígeno y agua, dióxido de carbono, efectuándose principalmente en medios acuosos.

La dispersión secundaria generada por agentes superficiales es variable para cada elemento y se relaciona con la distribución alrededor de un depósito. Figura 3.2.

Aunque los halos pueden ser bastante más extensos que la fuente de origen, siguen siendo demasiado pequeños en el contexto regional y si no existen evidencias geológicas aflorantes que ayuden a detectarlo, pueden ser casi tan difíciles de ubicar como el yacimiento mismo.

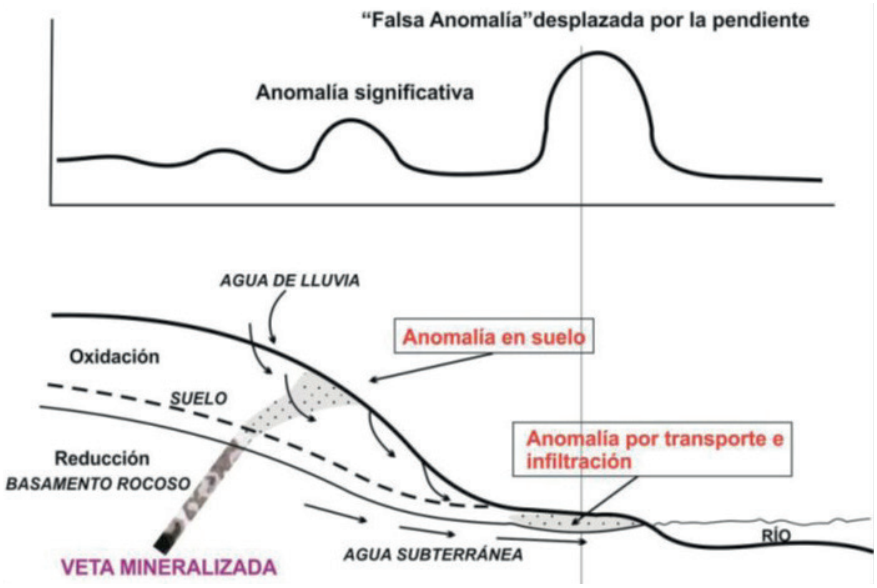


Figura 3.2. Anomalía geoquímica – Halo de dispersión secundaria

3.3 Trenes de dispersión

La erosión fluvial es típicamente retrógrada o retrogradante y es concepto básico de la geología que "todo lo que aflora se erosiona".
Si el foco o fuente de origen de la mineralización o anomalía geoquímica está en un relieve positivo, tarde o temprano caerá bajo la influencia de algún cauce fluvial activo en retroceso, comenzará a erosionarse y será arrastrado por esos ríos ("sedimento de corriente") resultando afectado o "enriquecido" por los mismos metales que contenía el depósito o su halo primario y secundario. Figura 3.3.
El tramo del cauce en que esa contaminación es "captable" se conoce como "tren de dispersión". Este concepto justifica el muestreo de sedimentos de corriente, como el mejor complemento de los relevamientos geológicos regionales, cuyo objetivo es detectar trenes de dispersión

(o sea sedimentos de corriente anómalos) para luego investigar su procedencia.
Este contenido en los sedimentos del río, normalmente se irá "diluyendo" aguas abajo a medida que se aleja de la fuente de origen y/o recibe aportes estériles de los afluentes hasta ser indistinguible de los normales (fin del tren de dispersión).

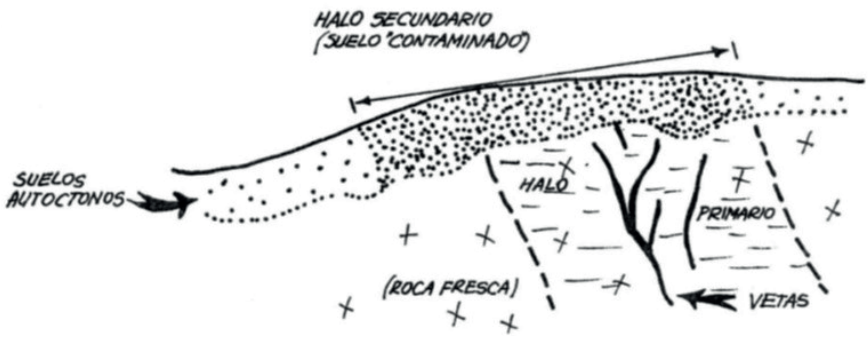


Figura 3.3: Perfil esquemático. Halos de dispersión primarios y secundarios.

3.4 Elementos contenidos en trenes de dispersión y halos secundarios

La formación de un halo secundario es un proceso bastante similar a los procesos edáficos, aunque muy raramente se alcanza un grado de madurez comparable a los suelos agrícolas.
Partiendo de la roca original en proceso de fragmentación hasta formar un regolito que luego sufre meteorización química, hay elementos solubles que migran en profundidad y se "empobrecen en superficie" (lixiviación) mientras que otros hacen lo contrario (impregnación ascendente por evapotranspiración). Ejemplos: Cu y Zn vs Li, K, B.
Algo comparable sucede con el material clástico fino o coloidal producto de la meteorización del mismo regolito, que puede originar una migración descendente (procesos de iluviación) hasta un nivel de acumulación conocido como horizonte B o arcilloso (o también "horizonte sequioxídico)", idéntico a la formación del "piso de greda" tan conocido para los que hacen "prospección a la batea".

Por la abundancia de coloides arcillosos y limos finos, este nivel suele tener alto poder de adsorción y/o de intercambio iónico que le permite retener o inmovilizar selectivamente muchos iones migratorios en solución. Existen ejemplos de suelos enriquecidos tanto en elementos exclusivamente "residuales" como en "transportados" o en ambos tipos. Cuando comienzan a formarse los trenes de dispersión, se reactivan tanto la dispersión mecánica como la química, reflejado en la distribución de elementos "sedentarios" o "móviles" que existan. Las dispersiones de metales sedentarios son más bien mecánicas (Ej. Pb-Sn-Au-Mo), tienden a ser "proximales" respecto al origen, mientras que las de tipo "químico" ganarán importancia en los tramos "distales" (río abajo) por tener más desarrolladas sus tendencias migratorias (Ejemplo Cu, Zn, Ag). Figura 3.4.

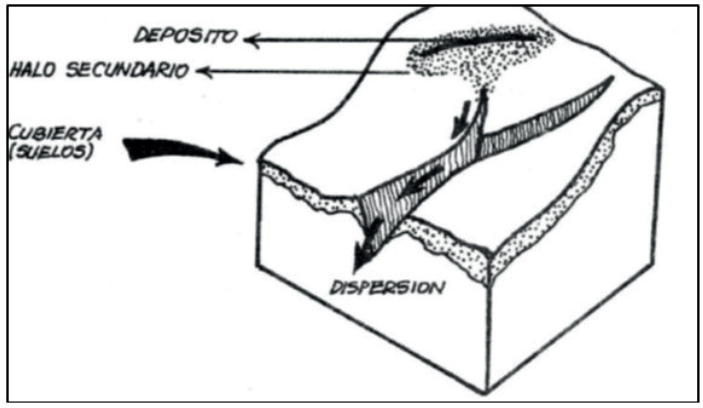


Figura 3.4:Relación entre Depósito - Halo secundario – Dispersión.

3.5 Trenes y anomalías falsas o accesorias

Superpuestos a los trenes principales, pueden desarrollarse centros accesorios de dispersión. Son muy comunes donde hay manantiales de aguas ácidas (drenaje ácido de rocas o DAR), avalanchas de rodados mineralizados, vegas o pantanos (éstos, por su poder reductor, son notables en el Cu y en menor grado en el Zn y la Ag). Figura 3.5.

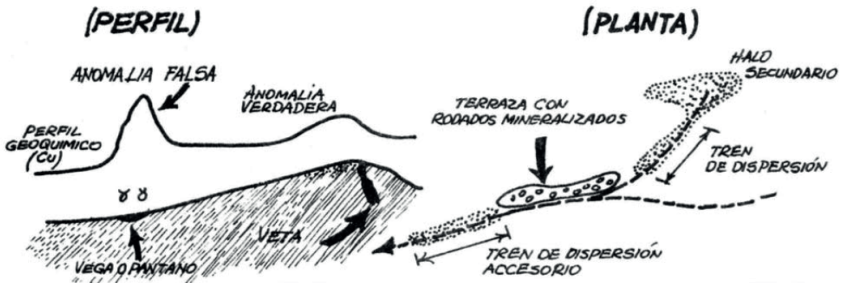


Figura 3.5: Anomalías aparentes (comunes en muestreos de sedimentos de corriente) representados en perfil y planta.

3.6 Migración. Influencia del ambiente geoquímico regional

La capacidad migratoria de un elemento en un tren de dispersión, depende de la susceptibilidad de sus minerales a la meteorización, la solubilidad de las sales resultantes y la naturaleza de la principal roca de campo ("retentiva" o "dispersiva").

No existe ningún mineral "inmune a la meteorización", pero algunos se acercan bastante y en la práctica migran solo en forma mecánica. Ejemplos: oro, casiterita, cromita, monacita y en general todos aquellos minerales pesados que se acumulan en placeres (aptos para "prospección a batea").

El problema es que su dispersión puede ser insuficiente (solo decenas o pocos centenares de metros) y detectar el blanco puede ser tan difícil como localizar el origen directamente en el terreno.

Los minerales de elementos migratorios en cambio, son "químicamente" inestables y sus productos son muy solubles, especialmente en medio ácido (casos de DAR) alcanzando muy buena dispersión en litologías químicamente inertes (no reactivas). En este caso, el muestreo geoquímico de sedimentos de corriente obtiene la mejor respuesta.

La extensión de algunos trenes de dispersión puede alcanzar desde cientos de metros hasta decenas de kilómetros. Existen ejemplos notables tales como:

a) Río Blanco (San Juan) donde las anomalías de Cu y Zn nacidas en el C° Potro y Cordón de la Brea - Cordillera de la Rioja, llegan

hasta cerca de la localidad de Angualasto. (Más de 150 Km).

b) Filo Colorado (Catamarca) llega sólo hasta Andalgalá (35 Km) porque allí se acaba el muestreo, de lo contrario llegaría seguramente hasta el Salar de Pipanaco (unos 70 Km).
c) Santa Clara (Mendoza) alcanza más de 40 Km, desde la alta cordillera hasta cerca de Tupungato.
d) En el caso del Río El Candado (Andalgalá-Catamarca), los trenes de dispersión de Cu-Zn (en mucho menor grado Pb) generados en el área de alteración hidrotermal de Filo Colorado se extienden libremente con valores anómalos hasta aguas abajo de Andalgalá (aproximadamente 70 Km). En cambio, en Bajo de la Alumbrera sus trenes de dispersión no logran extenderse más de 2 a 3 Km, hasta los Baños de Vis Vis.

La explicación está en que el cauce del Río El Candado corre en su totalidad sobre granito que es roca no reactiva, constituida principalmente por feldespatos potásicos, mientras que el río Amanao (que nace en Alumbrera) corre en su primer tramo sobre andesitas propilitizadas, que es roca reactiva, integrada por feldespato andesítico. El primero "facilita" la dispersión por ser aguas moderadamente ácidas (pH 5 a 7). En el segundo los efluentes tienen pH 7 a 8 lo que limita la dispersión química y está evidenciado por la precipitación de costras calcáreas. Se hace notar que con alteración hidrotermal argílica o propilítica, el primer efecto visible al microscopio, es la descomposición de las plagioclasas (en especial a partir de andesina) en caolín + calcita.

3.7 El muestreo geoquímico

La prospección geoquímica es hoy una herramienta indispensable como complemento de la geología de campo. En consecuencia, debe existir cierta relación o razonabilidad entre la intensidad o tipo de muestreo geoquímico y el grado de detalle (o escala) del relevamiento geológico. El problema es ¿cuánto es "suficiente" o "adecuado"?.
La metodología de muestreo condiciona el grado de certidumbre de los resultados y normalmente constituye un porcentaje muy significa-

tivo del costo total de un proyecto. En consecuencia, es conveniente establecerla previamente mediante protocolos cuidadosamente elaborados para distintos medios, fines y escalas.
En el muestreo geoquímico, se deben considerar los siguientes factores:

3.7.1 El material a muestrear

Puede ser:

a) Esquirlas de roca

Este muestreo se usa sobre todo en tareas de detalle, obteniéndose por lo menos 20 trozos más o menos representativos de una superficie de 20 a 25 m^2 (4m x 5m). Cada esquirla, debe ser al menos del tamaño de una nuez o mandarina chica y el conjunto pesar entre 1 y 2 Kg.
En prospección de oro parece haber mejor representatividad con muestras grandes. De allí que muchas empresas exigen no menos de 3 o 4 Kg por muestra (con las dificultades de transporte imaginables).
La veintena de esquirlas no deben estar demasiado juntas. En lo posible se sigue una grilla o reticulado ortogonal de 1 m de lado donde en cada cruce se extrae una esquirla (Figura 3.6). Tiende a ser engorroso. En la práctica se puede ser más expeditivo, por ejemplo, con una disposición en espiral, en cruz o en "x" cubriendo una superficie de 25-30 m^2. Es más rápida e igualmente efectiva y no cambia mucho el resultado. Los criterios varían según la empresa.
Estos estilos o criterios se usan especialmente en mineralizaciones más o menos "isótropas", donde gránulos minerales o vetillas delgadas aparecen homogéneamente dispersos en grandes masas de roca de menor ley o en afloramientos de varias decenas de Has. Ejemplo, los yacimientos de "cobre porfídico" (que pueden ser de Cu, de Cu-Zn, de Mo, de Au, de Sn, etc.) y la mayoría de los llamados "diseminados".

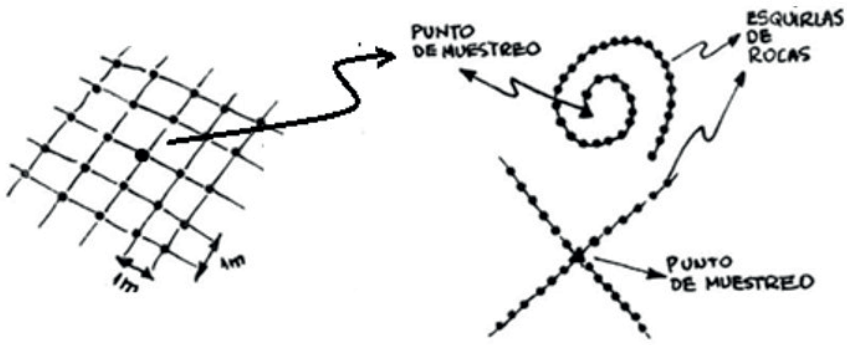


Figura 3.6: Criterios esquemáticos para el muestreo

Más comunes son los casos de pequeñas o medianas concentraciones minerales de muy alta ley, que aparecen incluidas o englobadas en roca estéril (mineralizaciones "anisótropas" o irregulares). Ejemplo: yacimientos vetiformes, mantos sedimentarios, chimeneas de brecha, lentes de sulfuros masivos, etc.

Es preferible el muestreo en perfiles, tomando esquirlas de roca (Figura 3.7) transversalmente a la zona mineralizada y aclarando la potencia muestreada (no es necesaria gran precisión).

Los contenidos de mineralizaciones isótropas suelen ser similares a los de mineralizaciones irregulares o anisótropas. Todo es cuestión de promedios.

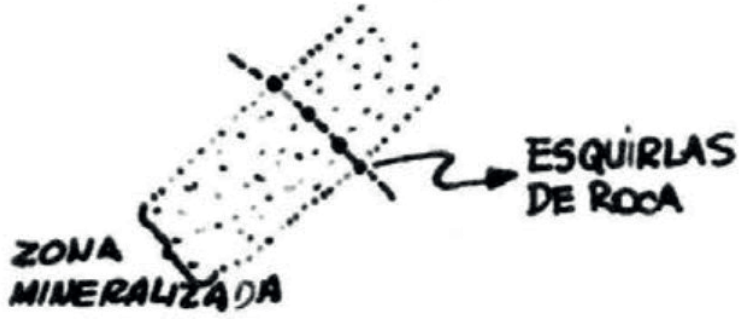


Figura 3.7: Criterio de muestreo en mineralizaciones "anisótropas" (irregulares)

Los yacimientos "diseminados" tienen una distribución de contenidos más o menos homogénea. Los "anisótropos" pueden ser una combina-

ción de sectores de muy alta ley en una masa más bien pobre. La ley media, sin embargo, puede ser la misma.
En programas de perforaciones exploratorias, son comunes casos como el mostrado en la Figura 3.8.

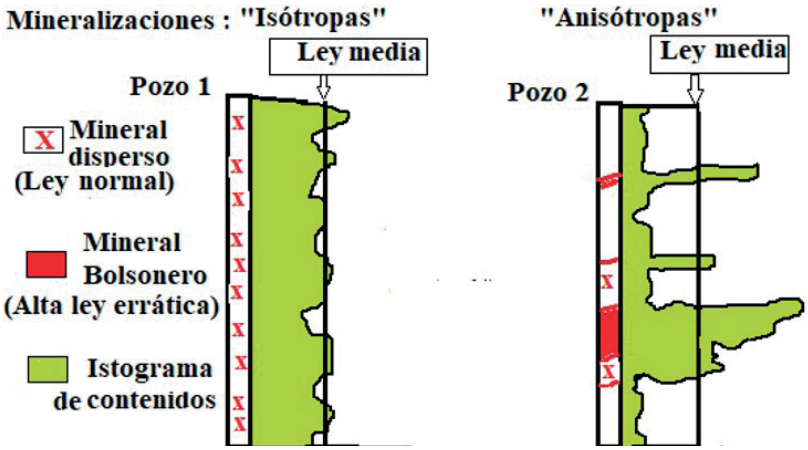


Figura 3.8: Leyes medias casi idénticas pueden proceder de mineralizaciones muy distintas

b) Suelos

Toda roca aflorante es afectada por la meteorización, que puede ser física o química, aunque en general actúan ambas. Según el clima (húmedo-árido o frío- cálido), en los productos de meteorización tiende a predominar la fracción gruesa (arenas) o la fina (limo-arcillosa coloidal) y una fracción menor soluble en agua. Es costumbre entre los mineros llamar "suelo" al nivel de meteorización más superficial.
El suelo generalmente es analizado desde dos puntos de vista:

- **Pedológico** (origen, evolución y clasificación)
- **Edafológico** (aptitud-capacidad productiva). Este concepto "suelo" aplicado por el ingeniero agrónomo, tiene poco que ver con el concepto "suelo" del prospector minero. Salvo en países de clima templado húmedo o cálido-húmedo donde la meteorización es más intensa, es raro encontrar perfiles edáficos bien evolucionados en áreas "Mineras". Para el agrónomo, el "suelo" de los geólogos prospectores, sería cuando mucho un "regolito inmaduro" o "esquelético".

Aun así, los procesos actuantes tienen cierta semejanza o paralelismo. Son cuatro procesos clásicos: **Eluviación–Iluviación** (ascenso y descenso de suspensiones coloidales y partículas arcillo-limosas), **Evapotranspiración-Lixiviación** (soluciones químicas ascendentes o descendentes). Como resultado en los "suelos mineros", los débiles procesos edáficos tienden a formar horizontes inmaduros, parecidos a los clásicos "A-B-C" de los suelos agrícolas. Las características de los suelos difieren en función de los aspectos geológicos, fisiográficos y climáticos de una región. Estos aspectos condicionan el desarrollo de sus perfiles (horizontes A-C). Bajo el punto de vista de la geoquímica el horizonte B (que constituye el horizonte de acumulación) presenta un gran interés, ya que es ahí donde suelen concentrase preferentemente los elementos químicos.

Estos suelos inmaduros pueden "heredar" de las rocas originales, contenidos anómalos residuales de elementos de interés (o sus "Indicadores") y a la vez, ser bastante eficientes como "captadores de iones" en su fracción limo-arcillosa. Este doble proceso (contenido residual + adsorción iónica) los hace especialmente aptos para la prospección geoquímica, sobre todo en zonas con pocos afloramientos, permitiendo delimitar sectores anómalos conocidos como **"Halos Secundarios".**

En la Figura 3.9 se esquematizan tres tipos diferentes de suelos: normales, desérticos y salinos.

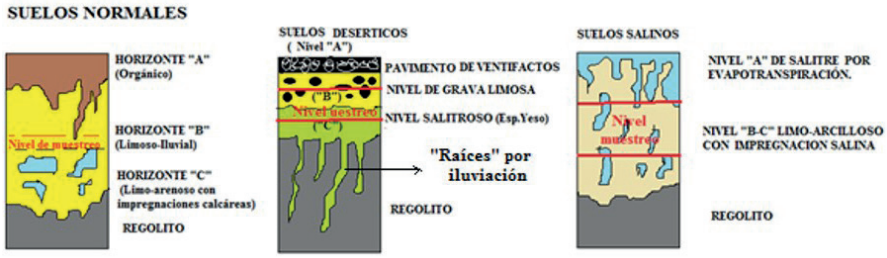


Figura 3.9: Esquemas de perfiles de suelos. Acción de procesos edáficos o similares y perfiles de "Suelos" resultantes en climas: Semihúmedos (Caso 1) - Desérticos (Caso 2) - Salitrosos-alcalinos (Caso 3).

Caso 1

En los suelos agrícolas es muy frecuente la diferenciación de cuatro horizontes o niveles (O-A-B-C):

- Horizonte orgánico (formación de humus).
- Horizonte con material orgánico y arcillosos (el más importante para agrónomos) o Eluvial (de lavado, formado con materiales gruesos y resistentes).
- Horizonte químico-coloidal (precipitación de sales alcalinas-térreas.) u Horizonte Iluvial.
- Horizonte de transición (impregnación arcilloso-coloidal o de Iluviación activa, por presencia de lodos arcillosos que invaden el regolito subyacente).

Caso 2

Propios de sequedad extrema. Ejemplo: Puna argentina. También muestra tres componentes:

- Horizonte deflacionado: pavimento de ventifactos.
- Horizonte de grava arcillosa preservada por "A" de la erosión eólica.
- Horizonte químico coloidal (precipitación de sales alcalino térreas, en especial yeso cristalino mediano a fino.) y "Raíces" o digitaciones de esas mismas sales producto de Iluviación.

Caso 3

Típicos de desecación rápida de efluentes aflorantes o saturados por freática subsuperficial salobre.

- Horizonte superficial con precipitación abundante de sales alcalino - térreas "esponjosas" (espesor 20 cm o más) por evapotranspiración predominante en medio arcillo-limoso.
- Horizonte híbrido arcillo-salitroso. Hay concreciones de sales alcalino térreas (generalmente yeso).
- Regolito disgregado, impregnado de yeso y cloruros.

Los suelos se muestrean generalmente donde hay escasez de afloramientos.
Para muestrear estos suelos anómalos, se toma el material más fino posible (limo-arcilloso) entre los 10 y 25 cm de profundidad. Los mejores resultados corresponden generalmente al equivalente del horizonte edafológico "B" (caracterizado por la abundancia de impregnaciones calcáreas o salitrosas).
En muchos proyectos patagónicos se ha muestreado la fracción superficial gruesa y deflacionada de suelos, investigando el material limo-arenoso (granulometría < 3 mm) en búsqueda de oro y con bastante éxito (muestreo "Blegg"). El mismo método se ha usado en la Puna, en especial en la región de Diablillos, pero con resultados entre nulos y modestos (González, O.,1980).
En cada muestra, el contenido analítico de un elemento dado procede en parte de la porción "residual" (restos no meteorizados de la roca original) y en parte de descomposición química de los minerales componentes, que liberan iones solubles que en gran parte son captados o retenidos y/o "concentrados" selectivamente por los minerales arcillosos (por los limos también, pero en mucho menor grado) o coloides, sobre todo los mangano-ferríferos.

c) Sedimentos de Corriente

Como su nombre lo indica son aquellos materiales arrastrados por las aguas vadosas. De ellos se prefiere siempre la fracción fina (limo-arcillosa).
Son los más útiles para detectar trenes de dispersión y el complemento ideal de la geología regional (el geólogo junior tendrá que acostumbrarse a trabajar con ambas técnicas).
En estos trenes, la zona "proximal" o cercana al origen, tiende a estar enriquecida en elementos "poco móviles" o "sedentarios" (caso de Pb-Au-Sn-Mo-Sb, etc.), con escasa dispersión mayormente mecánica.
Aguas abajo (zona distal) actúa mejor la dispersión química natural y paulatinamente ganan abundancia los metales solubles "migratorios", que son los más retenidos o adsorbidos por la fracción arcillosa (caso de Cu-Zn- U- Mn y en ocasiones Ag). Figura 3.10.

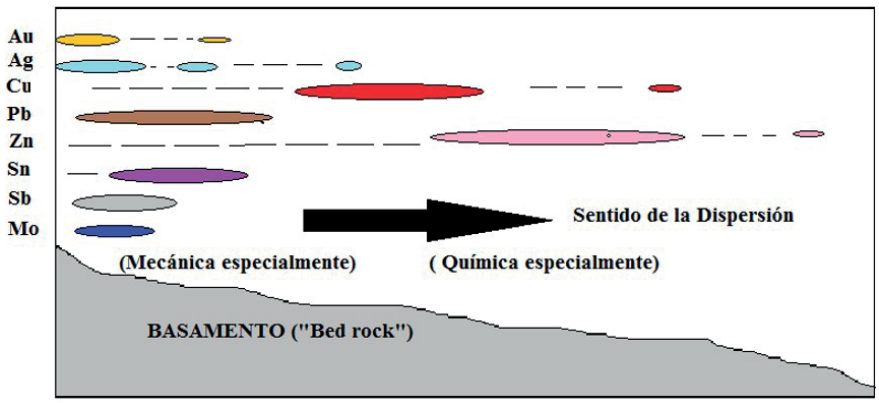


Figura 3.10: Esquema de la diferenciación de algunos elementos La dispersion de los diversos elementos es muy variable y si se la representara con vectores, se observará un panorama como el graficado

Lo recomendable es tomar siempre el material más fino posible, donde se concentra el máximo de limos y arcillas y con evidencia de haber sufrido recientemente transporte por las aguas vadosas. En lo posible, se debe evitar material eólico (difícil en la Puna).

Al igual que en los suelos, la fracción limo-arcillosa conserva un contenido residual heredado de la roca original meteorizada al que se le agregan los iones adsorbidos y poder de intercambio iónico.

Se toman sedimentos normales dejados por las correntadas, secos o húmedos, en meandros, remansos, saltos, recodos, tierra retenida debajo de rodados, en raíces de plantas herbáceas vivas o arrastradas por las crecientes.

Los únicos requisitos recomendables son: material fino (limo-arcilloso) y que al menos en alguna época del año sea, o haya sido, embebido por las aguas vadosas.

Tanto en suelos como en sedimentos de corriente solo se analiza la fracción – 80 mallas (algunas empresas prefieren – 100).

Las raíces al absorber la humedad, atraen también algunos coloides arcillosos y sales higroscópicas y con ellas cationes; actúan como una especie de “trampa de cationes” (aniones en menor proporción). Figura 3.11.

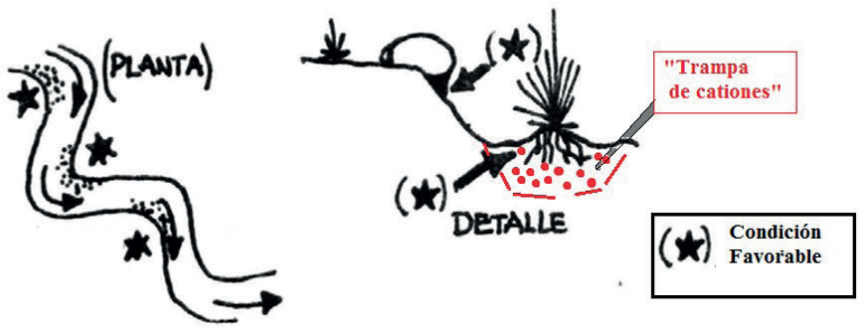


Figura 3.11: Situaciones ideales para toma de sedimentos de corriente. Siempre se busca el punto o sector donde las aguas vadosas se remansan, depositando el sedimento arcillo –limoso fino

d) Aguas y Salmueras

En algunos países como Finlandia o Canadá, por sus condiciones climáticas, el muestreo de aguas de ríos o vertientes e incluso perforaciones, es o ha sido práctica habitual durante muchos años. Este método (muestreo hidrogeoquímico) ha sido plenamente exitoso para la prospección de Li-K-B en los salares de la Puna Argentina.

e) Plantas

Con frecuencia se ha descripto en la literatura el muestreo de material vegetal para análisis de trazas en sus cenizas, pero los pocos intentos efectuados no fueron muy eficaces en Argentina, al menos hasta el presente.
Algunas pruebas se ensayaron en cardones en La Rioja (Peralta, 1967), con algas de aguas dulces en Mendoza, (Ann de Grys, comunicación verbal, 1968) o en Sierras Subandinas de Jujuy (Giulliani et al., 1975) logrando respuestas positivas en los tres casos, pero en la práctica se prefieren los métodos más tradicionales.

f) Otros materiales

Se comentan a veces los muestreos de gases telúricos en prospección

petrolera y/o He, para U-Th, pero no abundan artículos de divulgación. Se diría que hay poca experiencia todavía o es información confidencial.

3.7.2 Detalle y densidad de muestreo

En la prospección, hay dos escalas de trabajo "Regional" (o panorámica) y "Detallada", que pueden considerarse también como etapas en la investigación de un prospecto. Tabla 3.1.

Etapa	Escala operativa	Densidad de muestreo (mínima)
1	Regional 1:50000 a 1:10000	1 a 5 Muestras Km^2
2	Detalle 1:5000 a 1:1000	1 a 10 Muestras/0,01 Km^2

Tabla 3.1: Escalas de trabajo

Normalmente no se requiere una escala intermedia, o es Regional (búsqueda de un "blanco") o es Detallada (investigación del blanco detectado).
El mapeo geológico en exploración minera incluye tres criterios a graficar simultáneamente:

a) Litología y estructuras.
b) Tipos y zonación de alteraciones hidrotermales.
c) Mineralizaciones presentes o esperadas y su relación con "a" y "b".

El mapeo geológico en detalle siempre necesita del muestreo geoquímico complementario.
Cuando se combinan estos tres criterios de muestreo, se genera gran cantidad de muestras y se hace difícil el control de las tareas. Suele haber exceso de información en ciertos sectores (generalmente donde aparecen los primeros o mejores resultados), mientras que otros quedan debilitados u olvidados. Al principio, es inevitable el método de prueba y error, es decir muestreo orientativo no sistemático. Para controlarlo, se usa el criterio de cantidad de muestras/Has o Km^2 y una

vez ubicado algún blanco promisorio se pasa al muestreo sistemático (generalmente perfiles vs. cuadrículas o "grillas").
En escala regional, como se están buscando trenes de dispersión, lo clásico es la toma de sedimentos de corriente, siguiendo la red de drenaje. Es un muestreo de baja intensidad (por jemplo: muestras cada Km). Generalmente va acompañada por geología regional expeditiva como apoyo (en especial buscando zonas de alteración hidrotermal aflorantes).
La escala de detalle se basa en el muestreo intensificado de suelos y/o esquirlas de roca, sea por cuadrículas o perfiles, donde por cada Ha se pueden tomar entre una y varias docenas de muestras. Muchos proyectos necesitan cientos o miles de muestras. Siempre debe haber proporcionalidad entre el detalle geológico y la intensidad o densidad de muestreo.

3.7.3 Plan de muestreo

Puede ser sistemático (separación estándar entre muestras). Por ejemplo, con una equidistancia de 100 m, de 500 m, etc., ya sea en un trabajo regional o en algún sector específico. Puede usarse también un criterio selectivo, a criterio del prospector, sobre todo al principio y en áreas desconocidas (muestrear donde exista algún afloramiento o rasgo de interés especial), pero en lo posible se prefiere el muestreo sistemático.

3.7.4 Diseño del muestreo

Fundamentalmente son dos clásicos (Figura 3.12):

- **Perfiles,** para mineralizaciones estructuralmente controladas o "anisótropas"
- **Cuadrículas (o "grillas"),** para mineralizaciones más homogéneas o "isótropas".

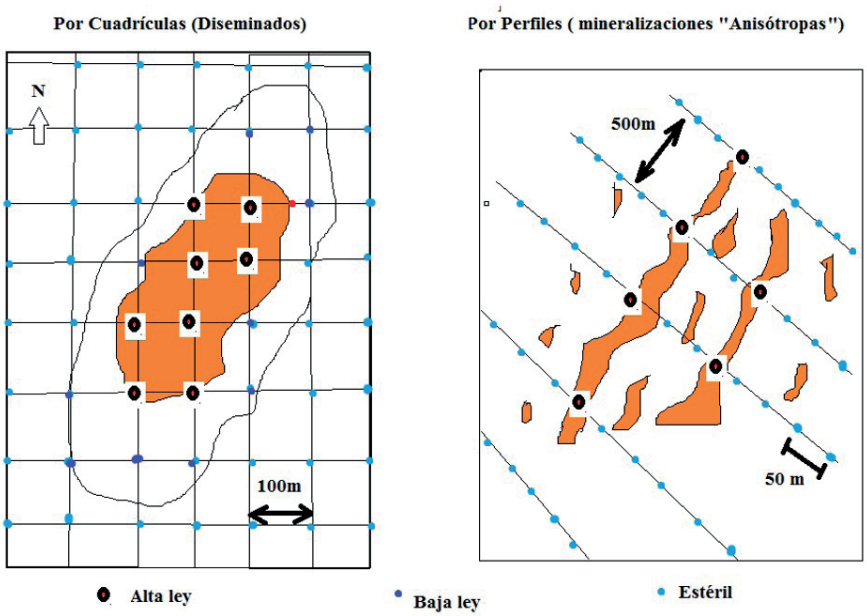


Figura 3.12: Tipo de diseño de muestreo

CAPÍTULO 4

INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS. PARTE 1

4.1 Pasado y presente. Ventajas y condicionamientos

Entre la "mentalidad" requerida para trabajos de geoquímica regional y los de detalle existen diferencias de criterios similares a las que se observan entre los geólogos regionalistas y los geólogos de exploración. Esto es mucho más que una diferencia en la "escala de trabajo". Es toda **una visión o "cultura" geoquímica-geológica** que se reflejará en la interpretación de resultados.

Las muestras tomadas en el terreno, se envían a un laboratorio para ser analizadas.

En general son tamizadas y solo se procesa la fracción - 0 mallas (algunas empresas exigen -100), es decir la fracción arcillo-limosa. Según cuales sean los componentes a investigar, en general cationes, con menor frecuencia aniones, serán los métodos analíticos empleados.

Históricamente, entre 1960-1970 predominaban los métodos colorimétricos y volumétricos de análisis, pero hacia 1970-1980 se generalizaron los espectrofotométricos y en especial por absorción atómica o "A.A.". Actualmente predomina la espectrometría de masa ICP-MS e ICP-OES.

Son comunes las combinaciones de 2 o más métodos para lograr el máximo posible de sensibilidad analítica. Por ejemplo, para Au se ha perfeccionado una variante de la tradicional copelación combinado con A.A.

Hoy se obtienen valores muy confiables en "partes por millón" (ppm) equivalentes a "gramos por tonelada" y en algunos elementos como Hg-Au-Pt-Pd se llega a "partes por billón (ppb o mg/Ton). Es común analizar partidas de cientos o miles de muestras, por hasta 40 elementos que suelen remitirse a algún especialista para su interpretación, aunque lo ideal sería que el propio geólogo de campo procese los datos porque puede incorporar experiencias y observaciones personales de campo. La informática permite procesar cientos y hasta miles de análisis en horas, cuando pocos años atrás se necesitaban semanas o meses.

En la interpretación no hay compartimientos estancos; en general se aceptan tres líneas de procesamiento con sus variantes, según se trate de trabajos regionales en búsqueda de "Blancos" de interés minero o investigación en detalle de los mismos.

4.2 Interpretación por estadística

Si se analiza un número discreto de muestras, en lo posible más de 100 y de preferencia sedimentos de corriente, se encontrará un panorama de resultados que tradicionalmente se interpretaron por estadísticas.
Volcando los resultados analíticos en un sistema de coordenadas donde X representa los tenores divididos por intervalos regulares de "Clases" (Ejemplo: 0 a 10, 10 a 20, 20 a 30 ppm, etc.), mientras que en Y se indica el número de muestras o su porcentaje de aparición, se observa que la mayoría de la población de datos se agrupa en una o varias "clases" más frecuentes, llamadas "moda". Ejemplo entre 60 y 70 ppm.
Las restantes clases se ordenarán más o menos simétricamente a ambos lados formando una "curva histográmica" o "campana de Gauss". Este concepto permite calcular los parámetros clásicos más importantes: "Media" o "Fondo" (no confundir con la Moda: nunca coinciden) y la "Desviación Standard".
La curva histográmica de la Figura 4.1 tiene tres componentes. En la misma, se observa una población principal (en gris) y dos secundarias (en verde y en azul) dadas por unas pocas muestras con los valores elevados (a veces se produce el "Efecto Pepita") o bajos, que se conocen como Anomalías Positivas y Negativas.

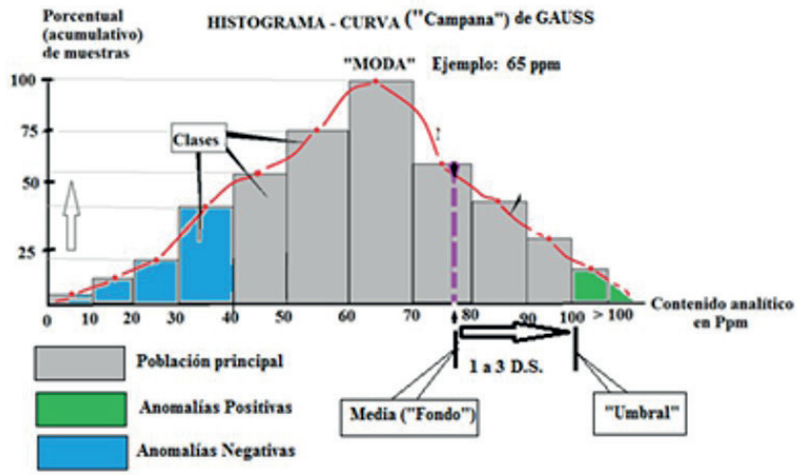


Figura 4.1: Procesando una población de muestras, al volcar los resultados en un sistema de coordenadas se obtendrán un grupo principal (Moda) y dos subgrupos" de valores anómalos" mayores o menores que la media (Anomalías positivas o negativas). En Geoquímica solo se usan las anomalías positivas.

En geoquímica de prospección se usa exclusivamente el campo positivo, prescindiendo de las anomalías negativas.
"Interpretar" resultados significa:

1) Diferenciar cuántas y cuáles son las muestras anómalas.
2) Ubicarlas geográficamente para su representación en un mapa.
3) Determinar tendencia o zonación de trenes de dispersión, si existen.
4) Categorizar las anomalías en orden de interés creciente en "Posibles, "Probables" y "Francas".
5) Deducir o aproximarse a las paragénesis y/o tipos de mineralización ("Firma Geoquímica") que pudieran existir en la región, en base a los "Indicadores".

En principio ¿Cuál es el valor límite entre "población normal" y "población anómala"?
A partir del análisis estadístico de los datos se define:

- Valor de fondo (background), que corresponde al valor normal de un elemento en un medio concreto.
- Anomalía, corresponde a una desviación estadísticamente significativa a partir del valor de fondo, por ejemplo, los valores que se encuentran sobre dos o tres veces el valor de la desviación estándar.
- Umbral (threshold), que corresponde al límite superior de las fluctuaciones de la media, en otras palabras, el límite inferior de los valores anómalos.

Para la escala regional, el "Umbral", se calcula mediante la "Desviación Standard" y el "Fondo". Para cualquier elemento, el "Fondo" (F) es el cociente entre la sumatoria de ppm, dividido por la cantidad (N) de muestras procesadas.

En general: Σ ppm / N
La mayoría de las muestras de la población normal tendrá contenidos cercanos al "Fondo" pero no idénticos y siempre habrá diferencias en

más o en menos. En la sumatoria, los valores positivos y negativos tenderán a neutralizarse o compensarse entre sí.
Para evitarlo se acostumbra elevar los sumandos al cuadrado y todos los signos se volverán positivos. La sumatoria de esos cuadrados dividida por la cantidad de muestras (N), es la "Varianza" y la raíz cuadrada de la misma es la llamada "Desviación Standard" (D.S.) que responde a la fórmula:

$$\text{D.S.} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(X_i - \bar{X})^2}{N}}$$

Tanto F como D.S. son artificios matemáticos discutibles, pero de gran utilidad práctica.
En geoquímica regional generalmente se acepta como valor "Umbral" a F+ D.S.
Por encima del mismo se tendrán valores anómalos positivos que pueden categorizarse en tres niveles de intensidad. Figura 4.2.

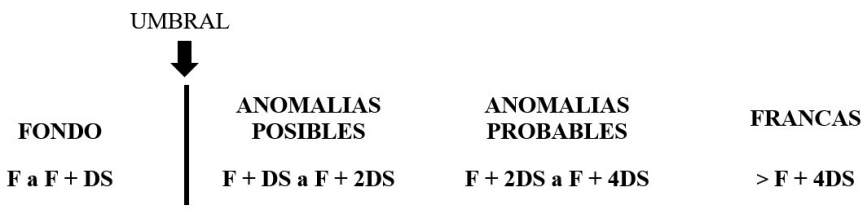


Figura 4.2: Categorización de valores. Cada categoría se determina sumando un valor de base (Fondo) a una D.S. (Umbral) o varias D.S. (Anomalías de valor creciente)

4.3 Histogramas polimodales

Es muy conocida la clásica curva histográmica o "Campana de Gauss", a veces de notable simetria, propia de poblaciones "Normales-Unimodales".
En la prospección geoquímica son más interesantes las curvas "Asimétricas" donde su forma puede servir como orientación acerca del ambiente geoquímico rio arriba, especialmente cuando son curvas

"Bimodales". Estas indican la coexistencia de dos (raramente más) poblaciones de muestras superpuestas y alguna de las cuales puede proceder de una fuente de origen importante y desconocida.
La forma o tipo de distorsión de la curva, sumados a los "Indicadores " (si los hay) puede orientar acerca del tipo de mineralización que se podría esperar en la región. La curva tenderá a parecerse a alguno de los ejemplos siguientes, mostrados en la Figura 4.3.

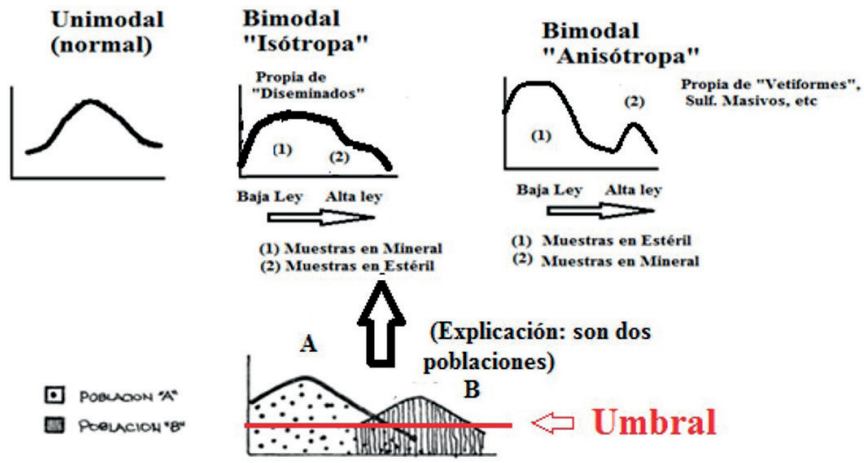


Figura 4.3: La presencia de dos "jorobas" en las gráficas, en general, indica la presencia de dos poblaciones distintas en el área.

4.4 Graficación. Criterio tradicional y valores residuales

Categorizados los resultados, es necesario graficarlos en mapa o imagen satelital por medio de rastras, colores, letras, etc.
Los criterios son dos:

a) El estadístico mencionado (graficación directa de muestras anómalas).
b) Graficando el "Valor Residual" de cada muestra (diferencia entre el Tenor analítico y el Umbral). Ejemplo: Umbral 100 ppm. Tenor muestra 500 ppm. Valor Residual: 500 ppm – 100 ppm= 400 ppm (graficación indirecta).

Los dos métodos son buenos, pero el más frecuente es el primero.
Se sugiere:

- No graficar valores por debajo del Umbral (población principal) ni anomalías negativas.
- Lejos de lo que generalmente se cree, las anomalías geoquímicas no son “escasas” y con frecuencia es necesario reducir su número elevando el Umbral. Ejemplo: graficando sólo las anomalías “Probables” y “Francas”.

Un valor anómalo aislado puede tener algún significado (depende del elemento o de contenidos muy altos), pero más importantes son los grupos de muestras “encadenados” río abajo formando trenes de dispersión como se muestra en la Figura 4.4.

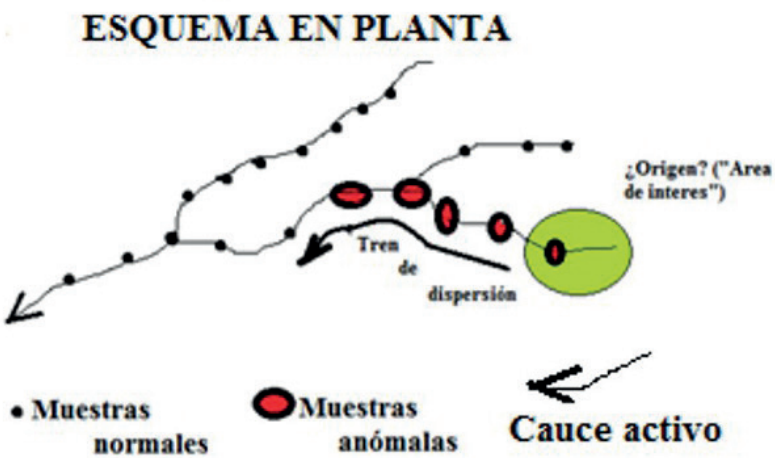


Figura 4.4: Ploteando las muestras anómalas en la red de drenaje (o base cartográfica usada) de inmediato aparecen los trenes de dispersión y su área de origen

Como sistema de graficación se sugiere usar el que se presenta en la Figura 4.5, que permite tratar hasta 3 elementos simultáneos y distinguiendo para cada caso si la anomalía es Posible, Probable o Franca.

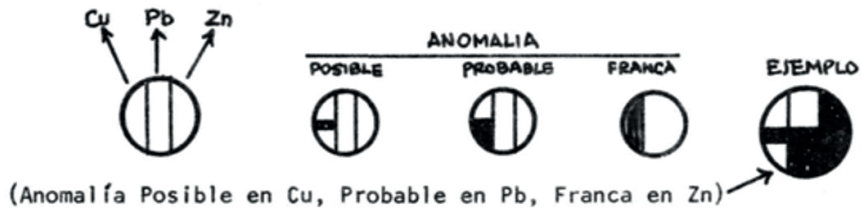


Figura 4.5: Sistema de graficación más utilizado para identificar los tipos de anomalías.

4.5 Procesamiento por Correlación

Muchos elementos aparecen en la naturaleza formando "Asociaciones Geoquímicas".
Se trata de grupos de elementos que normalmente aparecen juntos y donde las variaciones de abundancia de alguno de ellos, se refleja también en sus asociados. Este fenómeno de "Correlación" puede ser Positiva, Negativa o Indiferente y afectar a pares de elementos (Correlaciones Binarias) o a grupos numerosos (Correlaciones Múltiples)
En general son más confiables en muestreos de roca que en sedimentos de corriente o suelos.
Se pueden diferenciar:

a) **Correlaciones Binarias.** Se procesan 2 elementos a la vez, graficando los tenores sobre un sistema de coordenadas "X- Y", donde cada muestra tiene un lugar geométrico en el espacio coordenado.

En lo posible sobre la ordenada se grafican los elementos de hábito "Migratorio" y en la abscisa los "Sedentarios". Figura 4.6. De preferencia deberían plotearse al menos 100 muestras y el conjunto formará una "Nube de puntos", cuya posición y forma proporciona datos de utilidad. Ejemplo: si hay procesos de Lixiviación y/o Enriquecimiento supergénico.

Ej. Muestra	Metal A	Metal B
I	100	200
II	300	50

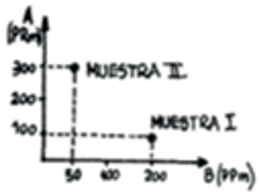


Figura 4.6: El ploteo de resultados en sistemas de coordenadas cartesianas

b) **Correlaciones Múltiples**. Obviamente son más complejas porque se trabaja con varios elementos simultáneos (preferibles 10 a 15). Permite destacar ubicación del área anómala, elementos principales e indicadores, probable paragénesis y/o tipo de mineralización ("Firma Geoquímica").

4.6 Comportamientos de la correlación binaria

Graficado el lugar geométrico de cada muestra en el espacio coordenado "X –Y", se obtiene una "nube" de puntos, que se debe interpretar. Lo que interesa es conocer si la tendencia general de la nube de puntos se parece a alguno de los tipos siguientes, Figura 4.7.

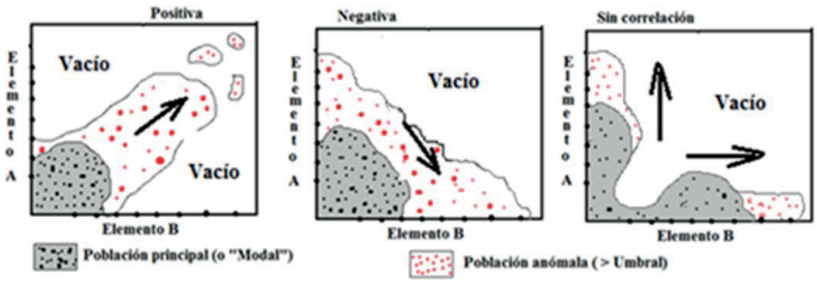


Figura 4.7: Esquema que muestra las tendencias de elementos móviles o lixiviable (A) y elemento sedentario (B), el cual no migra en solución.

Las respectivas líneas o curvas de tendencia serán las mostradas en la Figura 4.8.

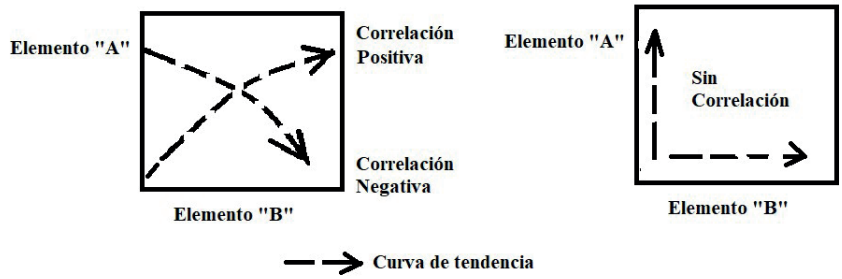


Figura 4.8: Curvas de tendencias positivas, negativas y sin correlación.

Las correlaciones binarias, pueden orientar sobre la ubicación del "Foco de Anomalía", es decir los lugares donde esperar las mejores leyes en una zona mineralizada ("Clavos") y el grado de avance o madurez de los procesos de Lixiviación-Enriquecimiento supergénico, si los hubiere.
Indirectamente, están relacionados también con la velocidad de erosión.
Ejemplos:

a) ¿Hay Sombreros de Hierro maduros (predominio de goetita-hematita)? Significa erosión lenta. Podría encontrarse un nivel enriquecido (calcosina) intacto en profundidad. Figura 4.9.

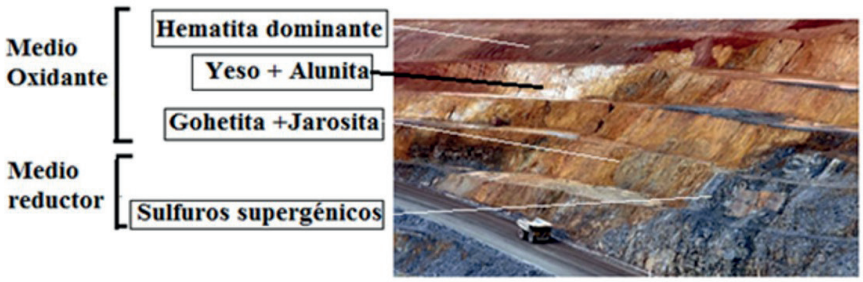


Figura 4.9: Ejemplo de un perfil maduro de un Sombrero de Hierro (Lixiviación + Enriquecimiento Supergénico)

b) ¿Hay remanentes de Sombreros de Hierro, pero también presencia local de calcosina-covellina-argentita aflorando? ¿Hay coexistencia de jarosita con goetita-hematita?. Indica erosión

acelerada y probablemente el depósito no tenga “raíces”(el perfil es todavía “Inmaduro”)==➔Tonelaje pobre y/o irregular.

c) ¿No hay “Sombreros”, ni sulfuros supergénicos en superficie, pero abundan los sulfuros primarios frescos aflorando? ==➔ Evidencia erosión demasiado rápida ==➔No hay enriquecimiento. No llegó a formarse nivel de calcosina o ya “se fue” con la erosión.

Para un ensayo de correlación en estos ambientes, generalmente se grafica en la ordenada un elemento móvil (lixiviable) como Cu-Zn-Ag y en la abscisa un elemento sedentario (residual), como Pb-Mo-Au. Ambos grupos deben ser parte de la misma asociación geoquímica. Es ideal para manifestaciones sulfuradas y/o sus acompañantes. Ejemplo: Cu-Pb, Cu-Au- Ag-Pb, Zn-Pb, Au-Ag, Sn-Ag, etc. Se deben usar pares de elementos con abundancias más o menos comparables como Cu-Pb (el más usado) u Au-Ag para poder graduar las coordenadas.
El procesamiento parece algo engorroso, pero solo se necesita un poco de práctica. Tomando la planilla de resultados analíticos:

Paso 1) Elegir las columnas del par de elementos “Sedentario - Móvil” que se volcarán a las coordenadas.

Paso 2) Subdividir cada eje de coordenadas según categorías Fondo, Anomalías Posibles, Probables y Francas, cada una con su color de referencia.

Paso 3) El sistema de coordenadas formará una grilla de 16 casilleros. Todas las anomalías caerán en alguno de ellos. Se marcará un punto por cada muestra encasillada, según coordenadas A y B. Figura 4.10.

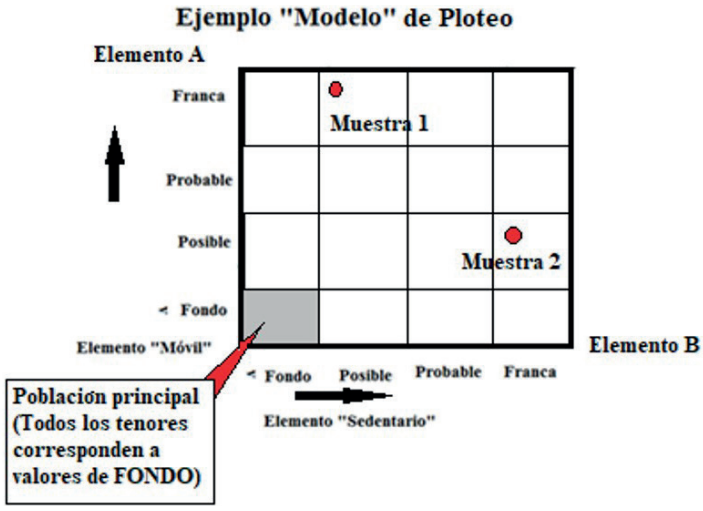


Figura 4.10: En el ploteo, la mayoría de muestras normales se encuentran en el casillero inferior izquierdo, correspondientes a los valores de fondo para los elementos A y B. Las muestras anómalas se ubicarán en los casilleros que le correspondan según la categoría en A o B. La muestra 1 es Franca en el elemento A y Posible para el elemento B. La muestra 2 es Posible para el elemento A y Franca para el elemento B.

Paso 4) Contar cuantos puntos (muestras ploteadas) contiene cada casillero y anotar el resultado en su sitio.

Paso 5) Como cada muestra es comparable a un punto acotado, marcar las líneas de abundancia del mismo modo que se marcan las curvas de nivel en un relevamiento topográfico. Figura 4.11.

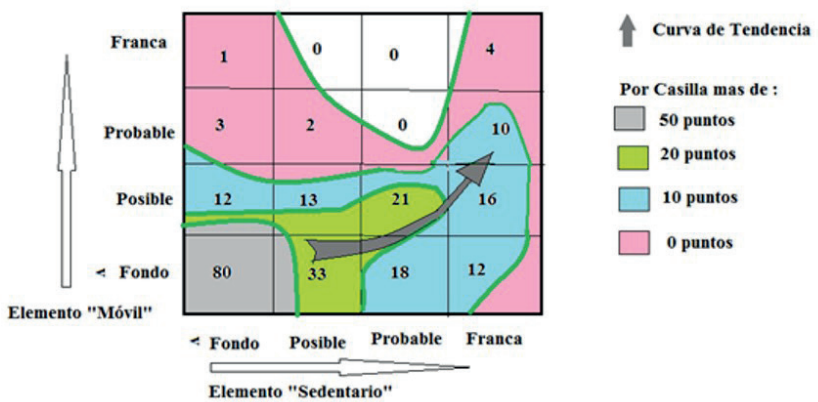


Figura 4.11. Ejemplo Modelo de Zona de Lixiviación

Suponiendo una mena compleja piritosa hipotética.
Con la meteorización se desarrollará un ambiente geoquímico ácido y oxidante, donde los elementos presentes tienen dos comportamientos bien definidos: los hay “Sedentarios” (permanecen “in situ” en la zona de oxidación) y “Móviles” (se lixivian y migran en solución). Figura 4.12.

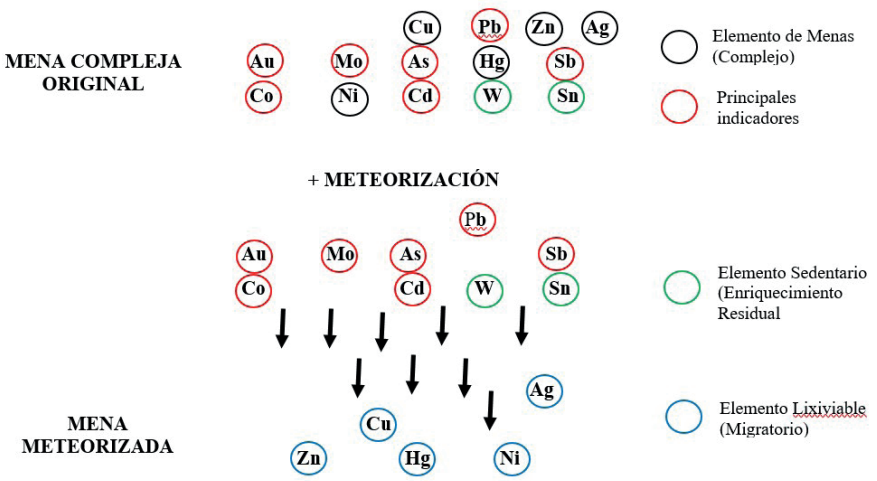


Figura 4.12: Un grupo de elementos con comportamientos afines en condiciones hipogénicas, por acción de la meteorización tienden a seguir dos tendencias antagónicas

La correlación binaria se puede usar en muestreos regionales de sedimentos de corriente (cientos de Km^2), pero son más confiables para muestreos detallados de roca y/o suelos y en superficies de al menos $1Km^2$.
En estos casos, la forma de la “nube” de puntos de la correlación positiva original (tendencia recta bisectriz) tiende a deformarse debido a la lixiviación, hacia la ordenada (por mayor presencia de minerales supergénicos incluyendo los oxidados) o hacia la abscisa (por mayor enriquecimiento residual). Figura 4.13. A mayor deformación, mayor intensidad del proceso lixiviación –enriquecimiento.

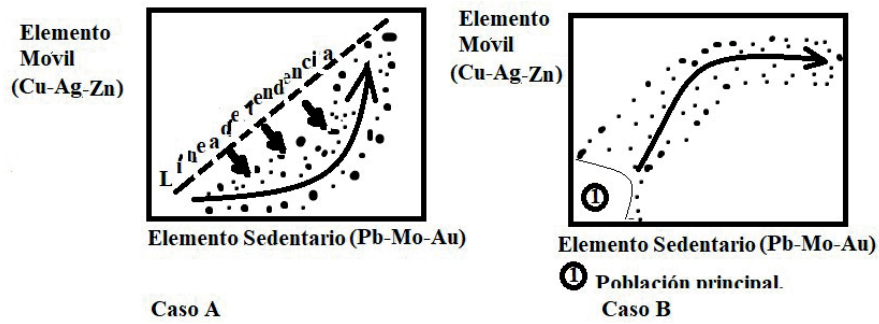


Figura 4.13:

a) Erosión lenta. Afloramientos lixiviados (Sombreros de Hierro) intactos. Niveles supergénicos conservados en profundidad. Potencial alentador.

b) Erosión rápida de zona de lixiviación (solo remanentes de Sombreros de Hierro). Abundantes minerales de enriquecimiento aflorando (calcosina, covelina, argentita, etc.). Potencial poco alentador.

CAPÍTULO 5

INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS. PARTE 2

5.1 El caso local. Muestreo geoquímico de detalle

Ubicado el origen del "Tren de dispersión", se debe comenzar el relevamiento geológico y el muestreo geoquímico de detalle: rocas, suelos o ambos, dependiendo de la proporción superficie cubierta / superficie aflorante. No hay problema en procesar ambos tipos de muestras en la misma área, pero el tratamiento se debe hacer por separado. En este tipo de trabajo casi no se muestrean sedimentos de corriente. Básicamente solo se muestrean suelos o rocas.

Generalmente, las zonas con relieve más o menos suave tienen ritmo erosivo moderado y buen desarrollo de regolitos autóctonos inmaduros, con escasez de afloramientos (el terreno "se va sepultando con sus propios escombros"). El muestreo de suelos es ineludible. No hay opción.

Con un relieve abrupto, la potencia de erosión será mayor, el desarrollo de suelos autóctonos dificultoso y abundarán los afloramientos. En ese caso, el muestreo principal será de rocas.

En la Figura 5.1, se esquematiza una situación hipotética en la cual existen dos afloramientos de rocas, rodeadas por un terreno con cobertura edáfica. Se muestrean ambos ambientes y se detectan anomalías aparentes que posteriormente son correlacionadas e integradas, confirmándose la existencia de anomalías reales.

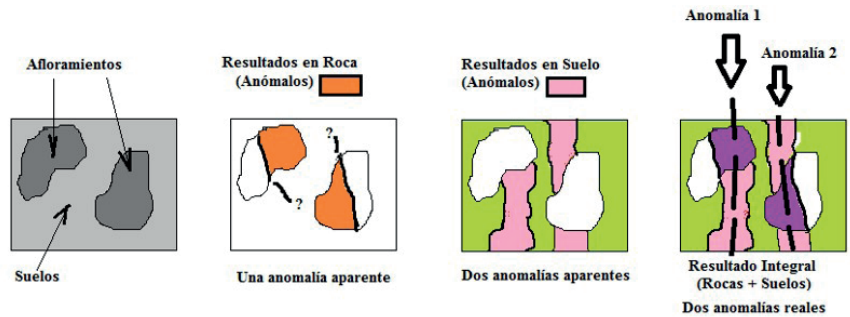


Figura 5.1: Anomalías aparentes en dos tipos de afloramientos. Muchas áreas necesitan dos tipos de muestreo: roca y suelos. Se debe tener la precaución de procesar por separado los grupos de materiales y después correlacionar las anomalías de ambos tipos.

5.2 El muestreo por tipos geométricos de mineralización

La mayoría de los yacimientos muestran dos tendencias:

a) Mineralización Isótropa o regular.

b) Mineralización Anisótropa o irregular.

La expresión de Isótropa y Anisótropa es sólo ilustrativa y nada tiene que ver con el concepto usado en mineralogía. Figura 5.2.

En los yacimientos diseminados, la mineralización tiene una disposición más homogénea (Isótropa) con menor ley, pero mejor distribuida y mayor tonelaje. Ej. un pórfido cuprífero, los pórfidos de estaño, de molibdeno, auríferos, etc. Según el caso habrá que decidir si el muestreo se realiza por perfiles o por cuadrículas.

En un distrito vetiforme (control estructural) o de mantos sedimentarios (control litológico) la mineralización se distribuye en unos pocos cuerpos tabulares de alta ley separados por “tabiques” de roca estéril y se la denomina mineralización Anisótropa.

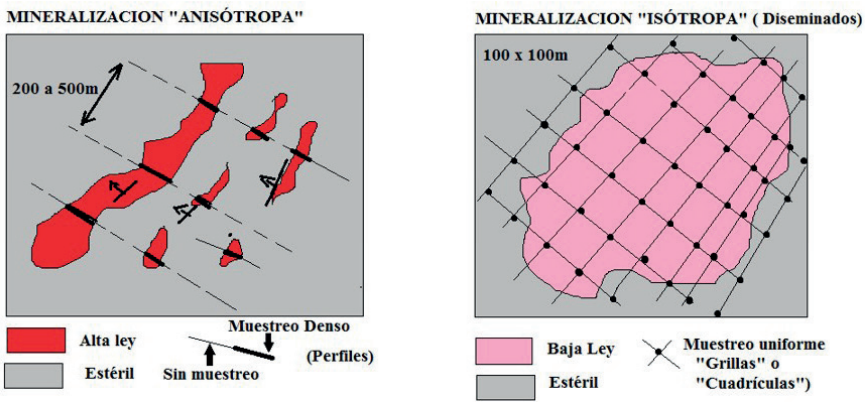


Figura 5.2: Mineralización anisótropa e isótropa. En los dos casos, las leyes medias pueden ser similares o muy cercanas

El muestreo de roca generalmente se realiza en áreas denudadas, con numerosos afloramientos. Solo cuando éstos escasean y abunda la cubierta regolítica se prefieren las muestras de suelos. En la Patagonia es frecuente tomar muestra del regolito deflaccionado y analizar solo

la fracción gruesa ("Muestreo de Blegg"). Sería de esperar que funcionara también como método de muestreo en la Puna, pero por alguna razón desconocida, los pocos intentos fueron infructuosos hasta ahora, excepto en la región de Salar de Diablillos (comunicación verbal de González, Osvaldo,1985).

Las muestras tomadas son enviadas al laboratorio donde el análisis básico más frecuente en la actualidad se realiza mediante Espectrometría de Masa con Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-MS, por sus siglas en inglés), que es una técnica de análisis multielemental que permite determinar y cuantificar la mayoría de los elementos de la tabla periódica a nivel de traza.

Tanto los análisis como la interpretación, se deben hacer por separado. No se debe mezclar rocas con suelos ni con los sedimentos de corrientes y lo mismo respecto a la escala de trabajo, que puede ser "regional" o "de detalle".

Como norma de calidad y autocontrol, los laboratorios repiten alguna muestra ("Duplicado") o introducen en la lista una muestra falsa (cuarzo molido, por ejemplo, llamado "Blanco"). Estos casos deben eliminarse de la lista, para que no entren en el cálculo de la sumatoria. Lo mismo suele hacerse con valores excesivamente ricos (Efecto "Pepita") que pasan directamente al grupo de las anomalías "Francas".

5.3 Correlación múltiple. Procesamiento de resultados. Interpretación

Normalmente el laboratorio vuelca los resultados en una planilla Excel, organizando las columnas de elementos por orden alfabético. Tabla 5.1.

La interpretación del conjunto se facilita ordenando los elementos por su función o comportamiento en: Metales Preciosos (Au-Ag-Pt)=➔ Indicadores (Sb-As-W-Mo-Co-Ni)=➔ Metales Base (Cu-Pb-Zn-Sn)==➔Metales Ferrosos (Fe-Mn)=➔ Gangas (Ba-Sr)===➔ Radioactivos (Th-U)=➔ Otros (solo en caso de interesar alguno de ellos). La Tabla 5.2 muestra el encabezado de planilla reordenando los datos, según este criterio.

MN°	Au	Ag	Hg	Sb	As	Bi	Sn	W	Mo	Cu	Pb	Zn	Cd	V	Co	Ni	Cr	Fe	Mn	Ba	Sr	Th	U
	ppb	ppm	ppb	ppm	ppb	ppm	ppm	ppm	ppm	Ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	%	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
57	2	0	1	1	,3	5	10	9	2	5	25	4	1	69	7	13	19	7	2	8	19	21	26
3060	2	0	1	1	8	5	10	7	2	26,3	28	111	1	67	7	12	30	3,4	626	311	149	54	57
3061	2	0	1	0	9,2	5	10	19	20	2460	35	1610	5	50	31	18	6	5,4	2960	259	125	42	106
3062	2	1	1	1	7,3	5	10	15	25	367	41	97	4	43	32	17	10	6,1	2810	238	101	31	163
3063	2	1	2	1	10	5	10	17	23	448	39	19	6	42	32	18	13	8,3	3420	207	95	25	212
3064	2	0	1	0	3,3	5	10	23	6	88,5	35	145	1	80	10	21	35	3,7	723	392	107	35	6,3
3068	2	0	1	0	2,4	7	10	7	1	12,9	28	96,5	1	55	5	8	5	3	527	299	119	107	14
3072	2	0	1	1	4,8	5	10	16	7	129	32	1090	3	53	22	20	29	3,6	2540	321	131	42	39
3912	2	1	1	1	5,6	10	10	1	2	14,5	17	64,1	1	92	8	10	26	3	531	536	363	23	7,2
3918	5	1	1	3	127	11	10	4	2	42,7	20	91,5	1	98	7	16	35	3,6	311	410	380	15	5,6

Tabla 5.1: Reordenando las columnas de la planilla según su utilidad o función, la "Firma Geoquímica" salta sola. En este caso, un aparente sistema de "Pórfido Cuprífero" Amarillo: Anomalías Probables, Rojo: Anomalías Francas

Precioso		Elementos Indicadores							Metales Bas		Acompañantes							Ferroso		Gangas		Radioac		Otros				
Au	Ag	Hg	Sb	As	Bi	Sn	W	Mo	Cu	Pb	Zn	Cd	V	Co	Ni	Cr	Ti	Fe	Mn	Ba	Sr	Th	U	Se	Ta	La	K	P

Tabla 5.2: El encabezado de planilla reordenado quedaría como sigue (Reproducción parcial de un muestreo real)

Casi siempre se registra alguna(s) muestra (s) con valores analíticos muy altos ("Efectos pepita"). Si son pocos casos o hay muchas muestras (100 o más), no traen inconvenientes, pero si son varias, deforman la sumatoria elevando demasiado la Varianza y, por lo tanto, la Desviación Standard (DS). Con criterio de estadística clásica y para poblaciones normales, el valor de la DS tiende a ser aproximadamente 1/3 del valor de Fondo (Ejemplo: método "Granier"), pero en poblaciones con frecuentes Efectos pepita, la DS tiende a igualar y hasta superar la Media, resultando más práctico usar directamente múltiplos de la Media, prescindiendo de la DS.
El procedimiento a seguir es el siguiente:

1) Obtener la sumatoria de valores de la columna para cada elemento.
2) Dividir la sumatoria por la cantidad de muestras (N) válidas o sea descontando las que tienen efectos "Pepita" (anómalos de por sí). Se obtiene la "Media" o "Fondo".

3) Categorizar las anomalías según la escala mostrada en la Figura 5.3.

Fondo	Posible	Probable	Franca
< F	F a F x 2	F x 2 a F x 4	> F x 4 (Incluir efectos "Pepita")

Figura 5.3: Categorias de anomalías geoquímicas

4) Obtener la Firma Geoquímica. La Figura 5.4, presenta la reproducción parcial de un muestreo existente de sedimentos de corriente, donde resalta un estilo “Pórfido de cobre”.
5) Deducir la asociación paragenética probable y, por lo tanto, el tipo de yacimiento y su “Firma Geoquímica” por medio de los “Indicadores” presentes y contenidos recuperables de otros elementos.

Por ejemplo, anomalías de Cu, con indicadores de:

- Mo-Sn-W será tipo “Pórfido”.
- Sb-As-Hg- Bi será “Epitermal polimetálico”.
- Co-Ni-Cr-Pb-Zn-Fe, será “Sulfuros masivos” (VMS en especial).
- Th-U-V-Cd será “Red Bed”.

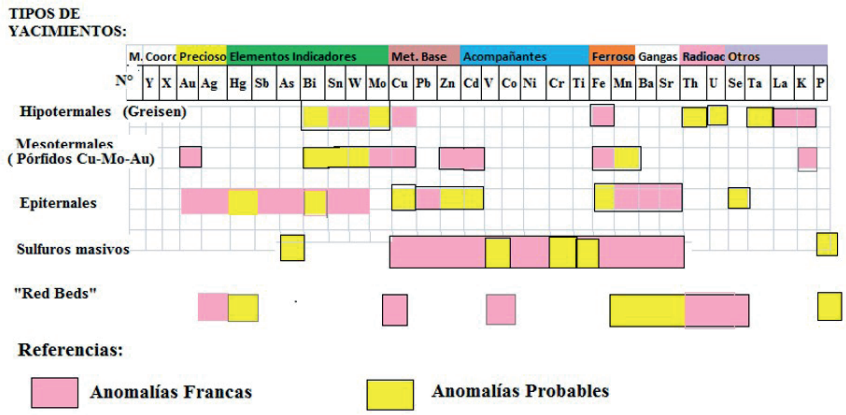


Figura 5.4: Intensidades de anomalías esperables para paragénesis y elementos. Correlación por abundancia

5.4 Valores Equivalentes

En muchos yacimientos, los valores de la mena son traducidos a "valores equivalentes" del principal mineral de ellos. Por ejemplo, si es una mina de Cu- Au-Ag, los dos últimos generalmente se expresan como "Cobre equivalente" usando la relación aproximada de precios entre esos metales. Los mismos, son de uso normal en Mina Aguilar (Jujuy) y en Mina Alumbrera (Catamarca). También pueden expresarse en "U$S equivalentes /Ton".
Si hay buena cobertura y densidad de muestras, permite dibujar "Líneas de Isotenores" para delimitar los cuerpos ("Clavos") de alta o baja ley, que son esenciales para calcular la Ley de "Cabeza de planta".
El mismo procedimiento se usa también en exploración minera avanzada, para orientar el plan de perforaciones y otras tareas de campo, como son los perfilajes geofísicos. Figura 5.5.

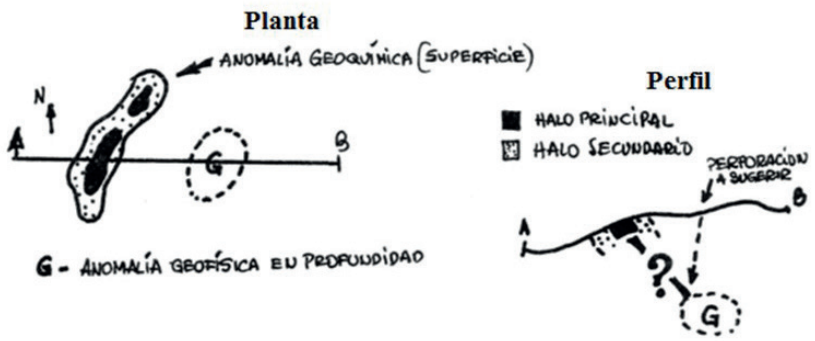


Figura 5.5.Esquema que muestra anomalías geoquímicas y geofísicas en planta y en perfil.

CAPÍTULO 6

ALTERACIONES HIDROTERMALES Y METEÓRICAS

6.1 Alteraciones hidrotermales. Clasificación

La alteración hidrotermal es el producto de un proceso metasomático que incluye la respuesta mineralógica, textural y química de las rocas a un cambio ambiental, en términos químicos y termales, en la presencia de agua caliente, vapor o gas (Maksaev, 2001).

Las reacciones producidas por la interacción de estos fluidos con las rocas que atraviesan, permiten la formación de minerales nuevos o secundarios, con respecto a los minerales originales de las rocas.

Las nuevas características mineralógicas, químicas y morfológicas generadas por el proceso de alteración, entregan información acerca de las condiciones termodinámicas del fluido hidrotermal que las generó. Permiten conocer sobre los factores que influyen en la intensidad y los tipos de alteración, como, la composición del fluido hidrotermal, composición de la roca huésped, temperatura, pH, Eh, razón agua/roca y tiempo de interacción (Townley, 2006).

Según sea el origen del fluido que las genera se clasifican en:

- **Descendentes:** producidas por soluciones frias que proceden desde la superficie y afectan a las rocas del subsuelo.
- **Ascendentes:** producidas por soluciones calientes que ascienden desde el interior de la tierra, afectando a las rocas a medida que las atraviesan.

El hidrotermalismo afecta a rocas vecinas (Proceso de alteración hidrotermal antiguo), pero normalmente se combina con meteorización (alteración postmineral más joven). La Figura 6.1 muestra la combinación normal de procesos pre y post minerales.

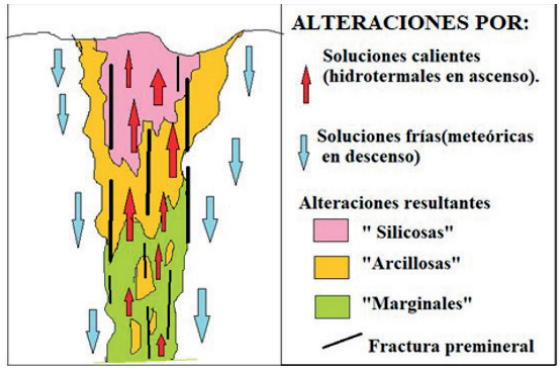


Figura 6.1: Perfil esquemático de un sistema hidrotermal simple.

La meteorización en áreas mineralizadas con sulfuros, aumenta la acidez del medio hasta alcanzar un nuevo equilibrio. La interacción con la roca encajonante, disminuye la acidez y se logra un nuevo equilibrio.
Las alteraciones resultantes pueden ser de naturaleza Silicosa, Arcillosa o Periferica (Marginal), las cuales a su vez, sean acidas o alcalinas van a generar efectos diferentes en las rocas, según se muestra en la Figura 6.2.
Sean soluciones ascendentes, descendentes o combinadas, hay 3 variantes de mineralizaciones principales:

a) **Relleno** de espacios vacíos (incluye impregnación de poros y sedimentación).
b) **Reemplazo** de rocas o minerales preexistentes.
c) **Residual-Selectivo**: Mineralización preexistente + Meteorización con eliminación de acompañantes.

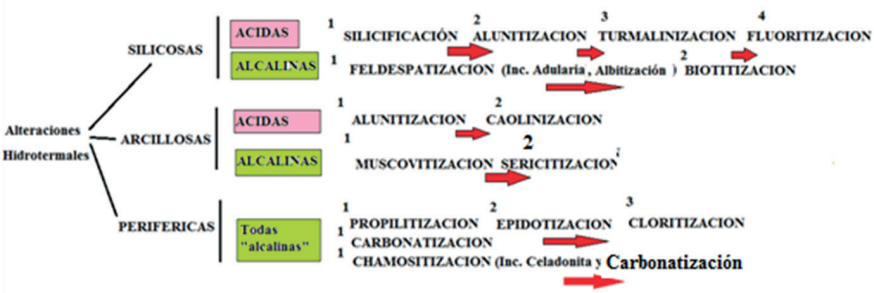


Figura 6.2: Interpretación y propuesta simplificada de los diferentes tipos de alteraciones hidrotermales y los efectos que producen en las rocas.

6.2 Alteración no es sinónimo de mineralización

Alteración hidrotermal significa “metasomatismo” (reemplazo). La más frecuente es la silicificación, seguida de argilitización (varios tipos).
La inyección de guías de cuarzo, sulfuros o carbonatos inyectados se conoce como “venulación” (relleno de fisuras abiertas). No es silicificación porque no hay reacción entre la solución mineralizante y la roca. Figura 6.3.
Los dos procesos pueden coexistir, pero corresponden a diferentes pulsos de mineralización. Un ejemplo es Aparoma (Catamarca). Se

trata de un granito silicificado con venulación mineralizada.

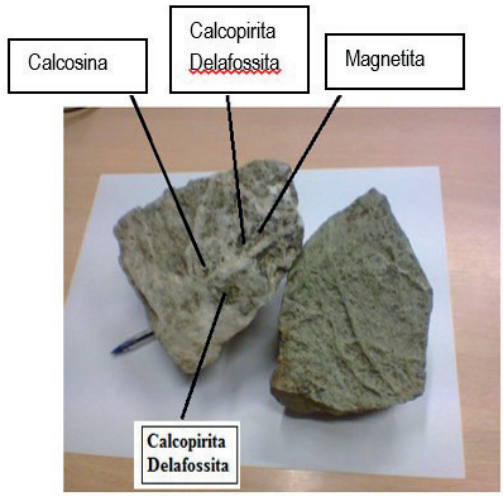


Figura 6.3: Relleno de fisuras enrejilladas (stockwork). No siempre la silicificación indica magmatismo

No siempre la silicificación indica magmatismo. Una solución hidrotermal ácida de un sistema convectivo no magmático, puede atacar y destruir los silicatos (feldespatos en especial), transformándolos en caolín y/o alunita.

El pasaje silicato (feldespato) ⟹ sulfato (alunita) o caolin, deja "SiO_2 sobrante" que "silicifica" la pasta de la roca, aunque los contenidos originales de SiO_2 en la roca no cambien.

Si el feldespato es corroído, a veces desaparece quedando una cavidad pseudomorfa más o menos vacía ("Vuggi silica") o parcialmente llena de limonita y caolín-alunita. Estas "Vuggis" son frecuentes en sistemas epitermales ácidos. Las miarolas son texturas primarias presentes en las rocas graníticas, consistentes en cavidades rellenas de minerales hidrotermales.

En las Figuras 6.4, 6.5, 6.6, 6.7, 6.8 y 6.9 se muestran diferentes ejemplos de estas texturas.

Figura 6.4: Toba dacítica con alteración argílico – alunítica + venulado cuarzo epitermal en guías (aurífero). Sobreimpuestos guías gohetita – hematita e impregnación jarosítica. Foto Peralta, E.

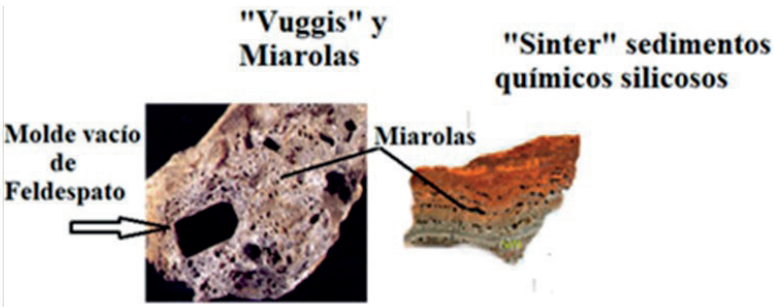


Figura 6.5: Toba riolítica con corrosión ácida a partir de feldespatos (vuggis) o cavidades miarolitica primarias (normal en sinteres)

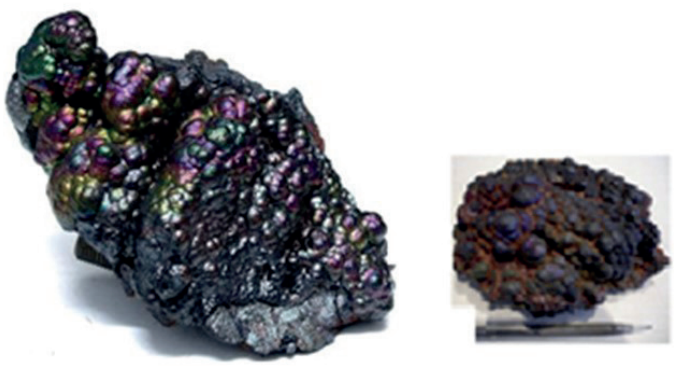


Figura 6.6: Precipitación de limonitas tornasolada botroidales (transportadas). Indican condiciones de extrema acidez. Blanchard, A.1968.

Figura 6.7: Lapillitita silicificada con clastos corroídos (en parte "Vuggis"). Bandeado Fantasma.

Figura 6.8: Toba lapillitica ácida argilitico-alunitizada. Los lapillis corroídos, totalmente reemplazados por alunita + jarosita ("Vuggis") Costras de goethita

Figura 6.9: Desarrollo de perfil de óxido – reducción. La zona lixiviada además de óxidos suele ser rica en Au y Mo. La zona de sulfuros tiende a enriquecerse en Ag y Cu

6.3 Limonitas transportadas

Cuando la meteorización actúa sobre un cuerpo sulfurado, primero se forman limonitas transportadas, agente principal del drenaje ácido natural (DAM). Figuras 6.10 y 6.11. Se debe tener en cuenta que, el mineral limonita no existe, es una mezcla de jarosita (amarilla), goethita (marrón o parda) y hematita (roja o rojo negruzco).

Figura 6.10: Limonitas "Transportadas"- Drenaje Acido de Drenaje (D.A.R.). Sierra de Famatina. La Rioja.

Figura 6.11: Confluencia de los ríos Amarillo y Blanco. Sierra de Famatina. La Rioja.

6.4 Limonitas indígenas

Simultáneamente tienden a formarse otras limonitas, que a diferencia de las transportadas permanecen en el sitio (indígenas) reemplazando como pseudomorfos a otros minerales, principalmente a los sulfuros. La asociación de sulfuros original tiende a generar dos subtipos de ambientes geoquímicos oxidante y reductor, ambos con pH ácido. Figuras 6.12 y 6.13.

Figura 6.12: La zona lixiviada, además de óxidos, suelo ser rica en Au y Mo. La zona de sulfuros tiende a enriquecerse en Ag y Cu.

Figura 6.13: Los procesos de lixiviación y enriquecimiento supergénico desarrollan ambientes geoquímicos oxidantes y reductores

6.5 Variantes de limonitas

Dentro de las limonitas se pueden encontrar distintos tipos, que responden al grado de oxidación.
En procesos de alteración incipiente, se evidencia la presencia de jarosita, mineral común en ambientes ácidos (pH 1 a 3) y ricos en sulfatos, derivados de la oxidación de sulfuros, especialmente pirita (Bigham et al., 1996, Dutrizac y Jambor, 2000). Cuando la oxidación avanza, es posible detectar goethita, que puede formarse en condiciones casi neutras o cuando las soluciones bajas en sulfato y pH < 4 se neutralizan con aguas ricas en carbonatos. Con procesos muy avanzados, se genera hematita, mineral de alta temperatura o que requiere mayores tiempos geológicos para su transformación a partir de goethita. Figuras 6.14 y 6.15.

Figura 6.14: Diferentes estados de alteración de las limonitas

Figura 6.15: Sulfuros con distintas etapas de oxidación. Río Candado. Andalgalá, Catamarca

6.6 Interpretación del proceso

Un afloramiento sulfuroso en procesos de meteorización tiende a evolucionar generando distintos tipos de minerales de alteración:
jarosita (amarillo) ⟶ goethita (marrón) ⟶ hematita (rojo)
Este proceso es conocido como "Viraje al rojo", el cual indica el grado de avance (o "Maduración") del proceso de lixiviación de cuerpos de sulfuros (en especial los piritosos) durante la meteorización.

a) El predominio de hematita (roja) indica maduración muy avanzada, con buenas u óptimas perspectivas de enriquecimiento para Cu-Ag en profundidad y Au en afloramiento.
b) El predominio de goetita + algo de jarosita evidencia un proceso medianamente avanzado, con condiciones aceptables a buenas perspectivas de sulfuros supergénicos en profundidad y leyes muy irregulares.
c) Con predominio de jarosita, las perspectivas de enriquecimiento supergénico son casi nulas. Hay sulfuros primarios dominantes en superficie y a poca profundidad.

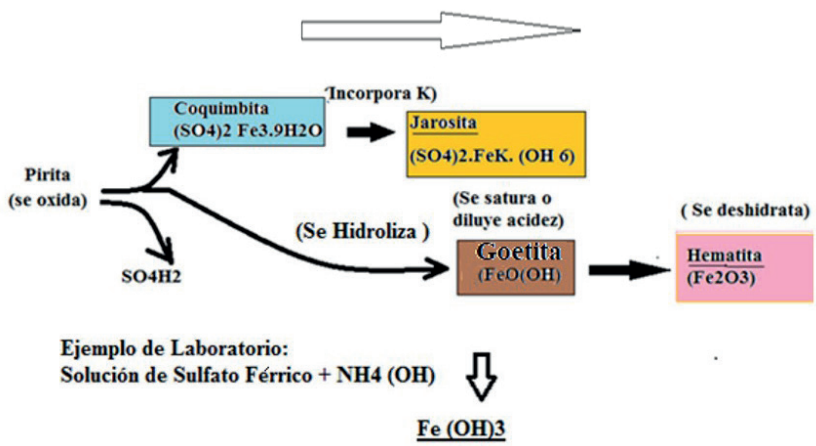


Figura 6.16: Proceso Viraje al rojo a partir de la oxidación de pirita

La Tabla 6.1 muestra un resumen de los valores auténticos del Plan Cordillerano, que puede ser de utilidad para la realización de ejercicios prácticos, usando algún programa informático de tipo estadístico.

Tabla 6.1: Geoquímica distrital (rocas). Hoja geoquímica de Villa Unión.

Preciosos (ppm)		Elementos indicadores (ppm)								Metales base (ppm)			Acompañantes (ppm)				Ferrosos	
Au	Ag	Tl	As	Sb	Bi	Hg	Sn	W	Mo	Cu	Pb	Zn	Cd	Cr	Co	Ni	Mn ppm	Fe%
<0,01	<0,5	0,09	16	<5	<5	<2	<20	<20	1	18	4	60	<1	15	7	18	363	2,54
<0,01	<0,5	<0,01	<5	<5	<5	<2	<20	<20	<1	5	8	15	<1	5	<1	2	67	0,76
<0,01	<0,5	0,24	<5	<5	<5	<2	<20	<20	1	13	<2	114	<1	39	12	25	566	6,13
<0,01	<0,5	0,07	40	<5	<5	<2	<20	<20	10	11	<2	70	<1	13	11	112	75	1,62
<0,01	<0,5	0,06	14	<5	<5	<2	<20	<20	1	11	<2	25	<1	9	4	9	285	1,40
<0,01	<0,5	0,04	442	<5	<5	<2	<20	<20	28	71	7	17	<1	21	4	10	43	2,36
<0,01	<0,5	<0,01	<5	<5	<5	<2	<20	<20	1	6	15	8	<1	6	<1	4	79	0,82
<0,01	<0,5	0,01	41	<5	<5	<2	<20	<20	2	28	36	162	<1	11	12	40	968	2,43
<0,01	<0,5	0,05	47	<5	<5	<2	<20	<20	1	13	5	38	<1	11	5	10	232	1,95
<0,01	<0,5	0,02	<5	<5	<5	<2	<20	<20	<1	6	4	30	<1	5	<1	4	143	1,39
<0,01	<0,5	0,04	<5	<5	<5	<2	<20	<20	1	6	<2	13	<1	7	2	8	137	3,77
<0,01	<0,5	0,05	20	<5	<5	<2	<20	<20	1	12	4	33	<1	11	4	11	200	1,71
<0,01	<0,5	<0,01	7	<5	<5	<2	<20	<20	1	7	2	26	<1	5	<1	4	66	1,31
<0,01	<0,5	0,02	52	<5	<5	<2	<20	<20	1	15	17	41	<1	8	5	11	176	1,97
<0,01	<0,5	0,04	6	<5	<5	<2	<20	<20	<1	9	5	28	<1	9	4	8	260	1,47
<0,01	<0,5	0,05	<5	<5	<5	<2	<20	<20	1	10	4	32	<1	13	4	9	270	1,69
<0,01	<0,5	0,03	<5	<5	<5	<2	<20	<20	3	86	121	54	<1	3	2	2	103	1,40
<0,01	<0,5	<0,01	<5	<5	<5	<2	<20	<20	4	43	25	69	<1	3	<1	3	80	1,24
<0,01	1,2	<0,01	23	<5	<5	<2	<20	<20	2	59	47	26	<1	3	<1	2	70	1,55
<0,01	<0,5	<0,01	<5	<5	<5	<2	<20	<20	<1	27	45	26	<1	4	<1	2	80	1,19
<0,01	<0,5	<0,01	<5	<5	<5	<2	<20	<20	<1	42	28	34	<1	3	<1	3	62	0,72
<0,01	<0,5	0,06	<5	<5	<5	<2	<20	<20	1	12	6	36	<1	14	5	9	317	2,11
<0,01	<0,5	<0,01	<5	<5	<5	<2	<20	<20	1	7	19	5	<1	3	<1	2	47	0,79
<0,01	<0,5	<0,01	<5	<5	<5	<2	<20	<20	2	6	6	32	<1	3	<1	2	100	0,61

Preciosos (ppm)		Elementos indicadores (ppm)								Metales base (ppm)			Acompañantes (ppm)				Ferrosos	
Au	Ag	Tl	As	Sb	Bi	Hg	Sn	W	Mo	Cu	Pb	Zn	Cd	Cr	Co	Ni	Mn ppm	Fe%
<0,01	<0,5	0,09	16	<5	<5	<2	<20	<20	1	18	4	60	<1	15	7	18	363	2,54
<0,01	<0,5	<0,01	<5	<5	<5	<2	<20	<20	<1	5	8	15	<1	5	<1	2	67	0,76
<0,01	<0,5	0,24	<5	<5	<5	<2	<20	<20	1	13	<2	114	<1	39	12	25	566	6,13
<0,01	<0,5	0,07	40	<5	<5	<2	<20	<20	10	11	<2	70	<1	13	11	112	75	1,62
<0,01	<0,5	0,06	14	<5	<5	<2	<20	<20	1	11	<2	25	<1	9	4	9	285	1,40
<0,01	<0,5	0,04	442	<5	<5	<2	<20	<20	28	71	7	17	<1	21	4	10	43	2,36
<0,01	<0,5	<0,01	<5	<5	<5	<2	<20	<20	1	6	15	8	<1	6	<1	4	79	0,82
<0,01	<0,5	0,01	41	<5	<5	<2	<20	<20	2	28	36	162	<1	11	12	40	968	2,43
<0,01	<0,5	0,05	47	<5	<5	<2	<20	<20	1	13	5	38	<1	11	5	10	232	1,95
<0,01	<0,5	0,02	<5	<5	<5	<2	<20	<20	<1	6	4	30	<1	5	<1	4	143	1,39
<0,01	<0,5	0,04	<5	<5	<5	<2	<20	<20	1	6	<2	13	<1	7	2	8	137	3,77
<0,01	<0,5	0,05	20	<5	<5	<2	<20	<20	1	12	4	33	<1	11	4	11	200	1,71
<0,01	<0,5	<0,01	7	<5	<5	<2	<20	<20	1	7	2	26	<1	5	<1	4	66	1,31
<0,01	<0,5	0,02	52	<5	<5	<2	<20	<20	1	15	17	41	<1	8	5	11	176	1,97
<0,01	<0,5	0,04	6	<5	<5	<2	<20	<20	<1	9	5	28	<1	9	4	8	260	1,47
<0,01	<0,5	0,05	<5	<5	<5	<2	<20	<20	1	10	4	32	<1	13	4	9	270	1,69
<0,01	<0,5	0,03	<5	<5	<5	<2	<20	<20	3	86	121	54	<1	3	2	2	103	1,40
<0,01	<0,5	<0,01	<5	<5	<5	<2	<20	<20	4	43	25	69	<1	3	<1	3	80	1,24
<0,01	1,2	<0,01	23	<5	<5	<2	<20	<20	2	59	47	26	<1	3	<1	2	70	1,55
<0,01	<0,5	<0,01	<5	<5	<5	<2	<20	<20	<1	27	45	26	<1	4	<1	2	80	1,19
<0,01	<0,5	<0,01	<5	<5	<5	<2	<20	<20	<1	42	28	34	<1	3	<1	3	62	0,72
<0,01	<0,5	0,06	<5	<5	<5	<2	<20	<20	1	12	6	36	<1	14	5	9	317	2,11
<0,01	<0,5	<0,01	<5	<5	<5	<2	<20	<20	1	7	19	5	<1	3	<1	2	47	0,79
<0,01	<0,5	<0,01	<5	<5	<5	<2	<20	<20	2	6	6	32	<1	3	<1	2	100	0,61
<0,01	<0,5	0,08	7	<5	<5	<2	<20	<20	2	21	10	59	<1	16	8	14	484	2,64

Preciosos (ppm)		Elementos indicadores (ppm)								Metales base (ppm)			Acompañantes (ppm)				Ferrosos	
Au	Ag	Tl	As	Sb	Bi	Hg	Sn	W	Mo	Cu	Pb	Zn	Cd	Cr	Co	Ni	Mn ppm	Fe%
<0,01	<0,5	0,06	<5	<5	<5	<2	<20	<20	<1	13	7	40	<1	13	5	10	338	2,02
<0,01	<0,5	<0,01	26	<5	<5	<2	<20	<20	2	21	12	84	<1	19	10	36	241	3,05
<0,01	<0,5	<0,01	22	<5	<5	2	<20	<20	3	54	3	1518	2	4	115	398	2695	>10,00
<0,01	<0,5	<0,01	7	<5	<5	<2	<20	<20	3	3	<2	168	<1	1	14	38	936	1,31
<0,01	<0,5	0,04	38	<5	<5	<2	<20	<20	2	26	12	69	<1	31	12	32	572	3,05
<0,01	<0,5	<0,01	17	<5	<5	<2	<20	<20	3	11	4	125	<1	1	7	26	658	1,91
<0,01	<0,5	<0,01	18	<5	<5	2	<20	<20	3	146	2	275	<1	6	9	56	124	>10,00
<0,01	<0,5	<0,01	<5	<5	<5	<2	<20	<20	<1	5	<2	51	<1	<1	2	6	300	0,46
<0,01	<0,5	<0,01	25	<5	<5	<2	<20	<20	1	16	19	39	<1	14	<1	7	97	2,36
<0,01	<0,5	<0,01	6	<5	<5	<2	<20	<20	1	4	<2	24	<1	<1	2	11	249	0,27
<0,01	<0,5	0,03	132	<5	<5	<2	<20	<20	2	56	10	92	<1	71	24	70	781	4,82
<0,01	<0,5	0,01	12	<5	<5	<2	<20	<20	<1	3	3	13	<1	6	2	6	192	0,41
<0,01	<0,5	<0,01	<5	<5	<5	<2	<20	<20	1	8	7	19	<1	8	4	7	1354	1,39
<0,01	<0,5	0,06	17	<5	<5	<2	<20	<20	2	27	11	66	<1	48	12	39	530	3,02
<0,01	<0,5	0,06	22	<5	<5	<2	<20	<20	1	32	9	69	<1	89	16	66	622	3,46
<0,01	<0,5	0,07	28	<5	<5	<2	<20	<20	2	34	11	66	<1	90	16	63	645	3,58
<0,01	<0,5	0,06	24	<5	<5	<2	<20	<20	2	31	14	66	<1	55	13	43	603	3,22
<0,01	<0,5	0,03	11	<5	<5	<2	<20	<20	1	21	13	60	<1	29	10	25	716	2,71
1	<5	<5	<2	<20	<20	1	21	13	60	<1	29	10	25	716	2,71	<1	<10	0,03
<0,01	<0,5	0,06	24	<5	<5	<2	<20	<20	2	31	14	66	<1	55	13	43	603	3,22
<0,01	<0,5	0,03	11	<5	<5	<2	<20	<20	1	21	13	60	<1	29	10	25	716	2,71
<0,01	<2	<5	<5	<5	<5	<2	<20	<20	1	21	4	36	<1	15	7	19	295	1,97
<0,01	<2	<5	<5	<5	<5	<2	<20	<20	1	24	8	43	<1	19	9	34	339	2,20
<0,01	<2	<5	10	<5	<5	<2	<20	<20	2	17	10	40	<1	11	5	12	267	1,88
<0,01	<2	<5	13	<5	<5	<2	<20	<20	2	13	13	65	<1	7	4	8	410	1,68

Preciosos (ppm)		Elementos indicadores (ppm)								Metales base (ppm)			Acompañantes (ppm)				Ferrosos	
Au	Ag	Tl	As	Sb	Bi	Hg	Sn	W	Mo	Cu	Pb	Zn	Cd	Cr	Co	Ni	Mn ppm	Fe%
<0,01	<2	<5	19	<5	<5	<2	<20	<20	3	18	16	52	<1	8	5	11	382	1,58
<0,01	<2	<5	13	<5	<5	<2	<20	<20	3	20	10	30	<1	3	3	7	100	1,30
<0,01	<2	<5	6	<5	<5	<2	<20	<20	2	12	15	32	<1	3	3	9	431	0,80
<0,01	<2	<5	14	<5	<5	<2	<20	<20	10	18	27	155	<1	4	8	13	485	5,45
<0,01	<2	<5	12	<5	<5	<2	<20	<20	4	10	9	227	1	2	19	95	1240	2,95
<0,01	<2	<5	10	<5	<5	<2	<20	<20	3	19	14	52	<1	13	7	15	334	2,55
<0,01	<2	<5	11	<5	<5	<2	<20	<20	2	17	8	39	<1	10	4	12	263	1,90
<0,01	<2	<5	12	<5	<5	<2	<20	<20	3	18	12	50	<1	9	6	14	322	2,17
<0,01	<2	<5	<5	<5	<5	<2	<20	<20	2	9	6	23	<1	13	5	13	215	2,05
<0,01	<2	<5	<5	<5	<5	<2	<20	<20	2	20	7	36	<1	22	6	17	323	2,16
<0,01	<2	<5	6	<5	<5	<2	<20	<20	2	11	11	7	<1	4	<1	4	52	0,86
<0,01	<2	<5	<5	<5	<5	<2	<20	<20	1	16	14	7	<1	5	1	4	54	0,90
0,04	6,43	<5	80	<5	<5	<2	<20	<20	11	36	543	36	<1	28	32	42	73	5,88
0,03	<2	<5	141	<5	<5	<2	<20	<20	20	125	172	741	1	12	8	120	67	>10,00
0,04	2,21	<5	208	<5	<5	<2	<20	<20	26	150	120	793	1	24	8	162	105	>10,00
<0,01	<2	<5	6	<5	<5	<2	<20	<20	2	18	8	53	<1	26	8	17	297	3,02
<0,01	<2	<5	12	<5	<5	<2	<20	<20	2	26	13	61	<1	19	6	19	240	2,44
0,01	2,53	<5	124	<5	<5	<2	<20	<20	34	668	47	1006	5	20	8	75	294	>10,00
0,04	2,11	<5	249	<5	<5	<2	<20	<20	28	109	124	331	2	28	5	53	56	>10,00
<0,01	<2	<5	14	<5	<5	<2	<20	<20	4	46	42	333	2	12	6	63	340	2,32
0,03	4,50	<5	173	<5	<5	<2	<20	<20	13	199	72	1288	2	19	5	157	313	>10,00
0,02	<2	<5	49	<5	<5	<2	<20	<20	7	36	68	58	<1	18	1	9	84	6,48
<0,01	<2	<5	63	<5	<5	<2	<20	<20	16	137	24	686	<1	42	7	194	149	8,30
0,01	<2	<5	53	<5	<5	<2	<20	<20	15	63	13	186	<1	17	2	42	122	8,12
<0,01	<2	<5	129	<5	<5	<2	<20	<20	17	34	53	351	<1	39	3	39	139	6,44

Preciosos (ppm)		Elementos indicadores (ppm)								Metales base (ppm)			Acompañantes (ppm)				Ferrosos	
Au	Ag	Tl	As	Sb	Bi	Hg	Sn	W	Mo	Cu	Pb	Zn	Cd	Cr	Co	Ni	Mn ppm	Fe%
0,04	<2	<5	105	<5	<5	<2	<20	<20	20	295	74	1580	18	24	6	171	664	>10,00
0,02	<2	<5	105	<5	<5	<2	<20	<20	20	240	50	1505	21	41	13	262	1508	>10,00
<0,01	5,8	<5	<5	<5	1471	ND	53	254	12	3116	99	100	<1	3	22	2	133	>10,00
<0,01	1,8	<5	<5	<5	46	ND	24	26	6	1685	53	66	<1	7	32	6	106	>10,00
<0,01	0,8	<5	<5	<5	15	ND	51	<20	35	1047	556	969	<1	2	16	3	1260	3,75
<0,01	1,3	<5	<5	<5	33	ND	25	<20	36	301	117	571	6	17	12	12	477	4
<0,01	<0,5	<5	7	<5	<5	ND	67	<20	11	77	20	911	17	20	30	27	1314	6
<0,01	8,5	<5	<5	<5	624	ND	122	34	29	990	40	495	1	12	49	8	426	>10,00
<0,01	<0,5	<5	<5	<5	<5	ND	<20	<20	3	52	8	50	<1	33	21	33	436	3
<0,01	<0,5	<5	<5	<5	<5	ND	57	<20	4	656	12	120	<1	37	22	23	370	4
<0,01	1,4	<5	<5	<5	708	ND	41	61	17	823	103	238	<1	2	18	3	234	5
<0,01	0,6	<5	<5	<5	451	ND	<20	38	5	2524	33	59	<1	15	13	7	174	2
<0,01	2,8	<5	<5	<5	124	ND	109	36	18	1704	39	391	<1	15	68	6	653	6,68
<0,01	<0,5	<5	<5	<5	<5	ND	<20	<20	10	34	12	60	<1	18	1	10	376	2
<0,01	<0,5	<5	6	<5	<5	ND	<20	<20	9	94	57	228	<1	154	58	267	3150	>10,00
0,03	4,80	<5	164	<5	<5	<2	<20	<20	10	497	39	3700	3	15	27	528	774	>10,00
0,02	<2	<5	40	<5	<5	<2	<20	<20	10	93	139	74	<1	24	1	13	75	3,15
<0,01	4,06	<5	152	<5	<5	<2	<20	<20	22	532	35	2500	5	18	69	582	1552	>10,00
0,04	<2	DUDOSA																
0,01	4,67	DUDOSA																
0,02	<2	<5	53	<5	<5	<2	<20	<20	25	134	84	95	<1	27	1	15	106	5,86
0,01	<2	<5	83	<5	<5	<2	<20	<20	14	102	78	61	<1	25	<1	9	75	8,70
0,04	<2	<5	87	<5	<5	<2	<20	<20	36	149	85	125	<1	28	2	15	59	>10,00
0,01	4,67	<5	64	<5	<5	<2	<20	<20	41	125	91	152	<1	16	2	22	58	6,83
0,01	<2	<5	30	<5	<5	<2	<20	<20	54	28	19	64	<1	23	7	14	1141	2,20

Preciosos (ppm)		Elementos indicadores (ppm)								Metales base (ppm)			Acompañantes (ppm)				Ferrosos	
Au	Ag	Tl	As	Sb	Bi	Hg	Sn	W	Mo	Cu	Pb	Zn	Cd	Cr	Co	Ni	Mn ppm	Fe%
0,04	3,49	<5	245	<5	<5	<2	<20	<20	31	154	136	450	<1	31	5	57	51	>10,00
0,03	<2	<5	191	<5	<5	<2	20	<20	60	259	87	261	<1	35	<1	25	37	>10,00
0,01	<2	<5	78	<5	<5	<2	<20	<20	44	73	116	48	<1	19	<1	7	23	3,32
0,02	<2	<5	43	<5	<5	<2	<20	<20	33	78	95	36	<1	17	<1	7	28	1,80
<0,01	<2	<5	73	<5	<5	<2	<20	<20	58	101	21	761	2	12	14	108	489	>10,00
0,01	<2	<5	22	<5	<5	<2	<20	<20	90	29	99	46	<1	13	2	9	62	1,81
0,01	<2	<5	13	<5	<5	<2	<20	<20	35	31	79	11	<1	6	<1	2	32	1,04
<0,01	3,56	<5	43	<5	<5	<2	<20	<20	18	155	66	90	<1	32	2	11	30	8,15
<0,01	<2	<5	65	<5	<5	<2	<20	<20	11	193	92	259	2	21	21	51	194	7,02
<0,01	<2	<5	68	<5	<5	<2	<20	<20	22	99	98	75	<1	30	2	12	93	5,16
<0,01	<2	<5	17	<5	<5	<2	<20	<20	23	87	89	71	<1	19	<1	5	36	3,00
0,03	<2	<5	15	<5	<5	<2	<20	<20	19	64	91	225	<1	25	2	27	69	2,67
0,02	<2	<5	47	<5	<5	<2	<20	<20	44	115	113	127	<1	18	<1	16	29	4,10
0,04	3,78	<5	91	<5	<5	<2	<20	<20	17	141	125	448	<1	28	5	53	109	>10,00
0,02	<2	<5	112	<5	<5	<2	<20	<20	13	182	145	463	<1	26	4	63	110	>10,00
0,01	<2	<5	61	<5	<5	<2	<20	<20	23	115	119	234	1	27	3	27	63	5,90
<0,01	<2	<5	20	<5	<5	<2	<20	<20	7	55	48	153	<1	12	2	21	63	3,71
<0,01	<2	<5	77	<5	<5	<2	<20	<20	7	23	42	719	5	38	17	83	506	5,27
<0,01	<2	<5	5	<5	<5	<2	<20	<20	1	13	5	31	<1	16	2	11	140	1,25
<0,01	<2	<5	6	<5	<5	<2	<20	<20	7	19	7	15	<1	42	2	8	98	0,85
<0,01	<2	<5	6	<5	<5	<2	<20	<20	<1	11	<2	17	<1	18	1	6	98	0,85
<0,01	<2	<5	8	<5	<5	<2	<20	<20	8	12	3	18	<1	51	2	7	80	0,92
<0,01	<2	<5	<5	<5	<5	<2	<20	<20	2	29	11	66	<1	46	13	23	688	3,26
<0,01	<2	<5	23	<5	<5	<2	<20	<20	7	14	16	8	<1	41	<1	4	47	0,65
<0,01	<2	<5	16	<5	<5	<2	<20	<20	1	12	8	88	<1	8	1	8	56	1,00

Preciosos (ppm)		Elementos indicadores (ppm)								Metales base (ppm)			Acompañantes (ppm)				Ferrosos	
Au	Ag	Tl	As	Sb	Bi	Hg	Sn	W	Mo	Cu	Pb	Zn	Cd	Cr	Co	Ni	Mn ppm	Fe%
<0,01	<2	<5	<5	<5	<5	<2	<20	<20	7	44	34	52	<1	52	9	19	344	2,35
<0,01	<2	<5	9	<5	<5	<2	<20	<20	2	16	18	65	<1	21	5	19	299	2,18
<0,01	<2	<5	13	<5	<5	<2	<20	<20	3	29	18	112	<1	26	6	26	351	2,74
<0,01	<2	<5	6	<5	<5	<2	<20	<20	1	9	7	6	<1	10	<1	3	38	0,58
<0,01	<2	<5	10	<5	<5	<2	<20	<20	4	45	12	26	<1	59	6	39	284	1,28
<0,01	<2	<5	<5	<5	<5	<2	<20	<20	<1	8	9	8	<1	8	<1	3	107	0,34
<0,01	<2	<5	41	<5	<5	<2	20	<20	1	59	4	56	<1	955	98	1102	1156	7,70
<0,01	<2	<5	95	<5	<5	<2	<20	<20	3	70	6	53	<1	1330	53	632	984	5,52
<0,01	<2	<5	95	<20	<5	<5	<20	<5	3	70	6	53	<1	1330	53	55	984	5,52
<0,01	<2	<5	<5	21	<5	<5	21	<5	1	25	3	32	<1	457	96	89	927	7,23
0,02	3,72	<5	<5	<20	<5	<5	<20	<5	3	24	8	51	<1	338	93	90	1153	6,60

CAPÍTULO 7
SULFUROS LIXIVIADOS, OTRO INTENTO DE INTERPRETACIÓN

7.1 Introducción

Son pocos los trabajos referidos a los sulfuros lixiviados, entre los que se puede mencionar:

- Blanchard R. (1968) “Interpretation of leached outcrops”. Nevada Bureau of Mines. Bull. 66. M.S.M. (USA).
- Krausse H. (1963) “Die Kupfervertailung auf des Eisenerzlagarstaetten Shams Abad (Iran) und ihre genetische Deutung” N.Jb. Miner.Abh- 100- 2- 185-202.Stutgart.
- Smirnov S. (1954) “Die oxidationszonesulfidisherlagarstaetten”. AkademicVerlag-Berlin.

El más completo, específico y didáctico es el escrito por Blanchard (1968). Los tres autores coinciden, en líneas generales, en los criterios principales.

Las mineralizaciones hipogénicas de sulfuros tienden a sufrir procesos de **lixiviación y/o enriquecimiento supergénico,** en especial las cupríferas sometidas a meteorización.

En la prospección es normal la búsqueda e investigación prioritaria de “áreas de alteración hidrotermal” como indicio de la existencia de sulfuros. En caso de haber estado sometidos a meteorización prolongada podrían existir sectores enriquecidos ocultos, de interés económico.

En las áreas de alteración hidrotermal las litologías presentes son afectadas por cambios hipogénicos importantes en aspecto y composición. La meteorización a su vez, sobreimpone nuevos cambios supergénicos, que suelen volver irreconocibles las rocas presentes y sobre todo a los sulfuros que formaban la mineralización original, resultando necesario interpretar o identificar cuáles eran éstos a partir de su estado actual.

Es difícil superar el punto máximo al cual llegó Blanchard (1968) y se han hecho famosos sus cautivantes modelos de estructuras esqueléticas de limonitas indígenas, procedentes de la lixiviación de distintos sulfuros, especialmente los cupríferos (Figura 7.1). Aun así, muchos reconocen que es complicado encontrar cristales de sulfuros suficientemente grandes (al menos 5mm) como para que tales estructuras

sean distinguibles a la lupa. Por tal motivo, es problemático asignarles carácter diagnóstico.

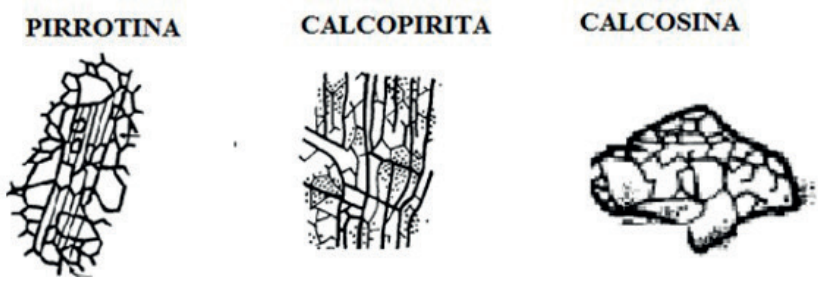


Figura 7.1: Estructuras "esqueletales" a partir de pirrotina, calcopirita y calcosina. Modificado a partir de Blanchard, 1968.

En la gran mayoría de los yacimientos, la mineralización forma glomérulos de sulfuros submicroscópicos, que generalmente se investigan por geoquímica y calcografía.

Otro aspecto en que los tres autores coinciden, es que resultan poco confiables los colores de las limonitas indígenas como criterio de distinción de la mineralogía original. Es materia opinable, pero es necesario buena agudeza visual y experiencia suficiente.

Cuando una mineralización de sulfuros metalíferos primarios o hipogénicos ("sistema hidrotermal") ya formada, es sometida a una meteorización prolongada, inicia una evolución supergénica diferente, desarrollando un perfil característico de contraste entre ambiente oxidante vs reductor (Figura 7.2). En ese ámbito se desarrollan las "limonitas indígenas" propias de la zona de Oxidación-Lixiviación de mineralizaciones de sulfuros (en especial cupríferos) también llamados "Sombreros de Hierro", que justifican el título de esta contribución.

Figura 7.2: Perfil clásico de Sombrero de Hierro – Enriquecimiento supergénico. Desde la esquina superior izquierda de la figura, hacia la inferior derecha, aparece claramente la zonificación. 1) Sombrero de hierro con hematita dominante, 2) Intercalación yesosa, 3) Zona de goetita-jarosita, 4) Zona de jarosita + restos de sulfuros a medio oxidar, 5) Zona de calcosina y sulfuros abundantes (Ambiente Reductor) El camión señala el contacto Oxidados/Sulfuros, lugar donde se ubicaba originalmente el "Paleonivel freático" que separaba ambos ambientes y que no se corresponde con el nivel freático actual

7.2 ¿Por qué Interpretación?

La aplicación del criterio de Blanchard, no es un "diagnóstico" infalible, sino una opinión razonable, con puntos dudosos y a veces sometida a aspectos subjetivos. El buen intento de este autor, de reconocer los sulfuros originales en una zona lixiviada, basándose en las "formas esqueletales" (dadas por el relleno con limonita de una red de clivajes y/o fisuras del sulfuro original desaparecido), propone determinar a lupa, los siguientes minerales: pirita, pirrotina, calcopirita, calcosina, bornita, tetrahedrita-tenantita, antimonita, etc., además de blenda, galena y molibdenita.

Esta técnica, es bastante difícil de aplicar, salvo cuando los cristales son idiomorfos y de buen tamaño (5 a 10 mm por lo menos). Por ahora, la determinación a lupa de los ex sulfuros, especie por especie, parece que llegó al máximo de sus posibilidades.

Sin embargo, además de identificar el sulfuro original, hay muchas otras características útiles para reconocer o deducir en un afloramiento lixiviado y que forman parte de una interpretación completa, sobre todo si hay intención de explorarlo en profundidad.
Un depósito de sulfuros lixiviado es el resultado de un proceso de meteorización sobreimpuesto a la mineralización original. Si el depósito lixiviado es "maduro" tiende a dar un perfil con varios "niveles" y/o etapas, donde es importante saber o estimar, cuál de ellos se está observando. A tal fin, se recomienda:

- Deducir cual fue la paragénesis original y cuáles son los minerales supergénicos, para estimar si pueden existir enriquecimientos importantes, especialmente en Cu o Ag (profundidad) o bien de Au por lixiviación de acompañantes (superficie).
- Diferenciar los sistemas hidrotermales "piritosos" (estériles o pobres) de aquellos que, además de pirita, tienen la mineralización que se está buscando, en especial de Cu-Ag-Au**.** En una zona mineralizada, siempre habrá sectores pobres y ricos. La observación de guías permite diferenciarlos con rapidez ("Clavos" u "Ore shoots").
- Estimar el grado de "madurez" alcanzada por el proceso de lixiviación-enriquecimiento, porque de él depende la posibilidad de afloramientos enriquecidos por lixiviación en superficie (Au en especial) y/o niveles importantes de calcosina y/o argentita en profundidad.
- Seleccionar desde el mapeo y muestreo de superficie, cuáles pueden ser los puntos estratégicos, para perforar (que en definitiva es lo que se quiere averiguar).
- La escala de interpretación, puede ir desde la observación megascópica de un afloramiento (a veces 1 a 10 hectáreas o más), hasta la observación a la lupa de una muestra de mano (1 a 2 Kg).
- Combinar la observación "Micro" (Calcografía) con la "Meso" (muestra de mano a la lupa) y la "Macro" (directamente en el afloramiento). Siempre conviene complementar los datos con microscopía de reflexión (Calcografía) y Geoquímica.

Son todas herramientas disponibles en la actualidad, pero no siempre bien aprovechadas.
Consejo para principiantes: aunque su tarea principal sea el campo, es importante aprender conceptos básicos de calcografía.

7.3 La historia de las Limonitas Indígenas

La mayoría de los objetivos de prospección minera sólo contienen pirita.
De forma excepcional (uno de cada diez o menos) se encontrarán en superficie suficientes minerales o elementos de valor (como Au o Ag) para despertar interés económico-minero. Por lo tanto, es muy lógico y tentador el interés en distinguir "estructuras esqueletales" de los minerales originales (ex-sulfuros), pero es un camino arduo que Blanchard (1968) recorrió hasta el final y parece muy difícil de superar.
Esta propuesta es especialmente aplicable a yacimientos de Cu-Ag, de los cuales se conocen numerosos sulfuros, pero en la gran mayoría de los casos la mineralogía primaria dominante es muy simple**:** pirita (a lo sumo pirrotina), calcopirita y calcosina.
La presencia de minerales menos frecuentes como tetrahedrita-tenantita, covellina, enargita, cubanita, galena y blenda, etc. son "rarezas" casi intrascendentes que poco aportan o modifican la ley media del depósito, salvo que contengan Au y/o Ag.
Más que minerales independientes aflorando, normalmente se encontraran asociaciones de varios de ellos y en general**,** afectados por la meteorización.
La formación de minerales supergénicos permite tanto aproximarse a la paragénesis original, como deducir el grado de "maduración" del sombrero de hierro en desarrollo.
Existen bastantes sulfuros comunes, capaces de generar "Limonitas". El problema siempre ha sido "conociendo la limonita dominante (¿Indígena o Transportada?) ¿cuál fue el sulfuro original?".
Como primera aproximación se debe tener en cuenta el "viraje al rojo". Figuras 7.3 y 7.4.

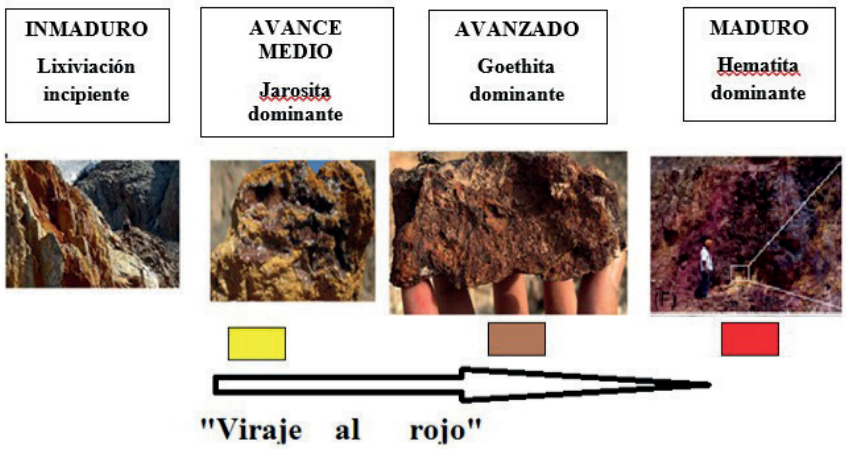


Figura 7.3: Maduración de un proceso de lixiviación en avance

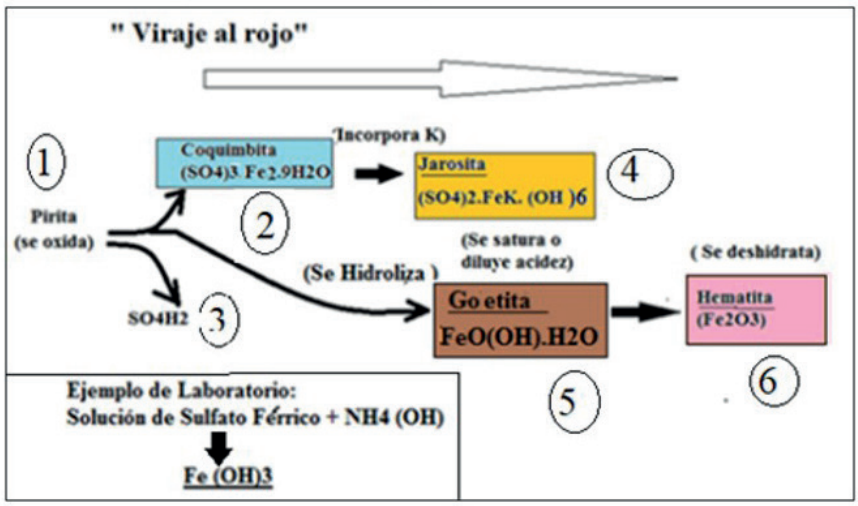


Figura 7.4: Viraje al rojo. Pasos sucesivos y formación de minerales indicadores. 1) Pirita en oxidación. 2) Formación de sulfatos solubles. 3) Formación de ácido sulfúrico. 4) Captación de K+ y formación de jarosita. 5) Hidrólisis del complejo para dar goethita al bajar la acidez. 6) Formación de hematita por deshidratación.

7.4 Influencia de la roca encajante

Para determinar la influencia de la roca encajante es importante preguntarse:

¿Cómo se comporta la pirita en oxidación? ¿Qué influencia tiene la ganga y, en especial, la roca encajonante?

1) La pirita es el "sulfuro iniciador universal" del proceso. Sin embargo, minerales químicamente idénticos como marcasita o melnicovita (amorfa) son muy difíciles de oxidar. A veces puede desaparecer toda la pirita del sombrero de hierro, pero todavía quedarán restos frescos de marcasita en superficie.
2) La pirita (S_2Fe) actúa como "generadora" de H_2SO_4y de $FeSO_4$, en menor grado $Fe_2 (SO_4)_3$, para formar soluciones ácidas. Éstas atacan a los otros componentes del sistema, en especial a la "roca de campo" y en menor medida, a las gangas carbonáticas. Todas en conjunto, actúan como "consumidores" de ácido para restablecer un equilibrio metaestable, mientras haya pirita capaz de oxidarse.
3) Ninguna roca o mineral es "absolutamente" inatacable, aunque algunas casi lo logran (generalmente las mas silicosas) y se clasifican como geoquímicamente "inertes o "resistivas".
4) Si la roca es "inerte" no hay consumo de ácido y el piritoedro o glomérulo piritoso sometido a meteorización, se oxida rápidamente y desaparece por completo, dejando como testimonio el molde vacío o a lo sumo una película fina rojiza o tornasolada (que a veces se confunde con bornita), similar al "Barniz del desierto".
5) En el extremo opuesto, si en la región predominan rocas calcáreas o reactivas a los ácidos, cada molécula de H_2SO_4 que se forma es automáticamente saturada, bajando la acidez del medio.
6) El $FeSO_4$en solución se oxida pasando a $Fe_2(SO_4)_3Fe_2$, (Fe++ =➔ Fe +++) que, al disminuir la acidez del medio por reacción con las rocas presentes o por simple dilución (agua de arroyos afluentes), se hidroliza con rapidez precipitando limonita coloidal (goethita en especial).

Así la pirita va siendo reemplazada volumen a volumen, quedando los piritoedro "fosilizados" en goetita (pseudomorfos). En cambio, si la

roca de campo es moderadamente reactiva, se obtendrán productos de transición como se muestra en la Figura 7.5.
Los piritoedro ("Dados" o "Winchos" en Jujuy) en su mayoría son cúbicos y es común que conserven relictos de pirita sin oxidar en el núcleo. La pirita puede tomar otras formas cristalográficas (ejemplo: dodecaedros) generalmente pequeños (1 a 2 mm) y estrechamente asociados a la roca silicosa o directamente ocluida en la ganga de cuarzo, pero siguen siendo más comunes los glomérulos casi amorfos de microcristales de pirita y a veces calcopirita, cuya sola presencia ya es un dato importante para el prospector.

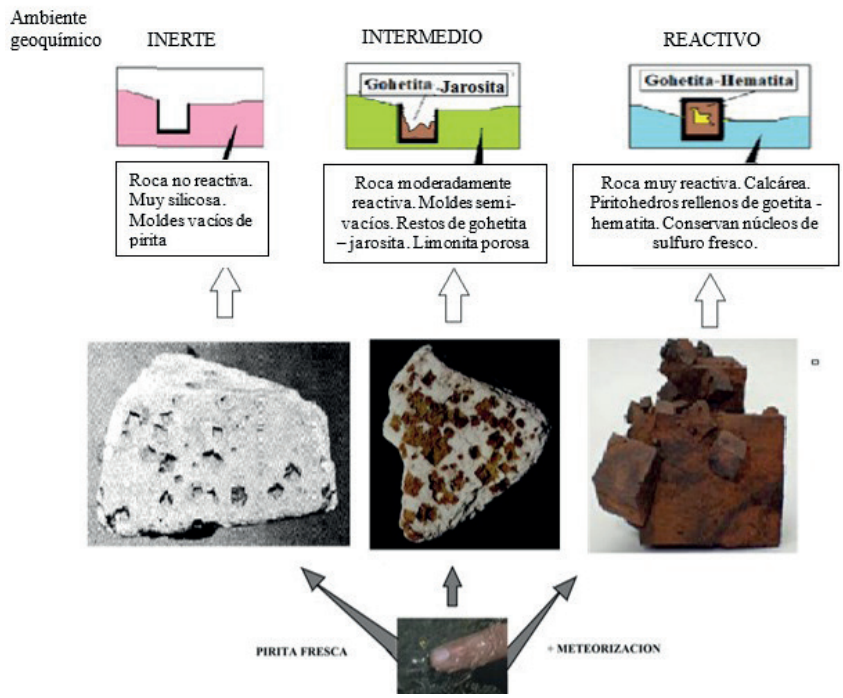


Figura 7.5: Efecto de la roca encajante. De la roca de campo depende que los sulfuros acidógenos, pirita en especial, aparezcan como moldes vacíos (roca no reactiva), en relieve (roca reactiva) o intermedia. Esto indica si puede o no haber suficiente acidez y enriquecimiento supergénico o residual importante. Modificado de Blanchard, 1968

7.5 Sistemas Hidrotermales. Fértiles y Estériles

Hay muchos tipos de yacimientos de sulfuros: vetas, brechas, mantos

sedimentarios, etc. Todos pueden sufrir lixiviación y/o enriquecimiento supergénico. Atendiendo a la frecuencia e importancia como recurso se pueden destacar los “Diseminados” y por oposición, los “Masivos”. Los primeros se prestan mejor para la “interpretación” porque hay mayor superficie específica de ataque o interacción entre la roca de caja y la solución ácida. Los masivos en cambio tienen fuerte interacción, pero muy local. La diferencia es cuestión de superficie específica de contacto.

Hablar de “Diseminados” da la idea de una “nube de partículas dispersas” en la roca. Es un concepto válido porque en efecto, la mayoría de los sistemas hidrotermales tiene una aureola envolvente de gránulos de sulfuros dispersos.

Además de esos gránulos dispersos, la mayoría de ellos contienen numerosas vetillas de cuarzo-sulfuros (control estructural) que pueden ser “Estériles” (sólo pirita) o “Fértiles” (con otros elementos o sulfuros útiles).

Normalmente, las venillas responden a varios juegos de rumbos y buzamientos (a veces hasta 5 o 6) que tienden a formar “enrejillados” complejos (Stockworks), pero casi siempre hay uno principal o dominante. Distintos juegos de venillas pueden mostrar un mismo tipo de mineralización o, al contrario, la mineralización de interés aparecer solamente en algún juego de vetillas especial. Figuras 7.6 y 7.7.

Es raro que se produzca un solo evento mineralizador, normalmente son tres o más (mineralizaciones policíclicas).

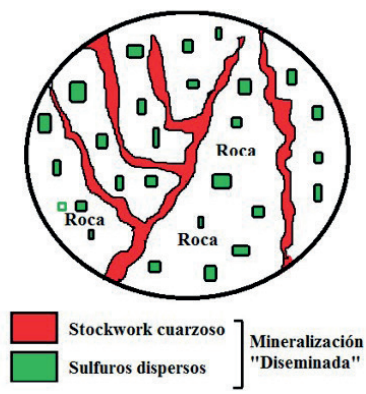


Figura 7.6: Mineralización diseminada como stockwork (relleno de red de fisuras enrejilladas), comúnmente asociados con vetas de alta ley. Puede ser precedido por una o más etapas de alteración hidrotermal, en general estériles o pobres.

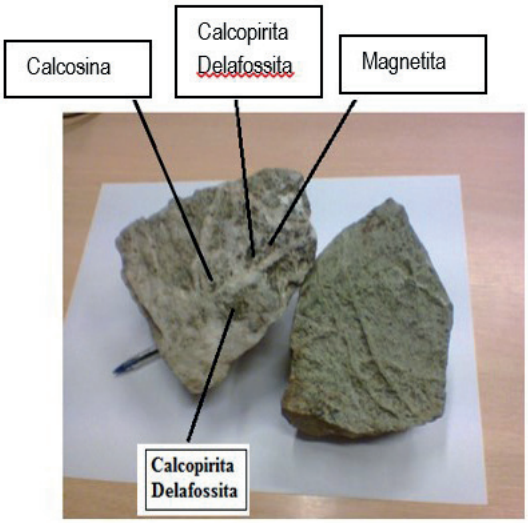


Figura 7.7: Granito silicificado más stockwork cuarzo con mineral

Un "Sistema hidrotermal" entonces, contiene pirita diseminada, acompañada generalmente por guías y vetillas de cuarzo y/o cuarzo-pirita. Ambos casos pueden contener calcopirita (Sistemas "Fértiles") o no tenerla ("Estériles").
En un sistema hidrotermal, lo normal es que todos los sulfuros, dispersos o en vetillas, evolucionen más o menos en igual sentido al meteorizarse, aunque con distinta velocidad.
Pueden darse tres casos:

a) Lixiviación insignificante =Predominio de sulfuros frescos = Falta de madurez o demasiado lenta.
b) Lixiviación selectiva (ejemplo: los sulfuros en vetillas están lixiviados, pero no los dispersos) o viceversa = Maduración entre lenta y normal.
c) Lixiviación total o avanzada ("maduración rápida"). En todas las limonitas resultantes habrá fuerte "tendencia al rojo": jarosita=➔ goetita=➔ hematita, indicadora de la intensidad y grado de avance de la lixiviación.

En todos los casos la naturaleza de la roca de campo será determi-

nante.

7.6 Indicios de mineralización

Lo primero a comprobar es si el mineral de Cu (calcopirita-calcosina) aparece solo en las vetillas o está también como sulfuros diseminados (elementos como Au o Ag seguirán caminos semejantes, pero solo detectables por vía analítica).
Las Figuras 7.8, 7.9, 7.10, 7.11, 7.12 y 7.13 muestran diferentes ejemplos de indicios de mineralización.

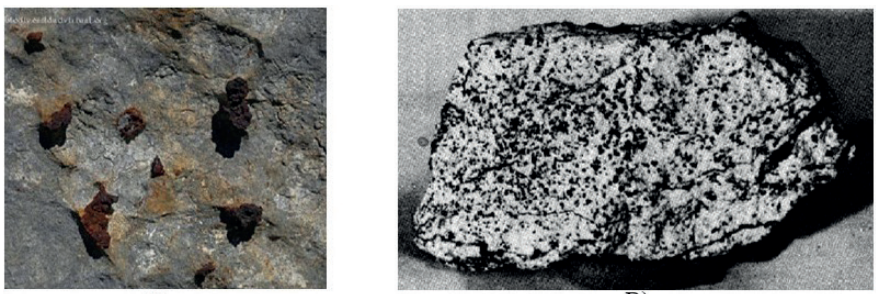


Figura 7.8: A) Glomérulos piritosos diseminados en andesita propilitizada. Mediano poder reactivo. Foto López Garcia, 2001. B) Calcosina diseminada (ex calcopirita enriquecida con pequeño exceso de pirita) en porfido caolinizado- Mediano poder reactivo. Foto Blanchard, 1961

Figura 7.9: Oxidación de glomérulos y cristales de pirita diseminados en ignimbrita algo argilitizada. Poder reactivo mediano a alto. Gentileza Almaraz, 2021.

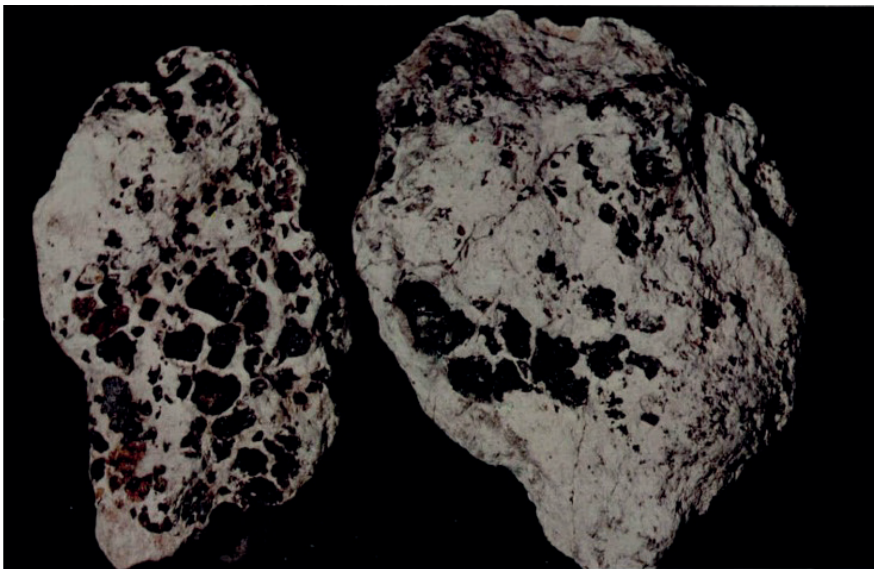


Figura 7.10: Pirita de grano grueso, dispersa en toba ácida argilitizada. Poder reactivo mediano a alto. Esta reemplazada casi completamente por calcosina (Fotografía tomada de Blanchard, 1961)

Figura 7.11: Argentita en toba ácida alunitizada (enriquecimiento supergénico). Baja a mediana reactividad. Fuente: Minning Press, 12/05/2021

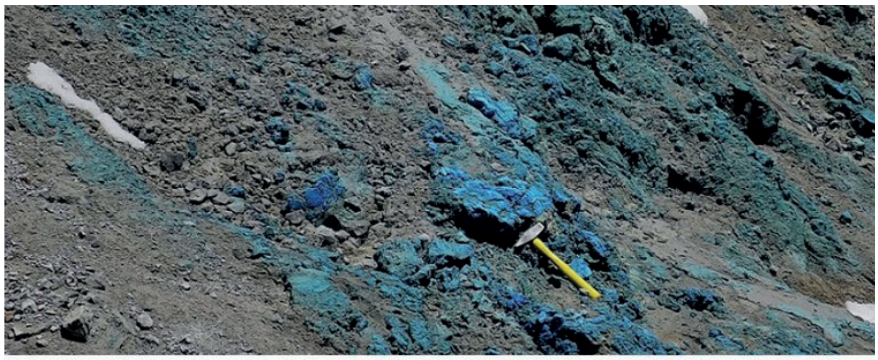


Figura 7.12: Afloramiento de andesitas argilitizadas con calcosina diseminada en oxidación a calcantita (ambiente húmedo). Fuente: Mining Press (2020)

Figura 7.13: Andesita argilitizada. Venillas y motas dispersas de calcosina en oxidación, pero en ambiente seco. Mediano poder reactivo. Foto Astorga M., 2012

7.7 Difusión por permeabilidad de limonita transportada. Influencia de la roca de campo

La pirita en oxidación genera $FeSO_4$, muy soluble en agua ácida. Ésta impregna la porosidad-permeabilidad de la roca generando una nube limonítica. Si es una roca inerte, la nube se dispersará mucho más que

si es una roca reactiva (Figura 7.14).

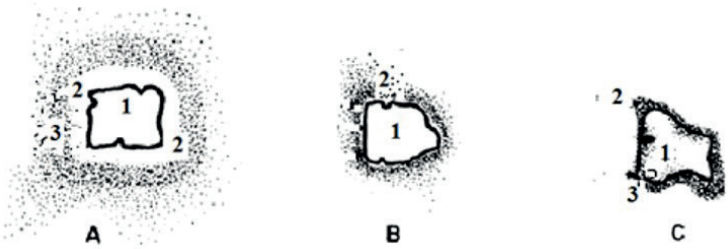


Figura 7.14: Lixiviación ácida por oxidaciòn de pirita en A: Roca porosa con lixiviacion àcida (1: Ex Pirita; 2: Roca lixiviada prososa. Inerte 3: Halo de gohetita, con dispersion por permeabilidad natural). B: Roca porosa con mediano poder reactivo. C: Roca porosa con alto poder reactivo. Esquema de Blanchard (1961) reintepretado por Peralta

Los sulfuros dispersos evolucionan rápidamente.
Sulfuro =➔jarosita =➔goethita, pero generando una "nube de impregnación" en la roca porosa. En general el $CuSO_4$ es más soluble y su "nube" se dispersa más que la de los sulfatos ferrosos. Si el sulfuro original es pirita la impregnación será jarosítica. Si es pirita + calcopirita, también habrá jarosita de impregnación, pero en su zona distal aparecerán algunos oxidados verdes de cobre (crisocola y/o malaquita), según cual sea la roca de campo. Ejemplo: riolita=➔ crisocola. andesita =➔ malaquita.
Los oxidados de Cu (ejemplo malaquita-azurita, crisocola) son buen indicio, pero es mucho mejor si aparecen con algo de calcosina. Figura 7.15.

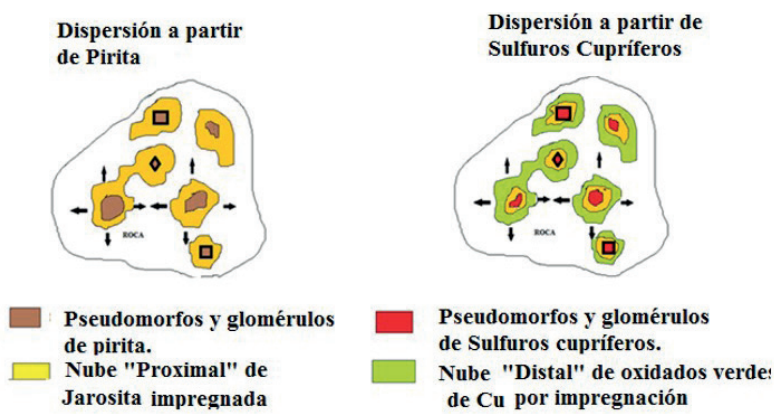


Figura 7.15: Sulfuros dispersos. Si el sulfuro es solo pirita, la dipersión por capilaridad se compone de jarosita – gohetita. Si hay sulfuros cupriferos los sulfatos de Cu tienen igual o mayor dispersión que la jarosita

7.8 Cronología Estructural y Cronología Paragenética. Estilos de aparición más frecuentes

En la exploración de un sistema hidrotermal se deben hacer cuatro tipos de mapeos simultáneos:

a) **Litologías:** Es el más clásico, tal como lo haría un estudiante.
b) **Alteraciones hidrotermales**. Cuando las rocas del área son afectadas por fenómenos hidrotermales intensos, cambia tanto su aspecto como su mineralogía. Estos cambios se conocen como "Alteraciones hidrotermales". Llevadas a su máxima simplicidad existen 3 grupos o tipos de alteraciones: Silicificación, Argilitización, Marginal. Cada una de ellas puede tener varios subtipos. Figura 7.16.

Figura 7.16: A) Silicificación. Granito silicificado. Mínimo o nulo poder reactivo en roca. B) Argilitizacion. Andesita argilitizada con ex pirita diseminada (limonitizada). Moderado poder reactivo en roca.

c) **Estructuras**. Pueden ser "Pre" o "Postminerales". En especial interesan las primeras porque alojan la mineralización. Figuras 7.17 y 7.18.

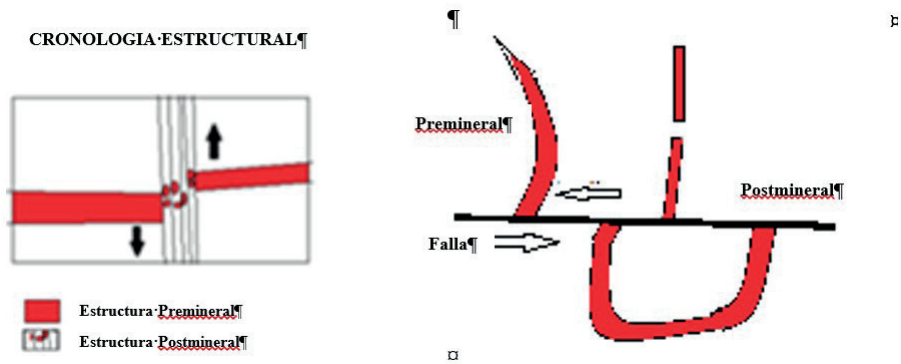


Figura 7.17: A escala de grupo de afloramientos, los elementos estructurales casi siempre muetran una secuencia temporal. Etapa 1, Etapa 2, Etapa 3, pero solo una, a lo sumo, será favorable para la mineralización.

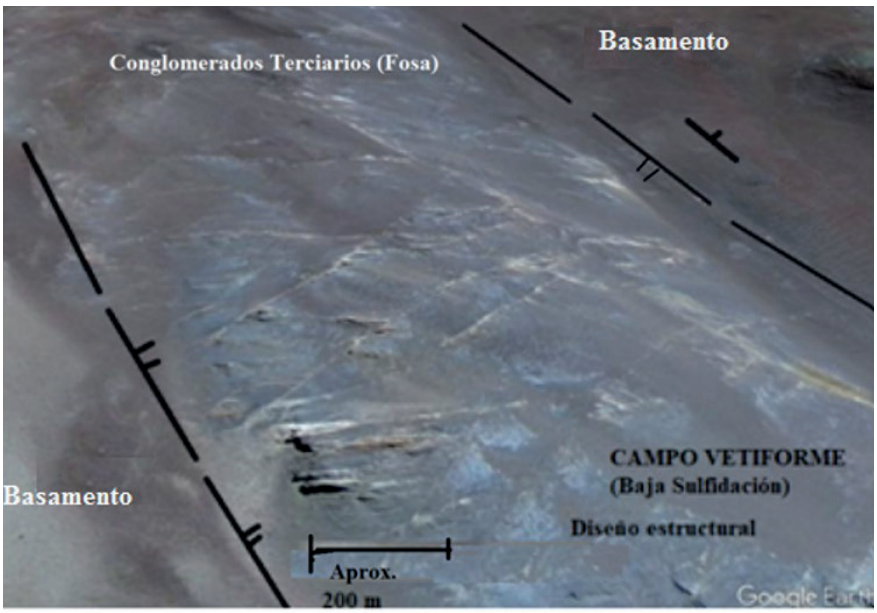


Figura 7.18: Ejemplo de "Campo Epitermal Vetiforme" en un sistema de fracturas preminerales. Faldeo norte del Volcán de Antofalla. Vetas de Smithsonita. Catamarca. Vista aérea, Peralta, 1979.

Las Figuras 7.19 y 7.20 muestran juegos de fisuras y secuencia temporal de aportes epitermales (eventos de formación) en afloramientos de campo.

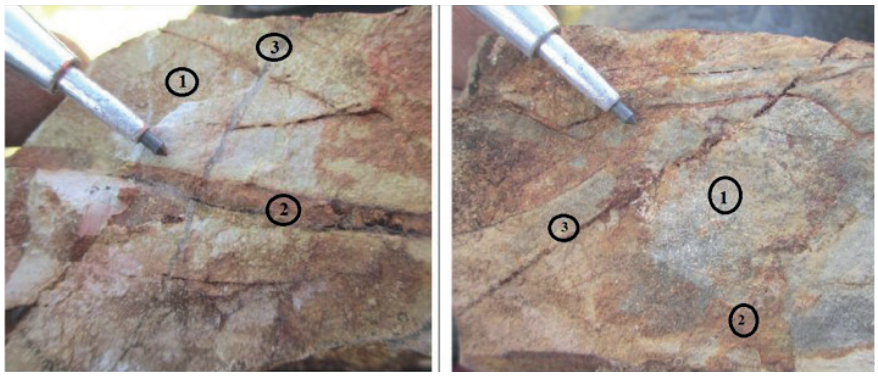


Figura 7.19: A) Ejemplo de roca alterada filica con dos tipos de venillas. Observese que las venillas silicas grises cortan a la venillas de jarosita. B)con pelicula de jarosita >> venillas de hematita. Fuente Huella Minera, 2015 1,2,3 Generación de fisuras mineralizadas.

Figura 7.20: Secuencia de aportes epitermales. Evento 1: Toba dacitica con caolinización – alunitización. Evento 2: idem al anterior con aportes de pirita mas jarosita (por meteorizacion de pirita con un pasaje parcial a gohetita). Evento 3: Stocwork de cuarzo (aurifero)

d) **Paragénetico** (Mineralogía de mena y secuencia de deposición). Escala muestra de mano.

La secuencia de deposición mineral también se puede mapear (paragénesis), así como cualquier dato que indique el orden de formación de la mena. Figura 7.21.

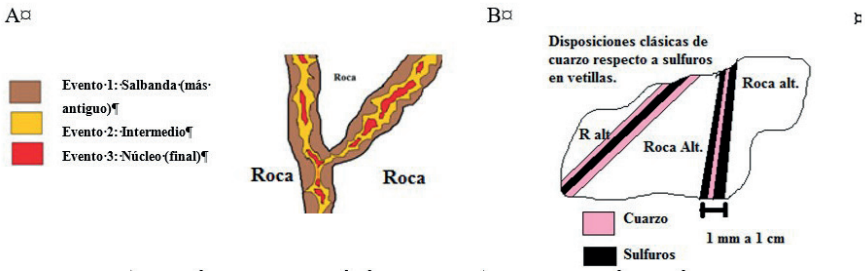


Figura 7.21: A) Mineralogía y secuencia de depositación, B) Disposiciones clásicas de cuarzo respecto a sulfuros en vetillas

Es importante distinguir y recordar:

- La mineralización más joven es la central de la vetilla.
- No confundir lo "hipogénico" o (primario) de los efectos de meteorización ("supergénico" o secundario).
- Las guías mineralizadas pueden ser "silicocéntricas" (salbandas de sulfuros con un núcleo de cuarzo) o al revés (salbandas de cuarzo y núcleo de sulfuros).

7.9 Criterios básicos tradicionalmente aceptados

a) La calcosina en oxidación no tiene suficiente azufre para transformar en SO_4Cu la totalidad del Cu contenido. Al menos la mitad permanecerá como calcosina en el afloramiento.

El resto del Cu^{++} solo puede formar óxidos como delafossita o tenorita. Algunos autores consideran a estos dos últimos como "indicadores de calcopirita" en profundidad.

b) Con proporción pirita/calcopirita > 1:1, en rocas poco reactivas, (zona núcleo) habrá suficiente H_2SO_4 para lixiviación total del Cu: Optima posibilidad de enriquecimiento supergénico en profundidad.

c) En zona marginal (reductora) rica en carbonatos y pobre en pirita, sucederá lo contrario. La calcosina permanecerá en superficie impregnando con malaquita los piritoedros dispersos semirellenos de goethita. En épocas o zonas húmedas se formarán

eflorescencias efímeras de calcantita. (Ejemplo: Figura 7.22). La presencia de calcosina será superficial (primeros metros).

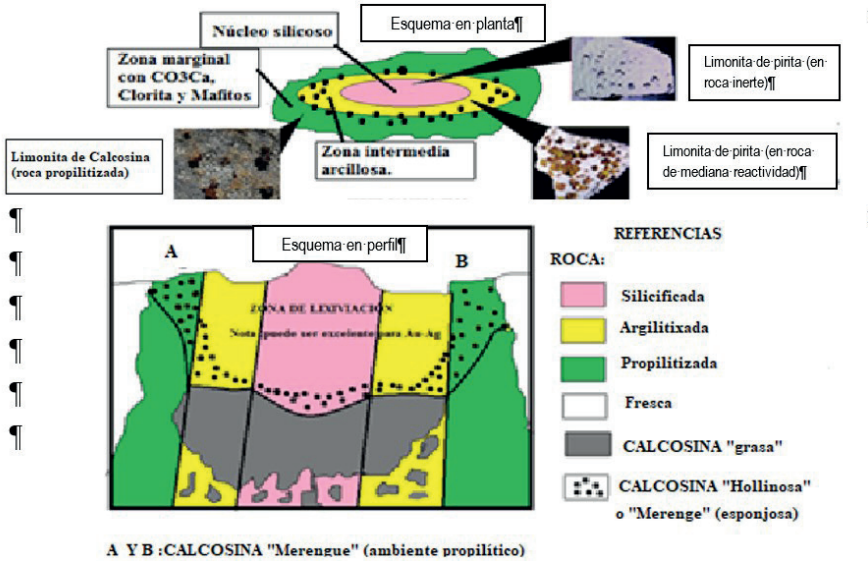


Figura 7.22: Interacción entre mena sulfurosa en proceso de lixiviación con composición de rocas de campo (ambiente geológico)

d) En la zona intermedia se darán casos de transición.

En general, los piritoedros a medio rellenar, con goethita-jarosita, + calcosina o delafossita ===➔Buena posibilidad de enriquecimiento supergénico.

e) Con relación pirita/calcosina > 2/1, habrá lixiviación total, excepto en zona de borde (rica en carbonatos).

f) En general las rocas reactivas o ambiente reductor frenan la lixiviación – enriquecimiento. Las rocas inertes la facilitan.

g) Estos procesos son más efectivos y rápidos en venillas, aunque difíciles de interpretar. La calcosina se presenta en 3 formas: “Grasa”, “Merengue” y “Hollinosa”.

La primera es la clásica compacta y pesada, reemplazando calcopirita (algunos autores la consideran primaria). La segunda forma concreciones esponjosas sueltas en el terreno. La tercera es pulverulenta, tizna el papel y se desprende con facilidad de la roca (se puede confundir con óxidos de Mn).

h) El efecto oxidante del H_2SO_4 sobre el Cu^{+2} es muy conocido, pero no tanto el efecto "Reductor" de la calcita (Ej: calizas, areniscas calcáreas, andesitas propilitizadas). En estos casos puede formarse calcosina, tenorita o delafossita (Cu^{+1} y hasta Cu nativo, aunque es bastante raro).

Regla memotécnica: Las plagioclasas de las andesitas y dacitas, al propilitizarse se desdoblan en calcita + caolinita y producen el mismo efecto reductor aunque más moderado. Curiosamente, las plagioclasas mas cálcicas (labradorita-bitownita- anortita) no producen este efecto.

La precipitación de calcosina en la transición de alteración argílica =➔ alteración propilítica es muy buen indicio para enriquecimiento supergénico en profundidad en toda la zona (y mejor aún si lo logra en plena zona inerte del núcleo silicoso). Figura 7.23.

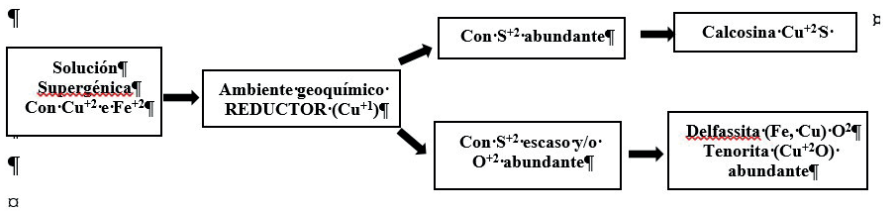


Figura 7.23: Evolución mineralógica del Cu en sombreros de Fe

Propiedades moderadas similares muestran algunos anfíboles, como la hornblenda. Esta última contiene aproximadamente 25% FeO, que tiende a oxidarse pasando de Fe^{+2} =➔Fe^{+3}.

Sin embargo para que algo pueda oxidarse, algo tendrá que reducirse, o viceversa. Si el Fe^{+2}=➔ Fe^{+3}, el Cu^{+2} acompañante tiende =➔ Cu^{+1} (y a veces a Cu nativo). La calcosina y/o covellina del nivel de enriquecimiento son alcanzados por el avance de la meteorización pueden formar secuencias de "nuevos oxidados" (re-oxidación), a veces con una zonación superficie =➔ profundidad, del tipo siguiente: crisocola (+ algo de turquesa) =➔ delafosita (+ tenorita) =➔calcosina hollinosa =➔ calcosina grasa. Figura 7.24.

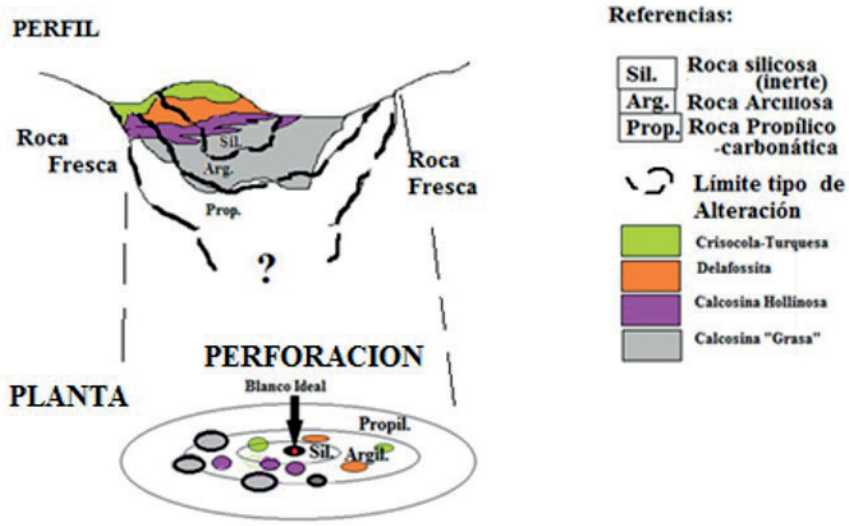


Figura 7.24: Zonación vertical de depósitos supergénicos cupríferos.

7.10 Ambiente Geoquímico vs Proporción Pirita / Calcopirita. Interacción y Graficación

La interpretación de una mineralización lixiviada busca identificar los componentes originales a partir de sus residuos meteorizados actuales. (es decir ¿Cómo es actualmente? ¿Cómo era antes?).
La lixiviación importante se debe al ciclo de meteorización antigua y no a la que está actuando en el presente. Puede haber más de un ciclo.
Ninguna mina produce mineral puro: La mitad de lo extraido es roca + ganga. El resto es pirita con una fracción menor de sulfuros útiles.
Las rocas aflorantes del sistema mineralizado tendrán 3 tipos de respuesta a los procesos meteóricos: inerte (o resistivo) –mediano— (normal-moderada) reactivo (rápida-intensa).
En el afloramiento lixiviado habrá 3 tipos de mineralogías principales: limonita indígena , sulfuros amarillos y sulfuros negros. Figura 7.25.

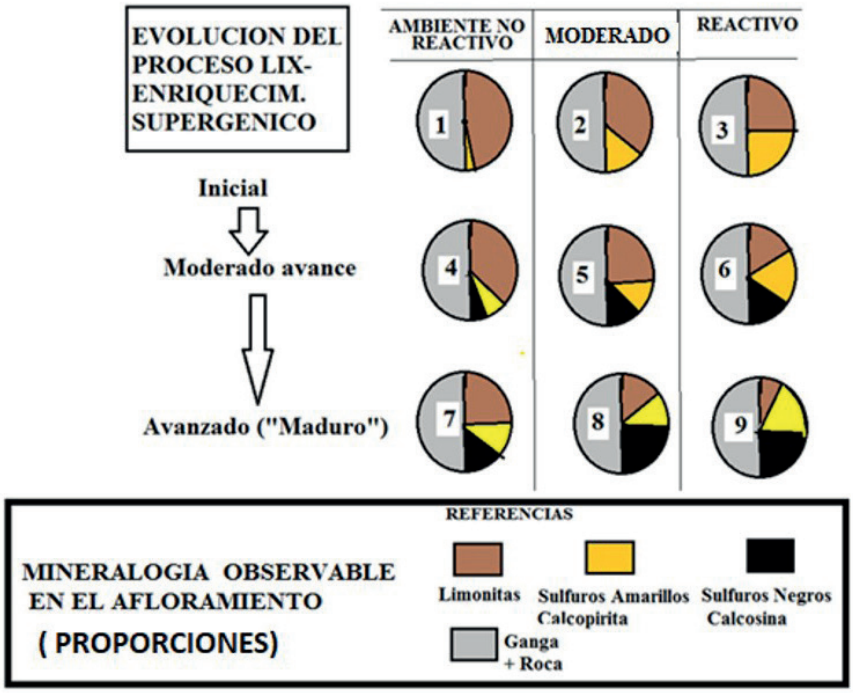


Figura 7.25: Evolución del proceso de lixiviación – enriquecimiento supergénico. La interacción entre sulfuros en oxidación, en especial pirita, generando H2SO4 y la roca encajante (algo también la ganga) consumiéndolo, produce efectos de lixiviación superficial, precipitación en limonitas (que comienzan de inmediato el proceso de viraje al rojo) y enriquecimiento supergénico en calcosina y delafossita. La proporción en que aparece cada uno de estos componentes orienta sobre el grado de avance o maduración del afloramiento mineralizado (o la muestra de mano) aproximadamente como se indica en el gráfico.

Se pueden presentar nueve combinaciones posibles a graficar (3 ambientes x 3 mineralogías)

Caso 1) **En roca inerte/Lixiviación incipiente:** si abunda la pirita en medio no reactivo, el sombrero de Fe evoluciona rápido y la pirita desaparece con celeridad (o se conservará algo, pero ocluida, preservada en cuarzo), predominarán limonitas (hematita-goetita-jarosita) en prorporciones más o menos similares. Si hay restos de calcosina es un indicio alentador para el enriquecimiento supergénico en profundidad.

Caso 2) **En roca de moderada reactividad c/Lixiviación incipiente**: Habrá abundante limonita (goetita**>**jarosita) y bastantes sulfuros. Si hay restos de calcosina, es probable un buen enriquecimiento supergénico en profundidad.
Caso 3) **En roca de alta reactividad/Lixiviación incipiente:** limonitas (tendencia goetita) y sulfuros en proporciones similares en el afloramiento. Si hay muchos oxidados de Cu y restos de calcosina, el enriquecimiento supergénico es moderado - superficial. Puede haber buena ley, pero seguramente no profundiza mucho.
Caso 4) **En roca inerte /Lixiviación avanzada.** Habra limonita dominante (hematita > goetita) pero tambien algunos sulfuros. Si hay restos de calcosina, existe una razonable probabilidad de enriquecimiento supergénico en profundidad.
Caso 5) **En roca de moderada reactividad c/Lixiviación avanzada**: limonita abundante (goetita + jarosita) pero también abundantes sulfuros. Se deben buscar restos de calcosina. En caso positivo, hay una excelente probabilidad de enriquecimiento supergénico en profundidad.
Caso 6) **En roca de alta reactividad c/Lixiviación avanzada:** Sulfuros abundantes en superficie. Se debe buscar calcosina o delafossita. Es posible que haya una probable buena ley en afloramiento, pero no en profundidad.
Caso 7) **En roca no reactiva c/Lixiviación "madura":** Limonitas y sulfuros en proporciones similares o leve dominio de sulfuros. Se debe confirmar la abundancia de calcosina. Puede haber enriquecimiento supergénico bueno, alta ley, pero probablemente muy erosionado. Será subsuperficial y no profundizará demasiado.
Caso 8). **En roca medianamente reactiva c/Lixiviación "madura":** calcopirita, calcosina ("Merengue") y pirita, equilibradas. Poca limonita (goetita y jarosita). Puede tener muy buen enriquecimiento supergénico en profundidad, pero incierta profundización.
Caso 9). **En roca no reactiva c/Lixiviación "madura":** Escasas limonitas, pero abundantes sulfuros amarillos (calcopirita) y abundante calcosina (los 2 tipos: "Grasa" y "Merengue"; Hollinosa es difícil): Puede estar muy erosionada pero aun asi puede haber buen enriquecimiento supergénico en profundidad.

Es posible concluir que son muchos los caracteres a observar. La Figura 7.26 esquematiza una síntesis idealizada de áreas de alteración hidrotermal.

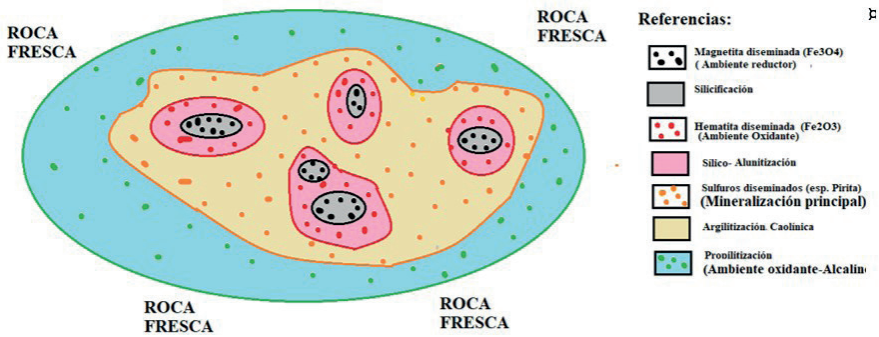


Figura 7.26: Esquema básico de áreas de alteración hidrotermal. El área de blanqueo casi siempre tiene un núcleo reductor, que grada hacia un halo oxidante externo. En las fajas intermedias hay términos de transición y algunos de ellos contienen la mineralización principal, si es que existe.

7.11 Recomendaciones

Cuando se detecta una nueva área de alteración hidrotermal y potencial mineralización, es importante:

a) Tratar de recorrer y mensurar la extensión del área en conjunto.
b) Ubicar la probable zona central rica en sílice (Núcleo del sistema: pueden ser varios).
c) Definir la zona argílica principal circundante al núcleo anterior (Ver: los óxidos de hierro primario: ¿oligisto o magnetita?).
d) Definir la zona externa carbonático-propilítica (puede ser muy irregular o solo “Parches”).
e) Revisar muy especialmente la transición entre 2 y 3, para ver si existen indicios de calcosina (cualquier tipo) o al menos impregnaciones de “verdes de Cu” (crisocola es mejor que malaquita-azurita). Puede haber algo de calcantita.
f) Si se dan estas condiciones, se puede confiar que se trata de un

sistema hidrotermal fértil (¿contenía Cu? ¿Indicadores? Sugeridos: Mo-As-Co) que, además puede estar lixiviado-enriquecido.

g) El resto ya es Geoquímica (con o sin microscopía calcográfica), esencial para interpretar la presencia y distribución de los "Elementos Indicadores" al meteorizarse.

h) Todas las herramientas, como uso de sensores remotos o geofísica, son lícitas. El resto ¡es suerte! y perforaciones.

BIBLIOGRAFIA

Angelelli V. (1950): Recursos minerales de la República Argentina. Tomo I. Yac. Metalíferos. M.A.C. Nat. Bs. As.

Alderete M. (1978): Prospección y exploración minera. Informes Generales (NOA 1) - Tucumán. (Inédito).

Ahlfeld F. (1958): Zinn und Wolfram. Die Meallishe Rohstoffe. Stutgart. R.F.A.

Ahlfeld F. y Schneider- Scherbina (1964): Los yacimientos minerales y de Hidrocarburos de Bolivia. La Paz.

Beuss A. y B. Vinogradov (1976): Primary geochemical halos of mineral deposits. Geochemical exploration methods for mineral exploration. Cap. V. Praga.

Blanchard R. (1968): Interpretation of leached outcrops. Nevada Bureau of Mines. Bull. 66. M.S.M. (USA).

Bigham J., Schwertmann U., Traina S., Winland R. and Wolf M. (1996): Schwertmannite and the chemical modeling of iron in acid sulfate waters Geochim. Cosmochim. Acta 60, 2111-212.

Bouladon J., Picot y Laforet C. (1976): Les Gisement sulfurés stratiformes liés au Volcanisme. Mem.Soc. Geol. France N° 77. Pag.149-154. París.

C.F.I. (1982): Evaluación del recurso minero de la Provincia de Salta. (Salta. Inédito).

Dirección de Recursos Geológico-Mineros. IGRM-Segemar (1999): Recursos minerales de la República Argentina". Volumen I y II. Bs. As.

Dutrizac J.E. and Jambor J.L., (2000): Jarosites and their application in hydrometallurgy. In Sulfate Minerals-Crystallography, Geochemistry, and Environmental Significance (eds. C. N. Alpers, J. L Jambor, and D. K. Nordstrom). Rev. Min. Geochem. Mineralogical Society of America, vol. 40, pp. 406–452Gamba M. (1983): Geoquímica del Uranio. CONEA. Bs. As. (Edic. Esp).

Ginzburg I. (1960): Principles of Geochemical Prospecting (traducido del ruso al inglés por V. Sokolof). Praga.

Krausse H (1963): Die Kupfervertailung auf des Eisenerzlagarstaetten Shams Abad (Iran) und ihre genetische Deutung. N. Jb. Miner.

Abh- 100- 2- 185-202. Stutgart,

Laznicka P. (1999): Quantitative Relationships among Giant Deposits of Metals. Ec. Geology Vol 94. N° 4. Pág. 455 y subs.

Lepeltier C. (1969): A simplified statistical treatment of geochemical data by graphical representation. Ec. Geol. Vol. 64. 538-550.

Lepeltier-Nichol (1971): Inf. Gral. (Plan NOA 1) Inédito.

Maksaev, V., (2001). Alteración Hidrotermal. Apunte Curso Metalogénesis. Documento de Trabajo. Departamento de Geología. Universidad de Chile.

Martos D. y Peralta E. (1972): Descripción del mapa geoquímico de Catamarca. Servicio Minero Nacional. NOA 1 Geológico Minero. Inédito.

Martos D. y E. Peralta (1983): Mapa geoquímico de Catamarca. II Cong. Arg. Geol. Ec. Tomo II. (San Juan).

Martos D. (1983): Modelos Geoquímicos en prospección panorámica (Nota breve) II Congr. Arg. Geol. Ec. Tomo II. (San Juan).

Peltola E. (1978): Origin of Precambian Copper Sulfides of the Outukumpu district. Finland. Ec. Geol. Vol. 78. Pág. 465.

Peralta E. (1979): Distritos subvolcánicos. Algunos caracteres detectados en el NW Argentino. A.M.P.S. N° 1-2. Bs As.

Peralta E. (1980): Correlaciones geoquímicas" R.A.G.A. XXXV (4). 505-518. Bs. As.

Peralta E. (1982): Sombreros manganíferos de oxidación. A.M.P.S.I 3/3-4. Bs. As.

Peralta E. (1985): Geoquímica de Prospección. Universidad Nacional de Catamarca. Fac. de Tecnología y Ciencias Aplicadas. Catamarca (Apunte didáctico).

PNUD (1976): Regional stream Sediment survey of Western Argentina. Pág. 8 a 11. Informe Inédito.

Reynoso M. (1975): Anomalías geoquímicas y litología. Edad y estructura del ambiente que las contiene en el N.W. Argentino. II Congreso Ib. Am. Geol. Ec. III- 35. Bs. As.

Rankama K. y Sahama G. (1962): Geoquímica. (Traducción Bolívar Izquierdo). Ed. Aguilar. Bs. As.

Reynoso M. (1976): Métodos expeditivos para la ejecución de cartas geoquímico-estadísticas.

Robinson G. (1960): Los Suelos. Trad: J. L. Amorós. OMEGA SA Barcelona.

Servicio Nacional Minero Geológico (1972): Exploración Geológico Minera del Noroeste Argentino. NOA 1 (Area Tucumán-Catamarca-Santiago del Estero. S.S.M. Bs. As.

Servicio Nacional Minero Geológico (1973): Exploración Geológico Minera de la Provincia de La Rioja (Plan La Rioja). S.S.M. Bs. As.

Smirnows (1954): Die oxidationszone sulfidisher lagarstaetten. Akademic Verlag Berlin.

Townley, B., (2006): Metalogénesis: Hidrotermalismo y Modelos de Yacimientos, Apuntes y Referencias, Documento de trabajo. Geología Económica, Departamento de Geología, Universidad de Chile.

BIBLIOGRAFIA DE EXTENSION (INEDITA)

GRUPO GENERACION DE PROYECTOS. SECRETARIA DE ESTADO DE MINERIA (SEM). Catamarca. Dirección Provincial de Minería (2013): “Mapa Geoquímico de la Provincia de Catamarca. Informe Final”. Programa Investigación y generación de nuevos proyectos mineros.

GRUPO GENERACION DE PROYECTOS. SECRETARIA DE ESTADO DE MINERIA (SEM). Catamarca. Dirección Provincial de Minería (2015): “Depósitos de Puzolanas de la Provincia de Catamarca”. Programa Investigación y generación de nuevos proyectos mineros. Proyecto G1.

GRUPO GENERACION DE PROYECTOS. SECRETARIA DE ESTADO DE MINERIA (SEM). Catamarca. Dirección Provincial de Minería (2014): “Manifestaciones de Calizas de la Provincia de Catamarca”. Programa Investigación y generación de nuevos proyectos mineros. Proyecto G2.

GRUPO GENERACION DE PROYECTOS. SECRETARIA DE ESTADO DE MINERIA (SEM). Catamarca. Dirección Provincial de Minería (2014): “Carbonatos sódicos de la Provincia de Catamarca”. Programa Investigación y generación de nuevos proyectos mineros. Proyecto G3.

GRUPO GENERACION DE PROYECTOS. SECRETARIA DE ESTADO DE MINERIA (SEM). Catamarca. Dirección Provincial de Minería (2014): “Depósitos de Litio y Potasio de la de la Provincia de Catamarca”. Programa Investigación y generación de nuevos proyectos mineros. Proyecto G4.

GRUPO GENERACION DE PROYECTOS. SECRETARIA DE ESTADO DE MINERIA (SEM). Catamarca. Dirección Provincial de Minería (2015): “Depósitos de Oro y Plata de la Provincia de Catamarca”. Programa Investigación y generación de nuevos proyectos mineros. Proyecto G6.

GRUPO GENERACION DE PROYECTOS. SECRETARIA DE ESTADO DE MINERIA (SEM). Catamarca. Dirección Provincial de Minería (2014): “Depósitos de Metales Base de la Provincia de Catamarca”. Programa. Investigación y generación de nuevos proyectos mineros. Proyecto G7.

GRUPO GENERACION DE PROYECTOS. SECRETARIA DE ESTADO DE MINERIA (SEM). Catamarca. Dirección Provincial de Minería (2014): “Tantalio-Columbio-Tierras Raras de la Provincia de Catamarca”. Programa Investigación y generación de nuevos proyectos mineros. Proyecto G 8.

Se terminó de imprimir en los talleres gráficos de la
Editorial Científica Universitaria
con un tiraje de 100 ejemplares
Noviembre de 2023