



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

División de Ingeniería en Ciencias de la Tierra

**“Respuesta de los Registros Geofísicos de Pozo en Yacimientos
Minerales en Función de su Ocurrencia en el Medio”**

TESIS PROFESIONAL

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

INGENIERO GEOFÍSICO

PRESENTA:

ROMERO DOMÍNGUEZ GERARDO JONATAN

DIRECTOR DE TESIS

ING. HÉCTOR RICARDO CASTREJÓN PINEDA



Ciudad Universitaria, México, Octubre de 2013.



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Agradecimientos

Quien soy ahora se lo puedo agradecer a dos personas en especial, mis padres. Gracias a ellos he podido llegar tan lejos, pues los valores que me inculcaron como el respeto y el amor a todo lo que hago son y siempre serán el resultado de sus enseñanzas. Con ellos aprendí a valorar cada una de las cosas que hago y que tengo. Me enseñaron a luchar y seguir adelante con ese cariño que los caracteriza. Quisiera decirles tanto en tan pocas palabras pero me sería casi imposible, solo encuentro unas palabras que le pertenece a ellos y que espero sean suficientes, Gracias los amo.

Sin embargo este camino que he recorrido no ha sido fácil y existen personas igual de importantes que mis padres que me han ayudado a sobrellevar mis problemas, mis hermanos Mauricio y Julio. Con ellos he vivido la mayoría de mis fracasos y éxitos. No son los hermanos más expresivos del mundo pero en el fondo se quienes son y lo mucho que valen. Tuvimos peleas, no muchas, y siempre de alguna forma se solucionaron. Pero me gustaría decir que fueron mas los momentos buenos que vivimos que las experiencias malas y que siempre a pesar de todo fueron y son los mejores hermanos con los que pude haber crecido.

Pero también existen otro tipo de hermanos, mis amigos, los que no conoces de toda la vida, pero sabes que serán para siempre. Con ellos aprendí muchas cosas y pienso que si no los hubiese conocido mi vida sería muy diferente, pues creo que después de vivir todas esas experiencias en 10 años mi visión de la vida cambio. Y no es para menos pues con ellos aprendí a salir de fiestas, aprendí a ser un amigo de verdad, aprendí que puedes contar con alguien más que tus padres y hermanos para salir adelante.

Como agradecimiento especial quisiera mencionar a la persona que me inspiro en hacer este trabajo, mi profesor Héctor Ricardo Castrejón Pineda. Que con sus enseñanzas despertó en mi un interés en los registros geofísicos de pozo. Y que gracias a él pude culminar este trabajo, pues siempre estuvo pendiente de mis avances y a pesar de ser una persona muy ocupada siempre tuvo ese tiempo para guiarme en esos momentos en los que no sabes cómo expresar una idea.

Y sin duda a la persona que más amo, mi esposa. Ella es mi inspiración en todo lo que hago y todo lo que hago es por ella. Pues mis metas y planes de vida tuvieron sentido el día que la conocí.

Por ultimo quisiera dar las gracias a mi alma mater, pues desde el bachillerato pude ingresar a esta gran institución llena de los mejores profesores y excelentes instalaciones. Que con sus ideales formaron en mí un gran profesional digno de competir contra cualquier institución de nivel mundial. Por mi raza hablara el espíritu.

Índice

RESUMEN	1
ABSTRACT	2
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....	3
CAPÍTULO 2. MODELOS MINERALES.....	5
2.1. PÓRFIDOS CUPRÍFEROS	5
2.2. YACIMIENTOS TIPO SKARN	7
2.3. YACIMIENTOS SULFURO MASIVO VULCANOGENICOS	9
2.4. YACIMIENTOS HIDROTERMALES	12
CAPÍTULO 3. PROPIEDADES DE LOS MINERALES PARA SU IDENTIFICACIÓN CON REGISTROS GEOFÍSICOS DE POZO	15
3.1. RESISTIVIDAD.....	15
3.2. DENSIDAD	17
3.3. RADIOACTIVIDAD	20
3.4. VELOCIDAD DE ONDAS MECÁNICAS.....	22
CAPÍTULO 4. REGISTROS ÓPTIMOS PARA LA IDENTIFICACIÓN DE YACIMIENTOS MINERALES.....	29
4.1. MINERALES METALICOS DISEMINADOS	30
4.2. MINERALES NO METALICOS DISEMINADOS.....	33
4.3. MINERALES METALICOS DE FORMA MASIVA.....	35
4.4. MINERALES NO METALICOS DE FORMA MASIVA.....	37
4.5. MINERALES METALICOS EN VETAS.....	41
CAPÍTULO 5. RESPUESTA DE LOS REGISTROS GEOFÍSICOS DE POZO EN YACIMIENTOS MINERALES.....	44
CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES	55
BIBLIOGRAFIA	58
ANEXOS	61

Resumen

El uso de los registros geofísicos de pozo se ha desarrollado principalmente en la industria petrolera, sin embargo, este tipo de técnicas de exploración pueden ser aplicadas a la minería, optimizando la exploración y aumentando las áreas de oportunidad, donde pueden existir otros yacimientos.

El objetivo de esta tesis es mostrar el alcance que tienen los registros geofísicos de pozo en el estudio de un yacimiento mineral. En el capítulo 1 se determina el Estado del Arte de los registros aplicados a exploración de yacimientos minerales.

En el capítulo 2 se describen los principales modelos de yacimientos minerales: yacimiento tipo skarn, un pórfido cuprífero, un yacimiento hidrotermal y un yacimiento sulfuro masivo vulcanogénico.

En el capítulo 3 se incluyen las principales propiedades físicas de los minerales, con el fin de determinar cuales son los registros más adecuados para utilizar, en cada tipo de yacimiento.

En el capítulo 4 se determinan los principales registros geofísicos de pozos que se pueden tomar, de acuerdo a la ocurrencia de la mineralización y al modelo de yacimiento mineral.

En el capítulo 5 se dan ejemplos de la respuesta de los registros geofísicos de pozos, de acuerdo a la ocurrencia de la mineralización y al modelo de yacimiento mineral. Al final se realizara una interpretación del registro geofísico de pozo para cada forma de ocurrencia del mineral. Adicionalmente se justificará el uso de los registros geofísicos de pozo en comparación con los núcleos de barrenación, así como las ventajas y desventajas que estos tienen al ser aplicados en un yacimiento mineral.

En el capítulo 6 se listan las conclusiones del presente trabajo. También se incluyen las referencias bibliográficas utilizadas y recomendadas. Al final se agregó un anexo con un glosario de términos empleados y una tabla de los minerales principalmente explotados a nivel mundial y sus aplicaciones.

Abstract.

The use of borehole geophysical logs has been developed mainly in the oil industry, however, this type of scanning techniques can be applied to mining exploration and rising optimizing the study area in the reservoir.

The aim of this thesis is to show the extent of the geophysical well logs in the study of a mineral deposit. Chapter 1 provides a state of the art of records applied to exploration of mineral deposits.

Chapter 2 describes the main models of mineral deposits: deposit skarn, porphyry copper, a reservoir hydrothermal and volcanogenic massive sulphide deposit.

Chapter 3 includes the main physical properties of minerals, in order to determine which records are most suitable for use in each type of deposit.

Chapter 4 identifies the main geophysical well logs that can be taken, according to the occurrence of mineralization and mineral reservoir model.

Chapter 5 gives examples of the response of geophysical well logs, according to the occurrence of mineralization and mineral reservoir model. In the end is shown a geophysical log interpretation as well for each occurrence of the mineral. Additionally justify the use of geophysical well logs compared with drilling cores as well as the advantages and disadvantages that they have to be applied in a mineral deposit.

Chapter 6 lists the conclusions of this work. Also included are references used and recommended. At the end is added an appendix with a glossary of terms used and a table of minerals mainly exploited worldwide and its applications.

Capítulo 1. Introducción.

Los registros geofísicos de pozo han sido utilizados desde sus inicios, hace casi un siglo en la exploración de yacimientos petroleros. La investigación se ha desarrollado de forma muy completa en esta área y los objetivos de exploración se han extendido a otras áreas, como es el caso de la industria minera.

En la industria minera es común usar núcleos de barrenación para el estudio de un yacimiento mineral, siendo esta la parte más costosa en la cadena de exploración. En la cadena productiva es más costosa la extracción. Por lo anterior aplicar un registro geofísico de pozo para la búsqueda de un yacimiento mineral podría entonces optimizar los costos y aumentar la efectividad de la investigación expandiendo los objetivos de exploración.

El modelo mineral es parte importante para poder seleccionar y aplicar un registro geofísico óptimo, ya sea que la mineralización se de en un yacimiento tipo skarn, un pórfido cuprífero, un yacimiento hidrotermal o en un yacimiento sulfuro masivo vulcanogénico; sin embargo, las propiedades del mineral y su forma de ocurrencia serán solo lo que defina el tipo de registro geofísico de pozo a aplicar.

Las formas de ocurrencia de la mineralización serán de seis tipos principalmente: en forma masiva (en capas ó no), en vetas, de forma diseminada, si se trata de un mineral metálico o si es el caso de un mineral no metálico. Para esto será necesario conocer primeramente las propiedades físicas y químicas de estos minerales, para posteriormente proponer un registro geofísico de pozo a cada una de estas formas de ocurrencia.

Los registros geofísicos de pozo son usados para hacer una caracterización más detallada del yacimiento. En minería los registros mas usados son los de densidad, rayos gamma naturales, susceptibilidad magnética y los conductivos. El conocimiento de la densidad de un mineral así como las propiedades elásticas siempre han sido necesarias en minería; estas propiedades físicas han servido mucho en los estudios mineros. Al igual que los registros conductivos y de susceptibilidad magnética, aplicados cuando se conoce si el yacimiento estudiado es metálico o no-metálico, respectivamente.

Los registros de rayos gamma naturales comúnmente se han usado para el estudio de minas de Uranio (Conaway y Killeen, 1978). Los registros de susceptibilidad magnética, por otra parte, han sido aplicados para identificar minas con altos contenidos de material magnético (Virkkunen y Hattula, 1992).

Debido a diversos accidentes en minas de carbón se empiezan a aplicar registros sónicos para conocer la estabilidad del yacimiento como medida de seguridad.

Se ha implementado el uso del registro de rayos gamma naturales en la identificación de zonas afalladas, necesaria en algunos ambientes sedimentarios, donde la correlación pozo a pozo puede contener algunos errores (Kerr, 1994). En ese mismo año se utiliza el registro de espectroscopia de rayos gamma para determinar el contenido de aluminio asociado a material kaolinitico, en una mina de Australia.

En cuanto a herramientas radioactivas, la empresa CSIRO desarrollo SIROLOG, la cual es utilizada para hacer registros de densidad y litodensidad. Esta herramienta ha sido utilizada en la industria minera para la detección de zonas mineralizadas. Sin embargo, algunas compañías consideran que el riesgo de utilizar herramientas radioactivas para la exploración es muy alto, pues la fuente con la que está formada esta herramienta produce una radiación de hasta 40 MBq (mega Becquerel); en algunas regiones las leyes prohíben trabajar con fuentes radioactivas mayores a 3.7 MBq (1 curie (Ci) = 3.7×10^{10} Bq). En la industria petrolera se utilizan fuentes de 1.5 Ci en herramientas de densidad.

Por estas razones CSIRO decide desarrollar en la década de los 90s una herramienta cuya fuente radioactiva fuese mucho menos intensa. Esta nueva herramienta cuenta con una fuente radioactiva menor a 2 MBq, nombrando a esta fuente de casi cero actividades radioactivas.

Dos diferentes configuraciones de esta herramienta se habían desarrollado para la exploración en minas de carbón. Una de estas empleada en el año de 1993 usaba una fuente de Cs^{137} cuya emisión radioactiva era de 1.8 MBq y en la cual el detector estaba a una distancia de 30 mm en posición axial. Un año después, en 1994, la segunda configuración fue desarrollada al igual que la configuración axial ésta usaba una fuente de Cs^{137} , pero la diferencia de ésta es que el detector estaba a mayor distancia.

En 2005 Scintrex comenzó a desarrollar un gravímetro de pozo que hace registros de gravedad dentro de un pozo, alcanzando profundidades de hasta 2000 m. Esta herramienta conocida como Graviglog tiene el objetivo de poder aplicarse en la industria minera, y con esto detectar algunos cuerpos masivos a grandes profundidades. Se tenían dos objetivos claros una vez desarrollada esta herramienta, uno era mapear las variaciones de densidad a una distancia considerable del pozo y con ello identificar objetivos a gran profundidad o a cierta distancia de la pared del pozo; el segundo objetivo era determinar el volumen de un yacimiento mineral que estuviese atravesando el pozo perforado.

Capítulo 2. Modelos de los Yacimientos Minerales.

Antes de estudiar las propiedades de un mineral y con ello saber que registro geofísico sería el óptimo para la identificación de este, será necesario un estudio previo de los modelos de los yacimientos minerales en donde ocurren. Debido a que los minerales y su forma de ocurrencia suelen ser difíciles de identificar directamente; sin embargo, se pueden estudiar las alteraciones asociadas a estos, así como la forma de ocurrencia que tienen.

Un ejemplo sería el caso del Oro en forma disseminada. Este metal gracias a que posee una gran densidad y es un buen conductor podríamos pensar en aplicar un registro de densidad y un registro resistivo. Sin embargo, dada su ocurrencia, usando los registros geofísicos de pozo para identificarlo podría ser un problema dadas las concentraciones en que se encuentra presente en los yacimientos de este elemento. Para estos casos se podrían estudiar las alteraciones asociadas a este metal y así poder identificar la mineralización.

En la actualidad se han modelado todos los tipos de yacimientos minerales conocidos en el mundo, pero es importante mencionar que estos estudios, continuamente se están mejorando al generarse nueva información, surgiendo nuevos subtipos e inclusive identificándose nuevos modelos. En este trabajo, se manejarán con fines de exploración los cuatro modelos de yacimientos minerales representativos en la minería en México, de los que se mencionarán únicamente sus características más distintivas: los skarns, los sulfuro masivos vulcanogénicos, los pórfidos cupríferos y los hidrotermales.

2.1. Pórfidos Cupríferos.

Los pórfidos cupríferos son un tipo de yacimiento mineral compuesto principalmente por Cobre y Molibdeno, que se caracterizan por estar relacionados en regiones con abundante magmatismo calco-alcalino asociado a márgenes de subducción. Como se observa en la figura 2.1 su abundancia no está restringida a una sola parte de la corteza terrestre, aunque sí se pueden observar que los lugares donde se da este tipo de yacimientos existe una relación con actividad tectónica.

El origen de los metales asociados a estos yacimientos no es del todo claro, pero existen algunas hipótesis que coinciden en que la mayor parte del cobre fue aportada por el manto astenosférico, atrapada por encima de la zona de subducción.

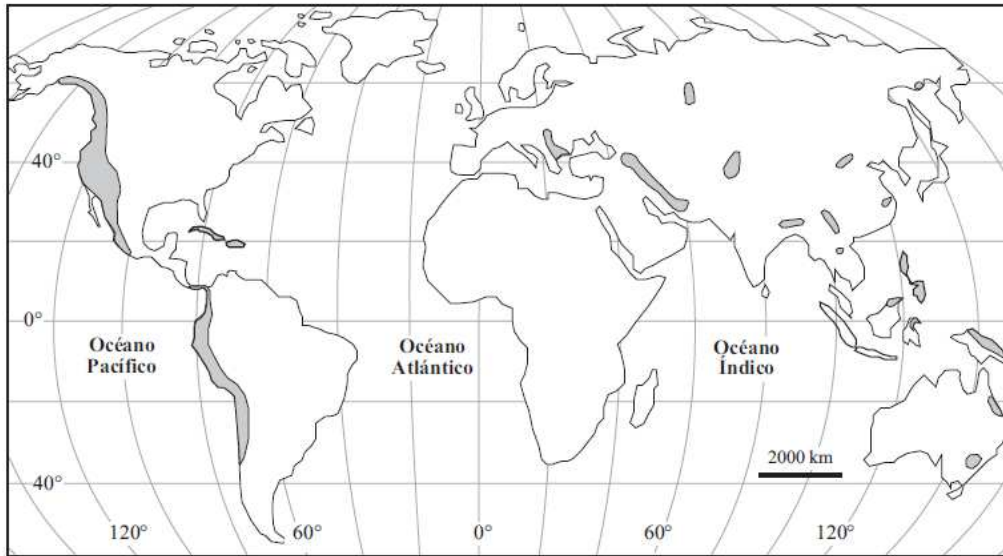


Fig. 2.1 Distribución de las principales zonas con mineralización de pórfidos cupríferos en el mundo (Valencia- Moreno et al, 2006).

Los pórfidos cupríferos tienen características mineralógicas y litológicas variadas, debido a que su origen depende tanto de un cuerpo intrusivo, cuyas características varían en tamaño, temperatura, profundidad de intrusión, química del magma, marco hidrológico, así como de las características del medio en que está intrusionando. Algunos autores han propuesto un diagrama en el que se generaliza las alteraciones y mineralización de este tipo de yacimientos (figura 2.2).

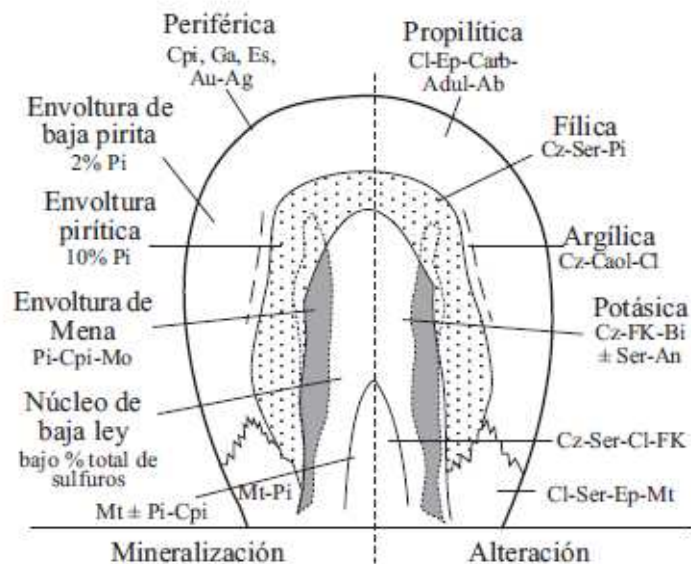


Fig. 2.2 Zonamiento vertical y lateral de la alteración y mineralización típico de los pórfidos de cobre (Valencia- Moreno et al, 2006).

La mineralización de este tipo de yacimientos tiene una textura diseminada y de vetilleo en forma de *stockwork*. Los metales de importancia económica que se dan en estos yacimientos incluyen: Oro, Plata, Wolframio, Estaño, teniendo en grandes cantidades Cobre y Molibdeno.

Una de las alteraciones que se presenta por la intrusión de este cuerpo porfídico es la alteración potásico-silicatada, rica en contenido de Potasio; esta alteración puede ser detectada y usada como guía para centrar la mineralización. Esta a su vez puede estar rodeada de otra alteración rica en arcilla, que puede estar acompañada en la parte más externa de esta por una alteración propilítica, rica en clorita, epidota y calcita. Las alteraciones anteriores son, por lo tanto, fuente de información que pueden usarse para predecir donde se encuentra la mineralización.

2.2. Yacimientos tipo Skarn.

Un yacimiento tipo *skarn* es aquel que se ha formado por un metaforismo ocasionado por un material magmático que intrusión una secuencia calcárea, produciendo en esta diferentes tipos de metamorfismo. Durante el metaforismo es cuando se forma la mineralización. El metaforismo puede ser regional, de contacto o por una variedad de procesos metasomáticos.

Este tipo de yacimientos están compuestos, básicamente, de minerales calcosilicatados, como el granate y los piroxenos (tabla 2.1). Debido a que su génesis depende de algunas condiciones como profundidad del cuerpo intrusivo, temperatura de formación, composición del material magmático y de la composición de la secuencia que esta intrusionando, tendremos por consiguiente una subclasificación de estos.

La subclasificación de *skarn* es importante pues no todos los *skarn* tienen el suficiente contenido de minerales con importancia económica para ser explotados, algunos de estos sólo tienen minerales de ganga. La clasificación de los *skarn* estará, por lo tanto, en función de su contenido mineral. Por consiguiente podemos tener *skarn* cuyo contenido sea predominantemente de Hierro (Fe), Plata (Au), Cobre (Cu), Zinc (Zn), Tungsteno (W), Molibdeno (Mo), Estaño (Sn), y otros que pudieran contener elementos de las tierras raras, así como Fluor (F), Boro (B) y Estaño (Sn).

Los *skarn* son unos de los principales yacimientos minerales que podemos encontrar en la mayoría de los continentes y en la casi todas las edades, pues dada su génesis y las condiciones de formación es posible encontrarlos en un gran número de países. En la tabla 2.2 podemos observar la distribución de los *skarn* a nivel mundial.

General group	End members	Abbreviation	Composition	Related names
Garnet	Grossularite	Gr	$\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$	Grandite
	Andradite	Ad	$\text{Ca}_3\text{Fe}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$	
	Spessartine	Sp	$\text{Mn}_3\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$	Subcalcic garnet
	Almandine	Al	$\text{Fe}_3\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$	
	Pyrope	Py	$\text{Mg}_3\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$	
Pyroxene	Diopside	Di	$\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$	Salite
	Hedenbergite	Hd	$\text{CaFeSi}_2\text{O}_6$	
	Johannsenite	Jo	$\text{CaMnSi}_2\text{O}_6$	
	Fassaite	Fas	$\text{Ca}(\text{Mg,Fe,Al})(\text{Si,Al})_2\text{O}_6$	
Olivine	Forsterite	Fo	Mg_2SiO_4	Monticellite Knebelite Glaucochroite
	Fayalite	Fa	Fe_2SiO_4	
	Tephroite	Tp	Mn_2SiO_4	
	Monticellite	Mc	Ca_2SiO_4	
Pyroxenoid	Ferrosilite	Fs	FeSiO_3	Pyroxmangite Bustamite
	Rhodonite	Rd	MnSiO_3	
	Wollastonite	Wo	CaSiO_3	
Amphibole	Tremolite	Tr	$\text{Ca}_2\text{Mg}_5\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$	Actinolite
	Ferroactinolite	Ft	$\text{Ca}_2\text{Fe}_5\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$	
	Manganese actinolite	Ma	$\text{Ca}_2\text{Mn}_5\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$	Hastingsite
	Hornblende	Hb	$\text{Ca}_2\text{Mg}_4\text{Al}_2\text{Si}_7\text{O}_{22}(\text{OH})_2$	
	Pargasite	Pg	$\text{NaCa}_2\text{Mg}_4\text{Al}_3\text{Si}_6\text{O}_{22}(\text{OH})_2$	
	Ferrohastingsite	Fh	$\text{NaCa}_2\text{Fe}_4\text{Al}_3\text{Si}_6\text{O}_{22}(\text{OH})_2$	
	Cummingtonite	Cm	$\text{Mg}_5\text{Fe}_2\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$	Subcalcic amphibole
	Dannemorite	Dm	$\text{Mn}_2\text{Fe}_5\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$	
Grunerite	Gru	$\text{Fe}_7\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$		
Epidote	Piemontite	Pm	$\text{Ca}_2\text{MnAl}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}(\text{OH})$	
	Allanite	All	$(\text{Ca,REE})_2\text{FeAl}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}(\text{OH})$	
	Epidote	Ep	$\text{Ca}_2\text{FeAl}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}(\text{OH})$	
	Pistacite	Ps	$\text{Ca}_2\text{Fe}_3\text{Si}_3\text{O}_{12}(\text{OH})$	
	Clinozoisite	Cz	$\text{Ca}_2\text{Al}_3\text{Si}_3\text{O}_{12}(\text{OH})$	
Plagioclase	Anorthite	An	$\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$	
Scapolite	Meionite	Me	$\text{Ca}_4\text{Al}_6\text{Si}_6\text{O}_{24}(\text{CO}_3, \text{OH}, \text{Cl}, \text{SO}_4)$	
Other	Vesuvianite (idocrase)	Vs	$\text{Ca}_{10}(\text{Mg,Fe,Mn})_3\text{Al}_4\text{Si}_9\text{O}_{34}(\text{OH, Cl, F})_4$	
	Prehnite	Pr	$\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	
	Axinite	Ax	$(\text{Ca, Mn, Fe})_3\text{Al}_2\text{BO}_3\text{Si}_4\text{O}_{12}(\text{OH})$	

Tabla 2.1 Mineralogía típica de los yacimientos tipo *skarn* (Lawrence et al, 2005).

La mineralización de este tipo de yacimientos se puede dar en una gran variedad de formas, con minerales particulares presentes. La ocurrencia en que se da la mineralización es variada y podemos encontrar minerales de forma masiva, estratiformes, en vetas, o en granos diseminados, como es el caso del oro. Este metal de gran importancia económica generalmente es depositado durante la alteración retrograda en zonas caracterizadas por calcosilicatos hidratados.

Region	Total	Fe	Au	Cu	Skarn types		Mo	Sn	Other	Appendix authors
					Zn	W				
Argentina	38	23	3	8	2		1	1		Franchini, M.B.
Australia	68	7	8	13	10	8	1	12	9	Seccombe et al. ¹
Brazil	10		2			5		1	2	Rios, J., Nobre Villas, R.N.
Canada, western	943	147	33	436	142	117	29	19	20	Ray, G.E.
Chile	12	1		9	2					Maksaev, V.
China	126	37	26	30	12	7	4	7	3	Chang, Z.
Europe, eastern	10	3		3	2				2	Nicolescu, S.
Fenno-Scandinavia	103	79		8	10	6				Sundblad, K., Bergman, T.
France	11	2								Cheilietz, A., Pelleter, E., Martin-Izard, A., Tomos, F.
Germany	7	1			2	2			1	Cheilietz, A., Pelleter, E., Martin-Izard, A., Tomos, F.
Great Britain	5	2		2					1	Cheilietz, A., Pelleter, E., Martin-Izard, A., Tomos, F.
India	13				1	6			6	Mishra, B.
Indonesia	7	0	2	4	1					James, L.P., Park, M.E., Burt, D.M.
Iran	16	6		10						Somarin, K., Liaghat, S., Hosseini, M., Zarasvandi, A.
Ireland	4						3	1		Cheilietz, A., Pelleter, E., Martin-Izard, A., Tomos, F.
Italy	10	2			6				2	Boni, M.
Japan	126	21		31	27	4	1	2	40	Ishiyama, D.
Kazakhstan	8	3		4			1			James, L.P., Park, M.E., Burt, D.M.
Korea, North	12	3	5	2	2					James, L.P., Park, M.E., Burt, D.M.
Korea, South	15	7			7	1				James, L.P., Park, M.E., Burt, D.M.
Kyrgyzstan	4	1	2					1		James, L.P., Park, M.E., Burt, D.M.
Malaysia	10	2	1					3	4	James, L.P., Park, M.E., Burt, D.M.
Mongolia	9	4			3		1	1		James, L.P., Park, M.E., Burt, D.M.
Myanmar	1					1				James, L.P., Park, M.E., Burt, D.M.
New Zealand	4			1	1	1			1	Seccombe et al. ¹
Papua New Guinea	10	2	3	5						Seccombe et al. ¹
Philippines	7	6	1							James, L.P., Park, M.E., Burt, D.M.
Portugal	52					10			42	Cheilietz, A., Pelleter, E., Martin-Izard, A., Tomos, F.
Spain	37	10	2	4	1	12	1	1	6	Cheilietz, A., Pelleter, E., Martin-Izard, A., Tomos, F.
Switzerland	2	1	1							Cheilietz, A., Pelleter, E., Martin-Izard, A., Tomos, F.
Tajikistan	4		1			1			2	James, L.P., Park, M.E., Burt, D.M.
Thailand	5		2	1				2		James, L.P., Park, M.E., Burt, D.M.
Turkey	50	27		1	12	8	2			Kuscu, I.
Uzbekistan	4			1		1			2	James, L.P., Park, M.E., Burt, D.M.
Vietnam	3	1	1			1				James, L.P., Park, M.E., Burt, D.M.
Total	1,746	398	93	573	243	203	42	52	142	31

Tabla 2.2 Distribución de skarns a nivel mundial, incluyendo la referencia de donde se tomaron los datos (Lawrence et al, 2005).

2.3. Yacimientos Sulfuro Masivos Vulcanogénicos

Los yacimientos sulfuro masivos vulcanogénicos (VMS, por sus siglas en inglés), también conocidos por algunos autores con el nombre de sulfuro masivos vulcanosedimentarios, son depósitos polimetálicos de grandes proporciones, en su mayoría, de metales como Zn, Cu, Plomo (Pb), Plata (Ag) y Au; en menores cantidades de Cobalto (Co), Sn, Selenio (Se), Manganeseo (Mn), Cadmio (Cd), Indio (In), Bismuto (Bi), Telurio (Te), Galio (Ga) y Germanio (Ge), entre otros que no son tan característicos.

Como en casi todas las clasificaciones de los yacimientos minerales, estos yacimientos también cuentan con una subclasificación que se puede distinguir de acuerdo a su contenido mineral. Estas subclasificación se van a distinguir por la mayor parte del

mineral o metal que estas contengan, como es el caso de los depósitos tipo Cu-Zn, en los que su contenido de Cobre es mayor en relación al contenido de Zn. Otros tipos de depósitos que podemos encontrar son cuyo contenido sea de Zn-Cu y otro de composición Zn-Pb-Cu, como se muestra en la figura 2.3.

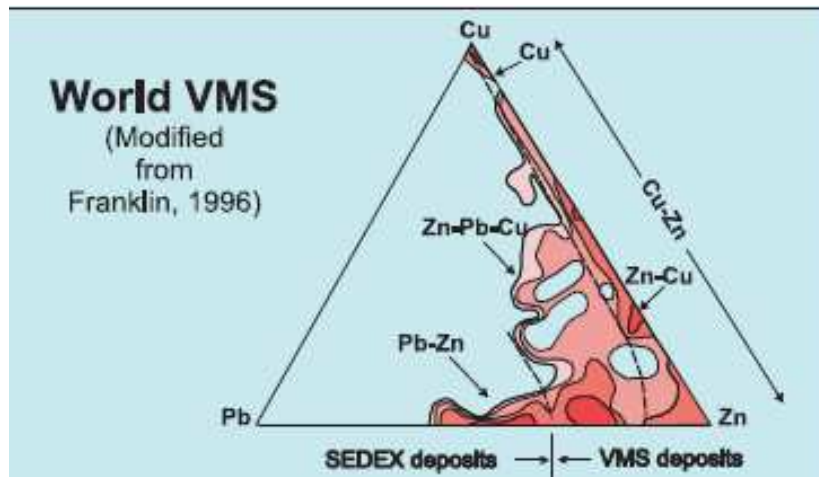


Figura 2.3 Distribución de yacimientos VMS basada en el contenido de metales presentes (Galley et al, 2005).

En cuanto a la aportación de metales que tienen los yacimientos VMS a nivel mundial está un 22 % de Zn, 6% de Cu, 9.7% de Pb, 8.7% de Ag y el 2.2% de Au. Hasta el 2005 el total de estos yacimientos asciende a mas de 800 y se estima que la producción de estos fue de más de 5 mil millones de toneladas, esta distribución se muestra en la figura 2.4.

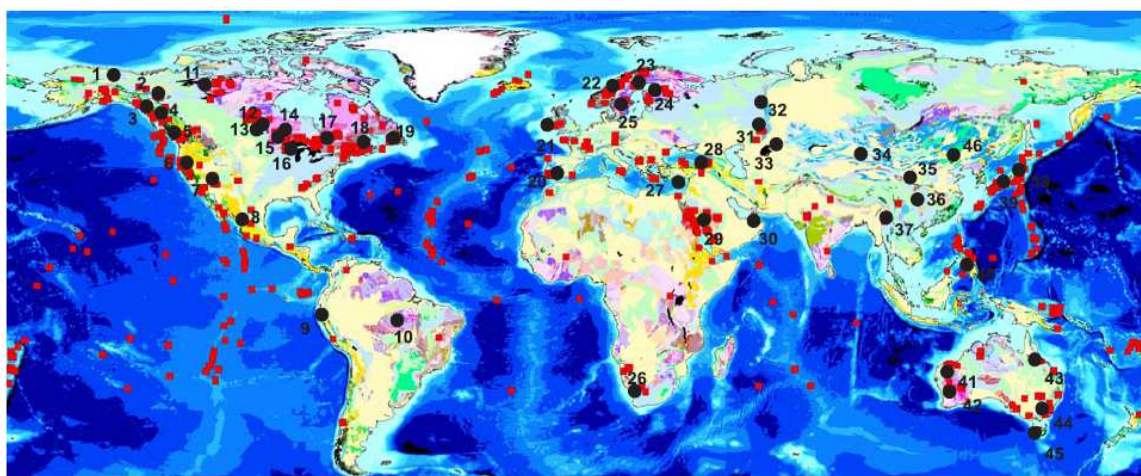


Figura 2.4 Distribución mundial de los principales distritos mineros donde se explotan yacimientos del tipo VMS (Galley et al, 2005).

La formación de yacimientos VMS está dada por 6 eventos principales, listados a continuación (figura 2.5):

1. Intrusión de un cuerpo magmático sobre la secuencia sedimentaria a altas temperaturas.
2. Lixiviación de los metales contenidos en las rocas por la reacción que tienen estas a la interacción del agua de mar presente con la secuencias vulcanosedimentarias.
3. Deposición, en fallas profundas, de material mineralizante contenido en el fluido hidrotermal.
4. Alteración por efecto del fluido hidrotermal en la zona superior e inferior que rodea a la zona de fallas.
5. Formación de sulfuros masivos en el piso oceánico cuyos metales fueron refinados en sucesivos eventos hidrotermales.
6. Producción distal, principalmente por procesos exhalativos, que representa una contribución hidrotermal a la sedimentación de fondo.

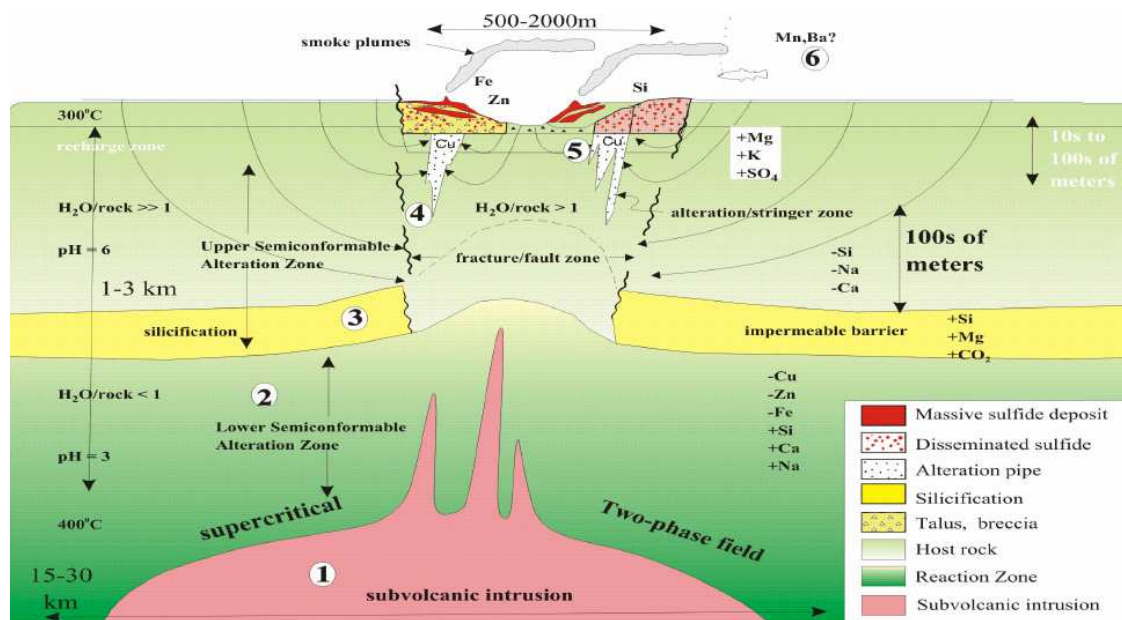


Figura 2.5 Esquema ilustrativo de la formación de un yacimiento VMS (Gibson et al, 2007)

La zona de mineralización de más interés en estos depósitos es la parte superior del depósito, donde se acumulan los metales de mayor importancia económica, así como los de mayor volumen. En la secuencia que se muestra en la figura 2.6 se puede

observar las etapas de depositación con las respectivas temperaturas a las que ocurren, esta formación puede ser vista como una secuencia paragénica.

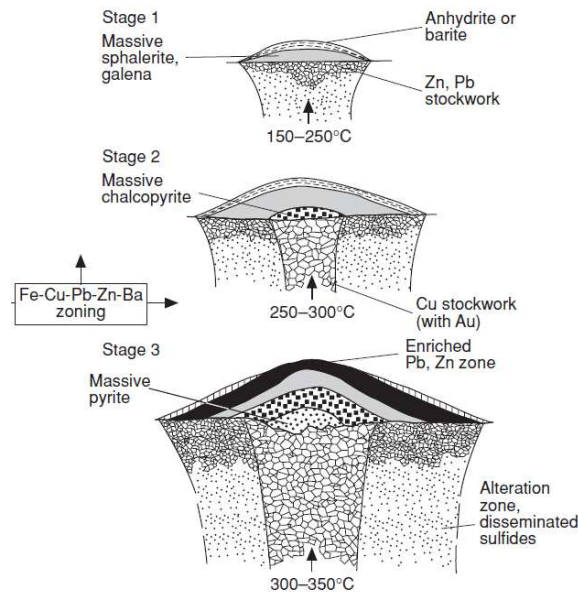


Figura 2.6 Modelo secular explicando la formación de fluidos en un yacimiento tipo VMS (Laurence, 2005).

2.4. Yacimientos Hidrotermales.

Los yacimientos hidrotermales son el producto que se tiene por la interacción de un cuerpo magmático con la corteza terrestre. Este proceso se lleva a ciertas condiciones de presión y temperatura; a mayor profundidad la presión es mayor así como la temperatura. Este cuerpo magmático en contacto con la corteza tendrá como consecuencia que se genere un fluido hidrotermal.

El fluido hidrotermal al estar en contacto con la roca producirá una disolución en esta y será este proceso parte de la mineralización del yacimiento. La conducción de fluido se dará tanto en fallas y fracturas, generadas antes y después de la intrusión magmática. La temperatura a la que ocurren estos procesos varía entre los 50 °C a los 500 °C.

Existe una subclasificación de estos yacimientos que depende de la temperatura a la que el fluido mineralizante se conduce. Estas subclases están divididas en 3 y fue propuesta por Lindgren. Esta subclasificación se divide en yacimientos de origen hipotermal, mesotermal y epitermal (tabla 2.3).

Vein	Metal	Ore mineralogy (in bold), and related alteration assemblages
Surface (epithermal)	Barren	Chalcedony, quartz, barite, fluorite, and carbonate minerals
	Mercury	Cinnabar : chalcedony, quartz, barite, fluorite, and carbonate minerals
	Antimony Gold-silver	Stibnite : quartz Gold, electrum, acanthite : quartz, chalcedony, adularia, alunite, carbonate minerals, silicification, some potassic, phyllic, and propylitic alteration
Intermediate (mesothermal)	Barren	Quartz and carbonate minerals
	Silver-manganese	Acanthite, rhodochrosite : quartz and carbonate minerals, some phyllic, argillic, propylitic alteration
	Lead	Galena : quartz with minor carbonate minerals
	Zinc	Sphalerite : quartz with occasional carbonate minerals, advanced argillic alteration
	Copper-arsenic-antimony	Chalcopyrite, tennantite-tetrahedrite : quartz, phyllic, propylitic, argillic alteration
Deep (hypothermal)	Copper	Chalcopyrite : quartz, phyllic alteration
	Molybdenum-tungsten-tin	Molybdenite, huebnerite, scheelite, cassiterite : quartz, potassic alteration
	Barren	Potassic alteration, anhydrite, carbonate minerals

Tabla 2.3 Observaciones empíricas que relacionan una secuencia paragenética, en la mayoría de los yacimientos hidrotermales, con la mineralogía característica así como las alteraciones asociadas (Laurence, 2005).

La distinción de clases en estos yacimientos tienen un cierto grado de importancia, además, del interés científico; también existe uno económico. Los minerales encontrados en estos yacimientos varían y algunos son característicos de cada tipo, las alteraciones también se distinguen entre la subclasificación y estas sirven como guías en la búsqueda mineral. La tabla 2.3 muestra los 3 tipos de yacimientos y señalando la mineralogía presente y sus alteraciones.

Dentro de esta subclasificación los yacimientos epitermales son los que más se explotan a nivel mundial (figura 2.7). La razón de esto es porque los yacimientos epitermales son los que se dan más próximos a la superficie, alcanzando profundidades de hasta 1 km. Dejando a los yacimientos hipotermas y mesotermas, en la mayoría de los casos a un lado en la exploración, pues estos son más difíciles de explotar por las condiciones de profundidad y temperatura a las que se dan, sin embargo, se han explotado algunos, que gracias a las condiciones orogénicas, están a una menor profundidad.

La figura 2.7 muestra la distribución de algunos yacimientos epitermales alcalinos y ácidos a nivel mundial. Se puede observar que la mayoría de estos están situados alrededor del margen Circum-Pacífico asociados al volcanismo del Paleógeno y Neógeno.

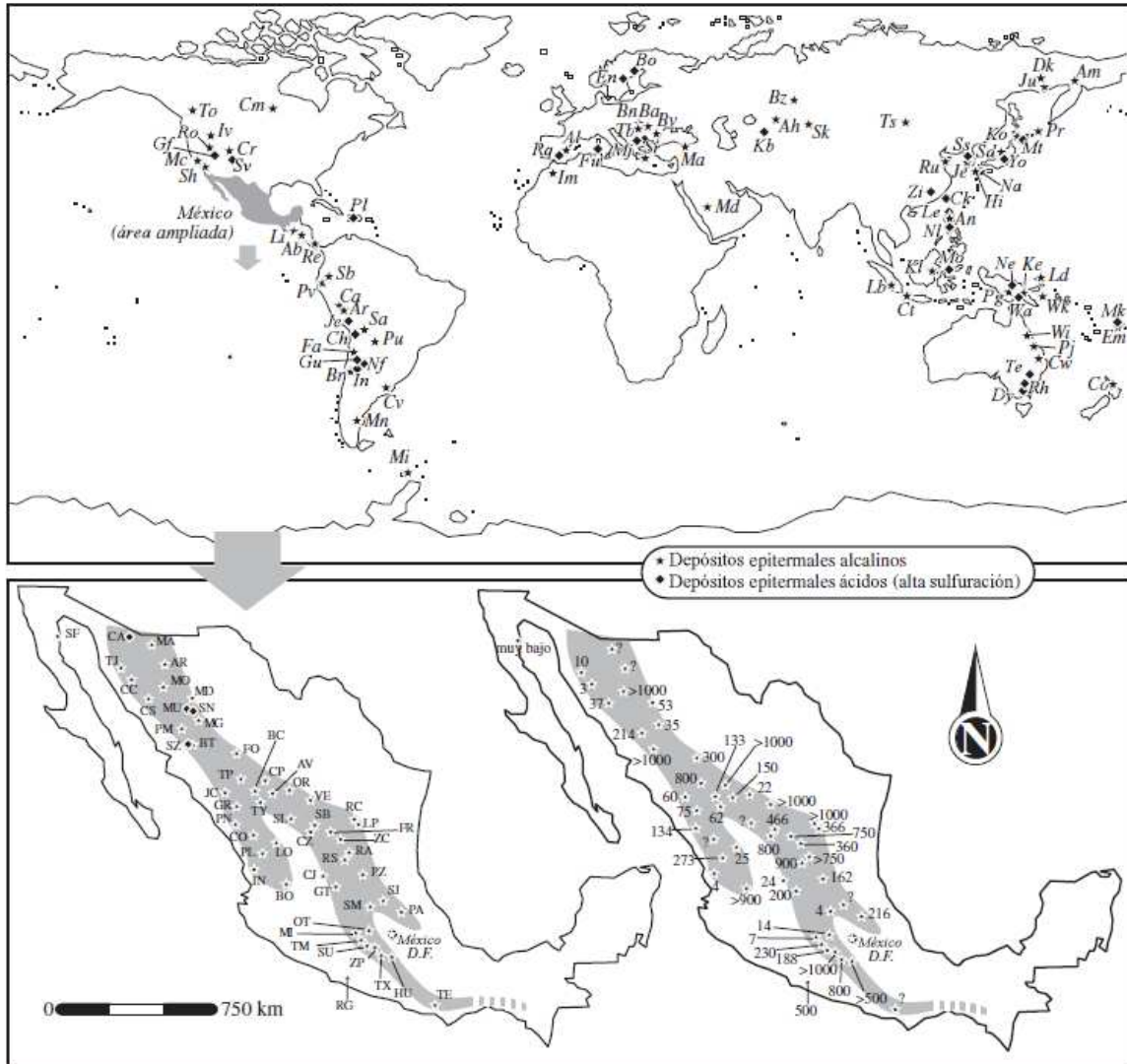


Figura 2.7 Distribución geográfica de algunos de los yacimientos epitermales a nivel mundial (superior), y en México (inferior). Se muestran los yacimientos de alta y baja sulfuración (Antonio et al, 2006).

Capítulo 3. Propiedades de los Minerales para su Identificación con Registros Geofísicos de Pozo.

Los registros geofísicos de pozo responden a las propiedades físicas, químicas y petrofísicas, propias de cada mineral. Por lo tanto será necesario definir cada una de estas para que con un análisis posterior, elegir el registro geofísico óptimo de cada ocurrencia mineral.

En la actualidad algunas compañías petroleras han desarrollado tablas de identificación de minerales, en las que incluyen la respuesta del registro geofísico de pozo. La mayoría de estas tablas tienen parámetros para minerales del grupo de los silicatos, carbonatos, óxidos, sulfuros, sulfatos, arcillas, fosfatos, micas y algunos otros más. Los parámetros que contienen estas tablas van desde la densidad, factor fotoeléctrico, porosidad y algunas pueden contener registros radioactivos.

Los parámetros medidos con los registros geofísicos de pozo van a responder a propiedades como: densidad, conductividad, susceptibilidad magnética, susceptibilidad eléctrica, radioactividad, elasticidad, algunas otras como la porosidad y permeabilidad, más comunes en rocas que minerales.

Por tanto, para entender un poco más cual sería el registro geofísico de pozo óptimo, se definirán las propiedades mencionadas anteriormente, con el fin de poder interpretar los resultados obtenidos por los registros y saber como afecta cada una de estas propiedades en la toma de los datos.

3.1. Resistividad.

Una de las propiedades que se va a reflejar en la toma de un registro geofísico de pozo es la resistividad del mineral. Esta propiedad la podemos definir como la resistencia que tiene el mineral al paso de una corriente eléctrica. Por otro lado la conductividad conocida como el inverso de la resistividad se define como la capacidad que tiene un cuerpo a permitir el paso de una corriente eléctrica.

Se sabe que todos los materiales son conductores, unos en menor grado que otros, de ahí que para materiales que poseen una mayor conductividad se les conozca como conductores y de menor conductividad como aislantes. Las unidades de la resistividad se dan en Ohm por metro [Ωm]. Las unidades de la conductividad se dan en siemens [S].

Esta propiedad es una de las más variables en los minerales. Pues al no ser homogéneo y contener impurezas, sus valores de resistividad suelen variar. Algunos estudios dan

rangos de resistividad para los minerales, aunque pueden tomarse valores teóricos con fines prácticos. Otra de las razones de que esta propiedad varía en un mismo mineral son las condiciones de temperatura, humedad e incluso la presión. Sin embargo esta propiedad resulta ser muy útil en la mayoría de los estudios minerales.

Matemáticamente la resistividad ρ proviene de la siguiente ecuación 2.1:

$$R = \rho \frac{l}{s} \quad \text{Ec. 2.1}$$

Donde ρ es la resistividad en $[\Omega \cdot m]$, l es la longitud, dada en $[m]$, por donde atraviesa la corriente eléctrica, s es la sección transversal del material, en $[m^2]$, y R es la resistencia, su unidad es el $[\Omega]$. Por lo que se observa esta propiedad depende tanto de la geometría del cuerpo como de la resistencia que tenga éste. Si despejamos de la ecuación 2.1 la resistividad, resulta (ec. 2.2):

$$\rho = \frac{R \cdot s}{l} \quad \text{Ec. 2.2}$$

En cuanto a minerales de la corteza terrestre que poseen poca resistividad o gran conductividad se encuentran los elementos nativos como el Oro, Cobre, Estaño, Plata y algunos pocos minerales. A estos se les reconoce por poseer conductividad metálica y pueden ser fácilmente identificados en los registros resistivos por presentar muy baja resistividad.

Existen también algunos minerales semiconductores que pueden ser identificados con el registro resistivo, por ejemplo, los telururos, arseniuros, sulfuros, debido a que el contenido de estos minerales es mayormente de elementos conductores, por otra parte los óxidos y los compuestos de antimonio suelen ser malos conductores, exceptuando la magnetita.

Otro grupo de minerales dieléctricos (no conductores) se presenta en la naturaleza y son de los más abundantes. Algunos elementos nativos como el Azufre se caracteriza por ser un mineral dieléctrico, otros más como la calcita, cinabrio, cuarzo y las micas como la moscovita y la biotita.

Si se quiere estudiar los minerales por esta propiedad resultaría, por si solo, complicado, pues existen poros, fracturas, espacios abiertos dentro de estos, y en ocasiones rellenos por algún líquido como el agua, o en otros casos por hidrocarburos. Por lo tanto para esta propiedad se dan rangos de valores a las resistividad, como se muestra en la figura 3.1.

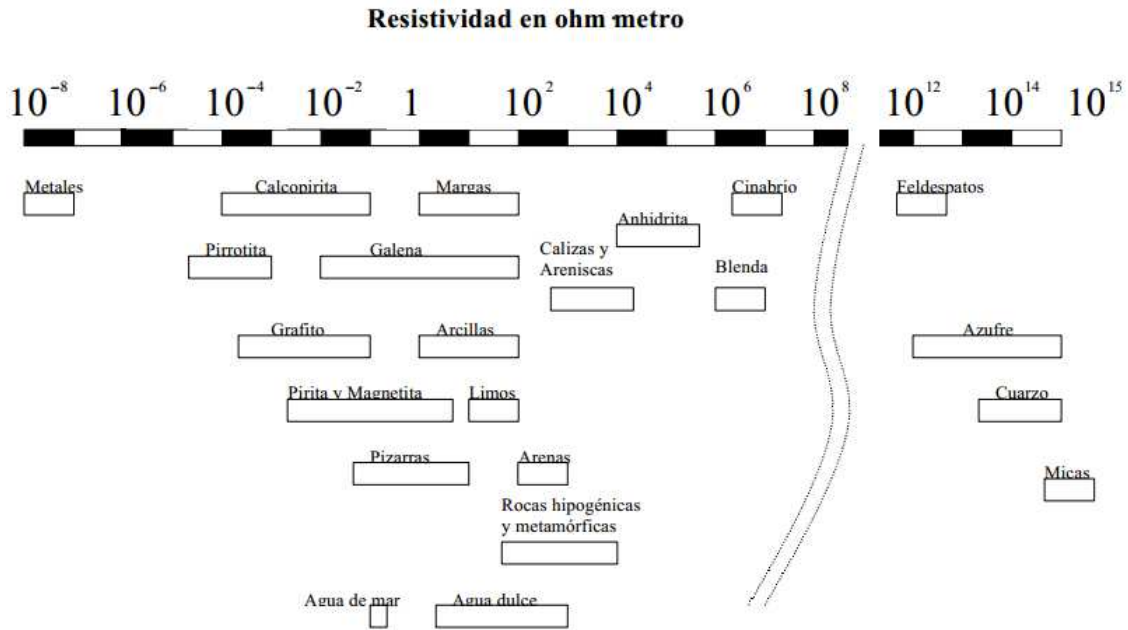


Figura3.1 Valores de resistividad para diferentes rocas y minerales (Manel, 1999).

Además del líquido que pudiese estar contenido en los minerales, otra de las condiciones que influye en los valores de la resistividad es la temperatura. Como se vió en el capítulo anterior, la mayoría de estos se encuentra a profundidades considerables, suficientes para que se reflejen cambios de temperatura, conocidos como gradiente geotérmico. Y como se ha observado al aumentar la temperatura disminuye la resistividad.

Sin embargo, esta propiedad aunque tienen algunas limitaciones para ser medida, es muy útil si se requiere buscar minerales metálicos como el Oro, Cobre, Estaño, Plata y algunos sulfuros asociados a la mineralización como es el caso de los yacimientos del tipo sulfuro masivos vulcanogénicos.

Esta propiedad es una de las más importantes pues muchos de los registros geofísicos de pozo como los registros resistivos, registros inductivos, el registro de potencial natural, algunas imágenes de pozo, responden a esta propiedad. Y como veremos en el capítulo de elección del registro óptimo, estos registros son usados en la mayoría de las formas de ocurrencia en que se encuentra la mineralización de un yacimiento.

3.2. Densidad.

Una de las propiedades físicas que más se requiere en estudios de identificación minerales es la densidad. Esta propiedad se puede definir como el cociente entre una diferencial de masa por una diferencial de volumen. En el caso ideal, si todo el cuerpo fuese homogéneo, la densidad quedaría expresada en términos de un cociente entre toda la masa del material por todo el volumen que este ocupa. Sin embargo, en la

naturaleza todos los minerales presentan un cierto grado de impurezas, ya sea por estar asociado a otro mineral o a una roca, o por estar lleno de fluido en los poros, fracturas y fallas, ocasionando un cambio en la densidad al estar rellenos de otro material.

En términos simples la densidad queda definida de forma matemática como el cociente mostrado en la ecuación 2.3, que se expresa de la siguiente manera:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad \text{Ec. 2.3}$$

Donde ρ es la densidad y sus unidades en $\left[\frac{g}{cm^3}\right]$ en el sistema internacional y $\left[\frac{lb}{ft^3}\right]$ en el sistema inglés, la masa m dada en $[g]$ y el volumen V en $[cm^3]$.

Sin embargo, para esta propiedad, al igual que para otras propiedades, se suele dar valores característicos a los minerales para su identificación y con fines prácticos. En la tabla 3.1 se observan los valores de densidad para muchos de los minerales explotados a nivel mundial.

Esta propiedad puede ser medida con registros geofísicos de pozo tanto directa como indirectamente. De forma directa existen herramientas como la recientemente desarrollada por Scintrex, conocida como Gravilog o gravímetro de pozo, que puede hacer mediciones en pozo y tener resolución mejor a 5 μGal , desarrollada principalmente para la búsqueda de cuerpos masivos a grandes profundidades. Sin embargo, la mayoría de las mediciones de densidad se hacen con otro tipo de registros. Esta herramienta, a diferencia de las usadas en los registros de densidad y litodensidad, se fundamenta en el principio físico de los campos potenciales.

Entre los registros geofísicos de pozo más usados para calcular la densidad de un medio se encuentran los registros de densidad y litodensidad. Estos registros no miden la densidad como el Gravilog, que se basa en el campo gravimétrico producido por la masa de un cuerpo, si no que funcionan por emisiones de rayos gamma de una fuente radioactiva, incluida dentro de la herramienta. Dependiendo del material con el que interactúa la emisión de rayos gamma y la forma en que se da esta interacción se hacen las mediciones de densidad. La diferencia entre ambas medidas es en el gravímetro de pozo que mide la masa de un gran volumen (varios m^3) alrededor del pozo a esa profundidad y en las herramientas radiactivas de densidad que permiten medir la masa en un volumen pequeño alrededor del pozo de aproximadamente 15 cm; en el primer caso serviría más para configurar yacimientos masivos y diseminados, si hay suficiente contraste en la densidad del material diseminado, y en el segundo caso para localizar vetas y capas.

Rock type	Range (g/cm ³)	Average (g/cm ³)	Mineral	Range (g/cm ³)	Average (g/cm ³)
Sediments (wet)			Metallic minerals		
Overburden		1.92	Oxides, carbonates		
Soil	1.2–2.4	1.92	Bauxite	2.3–2.55	2.45
Clay	1.63–2.6	2.21	Limonite	3.5–4.0	3.78
Gravel	1.7–2.4	2.0	Siderite	3.7–3.9	3.83
Sand	1.7–2.3	2.0	Rutile	4.18–4.3	4.25
Sandstone	1.61–2.76	2.35	Manganite	4.2–4.4	4.32
Shale	1.77–3.2	2.40	Chromite	4.3–4.6	4.36
Limestone	1.93–2.90	2.55	Ilmenite	4.3–5.0	4.67
Dolomite	2.28–2.90	2.70	Pyrolusite	4.7–5.0	4.82
Sedimentary rocks (av.)		2.50	Magnetite	4.9–5.2	5.12
Igneous rocks			Franklinite	5.0–5.22	5.12
Rhyolite	2.35–2.70	2.52	Hematite	4.9–5.3	5.18
Andesite	2.4–2.8	2.61	Cuprite	5.7–6.15	5.92
Granite	2.50–2.81	2.64	Cassiterite	6.8–7.1	6.92
Granodiorite	2.67–2.79	2.73	Wolframite	7.1–7.5	7.32
Porphyry	2.60–2.89	2.74	Sulfides, arsenides		
Quartz diorite	2.62–2.96	2.79	Sphalerite	3.5–4.0	3.75
Diorite	2.72–2.99	2.85	Malachite	3.9–4.03	4.0
Lavas	2.80–3.00	2.90	Chalcocopyrite	4.1–4.3	4.2
Diabase	2.50–3.20	2.91	Stannite	4.3–4.52	4.4
Basalt	2.70–3.30	2.99	Stibnite	4.5–4.6	4.6
Gabbro	2.70–3.50	3.03	Pyrrhotite	4.5–4.8	4.65
Peridotite	2.78–3.37	3.15	Molybdenite	4.4–4.8	4.7
Acid igneous	2.30–3.11	2.61	Marcasite	4.7–4.9	4.85
Basic igneous	2.09–3.17	2.79	Pyrite	4.9–5.2	5.0
Metamorphic rocks			Bornite	4.9–5.4	5.1
Quartzite	2.5–2.70	2.60	Chalcocite	5.5–5.8	5.65
Schists	2.39–2.9	2.64	Cobaltite	5.8–6.3	6.1
Graywacke	2.6–2.7	2.65	Arsenopyrite	5.9–6.2	6.1
Marble	2.6–2.9	2.75	Bismuthinite	6.5–6.7	6.57
Serpentine	2.4–3.10	2.78	Galena	7.4–7.6	7.5
Slate	2.7–2.9	2.79	Cinnabar	8.0–8.2	8.1
Gneiss	2.59–3.0	2.80	Non-metallic minerals		
Amphibolite	2.90–3.04	2.96	Petroleum	0.6–0.9	—
Eclogite	3.2–3.54	3.37	Ice	0.88–0.92	—
Metamorphic	2.4–3.1	2.74	Sea Water	1.01–1.05	—
			Lignite	1.1–1.25	1.19
			Soft coal	1.2–1.5	1.32
			Anthracite	1.34–1.8	1.50
			Chalk	1.53–2.6	2.01
			Graphite	1.9–2.3	2.15
			Rock salt	2.1–2.6	2.22
			Gypsum	2.2–2.6	2.35
			Kaolinite	2.2–2.63	2.53
			Orthoclase	2.5–2.6	—
			Quartz	2.5–2.7	2.65
			Calcite	2.6–2.7	—
			Anhydrite	2.29–3.0	2.93
			Biotite	2.7–3.2	2.92
			Magnesite	2.9–3.12	3.03
			Fluorite	3.01–3.25	3.14
			Barite	4.3–4.7	4.47

Tabla 3.1 Valores de densidad para diferentes minerales y rocas. Se observa que no se da un valor específico para cada mineral, pues al no presentar homogeneidad en la naturaleza, se expresan rangos entre estos valores (Telford, 1990).

Por sí sola, medir esta propiedad no sería suficiente en un estudio, pues dadas las condiciones en las que se encuentra un yacimiento mineral de no homogeneidad y de ocurrencia en que se da la mineralización, por lo que resulta difícil identificar un mineral teniendo sólo la densidad.

3.3. Radioactividad.

Una de las propiedades más complejas que poseen sólo algunos minerales, pero de gran importancia, es la radioactividad. Esta propiedad surge por un desequilibrio en el átomo, causado por una diferencia en el número de neutrones en comparación con el número de protones, a esta característica se le conoce como isótopos. Todos los elementos de la tabla periódica tienen sus isótopos, pero la mayoría de estos son estables a excepción unos cuantos de peso atómico grande, a los cuales se les conoce como isótopos radiactivos.

Esta radioactividad es causada por una inestabilidad en el núcleo, y como se ha observado en la naturaleza, todo tiende a estar en un estado de equilibrio. Al llevarse este proceso de inestabilidad en el núcleo, se suelen dar procesos de desintegración atómica. En estos procesos se libera energía en forma de radiación alfa, beta, gamma y neutrones. Cada una de estas formas de radiación tiene diferentes grados y efectos. Este tipo de radiación es útil pues conociéndola se puede llegar a saber el tipo de mineral que se está estudiando. Estos cuatro tipos de radiación se describen a continuación.

1. Radiación alfa (α).- Esta compuesta por núcleos de Helio, es decir dos neutrones y dos protones. La radiación se presenta en los elementos de la tabla periódica cuyo peso atómico es muy grande. La energía con la que se emiten estas partículas es la más alta de las tres radiaciones, por lo que, suele penetrar muy poco, por esta razón suelen ser menos detectables en los estudios radiométricos.
2. Radiación beta (β).- A diferencia de la radiación alfa, que emite núcleos de Helio, este tipo de radiación emite un flujo de electrones, resultado de un exceso de energía en el átomo. Al ser electrones los que se liberan de la desintegración atómica, la penetración que estos tienen es mayor que la de los rayos alfa, pues el electrón es de menor tamaño en relación a un átomo de Helio y puede atravesar por espacios más pequeños. Pueden tener carga negativa (electrones) ó positiva (positrones).
3. Radiación gamma (γ).- Este tipo de radiación, a diferencia de la alfa y beta, emite energía en forma de una onda electromagnética con una longitud de onda muy corta, por lo que la energía liberada es muy alta. Esta radiación penetra prácticamente cualquier material, a excepción de capas gruesas de Plomo.

Aunque no todos los elementos presentan actividad radioactiva, muchos de los minerales mayormente explotados a nivel mundial como los silicatos, algunos óxidos, oxisales y sales, contienen elementos isótopos de las series radiactivas del Torio, Uranio y Potasio, que como se observa en la tabla 3.2. Son elementos radioactivos y que pueden ser identificados con algunos registros geofísicos de pozo.

Element	Isotope	Abundance (%)	Half-life (yr)	Type of radiation	Energy (MeV)
Potassium	^{40}K	0.012	1.3×10^9	$\beta, K \text{ cap}$	1.46
Calcium	^{46}Ca	0.18	$> 2 \times 10^{16}$	β	0.12
Vanadium	^{50}V	0.24	6×10^{15}	$\beta, K \text{ cap}$	0.71, 1.59
Rubidium	^{87}Rb	27.8	4.7×10^{10}	β	0.27
Indium	^{115}In	95.72	6×10^{14}	β	0.60
Lanthanum	^{138}La	0.089	1.1×10^{11}	$\beta, K \text{ cap}$	0.54, 0.81, 1.43
Cerium	^{142}Ce	11.1		α	1.5
Neodymium	^{144}Nd	23.8	5×10^{15}	α	1.8
Samarium	^{147}Sm	14.97	10^{11}	α	2.32
Samarium	^{148}Sm	11.2	1.2×10^{13}	α	2.14
Samarium	^{149}Sm	13.8	$\sim 4 \times 10^{14}$	α	1.84
Gadolinium	^{152}Gd	0.2	1.1×10^{14}	α	2.24
Lutecium	^{176}Lu	2.6	3×10^{10}	β, γ	0.088, 0.20, 0.31
Hafnium	^{177}Hf	0.16	2×10^{15}	α	2.5
Rhenium	^{187}Re	62.9	7×10^{10}	β	≤ 0.008
Platinum	^{190}Pt	0.013	6×10^{11}	α	3.11
Platinum	^{192}Pt	0.78	$\sim 10^{15}$	α	2.6
Lead	^{204}Pb	1.48		α	
Thorium*	^{232}Th	100	1.39×10^{10}	α, β, γ	0.03 - 2.62
Uranium*	^{235}U	0.72	7.1×10^8	α, β, γ	0.02 - 0.9
Uranium*	^{238}U	99.3	4.5×10^9	α, β, γ	0.4 - 2.5

Tabla 3.2 Isótopos radiactivos cuya ocurrencia se da de forma natural, se incluye el tipo de radiación que emiten, así como su vida media (Telford, 1990).

Uno de los registros geofísicos de pozo que más se utiliza en la identificación de minerales radioactivos es el registro de rayos gamma naturales y el registro de espectroscopía de rayos gamma. El primero hace mediciones de radioactividad natural producida por los minerales, el segundo hace mediciones del contenido de Torio en ppm, Uranio en ppm y Potasio en %. Se pueden distinguir algunas ventajas de usar uno con respecto al otro, pues el de espectroscopia de rayos gamma puede ser utilizado para identificar los minerales, a diferencia del rayos gamma naturales que sólo se usaría para saber si existe algún mineral radioactivo o no.

Existen algunas gráficas de identificación de minerales utilizadas principalmente en la exploración petrolera, donde conociendo las curvas de Torio, Uranio y Potasio, se puede llegar a identificar un mineral. Estas tablas varían dependiendo de la compañía y de las herramientas utilizadas en las mediciones, un ejemplo se puede ver la figura 3.2, donde se observan principalmente arcillas y algunos minerales de importancia económica del grupo de los silicatos como la clorita, ortoclasa y algunas micas como la biotita y moscovita.

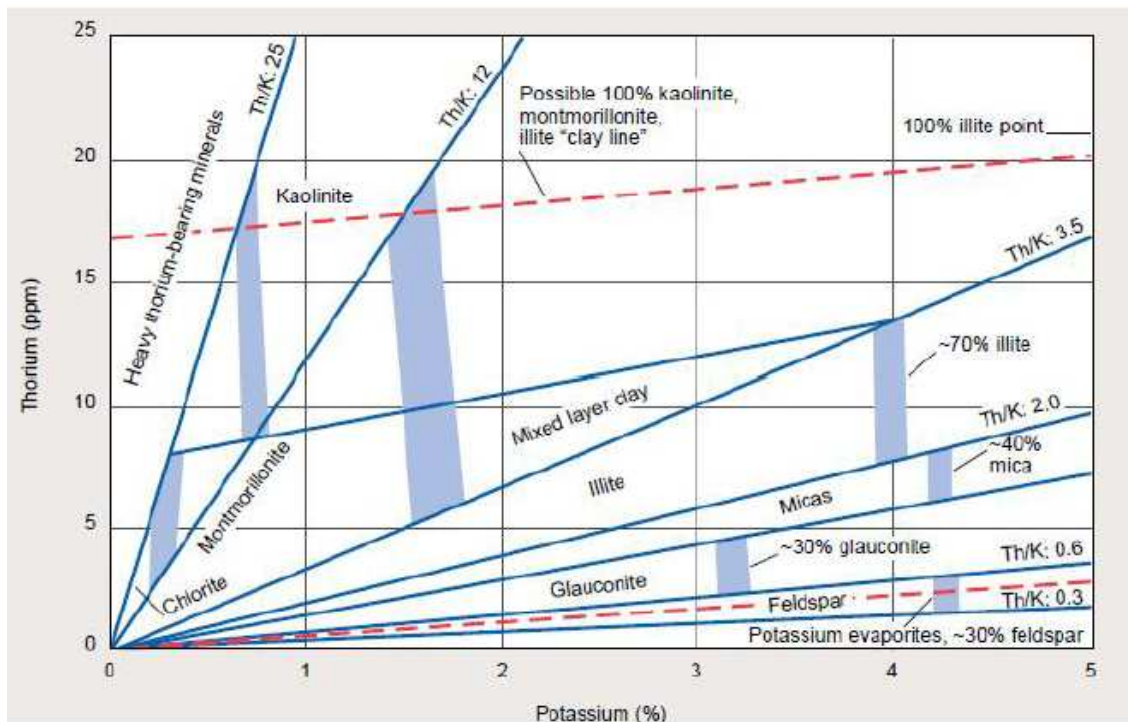


Figura 3.2. Gráfica de la compañía Schlumberger para la identificación de minerales en las rocas a partir de registros de pozos (Schlumberger, 2010).

3.4. Velocidad de ondas mecánicas

La velocidad de propagación de una onda elástica es una propiedad que se deriva de las constantes elásticas. Esta propiedad se puede definir como el tiempo que tarda una onda mecánica en recorrer una distancia. Para entender como es que se deriva esta propiedad es necesario definir el concepto de elasticidad y de constantes elásticas.

La elasticidad es la propiedad que tienen los cuerpos de recuperar su forma original, dentro de ciertos límites, después de haber aplicado un determinado esfuerzo el cual produjo una deformación. Esta definición surge de la ley de Hook, la cual establece que las deformaciones son proporcionales a los esfuerzos aplicados. Se tienen los módulos elásticos, los cuales se muestran en la tabla 3.3.

Nombre	Relación	Ecuación	Características
Módulo de Young	$\frac{\text{Esfuerzo}}{\text{Deformación}}$	$E = \frac{9kn}{3k + n}$	Deformaciones longitudinales sin cambio de volumen
Relación de Poisson	$\frac{\text{Deformación transversal}}{\text{Deformación longitudinal}}$	$\sigma = \frac{3k - 2n}{6k + 2n}$	Se conserva el volumen si σ es menor a 0.5
Rigidez	$\frac{\text{Esfuerzo cortante}}{\text{Deformación angular}}$	$n = \frac{E}{2(1 + \sigma)}$	Deformaciones angulares sin cambio de volumen
Compresibilidad	$\frac{\text{Variación de presión}}{\text{Variación de volumen}}$	$k = \frac{E}{3(1 - 2\sigma)}$	Presenta cambios en el volumen

Tabla 3.3. Módulos elásticos (Del Valle-Toledo, 1986).

Al aplicar estos esfuerzos y conociendo las deformaciones que se presentan en la roca, se puede derivar por medio de algoritmos matemáticos y análisis que involucran el uso de los módulos mencionados anteriormente, se puede llegar a la definición de algunos operadores matemáticos conocidos como constantes de Lamé. Las constantes de Lamé son esenciales en el análisis de las velocidades sísmicas, las cuales se pueden expresar en términos de los módulos elásticos, como se muestra a continuación (ecuaciones 2.4 y 2.5):

$$\mu = \frac{E}{2(1+\sigma)} = n \quad \text{Ec. 2.4}$$

$$\lambda = \frac{\sigma E}{(1+\sigma)(1-2\sigma)} = k - \frac{2}{3}\mu \quad \text{Ec. 2.5}$$

Al considerar un medio dinámico en el que se involucran esfuerzos y deformaciones, se entiende que existe una acción de movimiento el cual involucra un tiempo. Si se analiza de forma matemática se puede expresar este movimiento en función de una fuerza, como la segunda ley de Newton.

Si se tomara el modelo de esfuerzos y deformaciones, involucrando las ecuaciones de la física clásica, se puede llegar a una expresión (ecuación 2.6) que involucra la velocidad de propagación de una onda elástica, conocida como ecuación de onda.

$$\frac{\partial^2 \Delta}{\partial t^2} = \frac{\lambda + 2\mu}{\rho} \nabla^2 \Delta \quad \text{Ec. 2.6}$$

Siendo $\frac{\partial^2 \Delta}{\partial t^2} = \alpha^2$ la aceleración con la que se propaga la onda elástica, que se deriva con respecto al tiempo para obtener la velocidad, se podría expresar entonces como $\alpha = \sqrt{\frac{\lambda+2\mu}{\rho}}$ y sus unidades son $\left[\frac{Km}{s}\right]$, donde λ y μ son las constantes de Lamé y ρ es la densidad del medio en el que se está propagando la onda elástica.

La velocidad α está ligada a las ondas longitudinales conocidas como ondas compresionales (p), que son las primeras en llegar en la trayectoria de la onda elástica, por ser las más rápidas. Esta velocidad es la que se estudiará para la identificación de minerales usando registros geofísicos de pozo. Pues la herramienta de registros está diseñada para medir información de los primeros arribos. Sin embargo, existen otras ondas presentes dentro del tren de ondas, que suelen usarse para estudios especiales.

Cada mineral propaga las ondas elásticas con una velocidad que lo caracteriza. En general los minerales presentan velocidades de propagación relativamente altas; sin embargo, esta propiedad varía dependiendo de la ocurrencia en la que se presenta la mineralización, pues al no ser un medio homogéneo existirán variaciones significativas.

El registro geofísico de pozo que mide esta propiedad es el registro sísmico, usado comúnmente para conocer la porosidad de una formación. Este registro también tiene aplicaciones litológicas y aunque comúnmente no se aplica con fines de identificación mineral es posible hacerlo si se requiere.

Otro registro que responde a esta propiedad son los registros de imágenes acústicas. En las imágenes acústicas se pueden observar algunas estructuras geológicas como fallas, fracturas, vetillas y minerales diseminados, presentes en algunos de los yacimientos minerales. Estas estructuras geológicas se observan con mayor claridad en las imágenes de pozo de resistividad.

Algunas compañías petroleras han desarrollado una serie de tablas de respuesta de los registros de pozo en los diferentes minerales (tablas 3.4 y 3.5).

Name	Formula	ρ_{LOG} g/cm ³	ϕ_N p.u.	Δt_c µs/ft	Δt_s µs/ft	P_e barn/elect	U barn/cm ³	GR API units	Σ c.u.
Silicates									
Quartz	SiO ₂	2,64	-1,9	55	77	1,81	4,78	—	4,26
Cristobalite	SiO ₂	2,30	-2,9			1,81	4,16	—	3,75
Opal (3,5% H ₂ O)	SiO ₂ (H ₂ O) _{0,1208}	2,12	2,0	58		1,75	3,71	—	4,80
Garnet	Fe ₃ Al ₂ (SiO ₄) ₃	4,31	6,0	36	64	11,09	47,80	—	45,0
Homblende	Ca ₂ NaMg ₆ Fe ₂ AlSi ₈ O ₂₂ (O,OH) ₂	3,15	7,0	44	82	5,99	18,87	—	18,0
Tourmaline	NaMg ₂ Al ₆ B ₃ Si ₆ O ₂₁ (OH) ₄	2,98	21			2,14	6,38	—	7485
Carbonates									
Calcite	CaCO ₃	2,71	0	48	89	5,08	13,77	—	7,10
Dolomite	CaCO ₃ MgCO ₃	2,87	1,8	43	73	3,14	9,01	—	4,70
Ankerite	Ca(Mg,Fe)(CO ₃) ₂	2,90	1,0	53	84	9,32	27,03	—	21,0
Siderite	FeCO ₃	3,89	11,5	45	85	14,69	57,14	—	52,5
Oxidates									
Hematite	Fe ₂ O ₃	5,18	10,0	45	74	21,48	111	—	101
Magnetite	Fe ₃ O ₄	5,09	8,0	73	155	22,24	113	—	103
Geothite	FeO(OH)	4,28	60+			19,02	31,41	—	84,0
Limonite	FeO(OH)(H ₂ O) _{2,25}	3,60	60+	57	103	13,00	46,80	—	71,0
Gibbsite	Al(OH) ₃	2,49	60+			1,10	2,74	—	26,0
Phosphates									
Hydroxyapatite	Ca ₅ (PO ₄) ₃ OH	3,17	7,5	43	70	5,81	18,42	—	10,50
Chlorapatite	Ca ₅ (PO ₄) ₃ Cl	3,18	-1,0	42		6,06	19,27	—	131
Fluorapatite	Ca ₅ (PO ₄) ₃ F	3,21	-1,5	44	80	5,82	18,68	—	9,00
Carbonapatite	(Ca ₅ (PO ₄) ₃) ₂ CO ₃ H ₂ O	3,13	8,0			5,58	17,47	—	9,09

Name	Formula	ρ_{LOG} g/cm ³	ϕ_N p.u.	Δt_c µs/ft	Δt_s µs/ft	P_e barn/elect	U barn/cm ³	GR API units	Σ c.u.
Clays									
Kaolinite	Al ₂ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂	2,60	40	212	328	1,83	4,76	80 - 130	13,2
Chlorite	(Mg,FeAl) ₃ (Si,Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₈	2,76	52			6,30	17,39	180 - 250	25,0
Illite	K _{1-1,5} Al ₄ (Si _{7-8,5} Al _{1-1,5} O ₂₀ (OH) ₄) ₂	2,61	20			3,45	9,00	250 - 300	17,0
Smectite	(Ca,Na) ₊ (Al,Mg,Fe) ₄ (Si,Al) ₄ O ₂₀ (OH) ₄ (H ₂ O) _n	2,12	40			2,04	4,32	150 - 200	14,4
Coals									
Anthracite	CH _{0,98} N _{0,09} O _{0,22}	1,55	40	105		0,16	0,25	—	9,21
Bituminous	CH _{1,78} N _{0,15} O _{0,278}	1,30	60+	120		0,17	0,23	—	16,2
Lignite	CH _{1,84} N _{0,15} O _{0,211}	1,05	55	160		0,20	0,21	—	12,8
Micas									
Muscovite	KAl ₃ (Si ₃ AlO ₁₀)(OH) ₂	2,82	18,0	50	100	2,40	6,77	~ 270	16,9
Glauconite	K ₂ (Mg,Fe) ₂ Al ₄ (Si ₄ O ₁₀) ₂ (OH) ₂	2,54	30			6,37	16,18		24,1
Biotite	K(Mg,Fe) ₂ (AlSi ₃ O ₁₀)(OH) ₂	2,99	20	51	220	6,27	18,75	~ 275	30,0
Phlogopite	KMg ₃ (AlSi ₃ O ₁₀)(OH) ₂			50	207				33,3
Feldspars									
Orthoclase	KAlSi ₃ O ₈	2,53	-2,5	69		2,86	7,24	~ 220	15,5
Anorthoclase	KAlSi ₃ O ₈	2,56	-1,8	69		2,86	7,32	~ 220	15,9
Microcline	KAlSi ₃ O ₈	2,56	-2,5	45		2,86	7,32	~ 220	15,3
Albite	NaAlSi ₃ O ₈	2,60	-1,5	49	85	1,68	4,37	—	7,52
Anorthite	CaAl ₂ Si ₂ O ₈	2,75	-1,7	45		3,13	8,61	—	7,33

Name	Formula	ρ_{LOG} g/cm ³	ϕ_N p.u.	Δt_c μs/ft	Δt_s μs/ft	P_e barn/elect	U barn/cm ³	GR API units	Σ c.u.
Evaporites									
Halite	NaCl	2.04	-2.5	67	116	4.65	9.49	—	762
Anhydrite	CaSO ₄	2.98	-1.5	50	98	5.05	15.05	—	12.4
Gypsum	CaSO ₄ (H ₂ O) ₂	2.35	60+	53		3.99	9.38	—	18.6
Trona	Na ₂ CO ₃ NaHCO ₃ H ₂ O	2.09	40	65		0.71	1.48	—	16.9
Tachydrate	CaCl ₂ (MgCl ₂) ₂ (H ₂ O) ₁₂	1.66	60+	92		3.84	6.37	—	406
Sylvite	KCl	1.87	-3.0	74	140	8.51	15.91	500+	561
Carnalite	KClMgCl ₂ (H ₂ O) ₆	1.57	60+	79		4.09	6.42	~ 220	369
Langbeinite	K ₂ SO ₄ (MgSO ₄) ₂	2.82	-1.5	52		3.56	10.04	~ 290	24.1
Polyhalite	K ₂ SO ₄ (MgSO ₄) ₂ (CaSO ₄) ₂ (H ₂ O) ₂	2.79	23	58		4.32	12.05	~ 200	23.7
Kainite	MgSO ₄ KCl(H ₂ O) ₃	2.13	60+			3.50	7.46	~ 245	196
Kieserite	MgSO ₄ H ₂ O	2.59	40			1.83	4.74	—	14.0
Epsomite	MgSO ₄ (H ₂ O) ₇	1.71	60+			1.15	1.97	—	21.5
Bischofite	MgCl ₂ (H ₂ O) ₆	1.54	60+	100		2.59	3.99	—	323
Barite	BaSO ₄	4.09	-1.5	69	133	267	1092	—	21.0
Celestite	SrSO ₄	3.79	-1.0	60	149	55.2	209	—	22.4
Sulfates									
Pyrite	FeS ₂	5.00	-2.5	38	59	16.96	84.85	—	90.3
Marcasite	FeS ₂	4.87	-2.6			16.97	82.64	—	88.4
Pyrrhotite	Fe ₇ S ₈	4.54	-2.6	65	111	20.55	93.30	—	94.2
Sphalerite	ZnS	3.93	-2.7	57	108	35.93	141	—	41
Chalcopyrite	CuFeS ₂	4.07	-2.3			26.72	109	—	101
Galena	PbS	6.39	-2.8			1631	10422	—	13.4

Tabla 3.4 Respuesta de algunas herramientas de registros usadas en la exploración de minerales. Se observan algunos valores de densidad, porosidad, tiempo de tránsito, factor fotoeléctrico y radioactividad (Weatherford, 2009).

Name	Formula	ϕ_{NLS}^* thermal (p.u.)	ρ_b g/cc	ρ_{LOG} g/cc	P_e	P_{em}^4	Δt_c (μs/ft)	Δt_s (μs/ft)	Σ_{ma} (c.u.)
SILICATES									
Quartz	SiO ₂	-1	2.65	2.64	1.81	1.81	55.5	74	4.6
Cristobalite	SiO ₂	-1.4	2.33	2.30	1.81	1.81			4.0
Opal (3.5% H ₂ O)	SiO ₂ (H ₂ O) ₁₂₀₉	2.0	2.13	2.10	1.75	1.74	58.0		3.8
Garnet									
Almandine	Fe ₃ Al ₂ (SiO ₄) ₃	1.8	4.32	4.31	11.1	10.3	35.8	63.9	45
Andradite	Ca ₃ Fe ₂ Si ₃ O ₁₂	.4	3.86	3.88	10.13	9.67			32
Grossularite	Ca ₃ Al ₂ Si ₃ O ₁₂	-3	3.59	3.63	4.37	4.44			11
Pyrope	Mg ₃ Al ₂ Si ₃ O ₁₂	.4	3.58	3.61	1.60	1.61			6.2
Zircon	ZrSiO ₄	0	4.68	4.51	69.1	50	95.8	146.5	5.5
Hornblende	Ca ₂ NaMg ₂ Fe ₂ AlSi ₈ O ₂₂ (OH) ₂	2.9	3.12	3.11	5.99	5.72	44	82	17.9
Tourmaline	(Na,Ca)(Li,Mg,Al)- (Al,Fe,Mn) ₆ - (BO ₃) ₃ (Si ₆ O ₁₈)(OH) ₄	11-22	3.00	2.93-3.00	1.9-10.5	1.3-9.5			4000
SHEET SILICATES									
Kaolinite	Al ₄ (Si ₄ O ₁₀)(OH) ₈	40	2.61	2.63	1.49	1.45	212	328	12.9
Illite	KAl ₄ (Si ₇ AlO ₂₀)(OH) ₄	9-10	2.65-2.69	2.64-2.69	2.04	2.05			12-14
Montmorillonite	(Ca,Na) ₇ (Al,Mg,Fe) ₄ - (Si,Al) ₈ O ₂₀ (OH) ₄ +4H ₂ O	18-53	2.2-2.7	2.2-2.7	1.3-1.55	1.24-1.5			14.7
Chlorite									
Clinchlore	(Mg,Fe) ₅ Al(Si ₃ Al)- O ₁₀ (OH) ₈	29-47	2.63-2.98	2.6-3.0	1.04-12.7	.95-11.7			35.6
Gonyerite	(Mn,Mg) ₅ Fe ³⁺ (Si ₃ Fe ³⁺)- O ₁₀ (OH) ₈	45	3.01	2.97	10-16	9.2-15			113
Nimite	(Ni,Mg,Fe) ₅ Al(Si ₃ O)- O ₁₀ (OH) ₈	75	3.19	3.20	1.3-17	1.2-15			45
Muscovite	KAl ₂ (AlSi ₃)O ₁₀ (OH) ₂	11	2.83	2.82	2.40	2.40	53	92	16.9
Biotite	K(Mg,Fe) ₃ AlSi ₃ O ₁₀ - (OH) ₂	10-12	3.01	2.95-3.03	2.3-10.2	2.3-9.5	49	82	35.2
Glauconite	(K,Na,Ca) _{1,2-2} - (Fe ³⁺ ,Al,Fe,Mg) ₄ - Si _{7-7.6} - Al ₁₋₄ O ₂₀ (OH) ₄ +2H ₂ O	11-18	2.45-2.85	2.42-2.83	5.1-6.1	4.8-5.9			17-22
FELDSPARS									
Microcline	KAlSi ₃ O ₈	-1.3	2.59	2.56	2.86	2.87			15.8
Orthoclase	KAlSi ₃ O ₈	-1.4	2.56	2.53	2.86	2.87	69		15.8
Anorthoclase	KAlSi ₃ O ₈	-1.4	2.59	2.56	2.86	2.87	69		15.8
Albite	NaAlSi ₃ O ₈	-1.1	2.62	2.59	1.68	1.68	49	85	7.7
Anorthite	CaAl ₂ Si ₂ O ₈	-1.2	2.76	2.74	3.13	3.18	45		7.4
CARBONATES									
Calcite	CaCO ₃	0	2.71	2.71	5.08	5.08	47.6	88.7	7.1
Aragonite	CaCO ₃	.6	2.95	2.97	5.08	5.08	47.6	88.7	7.1
Dolomite	CaMg(CO ₃) ₂	.9	2.87	2.88	3.14	3.08	43.5	71	4.7
Siderite	Fe(CO ₃) ₂	6	3.96	3.89	14.7	13.4	43.8	84.9	52.8
Ankerite	CaCO ₃ (Mg,Fe,Mn)CO ₃	≈1	2.94	2.90-2.95	7.3-8.7	6.9-8.1	53.0	83.6	24.9

* DSN-II Neutron Porosity only

Name	Formula	Φ_{NLS}^* thermal (p.u.)	ρ_b g/cc	ρ_{LOG} g/cc	P_e	P_{em}^4	Δt_c ($\mu s/ft$)	Δt_s ($\mu s/ft$)	Σ_{ma} (c.u.)
SULPHATES									
Barite	BaSO ₄	-1	4.48	4.09	267	144	69.7	132.7	20
Celestite	SrSO ₄	-8	3.96	3.79	55.2	41.2	60.7	168.8	23.5
SULPHIDES									
Pyrite	FeS ₂	-1.7	5.02	5.00	17.0	16.1	38	59	91.2
Pyrrhotite	Fe ₇ S ₈	-1.7	4.60	4.53	20.5	19.3	65	110	95.8
Galena	PbS	-2.3	7.40	6.30	1631	133			13.4
Sphalerite	ZnS	-2.3	4.10	3.96	35.9	31.7	57	108	41
Chalcopyrite	CuFeS ₂	-1.9	4.20	4.07	26.7	24.4			102
Chalcocite	Cu ₂ S	-1.5	5.50	5.20	37.4	33.4			168
OXIDES									
Hematite	Fe ₂ O ₃	4.8	5.27	5.18	21.5	19.8	46	72	102
Magnetite	Fe ₃ O ₄	3.8	5.18	5.08	22.2	20.5	73	155	103
Limonite	FeO·OH·nH ₂ O (n = 2.1)	>100	3.85	3.98	12.9	11.8	57	103	78.5
Corundum	Al ₂ O ₃	.5	4.02	4.03	1.55	1.57			11
Rutile	TiO ₂	1	4.18	4.06	10.1	9.70			192
Spinel	MgAl ₂ O ₄	-.1-(+1)	3.5-4.1	3.49-4.13	1.49	1.51			7.5-10
Ilmenite	FeTiO ₃	2.0	4.70	4.60	16.6	15.5			162
EVAPORITES									
Halite	NaCl	-1.5	2.17	2.04	4.65	4.86	67	116	761
Sylvite	KCl	-2	1.99	1.87	8.51	8.71	74		572
Carnallite	KMgCl ₃ ·6H ₂ O	63	1.61	1.57	4.09	4.11	78		372
Anhydrite	CaSO ₄	-1	2.96	2.98	5.05	5.14	50	97.5	12.6
Gypsum	CaSO ₄ ·2H ₂ O	53	2.32	2.35	3.99	3.99	52.5		18.6
Langbeinite	K ₂ Mg ₂ (SO ₄) ₃	-1.1	2.83	2.82	3.56	3.57	52		24.0
Polyhalite	K ₂ Ca ₂ Mg(SO ₄) ₄ ·2H ₂ O	14.5	2.78	2.79	4.32	4.35	57.5		23.8
Kieserite	MgSO ₄ ·H ₂ O	37	2.57	2.59	1.83	1.79			14.1
MISCELLANEOUS									
Borax	Na ₂ B ₄ O ₇ ·10H ₂ O	>100	1.71	1.71	.473	.247			8305
Kernite	Na ₂ B ₄ O ₇ ·4H ₂ O	>100	1.91	1.87	.522	.314			13000
Flourite	CaF ₂	-1.3	3.18	3.13	6.71	6.82			11
Apatite	Ca ₅ (PO ₄) ₃ (F,Cl,OH)	1.2	3.15	3.15	5.8-6.1	5.9-6.2			52
Goethite	FeO·OH	>100	4.37	4.34	19.0	17.5			80
Augite	(CaNa)(Mg,Fe,Al)- (Si,Al) ₂ O ₆	-.7-(-1.1)	3.30	3.25-3.32	1.3-9.6	1.3-9.1			7-30
Sulphur	S ₂	-2	2.07	2.02	5.40	5.80	122		20.6
COALS									
Anthracite	CH ₃₅₈ N ₀₀₉ O ₀₂₂	>60	1.60	1.57	.17	-.15	105		10.5
Bituminous	CH ₇₉₃ N ₀₁₉ O ₀₇₈	>100	1.35	1.34	.17	-.16	120		20
Lignite	CH ₈₄₉ N ₀₁₅ O ₂₁₁	>45	1.10	1.05	.20	-.11	160		12.6

* DSN-II Neutron Porosity only

Tabla 3.5 Respuesta de algunas herramientas de registros usadas en la exploración de minerales. Se observan algunos valores de densidad, porosidad, tiempo de tránsito, factor fotoeléctrico y radioactividad (Glover, 2010).

En estas tablas también se incluye la velocidad de las ondas compresionales (p), aunque existen herramientas modernas que pueden captar todo el tren onda elástica que incluye ondas de cizalla (s) y Stoneley; lo más común es encontrar tablas para velocidades de la onda "p". La figura 3.3 muestra el tren de ondas completo que registran las herramientas sónicas.

Las herramientas usadas para medir esta propiedad usualmente no proporcionan directamente valores de velocidad, por lo general, dan el recíproco de este y en unidades más $\left[\frac{\mu sec}{ft} \right]$ pequeñas. El tiempo de tránsito se define como el tiempo que tarda en recorrer la onda longitudinal 1 pie de formación.

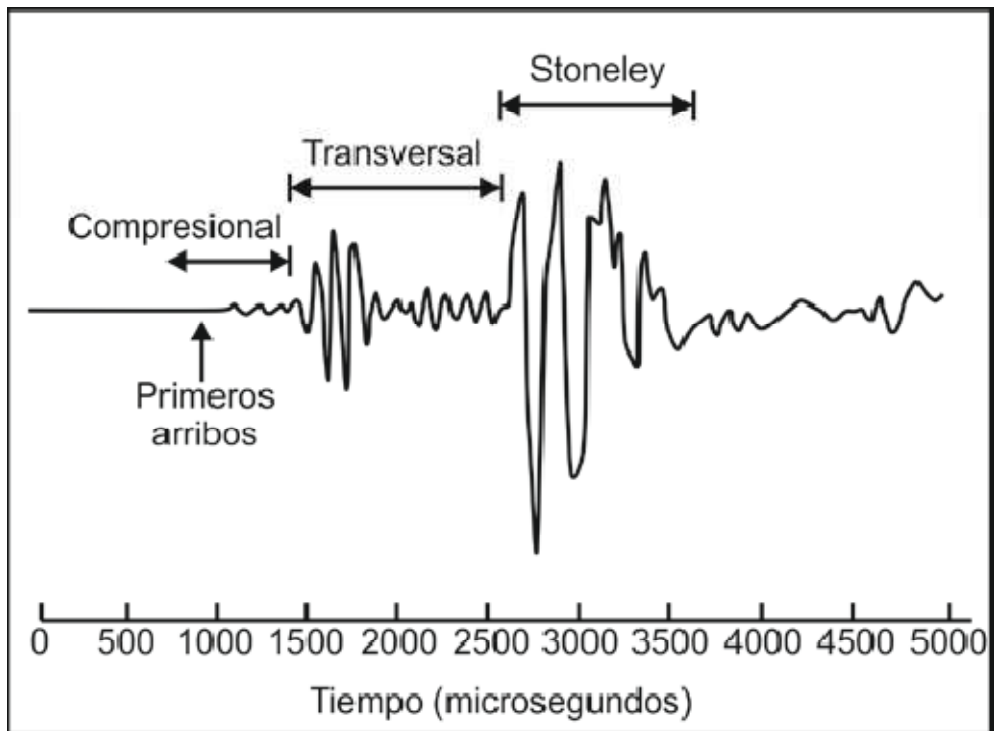


Figura 3.3. Diferentes arribos que pueden detectar las herramientas sónicas de porosidad (Ricco-Macedo, 2012).

Capítulo 4. Registros Óptimos para la Identificación de Yacimientos Minerales.

Como en otras áreas de aplicación de Ciencias de la Tierra, petróleo, hidrogeología, geotermia, geotecnia y ambiental; los registros geofísicos de pozos son un complemento final de la exploración con métodos geofísicos indirectos de superficie. Es decir, es necesario que primero se localice el yacimiento mineral con métodos indirectos o de superficie y una vez seleccionada la oportunidad exploratoria, se deberían perforar uno o varios pozos exploratorios a la profundidad de acuerdo al yacimiento buscado, basándose en el contexto geológico del área. En este momento los registros geofísicos son muy valiosos para caracterizar el yacimiento mineral y definir los sitios con mayor concentración. Una vez localizado el yacimiento se pueden seguir tomando registros en barrenos con diferentes direcciones en la mina, para optimizar la explotación, sobre todo en el caso de vetas.

La elección del registro geofísico de pozo óptimo para la exploración de un determinado mineral estará en función de las propiedades físicas y químicas del mineral que se esté buscando, así como de su ocurrencia en el yacimiento. Ya sea que el mineral sea metálico o no metálico, que se encuentre en forma masiva o diseminada o incluso también que la mineralización se dé en forma de vetas, mineralizando en fallas y/o fracturas; se deberá entonces definir que registro usar y realizar una justificación.

Como se trató en el capítulo de propiedades de los minerales, algunos registros geofísicos de pozo responden a ciertas características de los minerales, pero también es importante saber la forma en la que estos ocurren. Pues los registros geofísicos de pozo también hacen lecturas de toda la formación, pudiendo presentarse otro tipo de rocas sin interés económico como la roca huésped y alteraciones minerales.

Podemos definir seis tipos de formas en las que se puede encontrar el mineral en el yacimiento. Estas formas serán propuestas de tal forma que su ocurrencia permita aplicar los registros geofísicos de pozo óptimos que sirvan para localizar la concentración más alta de mineralización. Estas 6 formas de ocurrencia las podemos definir como:

1. La mineralización se da en forma masiva con minerales metálicos.
2. La mineralización está en forma diseminada con minerales metálicos.
3. La mineralización se da en vetas con minerales metálicos.
4. La mineralización se da de forma masiva con minerales no metálicos.
5. La mineralización está en forma diseminada con minerales no metálicos.
6. La mineralización se da en vetas con minerales no metálicos.

Cuando se habla de que existe mineralización en forma diseminada se refiere a que el yacimiento cuenta con minerales cuya ocurrencia está en forma de pequeñas partículas aisladas que, en conjunto, pueden formar una masa de gran tonelaje y cuyo volumen es variable; en ocasiones, no es lo suficientemente grande para poder detectarse de forma directa.

Un yacimiento que mineraliza en forma masiva se refiere a que el mineral de interés se encuentra acumulado en un sólo cuerpo, en donde su concentración es mayor en proporción que el resto de los otros minerales asociados que no son de interés. Esta mineralización puede ser la de mayor importancia desde el punto de vista económico, pues al darse la mineralización en un sólo cuerpo se podrá explotar de forma más fácil y directa; especialmente cuando el mineral de interés se encuentra casi puro.

Cuando la mineralización se da en forma de vetas, hablamos de que el mineral se alojó en alguna falla o fractura. La génesis en que esta mineralización se da es posible debido a que el fluido mineralizante se puede transportar con facilidad y alojarse en estas estructuras, teniendo condiciones de espacio, presión y temperatura idóneas en la mayoría de los casos.

Por lo tanto la elección del registro geofísico de pozo óptimo estará en función tanto de la forma de ocurrencia como de las propiedades físicas y químicas del mineral.

4.1. Minerales Metálicos Diseminados.

Para los minerales que se encuentran en forma diseminada, como es el caso del oro, en ocasiones los registros deberán estar enfocados no a localizar el mineral diseminado, sino a estudiar la roca huésped y las alteraciones que se asocian a este tipo de mineralización. Un ejemplo de esto es el caso del oro presente en los yacimientos del tipo pórfidos cupríferos. En estos yacimientos primeramente se deberá identificar las alteraciones hidrotermales y posteriormente estudiar el contenido de oro, conociendo con mayor detalle donde se centra esta mineralización.

Para explicar un poco más a detalle esta forma de ocurrencia y como aplicar el registro óptimo, tomaremos de ejemplo un yacimiento del tipo pórfido cuprífero. Recordando cual es la distribución mineral y la forma de las alteraciones, usaremos la figura 2.2 del capítulo 2 de yacimientos minerales, donde se representa de forma gráfica cual es su distribución.

La distribución de oro en la alteración propilítica se presenta comúnmente de forma diseminada y en ocasiones rellenando fracturas pequeñas o vetillas. Para este caso podemos identificar la alteración potásica, fílica y argílica. El objetivo sería identificar estas alteraciones y posteriormente estudiar, una vez identificadas, la alteración propilítica, que es la que presenta el oro de forma diseminada.

Para elegir los registros óptimos de esta forma de ocurrencia se propone la siguiente metodología.

Como se observa en la figura 4.1, en la alteración potásica podemos tener minerales del grupo de los silicatos como el cuarzo, biótita, actinolita; así como feldespato potásico como la ortoclasa. Para este caso las concentraciones de estos minerales son considerablemente más altas en comparación al contenido de oro, que se encuentra en forma diseminada. Para identificar esta alteración con registros geofísicos de pozo, podemos usar los registros de espectroscopía de rayos gamma y el registro de rayos gamma naturales.

Usando los registros mencionados anteriormente se puede localizar esta alteración, por el contenido de Potasio de estos minerales y no importando que se encuentre también de forma diseminada. Si se identifica con este registro la alteración potásica, se podrá buscar cerca a la alteración de importancia, que en este caso es la propilítica.

Una vez identificada la zona de alteración propilítica se podrá aplicar registros resistivos, que van a servir para conocer el contenido de oro en la alteración. Puesto que el oro presenta una conductividad muy alta al aplicar los registros resistivos, se podrá tener variaciones que en la interpretación se le podrá dar un significado del contenido de este metal.

Se han realizado algunos registros en minas de Ontario, en las que se estudió la respuesta que tenía un yacimiento de oro, cuya ocurrencia era en forma diseminada. Entre los registros usados para determinar la respuesta al yacimiento mineral están: el registro de espectroscopía de rayos gamma (Th, U y K), registros de densidad (gamma-gamma), registro resistivo, registro de polarización inducida, registro de potencial natural y registro de susceptibilidad magnética. La figura 4.2 muestra los registros tomados en el depósito mineral Victoria Creek.

Algunos minerales tienen más ocurrencia que otros y por lo tanto se puede estudiar directamente la mineralización y no la alteración. Un ejemplo de esto es el caso del estaño, el estaño suele darse en diferentes formas: diseminada, en vetas e incluso de forma masiva. Cuando se da de forma diseminada este contiene grandes porcentajes de mineral, esto es debido a que el fluido mineralizante tiene más contenido de Zinc en comparación al contenido de Oro. Usando esta comparación se puede conocer como se encuentra la mineralización y localizarla. Para estos casos los registros resistivos son usados con mayor frecuencia, gracias a la alta conductividad del mineral.

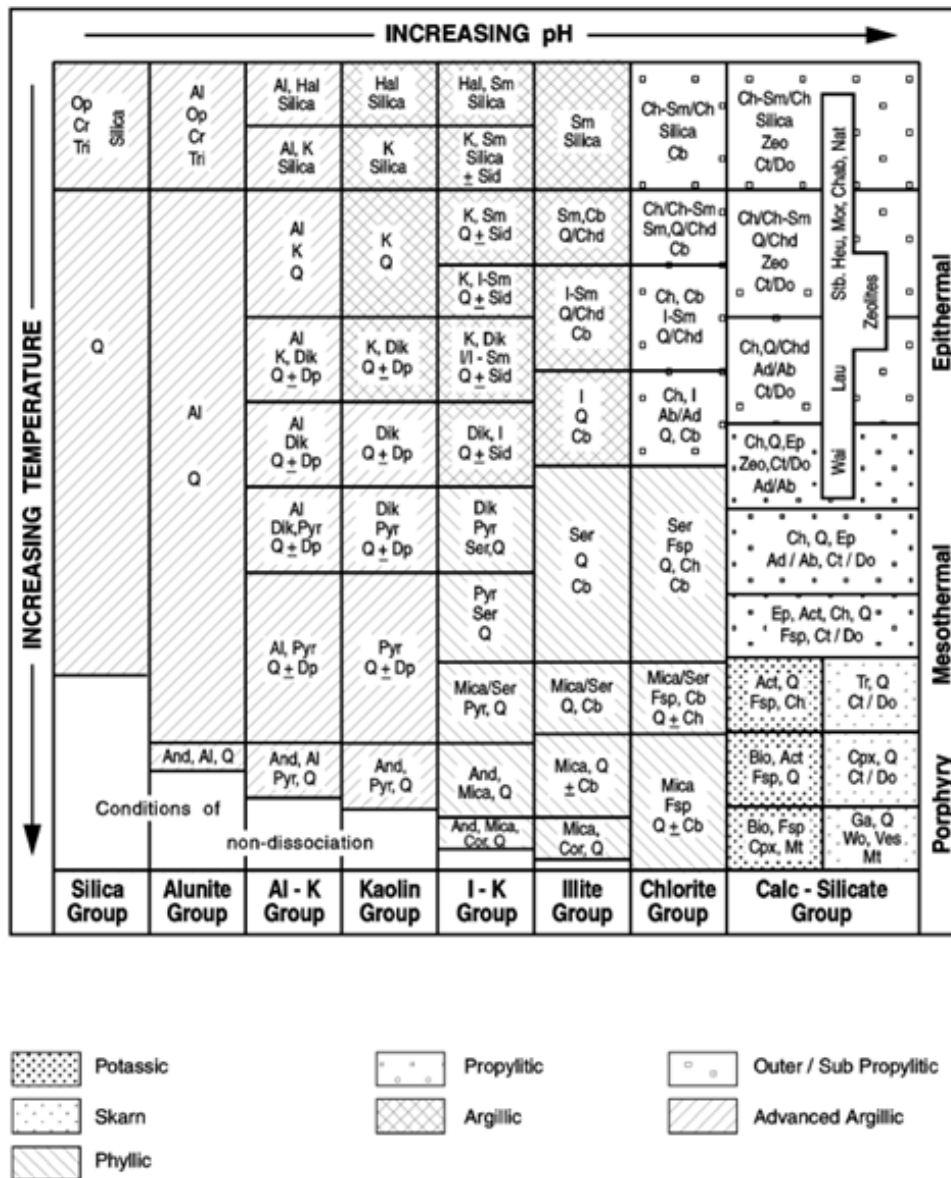


Figura 4.1. Alteraciones comunes de un sistema hidrotermal. Las abreviaturas corresponden a: Ab-albita; Act-actinolita; Al-alonita; And-andalusita; Bio-biotita; Cb-carbonatos; Ch-clrita; Chab-cabacita; Chd-calcedonia; Ch-Sm-clorita-esmectita; Cor-corundum; Cpx-clinopiroxeno; Cr-cristobalita; Ct-calcita; Do-dolomita; Dik-dikita; Dp-diaspora; Ep-epidota; Fsp-feldespatos; Ga-granate; Hal-halosita; Heo-heolita; I-Iilita; I-Sm-ilita-esmectita; K-caolinita; Lau-laumonita; Mt-magnetita; Mor-mordenita; Nat-natrolita; Op-ópalo; Pyr-piropilita; Q-cuarzo; Ser-sericita; Sid-siderita; Sm-esmectita; Stb-estibilita; Tr-tremolita; Tri-tridimita; Ves-vesuvianita; Wai-wairakita; Wo-wolastonita; Zeo-zeolita, (Corbett, 1997).

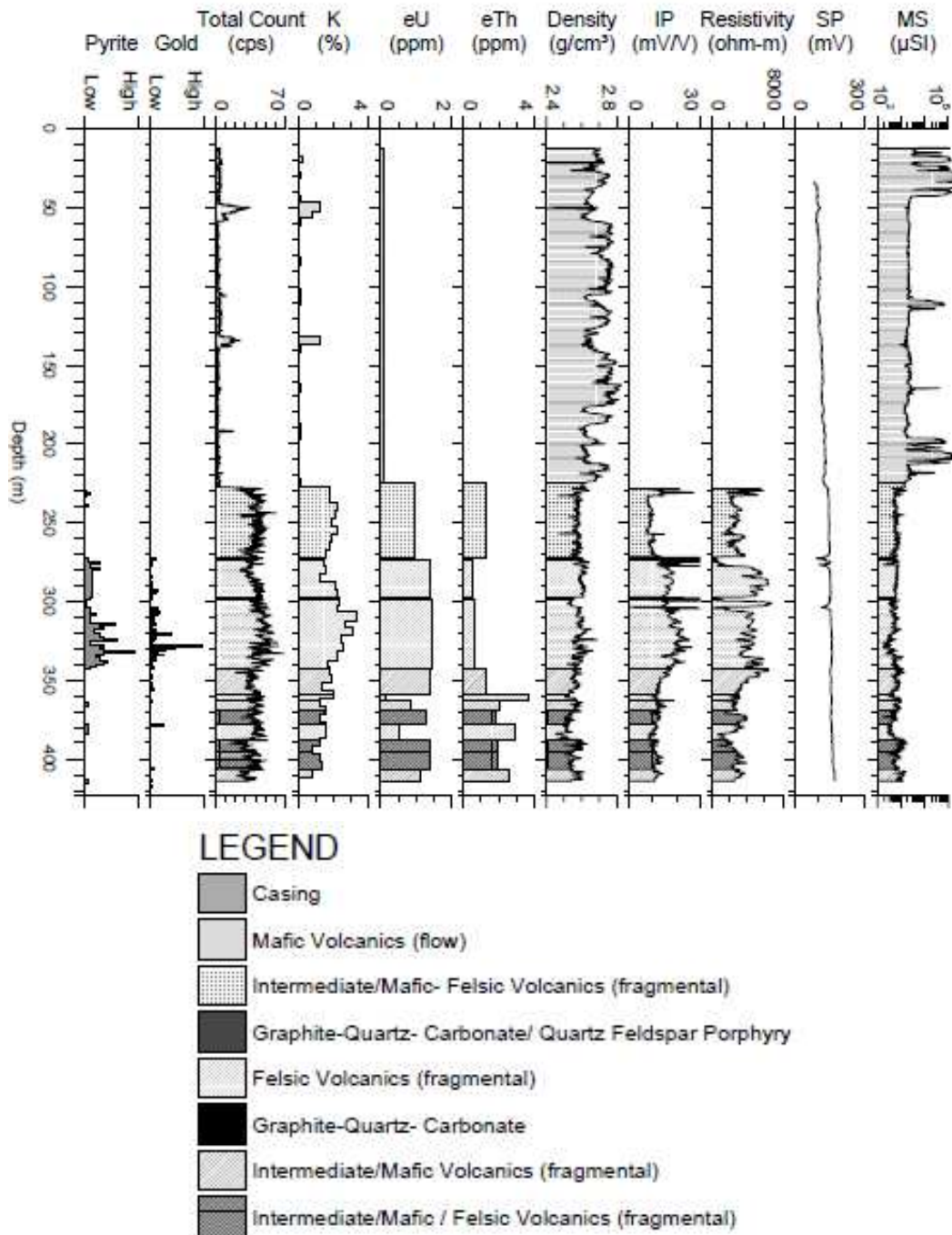


Figura 4.2. Registros geofísicos de pozo adquiridos en el depósito minero Victoria Creek, Canadá. Se observa que a las profundidades de 275 m a 350 m los valores en los registros de espectroscopía de rayos gamma y el registro de resistividad, aumentan considerablemente (Pflug, 1996).

4.2. Minerales No Metálicos Diseminados.

Aunque la mayoría de los minerales diseminados de importancia económica sean metálicos, existen algunos yacimientos que presentan cantidades de minerales no metálicos en forma diseminada, por ejemplo el Azufre, la barita y la fluorita.

La mayoría de estos minerales se explotan en yacimientos cuya ocurrencia del mineral se da de forma masiva o en vetas. Por lo que explotar estos yacimientos no es rentable. Sin embargo, si en algún momento los yacimientos masivos y en vetas llegaran a escasear, se tendría la necesidad de explorar también los yacimientos diseminados y para ello serán necesario estudios de este tipo de ocurrencia mineral.

Si se propone un registro geofísico para estos yacimientos se tendrá primero que encontrar estas mineralizaciones con métodos geofísicos y geológicos de superficie. Los posibles escenarios de estos yacimientos son aquellos cuyo modelo se conoce, un ejemplo sería el caso de los sulfuro masivos vulcanogénicos. En estos yacimientos como se vió en el capítulo 2, se explotan principalmente metales como oro, plata, cobre, etc., pero también se pueden explotar algunos no metálicos como la barita.

La barita en estos yacimientos suele darse de forma masiva en la parte superior del yacimiento. Pero si las circunstancias hacen que se tenga que explotar de forma diseminada, se debe considerar que:

- 1.- Se conoce primeramente el modelo del yacimiento.
- 2.- La explotación del mineral en forma masiva se ha dado y se requiere explotar aquel que se encuentre de forma diseminada.
- 3.- Dado que se exploró con anterioridad el mineral de forma masiva, se conoce la ubicación espacial de la mineralización.

Posterior a estas tres condiciones, se podrá localizar el mineral de forma diseminada. Lo siguiente es elegir el registro óptimo para esta forma de mineralización.

Las propiedades del mineral se conocen, tiene una densidad de 4.5 g/cm^3 , esto lo hace de fácil detección, pues para ser un mineral no metálico tiene una gran densidad. Dado que se encuentra de forma diseminada, es posible que la roca encajonante enmascare estos valores. Inicialmente se deberá identificar cuál es el tipo de roca encajonante, para posteriormente en los registros identificar el mineral diseminado, contrastando sus propiedades físicas.

Los registros geofísicos de pozo óptimos para yacimientos diseminados de barita son densidad y litodensidad; con estos registros se puede medir la densidad de la formación y con ello hacer la identificación mineral.

Sin embargo, existen estudios en depósitos mineros de contenido no metálico como es el caso de la formación de evaporita Praire, en Canadá. En el que se estudio el contenido de silvita en una formación. En este caso el registro de espectroscopía de rayos gamma fue empleado para conocer el contenido de este mineral. Como se sabe la Silvita está constituida por Potasio, mineral que presenta cierta radioactividad natural. En este caso se sabía de la presencia de este mineral, por lo que el estudio fue

con fines comparativos entre un núcleo de barrenación y un registro geofísico de pozo. En la figura 4.3 se puede observar el porcentaje de silvita que se encuentra de forma diseminada en el yacimiento.

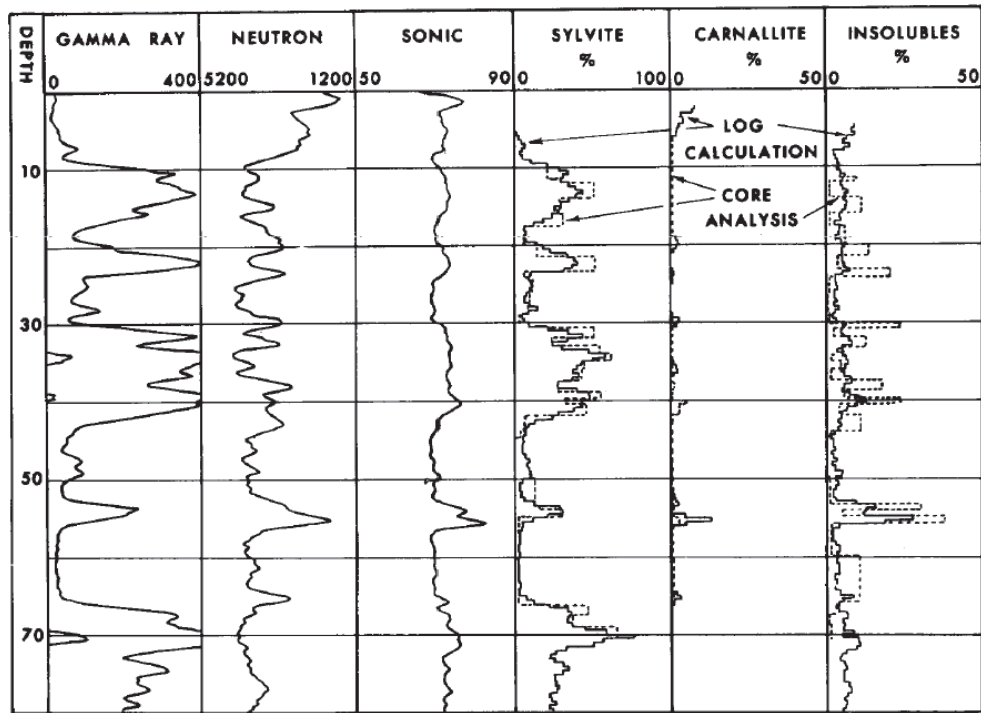


Figura 4.3. Comparación de un núcleo de barrenación con un registro geofísico de pozo en la formación de evaporita Prairie, Canada. Las unidades son convencionales para cada curva registrada (Tixier, 1970).

Este tipo de ocurrencia mineral diseminada se explota más en minerales con contenido metálico, pues los yacimientos de contenido no metálico son más rentables cuando estos ocurren en volúmenes más grandes como en vetas o de forma masiva.

4.3. Minerales Metálicos de Forma Masiva.

Quizá esta forma de ocurrencia mineral sea de las más explotadas y estudiadas, pues al tener volúmenes muy grandes las leyes de estos minerales suelen ser bajas. Los yacimientos de forma masiva suelen estar acompañados de otras mineralizaciones como en forma diseminada y en vetas o vetillas como los, comúnmente presentes en los yacimientos del tipo sulfuro masivo vulcanogénicos (VMS).

Este tipo de ocurrencia mineral es posible estudiarla con mucho éxito utilizando registros resistivos, pues al no estar afectado por otros minerales y rocas, la respuesta medida de resistividad con estos registros será muy cercana a la del mineral estudiado.

Aunque es posible que el yacimiento tenga un cierto grado de porosidad y permeabilidad, pues al presentarse de forma masiva es más probable que existan estas características. Lo anterior podría hacer que el registro presente valores más altos de resistividad que la resistividad del mineral, pero teniendo esto presente se podría hacer la interpretación del yacimiento.

Un ejemplo donde se puede dar la mineralización en forma masiva es el caso de los yacimientos tipo VMS. Estos yacimientos se caracterizan por tener tres estados de depositación mineral en forma masiva. Los dos primeros estados representa la mayor parte de importancia económica de estos, aunque el tercero puede servir como guía para otras fuentes minerales, incluso también se podría explotar pero en casos especiales. El primer estado de depositación está compuesto principalmente por minerales metálicos como la esfalerita y la galena; estos dos minerales son fuente importante de Zinc y Plomo respectivamente, aunque se les puede asociar con elementos de mayor importancia económica como el Oro y la Plata, pero en menores cantidades. El segundo estado se compone de calcopirita en forma masiva. Por último, el tercer estado de depositación puede servir como fuente de Fierro, aunque en la actualidad ya no es la principal fuente de ese elemento.

En la figura 2.6 del capítulo 2 se tiene el modelo de un depósito VMS, en el cual se pueden observar los diferentes estados de depositación. Se puede tomar como base esa figura para explicar cuáles serían los registros geofísicos de pozo óptimos para identificar la mineralización.

Estos depósitos minerales se pueden identificar gracias a que los minerales metálicos presentes son muy conductores y al estar en forma masiva un registro de densidad sería óptimo en estos casos, pues al concentrarse la mineralización y conociendo la densidad de estos minerales, las mediciones de densidad resultarán muy certeras. En la figura 4.4 se muestra un registro de conductividad para un yacimiento de Níquel en forma masiva, se observa que cuando este ocurre de forma masiva se registra una conductividad más alta que cuando este se encuentra de forma diseminada.

Además del registro de densidad, para estos casos serían óptimos también los registros de resistividad, pues al no estar muy afectados por otro tipo de rocas como es el caso de los depósitos diseminados, la respuesta con estos registros sería en la mayoría de los casos únicamente por efecto del cuerpo mineral.

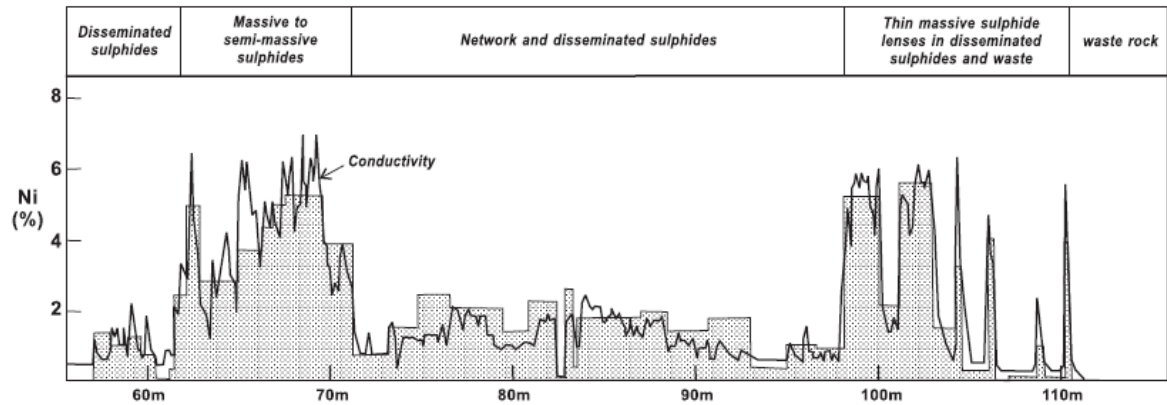


Figura 4.4. Gráfica de un yacimiento de Níquel de la mina Enonkoski, Finlandia, en la que se muestran los porcentajes de este a diferentes profundidades. La gráfica está superpuesta a un registro de conductividad (Fullagar, 1997).

Al estar compuestos estos yacimientos de forma masiva y con contenidos de esfalerita, galena, calcopirita y pirita, la interpretación que se les dé a las curvas de resistividad podrá compararse con los valores de resistividad teóricos de estos minerales y aunque es posible que existan algunas diferencias por el grado de impurezas que se tenga en el yacimiento, se tomará esto en cuenta en la comparación de las curvas obtenidas en los registros.

Aunque existen diferentes yacimientos que presentan mineralización en forma masiva, los registros de densidad y de resistividad no se verían muy afectados por impurezas como rocas y otros minerales, resultando en su óptima aplicación para este tipo de forma de ocurrencia mineral.

4.4. Minerales No Metálicos de Forma Masiva.

Los minerales no metálicos de forma masiva suelen presentarse en yacimientos de alta ley, esto es porque en comparación con los yacimientos metálicos son menos valiosos y se necesitan altas leyes para ser explotados. Por lo regular los minerales que se explotan pertenecen al grupo de las evaporitas y algunos minerales de origen sedimentario como la calcita, dolomita y cuarzo. La tabla 4.1 muestra algunos minerales estudiados con diferentes registros geofísicos de pozo.

Para este tipo de minerales las propiedades que más se van a medir son aquellas que corresponden a la densidad, tiempo de tránsito y radioactividad. Como se observa en la tabla 4.1 los registros usados corresponden a registros de densidad, registro sísmico, registro de neutrones y un registro de rayos gamma. Comúnmente para este tipo de yacimientos estos registros serían óptimos para su estudio.

		Mineral	Composition	Sp. gr.	Log density gm/cm ³	Average Δt $\mu\text{sec}/\text{ft}$	ϕ_N^* (GNT)	γ -ray deflection (API, $d=8$ inches)	Appar- ent K ₂ O%
Evaporites	Nonradioactive	Halite	NaCl	2.165	2.032	67	0	0	0
		Anhydrite	CaSO ₄	2.960	2.977	50	0	0	0
		Gypsum	CaSO ₄ ·2H ₂ O	2.320	2.351	52.5	49	0	0
		Trona	Na ₂ CO ₃ ·NaHCO ₃ ·2H ₂ O	2.120	2.100	65	40	0	0
	Radioactive	Sylvite	KCl	1.984	1.863	74	0	~500	63.0
		Carnallite	KCl·MgCl ₂ ·6H ₂ O	1.610	1.570	78	65	200	17.0
		Langbeinite	K ₂ SO ₄ ·2MgSO ₄	2.830	2.820	52	0	275	22.6
		Polyhalite	K ₂ SO ₄ ·MgSO ₄ ·2CaSO ₄ ·2H ₂ O	2.780	2.790	57.5	15	180	15.5
		Kainite	MgSO ₄ ·KCl·3H ₂ O	2.130	2.120	---	45	225	18.9
	Sedimentary minerals	Calcite	CaCO ₃	2.710	2.710	47.5	0	0	0
Dolomite		CaMg(CO ₃) ₂	2.870	2.876	43.5	4	0	0	
Quartz		SiO ₂	2.654	2.648	51.5	-4	0	0	
Sedimentary formations	Limestone	(e.g., when $\phi = 10\%$)	2.540	2.540	62	10	5-10	0	
	Dolomite	(e.g., when $\phi = 10\%$)	2.680	2.683	58	13.5	10-20	0	
	Sandstone	(e.g., when $\phi = 10\%$)	2.489	2.485	65.3	3	10-30	0	
	Shale			2.2-2.75	70-150	25-60	80-140	2-10	

Tabla 4.1. Característica de algunos minerales no metálicos comúnmente explotados en la industria minera (Tixier, 1970).

Para los minerales radioactivos del grupo de las evaporitas, los registros de rayos gamma tienen una respuesta característica. También es posible aplicar registros de espectroscopía de rayos gamma para conocer el contenido de Potasio, presente en minerales como la silvita, carnalita, polihalita y kainita.

Dado que estos minerales ocurren de forma masiva, comúnmente por la génesis que tienen suelen presentar un cierto grado de porosidad, por lo que aplicar registros de neutrones o sónicos, ayudarían a conocer tanto el grado de porosidad que tienen, como el tiempo de tránsito característico de estos minerales.

Al ser minerales no metálicos, los registros resistivos podrían ayudar a su identificación, sin embargo, dado que esto suelen presentar un cierto grado de porosidad y en ocasiones estos poros son llenados con líquidos como agua o hidrocarburos, esta propiedad se podría ver afectada, por lo tanto las mediciones hechas no corresponderían del todo al mineral estudiado.

La densidad es otra propiedad que puede ser identificada, pues al ocurrir de forma masiva la mineralización esta se puede leer fácilmente. En la figura 4.5 se muestra un registro de densidad y de rayos gamma, en el que se observan 3 litologías halita, anhidrita y lutita.

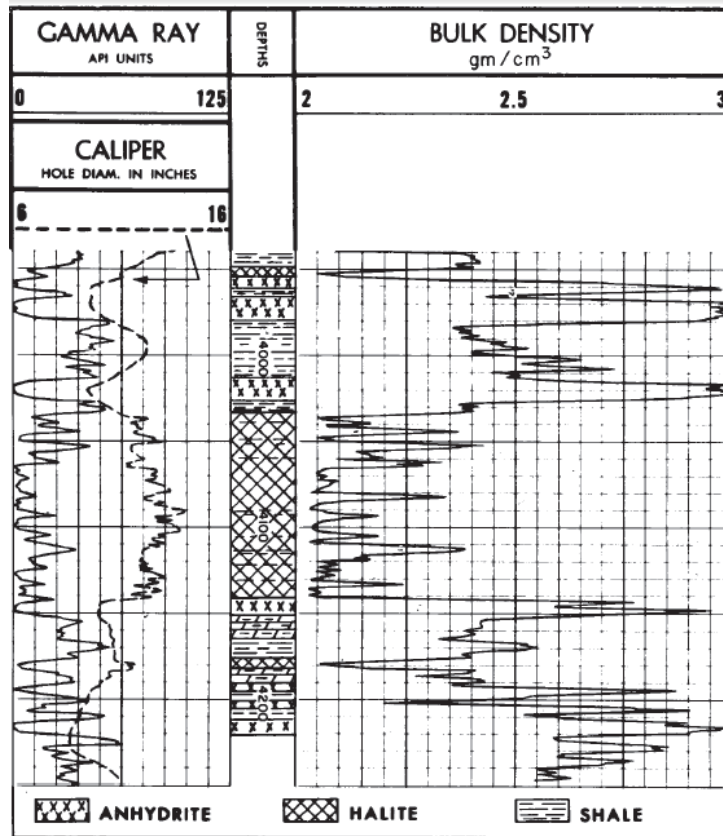


Figura 4.5. La gráfica presenta 3 diferentes curvas correspondientes a los registros de rayos gamma, densidad y caliper (Tixier, 1970).

Este tipo de mineralizaciones son quizá la forma en que más ocurren en capas de carbón. Los estratos de carbón son formas minerales cuya génesis depende del depósito de grandes cantidades de vegetación en periodos de tiempo geológico relativamente cortos y cuya extensión suele ser de varios kilómetros.

Para este tipo de yacimientos existen una variedad de registros que pueden ser aplicados para la identificación del mineral. Entre los registros que mas podrían proporcionar información de estos yacimientos se encuentran los registros sísmicos (tiempo de tránsito), de resistividad, de densidad y de rayos gamma.

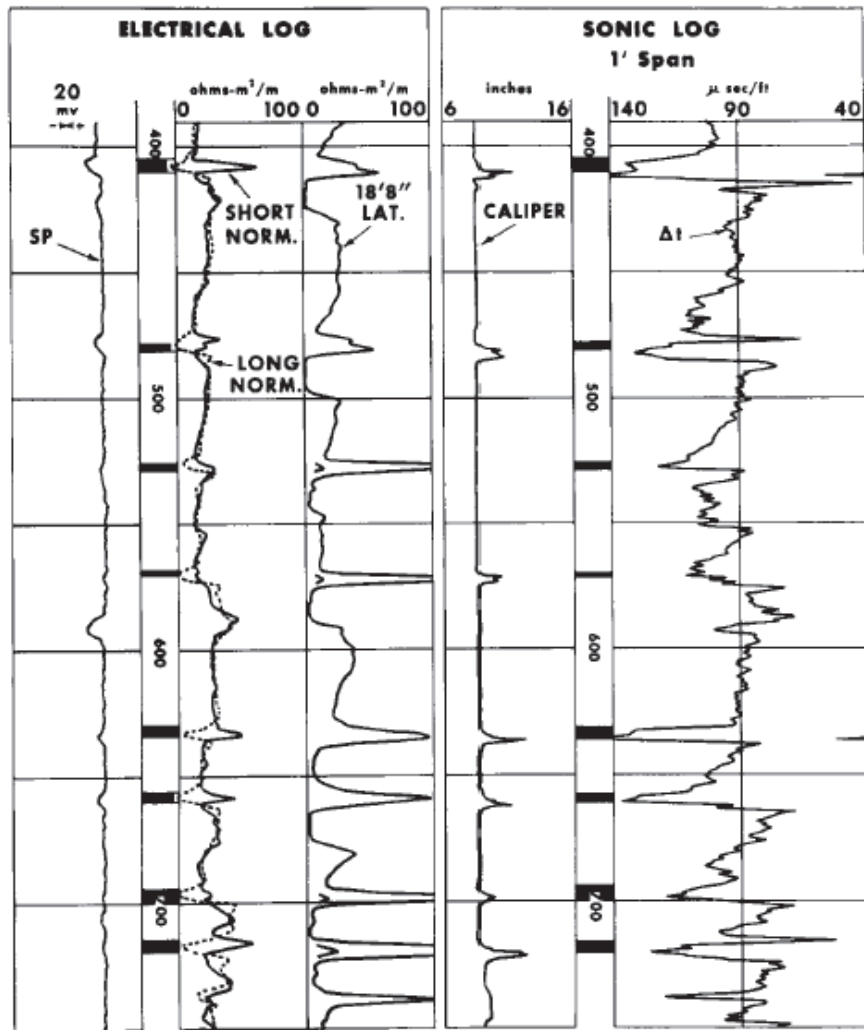


Figura 4.6. Respuestas típicas causadas por estratos de carbón en registros de resistividad y sónico, en una mina de carbón en Kentucky, EU (Tixier, 1970).

Estos yacimientos tienen características además de físicas y químicas, también petrofísicas, pues al depositarse en forma de estratos estos suelen tener valores contrastantes de porosidad y permeabilidad. En la figura 4.6 se pueden observar los registros resistivos y sónico, el registro resistivos presenta una respuesta característica para lo estratos de carbón, podría pensarse que los valores corresponden a ruido de la herramienta pero al estudiarse con otros registros se observa que se trata de estratos de carbón.

Por tanto el registro sónico, proporciona información de porosidad como de tiempo de tránsito; por lo que son aplicados con éxito en estos yacimientos. También los registros resistivos son óptimos en estos casos, pues al ser un mineral que presenta altos valores de resistividad, este puede ser bien identificado en las curvas de resistividad.

El registro de densidad (figura 4.7), es también ampliamente utilizado, pues como se observa la densidad disminuye en el estrato de carbón, mostrando valores característicos.

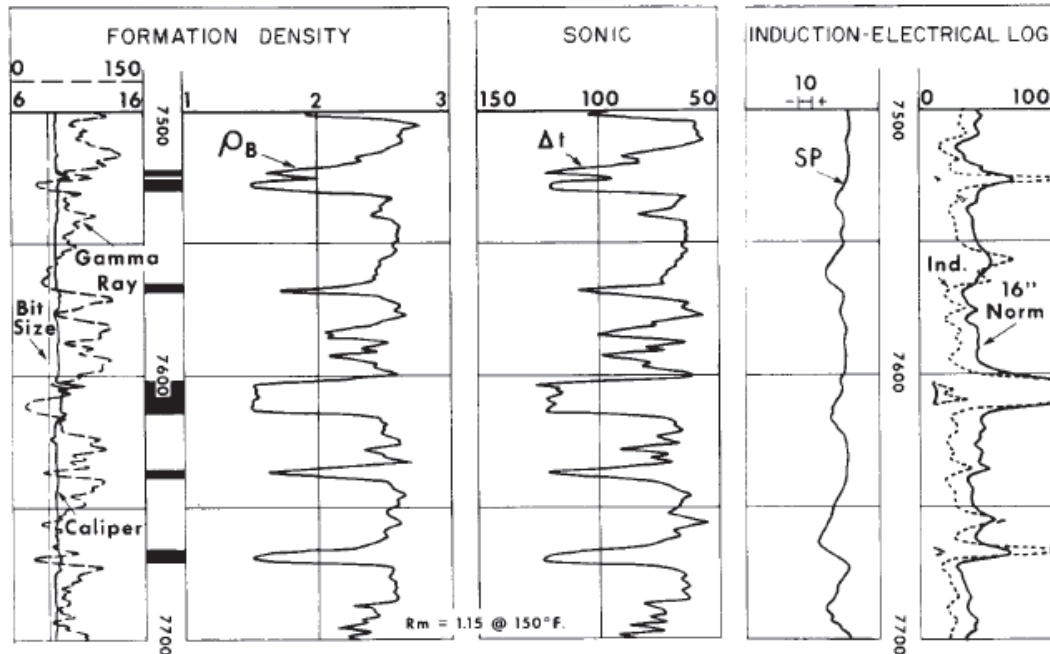


Figura 4.7 Registros de densidad, resistividad y sónico usados en una mina de carbón en Colorado (Tixier, 1970).

4.5. Minerales Metálicos en Vetas.

Muchos de los yacimientos minerales debido a que son el producto de un proceso magmático, presentan estructuras geológicas como fallas y fracturas; estas estructuras representan espacios abiertos en el yacimiento. Por otro lado para que exista la mineralización se tienen que tener algunas condiciones de presión, temperatura, espacio y fluidos mineralizantes, donde los espacios abiertos suelen ser buenos sitios para que exista la mineralización.

Las fallas y fracturas son rellenas por diferente minerales que van en solución, en ocasiones este relleno es un fluido mineralizante que contiene minerales de interés económico. Cuando se habla de un yacimiento VMS es posible encontrarse con familias de vetas pequeñas conocidas como *stockwors*, en ellas se encuentran minerales con contenido de Zinc y Plomo. Otros yacimientos como los hidrotermales, como se vio en el capítulo 2, presenta estructuras mas grandes de mineralización, que dependen de la profundidad a la que mineralizan estos cuerpos.

Para estudiar estos yacimientos es necesario conocer tanto la ubicación de las fallas y fracturas como de la dirección que estas tengan, pues al encontrar la mineralización será necesario hacer un seguimiento de esta hasta un punto donde sea explotable. Para llevar a cabo estos estudios será necesario: identificar el mineral que está presente en las vetas, e identificar el rumbo y echado de la veta donde se encuentra la mineralización.

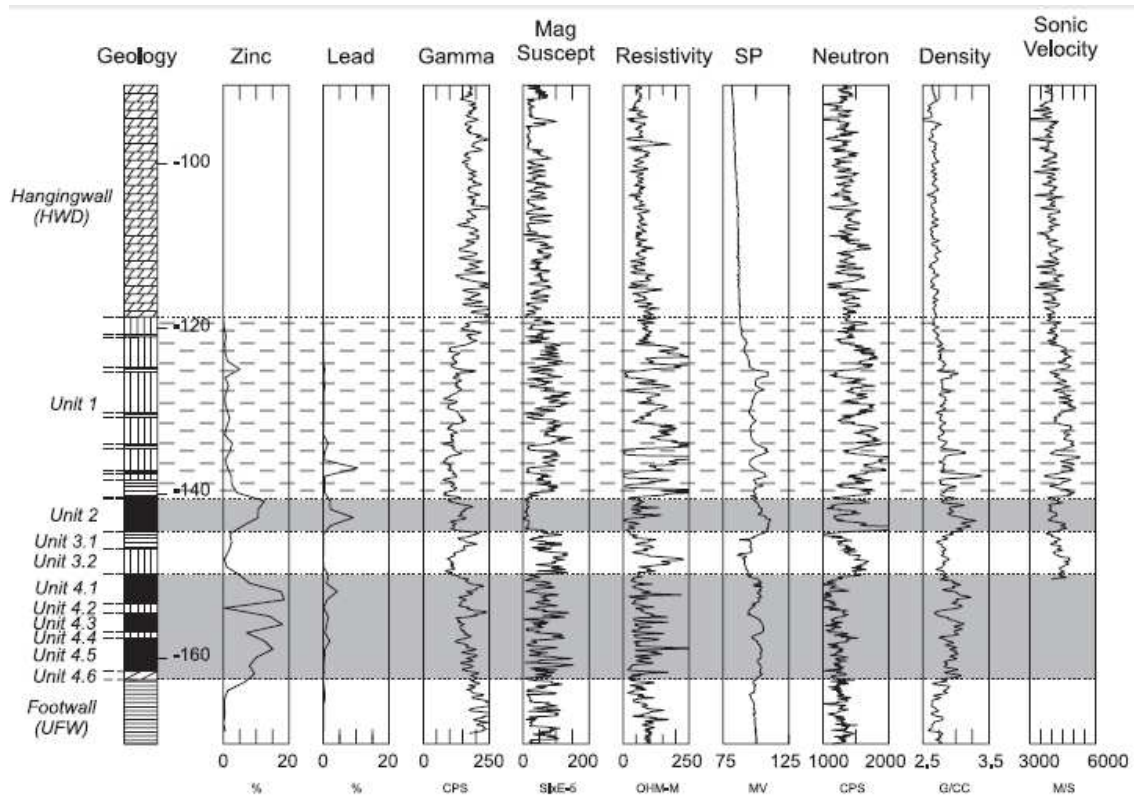


Figura 4.8. Diferentes registros geofísicos aplicados a un depósito de Zn, la mineralización se encuentra en un forma de vetas (Mutton, 1997).

Para identificar el mineral que está presente en las vetas, dado que se trata de minerales metálicos, los registros óptimos para su identificación serán aquellos que nos den información del mineral, como es el caso de los registros resistivos y los registros de densidad. Sin embargo, para algunos casos donde las vetas sean pequeñas los registros de resistividad y densidad podrían dar valores que pudiera parecer ruido por las dimensiones que tienen esas vetas. En esos casos sería muy útil tomar algunas imágenes de pared pozo, ya sea utilizando imágenes resistivas o imágenes sínicas; con esto se puede tener mayor seguridad que se trata de vetas y no de ruido en el instrumento. La figura 4.8 muestra un registro aplicado a una mina de Zinc en Australia.

Una vez identificada la mineralización con los registros anteriores, será necesario con un registro de echados, medir el rumbo y echado que tiene la veta mineralizada. La figura 4.9 muestra un registro de echados aplicado a un depósito de Uranio, en este se encuentra los valores de inclinación (echado) de estructuras estudiadas en el yacimiento con rangos de inclinación de de 0° a 40°.

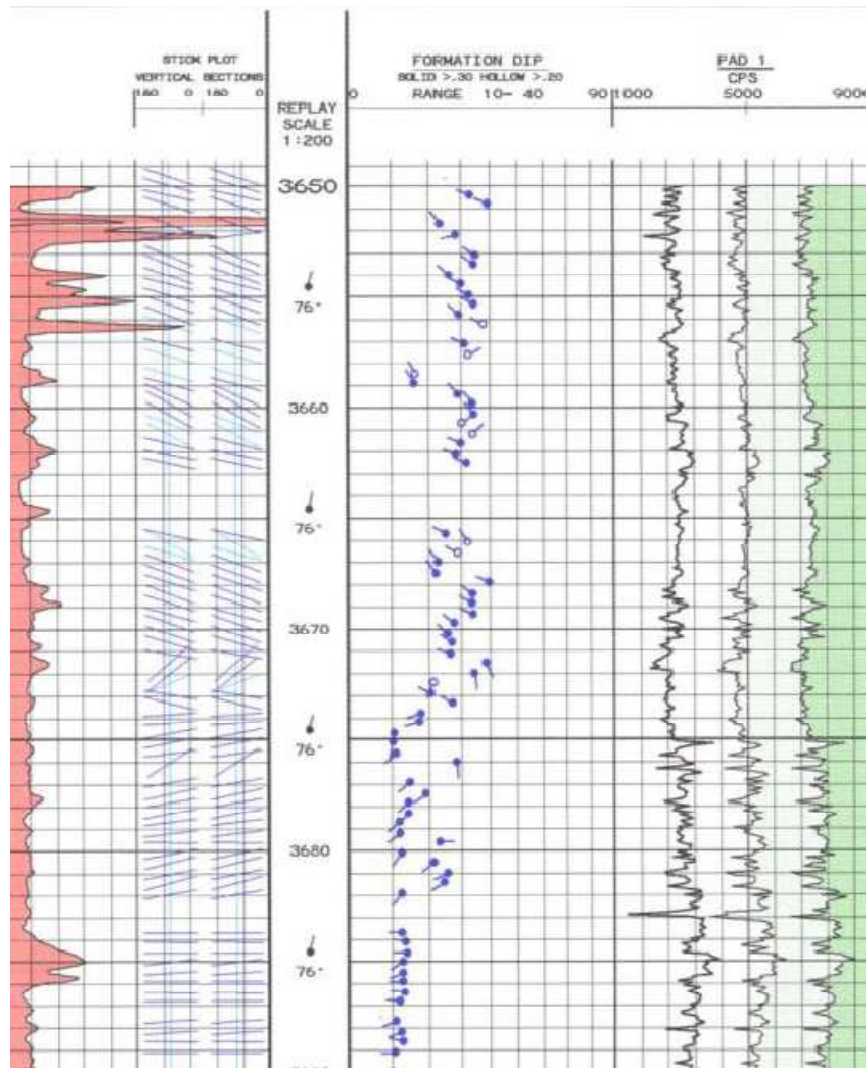


Figura 4.9. Registro de echados con un registro de gamma, en el que se define un depósito de Uranio asociado a un conglomerado arrecifal (Wireline workshop, 2012).

Capítulo 5. Respuesta de los Registros Geofísicos de Pozo en Yacimientos Minerales.

Algunos registros geofísicos de pozos usados para el estudio de un yacimiento mineral han sido aplicados en minas de diversas partes del mundo, aunque el interés en algunos casos fue el de medir la respuesta que tenían a yacimientos ya conocidos, en otros casos fue para la exploración de nuevos yacimientos minerales.

En este capítulo se presentan casos históricos y su interpretación. Generalmente se tienen pocas curvas, como en el caso de los minerales no metálicos en forma masiva; esto es porque en ocasiones cuando se utilizan registros geofísicos de pozo en un estudio minero, sólo se quiere confirmar la mineralización o ubicarla espacialmente y para ello sólo se utilizan algunos registros específicos.

La interpretación que se les da a los registros mostrados, se basa en las tablas de propiedades físicas de los minerales y en el comportamiento que tienen las curvas de registro.

Dentro de los registros geofísicos de pozo más empleados se encuentran los registros resistivos, acústicos, rayos gamma, densidad, neutrón, espectroscopía de rayos gamma, caliper y susceptibilidad magnética.

Cuando se utilizan registros geofísicos de pozo en la industria petrolera, comúnmente se hacen correcciones a los valores medidos, tanto por efectos ambientales como por efectos geológicos, y posteriormente se hace la interpretación con valores más cercanos a la realidad. Sin embargo, para fines prácticos en los estudios minerales estos efectos, aunque están presentes, no son significativos y por tanto no serán mencionados en este estudio.

Minerales Metálicos Diseminados.

Se presenta el caso de un yacimiento de minerales metálicos en forma diseminada en Victoria Creek, Canadá y la interpretación con base en las curvas de registros geofísicos obtenidas en ese yacimiento mineral. A continuación (fig. 5.1) se muestra el registro, en el que se observan curvas de Torio (eTh), Uranio (eU) y Potasio (K), densidad, polarización inducida (IP), resistividad, potencial natural (SP) y susceptibilidad magnética (MS).

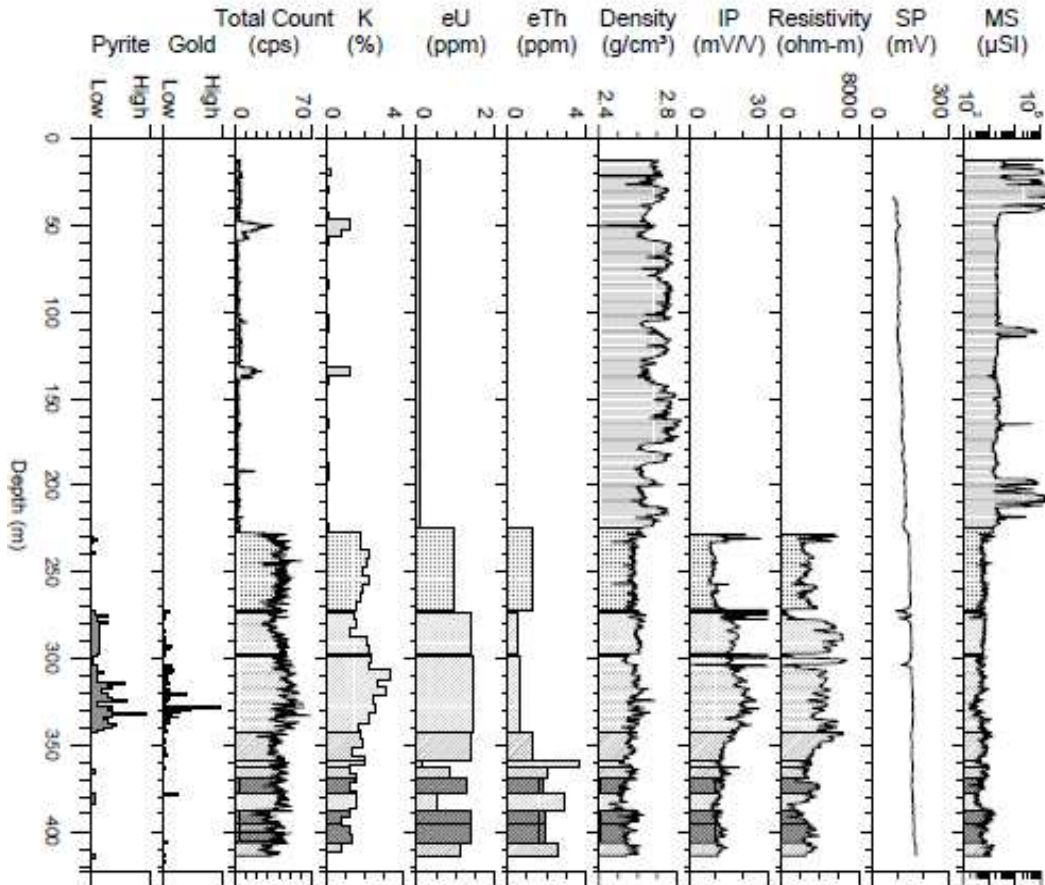


Figura 5.1. Registro geofísico de pozo de un depósito mineral en Victoria Creek, Canadá (Pflug, 1996).

Se presentan curvas de contenido de pirita y de oro, por lo tanto se puede basar la interpretación con estos datos, a partir de los registros. Esos valores se conocen de resultados obtenidos por otros estudios, pues en muchos casos los registros que se tienen de yacimientos minerales no son aplicados directamente en el estudio de nuevos yacimientos, sino que son aplicados al estudio de un yacimiento conocido para documentar la respuesta que tienen los mismos.

Se sabe de estudios previos que este yacimiento está asociado a alteraciones hidrotermales, en las que se incluyen: sericitización, feldespatización, piritización, carbonatación y hematización. También se tiene registrado que el tipo de roca que sirve de huésped para esta mineralización es del grupo de las rocas ígneas volcánicas, específicamente un tipo félsica vulcanoclástica.

Teniendo en cuenta la información anterior, se puede interpretar la respuesta de algunos registros geofísicos, como el registro de rayos gamma naturales y el de espectroscopía de rayos gamma, con valores característicos de contenido de Potasio, para la sericitización y feldespatización; cambios en la cargabilidad en el registro de

polarización inducida (IP) por el efecto de la pirita, presente en la piritización; esta propiedad define el contenido de pirita y oro diseminados.

A las profundidades de 270 m a 340 m se tiene el conocimiento de que existe un contenido considerable de oro y pirita. Haciendo esta observación se puede pasar a las curvas que pueden proporcionar información de este yacimiento.

Analizando las curvas sobre el contenido de Potasio, Uranio y Torio, ya que como se mencionó anteriormente existen alteraciones con contenido de Potasio; por lo tanto se puede observar que este registro presenta un aumento de 230 m a 410 m, las curvas de equivalente de Uranio y Torio también se tienen respuesta a estas profundidades por el efecto de mineralización. Se observa que en otro rango de profundidades estas curvas no presentan aumento considerable en el contenido de Th, U, y K.

Lo anterior sirve de guía para continuar el análisis, sin embargo, no es suficiente para dar una interpretación, pues aunque se tiene información que sirve para identificar una posible alteración hidrotermal aún es necesario hacer un análisis mayor.

En este caso la curva de densidad pueden servir para identificar la alteración y no precisamente para la mineralización, que como se sabe se encuentra de forma diseminada. Se puede observar un cambio en la densidad debida a la alteración hidrotermal a las profundidades de entre 230 m y 410 m; en ese intervalo se observa un pequeño incremento en los intervalos donde se reporta el mineral metálico diseminado y aunque no es la densidad del oro, el valor es mayor al que se observa en ese intervalo.

De las curvas analizadas se interpreta un cambio de litología a las profundidades de 230 m a 410 m. En la curva de polarización inducida (IP) por el efecto de las alteraciones hidrotermales y concretamente de la piritización, se puede apreciar que la cargabilidad también presenta cambios en las mismas profundidades en las que se observó un aumento de contenido de Potasio, siendo mayor donde hay más pirita.

Se puede concluir que a las profundidades de 230 m a 410 m existe un cambio de litología, aumento en el contenido de Potasio e incremento en la cargabilidad del yacimiento. Esto es indicador de alteraciones de sericitización, feldespatización y piritización. Como se vió en capítulos anteriores en este tipo de alteraciones es común encontrar cantidades considerables de oro, cuya ocurrencia es de forma desminada.

Minerales no Metálicos en Forma Masiva.

Un ejemplo de minerales no metálicos en forma masiva son los yacimientos de evaporitas como halita, anhidrita y yeso; dado su valor económico son explotados

cuando se presentan en yacimientos con alta ley, en este caso de forma masiva. En la figura 5.2 se muestra un registro geofísico de pozo para un yacimiento de halita y anhidrita.

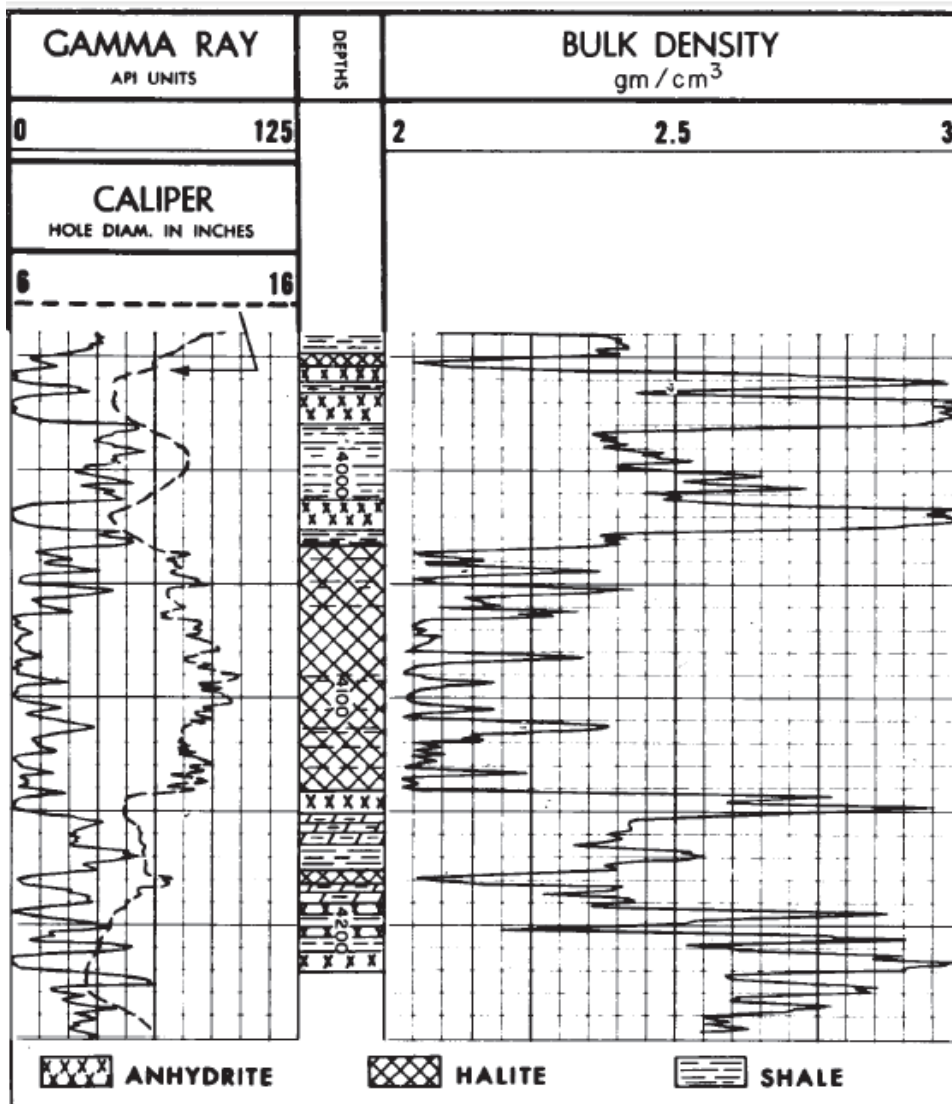


Figura 5.2. Registro geofísico de pozo en el que se muestran 3 curvas: diámetro de pozo (caliper), rayos gamma naturales y densidad (Tixier, 1970).

En el registro de rayos gamma mostrado en el primer carril se observa que los valores de API medidos son bajos en el intervalo que va de 4,030 ft a los 4,140 ft; además hay que considerar que existen diferentes evaporitas algunas emiten radioactividad y otras no. En este caso tenemos la presencia de un cuerpo no radioactivo.

A la misma profundidad donde el registro de rayos gamma detectó poca actividad radioactiva, podemos analizar en conjunto el registro de densidad. En este registro se

observa que hay valores de densidad de aproximadamente 2.05 g/cm^3 , por lo que se trata de un mineral de baja densidad.

Se trata de un mineral no metálico del grupo de las sales, fue identificado como halita con valores de densidad de aproximadamente 2.03 g/cm^3 . Por otro lado se pudo identificar también capas de anhidrita en la parte superior de donde se identificó la halita y a otras profundidades.

Otro ejemplo, es una mina de carbón en Colorado, se pueden interpretar ciertas características que pueden resultar evidentes en estos yacimientos. El registro mostrado en la figura 5.3, presentan diferentes curvas: caliper, rayos gamma naturales, densidad, sónico, potencial natural, resistividad normal corta e inducción eléctrica.

Las curvas de caliper y rayos gamma pueden ayudar a identificar algunos límites donde existen las capas de carbón. Se observa que cuando el registro pasa por donde se encuentra el carbón, la curva de rayos gamma tiende a moverse hacia la izquierda y se puede interpretar como una formación permeable. Las capas de carbón al formarse por procesos sedimentarios repentinos, presentan un cierto grado de porosidad, identificada por los registros mencionados.

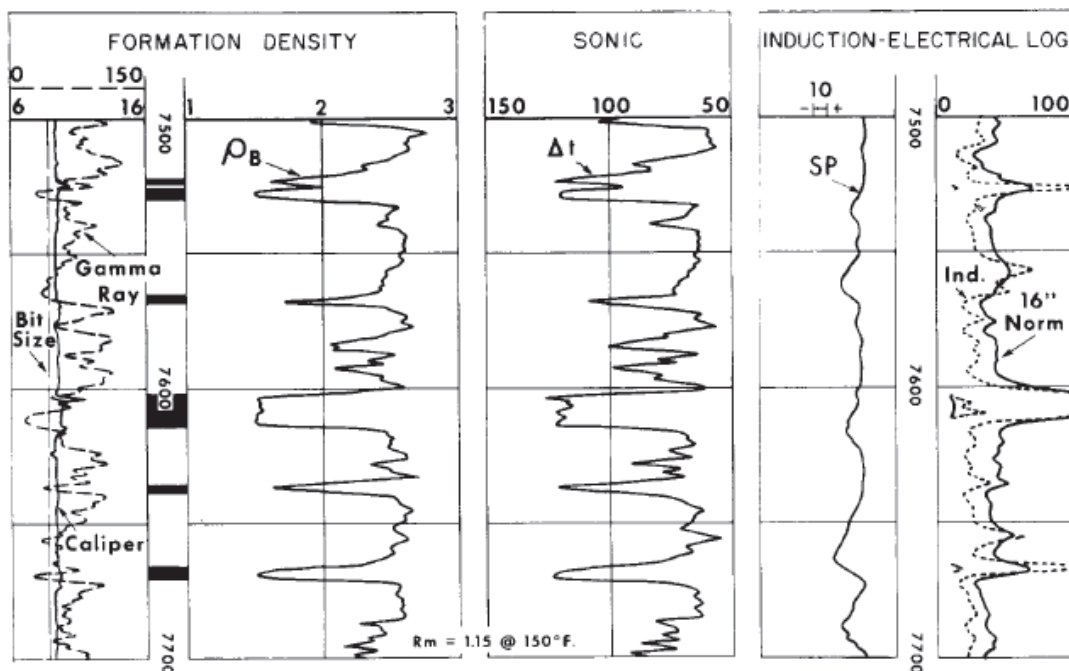


Figura 5.3. Registros geofísicos de pozo en una mina de carbón en Colorado, unidades convencionales (Tixier, 1970).

Para el carbón existen algunas clasificaciones que dependen del contenido de material volátil presente en este, por ello tiene valores de densidad variables dentro de un rango de entre 0.7 g/cm^3 a 1.8 g/cm^3 . En el registro de densidad se observa que la curva al pasar por 7,525 ft presenta valores de densidad entre 1.5 g/cm^3 y 1.6 g/cm^3 . Esto quiere decir que el yacimiento presenta capas de carbón con valores de densidad bajos, así como un medio permeable, que en el caso del carbón es común encontrar estas características.

Haciendo un análisis de la curva de tiempo de tránsito, observamos que los valores aumentan a 125 y 130 $\mu\text{s/ft}$ cuando pasa por la misma profundidad. Para estratos de carbón estos valores son comunes, pues al ser un medio poroso la curva de tiempo de tránsito tiende a presentar valores altos.

Por último, analizaremos la curva de resistividad, considerando que el carbón es un mineral altamente resistivo, por lo tanto, donde se observe que la curva del registro e inducción eléctrica se mueva hacia la derecha, quiere decir que existen valores de resistividad altos. A los 7,525 ft se observa que la curva de resistividad profunda aumenta drásticamente. Estos mismo aumentos en la resistividad se repiten a otras profundidades.

Juntando la información anterior podemos decir que existen límites de carbón en diversas profundidades: 7,525 ft, 7,555 ft, 7,610 ft, 7,635 ft y 7,670 ft. Las curvas antes mencionadas presentan estos mismo valores a en dichas profundidades.

Minerales Metálicos en Forma Masiva.

Posiblemente los yacimientos que más fácilmente se podrán identificar con registros geofísicos de pozo, son aquellos que se encuentren de forma masiva y con minerales metálicos. Esto es porque las propiedades de los minerales metálicos son más evidentes en las curvas medidas. En la cuenca de Sudbury, Canadá, se aplicó un registro geofísico de pozo para medir diferentes propiedades de un yacimiento del tipo sulfuro masivo.

Las curvas presentes en este registro corresponden a rayos gamma, resistividad (conductividad), polarización inducida, susceptibilidad magnética y densidad. Analizando estas curvas y observando su comportamiento se puede interpretar de qué mineral se trata.

Se tienen estudios de la cuenca de Sudbury, de los que se conoce que esta cuenca presenta una mineralogía mayormente con contenido de Níquel y Cobre. Partiendo de esta información se puede analizar el registro geofísico de pozo obtenido en esta región (figura 5.4).

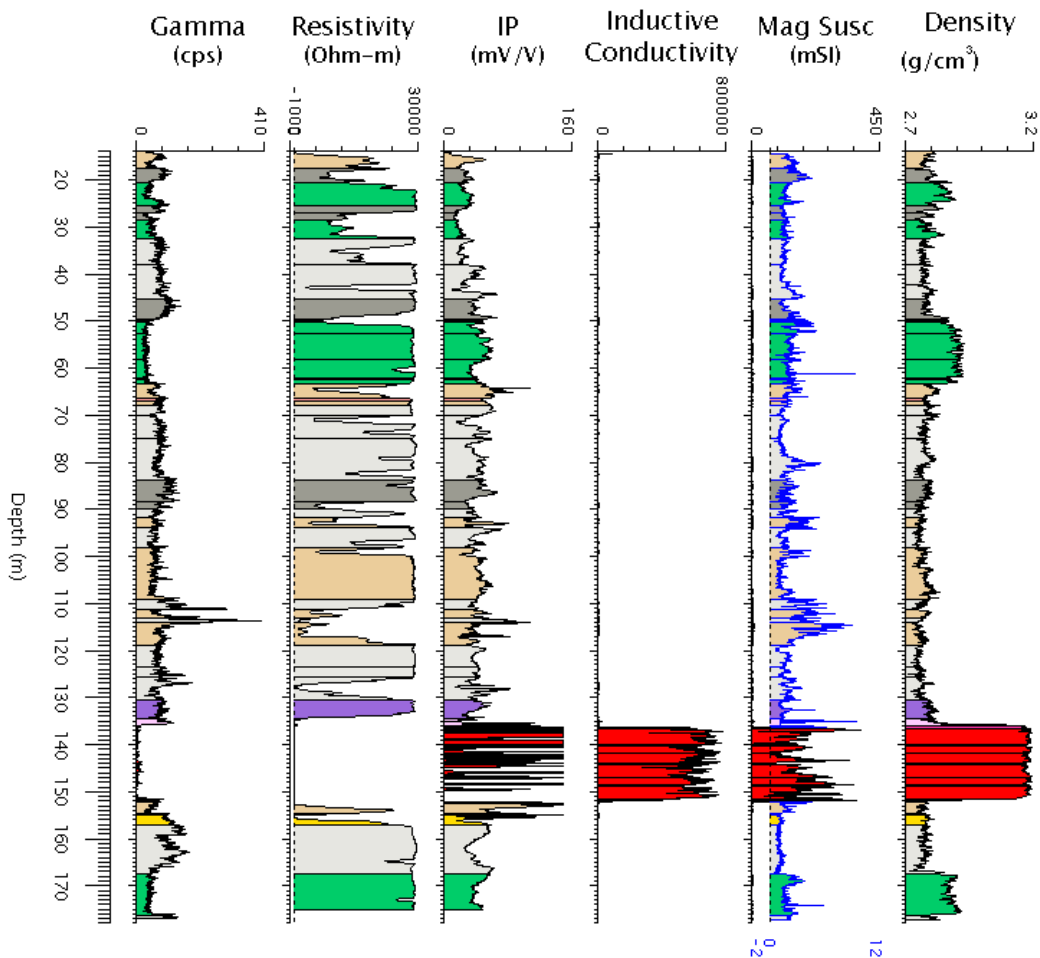


Figura 5.4. Registro geofísico de pozo aplicado en la cuenca de Sudbury, Canadá. Se muestran algunas litologías donde lo más destacado es la parte en rojo, correspondiente a un sulfuro masivo de Níquel y Cobre (King, 2012).

Analizando las curvas de izquierda a derecha, la primera curva de rayos gamma naturales no muestra actividad aparente en el conteo de partículas radioactivas, dado que minerales como el níquel y cobre no son minerales que emitan radiactividad. Esta propiedad indica que el contenido mineral a la profundidad de 135 m a 155 m es un mineral no radioactivo.

Continuando el análisis, la curva de resistividad mide valores extremadamente bajos a la misma profundidad donde no existía actividad aparente de radioactividad. Consecuentemente en la curva de conductividad se puede observar que los valores aumentan considerablemente al igual que los valores de polarización inducida. Esto indica que el contenido mineral en esta parte del yacimiento es metálico.

Finalmente analizando la curva de densidad esta presenta valores altos. Dado que las herramientas convencionales tienen un rango de medición para cada curva, pues están calibradas en rocas sedimentarias que comúnmente son utilizadas en exploración petrolera; los valores de densidad no rebasan los 3.2 g/cm^3 , y el cuerpo analizado excede estos valores, limitando de cierto modo una identificación mineral precisa. Sin embargo, esta curva resulta ser útil si en conjunto con las otras curvas en el intervalo donde hace el análisis.

Tomando la información de todas las curvas, se observa que el cuerpo mineral se presenta a una profundidad de entre 135 m a 155 m, pudiéndose clasificar como un cuerpo masivo por el espesor que tiene. Las curvas de resistividad y radioactividad son muy bajas, que para la mayoría de los metales es lo común; es un cuerpo conductor y de densidad mayor a los 3.2 g/cm^3 . Con estos valores y con la información que ya se tenía se puede concluir que el cuerpo mineral corresponde al yacimiento de Níquel y Cobre, que en estudios previos había considerado su existencia.

Minerales Metálicos en Vetas.

Los minerales metálicos en forma de vetas son comunes en muchos yacimientos minerales, debido a las condiciones en las que se forman. Este tipo de mineralización puede ser identificada por la mayoría de los registros geofísicos de pozo, ya que la respuesta que tienen es característica.

Un ejemplo se muestra en la figura 5.5, donde se aplicaron registros geofísicos de pozo en una mina de Zinc en Australia. En este registro se midió la respuesta que se tenía a ciertas propiedades de este metal como radioactividad, susceptibilidad magnética, resistividad, y densidad. Se aplicaron también un registro de neutrones, potencial natural y sónico, que ayudaron en la interpretación. Se identificaron también otros minerales como Plomo y en algunas partes Plata, pero no en la misma forma de ocurrencia, por lo tanto sólo se mencionarán y no se aplicará un análisis en la interpretación.

Se presentan dos curvas de contenido mineral, correspondientes al contenido de Plomo y Zinc, esta interpretación se hizo con los datos que ya se conocían sobre el yacimiento y los datos medidos con los registros geofísicos de pozo. Los minerales presentes corresponden a esfalerita, galena y piritita. Se observa que para la curva de Zinc y Plomo los valores se dan en porcentaje, esto dado que la mineralización en la veta no está compuesta completamente de esfalerita, galena o piritita, sino también puede estar presente algún material sedimentario u otro tipo de roca.

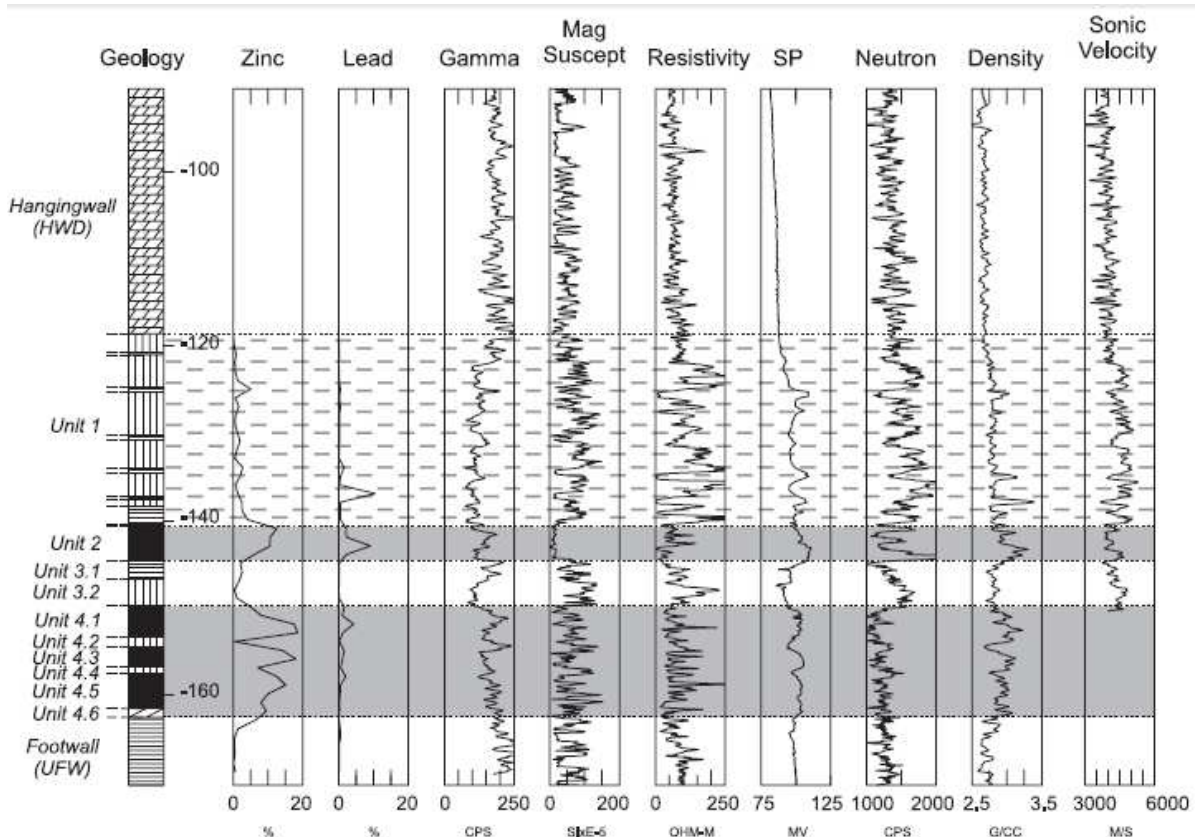


Figura 5.5. Registro geofísico de pozo aplicado a un depósito de Zinc en Queensland, Australia (Mutton, 1997).

Analizando la unidad 2, se puede ver que tanto las curvas de susceptibilidad magnética como de resistividad presentan valores muy bajos. Esto nos dice que existe un material conductor y que es poco susceptible a ser magnetizado.

Con la información anterior se podría definir a que profundidad se encuentra la mineralización, pero se sabe que este yacimiento está formado por un grupo de vetas, por lo tanto si se quiere identificar donde se encuentran las otras vetas será necesario analizar con más detalle todo el registro.

A otras profundidades ya no tenemos el mismo comportamiento en las curvas de resistividad y susceptibilidad magnética, esto se puede deber a que el contenido de Plomo disminuyó, dando como resultado un aumento en la curva de resistividad, pues el Plomo es menos resistivo que el Zinc y al disminuir el contenido de Plomo aumentaría la respuesta en el registro de resistividad.

Observando la curva de densidad, se pueden ver incrementos a profundidades de los 150 m a los 165 m, que se pueden comparar con las curvas de resistividad y de susceptibilidad magnética, y si presenta un comportamiento de baja resistividad y baja susceptibilidad magnética es posible encontrar la mineralización.

Se observa que estas características se cumplen en tres rangos de profundidad de: 150 m a 153 m, de 154 m a 156 m y de 157 m a 163 m. Por lo tanto se interpreta que existen 4 vetas cuyo contenido de Zinc o esfalerita es considerable.

Minerales no Metálicos Diseminados.

Como se vió anteriormente este tipo de depósitos minerales aún no presenta gran importancia económica y por tanto los datos que se tienen son escasos. Sin embargo, algunos estudios aplicados a depósitos de minerales no metálicos radioactivos revelan cierta información que puede ser captada por los registros geofísicos de pozo.

Un ejemplo es el registro mostrado en la figura 5.6, en este se buscaba identificar minerales no metálicos como la carnalita y la silvita. Se presenta una comparación entre la interpretación de las curvas medidas y de un núcleo de barrenación en este pozo.

Este tipo de yacimiento es del grupo de las evaporitas radioactivas, por lo tanto el registro de rayos gamma presenta correlación con el contenido de silvita. También se aplicaron registros de neutrones y sónico, cuyo tiempo de tránsito de la carnalita es mayor al de la silvita y por tanto puede ser identificado en esta curva.

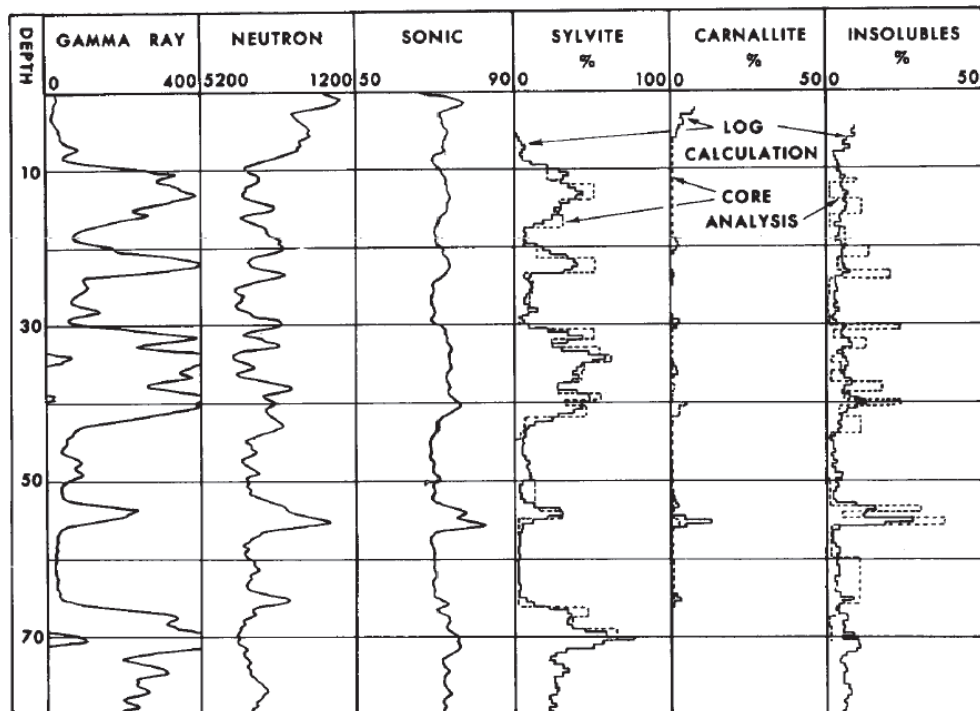


Figura 5.6. Registro geofísico de pozo aplicado a un yacimiento de silvita y carnalita en la formación de evaporita Prairie, unidades convencionales para cada curva registrada (Tixier, 1970).

La curva más importante en este registro es la de rayos gamma, se sabe que el yacimiento está compuesto de silvita y carnalita, pero es necesario identificar donde se acumula la mayor cantidad de este mineral, pues al darse de forma diseminada es más difícil su localización. En la curva de rayos gamma se pueden observar algunos picos de actividad a diferentes profundidades. Estos picos representan la ubicación de la silvita y la carnalita, los dos minerales son radioactivos, pero si se requiere localizar donde existe más contenido de carnalita es necesario interpretar la curva de tiempo de tránsito.

La carnalita se puede identificar por un aumento el tiempo de tránsito y en la curva de neutrones. Las profundidades que presentan estos aumentos en las curvas son a los 2 m, 53 m, y 65 m. Si se requiriera localizar donde se concentra la mayor cantidad de carnalita sería en estas profundidades.

Capítulo 6. Conclusiones.

Como en otras áreas de aplicación de Ciencias de la Tierra, como en petróleo, hidrogeología, geotermia, geotecnia y ambiental, los registros geofísicos de pozos son un complemento final de la exploración, con métodos geofísicos indirectos y de superficie. Una vez seleccionada la oportunidad exploratoria, se deberían perforar uno o varios pozos a la profundidad de acuerdo al yacimiento buscado, basándose en la Geología del area. En este momento los registros geofísicos son muy valiosos para caracterizar el yacimiento mineral y definir los sitios con mayor concentración. Una vez localizado el yacimiento se pueden seguir tomando registros en barrenos con diferentes direcciones en la mina, para optimizar la explotación, sobre todo en el caso de vetas.

Propiedades de los minerales que más van a responder a los registros geofísicos, resistividad (conductividad y potencial natural), densidad, radioactividad (rayos gamma naturales, espectroscopía de rayos gamma naturales, neutrón y geoquímico), velocidad de ondas mecánicas (sónico), susceptibilidad magnética y cáliper. Aunque existen más registros de mucha utilidad para los estudios de un yacimiento mineral, estos suelen ser más específicos para yacimientos más complejos.

Se pueden usar los registros geofísicos de pozo para más de un objetivo, se puede conocer más de una propiedad física con una sola corrida.

Los límites de mineralización son uno de los principales objetivos en la exploración de yacimientos minerales usando registro geofísicos de pozo, algunos registros como rayos gamma naturales, sónicos, densidad y resistivos, ayudan en el alcance de este objetivo.

Entre los registros mayormente usados en minería, ya sea para hacer un cálculo de reservas, una correlación pozo a pozo, o incluso un zoneamiento del yacimiento, se encuentran los registros conductivos, registro de rayos gamma naturales, y susceptibilidad magnética; este último cuando el yacimiento mineral es predominantemente no metálico.

Para seleccionar el tipo de registros óptimo a utilizar para identificar un determinado mineral, se debe determinar cual es la propiedad o propiedades físicas y químicas más características de ese mineral y su contraste con las propiedades de la roca encajonante.

Una vez determinada la propiedad física más característica y/o contrastante de un mineral, se puede identificar mediante registros geofísicos de pozos que midan esa

propiedad física, independientemente de si el mineral está presente en forma de vetas, masivo o diseminado; ya sea metálico o no metálico.

Aplicando un registro geofísico de pozo en un yacimiento mineral se puede describir no sólo el tipo de mineral que existe en el yacimiento, sino también el volumen en porcentaje que este ocupa.

Una de las propiedades físicas de mayor importancia en la exploración minera es la densidad, actualmente la mayoría de las compañías toman núcleos de barrenación para conocer esta propiedad. Sin embargo con los registros geofísicos de pozo es posible conocerla directamente sin necesidad de análisis de núcleos, cuya recuperación es más costosa y tardada.

Haciendo una comparación con los núcleos de barrenación (principal forma de estudiar los yacimientos minerales) estos suelen tener problemas en algunos yacimientos con contenido de azufre, pues este al estar en contacto con la barrena se puede fracturar a diferencia de los registros geofísicos de pozo que al ser usados directamente en el yacimiento no son destructivos y se puede obtener la información sin dañar al mineral estudiado.

Algunas de las propiedades medidas con registros geofísicos de pozo y las medidas de las muestras del yacimiento en laboratorio pueden variar un poco. Esto por los efectos ambientales como son: el diámetro del pozo, filtrado de lodo, espesor de la zona mineralizada, posición de la sonda y densidad del lodo de perforación. Por lo que es importante hacer correcciones a las curvas de registros antes de interpretarlas.

El principal interés de usar los registros geofísicos de pozo en la industria minera es: hacer una interpretación mineralógica, delimitar cuerpos, hacer una estimación de reservas y caracterización geotécnica.

Tomando un registro geoquímico (ECS ó GEM) se puede determinar la ley de un determinado mineral y su distribución exacta a lo largo del barreno, sin necesidad de hacer análisis de núcleo que para hacer ensayos para algún mineral son mas costosos. Este registro permitiría un cálculo de volúmenes más exacto, pues el análisis de núcleo es muy puntual; ya que de todo un núcleo sólo se ensayan algunos segmentos.

Una limitación para tomar registros en muchas de las barrenaciones en minería es la dirección de las perforaciones, ya sea horizontales o hacia arriba en un túnel. Si la sonda no pueda moverse por gravedad, es necesario moverla con tubería o utilizar otro sistema adicional.

La mayoría de los yacimientos minerales son producto de una serie de procesos en los que interviene la intrusión de un material magmático a una secuencia estratigráfica sedimentaria. Teniendo esto presente, si se quiere estudiar un yacimiento mineral,

debemos de tener en cuenta las alteraciones producidas, pues estas servirían de guía en la identificación de algún cuerpo mineralizado. Los registros geofísicos de pozo utilizados para estudios de exploración de yacimientos minerales muchas veces no se enfocan en identificar la mineralización, en ocasiones es necesario estudiar parte del yacimiento, como son las alteraciones hidrotermales, y con un análisis posterior identificar la mineralización.

En muchos casos el objetivo de aplicar registros geofísicos de pozo en un yacimiento mineral es el documentar la respuesta que tienen estos en un yacimiento ya conocido y comprar los resultados en un nuevo sitio.

En cuanto a las herramientas que existen actualmente para tomar registros geofísicos de pozo, es importante señalar que aunque se pueden aplicar en minería, el rango de valores para las mediciones está restringido para varios de los registros. Esto imposibilita dar una interpretación exacta, un ejemplo es el caso de los registros de densidad, por lo regular varían en un rango de entre 1 a 3.5 g/cm³, que para minería son valores muy bajos. Sin embargo, como se vio en el desarrollo de la tesis es posible aprovechar este tipo de registros un conociendo sus restricciones. Lo anterior implica que la mayoría de herramientas de registros y gráficos de interpretación han sido calibrados y desarrollados para rocas sedimentarias en yacimientos petroleros; por lo que falta hacer investigación y desarrollo aplicados a minería y otras áreas de Ciencias de la Tierra; esta es un área de oportunidad para empresas y geocientíficos.

Una de las razones por las que no se aplican los registros geofísicos de pozo en minería es meramente cultural, pues la forma en que se hacen los estudios es muy mecanizada y no innovadora.

En general, la interpretación que se hace a los registros geofísicos de pozos en minería es cualitativa; no porque no se puedan cuantificar parámetros petrofísicos, sino que refleja el incipiente uso y aplicación de los registros geofísicos en esta área.

Bibliografía.

Camprubí A., y Albinson, T., 2006. Depósitos Epitermales en México: Actualización de su Conocimiento y Reclasificación Empírica, Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, Volumen Conmemorativo del Centenario, p. 27-87.

Charbucinski, J., Borsaru, M., y Gladwin, M., 2000, Ultra-Low Radiation Intensity Spectrometric Probe for Ore Body Delineation and Grade Control of Pb-Zn Ore, p. 631-638.

Corbett, G. J. y Leach, T. M., 1997. Southwest Pacific Rim, Gold-Cooper Systems: Structure, Alteration and Mineralization, short course manual.

Del Valle-Toledo E., 1986. Apuntes de Introducción a Los Métodos Geofísicos de Exploración, Facultad de Ingeniería UNAM.

Fullagar, P. K. y Fallon, G. N., 1997. Geophysics in Metalliferous Mines for Orebody Delineation and Rock Mass Characterization: in Proceedings of Exploration 1997 — Fourth Decennial International Conference on Mineral Exploration, Gubins A. G., p. 573–584.

Galley, A., Mark, H. y Ian, J., 2005. Volcanogenic Massive Sulphide Deposits, Geological Survey of Canada, p. 1-19.

Gavin, S., 1997. New Applications of Borehole Geophysical Logging in Mining and Mineral Exploration, p. 127-129.

Gibson, H. L., Allen, R. L., Riverin, G. y Lane, T. E., 2007. The VMS Model: Advances and Application to Exploration Targeting, Ore Deposits and Exploration Technology, p. 713-730.

Glover, P., 2010. Petrophysics MSc Petroleum Geology.

Howard, L. H. y Jan, M. M., 2002. Introductory Mining Engineering, Second edition, p. 1-5.

Jane, M. H., Boris, B. K., Ted, G. T., James, E. E., David, A. J., Jeff, L. D., Thomas N., Robert, R. C., Gregory, K. L., Eric L. y Douglas, P. K., 1996. Cu, Au, and Zn-Pb Skarn Deposits.

Jébrak, M., 1997. Hydrothermal Breccias in Vein-type Ore Deposits: a Review of Mechanisms, Morphology and Size Distribution. Ore Geology Reviews, p. 111-134.

Killeen, P. G., 1997. Nuclear Techniques for Ore Grade Estimation; Proc. Of fourth Decennial International Conference on Mineral at Neves-Corvo Cooper-tin Mine, Portugal: Trans. Inst. Min. Metall., p. 677-684.

King, A., 2012. Borehole Geophysics in Mining Exploration: Review, New Technology and New Opportunities, VALE.

Laurence, R., 2005. Introduction to ORE-FORMING PROCESSES, Blackwell Publishing, p. 174-183.

Lawrence, D. M., Gregory, M. D., Stefan, N., 2005. World Skarn Deposits, Society of Economic Geologist. Inc., Economic Geology 100th Anniversary, p. 299-336.

Manuel, G. F., 1999. Obtención de Imágenes de la Distribución de Impedancia Eléctrica del Subsuelo. Aplicación a la Detección de Objetos Locales. Universidad Politécnica de Cataluña, Departamento de Ingeniería Eléctrica.

Mutton, A.J., 1997. The Application of Geophysics During Evaluation of the Century Zinc Deposit, p. 599-614

Park, C.F. y MacDiarmid, 1975. Ore Deposits. San Francisco: W.H. Freeman and Company, p. 280-336.

Pflug, K.A., Killeen, P.G. y Mwenifumbo, C.J., 1996. Borehole Geophysical Logs in Gold Deposits in the Kirkland Lake Area, Ontario (Macassa Gold Mine and Victoria Creek Gold Deposit). Geol. Survey Canada, p. 718-719.

Ricco-Macedo, G., 2012. Principio de Medición de los Registros Geofísicos de Pozo, Tesis, Universidad Nacional Autónoma de México.

Seigel, H. O., Nind, C., Lachapelle, R., Chouteau, M. y Giroux, B., 2007. Development of a Borehole Gravity Meter for Mining Applications, Proceedings of Exploration 07: Fifth Decennial International Conference on Mineral Exploration, p. 1143-1147.

Telford, W. N., Geldart, L. P. y Sheriff, R. E., 1990. Applied Geophysics, Cambridge University.

Tixier, M. P., y Alger, R. P., 1970. Log Evaluation of Nonmetallic Mineral Deposits: Geophysics, v. 35, p. 124-142.

Valencia-Moreno, M., Ochoa-Landín, L., Noguez-Alcántara, B., Ruiz, J. y Pérez-Segura, R., 2006. Características Metalogénicas de los Depósitos del Tipo Pórfido Cuprífero en México y su Situación en el Contexto Mundial, Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, Volumen Conmemorativo del Centenario Revisión de Algunas Tipologías de Depósitos Minerales en México, Tomo LVIII, núm. 1., P. 1-26.

Victore, M., 2003. Evolución del Conocimiento de los Procesos Involucrados en la Génesis de los Pórfidos Cupríferos, p. 1-31.

Weatherford, 2008. Wireline Services Log Interpretation Chart Book.

Wireline Workshop, 2010. South Africa, A history of Mineral Wireline Logging, p. 1-4

Anexos.

Glosario de términos:

Alteración Argílica.	Este tipo de alteración se suele subdividir en intermedia y avanzada, dependiendo de las condiciones físicas de la roca huésped. En la alteración intermedia se pueden encontrar minerales arcillosos, así como minerales del grupo de la esméctica. Esta alteración se suele dar a temperaturas menores a los 250°C. Por otra parte la alteración avanzada presenta una forma de lixiviación base, dando como resultado concentraciones de minerales como la caolinita, pirofilita y en menores cantidades cuarzo, topacio y turmalina.
Alteración Fílica.	Esta alteración se presenta comúnmente en yacimientos hidrotermales. Se pueden formar a diferentes temperaturas por hidrólisis de feldespatos, para formar sericita.
Alteración Potásica.	Se caracteriza por formar un nuevo feldespato potásico y/o biotita. La temperatura de formación varía de entre 500°C y 600 °C. Mayormente se presenta en yacimientos minerales tipo pórfidos cupríferos.
Alteración Propilítica.	Se forma durante el metamorfismo regional a temperaturas intermedias de entre 200°C y 300°C. Los minerales que se pueden llegar a formar son principalmente clorita y epidota, con menor presencia de de clinozoisita, calcita, zoisita y albita.
Carbonatización.	Se refiere a la formación de minerales carbonatados (calcita, dolomita, magnesita, siderita, etc.), durante el proceso de alteración de la roca.
Distrito minero.	Aquel conjunto de yacimientos minerales, con génesis similares y por consiguiente la extensión que ocupan estos es mayor que la de un yacimiento.
Ganga.	Minerales de menor valor económico, presentes en un yacimiento mineral, que no siempre son explotados debido a su bajo valor comercial.

Guía de mineralización.	Son aquellas características estructurales, litológicas, biológicas y geofísicas, que sirven para la localización de cuerpos mineralizados.
Hematización.	Es un tipo de alteración que se asocia a fluidos oxidantes, resultando en la formación de minerales con alto contenido de Fe^{3+}/Fe^{2+} y particularmente con la formación de hematita asociada a feldespatos potásicos, sericita, clorita y epidota.
Ingeniería Minera.	La práctica de aplicar los principios de ingeniería para el desarrollo, planeación, explotación y clausura de una mina.
Ley.	Concentración de un mineral en la mena o roca huésped, en porcentaje ó g/ton.
Mena.	Depósito mineral con el grado suficiente de material explotable del cual se puede obtener una ganancia.
Mina.	Excavación hecha en el subsuelo para extraer minerales.
Mineral.	Es aquel elemento o compuesto inorgánico con una estructura interna definida con ciertas características físicas y químicas particulares.
Minerales metálicos.	Se les llama así a aquellos minerales ferrosos (Hierro, Magnesio, Molibdeno y Tungsteno), metales base (Cobre, Plomo, Zinc y Estaño), metales preciosos (Oro, Plata y los del grupo del Platino) y a los minerales radioactivos (Uranio, Torio y Radio).
Minerales no metálicos.	También conocidos como minerales industriales, son aquellos que no están asociados con la producción de metales. Entre los más comunes se encuentra el Fósforo, Potasio, calcita, sulfuro, carbón, halita, trona y muchos otros más.
Mineralización.	Cualquier mineral o combinación de minerales, cuya ocurrencia se da de forma masiva, diseminada, en vetas y en cualquier tipo de yacimientos minerales, con un cierto valor económico.
Minería.	Actividad, ocupación, o industria concentrada en la extracción de minerales.

Residuos mineros.	Es aquel mineral que puede ser explotado para extraer otro con mayor valor, que por las condiciones a las que se da no se puede extraer directamente. La Ganga es un caso particular de un residuo minero.
Roca.	Es aquel agregado natural de uno o más tipos de minerales.
Silicificación.	Es la conversión de un mineral carbonatado, o una roca, por sílice.
Yacimiento mineral.	Conjunto de cuerpos mineralizados asociados estrechamente con extensiones no muy grandes.

Minerales mayormente explotados a nivel mundial:

Elementos nativos	Fórmula química	Usos
Oro	<i>Au</i>	Mayormente en joyería, electrónica, medicina y en monedas y barras.
Plata	<i>Ag</i>	Joyería, electrónica, monedas y películas fotográficas.
Platino	<i>Pt</i>	Instrumental médico, electrónica y agente catalítico.
Paladio	<i>Pd</i>	Aleaciones, catalizador y joyería.
Cobre	<i>Cu</i>	Industria.
Azufre	<i>S</i>	Fertilizantes, en la formación de ácido sulfúrico y en compuestos de azufre.
Diamante	<i>C</i>	Principalmente como abrasivo.
Grafito	<i>C</i>	Lubricante y combustible.
Sales		
Halita	<i>NaCl</i>	Industria química, en carreteras, uso doméstico.
Silvita	<i>KCl</i>	Fertilizante y sustituto de sal.
Querargirita	<i>ClAg</i>	Fuente de Plata.
Fluorita	<i>CaF₂</i>	Piedra ornamental y potabilizar el agua.
Atacamita	<i>Cu₂Cl(OH)₃</i>	Fuente menor de Cobre.
Sulfuros		
Calcocita	<i>Cu₂S</i>	Se utiliza como MENA de Cobre.
Bornita	<i>Cu₅FeS₄</i>	Extracción de Cobre.
Galena	<i>PbS</i>	Fuente de Plomo y en ocasiones también de Plata.
Esfalerita	<i>ZnS</i>	Principalmente como fuente de Zinc, en menores cantidades de Indio, Cadmio, Germanio y Galio.

Calcopirita	$CuFeS_2$	Importante fuente de Cobre.
Pirrotita	$Fe_{1-x}S$	Mineral asociado a la pentlandita, fuente de cantidades significativas de Níquel y Cobalto.
Pentlandita	$(Fe, Ni)_9S_8$	Fuente de Hierro y Níquel.
Millerita	NiS	Fuente de Níquel.
Covellina	CuS	Fuente menor de Cobre.
Cinabrio	HgS	Principal fuente en la extracción de Mercurio.
Skutterudita	$(Co, Ni)As_3$	Fuente de Cobalto y Níquel.
Esperrilita	$PtAs_2$	Catalizador.
Braggita	$(Pt, Pd, Ni)S$	Fuente de Platino.
Cobaltita	$CoAsS$	Fuente de Cobalto.
Gersdorffita	$NiAsS$	Fuente de Níquel.
Molibdenita	MoS_2	Principal fuente de Molibdeno.
Realgar	AsS	Insecticida.
Oropimente	As_2S_3	Pigmento.
Estibinita	Sb_2S_3	Aleaciones para soporte, terminales de baterías y semiconductores.
Bismutinita	Bi_2S_3	Principal fuente de Bismuto.
Argentita	Ag_2S	Fuente de Plata.
Calaverita	$AuTe_2$	Fuente de Oro y Teluro.
Pirita	FeS_2	Fuente de Hierro y Azufre.
Sulfosales		
Tetraedrita	$(Cu, Ag)_{12}Sb_4S_{13}$	Fuente de Cobre.
Tennantita	$(Cu, Ag)_{12}As_4S_{13}$	Fuente de Cobre y Plata.
Enargita	Cu_3AsS_4	Fuente de Cobre.
Óxidos		
Cuprita	Cu_2O	Fuente de Cobre.

Hematita	Fe_2O_3	Fuente de Hierro.
Ilmenita	$FeTiO_3$	Principal fuente de Titanio, también se utiliza en la formación de dióxido de Titanio en pigmentos de pintura.
Hercinita	$FeAl_2O_4$	Fuente de Aluminio.
Magnetita	Fe_3O_4	La mayor parte como mineral de Hierro.
Cromita	$FeCr_2O_4$	Único mineral usado para la extracción de Cromo. Usado para aleaciones de metales.
Rutilo	TiO_2	Revestimiento en barras de soldadura, también se utiliza para la extracción de Titanio.
Anatasa	TiO_2	Soporte de los componentes activos en catalizadores.
Pirolucita	MnO_2	Fuente de Magnesio, oxidante, decolorante en vidrios y cerámica.
Casiterita	SnO_2	Principal fuente en la producción de Estaño.
Uraninita	UO_2	Fuente de Uranio.
Torianita	ThO_2	Fuente de Torio.
Columbita-Tantalita	$(Fe, Mn)(Nb, Ta)_2O_6$	Extracción de elementos raros como el Niobio.
Hidróxidos		
Goethita	$FeO(OH)$	Fuente de Hierro.
Boehmita	$AlO(OH)$	Principal fuente de Aluminio.
Manganita	$MnO(OH)$	Fuente de Manganeseo.
Oxíales		
Calcita	$CaCO_3$	Construcción.
Dolomita	$CaMg(CO_3)_2$	Construcción.
Siderita	$FeCO_3$	Fuente de Hierro.
Rodocrosita	$MnCO_3$	Ornamental, fuente de Manganeseo.
Smithsonita	$ZnCO_3$	Fuente de zinc y ornamenta.

Cerusita	$PbCO_3$	Fuente de Plomo.
Azurita	$Cu_3(OH)_2(CO_3)_2$	Fuente de Cobre, piedra preciosa y ornamental.
Malaquita	$Cu_2(OH)_2CO_3$	Fuente de Cobre, piedra preciosa y ornamental.
Scheelita	$CaWO_4$	Fuente de Wolframio.
Wolframita	$(Fe, Mn)WO_4$	Fuente de Wolframio.
Barita	$BaSO_4$	Lodos de perforación para aumentar su peso y también se utiliza en pigmentos de pintura.
Anhidrita	$CaSO_4$	Sustituto de yeso.
Alunita	$KAl_3(OH)_6(SO_4)_2$	Datación de sedimentos y fuente de Aluminio.
Yeso	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$	Paneles de yeso, cemento y acondicionamiento de suelo.
Epsomita	$MgSO_4 \cdot 7H_2O$	Purgante y laxante.
Monazita	$(Ce, La, Th)PO_4$	Principal fuente de Torio, Cerio y otros elementos raros.
Apatita	$Ca_5(PO_4)_3(F, Cl, OH)$	Principalmente como fertilizante y fuente de Fósforo.
Carnotita	$K_2(UO_2)(VO_4)_2 \cdot 3H_2O$	Fuente de Vanadio.
Silicatos		
Cuarzo	SiO_2	Fabricación de vidrio, abrasivo, arena de fundición, electrónica y piedra preciosa.
Ortoclasa	$(K, Na)AlSi_3O_8$	Piedra preciosa.
Albita	$(Na, Ca)AlSi_3O_8$	Cerámica.
Circón	$Zr(SiO_4)$	Fuente de circonio y piedra preciosa.
Granate	$Fe_3Al_2(SiO_4)_3$	Piedra preciosa y lija.
Grosularita	$Ca_3Al_2(SiO_4)_3$	Abrasivo.
Silimanita	Al_2SiO_5	Refractario.
Topacio	$Al_2SiO_4(F, OH)_2$	Piedra preciosa

Berilo	$Be_3Al_2Si_6O_{18}$	Principal fuente de aluminio y piedra preciosa.
Turmalina	$(Na, Ca)(Mg, Fe, Mn, Al)_3(Al, Mg, Fe)_6Si_6O_{18}(BO_3)_3(OH, F)_4$	Piedra preciosa.
Epidota	$Ca_2(Al, Fe)_3Si_3O_{12}(OH)$	Piedra semipreciosa
Caolinita	$Al_4Si_4O_{10}(OH)_8$	Fabricación de vidrio, refractario, medicina, construcción, electrónica, cerámica y plásticos.
Montmorillonita	$(Na, Ca)_{0.3}(Al, Mg)_2Si_4O_{10}(OH)_2 \cdot nH_2O$	Lodos de perforación, farmacéuticos e industria papelera.
Pirofilita	$Al_2Si_4O_{10}(OH)_2$	Cerámica y material refractario.
Talco	$Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$	Uso doméstico.
Muscovita	$KAl_2(AlSi_3O_{10})(OH)_2$	Compuesto para juntas, pintura, lodo de perforación, plástico y cosméticos.
Biotita	$K(Fe, Mg)_3(Al, Fe)Si_3O_{10}(OH, F)_2$	Material de relleno y extensor de pintura, aditivo en lodos de perforación y revestimiento de superficies.
Lepidolita	$K(Li, Al)_3(Si, Al)_4O_{10}(OH, F)_2$	Fuente de Litio.
Clorita	$(Fe, Mg, Al)_{5-6}(Si, Al)_4O_{10}(OH)_8$	Material de carga y constituyente de la arcilla.
Actinolita	$Ca_2(Fe, Mg)_5Si_8O_{22}(OH)_2$	Asbesto y ornamenta.
Espodumena	$LiAlSi_2O_6$	Fuente de Litio.
Wolastonita	$CaSiO_3$	Asbesto, revestimiento, cerámica y tejas.
Crisocola	$(Cu, Al)_2H_2Si_2O_5(OH)_4 \cdot nH_2O$	Fuente de Cobre.