

Modelos genéricos de diseño de redes de monitoreo hidrogeológico en yacimientos de lateritas ferroniquelíferas: aplicación a las saprolitas y serpentinitas blandas del horizonte inferior de las cortezas lateríticas de Moa, Cuba Oriental

Generic models in the design of hydrogeological monitoring networks in lateritic iron-nickeliferous ore mines: application to saprolites and soft serpentines of lateritic crusts in Moa, Eastern Cuba

L.F. Molerio León

INVERSIONES GAMMA, S.A., PO Box 6219, CP 10600, Habana 6, Ciudad de La Habana, Cuba;

E-mail: especialistaprincipal@gmail.com;

RESUMEN

Se presenta una aproximación Euleriana – Lagrangiana al diseño, construcción y operación de una red de monitoreo del régimen y la calidad de las aguas subterráneas en yacimientos niquelíferos de Cuba oriental basados en una solución diferenciada de las ecuaciones de flujo darciano a partir de modelos genéricos.

PALABRAS CLAVE: monitoreo, Cuba, saprolita, hierro, níquel, minería

ABSTRACT

An Eulerian-Lagrangian approach to the design construction and operation of a hydrogeologic monitoring network in nickeliferous ore bodies from Eastern Cuba based on the differentiated solution of the Darcian flow equations in generic flow models.

KEY WORDS: monitoring, Cuba, saprolite, iron, nickel, mining

INTRODUCCIÓN

Al diseñarse una red de monitoreo de aguas subterráneas es imprescindible definir estos aspectos básicos de su operación (Molerio y Torres, 2002):

- Los objetivos de la Red;
- La representatividad espacial de los puntos de monitoreo;
- La frecuencia de las observaciones;
- El tipo y número de variables a monitorear.

La aplicación de técnicas geomatemáticas y de la teoría de la información garantizan el diseño y operación de una Red de Monitoreo Hidrogeológico y el consecuente Sistema de Prevención Hidrogeológica al menor costo aceptable, habida cuenta que se implementan con el mínimo de estaciones que exhiben la máxima representatividad pero en las que, también, se mide el menor número de variables en los plazos más largos, garantizando la máxima informatividad posible.

Aplicadas desde la etapa de diseño de la red, estas técnicas conducen a una rigurosa elaboración del modelo conceptual del sistema hidrológico, de tal modo que permiten:

- Identificar los factores naturales o inducidos artificialmente, incluidos los de construcción y operación de cada estación de monitoreo, que controlan el régimen hidrodinámico de los acuíferos así como los que rigen el proceso de adquisición de la composición química y la calidad de las aguas;
- Regionalizar adecuadamente los sistemas acuíferos y definir la estructura y composición de las estaciones que conformarán el Sistema de Prevención Hidrogeológica en cada una de las cuencas subterráneas, y,

- Precisar las relaciones estímulo - respuesta en el régimen y la hidrodinámica geoquímica de cada estación de monitoreo a fin de definir los instantes e intervalos óptimos de muestreo y las variables a medir en cada estación en cada intervalo de tiempo.

Este artículo presenta los criterios básicos de diseño y operación de una red de monitoreo del régimen y la calidad de las aguas subterráneas en un yacimiento de saprolitas ferroniquelíferas del oriente cubano basados en la aplicación de modelos genéricos particulares de solución de la ecuación de flujo darciano en los diferentes sistemas de flujo considerados. La red operó durante varios años con esta concepción, lo que permitió validar favorablemente los conceptos de diseño.

CONCEPCIÓN GENERAL DEL DISEÑO DE LAS REDES DE MONITOREO HIDROGEOLÓGICO

El diseño de la red de monitoreo tiene que satisfacer las necesidades de información a partir del correcto diseño de:

- La distribución espacial de los puntos que integran la red.
- Una construcción adecuada de las estaciones de monitoreo (pozos en este caso).
- Un contenido de muestreo (físico, químico, bacteriológico, isotópico, etc.) que satisfaga las necesidades de conocimiento.
- Una frecuencia tal que permita obtener la información de diseño con el menor número posible de viajes al campo (sobre todo en regiones inhóspitas o de difícil acceso).

El **control no-supervisado o Euleriano** consiste en medir las variables de interés en un grupo de estaciones fijas distribuidas en el territorio (dominio espacial). En este caso no se ejerce ningún control sobre las condiciones del monitoreo y éste se limita a registrar la variación en el tiempo de las concentraciones de las variables en una estación. Es el caso de un observador fijo que no ejerce ningún control sobre los factores (condiciones de contorno) que influyen en el comportamiento de la variable (temperatura, lluvia, presión atmosférica, entre otras). Bajo este principio y, por tanto, con tal objetivo, se construyen la mayor parte de las estaciones de observación del régimen y la calidad de las aguas subterráneas.

El **control supervisado o Lagrangiano** consiste en medir las variables de interés en un número de estaciones discretas distribuidas en el territorio bajo condiciones de contorno fijas; es decir, sin que varíen los factores que influyen en el comportamiento de la carga piezométrica. La aplicación asume la observabilidad de la variable y que ésta cumple con los criterios de Observabilidad de Luenberger.

La **Aproximación de Lagrange** permite obtener una imagen matemáticamente “instantánea” de la situación bajo ciertas condiciones meteorológicas y tecnológicas. Ello significa que se dan ciertas condiciones de simultaneidad temporal en el dominio; es decir, que los factores de control de flujo (dirección y velocidad del viento, temperatura, humedad relativa, presión atmosférica, concentración en los emisores, caudal en los emisores, tecnología del proceso de emisión y composición del aire y de las aguas terrestres) son constantes en el intervalo de tiempo seleccionado para la medición.

Esto equivale a suponer que la función es continua en el dominio espacial y constante en el temporal, de manera tal que las concentraciones, medidas en diferentes estaciones simultáneamente, definida la simultaneidad como el intervalo Δt en que los factores de flujo y las concentraciones son constantes, permiten obtener una descripción cuantitativa del estado de calidad del aire para ciertos instantes dados.

La **Aproximación de Lagrange** permite, entonces, caracterizar el estado de la función, en este caso, las cargas piezométricas, los indicadores físicos y las concentraciones de los macroconstituyentes y metales y microelementos totales y disueltos en las aguas subterráneas, en intervalos de tiempo determinados, lo que equivale a identificar el estado de calidad y las fuentes y pérdidas de la función.

La **Observabilidad del Sistema** requiere de una descripción matemática única de las condiciones internas (procesos, parámetros, condiciones iniciales y de contorno) y externas (instrumentación, frecuencia del muestreo, distribución espacial de la red, entre otras). La derivación conjunta de las ecuaciones de estado y de observación de un sistema con una red de monitoreo activa o programada, debe permitir reconstruir el estado del sistema a partir de mediciones de tal estado en algunos puntos discretos del

sistema. El observador se define, ahora, como un sistema dinámico abstracto cuyo estado converge con el del sistema físico real. Disponiendo del observador pueden reconstruirse, entonces, las coordenadas del vector de estado, en especial, aquellas que resulten como incógnitas luego de remover algunos puntos de la red. Para estos puntos, el error de reconstrucción se define como la desviación cuadrática media de los puntos reconstruidos respecto a los reales.

La **Teoría del Observador** se basa en los siguientes presupuestos:

1. Existe realmente una red de monitoreo que suministra información acerca -por ejemplo- de la carga piezométrica en algunos puntos discretos del sistema;
2. Se conocen los límites del sistema y la estructura y distribución espacial del campo de propiedades físicas;
3. Durante el período de observación se conocen las condiciones de contorno, las entradas, y las salidas del sistema;
4. El sistema está libre de ruidos, lo que significa que los factores estocásticos desempeñan un papel poco importante en el comportamiento temporo-espacial del sistema.

La presencia de eventos críticos altera las series, por lo que casi siempre se requiere de un blanqueo de la data para minimizar los errores que introducen los componentes estocásticos naturales y artificiales. La forma de la ecuación de estado es, $Dh + Ah = Bu$, en la que h , vector de estado ($n \times 1$); D , A , matrices de parámetros ($n \times n$); u , vector de entrada ($k \times 1$) y B , matriz de distribución de entrada.

Usualmente, la información hidrogeológica de base resulta escasa, insuficiente e imprecisa. Por ello el diseño se orienta a la ganancia de informatividad en el menor tiempo al mínimo costo. La distribución de la red debe responder, básicamente, a este criterio.

Al carecerse de información hidrogeológica el diseño de la red parte de una aproximación mixta de tipo Euleriana-Lagrangiana, para la distribución de los puntos y la frecuencia de muestreo. Las redes de monitoreo hidrogeológico en los yacimientos minerales se diseñan, básicamente, para cumplir los siguientes objetivos:

- Orientar la explotación minera.
- Identificar las reservas inundadas; esto es, las que se encuentran en la zona saturada del acuífero.
- Evaluar la afluencia de agua hacia los cortes y frentes de excavación.
- Identificar el estado de calidad actual y prospectivo de las aguas subterráneas.
- Pronosticar las variaciones en el régimen y calidad de las aguas durante las etapas de explotación de la mina, abandono y restauración del sitio.

La concesión minera (Fig. 1) ocupa el tercio medio de la cuenca del Río Moa (Fig. 2) y su afluente principal, el río Cabañas, en Cuba nororiental. Aquí predominan las rocas intrusivas del Cretácico en las cuales están incluidas las rocas metamórficas esquistosas atribuibles al Jurásico ($J_1 - 2$), pues se consideran rocas del basamento arrancadas por las protrusiones hiperbasálticas. Las formaciones efusivo-sedimentarias tienen una distribución limitada, las primeras que deben corresponder al Cretácico (K) y las segundas al Paleógeno-Neógeno y Cuaternario.

En cada caso particular del cuerpo minero, la distribución de los puntos debe responder a un descriptor matemático del campo de potenciales de flujo, adecuado a la disponibilidad de pozos con alguna indicación de contener agua subterránea. En principio puede ser cómodo asumir que cada cuerpo minero constituye una unidad hidrogeológica, pero no un acuífero ni, tampoco, un sistema de flujo subterráneo. La razón de ello es, básicamente, que por la naturaleza de las rocas encajantes y las condiciones de yacencia del mineral, no siempre puede identificarse un acuífero, en sentido estricto. La discontinuidad espacial del horizonte de aguas subterráneas es más una regularidad que una excepción. Ello hace que, también, aclarar las relaciones entre las aguas superficiales (Fig. 2) y subterráneas debe ser considerado una prioridad en el diseño de las redes.

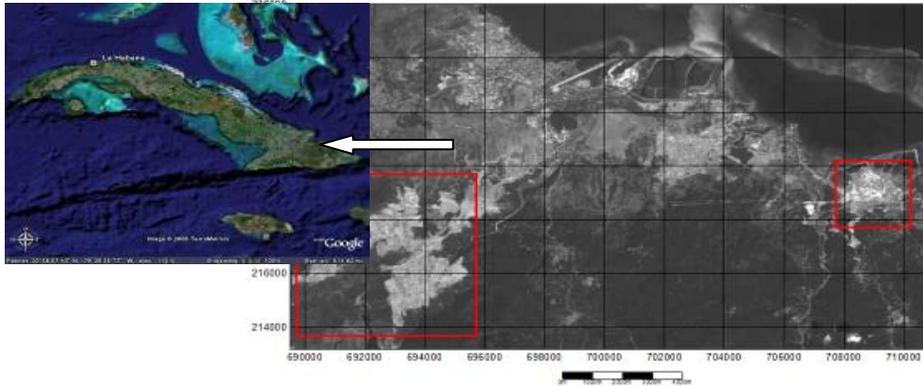


Fig. 1. Áreas estudiadas



Fig. 2. Vista general del río Moa, a la altura de la presa del mismo nombre.

AGUAS SUBTERRÁNEAS Y SISTEMAS ACUÍFEROS LOCALES

El yacimiento presenta la particular característica de la discontinuidad de los horizontes acuíferos. Las aguas subterráneas forman unidades diferentes, sistemas de flujo locales (Freeze y Witherspoon, 1966a, 1966b, 1966c), en los distintos cuerpos mineros y, dentro de ellos, incluso, existen vastas zonas que funcionan como barreras impermeables y acuícludas locales. Esta marcada zonalidad en la distribución de las aguas subterráneas, está controlada fundamentalmente por la hipsometría, el espesor de la corteza de intemperismo y la tectónica. A partir de la información obtenida durante la perforación de exploración hidrogeológica, fue posible corroborar la existencia de dos horizontes acuíferos dentro de las áreas explotables (Fig. 3):

- Horizonte acuífero desarrollado en los ocres inestructurales y estructurales que componen la corteza de intemperismo.
- Horizonte acuífero desarrollado en las rocas serpentinizadas, disgregadas y alteradas en la base de la corteza de intemperismo.

Acuífero desarrollado en el horizonte de los ocres inestructurales y estructurales.

Este acuífero tiene una yacencia libre (sin presión) a profundidades que oscilan entre los 4 y los 13 m, pero resultan muy variables en función de las lluvias locales. Es un acuífero con alimentación cercana (local), asociada a la infiltración vertical que se produce a partir de toda la superficie del relieve con velocidades de tránsito bastante altas a través de la zona de no saturada, desarrollada en la zona de los ocres inestructurales muy permeables.

Se comporta como un acuitardo con relación al acuífero subyacente, desarrollado en las serpentinitas disgregadas y alteradas, de manera que fenómenos de leakage son comunes, tanto a través de la matriz como de grietas aisladas o zonas de fracturación tectónica.



Fig. 3. Corte geológico general donde se muestran, exhumados, los dos horizontes acuíferos identificados.



Fig. 4. Descarga de las aguas subterráneas del horizonte acuífero superior. Estos manantiales son de funcionamiento estacional y se asocian solamente al flujo lateral de las aguas subterráneas alimentadas por las precipitaciones locales.

En determinadas ocasiones, cuando los niveles de las aguas producto de las precipitaciones son bajos es capaz de alimentarse a expensas del horizonte subyacente a través de las vías de comunicación antes expuestas y cuando es favorecido por la infiltración de las aguas atmosféricas, puede alimentar también el horizonte subyacente en zonas donde la presión de las aguas de este último sea pobre o escasa. La descarga fundamental, se produce en forma difusa y de pequeños manantiales, hacia las corrientes superficiales que atraviesan el área y que cortan profundamente todo el espesor de éste acuífero (Fig. 5)

Acuífero desarrollado en las rocas serpentinizadas, disgregadas y alteradas.

Este acuífero subyace al anterior horizonte y por tal motivo resulta confinado entre las capas ocrosas (arcillosas) del horizonte superior y las rocas poco alteradas en profundidad. Esto le confiere cierta presión, como pudo identificarse en las perforaciones de exploración. No obstante, la carga es pequeña y nunca (en el área y período estudiado) sobrepasa el metro.

La alimentación de este acuífero no es local y está asociada a los afloramientos de serpentinitas intensamente fisuradas y fracturadas, desarrollados hacia la zona de la divisoria de aguas con el río Moa, y en menor grado, a partir del acuitardo suprayacente. Los tiempos de tránsito son mayores al igual que el tiempo de contacto agua – roca. La descarga de éste acuífero se produce mediante manantiales sencillos y múltiples a diferentes alturas que funcionan durante todo el año. Los caudales pueden llegar hasta los 15 l/s. el plano de descarga suele estar orientado; en dirección E-W

y siempre se ha identificado asociado a zonas de debilidad tectónica que drenan a las corrientes superficiales que atraviesan el yacimiento.

MODELOS GENÉRICOS

No todos los pozos de exploración geológica presentaron evidencias de agua en el subsuelo y, en general, la informatividad de partida fue prácticamente nula. La red de cada cuerpo mineral, concebida

como unidades hidrogeológicas independientes, responde a un descriptor de potenciales individual. Es decir que, en cada uno de ellos, la ecuación general de flujo darciano se resuelve de modo diferente. La Tabla 1 muestra resumidos, como ejemplo, dos de los modelos conceptuales básicos del sistema de distribución de potenciales (Fig. 5) de uso más común en el diseño de redes hidrogeológicas en cuerpos mineros. Los modelos conceptuales se expresan de la manera siguiente (Bear et al., 1968).

Transformada general de Laplace:

- Unilateral: $\int_{x=0}^{\infty} \varphi(x) \exp(-sx) dx$
- Bilateral: $\int_{x=-\infty}^{\infty} \varphi(x) \exp(-sx) dx$
- S-Multiplicativa: $\int_{x=0}^{\infty} \varphi(x) s \exp(-sx) dx$

Solución de Kamenski:

$$\varepsilon(t_2) + \frac{1}{b_2} \left[\frac{T_1(t_2)}{\Delta x_1} \Delta H_{1x}(t_2) + \frac{T_3(t_2)}{\Delta x_3} \Delta H_{3x}(t_2) \right] + \frac{1}{b_1} \left[\frac{T_2(t_2)}{\Delta x_2} \Delta H_2(t_2) + \frac{T_4(t_2)}{\Delta x_4} \Delta H_{4x}(t_2) \right] = \frac{\Delta H_{0t}}{\Delta t} n_s$$

Solución para z^{-n} puntos singulares:

$$\zeta = z^2 = \varphi + i\psi$$

$$\varphi = x^2 - y^2$$

$$\psi = 2xy$$

En el descriptor del campo de potenciales, s, x, y, z, t , son las coordenadas temporo-espaciales; ζ, ψ, φ , son los potenciales y las funciones de corriente en el dominio de flujo y H es el potencial expresado en términos de carga hidráulica. Las Tablas 2 y 3 muestran los grados de homogeneidad relativa y el número de términos que se requieren para precisar el grado de certidumbre.

Tabla 1. Modelos conceptuales de la distribución de potenciales.

Tipo de flujo	Régimen	Modelo conceptual
Libre (sin presión)	Permanente	Transformada general de Laplace Uni- y bilateral y s-multiplicativa para flujo bidimensional
	No permanente	Solución de Kamenski para flujo unidimensional
Semilibre	Permanente	Solución para z^{-n} puntos singulares

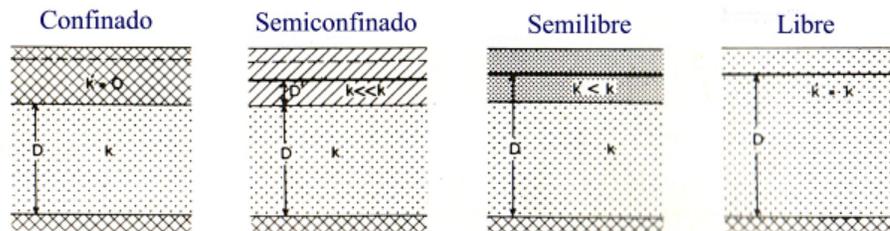


Fig. 5. Tipos genéricos de acuíferos (según Krusemann y De Ridder, 1985).

Tabla 2. Grados de homogeneidad relativa de los sistemas acuíferos a partir de la estructura del campo de propiedades físicas, según Borevskii, Samsonov y Yazvin, 1979 (σ , desviación estándar; C.V., Coeficiente de variación)

Grado de homogeneidad	$\log \sigma$	C.V.
Homogéneos	< 0,2	< 0,4
Heterogéneos	0,2 - 0,4	0,4 - 0,8
Muy heterogéneos	0,4 - 0,75	0,8 - 1,5
Extremadamente heterogéneos	> 0,75	> 1,5

Tabla 3. Número necesario en series de transmisividad para la valoración del grado de certidumbre según Borevskii, Samsonov y Yazvin, 1979 (σ , desviación estándar)

$\log \sigma$	95%	90%	80%	70%	50%
0,2	22	15	9	6	3
0,3	45	32	20	13	6
0,4	79	55	34	22	10
0,5	119	84	51	34	15
0,6	171	120	74	49	21
0,8	306	215	131	86	36

$$\log \sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \log x_i^2 - \frac{(\sum_{i=1}^n \log x_i)^2}{n}}{n-1}}$$

$$CV = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i}{x_0} - 1\right)^2}{n-1}}$$

ESTRUCTURA DE LA RED DE MONITOREO

Distribución espacial

Los puntos finalmente seleccionados para integrar la Red de Monitoreo se resumen en la Tabla 4. Un ejemplo de distribución, para el caso del cuerpo YA, se presenta en la Fig. 6.

Construcción de la red

Los pozos fueron construidos con una perforadora UGB 50 sobre una red de exploración geológica preexistente, en mallado 100 x 100. El desglose de tareas fue el siguiente:

- Reperforación (rimado), limpieza, implementación y desarrollo con cubeteo de 15 pozos.
- Encamisado e instalación de camisa ranurada y filtros de grava y arena en el horizonte acuífero y ciega en el horizonte no saturado, con las siguientes especificaciones:
 - Diámetro mínimo de perforación 89 mm
 - Profundidad máxima de los pozos 30 m
 - El filtro de arena y grava tendrá un espesor no menor de 2"
 - La camisa ciega, con tapa, sobresaldrá no más de 50 cm sobre el monumento de hormigón de la base del pozo de observación con dimensiones 15 x 15 x 15 cm
- Construcción de plataforma de grava en un radio de 2 m alrededor de cada pozo.
- Posicionamiento topogeodésico, monumentación y habilitación de los pozos con base hormigón, tapa, cerca y determinación de cota y coordenadas.
- Ensayo de bombeo y purgado de cada uno de los pozos.

Contenido del muestreo: estructura del campo de propiedades físicas y carga hidráulica

Todos los pozos fueron sometidos a ensayos rápidos de caudal a fin de obtener una idea de la estructura del campo de propiedades físicas en la unidad hidrogeológica. La heterogeneidad del campo de transmisividad es alta debido a las peculiares condiciones que rigen los procesos de acumulación de las aguas subterráneas. Algunos sectores de los cuerpos deben funcionar solo de manera episódica. El resto debe funcionar de modo estacional, respondiendo a los ciclos locales de distribución interanual de la lluvia. La red fluvial es prácticamente nula y discurre de forma episódica o estacional generalmente independientes de los sistemas de lagunas y de las aguas subterráneas.

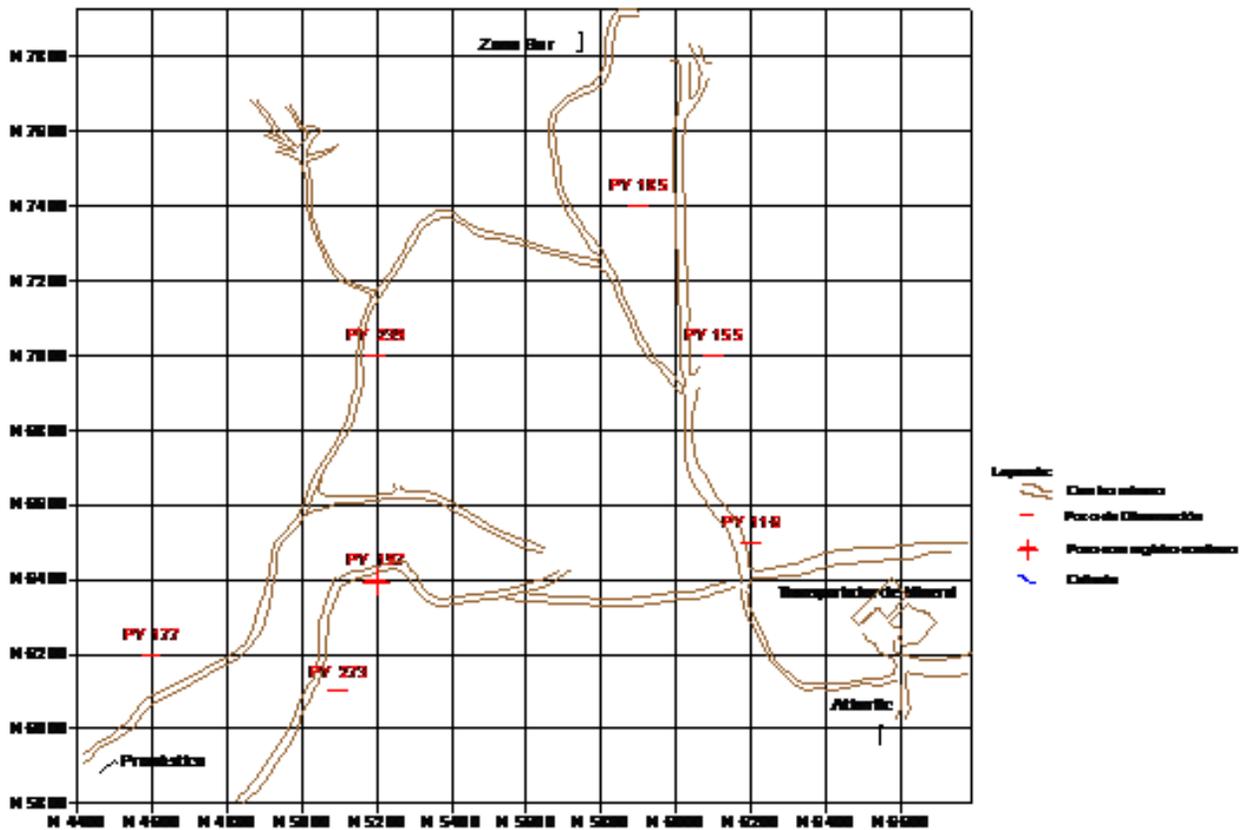


Fig. 7. Distribución espacial de los puntos de observación de las aguas subterráneas en el Cuerpo YA.

La presencia de horizontes acuíferos con diferentes cotas piezométricas, la existencia de barreras de menor permeabilidad, la existencia de dos horizontes acuíferos (hasta probablemente tres) y la identificación de zonas con acuosidad nula, en los campos YA y ZS, indica que **la observación de las oscilaciones de la superficie piezométrica es una de las variables a muestrear durante la operación de la red**. Tres de los pozos fueron seleccionados para equiparlos con registradores automáticos de la fluctuación de las aguas subterráneas a fin de obtener información directa del comportamiento a corto plazo de la distribución de las cargas hidráulicas y transferir esta información, colateralmente, a la identificación de las reservas inundadas de mineral, de manera que pudiera diseñarse, en breve tiempo, el sistema de corte y extracción del mineral.

Contenido del muestreo: hidrodinámica geoquímica

Para diseñar el contenido y la frecuencia de muestreo se colectaron simultáneamente 11 muestras de agua luego del ensayo de bombeo de los pozos, considerado, obviamente, como sobrepurgado de cada pozo para la determinación de macroconstituyentes y metales pesados. La composición general es bastante similar aunque presenta sus especificidades debidas a la diferenciación de las condiciones de formación del escurrimiento y la adquisición de la composición química (Fig. 8). Las variaciones entre los metales totales y disueltos están básicamente asociadas a la influencia de sedimentos en las muestras. Son especialmente notables, por otra parte, las concentraciones de As y Cd observadas. Los valores de Cr, Fe, Mn y Ni se encuentran en los límites esperados para yacimientos de este tipo.

Frecuencia de muestreo

Sin información previa acerca de la variación y variabilidad estacional de la distribución de las cargas hidráulicas y la hidrodinámica geoquímica local, identificar la frecuencia de monitoreo es una de las tareas más difíciles de estimar. La selección de la frecuencia adecuada (Matalas, 1967; Yevjevich, 1972) es quizás la más importante de las tres variables de diseño (las otras dos son la distribución espacial y el contenido) por dos razones básicas:

- El costo de la adquisición de información: transportación, alimentación, muestreo, gastos de laboratorio, salario y viáticos del personal de trabajo de campo.
- El costo de la pérdida de informatividad ante una frecuencia impropia, que anula la efectividad de la red.

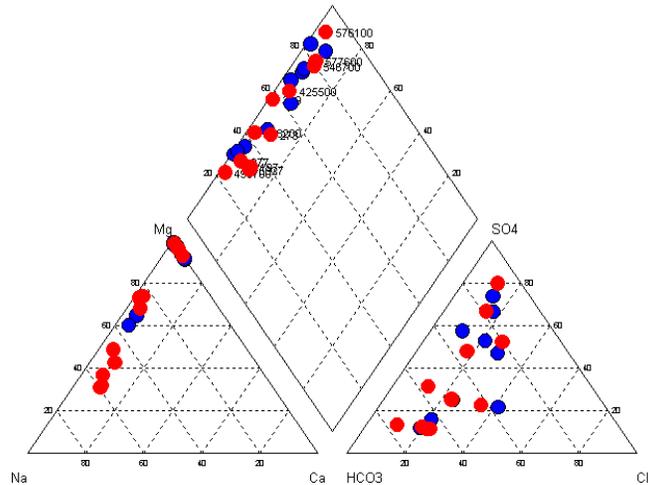


Fig. 8. Diagrama de Palmer-Piper de la composición en macroconstituyentes de una muestra simultánea y aleatoria de 11 pozos de observación del régimen y la calidad de las aguas subterráneas en los tres cuerpos evaluados.

Aunque existen en el mercado registradores automáticos de un grupo de variables físicas y geoquímicas que sustituyen la presencia directa del observador pero la observación directa de los fenómenos que tienen lugar en el terreno jamás es sustituida por ellos y, de cualquier modo, hay que fijarle una frecuencia de lecturas. Acumular datos sobre determinada variable no necesariamente significa que se incremente la información ni la informatividad respecto a la variable o al fenómeno.

En el Trópico Húmedo existe una marcada estacionalidad en el régimen de formación del escurrimiento superficial y subterráneo. Ello proporciona la ventaja adicional de condicionar la frecuencia inicial del muestreo a un plazo tal que permita reconocer esa influencia sobre las variables que caracterizan el régimen de las aguas subterráneas. En el caso de acuíferos libres con rápida respuesta a los estímulos de lluvia –siendo esta la única fuente de recarga natural de los sistemas acuíferos- esto es una ventaja indudable. No lo es tanto, sin embargo, si el acuífero a observar está en algún modo sometido a alguna presión (sea semilibre, confinado o semiconfinado).

En el caso considerado en esta contribución, se trata de un acuífero libre, con respuesta variable pero directa a los estímulos de lluvia, como lo muestran los dominantes bajos valores de SPC. Sin embargo, los fenómenos de transferencia vertical (leakage, percolación) y aguas con mayor tiempo de residencia en el sistema pueden inducir cierto retraso en la respuesta. Por tal motivo se programó un paso de tiempo trimestral para los primeros dos años de operación de la red que resultó adecuado a los fines del proyecto. Al cabo de ellos se procedería a la optimización de la red.

NOTA FINAL

1. La Red de Monitoreo de las Aguas Subterráneas de los cuerpos está compuesta por 15 pozos, 11 de los cuales deben responder a un funcionamiento estacional y los 4 restantes a un régimen episódico, caracterizados por un bajo almacenamiento específico.
2. La Red fue diseñada a partir de una aproximación mixta de tipo Euleriana-Lagrangiana para seleccionar la distribución espacial de los pozos y la frecuencia de muestreo, bajo un criterio de selección dominado por una informatividad de partida muy baja, y una variable accesibilidad, que obligó a un reajuste sostenido en donde cada cuerpo fue tratado como una unidad hidrogeológica y en los que la distribución de potenciales y, por ende, las redes de flujo, fueron resueltas caso a caso.

3. El descriptor de las redes de flujo responde a las condiciones de borde identificadas en cada caso durante el proceso de construcción de la red. Es independiente para cada cuerpo y consideró para régimen permanente libre el modelo conceptual de la Transformada general de Laplace Uni- y bilateral y s-multiplicativa para flujo bidimensional y la Solución de Kamenski para flujo unidimensional. Para acuífero libre y semilibre se aplicó una Solución para z^n puntos singulares
4. La observación de las oscilaciones de la superficie piezométrica es una de las variables a muestrear durante la operación de la red. Tres de los pozos fueron seleccionados para equiparlos con registradores automáticos de la fluctuación de las aguas subterráneas a fin de obtener información directa del comportamiento a corto plazo de la distribución de las cargas hidráulicas y transferir esta información a la identificación de las reservas inundadas de mineral, de manera que pudiera diseñarse, en breve tiempo, el sistema de corte y extracción del mineral.
5. La determinación de macroconstituyentes así como la temperatura y Conductividad Eléctrica Específica de las aguas se incluye en el contenido del monitoreo. El paquete de metales y microelementos seleccionados incluye las asociaciones geoquímicas más importantes en este tipo de yacimiento.
6. Se programó un paso de tiempo trimestral para los primeros dos años de operación de la red que resultó adecuado a los fines del proyecto por tratarse de un acuífero libre, con respuesta variable pero directa a los estímulos de lluvia con la influencia de fenómenos de transferencia vertical (leakage, percolación) y aguas con mayor tiempo de residencia en el sistema que pueden producir cierto retraso en la respuesta.
7. El régimen de muestreo establecido se extendió por dos años hidrológicos bajo un control sostenido de la ganancia de informatividad del sistema en términos de los potenciales de carga, químicos y la identificación de las tasas e intercambios de flujo en las unidades hidrogeológicas.

AGRADECIMIENTOS

A J.R. Hernández Santana, F. Cutié, A. Pierra Conde y a Ana, mi compañera, con los que compartí muchas agradables jornadas de exploración hidrogeológica en los yacimientos ferro-niquelíferos de Cuba Oriental.

BIBLIOGRAFÍA

- Bear, J.; D. Zaslavsky y E. Irmay 1968. Physical principles of water percolation and seepage. Unesco. Arid Zone Res. XXIX, Paris, 465 pp
- Borevskii, B., B. Samsonov, L. Yazvin .1979. Metodica para la determinación de los parámetros de los acuíferos por datos de aforos .en ruso). Edit. Nedra, Moscú, 328 pp
- Freeze, R.A. & P.A. Witherspoon .1966a. Theoretical analysis of regional groundwater flow 1. Analytical and numerical solutions to the mathematical model. Water Resour. Res. 2 pp 641
- Freeze, R.A. & P.A. Witherspoon .1966b. Theoretical analysis of regional groundwater flow 2. Effect of water table configuration and subsurface permeability variations. Water Resour. Res. 3 pp 623
- Freeze, R.A. & P.A. Witherspoon .1966c. Theoretical analysis of regional groundwater flow 3. Quantitative interpretations. Water Resour. Res. 4 pp 617-640
- Matalas, N.C. .1967. Time Series Analysis. Water Resour. Res. 3, pp 817-829
- Molerio León, Leslie F y J.C. Torres Rodríguez .2002. Métodos geomatemáticos de diseño y optimización de redes de monitoreo del régimen de las aguas subterráneas. Ing. Hidráulica y Ambiental, .3. 24-38
- Tóth, J.1963. A theoretical analysis of groundwater flow in small drainage basins. J. Geophys. Res. 68 pp 4795
- Yevjevich, V.M. .1972). Stochastic Processes in Hydrology. Water Resoiurc. Publ. Fort Collins, Colo., USA, 216 pp