

INFLUENCIA DE PROCESOS HIDROGEOLÓGICOS EN LA FORMACIÓN Y POSTERIOR ENRIQUECIMIENTO MINERAL DE YACIMIENTOS COBALTO-NIQUELÍFROS EN LATERITAS

Constantino de Miguel Fernández.

Instituto Superior Minero Metalúrgico (ISMM) Las Coloradas s/n, Moa, Holguín: E-mail: cdemiguel@ismm.edu.cu

RESUMEN

En el trabajo se exponen las características hidrogeológicas por componentes de la corteza de intemperismo que forma el yacimiento Punta Gorda en Moa, Cuba, ubicado en la franja ofiolítica en el extremo noreste de la Provincia Holguín, incluyendo el quimismo de las aguas subterráneas y cálculos que establecen las características de los procesos de movimiento del agua en las lateritas del yacimiento, con flujo vertical originado por las altas propiedades de ascensos capilares de las lateritas y presiones existentes en el acuífero de las peridotitas que las subyacen.

Los resultados del trabajo aportan un incalculable efecto científico y económico ya que se establece una nueva teoría sobre la influencia de procesos hidrogeológicos en la formación de estos yacimientos y su enriquecimiento posterior, también se establecen las bases para la ejecución de un Proyecto de Explotación minera incluyendo medidas de drenaje y definición de áreas para la construcción de plataformas para el secado de la materia prima mineral que permitan la reducción de la humedad de las lateritas antes del ingreso a la industria, con significativos aportes económicos por reducción del consumo de combustible (Petróleo) en el secado del mineral en hornos de la industria.

ABSTRACT:

In this Project, the hydro - geological characteristics are expounded in components of the weathered layer that form the cobalt – nickel site at Punta Gorda in Moa, Cuba, the chemical composition of the subterranean waters and calculations that establish the characteristics of the processes of water movement in the upper soil layers of the site with vertical flow originating from the high properties of capillary ascents in the upper layers of the soil and existent pressures in the aquifer in the peridotitas that underlie them.

In function of the obtained results, a new theory was established that characterizes the hydro – geological processes or moreover, represents the main factors of formation of these sites; if those factors were the main ones that influenced greatly in the formation of the site, like in its later mineral enrichment.

Moreover, the results of the project contribute greatly and incalculably to the economy, since it allows the execution of a Mineral Exploitation Project, drainage measures and a base for the creation of Dry Mineral Platforms in the sites causing the reduction of the humidity in the upper soil layers which significantly contributes to the reduction in the consumption of fuel (Petroleum) in the drying of the minerals in the factory " Comandante Ernesto Che Guevara " of Moa.

INTRODUCCIÓN:

El yacimiento niquelífero Punta Gorda con un área de unos 8 Km², ubicados por red kilométrica de Cuba en las coordenadas:

X: 700,800 - 704,100

Y: 218,600 - 221,900

El yacimiento tiene en la actualidad más de un 60 % de sus reservas explotadas, cuenta con diversos estudios geológicos y también hidrogeológicos, que hasta el año 2002 tenían establecido parcialmente las características hidrogeológicas del yacimiento así como de forma general las características del drenaje necesario para mejorar las condiciones de explotación mineral y de racionalidad del proceso industrial, ambos casos afectados sobre todo por el alto grado de humedad presente en el yacimiento.

Los estudios realizados no aportaban la información necesaria para el establecimiento de la complejidad hidrogeológica a nivel de detalle de forma que permita racionalizar la minería y obtener una metalurgia efectiva en lo que a las afectaciones por condiciones hidrogeológicas se refiere.

De tal forma por la Dirección de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara (E.C.G.E.C.G.) se propuso la ejecución de una investigación hidrogeológica e ingeniería geológica de detalle en los aspectos que directamente afectan el proceso de explotación minera y el proceso metalúrgico con salida de resultados reflejados en mapas escala 1: 10 000. Estudio que diera respuesta a lo solicitado fue programado y dirigido por el autor de este trabajo. Con la investigación se estableció el detalle necesario de las condiciones hidrogeológicas y se realizó entre los años 2003 al 2004 (Blanco B. J. L.; Llorente. G. E.; De Miguel F. C.).

MATERIALES Y MÉTODOS:

Durante la ejecución del estudio que aportó la información necesaria para la elaboración del presente trabajo se realizó un complejo de trabajos con volúmenes correspondientes al Programa de Investigación, elaborado por actividades hidrogeológicas y que se relacionan en la Tabla No. 1.

Tabla I. Principales Trabajos ejecutados.

Actividad	U.M.	Real
Levantamiento geológico	1:10 000	8 Km ²
Perforación	Calas	43
	m.l.	905
Vertimientos	U	20
Cubeteos	U	31
Muestras de rocas	Sacos	180
	Pomos	236
	Shelbys	35
Ensayos de laboratorio	Humedad	226
	Peso específico	219
	Granulometría	177

Con los resultados de los trabajos realizados se pudo establecer en detalle las condiciones hidrogeológicas e ingeniería geológica del yacimiento, estableciéndose condiciones que se desconocían relacionadas con el carácter hidrodinámico de las aguas en las peridotitas agrietadas que yacen bajo las lateritas y de los estratos inferiores de estas. Estableciéndose también las propiedades de capilaridad y ascensos capilares de las lateritas que junto con las características del quimismo de las aguas subterráneas nos han permitido establecer la influencia que las propiedades de capilaridad y quimismo pueden tener en la formación primaria del yacimiento y su posterior enriquecimiento mineral.

Características hidrogeológicas generales.

En el yacimiento Punta Gorda ubicado en la Faja Ofiolítica Mayari – Baracoa en el Noreste de la Provincia de Holguín, está desarrollado un complejo acuífero formado por dos horizontes acuíferos estratificados o con capas, con diferencias en perfil, tanto por su granulometría como por su permeabilidad, las que para mejor comprensión hidrogeológica, ingeniería geológica y minero resumimos su litología en la Tabla II.

Tabla II. Características litológicas de yacimientos cobalto-niquelíferos en ofiolitas.

Horizontes acuíferos	Litología
Lateritas ("acuitardo")	Arena gravo-limosa con fracciones gruesas constituidas por perdigones de óxido de hierro, con baja plasticidad (Capa 1 – OIP*)
	Limo arcilloso de alta plasticidad (Capa 2 .OII*,OEF*, OEI*)
Serpentinitas (acuífero)	Roca muy lixiviada, presente en forma de arena limo-gravosa con arcilla y fracciones de peridotita (Capa 3)
	Roca peridotita piroxenica serpentinizada (Capa 4).

OIP – Ocre inestructural con perdigones (concreciones de óxido de hierro).

OII – Ocre inestructural inicial.

OEF – Ocre estructural final.

OEI – Ocre estructural inicial.

Afloramiento (aparición) y profundidad del nivel del agua.

En la mayoría de las calas perforadas (70 %) el agua subterránea se detectó (afloró) en las peridotitas lixiviadas y serpentinizadas agrietadas y su profundidad de afloramiento oscila en el yacimiento entre 0 y 27,4 m., en dependencia del relieve del terreno, de la profundidad de yacencia de las peridotitas y espesor de las lateritas. En la gran mayoría de las calas perforadas se observó un ascenso lento del agua, hasta estabilizarse el nivel a distintas alturas de su cota de aparición.

El lento ascenso del agua en las calas demuestra la existencia de artesanismo en las rocas acuíferas representadas por las peridotitas, baja permeabilidad, conductividad de nivel y trasmisividad de estas rocas. Los niveles en las calas se estabilizaron a profundidades que oscilan entre 4,1 y 29,2 m., en correspondencia con las presiones puntuales y locales del acuífero, relieve del terreno y ubicación en perfil del techo de las peridotitas.

Dirección del flujo subterráneo y gradiente del nivel de las aguas.

Hasta las profundidades estudiadas el flujo de las aguas subterráneas y su dirección están influenciadas por el relieve del terreno, cauces de ríos y otras depresiones del terreno, así como por el relieve del techo de las peridotitas. Existe una dirección del flujo predominantemente en dirección Norte, hacia el río Moa, con desviaciones locales en los extremos del yacimiento en dirección al río Yagrumaje, río Los Lirios, depresiones del terreno con afluencia de agua (manantiales) y en la parte central del yacimiento existe un flujo radial en dirección a la zona en que el yacimiento se encuentra explotado hasta las rocas peridotitas.

El gradiente del nivel piezométrico de las aguas subterráneas oscila entre 0,0004 y 0,0232. Los valores mas bajos caracterizan el área del yacimiento con menores pendientes del terreno, los valores más altos caracterizan las áreas de mayores pendientes.

Espesor acuífero.

En las perforaciones ejecutadas los espesores saturados y acuíferos fueron totalmente perforados a excepción del acuífero de las peridotitas agrietadas, en las que en correspondencia con el Programa de Investigación, solo se perforó 5 m. bajo el techo de las peridotitas con la aparición del agua en cotas superiores y hasta unos 3 m. bajo la cota de aparición del agua en las peridotitas.

En el territorio los espesores de las peridotitas alteradas es de unos 30 m como valor medio. En las lateritas la zona saturada no representa como tal un acuífero, ya que debido a la litología existente, prácticamente no existe circulación lateral del agua, por lo que esta zona la podemos considerar como un "acuitardo". Los espesores saturados perforados en las lateritas oscilan desde 0 m. hasta 27,6 m. y los mismos dependen del relieve del terreno y base de erosión del mismo. Los mayores espesores de las lateritas se encuentran en las áreas más altas del yacimiento.

Permeabilidad.

La permeabilidad representada por el coeficiente de filtración es variable tanto en las lateritas como en las peridotitas. En las lateritas el coeficiente de filtración oscila entre 0,006 y 0,21 m. / día. Y por capas sus valores medios son como sigue: Capa 1- 0,106 m. /día., Capa 2 – 0,043 m. / día.

En las peridotitas la permeabilidad oscila en valores entre 0,004 y 0,43, aunque en zonas de fallas se encuentran valores superiores a 3 m / día. Por capas en las peridotitas la permeabilidad representada por el coeficiente de filtración alcanza los siguientes valores medios: Capa 3 –0,044 m. / día., Capa 4, sin considerar las zonas de fallas- 0,14 m. / día.

Como puede observarse, la permeabilidad en la Capa 4 (peridotitas agrietadas) es más de tres veces mayor que la permeabilidad de las lixiviadas lixiviadas (Capa 3) y que el de las lateritas (Capa 2) y 1,3 veces mayor que la permeabilidad del estrato de cubierta de las lateritas (Capa 1).

Acuosidad.

La acuosidad determinada es referida a las lateritas por su importancia en el proceso minero-industrial, sus valores son bajos y expresados en l. seg. / m. de abatimiento con valores menores de 0,1 l. seg. / m.

En la mayoría del área de distribución de las lateritas la acuosidad es predominantemente de origen capilar, por saturación debido a procesos de ascensos capilares desde mayores profundidades y teniendo como fuente las peridotitas acuíferas, las que subyacen a las lateritas.

En períodos de lluvia se desarrolla la sobresaturación de espesores de lateritas en la parte superior del corte motivado por la infiltración de las aguas de lluvia hasta profundidades en que la infiltración desde la superficie se equilibra con la saturación presente por los ascensos capilares y subpresión desde las peridotitas agrietadas.

Ascensos capilares.

Las propiedades de ascenso capilar de las lateritas fueron determinadas según metodología basada en la granulometría de los sedimentos analizados y su porosidad (ver Tabla III).

Como resultado de los cálculos efectuados tenemos que los ascensos capilares en las lateritas oscilan entre 0 y más de 26 m (Ver mapa Fig. 1). Los menores valores coinciden con espesores

lateríticos de la Capa 1 que presenta la granulometría más gruesa, con ascensos que oscilan entre 0 y 3,4 m.

En la Capa 2 la granulometría es más fina, correspondiendo con ella los ascensos capilares oscilan entre 20 y 32,8 m. Con valores medios de 26,0 m.

En la mayor parte del territorio del yacimiento Punta Gorda las lateritas yacen directamente sobre las peridotitas lixiviadas y acuíferas, siendo la zona de contacto entre estas diferencias litológicas la mayor vía de circulación de las aguas subterráneas en las lateritas (Capa 2 y 3) por lo que las posibilidades determinadas de ascensos capilares en las lateritas por su granulometría se hacen efectivas al estar estos sedimentos en contacto directo con el agua en su basamento.

Los ascensos capilares propiamente son efectivos a partir del nivel de estabilización de las aguas (por saturación) en estos sedimentos debido a las subpresiones desde su basamento en las peridotitas agrietadas, donde existen aguas confinadas con presiones moderadas.

Por la granulometría presente en las lateritas estudiadas, en las que el diámetro efectivo (D_e) oscila entre 0,0018 y 0,0022 mm., correspondiente al diámetro del 10% del peso de las muestras analizadas y asumiendo la media de 0,0020 mm para los cálculos y la porosidad media de 60% ($n=0,6$), los ascensos capilares medios en el territorio del yacimiento que pueden producirse calculados por tres métodos distintos presentan un valor de $H_c = 17,14$ m. (valores medios obtenidos por aplicación de tres formulas de cálculos).

Tabla III. Cálculo de ascensos capilares medios.

Datos		Fórmula de Cálculo H_c (m)	Autor	Ascenso Capilar Medio H_c (m)
Porosidad Media. n	Diámetro Efectivo D_e (mm)			
0.6	0.002	$H_c = 0.0446 \frac{1-n}{n} \cdot \frac{1}{D_e}$	Kozeny	14.87
		$H_c = \frac{0.0559}{D_e} \sqrt[3]{\left(\frac{1-n}{n}\right)^2}$	Mavis - Tsui	21.32
		$H_c = \frac{0.0306}{D_e}$	Laplaza - Sergueiev	15.3

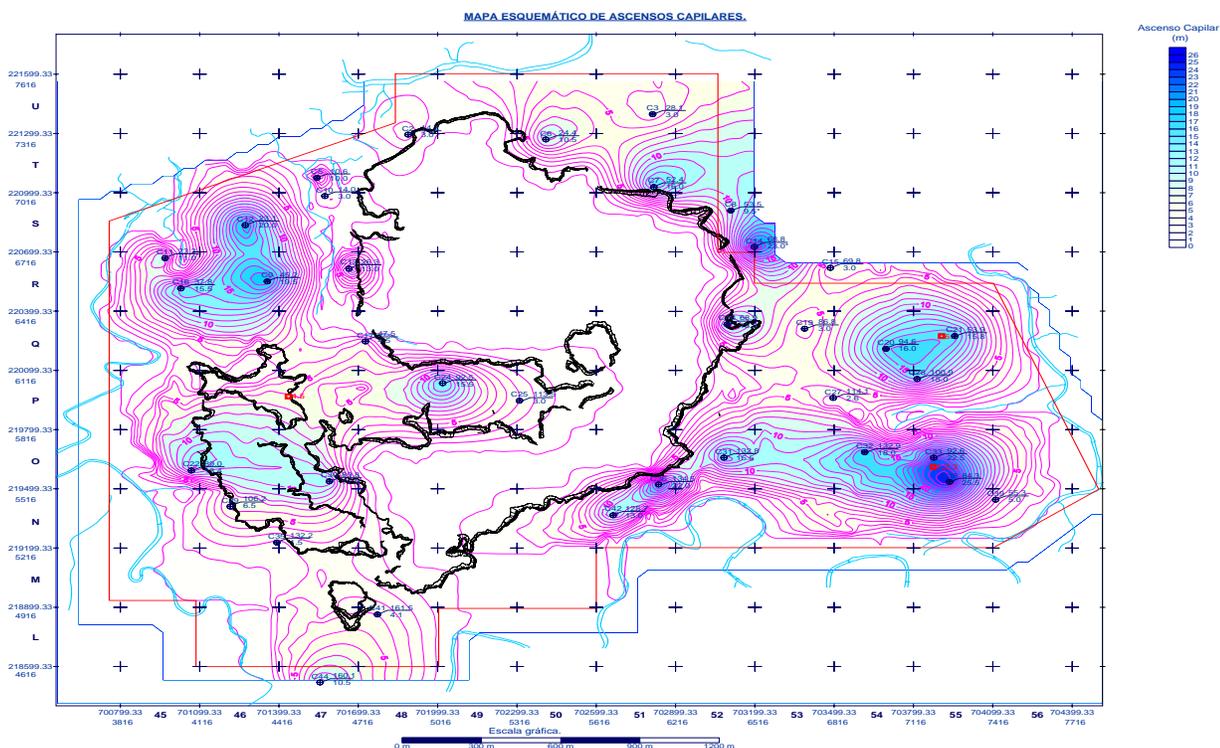


Figura 1. Mapa de ascensos capilares de las lateritas en el yacimiento Punta Gorda.
Isolneas de ascensos capilares cada 1 m. desde 0 hasta mas de 26 m.

Humedad de las lateritas.

La humedad en las lateritas oscila en la Capa 1 varía entre 17,1 y 47,3 %, en la Capa 2 oscila entre valores de 31,4 y 94,9 %. Esta diferencia de valores entre estas capas es debido a que en la Capa 1 la granulometría es más gruesa y sobre ella actúa directamente el proceso de evaporación al ser la primera Capa a partir de la superficie del terreno.

En la Capa 2 los mayores valores de humedad se registran a mayores profundidades y contactando la Capa 3 y con las peridotitas acuíferas. La humedad de estas capas está influenciada directamente por las presiones existentes en las aguas contenidas y que circulan por las peridotitas, hasta niveles de equilibrio de esas presiones. Sobre la cota de acción de las subpresiones, la humedad de las lateritas está influenciada directamente por los procesos de ascensos capilares a través de las lateritas desde la zona de humedad por presiones subyacentes o directamente desde las aguas contenidas en las peridotitas.

Otro aspecto que influye en la humedad de las lateritas lo representa la rugosidad del techo de las peridotitas agrietadas acuíferas, ya que en aquellos puntos donde presenta descensos con relleno de lateritas, estas se presentan con alta saturación, pudiendo en algunos casos encontrarse el agua a pequeñas profundidades (nivel piezométrico).

Durante los períodos de lluvia en la parte superior de las lateritas se produce una saturación debido a la infiltración de las aguas de lluvia desde la superficie del terreno, esta saturación en profundidad se desarrolla hasta profundidades donde se equilibra con las humedades presentes debido a los ascensos capilares y subpresión desde las peridotitas agrietadas.

Régimen de las aguas subterráneas.

El régimen de las aguas subterráneas se logró establecer mediante la conjugación de un paquete de mapas elaborados con los datos obtenidos de las investigaciones de campo y monitoreo del comportamiento de los niveles de las aguas en las calas perforadas (Sánchez S. Y. 2006). Las aguas subterráneas del yacimiento Punta Gorda, las podemos diferenciar en los dos horizontes acuíferos que forman el complejo acuífero en las ofiolitas. El primer horizonte acuífero ("acuitardo") está desarrollado en las lateritas y formado por las dos capas que caracterizan los sedimentos en ellos presentes (Capa 1 y Capa 2, ver en Tabla II).

En la Capa 1 con espesor variado de 0 a 5 m. la presencia de agua de circulación libre se limita a los períodos de lluvia, cuando parte del agua que se precipita se infiltra y circula hacia las zonas de drenaje de la capa, ocurriendo a la vez la evaporación de esta agua en partes o totalmente en zonas donde esta capa forma "bolsones" dentro de los sedimentos arcillosos de las lateritas.

Durante períodos de lluvia desde esta capa ocurre la infiltración de las aguas a la Capa 2 estabilizándose la infiltración hasta profundidades en que las aguas saturan espesores no totalmente saturados por aguas que ascienden por los procesos de ascensos capilares y subpresiones de las aguas desde las peridotitas agrietadas, de tal forma su régimen de funcionamiento es esporádico y su alimentación proviene principalmente de las aguas de lluvia que se infiltran en una proporción mínima, teniendo como segunda fuente de alimentación las aguas que desde las lateritas de la Capa 2 llegan a ella por ascensos capilares y luego se evaporan.

En el primer horizonte acuífero y bajo la Capa 1 yace la Capa 2 con espesor saturado que oscila entre 0 y más de 25 m. En esta Capa como acuífero está presente un "acuitardo", debido a que la circulación lateral de las aguas en el mismo es muy débil o no existe, motivado por la fina granulometría de los sedimentos presentes que no permite la libre circulación de las aguas. Sin embargo las propiedades acuíferas las determina el alto grado de saturación de las lateritas por procesos de ascensos capilares que se desarrollan en ella y que provocan una muy lenta circulación de las aguas, en este caso en sentido vertical ascendente, hasta la superficie del terreno o hasta la Capa 1 que forma la cubierta del yacimiento, donde el agua se evapora. De tal forma el régimen de flujo en esta capa es permanente y predominantemente ascendente, teniendo como zona de drenaje la Capa 1 y la superficie del terreno desde donde se evaporan las aguas. Durante los períodos de lluvia existe un régimen vertical descendente de infiltración y este en tiempo depende también de la duración de este período y del tiempo que demore la saturación de la parte superior de las lateritas, hasta profundidades en que las mismas aunque presentan humedad no están totalmente saturadas por las aguas de ascensos capilares aquí presentes.

La Capa 3 formada por peridotita lixiviada presenta un espesor que puede alcanzar en partes los 10 m. Se encuentra totalmente saturada debido principalmente a las aguas provenientes de las peridotitas agrietadas que las subyacen y por las presiones que existen en las mismas. En esta Capa igual que en la Capa 2 el movimiento lateral del agua es despreciable y el movimiento que existe es vertical por las subpresiones y propiedades de ascenso capilar de la litología aquí presente.

La Capa 4 esta formada por peridotita piroxenica serpentinizada y agrietada con espesor máximo de unos 30 m., esta Capa es la de mayor acuosidad en el complejo acuífero de las ofiolitas por tener una mayor permeabilidad y libre circulación del agua. Por estas condiciones y su yacencia bajo

sedimentos de permeabilidad muy inferior presenta régimen de acuífero semiconfinado con presiones notables, aunque no sobrepasan los 10m. (1 atmósfera.- Ver Mapa Fig. 2).

La alimentación de la Capa 4 se debe a la infiltración de las aguas de lluvia en aquellas zonas donde aflora a la superficie del terreno y por infiltración de las aguas de fuentes fluviales representadas por cauces de los ríos Yagrumaje, Los Lirios y otros. El drenaje de esta Capa se produce predominantemente por su escurrimiento hacia zonas bajas, hacia los ríos Moa y Yagrumaje donde estos escurren en cotas mas bajas. En segundo orden y en pequeñas proporciones esta Capa presenta un drenaje vertical ascendente desde su techo, causado por los procesos de ascensos capilares de las lateritas que “absorben” las aguas desde las peridotitas y con su posterior evaporación desde la superficie del terreno.

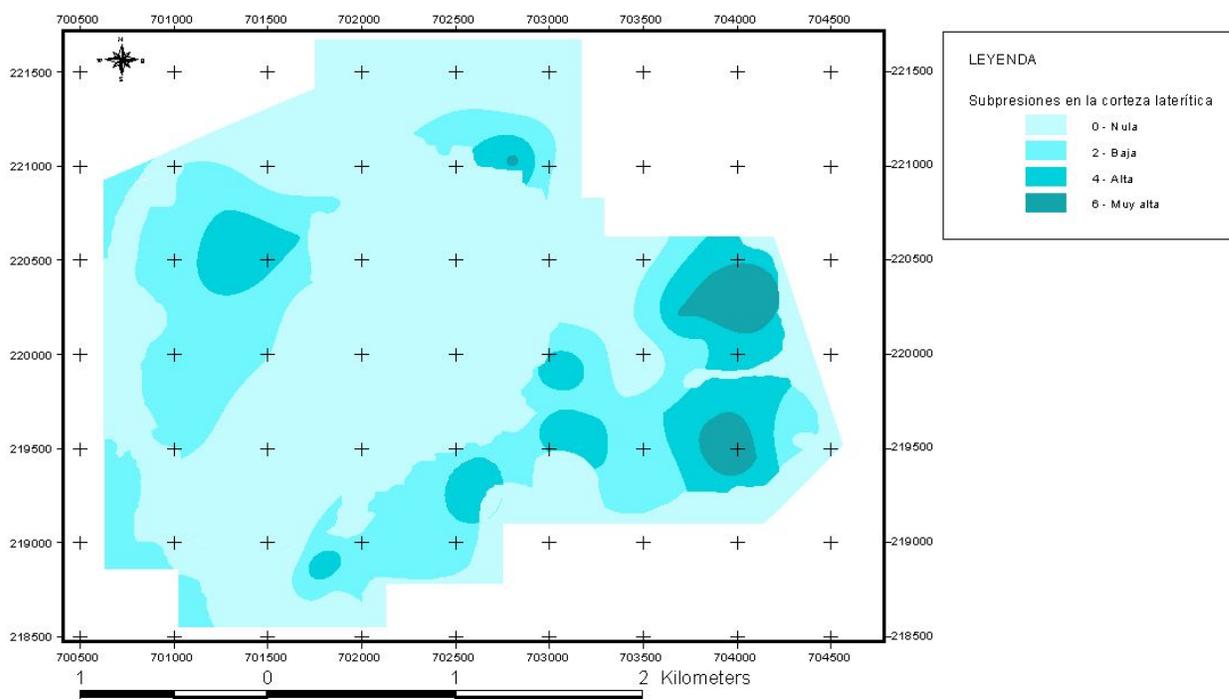


Figura 2. Mapa de presiones en las peridotitas agrietadas. Tonalidad de colores cada 2 m. de 0 a más de 6 m.

Composición química de las aguas subterráneas.

Las aguas subterráneas en el yacimiento Punta Gorda presentan una composición química relacionada con las fuentes de alimentación de las mismas (infiltración de las aguas de lluvias y de las aguas de ríos) y tipo de rocas por donde circulan (peridotitas serpentinizadas). Los elementos químicos contenidos que se relacionan con las rocas acuíferas y por donde circula el agua, dependen directamente de la mineralogía de las rocas, en este caso las rocas acuíferas las representan las peridotitas que presentan alto contenido de Magnesio y otros micro componentes (elementos pesados), en este caso también relacionado con el enriquecimiento de las rocas con minerales que han dado lugar a la formación de los yacimientos cobalto-niquelíferos y otros presentes en el territorio de Moa. Caracterizadas por estudio hidroquímico en el 2004 (Palacios G.; Monte de Oca L.).

Por su composición química en porcentos equivalentes de los macro componentes las aguas según Kurlóv las podemos exponer en su formula como sigue:



Por el predominio de macro componentes las aguas son Bicarbonatadas Magnésica.

Por su mineralización predominante ($M \cong 0,2$ gr. / l.), según Clasificación de Aliokin las aguas son muy dulces.

Por su dureza total (D en $Ca + Mg = 3,35$ mg.eq. / l.), las aguas por Clasificación de Aliokin son algo duras.

Tabla IV. Composición química media de las aguas subterráneas en las peridotitas.

Elementos	Contenido		
	mg. / l.	mg. eq. / l.	% eq.
Macro componentes			
Cl	41,7	1,176	39,25
HCO ₃	76,66	1,257	41,95
SO ₄	26,25	0,546	18,22
NO ₃ +NO ₂	0,9	0,017	0,6
Suma	145,52	2,996	100
Ca	8,0	0,399	10,87
Mg	33,0	2,71	69,33
Na	6,9	0,5	12,79
K	2,3	0,06	1,5
Suma	55,0	3,9	100
Suma total	200, 52	6,896	
Micro componentes en mg. /l.			
Al	1,04	-	-
Fe	0,768	-	-
Mn	0,22	-	-
Zn	0,03	-	-
Ni	0,24	-	-
Co	0,033	-	-
Cr	0,06	-	-
Cd	< 5x10 ⁻³	-	-
Cu	< 0,01	-	-
Pb	< 0,02	-	-
Ba	< 5,8x10 ⁻³	-	-

DISCUSIÓN:

Correlación de las características hidrogeológicas descritas con el quimismo de las aguas subterráneas en el Yacimiento Punta Gorda.

Si supuestamente consideramos que las condiciones actuales de las lateritas en el Yacimiento Punta Gorda existen desde hace un millón de años (1×10^6 años), con la existencia de las altas propiedades de ascenso capilar en las lateritas que permiten el ascenso del agua hasta la superficie del terreno, con la correspondiente evaporación de la misma, y considerando además el contenido del Níquel en las aguas subterráneas, que varía entre 0,01 y 0,6 mg. / l., el Cobalto entre 0,001 y 0,08, el Hierro entre 0,004 y 2,56 con un contenido medio en el territorio: Níquel, Ni = 0,24 mg. / l. (0,24 gr. / m³). Cobalto, Co = 0,033 mg. / l (0,033 gr. / m³.) y Hierro, Fe = 0,768 mg. / l. (0,8 gr. / m³.), podemos ejecutar un cálculo (pronóstico) aproximado del volumen de estos elementos depositados en las lateritas o que han transitado a través de ellas en el perfil o columna laterítica productiva con determinada deposición en las mismas durante el millón de años considerado.

Para este pronóstico estimamos el caudal del agua de ascenso por capilaridad, considerando una sección horizontal de 1 m². y una columna laterítica media de 12 m. y de la capa superior con perdigones un espesor medio de 5 m. utilizamos la expresión siguiente:

$$Q = K H B I p^{-1} \quad (\text{formula de Darcy transformada})$$

Q- Caudal o volumen de agua que ha circulado verticalmente a través de las lateritas por una columna de 12 m (espesor medio de las lateritas productivas en Ni y Co en el Yacimiento) y 5 m. en la capa con perdigones de hierro (Fe), m³ / día.m².

K – Coeficiente de filtración medio de las lateritas = 0,043 m / día.

H – Espesor (en sección vertical) de la columna de lateritas por donde asciende el agua = 1 m.

B - Ancho de la sección de filtración del agua (ascenso capilar vertical) = 1 m.

I - Gradiente (pendiente) del flujo del agua, vertical ascendente = 1

p – Coeficiente que caracteriza la presión atmosférica, equivalente a 10 m en columna de agua que hace resistencia al ascenso del agua por capilaridad, ($p = 10^{-1}$).

De donde: $Q = 0,043 \times 1 \times 1 \times 1 \times 10^{-1} = 0,0043 \text{ m}^3 / \text{día. m}^2 = 4.3 \text{ l/día.m}^2$.

Considerando que el agua que llega a la superficie se evapora, el caudal resultante es equiparable a una lámina de evaporación media en la superficie del terreno de 4,3 mm. / día = 1 569,5 mm. / año, que corresponde con las características de la evaporación en el territorio.

El volumen de Ni, Co, y Fe contenido en el agua, que puede haber transitado a través de una columna de lateritas con sección de 1 m² lo estimamos considerando para los cálculos el período de tiempo de 1×10^6 años, caracterizado por dos cálculos: 1. En toda la columna y 2. En un metro de la columna laterítica (por metro cúbico), por la formula:

$$V = b \times Q \times 365 \times 1 \times 10^6 \times \frac{1}{1000}$$

V- Volumen depositado del elemento analizado Kg / m². en la columna de laterita.

b- Contenido del elemento en gr. / m³ de agua.

Q- Caudal que transita en ascenso vertical por sección de 1 m² de las lateritas = 0,0043 m³ / día. m².

1×10^6 – Tiempo en años considerado para los cálculos (un millón de años).

365- Días que tiene el año.

$$\frac{1}{1000} - \text{Conversión de gr. / m}^3 \text{ a Kg. / m}^3.$$

$$1- V \text{ Ni} = \frac{0.24 \times 0.0043 \times 365 \times 1 \times 10^6}{1\ 000} = 376,68 \text{ Kg. / m}^2$$

$$2- V \text{ Ni} = \frac{376,68}{12} = 31,39 \text{ Kg / m}^3$$

$$1- V \text{ Co} = \frac{0,033 \times 0.0043 \times 365 \times 1 \times 10^6}{1\ 000} = 51,7935 \text{ Kg. / m}^2$$

$$2. V \text{ Co} = \frac{51,7935}{12} = 4,3161 \text{ Kg / m}^3$$

$$1- V \text{ Fe} = \frac{0,768 \times 0.0043 \times 365 \times 10 \times 10^6}{1\ 000} = 1\ 205,376 \text{ Kg. / m}^2$$

$$2. V \text{ Fe} = \frac{1\ 205,376}{12} = 100,448 \text{ Kg / m}^3$$

Para los cálculos aproximados del porcentaje que representa el volumen de los elementos minerales que han transitado por las lateritas, asumiendo la deposición de los mismos en un m³ de estas, se considera un peso volumétrico de las lateritas de 1 800 Kg. / m³.

Los porcentajes de volúmenes determinados de mineral representan en 1 m³ de la masa laterítica los siguientes valores:

$$\text{Ni} = 1,74 \%$$

$$\text{Co} = 0,24 \%$$

$$\text{Fe} = 5,58 \%$$

Los contenidos de los distintos elementos que han transitado por 1 m³ de la masa laterítica resultantes, son aproximados al contenido de estos elementos actualmente en las lateritas del yacimiento estudiado, pero debemos considerar que se ha asumido un tiempo de tránsito del agua a través de las lateritas de 1 x 10⁶ años y en realidad la edad del yacimiento es muy superior, por lo que el volumen de estos elementos que ha transitado por las lateritas en flujo ascendente es muy superior al pronosticado, con lo que se reafirma la influencia de los procesos analizados en la deposición y acumulación de elementos minerales en las lateritas hasta las concentraciones actuales en ellas.

CONCLUSIONES:

1. Desde el punto de vista Hidrogeológico las condiciones existentes en el yacimiento Punta Gorda son poco complejas. Existe un complejo acuífero formado por dos horizontes, el primero en las lateritas (Capa 1y Capa 2), que se caracterizan por poseer propiedades de "acuitardo", el segundo horizonte acuífero está formado por las capas 3 y 4 en las peridotitas.
2. El principal acuífero en el yacimiento lo representa la Capa 4, peridotitas agrietadas, con un régimen de acuífero semiconfinado, con presiones que alcanzan hasta los 8,4 m. (en algunos puntos puede ser mayor) en columna de agua. La profundidad de afloramiento del agua

subterránea varía en función del relieve del terreno y profundidad del techo del acuífero en las peridotitas agrietadas y oscila entre 1 y 27,4 m. La dirección del flujo subterráneo general es en dirección al Norte, con desviaciones locales hacia ríos y pozos de explotación mineral existentes. El gradiente de las aguas subterráneas varía en dependencia del relieve del terreno su valor medio en el territorio es de 0,018. La permeabilidad de las lateritas expresada por el coeficiente de filtración presenta un valor medio de 0,043 m. / día.

3. Las lateritas presentan un alto grado de humedad, debido a las altas propiedades de ascenso capilar de estos sedimentos que en el territorio alcanzan magnitudes hasta de 32 m. con valores medios de unos 26 m. en las Capa 2 y 3 y de hasta unos 3 m. en la Capa 1 de perdigones y granulometría más gruesa. Por las presiones del agua en las peridotitas agrietadas y los procesos de ascensos capilares en las lateritas las aguas llegan hasta la superficie del terreno o hasta la Capa 1, donde se evaporan. El caudal de evaporación de las aguas es de unos 0,0043 m³. / día. m²., equivalente a una lámina de evaporación de 1569,5 mm. / año. Esta lámina de evaporación resultante se corresponde con la evaporación del territorio.
4. Las aguas subterráneas en el yacimiento por su composición química son Bicarbonatadas Magnésicas con mineralización predominante de 0,2 gr. / l., que las determina como aguas muy dulces, con una dureza media total (Ca + Mg) de 3,35 mg. eq. / l., que las hace aguas algo duras. En el contenido químico de las aguas subterráneas están presentes varios elementos pesados entre los que se encuentran el Níquel, Cobalto y Hierro con contenidos medios en el territorio de: Ni = 0,24 mg. / l., Co = 0,033 mg. / l., Fe = 0,8 mg. / l.
5. Por el análisis de datos y resultados obtenidos, se establece una teoría novedosa a nivel nacional e internacional: En la formación de los yacimientos ferro-cobalto-niquelíferos de las Ofiolitas y su posterior enriquecimiento mineral, las condiciones hidrogeológicas y procesos que se desarrollan en las lateritas tienden a ser uno de los principales factores. De forma predominante entre ellos: la composición química de las aguas subterráneas en las peridotitas agrietadas, presión de las aguas en estas rocas bajo las lateritas y las altas propiedades de ascenso capilar de las lateritas, que provocan un flujo vertical ascendente de agua en caudales que aunque pequeños permite a largo plazo el paso de gran volumen de Níquel, Cobalto y Hierro a través de las lateritas y su deposición en ellas, acumulando sino el total, si gran parte de los contenidos minerales actuales del yacimiento estudiado y en otros de características similares.
6. El trabajo como tal representa un alto efecto económico, ya que establece las bases para la ejecución de Proyectos de Explotación Minera en los yacimientos lateríticos que incluyan sistemas de drenaje de estos, también aporta datos (mapas) que permiten seleccionar las áreas para Plataformas de secado de la materia prima antes de su ingreso a la industria, con lo que se podrá obtener una considerable reducción de la humedad en la materia prima mineral y con ello reducir considerablemente el consumo de combustible (Petróleo) durante el proceso de secado del mineral en hornos de la Industria, pudiendo alcanzar varios cientos de miles de USD anualmente.

BIBLIOGRAFÍA.

- Blanco, J. L., G. Llorente, 2004. Informe técnico sobre investigaciones ingeniero - geológicas e hidrogeológicas de la Base Minera Punta Gorda. Holguín: INRH, 54 p.
- De Miguel, C., 2004. Informe conclusivo de las investigaciones hidrogeológicas e ingeniero geológicas del yacimiento Punta Gorda. Moa: ISMM, 38 p.
- De Miguel, C., 2002. Proyecto: Hidrogeología Yacimiento Punta Gorda (Programa general de trabajos hidrogeológicos en yacimiento Punta Gorda). Moa: ISMM, 12 p.

- González, A., 1986. Mapa de evaporación de las provincias orientales. La Habana: INRH.
- Palacios G., L. Monte de Oca, O. Fernández, E. Castaño, 2004. Caracterización de las aguas subterráneas en el área industrial de la Empresa Ernesto Che Guevara. Moa: ECECG, 14 p.
- Sánchez, Y., 2006, Caracterización hidrogeológica e ingeniero - geológica del yacimiento Punta Gorda (Trabajo de Diploma). Moa: ISMM, 113 p.