



**BOLETÍN INFORMATIVO DE LA
COMISIÓN DE GEOSPELEOLOGÍA
Federación Espeleológica de América Latina
y el Caribe
-FEALC-**

*[Geospeleology Commission Newsletter,
Speleological Federation of Latin America and the
Caribbean -FEALC-]*

No. 58, Abril 2005

Coordinador: Prof. Dr. Franco Urbani
Sociedad Venezolana de Espeleología. Apartado 47.334, Caracas 1041A, Venezuela.
Telefax: (58)-212-272-0724, Correo-e: urbani@cantv.net

Boletín Informativo de la Comisión de Geoespeleología, Federación Espeleológica de América Latina y el Caribe (FEALC). *Esta publicación es de carácter informal y no arbitrada, preparada con el único objetivo de divulgar rápidamente las actividades geoespeleológicas en la región de la FEALC. Sólo se difunde por vía de correo electrónico. Es de libre copia y difusión y explícitamente se solicita a quienes lo reciban que a su vez lo reenvíen a otros posibles interesados, o lo incluyan en páginas web. Igualmente se pide que obtengan copias en papel para las bibliotecas de sus instituciones. Se solicitan contribuciones de cualquier tipo y extensión para su divulgación. Todos los números anteriores están disponibles en <http://www.fealc.org/geoespeleologia.htm> o solicitándolos a fealc-sve@cantv.net.*

Geospeleology Commission Newsletter, Speleological Federation of Latin America and the Caribbean (FEALC). *This publication is informal and not peer-reviewed. Its only objective is to quickly disseminate the geoespeleological activities in the FEALC region. It is only distributed by electronic mail. It can be copied freely and we ask the recipients to forward to other interested parties or to include in Web pages. We recommend that you obtain a paper copy for the library of your institution. Contributions of any type and extension are welcomed. All previous issues are available at <http://www.fealc.org/geoespeleologia.htm> or ask for them to fealc-sve@cantv.net.*

Índice – Index

Hidrodinámica isotópica de los sistemas acuíferos Jarucop y Aguacate, Cuba. <i>Leslie F. MOLEIRO LEÓN et al.</i>	2-8
Métodos geomatemáticos de optimización de redes de monitoreo de aguas subterráneas. <i>Leslie F. MOLEIRO LEÓN & J. C. TORRES RODRÍGUEZ.</i>	9-16
Vulnerabilidad a la contaminación en el tercio inferior de la cuenca del río San Antonio. <i>Rosa María Leal Ramírez et al.</i>	17-25

Hidrodinámica isotópica de los sistemas acuíferos Jaruco y Aguacate, Cuba

INTRODUCCIÓN

En Cuba, los acuíferos cársicos ocupan el 65 % del territorio del país.^{1,2} Estos constituyen, aproximadamente, el 85 % de los recursos totales en aguas subterráneas.^{3,4} Más de la mitad se destinan al abastecimiento poblacional, agrícola e industrial. Uno de los sistemas acuíferos más notables, por razón del volumen de sus recursos, la importancia del receptor de su explotación y las singularidades de su régimen hidrodinámico es la cuenca Jaruco-Aguacate, en el Occidente de Cuba (fig. 1). Gran parte del abastecimiento urbano e industrial de la Ciudad de La Habana, capital del país, y casi todo el suministro de agua potable de la ciudad de Matanzas, capital de la provincia de igual nombre, proviene de este sistema acuífero. Vastas áreas agrícolas y no pocos complejos agroindustriales aprovechan estas aguas subterráneas para el regadío o la emplean en su proceso industrial; poco más de una decena de poblaciones del territorio se sirven, exclusivamente, de estas fuentes.



FIG. 1 *Mapa de localización.*

Resumen / Abstract

Se presentan los resultados de la aplicación de un modelo isotópico de las aguas subterráneas de los sistemas acuíferos Jaruco y Aguacate, Cuba. El mejor ajuste del modelo de dispersión, validado con isótopos estables (^{18}O y 2H) y radioactivos (3H), mostró una estratificación del sistema acuífero en dos niveles básicos. Tales niveles acuíferos presentan tiempos de renovación de las aguas de tres meses para el superior, y de unos 100 años para el inferior. Este último constituye, mayoritariamente, el caudal base de los manantiales de Ojo de Agua y Bello, y, por ello los caudales de explotación en estiaje, de los acueductos de El Gato y Bello. Los resultados del modelo introducen una restricción de consideración en la explotación de las aguas subterráneas de ambos sistemas acuíferos.
Palabras clave: acuíferos cársicos, tritio, oxígeno 18 deuterio, modelación matemática

An isotopic dispersive model is applied to the Jaruco and Aguacate karstic groundwater basins of Western Cuba. The best fit of the model was validated with stable (^{18}O and 2H) and radioactive (3H) isotopes. Modelling showed an aquifer stratification in two basic levels with turnover times of three months to the upper level and close to 100 years to the lower level. The last one mainly supplies the baseflow of the Ojo de Agua and Bello springs and therefore, controls the dry season exploitation yields of the aqueducts of El Gato and Bello. Model results introduces an important constraint in the exploitation of groundwater resources of both aquifer systems.

Key words: aquifer karstic, tritium, oxygen 18, deuterium, mathematical modeling

L. F. Molerio León, Grupo de Aguas Terrestres, Instituto de Geofísica y Astronomía, Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente, CITMA e-mail:lmolerio@hotmail.com

P. Maloszewski, GSF, Institut für Hydrologie, Munich, RFA

M. G. Guerra Oliva, Grupo de Aguas Terrestres, Instituto de Geofísica y Astronomía, CITMA

D. M. Arellano Acosta, Agencia de Medio Ambiente, CITMA, Ciudad de La Habana e-mail:marell@ama.cu

K. del Rosario Rodríguez, Dirección Provincial de Recursos Hídricos, Matanzas

Desde principios de la década de 1960, la llamada cuenca Jaruco-Aguacate-M 1 ha recibido una atención especial por parte de las autoridades nacionales encargadas del manejo de los recursos hidráulicos; sobre todo, desde que S. Gúneva, entre 1966 y 1967, realizara la primera evaluación de sus recursos de agua subterránea.^{4,5} Hasta la fecha se han realizado no pocos estudios locales y algunas evaluaciones regionales.⁴⁻²⁰ El sistema acuífero, cuyo eje principal se orienta de Este a Oeste, está constituido por dos unidades hidrogeológicas bien definidas. La occidental, Jaruco, es un típico polje cársico con un área cercana a los 300 km² cuya zona de descarga natural, los manantiales Ojo de Agua se encuentran entre las cotas +70 y +60; el caudal base promedio es de unos 3,9 m³/s. La parte oriental, Aguacate (que incluye la denominada cuenca M 1), es un valle fluvio-cársico decapitado de unos 400 km² de superficie cuya zona de descarga natural la constituye un conjunto de surgencias de flujo difuso que descargan entre cotas +30 y +10, al este del territorio, con un caudal base promedio de 3 m³/s.

El principal problema hidrogeológico del sistema se puso de manifiesto a principios de los años 70, cuando las aguas de los manantiales Bello, al este del sistema, aparecieron contaminados por residuales azucareros vertidos en una caverna unos 20 km al oeste. Como quiera que el vertimiento se producía desde principios de este siglo sin afectaciones trascendentales para las aguas subterráneas, y la divisoria subterránea entre los sistemas Jaruco y Aguacate-M 1 se situaba al este del punto de vertimiento, el inesperado resultado elevó a un primer plano la necesidad de definir, con la mayor precisión, la posición de la divisoria hidrogeológica entre ambos sistemas y el régimen hidrodinámico del acuífero en su conjunto. La solución del problema se requería con mayor premura por cuanto el macizo occidental, la cuenca Jaruco, incrementaría la explotación de las aguas subterráneas en 100 millones de metros cúbicos con la construcción, en 1987, del Acueducto El Gato. El sector oriental, la cuenca Aguacate-M 1 también preveía la duplicación de su explotación. Los estudios realizados,^{9,11,15-20} lograron precisar la zona de la divisoria, pero las técnicas empleadas ofrecían no pocas limitaciones para definir algunos indicadores hidrodinámicos del acuífero como los parámetros de dispersión, la posición de las zonas de alimentación, la distribución de los sistemas locales e intermedios de flujo, el tiempo de renovación de las aguas y las relaciones hidrodinámicas y geoquímicas agua-roca.

En 1989, el Organismo Internacional de Energía Atómica, a través del Programa de Arreglos Cooperativos para la Promoción de la Ciencia y la Tecnología Nucleares en América Latina, ARCAL XIII, patrocinó un conjunto de investigaciones de hidrología isotópica destinadas a la

aclaración de un conjunto de aspectos básicos de la dinámica del flujo regional.

Este trabajo presenta los resultados de la modelación matemática del tritio, destinada a obtener los tiempos de residencia de las aguas subterráneas y las tasas de infiltración a fin de precisar el balance hídrico del sistema mediante técnicas isotópicas.

■ HIDRODINÁMICA ISOTÓPICA

Con la información disponible de la Red de Monitoreo Isotópica diseñada especialmente para este estudio, se elaboró un modelo conceptual de la hidrodinámica isotópica ambiental de las aguas subterráneas. La fundamentación matemática ha sido presentada por uno de los autores,²¹⁻²⁸ en tanto el modelo conceptual parte de asumir todo el sistema como un medio de doble porosidad donde el agua móvil del acuífero se encuentra en las grietas y la componente inmóvil en la matriz microporosa, estimada en un 40 %. La porosidad de grietas, considerada en este caso como porosidad efectiva, se desconoce con precisión y fue estimada en un 5 % para la construcción del modelo. Este valor es más alto que el encontrado en la zona no saturada. Las características de la zona de descarga natural impidieron, en ambos sistemas acuíferos, coleccionar muestras de los manantiales cársicos. Por tal motivo, el desarrollo del modelo conceptual y la aplicación de la simulación matemática fueron solamente posibles a partir de información isotópica ambiental derivada del bombeo en los campos de pozos de El Gato y Bello.

Oxígeno-18 y Deuterio

Durante 1990, los valores de ¹⁸O y ²H medidos en El Gato y Bello mostraron el mismo valor medio, -3,18 % para el $\delta^{18}O_{out}$ y -18,5 % para el δ^2H_{out} . Las variaciones estacionales resultaron muy pequeñas. El ingreso medio ponderado anual de isótopos estables en las aguas de lluvia resultó $\delta^{18}O_{in} = -2,74$ % y $\delta^2H_{in} = -16,2$ %, con amplitudes respectivas de 1,4 % y 19,5 % para el oxígeno-18 y el deuterio. En los meses de verano la concentración media ponderada de Deuterio es de $\delta^2H_s = -20,4$ % (mayo a octubre) y en invierno $\delta^2H_w = -5,7$ % (noviembre a abril). Del mismo modo, la relación entre las cantidades de lluvia en invierno y verano para 1990 es de 5,5:1, en tanto para todo el período 1989-1991 es de 4:1. La simple comparación en el contenido de deuterio en los puntos de descarga, con las medias ponderadas de todo el año muestra una fuerte influencia de los meses de verano, donde la tasa de infiltración es mayor que 1. La concentración en isótopos estables permite estimar la tasa de infiltración a de manera que:

$$\alpha = \alpha_w / \alpha_s, \text{ donde } \alpha_w = I_w / P_w \text{ y } \alpha_s = I_s / P_s:$$

siendo I_w e I_s la infiltración media en invierno (w) y verano (s) y α_w y α_s , las tasas de infiltración para tales períodos.

A partir de los datos isotópicos, la tasa de infiltración α se calcula según la expresión:

$\alpha = Pw/Ps = (\delta Hw - \delta Hout) / (\delta Hout - \delta Hs)$ que, para 1990, equivale a 1,25.

Tritio

Las figuras 2 y 3 muestran la concentración de tritio medida en las aguas de lluvia y subterráneas, para el período 1989-1991 que, como se observa, exhiben claras diferencias entre los períodos de invierno y verano. En invierno, la concentración media de 3H resulta muy baja, alrededor de 1 UT; en tanto, durante el verano, se incrementa rápidamente, aunque con un retardo entre uno y tres meses (compárense las figuras 2 y 3).

Este análisis cualitativo constituyó la base para asumir que el acuífero consiste de dos capas diferentes; la más profunda, caracterizada por un largo tiempo de tránsito y, la superior, con un tiempo muy breve. Durante la época de seca (invierno), solamente se drenan las aguas del nivel inferior mientras que, en el verano (época de lluvias) se bombean las aguas mezcladas de la componente antigua del nivel inferior y las más recientes del horizonte superior. Asumiendo que la componente más reciente posee una concentración de tritio de aguas recién infiltradas, es posible calcular la parte de componente antigua en el volumen que se descarga del macizo durante el período lluvioso. Los cálculos se realizaron para las tres estaciones húmedas del período 1989-1991.

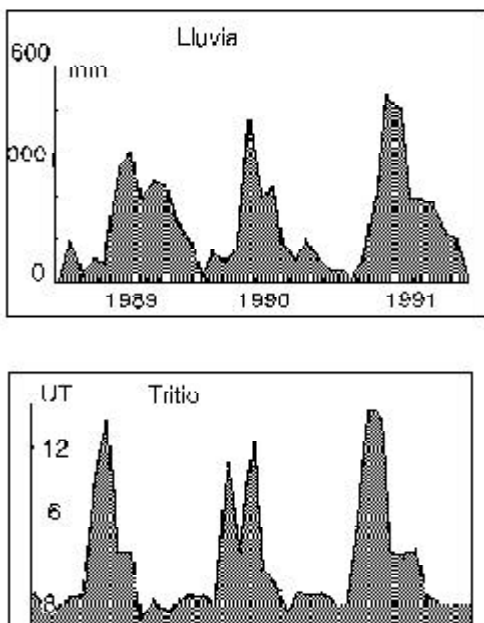


FIG. 2 Concentración de Tritio en las aguas de lluvia y subterráneas de la cuenca Jaruco.

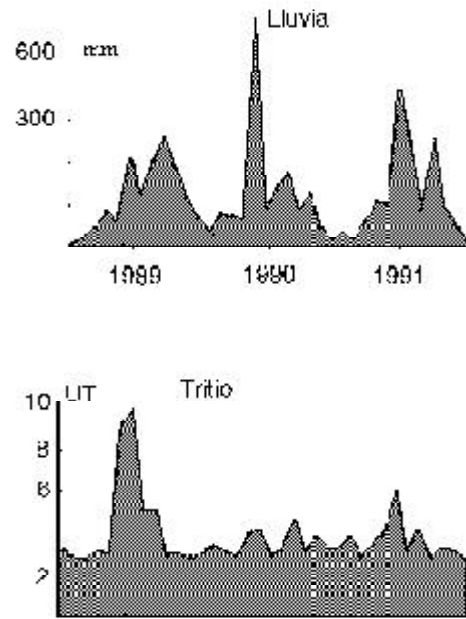


FIG. 3 Concentración de Tritio en las aguas de lluvia y subterráneas de la cuenca Aguacate.

La concentración de tritio en las aguas de infiltración para cada estación húmeda fue tomada como equivalente a la concentración media ponderada de 3H en la lluvia. La componente antigua se toma con una concentración aproximadamente constante durante los últimos años. De este modo, asumiendo un modelo de mezcla simple para cada pozo de bombeo, se obtiene que:

$$p = [(Cout)s - (Cin)s] / [(Cold) - (Cin)s]$$

donde:

p : Proporción de componente antigua en el pozo de bombeo durante los meses de verano.

$Cold$ y $(Cout)s$: Concentraciones medias de tritio en invierno y en verano, respectivamente.

$(Cin)s$: Concentración media ponderada de tritio en las aguas de lluvia durante el verano.

En la tabla 1 se muestran los resultados de los cálculos para ambas estaciones de bombeo, Jaruco y Aguacate -M1:

De igual forma, en la tabla 2, se presentan los volúmenes medios anuales de cada horizonte acuífero, que fueron bombeados durante el período de estudio.

Tabla 1 Proporción de componente antigua en las aguas subterráneas durante la estación húmeda					
Parte occidental (Jaruco)					
Año	(<i>Cout</i>)s UT	(<i>Cin</i>)s UT	(<i>Cold</i>) UT	p (%)	<i>p</i> _{media} (%)
1989	5,33	5,9	1,2	17	34
1990	2,3	3,68	1,2	55	
1991	3,2	4,17	1,2	32	
Parte oriental (Aguacate-M1)					
Año	(<i>Cout</i>)s (UT)	(<i>Cin</i>)s (UT)	(<i>Cold</i>) (UT)	<i>p</i> (%)	<i>p</i> _{media} (%)
1989	3,9	5,9	0,75	39	40
1990	5,2	7,25	0,8	32	
1991	3,12	8,22	0,82	59	

Tabla 2 Volúmenes bombeados en cada horizonte acuífero asumiendo caudal constante de extracción (m ³ /s)				
Año	Parte occidental		Parte oriental	
	Horizonte superior	Horizonte inferior	Horizonte superior	Horizonte inferior
1998	0,46	2,24	0,78	1,22
1990	1,49	1,22	0,64	1,36
1991	0,86	1,84	1,18	0,82

MODELACIÓN MATEMÁTICA:

FUNDAMENTACIÓN Y RESULTADOS

Para la interpretación de los datos de isótopos ambientales se emplean modelos de caja negra o del tipo de parámetros aglutinados. Todos ellos se basan en la forma que se asume para la función de distribución del tiempo de tránsito, que es la función de ponderación. Tal función describe el tiempo de tránsito del trazador entre la entrada y la salida del sistema. En la mayor parte de los casos se emplea el modelo de dispersión (DM) o el exponencial (EM) y ambas poseen el mismo parámetro

de ajuste: el tiempo medio de tránsito del agua o del trazador en dependencia del tipo de acuífero que se considere.

En los acuíferos agrietados, parte del agua se concentra inmóvil en la matriz microporosa y se considera estática, mientras que otra parte fluye directamente por las grietas (agua móvil). El trazador se difunde entre las dos fases, la móvil y la estática, lo que provoca un cierto retardo en el transporte del trazador en comparación con el flujo en el agua móvil. Una vez que el trazador dispone de tiempo suficiente para penetrar toda la matriz microporosa, el transporte puede considerarse similar al que ocurre en un medio poroso (utilizando modelos de caja negra). No obstante, en tal caso, el modelo matemático suministra el tiempo de tránsito del trazador; este es *Rp* veces mayor que el tiempo medio de tránsito del agua *tw*. El parámetro *tt* equivale a la relación entre el volumen total de agua en el sistema *V*, y la tasa de flujo volumétrico *Q*, a través del sistema. El volumen de agua móvil (*V_m*), igual a la relación *V/Rp*, requiere del conocimiento del factor de retardo *Rp* que, a su vez, representa la relación entre la porosidad total *nt*, y la porosidad de fisuras, *nf*. En el área considerada para el modelo, ambas porosidades se asumieron, respectivamente, del 40 y el 5 %, lo que resulta en un valor *Rp* = 8.

Al aplicar el modelo de dispersión (DM) se requiere de un parámetro adicional de ajuste; este es el llamado parámetro de dispersión (*D/vx*)*. En sistemas de doble porosidad, del tipo grieta-poro, el parámetro (*D/vx*) describe la variación de los tiempos de tránsito del trazador a través de las grietas y resulta de la dispersión en las fisuras (o su distribución) y de la difusión entre el agua móvil y la estática. En el sistema Jaruco-Aguacate se aplicó el modelo de dispersión (DM) para determinar los tiempos de tránsito del tritio a través del acuífero. En condiciones de régimen permanente, la relación entre las concentraciones de entrada, *Cin(t)* y salida *Cout(t)* del trazador en el sistema hidrogeológico, se describen mediante la integral de convolución:

$$Cout(t) = \int Cin(t - \tau)g(\tau) \exp(-\lambda t) d \quad \dots(1)$$

en la que:

Cin: Constante de decaimiento radioactivo para el tritio (cero para isótopos estables).

g(τ): Función de ponderación que, en el modelo de dispersión, se define como:

$$g(\tau) = \{Pd / 4\pi / tt\} 0.5 \exp[-Pd(1 - \tau / tt)^2 / (4\tau / tt)] / \tau \quad \dots(2)$$

donde:

tt : Tiempo medio de tránsito del trazador.

Pd : Es $1/(D/vx)^*$, para cada año, la función de entrada se calcula según la expresión siguiente:

$$C = \left[\alpha \sum (PiCi)_s + \sum (PiCi)_w \right] / \left[\alpha \sum (Pi)_s + \sum (Pi)_w \right] \quad \dots(3)$$

En la que Pi y Ci son, respectivamente, la lámina de lluvia y el contenido de tritio en esta, en el i -ésimo mes del año en consideración. Empleando esta ecuación se calculó la función de entrada de 3H para el período de observación 1989-1991, sobre la base de datos medidos directamente en el sistema acuífero, en tanto para años anteriores se correlacionaron con los datos de la estación OIEA-OMM del Instituto de Ciencias Marinas de Miami, Estados Unidos. La tasa de infiltración α se tomó igual a la unidad.

La modelación se llevó a cabo solamente para los datos de tritio, medidos durante los meses de invierno, a fin de obtener información acerca del tiempo medio de tránsito de la componente más antigua en el sistema acuífero (horizonte inferior). Para la estación de bombeo de El Gato (sistema Jaruco), el tiempo de tránsito del 3H , $tt = 100$ años con un valor $Pd = 4$, en tanto para la estación de bombeo de Bello, al este, el mejor ajuste, con $Pd = 4$ fue obtenido para $tt = 115$ años.

La figura 4 muestra los mejores ajustes del modelo de dispersión

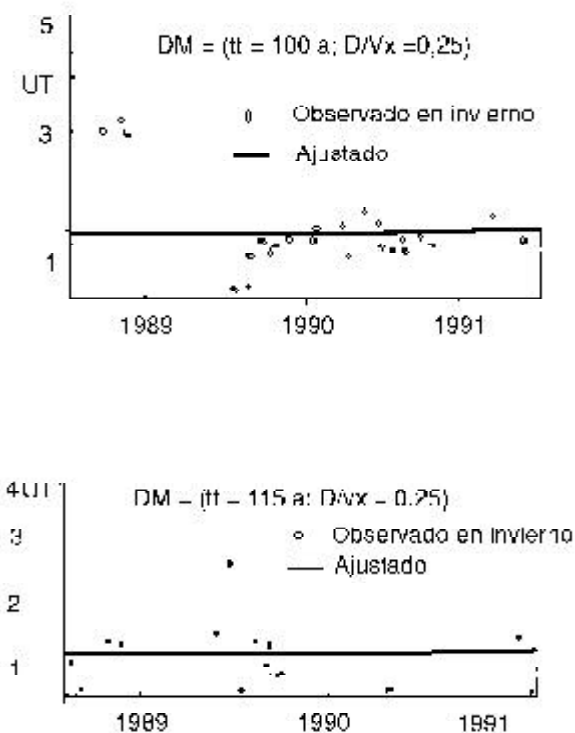


FIG. 4 Ajuste del Modelo de Dispersión.

Tiempos de tránsito tan largos para el tritio indican que -isotópicamente- el sistema no se encuentra en régimen permanente. En tal sentido, los valores de tt obtenidos son, probablemente, más representativos para el tiempo de tránsito del tritio en el pasado; es decir, para un momento en que el sistema acuífero se encontraba en régimen permanente (aproximadamente 20 años atrás) y ambas fuentes cársicas (manantiales de Ojo de Agua y Bello), respectivamente, drenaban el acuífero. Para un tiempo de tránsito del tritio en el horizonte acuífero inferior de unos 100 años, y considerando un espesor $H = 50$ m y una porosidad total $nt = 40$ %, la tasa de flujo volumétrico en este horizonte equivale a $Il = nt * H/tt$ y $Q = Il * S$, es decir, $Il = 200$ mm/a y $Q = 4,4$ m³/s. Il representa la tasa de infiltración que el horizonte inferior recibe del superior. Asumiendo que la infiltración se distribuye uniformemente en la superficie, el valor $Il = 200$ mm/a representa una tasa de flujo volumétrica de 1,9 y 2,5 m³/s, respectivamente, para los sistemas Jaruco y Aguacate. Este último es muy semejante al caudal de descarga del grupo de fuentes de Bello y sugieren que ellas drenan el horizonte acuífero inferior. La respuesta diferenciada en la relación lluvia acumulada-caudal acumulado y las curvas de recesión del río Cañas contribuyen a sustentar esta hipótesis.

En el sistema Jaruco, la tasa de flujo volumétrico calculada ($Q = 1,9$ m³/s) corresponde con el caudal base actual estimado de los manantiales Ojo de Agua. Ello muestra que parte de las aguas (2,5-1,9 = 0,6 m³/s) llegan a los manantiales desde el horizonte superior, lo cual está en correspondencia con el comportamiento hidrodinámico de las curvas de recesión del río Mayabeque. El balance hídrico y de cloruros ofrece valores semejantes (350 mm/a) de la lámina de infiltración. Asumiendo cierto un 85 % de este valor (tomando en cuenta los coeficientes de variación observados), resulta una tasa de infiltración general $I = 300$ mm/a, de modo que si 200 mm/a pasan al horizonte acuífero inferior, el superior ($u = I - Il$), unos 100 mm/a representa la lámina que fluye directamente a la zona de descarga como componente joven. En términos de caudal, representan una tasa de flujo de 0,95 y 1,35 m³/s descargando directamente del horizonte superior de los sistemas Jaruco y Aguacate.

Con los valores asumidos de H , nt y Rp fueron obtenidos los volúmenes totales y de agua móvil en el horizonte acuífero inferior. Para el nivel acuífero superior, el tiempo medio de tránsito del agua se asumió como $tw = 1,6$ a, de acuerdo con las curvas de recesión del río Mayabeque. Para la porosidad de fisuras asumida (5 %) y la tasa de infiltración de 300 mm/a, el espesor acuífero del horizonte es de unos 9,6 m. En consecuencia, el volumen total de agua en el horizonte superior, bajo condiciones de régimen permanente era de $V = 2,7 \cdot 10^9$ m³, en tanto la componente móvil, unas ocho veces menor.

El estado actual del acuífero puede deducirse a partir de los volúmenes que son tomados de los diferentes

horizontes acuíferos, las descargas conocidas y las suposiciones acerca de las porosidades y espesor del horizonte inferior. Adicionalmente se asume que el tiempo medio de tránsito del agua a través del horizonte superior es de unos tres meses. Este valor se toma a partir del retardo en el incremento de la concentración de tritio en las aguas bombeadas en Bello y El Gato, luego del inicio de la temporada húmeda. Suponiendo para Bello la misma relación entre las componentes tomadas de ambos horizontes acuíferos que fuera deducida para la parte occidental (Jaruco), pueden estimarse las tasas de flujo volumétrico. El volumen de agua móvil es el mismo, para el horizonte inferior, que en condiciones de régimen permanente y, tomando $tw = 3$ meses para el horizonte superior, el volumen de agua móvil en él $Vm = I \cdot S \cdot tw = 53 \cdot 106 \text{ m}^3$ y la potencia actual, de 1,5 m. Del mismo modo, conociendo las tasas de flujo y los volúmenes en el horizonte inferior, fueron estimados los tiempos actuales de tránsito del agua y el trazador a través de ese horizonte.

La composición isotópica estable de las aguas subterráneas en diferentes puntos del sistema acuífero y distinta época del año muestran, indirectamente, la presencia de aguas que pueden interpretarse como de diferentes horizontes acuíferos, de acuerdo con los resultados del modelo. Así, por ejemplo, los pozos muestreados en el sistema durante la época de lluvias (fig. 5) se ajustan sobre, o muy cerca de las rectas meteóricas (K4, GAT9, Mudo, K5, HMA-120, K1, K18, K27, El Coronel), mientras que, durante el período seco se ajustan a una recta de mayor pendiente. Tal es el caso,

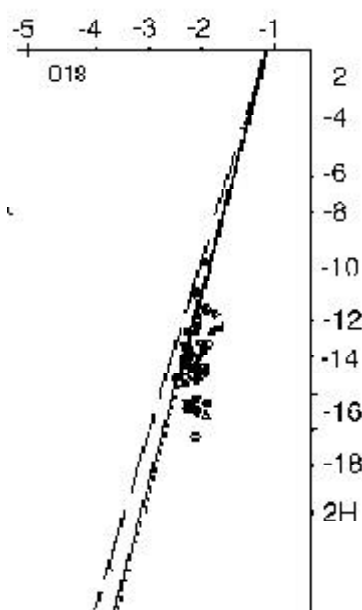


Fig. 5 Recta meteórica local.

por ejemplo, del LSC 1, Bello, Nudo, Catalina, Ojo de Agua, K23, K24) y resulta significativo que las muestras de Bello, Catalina y Ojo de Agua corresponden a puntos en, o muy cerca de la zona de descarga. En este caso pudiera pensarse, incluso, en cierto intercambio con el macizo carbonatado promovido por un mayor tiempo de tránsito de las aguas en el sistema.²⁹

CONCLUSIONES

El balance de masas mostró que el acuífero se encuentra sobreexplotado con un déficit volumétrico de $1,5 \text{ m}^3/\text{s}$, lo que corresponde a un déficit de la lámina de infiltración de 70 mm/a . La porosidad de fisuras asumida (5 %) representa un descenso del nivel de las aguas subterráneas de $1,4 \text{ m/a}$, bajo el supuesto caso que la tasa de infiltración permaneciese constante. No obstante, en 1992, la lámina de lluvia resultó casi un 33 % menor y, en consecuencia, también disminuyó la tasa de infiltración. La diferencia entre el espesor saturado del acuífero en condiciones de régimen permanente y el estado actual es de unos $8,1 \text{ m}$, y se corresponde con un período de cinco años de déficit de agua, tomando en consideración el propio déficit de 1992. Ello muestra, claramente, que el balance del sistema fue completamente alterado por el campo de pozos de El Gato. Desde el inicio de las operaciones de ese sistema de bombeo, el nivel de las aguas subterráneas ha decrecido unos 10 m , lo que está en conformidad con los resultados de la aplicación conjunta del modelo matemático y las investigaciones hidrológicas.

REFERENCIAS

1. MOLERO LEÓN, LESLIE F.: "Fundamentos del mapa hidrogeológico de Cuba", *Voluntad Hidráulica* (47-48):50-54, 1978.
2. ———: Esquema geoespeleológico preliminar de Cuba, *Simp. XXXV Aniversario Sociedad Espeleológica de Cuba*, Ciudad de La Habana, 1975.
3. DORTICÓS, PEDRO L.: "Aprovechamiento de los recursos hidráulicos", *Voluntad Hidráulica*, Vol. XIX, Número Especial, pp. 6-19, Ciudad de La Habana, 1982.
4. GENORGUIEV, M.: El aprovechamiento de las aguas subterráneas en Cuba, Conferencias, p. 35, Instituto de Hidroeconomía, Ciudad de La Habana, 1980.
5. GÚNEVA, T.: Estudio hidrogeológico de la cuenca Jaruco-Aguacate, Habana, Archivo, Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos, La Habana, 1967.
6. ———: Estudio hidrogeológico de los manantiales Bello, p. 110, 1967.
7. MOLERO LEÓN, LESLIE F.: Notas sobre el desarrollo del curso en el área de embalse de la presa Pedroso, p. 40, Archivo, Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos, La Habana, 1970.

8. ———: Nota ingenierogeológica sobre el carso en el Valle de Picadura, Aguacate, Habana, p.20, Archivo, Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos, La Habana, 1970.
9. ———: Aplicación del método de recesión al estudio hidrodinámico de las fuentes del río Mayabeque, Simp. XXXV, Aniversario Sociedad Espeleológica de Cuba, p.67, La Habana, 1975.
10. MOLERIO LEÓN, LESLIE F. Y M. G. GUERRA OLIVA: Notas sobre la problemática hidrogeológica de la porción oriental del polje Jaruco-Aguacate, provincias Habana y Matanzas, p. 60, Archivo, Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos, Ciudad de La Habana, 1981.
11. SCHMIDT, E.: Reevaluación de los recursos de explotación de los pozos del Acueducto El Gato, cuenca Jaruco-Aguacate, p. 30, Archivo, Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos, Ciudad de La Habana, 1979.
12. VARELA, E., O. BARROS AND S. JIMÉNEZ: "L'effet de evacuation des residus de raffnerie de sucre sur un aquifere de calcaire karstique", in/ Jackson, R.: *Pollution et protection des aquiferes*, pp.325-336, Unesco, Paris, 1981.
13. PIÑERA CASO, J., L.F. MOLERIO LEÓN Y C. MARCH DELGADO: Análisis de un modelo estadístico para la regionalización de las transmisividades en un polje, Coloquio Internacional Hidrología Cársica de la Región del Caribe, pp.303-321, Unesco, Ciudad de La Habana, 1982.
14. BEILIN, B. V.: Sobre las investigaciones hidrogeológicas para el estudio de la fuente de abasto a la Ciudad de La Habana - Acueducto El Gato, Archivo, Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos, Ciudad de La Habana, 1984.
15. RODRÍGUEZ, G.: Informe hidrogeológico final sobre la ejecución del sistema de pozos del Acueducto El Gato. Etapa técnico-ejecutiva, Archivo, Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos, Ciudad de La Habana, 1987.
16. MOLERIO LEÓN, LESLIE F.: Hidrogeología y recursos explotables del Acueducto El Gato, p. 180, Archivo, Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos, Ciudad de La Habana, 1990.
17. ———: Investigaciones hidrogeológicas en cuencas representativas del Occidente de Cuba, p. 200, Archivo, Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos, Ciudad de La Habana, 1991.
18. ———: Inducción artificial de la respuesta jerarquizada de los espacios acuíferos en el carso, p.35, Jornada Científico-Técnica, Sociedad Cubana de Geología, Ciudad de La Habana, 1988.
19. LONGUEIRA LOYOLA, A.: Algunos rasgos geodinámicos de la zona sur de alimentación del polje Jaruco-Aguacate, Sociedad Espeleológica de Cuba, Ciudad de La Habana, 1990.
20. MOLERIO LEÓN, LESLIE F., D. ARELLANO, A. SURÍ, A. SANTOS Y K. DEL ROSARIO: Dinámica de las aguas subterráneas en la cuenca Jaruco-Aguacate, pp. 13-151, ARCAL XIII-RLA/8/14. Primera Reunión de Responsables de los Estudios de los Recursos y la Contaminación de las Aguas Subterráneas, Instituto Pesquisas Hidráulicas, Universidad Federal Río Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, 1990.
21. MALOSZEWSKI, P. AND A. ZUBER: "Mathematical Modeling of Tracer Behaviour in Short term Experiments in Fissured Rocks, *Water Resour. Res.* 26(7):1517-1528, 1990.
22. SEILER, K.P., P. MALOSZEWSKI AND H. BEHRENS: "Results on Hydrodynamic Dispersion in the Karstified Aquifer of the Upper Jura of Frankonian Alb, FR Germany", pp. 83-87, Proc. Internatl. Symp, Contaminant Transport in Groundwater, Stuttgart, Balhema, Rotterdam, 1989.
23. HERRMAN, A., B. FINKE, M. SCHÖNIGER, P. MALOSZEWSKI, W. STICHLER: The Environmental Tracer Approach as a Tool Forhydrological Evaluation and Regionalization of Catchment Systems, pp. 45-58, Regionalization in Hydrology, Proc. Ljubljana Symp. IAHS, Publ. 191, 1990.
24. BENISCHKE, R., H. ZOJER, P. FRITZ, P. MALOSZEWSKI AND W. STICHLER: "Environmental and Artificial Tracer Studies in an Alpine Karst Massiff" (Austria), pp. 938-947, IAH 21st, Congr, Karst Hydrogeology and Karst Environmental Protection, Guilin, China, 1988.
25. MALOSZEWSKI, P. AND A. ZUBER: "On the Calibration and Validation of Mathematical Models for the Interpretation of Tracer Analysis in Groundwater", *Adv. Water Resourc.*, pp. 15:47-62, 1992.
26. MALOSZEWSKI, P.: Mathematical Modelling of Tracer Transport in Different Aquifers: Results From ATH Test Fields, Proc. 6th. Internatl. Symp, Water Tracing, Karlsruhe, pp. 25-30, Ger., A.A. Balhema, Rotterdam, 1992.
27. MALOSZEWSKI, P., W. RAUERT, W. STICHLER AND A. HERRMANN: "Application of Flow Models in an Alpine Catchment Area Using Tritium and Deuterium Data", *Jour. Hydrol.*, 66:319-330, 1983.
28. MALOSZEWSKI, P. AND A. ZUBER: "Influence of Matrix Diffusion and Exchange Reactions on Radiocarbon Ages in Fissured Carbonate Aquifers", *Water Resour. Res.*, 27(8):1937-1945, 1991.
29. GAT, J.R. R. AND GONFIANTINI: "Stable Lisotope Hydrology. Deuterium and Oxygen-18 in the Water Cycle", *IAEA Tech. Rep. Series 210*, Vienna, 339, 1981.

Métodos geomatemáticos de diseño y optimización de redes de monitoreo de aguas subterráneas

INTRODUCCIÓN

Al diseñarse una red de monitoreo de aguas subterráneas es imprescindible definir los aspectos básicos de su operación:

1. Los objetivos de la Red.
2. La representatividad espacial del punto de monitoreo.
3. La frecuencia de las observaciones.
4. El tipo y número de variables a monitorear.

Las técnicas clásicas de proyección de redes de monitoreo de las aguas subterráneas se han basado en la aplicación, más o menos generalizada, de la interpolación espacial mediante kriging y, en menor grado del filtrado de Kalman a redes preexistentes. Algo más refinadas son las que se derivan de la aplicación de la Teoría del observador o aplican conjuntos Fuzzy. Todos estos métodos, sin embargo, dan por sentado, en sus presupuestos, que las estaciones de observación cuya distribución espacial y frecuencias será optimizada están correctamente diseñadas y, por ello, las mediciones u observaciones que se realizarán en ellas, reflejarán perfectamente la dinámica del fenómeno a estudiar. Ninguna de tales técnicas resuelve el problema de la frecuencia óptima del monitoreo ni del número de variables a observar en cada punto de la red. Casi nunca se aplican técnicas geomatemáticas desde la etapa inicial de diseño de una red de monitoreo del régimen y la calidad de las aguas subterráneas.

Por ello, los autores han desarrollado y aplicado, un conjunto de métodos geomatemáticos que por el contrario, resuelven, rigurosamente, los problemas básicos del diseño y optimización espacial y frecuencial de las redes de monitoreo hidrogeológico. Garantizan, con ello, la operación de una red de monitoreo hidrogeológico y el consecuente sistema de prevención hidrogeológica al menor costo aceptable, habida cuenta que se implementan

Resumen / Abstract

Los autores han desarrollado y aplicado, un conjunto de métodos geomatemáticos que, resuelven, rigurosamente, los problemas básicos del diseño y optimización espacial y frecuencial de las redes de monitoreo hidrogeológico, que garantizan la operación de una red de monitoreo hidrogeológico y el consecuente sistema de prevención hidrogeológica al menor costo aceptable. Este artículo resume aquellas técnicas geomatemáticas aplicadas por los autores en el diseño y la optimización de las redes de monitoreo del régimen y la calidad de las aguas subterráneas, en las que se ha considerado la evaluación de la incertidumbre de los datos, las técnicas de reducción o ampliación de la red de monitoreo, o la regionalización temporo-espacial de las variables hidrodinámicas. Palabras clave: monitoreo, aguas subterráneas, optimización, geomatemática, geoestadística.

The authors have developed and applied, a group of geomathematics methods that, they solve, rigorously, the basic problems of the design and space optimisation and monitoring frequency of the groundwater networks that guarantee the operation of the Hydrogeological Monitoring Network and the consequent of Hydrogeological Prevention System at the smallest acceptable cost. This article summarise those geomathematics techniques applied by the authors in the design and the optimisation of the groundwater networks for the monitoring of groundwater regime and water quality, in those that it has been considered the evaluation of the uncertainty of the data, the reduction techniques or amplification of the monitoring network, or the time-space regionalisation of the hydrodynamic variables. Key words: monitoring, groundwater, optimization

L. F. Molerio León, Grupo de Aguas Terrestres, Instituto de Geofísica y Astronomía, Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente (CITMA) e-mail: lmolerio@hotmail.com

J. C. Torres Rodríguez, Grupo de Aguas Terrestres, Instituto de Geofísica y Astronomía, Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente, CITMA, Ciudad de La Habana

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.

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

1. 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.

2. 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.

3. 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 y (o) en cada intervalo de tiempo.

Los resultados obtenidos en el diseño y la optimización de redes de monitoreo del régimen y la calidad de las aguas subterráneas en varias cuencas subterráneas de Cuba y México, han permitido la generalización de este conjunto de novedosos métodos de manera tal que se ha logrado:

1. Elevar el conocimiento de la estructura interna y de los factores naturales y artificiales que funcionan como operadores del campo de transformaciones del régimen físico y la hidrodinámica geoquímica de los sistemas acuíferos ensayados.

2. Mejorar los respectivos sistemas de prevención hidrogeológica, haciéndolos más eficientes, seguros y dinámicos.

3. Disminuir los costos de adquisición, procesamiento, conservación y recuperación de los datos derivados de la operación de las redes mediante un diseño más eficiente de esta.

4. Definir el mínimo número de estaciones de monitoreo que satisfagan los requisitos de máxima informatividad al mínimo costo posible.

5. Identificar los parámetros constructivos de las estaciones de completamiento de la red y la posición que tales estaciones de monitoreo deben ocupar en el acuífero para garantizar la representatividad del fenómeno que observan o de las variables que miden.

6. Identificar los mínimos intervalos de muestreo y de frecuencia de las observaciones en cada estación de la red, es decir:

a) La frecuencia mínima de mediciones que deben realizarse en cada uno de ellos sin pérdida notable de informatividad o, incluso, con ganancia de esta.

b) La definición de las variables que corresponde medir en tales estaciones en cada intervalo de tiempo.

En este artículo se resumen aquellas técnicas geomatemáticas aplicadas por los autores en el diseño y la optimización de las redes de monitoreo del régimen y la calidad de las aguas subterráneas, en las que se ha considerado la evaluación de la incertidumbre de los datos, las técnicas de reducción o ampliación de la red de monitoreo, o la regionalización temporo-espacial de las variables hidrodinámicas.

■ TÉCNICAS GEOMATEMÁTICAS

En la *generalización* de las observaciones hidrogeológicas o en la *cartografía* de las propiedades de los sistemas se introducen errores derivados de varias fuentes, entre las que pueden destacarse¹⁻¹² la incertidumbre con que fueron tomados o medidos, las que son propias de los métodos que se emplearon en su cuantificación, o las que corresponden a los errores vinculados a los métodos de interpolación o extrapolación. Aquellas variables que son medidas directamente no están, tampoco, exentas de errores de distinto tipo: analíticos, instrumentales, sistemáticos, entre otros.

Asimismo, *la variabilidad espacial* de las propiedades que caracteriza el sistema de aguas subterráneas introduce un número importante de consecuencias negativas en la evaluación de los recursos disponibles y en la toma de decisiones respecto a la gestión del recurso hídrico. A la variabilidad espacial, que en principio es una consecuencia directa de la *heterogeneidad* de las rocas y del sistema de colectores conductores de las aguas que circulan por el macizo, debe añadirse la que es provocada por la *anisotropía* de las propiedades físicas. También es de esperar una cierta *dependencia del tiempo* de algunas de las propiedades del campo físico y, obviamente, las que caracterizan la composición química o la calidad de las aguas de los acuíferos son variables en las que el tiempo influye de manera decisiva. Las técnicas geomatemáticas^{1,13-25} conducen a la reducción de las fuentes de incertidumbre en la representación y descripción de las propiedades del sistema.

■ CONTENIDO BÁSICO DE LA METODOLOGÍA

El método geomatemático, fundamentado en las ideas básicas expresadas por Agterberg,¹ conjuga las técnicas de la teoría de la información, el análisis de distribución de frecuencia y de las funciones aleatorias independientes, el análisis factorial y de cluster, la dependencia estadística, el análisis de las variables estacionarias aleatorias y kriging, la estadística de datos orientados, el análisis armónico, autocorrelatorio y espectral, la matemática fractal y el análisis de variabilidad espacial de sistemas multivariados. Tales técnicas se aplican a las series cronológicas y espaciales de la red de monitoreo hidrogeológico y se complementan con variables geométricas que describen los detalles constructivos de cada estación de monitoreo; la posición absoluta de la estación; la posición relativa de la estación respecto a

fuentes de abasto o sistemas de explotación importantes y, o a fuentes de contaminación o puntos vulnerables o de riesgo, como también respecto a estructuras geológicas y, o geomorfológicas de interés; la estructura del campo de propiedades físicas del sistema acuífero definida en cada estación de monitoreo y las acciones sobre y desde el sistema.

El *procedimiento de trabajo* conduce a la definición de los elementos más importantes de diseño de la red, entre ellos:

1. Número de pozos que integrarán la red inicial o la red optimizada.
2. Detalles constructivos de cada uno de los pozos.
3. Frecuencia de monitoreo.
4. Tipo y número de variables a muestrear en cada intervalo de monitoreo.

La *metodología* establecida, consiste en las siguientes etapas:

1. Elaboración del modelo conceptual del sistema hidrológico: estructura, leyes que rigen su funcionamiento, acciones sobre el sistema y mecanismos de respuesta y resiliencia del sistema.
2. Identificación de la informatividad actual que posee el sistema de flujo.
3. Procesamiento estadístico uni y multivariado de las series cronológicas.
4. Procesamiento estadístico uni y multivariado de las series de propiedades espaciales.
5. Procesamiento multivariado de las variables geométricas.
6. Regionalización del sistema.
7. Definición de la frecuencia de monitoreo.
8. Identificación de los puntos complementarios y de los puntos que se eliminan de la red actual.
9. Definición de los indicadores constructivos y espaciales de los puntos complementarios.
10. Validación de la red diseñada u optimizada.
11. Cálculo de la informatividad de la red diseñada u optimizada.
12. Evaluación de los costos de operación y balance de la relación costo-beneficio entre la red en operación y la red optimizada.

METODOLOGÍA GEOMATEMÁTICA DE DISEÑO DE REDES DE MONITOREO HIDROGEOLÓGICO

La definición de las técnicas geomatemáticas para el diseño inicial de una red de monitoreo del régimen y, o la calidad de las aguas subterráneas depende, ante todo, de la disponibilidad o no de información de alguna de las variables que identifique el régimen hidrodinámico del sistema, tales como: niveles piezométricos o composición físico-química de las aguas, o que influyan por definición, sobre el régimen hidrodinámico del sistema de flujo subterráneo. Estos métodos conducen, de manera eficaz, a la evaluación de la incertidumbre y permiten fundamentar los criterios de reducción o ampliación de la red de

observación, reducir los errores de interpolación y definir, entre otros, la representatividad de los datos o de las estaciones de la red. El diseño y optimización de una red de monitoreo de aguas subterráneas se fundamenta en los siguientes criterios:

1. Aprovechamiento óptimo de la información de archivo y, caso de existir, de la red de observación hidrogeológica y de calidad de las aguas subterráneas en operación.

2. Reducción del número de puntos a monitorear y de la frecuencia de las observaciones y muestreos con relación al diseño actual tomando en cuenta: la representatividad de los puntos de la red; la calidad del dato primario; las perspectivas de uso de los recursos hidráulicos superficiales y subterráneos del territorio; y los objetivos de la red de monitoreo.

3. Elevación máxima de la cantidad de información primaria derivable del levantamiento hidrogeológico reduciendo al mínimo los trabajos de perforación y aforos, que elevan sustancialmente los costos de investigación y prolongan los trabajos de campo y de adquisición del dato básico, sustituyéndolos -en lo posible- por la documentación minuciosa del relieve y la estructura geológica, apoyados en el empleo de métodos indirectos tales como el análisis morfométrico y la documentación aerofotográfica.

La práctica ha confirmado que puede lograrse un incremento en la eficiencia económica de las investigaciones hidrogeológicas siempre que se disponga de métodos adecuados para evaluar, continuamente, el valor de uso de las redes de monitoreo de las aguas subterráneas. El diseño u optimización, deben satisfacer los principios siguientes:

1. Los objetivos del monitoreo deben ser identificados y cuantificados -en lo posible- para cada uno de los sistemas hidrológicos, lo que incluye la definición de cierta medida de efectividad. Este es el aspecto más complejo en la optimización de las redes, ya que se complica por los diferentes objetivos que, para distintos usuarios, puede poseer la red. Estos objetivos incluyen la estimación del estado actual de calidad, la detección de tendencias a largo plazo, violaciones en las normas de calidad de las aguas subterráneas o de los diseños de explotación, y la simulación matemática de acuíferos o del uso conjunto de las aguas superficiales y subterráneas.

2. Identificación de los procesos hidrodinámicos e hidrogeoquímicos más importantes, toda vez que ellos indican, en cada caso, la forma y los métodos de investigación y de análisis de los datos.

3. Determinación de la efectividad de la información derivada del análisis de los datos que proporciona la red o de la data colectada para conformar la matriz inicial de evidencias. Muchas veces, tal efectividad puede relacionarse con conceptos estadísticos tales como la varianza de las muestras, la varianza explicada mediante el análisis factorial, la probabilidad de ocurrencia de un evento cualquiera o el error de interpolación, entre otros.

4. Cálculo del costo de la red y del programa de monitoreo en su conjunto.

5. Análisis de la relación costo-beneficio o costo-efectividad, aspecto en extremo complejo e, incluso, con una componente subjetiva muy importante. Debe tomar en consideración la importancia relativa de las estaciones de muestreo y las variables a observar en cada una de ellas. En la práctica, sin embargo, se requiere de un nivel mínimo de efectividad que se basa en criterios subjetivos, consideraciones económicas y aun políticas que, muchas veces, no toman en cuenta el óptimo mínimo del monitoreo, sobredimensionan la red, o se ignora o sobrestima la necesidad real de adquisición del dato primario.

En el caso de disponerse de series cronológicas de niveles y, o composición físico-química o de indicadores de calidad de las aguas subterráneas, se llevan a cabo las siguientes tareas:

1. Procesamiento y análisis crítico de la informatividad y costo de adquisición y procesamiento del dato básico.

2. Procesamiento estadístico de las series cronológicas de cada una de las estaciones de la red existente y validación de los resultados de su operación.

3. Análisis multivariado y de clasificación numérica de los indicadores geométricos del acuífero asociados a los puntos de la red y de la serie cronológica de cada uno de ellos, a fin de determinar los factores que condicionan el régimen, los parámetros de diseño de las estaciones de monitoreo y el nivel de informatividad de cada uno de ellos.

4. Comparación de los niveles de informatividad de cada grupo de series de acuerdo con la frecuencia de muestreo.

5. Automatización del procesamiento del dato básico del régimen de niveles de las aguas subterráneas e incremento de su efectividad para la operación de las redes y el manejo de los recursos de explotación de los acuíferos.

6. Categorización de la importancia socio-económica, política y ambiental de los sistemas acuíferos a monitorear.

7. Validación de los resultados del diseño para la regionalización más precisa del sistema acuífero.

8. Perfeccionamiento del modelo conceptual del sistema hidrológico.

9. Optimización de la red.

El caso más complejo es, obviamente, aquel en que ha de diseñarse, por vez primera, una red de monitoreo y no existe información previa de los indicadores hidroambientales. Para resolver este problema, se requiere la preparación y procesamiento de una matriz de evidencias derivable de la prospección y la cartografía hidrogeológica y del procesamiento digital de imágenes aerospaciales, a la que se debe añadir información que caracterice o identifique los posibles impactos sobre el régimen y calidad de las aguas que han decidido el diseño de tal red. En este caso, es común el siguiente flujo de tareas:

1. Elaboración del modelo conceptual del sistema hidrológico.

2. Procesamiento digital de imágenes aerospaciales y elaboración de la plataforma geológica, geomorfológica e hidrográfica del territorio. Definición de las condiciones de accesibilidad, definición de impactos sobre el régimen y la calidad de las aguas subterráneas y evaluación preliminar del costo de adquisición y procesamiento del dato básico.

3. Documentación hidrogeológica de campo, que incluye inventario, muestreo y aforo de puntos de agua, cartografía geológica y geomorfológica.

4. Definir la estacionalidad de los estímulos sobre el sistema (lluvia, evapotranspiración, escurrimiento superficial) y la respuesta de este mediante técnicas combinadas de procesamiento estadístico y cartografía de campo.

5. Análisis multivariado y de clasificación numérica de los indicadores geométricos del acuífero a fin de determinar los factores que condicionan el régimen, los parámetros de diseño de las estaciones de monitoreo y el nivel de informatividad de cada uno de ellos.

6. Definición de un ciclo de muestreo acorde a los mismos intervalos del estacionamiento de los estímulos sobre el sistema de mayor importancia hidrológica o ambiental o ambas y validarlo durante un ciclo completo.

7. Comparación de los niveles de informatividad de cada grupo de series de acuerdo con la frecuencia de muestreo.

8. Validación de los resultados del diseño para la regionalización más precisa del sistema acuífero.

9. Perfeccionamiento del modelo conceptual del sistema hidrológico.

10. Optimización de la red.

METODOLOGÍA GEOMATEMÁTICA DE OPTIMIZACIÓN DE REDES

DE MONITOREO HIDROGEOLÓGICO

La optimización de una red hidrogeológica consiste en ajustar su distribución espacial, frecuencia de monitoreo y número de variables a medir de tal manera que, igual o superior informatividad pueda obtenerse con menos estaciones en las que se indican el mismo o un menor número de variables en intervalos de tiempo mayores y a un costo mínimo de operación.

Para optimizar adecuadamente la distribución espacial, frecuencia de monitoreo y número y tipo de variables a observar se requiere de un cierto número de observaciones de las variables que se pretende optimizar y de un perfeccionamiento del conocimiento del modelo conceptual del sistema acuífero. Es necesario, además, manejar información fidedigna acerca de los costos de operación. En la práctica suele ocurrir que se requiere optimizar una red diseñada bajo otros métodos o con un modelo conceptual que puede no haber sido validado. A veces, incluso, no se dispone de este último. Es esencial validar

el modelo conceptual que condicionó el diseño original. Para ello, es necesario definir:

1. La precisión de los objetivos de la red optimizada.
2. El cálculo de la efectividad de la información de la red en operación y evaluación de incertidumbre.
3. La definición de los factores de control del régimen hidrodinámico y de los procesos que intervienen en la adquisición de la composición química y la calidad de las aguas subterráneas y superficiales.

La *precisión de los objetivos de la red optimizada define*, en gran medida, el alcance del procesamiento de la información disponible, en particular, la correspondiente a las series cronológicas de las variables del régimen hidrodinámico e hidrogeoquímico. Suele presentarse alguno de estos casos:

1. *Ampliar los objetivos del monitoreo* incrementando nuevas variables, en cuyo caso es esencial definir si, de no haber sido medidas con anterioridad, guardan alguna relación con las observadas durante la operación de la red; este es un caso que, con frecuencia, conduce directamente a la ampliación del número de estaciones de la red.

2. *Reducción de variables*, bien porque han cesado las causas o estímulos que provocaron su inclusión en el programa de monitoreo, por la retirada de algunos usuarios o por ajustes de presupuesto.

3. *Reducción de estaciones*, lo que generalmente obedece a consideraciones financieras o la introducción de mejoras tecnológicas.

La *efectividad de la información (E)*, derivable de la red de monitoreo puede evaluarse²⁶ por una medida función de la frecuencia de muestreo, el número y localización de las estaciones de muestreo y el número y tipo de las variables a observar. La función puede derivarse conociendo la estructura de autocorrelación de cada variable en tiempo y espacio, y la estructura de la correlación cruzada entre todas las variables, también en tiempo y espacio. Esta función es útil para el caso de optimización de la red de una variable unidimensional ya que define la relación entre una cierta medida de efectividad y la frecuencia de muestreo para variables fijas en localidades también fijas.

Puede medirse la efectividad de la información obtenida para diferentes objetivos como la estimación de las medias anuales; detección de tendencias; detección de violaciones en las normas de calidad o de explotación, o reconstrucción del estado de calidad del agua así como la influencia de la reducción de la frecuencia de muestreo sobre la efectividad. En la práctica, se asume un modelo de cala negra para la función de correlación, de manera que solamente tengan que ser determinados los parámetros. Ello impone menos restricciones a las series cronológicas y facilita la evaluación del efecto de un eventual incremento en la frecuencia de muestreo. Esta relación se describe mediante un modelo autorregresivo de primer orden. Para valores no correlacionados se requiere de otro tipo de

procesamiento y para intervalos decrecientes se alcanza un límite por debajo del cual se obtienen solamente valores de incremento marginal de efectividad que provocan un incremento innecesario de muestreo, al requerir un esfuerzo sostenido de adquisición del dato básico. Como este valor es alto para procesos estrechamente correlacionados, la frecuencia de muestreo para otros procesos con baja relación dinámica puede ser reducida sin pérdida notable de efectividad.

Cuando se pretenden evaluar *las violaciones en las normas de calidad o de explotación de las aguas subterráneas*, la medida de efectividad se expresa,²⁶ como una relación entre el número esperado de violaciones detectadas y el número esperado de violaciones totales. Finalmente, para evaluar la *reconstrucción del estado de calidad de las aguas* a partir de mediciones discretas obtenidas durante un período de tiempo, E puede expresarse como el error medio cuadrático de la data reconstruida o interpolada que se relaciona con el intervalo de muestreo empleando la forma discreta de la teoría de filtrado de Wiener-Kolmogorov. La efectividad y, por ello, la calidad de la red, puede evaluarse como una función de Δ excluyendo mediciones reales en la red de monitoreo pero, por otro lado, se requieren datos históricos confiables para estimar la estructura de correlación o para ajustar el modelo de esta.

Para evaluar la incertidumbre de los datos de variables del campo de propiedades físicas son útiles especialmente, *las funciones de autocorrelación, el semivariograma, la distribución de frecuencias y el kriging*. La *función de autocorrelación* caracteriza la estructura interna de los procesos aleatorios y expresa la dependencia correlativa entre los valores de un proceso.

El *autocorrelograma o el autocovariograma* (fig. 1) suministra la información sobre los ciclos dentro de un perfil temporal y, por ende, de la memoria del sistema, equivalente a su capacidad inercial respecto a un estímulo de valores, así como a la magnitud de su potencial hídrico. *El periodograma y el espectro de varianza* (fig. 2) permite descomponer la varianza de los datos en contribuciones sobre un rango de frecuencias. El análisis espectral consiste en la descomposición de una secuencia de datos en componentes sinusoidales de diferente longitud de onda que, sumados, reproducen la serie original. En ciertos casos se aplican los análisis de correlación cruzada y de espectro cruzado de varianza.

El semivariograma permite examinar la varianza de las diferencias entre los valores de una variable espacial, medida en diferentes estaciones, con un mismo lag de tiempo, en función de ese lag. Sin tendencia, la función de covarianza es el complemento del semivariograma respecto a la varianza. Asumiendo cuatro escalas de heterogeneidad, una para cada espacio constitutivo de los dominios de flujos posibles a cada nivel de escala i contenga N_i unidades del nivel i , y el número total de muestras sea $N \times N_2 \times N_3 \times N_4$, puede realizarse el análisis

de varianza de cualquier variable del campo físico, incluidas las componentes de varianza de las propiedades de cada espacio (matriz, poros, grietas y cavernas) (tabla 1). Para espacios crecientes involucrados en el análisis, con el consiguiente incremento de la distancia relativa entre los puntos de muestreo disminuye la influencia de la covarianza de las diferentes escalas de heterogeneidad, de manera que predomina solamente la componente regional, como se muestra en la figura 3.

La función de covarianza reproduce las curvas de efecto de escala,⁸ indicando los órdenes de homogeneidad (o heterogeneidad) relativos en el sistema y la dependencia del área ensayada respecto a los límites físicos, reales, del área elemental representativa del sistema. Tales relaciones son extendidas por Obdam²³ al estudio de la relación costo-beneficio de la red de monitoreo. Para optimizar los costos de información obtenida, en la siguiente expresión, F se minimiza para N_1 y N_2 .

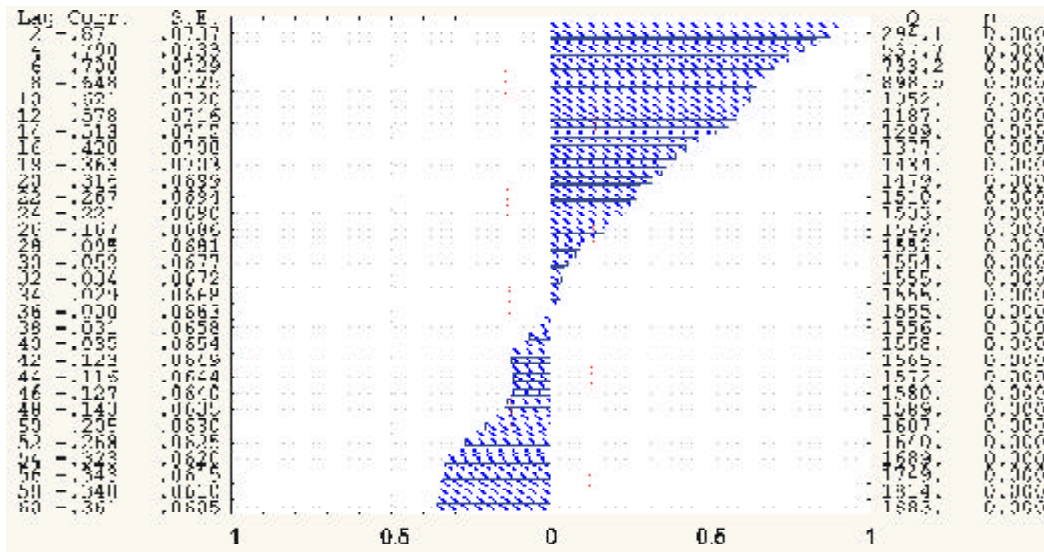


FIG. 1 Autocorrelograma de cotas piezométricas mensuales de un pozo de monitoreo en un acuífero cársico del Occidente de Cuba.

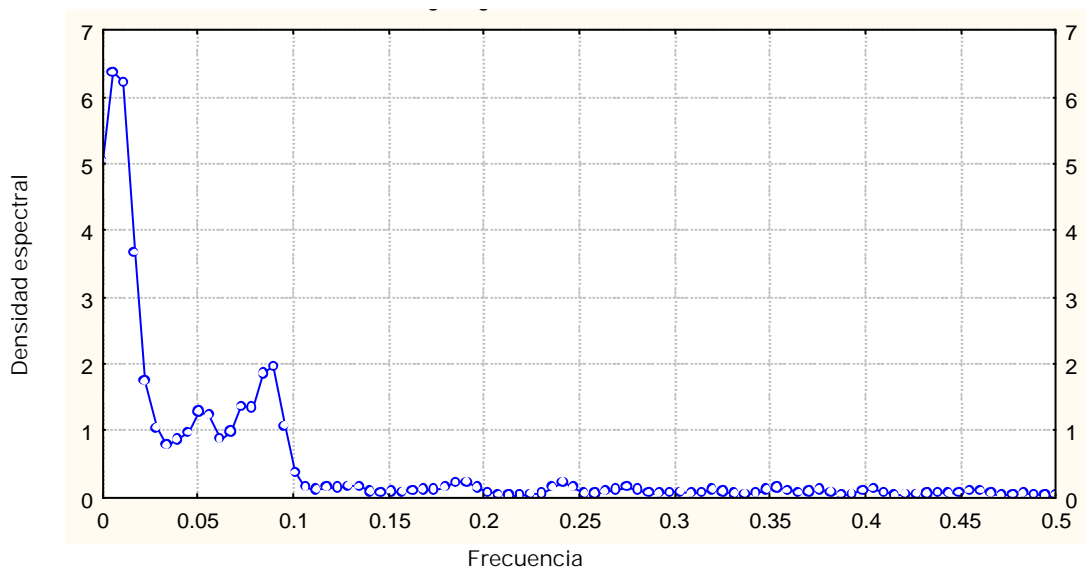


FIG. 2 Espectro de varianza de las colas piezométricas de un acuífero cársico

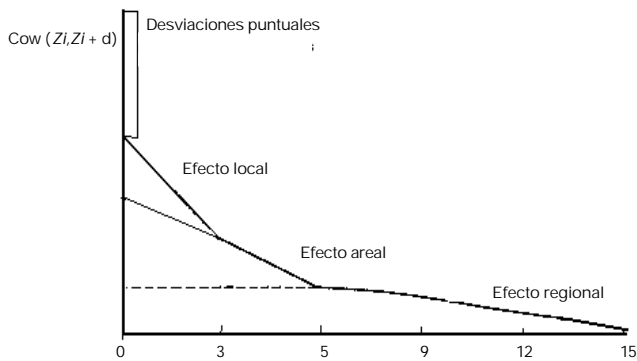


FIG. 3 Función de covarianza con efecto de factor de escala.

En este sentido, el criterio de convergencia que ha mostrado ser, con mayor frecuencia, suficientemente riguroso y coherente para seleccionar la red optimizada consiste en:

1. Obtener, con la red optimizada, una configuración de hidroisohipsas que no oscile en más del 20 % en términos de gradiente ni más de 10^0 en la dirección con respecto a idénticos períodos de prueba con la red en operación (no optimizada).

2. Que no exista pérdida de informatividad con la red optimizada respecto a la red en operación. En términos de la distribución espacial y composición de la red, se dan los siguientes casos:

a) Reducción de la red.

Tabla 1				
Análisis de varianza. Test de significación de V_i respecto a V_{i+1} : $V_i/V_{i+1} < F_{1-\alpha}$ (DGF_i, DGF_{i+1}) el caso de $V_i > V_{i+1}$; para $V_{i+1} > V_i$ el test es de V_{i+1} respecto a V_i . La varianza total es $\sigma_{tot}^2 = \sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 + \sigma_4^2$ (según Obdam ²³)				
Nivel de la subdivisión	Grados de libertad	Suma de los cuadrados	Medidas de los cuadrados (estimados óptimos)	Componentes de la varianza estimados mediante la media de los cuadrados
1	$N_1 - 1$	$S_1 = N_2 N_3 N_4 \sum (x_i - \bar{x})^2$	$V_1 = S_1 / (N_1 - 1)$	$\sigma_4^2 + N_4 \sigma_3^2 + N_3 N_4 \sigma_2^2 + N_2 N_3 N_4 \sigma_1^2$
2	$N_1 (N_2 - 1)$	$S_2 = N_3 N_4 \sum_i \sum_j (x_{ij} - \bar{x}_i)^2$	$V_2 = S_2 / (N_1 (N_2 - 1))$	$\sigma_4^2 + N_4 \sigma_3^2 + N_3 N_4 \sigma_2^2$
3	$N_1 N_2 (N_3 - 1)$	$S_3 = N_4 \sum_i \sum_j \sum_k (x_{ijk} - \bar{x}_{ij})^2$	$V_3 = S_3 / (N_1 N_2 (N_3 - 1))$	$\sigma_4^2 + N_4 \sigma_3^2$
4	$N_1 N_2 N_3 (N_4 - 1)$	$S_4 = N_4 \sum_i \sum_j \sum_k \sum_l (x_{ijkl} - \bar{x}_{ijk})^2$	$V_4 = S_4 / (N_1 N_2 N_3 (N_4 - 1))$	σ_4^2
	$N_1 N_2 N_3 N_4 - 1$	$S = \sum_i \sum_j \sum_k \sum_l (x_{ijkl} - \bar{x})^2$	$S / N_1 N_2 N_3 N_4 - 1$	

SELECCIÓN DE LA RED ÓPTIMA DE MUESTREO

Antes de proceder a la optimización de la red de monitoreo, es imprescindible validar el modelo conceptual original. Comoquiera que la operación de la red debe haber contribuido al perfeccionamiento del conocimiento del sistema hidrológico, entonces los objetivos de la red pueden precisarse adecuadamente. La validación se realiza aplicando técnicas de análisis multivariado, reconocimiento de patrones, clasificación numérica, y, en general, de generación automática de hipótesis.

El *criterio básico de convergencia*, ha de ser ajustado, una vez más, a los objetivos de la red, la informatividad requerida, el financiamiento disponible. La optimización tiene que propender a la disminución de los costos de operación basados en que, casi siempre, la nueva red debe contener menos puntos y medir menos variables con frecuencias temporales y espaciales mayores.

b) Operar los puntos actuales y añadir otras estaciones de monitoreo.

3. Eliminar algunos puntos actuales y añadir otras estaciones. En términos frecuenciales se dan los siguientes casos:

a) Se mantiene la frecuencia actual en los puntos a conservar y los que se añadan.

b) Se varía la frecuencia de algunos puntos.

Del análisis geomatemático se derivan, perfectamente, cuáles puntos pueden reducirse y cuáles se conservan. Del mismo modo, al perfeccionarse las características de diseño y definirse los pozos representativos se logra:

1. Perfeccionar el Sistema de Prevención Hidrogeológica.

2. Mejorar el diseño de los pozos que permanecen en la red.

3. Diseñar adecuadamente los pozos que se incorporan. El proceso de validación se realiza mediante diferentes técnicas de cartografía digital (kriging, EOF, co-kriging, conjuntos Fuzzy) y de simulación condicional o no condicional de las series de cargas piezométricas, composición química y calidad de las aguas (análisis correlatorio y espectral, ARIMA, Monte Carlo, Filtrado de Kalman, entre otras).

REFERENCIAS

1. AGTERBERG, F. P.: *Geomathematics* Elsevier, 1974.
2. BROWER, G. K.: "Reduction of a Groundwater Level Network", *Internatl. Symp. MIIGS, The Netherlands, Unesco, TNO :101 - 117, 1983.*
3. BEAR, J.; D. ZASLAVSKY AND S. LRMAY: *Physical Principles of Water Percolation and Seepage, Unesco, Ariz Zone Research, XXIX, Paris, 1968.*
4. MARDIA, K-V.; J.T. KENT AND J.M. BIBBY: *Multivariate Analysis, Academic Press, 1979.*
5. NAWALANY, M.: "Application of the Observer Theory Optimización of Groundwater Monitoring Network", *Internatl, Symp. MIIGS, The Netherlands, Unesco, TNO:73-85, 1983.*
6. YEYJEVICH, V.: "Sources of Stochasticity in Geophysical Processes", *IAHS Publ. 116, pp. 83-100, London, 1971.*
7. MOLERO LEÓN, LESLIE F.: Consideraciones sobre los Sistemas de Adquisición y Procesamiento de la Información Hidrogeológica, Conferencia Científica XX Años de Colaboración Soviética en la Hidráulica, Santa Clara, 1983.
8. ——— : Dependencia del tiempo de la transmisividad y el almacenamiento en acuíferos cársicos, *Voluntad Hidráulica, Ciudad de La Habana (65):32-38, 1984.*
9. ——— : El efecto del factor de escala en la interpretación del campo de propiedades físicas de los acuíferos cársicos. XXVII Internati. Geol. Congr., Moscú, Vol. VII, Secc. 16, -468-469, 1984.
10. ——— : Dominios de flujo y jerarquización del espacio en acuíferos cársicos. *Simp. XLV Aniversario Sociedad Espeleológica de Cuba, Ciudad de La Habana, 1985.*
11. ——— : El Área Elemental Representativa (AER) para la evaluación de las propiedades físicas del carso. Modelo teórico. *Simp. XLV Aniversario Sociedad Espeleológica de Cuba, La Habana, :45, 1985.*
12. JIMÉNEZ HECHEVARRÍA, S. Y L. F. MOLERO LEÓN: Variabilidad de la carga hidráulica en un acuífero con anisotropía homogénea, en D.M. Arellano, M.A. Gómez-Martín e I. Antigüedad (Eds): *Investigaciones Hidrogeológicas en Cuba, Eibar, 61-70, País Vasco, 1997.*
13. MATHERON, G.: *Les variables regionalisées et leur estimation, Masson ed., Paris, 1965.*
14. JOURNEL, A. AND C. HUIJBREGTS: *Mining Geostatistics, Acad. Press, New York, 1978.*
15. DELHOMME, J. P.: Kriging in the Hydrosiences, *Adv. in Water Resourc, 1(5)-251-261, 1978.*
16. MOLERO LEÓN, LESLIE F.: Técnicas estadísticas y de la teoría de la información en el diseño y control de las redes de monitoreo de las aguas subterráneas en el Carso, 1er. Taller Iberoamericano de Informática y Geociencias, Academia de Ciencias de Cuba, Ciudad de La Habana, p. 32, 1992.
17. ——— : Geostatística. Notas de clase, Primer Curso Internacional de Agua Subterránea y Medio Ambiente, Ciudad de La Habana, 1997.
18. MOLERO LEÓN, LESLIE F.; YOEMÍ PORTUONDO LÓPEZ Y YAMILÉ BUSTAMANTE ALLEN: Migración de hidrocarburos en acuíferos cársicos. Factores de control de transporte y pronóstico del movimiento, Taller Nac. Manejo de Desastres por Derrame de Hidrocarburos, Estado Mayor Nac. Def. Civ, Sherritt Co., Geopetrol, Ciudad de La Habana, 1996.
19. MOLERO LEÓN, LESLIE F. Y OTROS: Aguas subterráneas en las zonas de montaña de Cuba, *Voluntad Hidráulica (86)-23-33, 1996.*
20. MOLERO LEÓN, L.F. Y Y. PORTUONDO LÓPEZ : Técnicas geomatemáticas aplicadas a la hidrogeología. Notas de clase, CENHICA, Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos, Circ. restr. 69, 1997.
21. MOLERO LEÓN, LESLIE F.; M.G. GUERRA OLIVA; E. FLORES VALDÉS AND E. ROCAMORA ÁLVAREZ: "Hydrogeological Prospecting with Geomathematical Tools in Karstic and Fissured Non-Karstic Aquifers!". *Hydrology in the Humid Tropic Environment, Kingston, Jamaica, IAHS,:19, 1997.*
22. MOLERO, L.F.; M. GUERRA; E. ROCAMORA; E. FLORES Y M. NÚÑEZ: "Prospección hidrogeológica en rocas de baja permeabilidad en Cuba. Resultados de la aplicación de técnicas geomatemáticas y geometría del fractal", in/J.G. Yelamos & F. Villarroya (Eds): *Hydrogeology of Hard Rocks. Some Experiences from Iberian Peninsula and Bohemian Massif, pp. 79-87, Madrid, 1997.*
23. OBDAM, A. N. M.: Statistical Treatment of Sedimentary Structures in the Underground and its use for Geohydrological Sampling. *Internatl. Symp. MIIGS, The Netherlands, Unesco, TNO :55-72, 1983.*
24. PECK, A. *et al.*: Consequences of Spatial Variability in Aquifer Properties and Data Limitations for Groundwater Modelling Practice, *IAHS Publ. 175, p. 272, Oxfordshire, 1988.*
25. REYMENT, R.A. AND K.G. JORESKOG: *Applied Factor Analysis in the Natural Sciences, p. 371, Cambridge Univ. Press, 1993.*
26. SCHILPEROORT, T. AND S. GROOT: Design and Optimization of Water Quality Monitoring Networks. *Internatl. Symp. MIIGS, The Netherlands, Unesco, TNO:86-100, 1983.*



VULNERABILIDAD A LA CONTAMINACIÓN EN EL TERCIO INFERIOR DE LA CUENCA DEL RÍO SAN ANTONIO

Rosa María Leal Ramírez, Mario Guerra Oliva, Leslie Molerio León.

Departamento de Estudios Geoambientales, Instituto de Geofísica y Astronomía, Calle 212 # 2906 e/ 29 y 31, La Lisa, CP 11600, La Habana, Cuba; fax: (537) 33-9497, e-mail: rosa@iga.cu

RESUMEN

La cuenca Ariguanabo constituye una de las fuentes de abasto de Ciudad de la Habana. Su actual estado de contaminación hace necesario la realización de investigaciones hidrológicas, mediante la aplicación de métodos rápidos y económicos. En el presente trabajo se aplicaron los modelos determinísticos de simulación de las curvas de retención de humedad RETC y ADRIANA, en diferentes localidades asociadas al nivel de cavernamiento actual. Las variables estudiadas fueron: contenido de agua residual, contenido de agua saturada, conductividad hidráulica, presentándose las curvas de retención de humedad.

Como resultado de la investigación se han definido y caracterizado los procesos que controlan el transporte de masa en la zona no saturada, lo que permitió establecer una diferenciación del área, en relación con la vulnerabilidad del acuífero a la contaminación.

El trabajo constituye una importante fuente de información, por profundizar en el conocimiento de un sector de la cuenca, el mismo tendrá aplicación directa en la ejecución de proyectos de protección ambiental y gestión integrada de los recursos hídricos superficiales y subterráneos de la cuenca Ariguanabo.

ABSTRACT

Ariguanabo the basin one of the sources of supply of City of the Havana constitutes. Their current state of contamination makes necessary the realization of hydrological investigations, by means of the application of quick and economic methods. Presently work the model deterministic of simulation of the curves of retention of humidity RETC and ADRIANA were applied, in different towns associated to the level of current cavernamiento of the basin. The studied variables were: content of residual water, content of saturated water, hydraulic conductivity, being presented the curves of retention of humidity.

As a result of the investigation they have been defined and characterized the processes that control the transport of mass in the not saturated area, what allowed to establish a differentiation of the area, in connection with the vulnerability of the aquifer to the contamination.

The work constitutes an important source of information, the same one will have direct application in the execution of projects of environmental protection and integrated administration of the resources superficial hydrological and undergrounds of the basin Ariguanabo.

Introducción

Hoy día se presenta la problemática de la contaminación de las aguas de la cuenca del río San Antonio, por vertimiento de residuales industriales y urbanos sin tratamiento o deficientemente tratados.

En relación con esta problemática ha sido realizada esta investigación en la zona inferior de la cuenca del río San Antonio, provincia La Habana (Ver Fig.1), localizada en los



alrededores del poblado de San Antonio de los Baños, al Sur de la Ciudad de La Habana, con el objetivo de identificar los procesos que controlan el transporte de masa, y de caracterizar el área en relación con la vulnerabilidad a la contaminación, teniendo en cuenta que la misma se ha desarrollado sobre rocas sedimentarias carbonatadas de la cobertura platafórmica, en particular calizas pertenecientes a las unidades estratigráficas: formación Cojimar de edad Mioceno Medio y a la formación Güines de edad Mioceno Medio Tardío.

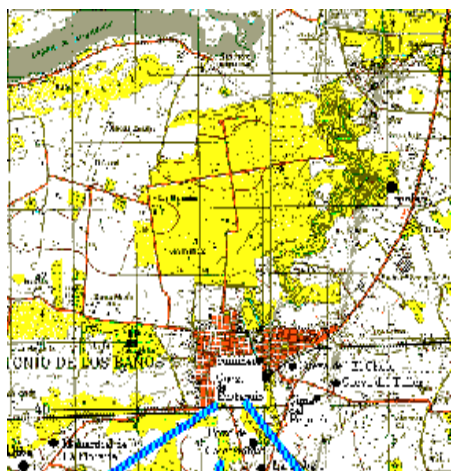


Fig.1 Esquema de Ubicación Geográfica.



Fig. 2 Contaminación del río San Antonio.

El trabajo que presentamos, constituye un resultado del proyecto Protección Ambiental y Gestión Integrada de los Recursos Hídricos y Subterráneos de la Cuenca Ariguanabo. En el mismo brindamos el estudio de los procesos de transporte de masa en la ZNS de las cuevas Sumidero, El Cholo, Sima del Pequeño Padirác, El Taller y Eustaquio y una caracterización de las tres zonas diferenciadas en cuanto al grado de vulnerabilidad a la contaminación, lo cual ha sido mapificado a escala 1: 50 000.

Materiales y métodos

La metodología utilizada ha sido empleada en diferentes estudios hidrológicos realizados en otras regiones del país, por el Centro de Investigaciones de los Recursos Hidráulicos.

La investigación se inicia con la recopilación de la información existente, la misma tuvo como base, la utilización de los datos derivados de la implementación y corridas de los modelos (RETC y ADRIANA), además de contar con una base topográfica a escala 1:50 000, mapa de Suelos, mapa geomorfológico y el mapa geológico, los cuales fueron analizados de forma conjunta.

Resultados y discusión

Como salidas de los modelos se obtuvieron, los gráficos de las curvas de retención de la conductividad y difusividad, para cada una de las cuevas muestreadas.

Estos gráficos han permitido conocer para un instante dado el avance del frente de humedad desde la superficie del terreno hasta la zona saturada. A continuación se analizará el comportamiento de las curvas para cada cueva.



Cueva Sumidero

La curva de difusividad presenta un comportamiento ascendente. Con respecto a los valores de difusión ocurre que aumentan desde los primeros centímetros hasta el primer metro y luego se hace más lenta hasta tener un comportamiento casi estable de estos valores hacia el extremo final.

Con respecto a los valores de conductividad ocurre de manera similar, manifestándose el mismo tipo de curva e igual tendencia de estos valores hacia el extremo final.

Del análisis de los gráficos para la cueva Sumidero se puede afirmar que los procesos de volatilización, infiltración y degradación predominan sobre el retardo-adsorción, evidenciado en el valor de 0,007 de retención a una profundidad de 10 cm, el cual constituye uno de los valores más pequeños en el área de estudio.

Cueva El Cholo

Es característico que los valores de la difusividad presenten un comportamiento invariable entre el rango de 0.15 % hasta 0.28% de retención y posteriormente comienzan a ascender de forma brusca hasta alcanzar los 0.37%, y a partir de allí su tendencia es a la estabilidad.

Un aumento similar a la curva de difusividad presenta la curva de conductividad, aunque la tendencia al aumento de estos valores es mayor.

En ésta cueva ocurre que tanto los procesos de volatilización, infiltración como la degradación son más determinantes que los de retardo –adsorción, si se tiene en cuenta que en esta cueva tiene lugar a los 10 cm de espesor de la ZNS, el menor valor de retención (0, 002 %) del área.

Cueva Sima del Pequeño Padirác

Los valores de difusividad son constantes para una retención comprendida entre el 0.15 % y los 0.28 % de retención. A partir de aquí comienza un cambio brusco con tendencia a la estabilidad, al final de la curva, definida por valores de contenido de agua de alrededor del 40%.

La curva se manifiesta de forma similar a la anterior, presentando un mismo nivel de los valores de retención. Es característico que para los primeros 50 cm, existe un ligero aumento de los valores de retención, los cuales descienden de forma suave, manteniendo una tendencia a la disminución.

Esta cueva se distingue por el valor medio (0.01%) de retención en comparación con la mayoría de las cuevas. Esto ocurre a los 50 cm de espesor de la ZNS, lo que permite caracterizarla como reguladora del movimiento de los contaminantes porque predominan los procesos de retardo-adsorción y degradación sobre los restantes procesos que ocurren en la zona vadosa.



Cueva El Taller

La curva de difusividad comienza a manifestarse a partir de 0.15% de retención, siendo constante hasta los 2,7% y a partir de este valor comienza a ascender gradualmente hasta estabilizar nuevamente a los 0.39 %.

El gráfico de la conductividad tiene un desarrollo ascendente, se inicia en el valor 0.15% de retención y crece gradualmente hasta 0.43%. Es significativo la constancia que presenta la curva en su comienzo desde 0.15 a 0.25% de retención.

En la cueva El Taller el comportamiento de la ZNS es similar al de la cueva Sima del Pequeño Padirác, a los 50 cm de profundidad ocurre el mayor valor de retención (0,01 %), provocando un lento movimiento de los contaminantes hacia la zona saturada del acuífero.

Cueva de Eustaquio

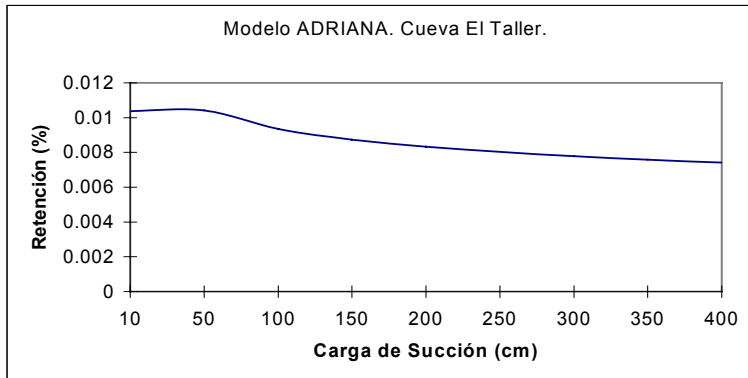
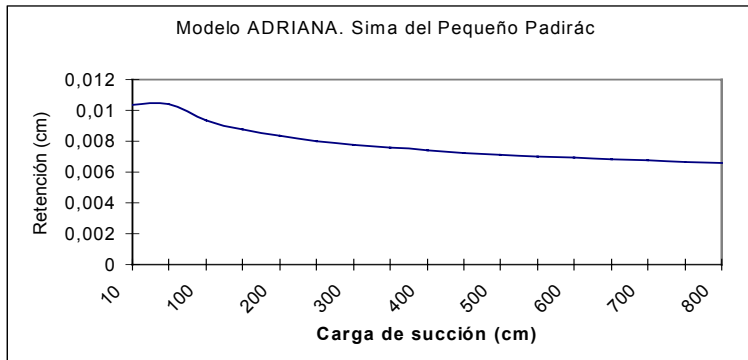
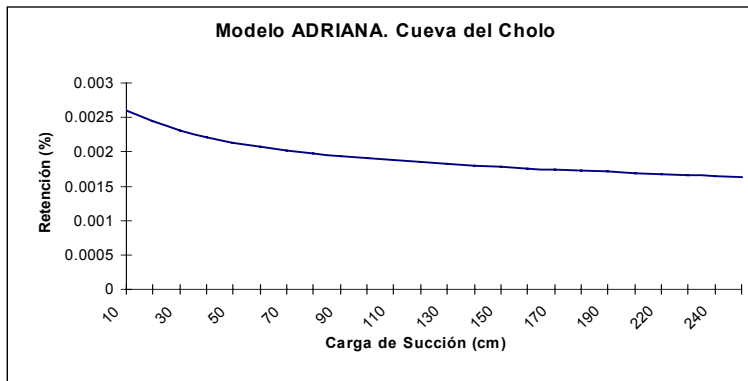
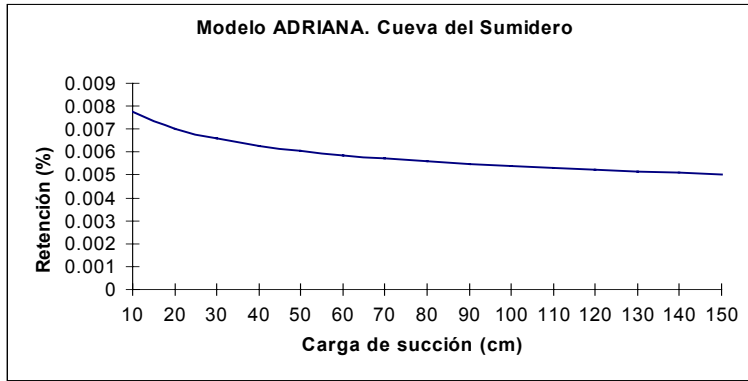
El gráfico de difusividad, muestra el comportamiento ascendente de la curva. Es característico para ésta cueva que los valores de la difusividad permanecen constantes con relación al contenido de agua en el rango de retención comprendido entre los 0.12 % y los 0.27 % de retención. A partir de este último valor comienza a aumentar de forma brusca hasta los 0.37 % y continua incrementándose gradualmente a partir de este valor, logrando una ligera estabilidad.

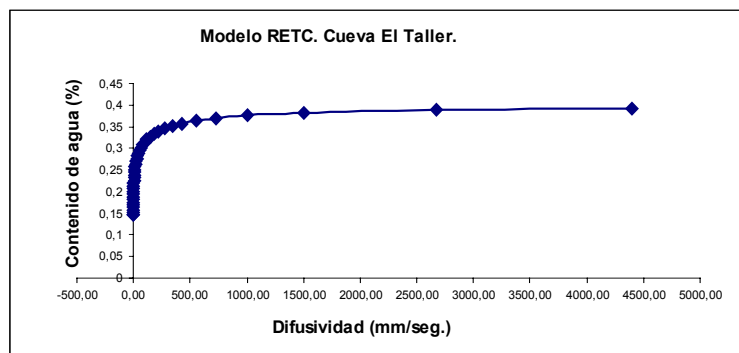
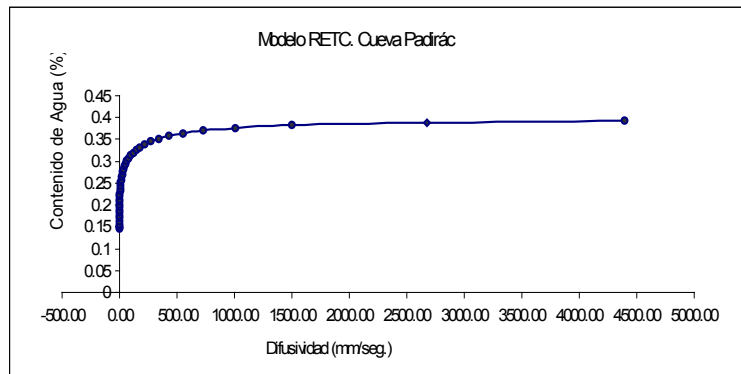
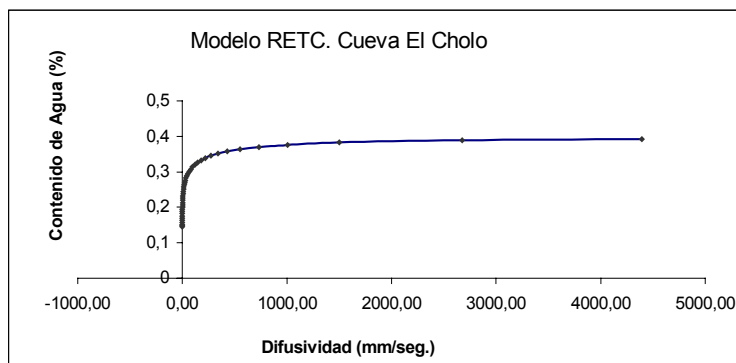
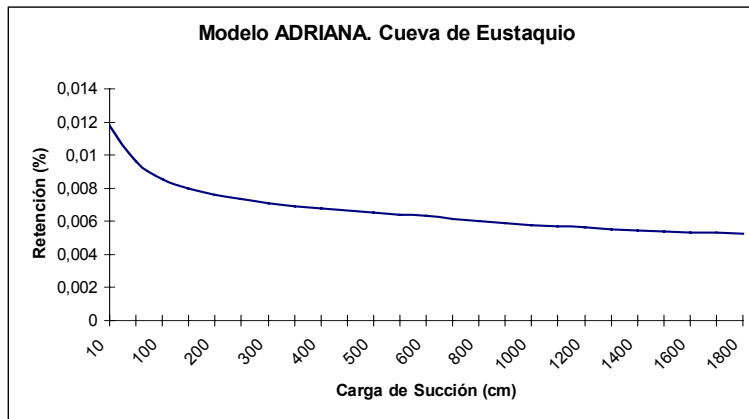
La conductividad hidráulica presenta un comportamiento similar, aunque el aumento de estos valores es más pronunciado hacia el extremo final de la curva.

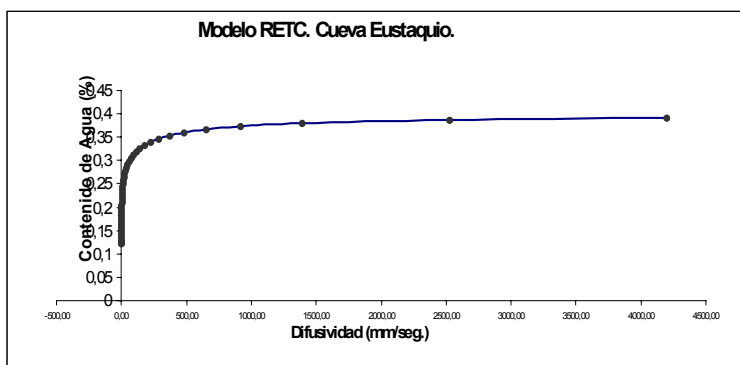
Para esta cueva se define el mayor valor de retención (0,1%) a los 10 cm de profundidad y tiene lugar precisamente donde el espesor de la ZNS es el mayor (15 m), en relación con el resto, predominando los procesos de retardo-adsorción, lixiviación y degradación, lo que hace positivo el papel de la ZNS, en relación con el control del movimiento de los contaminantes hacia la zona saturada.

En relación con la difusividad y la conductividad ambas se interpretan en función del carso y las condiciones estructurales existentes, así se tiene que su comportamiento es homogéneo en toda el área, porque están estrechamente vinculadas a la disminución de la aceleración del movimiento de los contaminantes hacia la zona saturada. Sus valores van incrementándose hasta llegar a estabilizarse, por ello se identifica a la ZNS como conductora desde el punto de vista hidráulico.

A continuación se muestran las curvas de retención para cada una de las cuevas estudiadas, a partir de las corridas del modelo ADRIANA.







En las regiones cársticas como la que se investiga, el transporte de masa en la zona no saturada está condicionado por el conjunto agua-roca-suelo, que interactúa ocasionando aceleración o retardo del transporte.

En este caso la permeabilidad de las rocas, el desarrollo de los procesos cársticos y el tipo de suelo ferralítico, constituyen factores que favorecen el proceso de filtración de las aguas hacia la zona saturada del acuífero.

Una vez analizado el comportamiento de estos factores conjuntamente con los resultados de los programas RETC y ADRIANA se realizó el Mapa de Vulnerabilidad (ver Fig.2), donde aparecen tres zonas bien diferenciadas, atendiendo al grado de vulnerabilidad, compuestas a su vez por varios sectores.

Una primera zona se sitúa en la parte NE del área, con relieve de glacis cárstico cubierto (Ver Fig. 2), desarrollado sobre margas arcillosas, cuyas características texturales condicionan valores bajos de resistencia al fluido, el suelo presente es de tipo gley originando que en la ZNS sean los procesos de volatilización, retardo-absorción, así como los de degradación los que predominen.

En la misma han sido clasificados 2 sectores como de vulnerabilidad baja que se extienden en 10.07 kilómetros cuadrados. (Ver Fig.2).

La segunda zona se localiza en la parte central y Oeste del área, su relieve es de superficie cárstica de pediplanación, el cual presenta cotas de hasta 100 m, el mismo se ha desarrollado sobre calizas organógenas de grano fino y arcillosas de textura fina, que ocasiona valores medios de resistencia al agua, trayendo consigo que los procesos de volatilización, retardo – adsorción y los de degradación sean los que prevalezcan.

Los suelos desarrollados sobre estos estratos son Ferralíticos Rojo Típicos, los cuales son medianamente profundos (51 –100 cm), están compuestos por más del 75% de arcilla caolinítica y se mantienen medianamente saturados (40 – 75%), los mismos favorecen en cierta medida al proceso de infiltración del agua.

En las cuevas Eustaquio y Sumidero se encuentran éstas condiciones y los espesores de la ZNS son menores de 20 cm. Los valores de retención no exceden el valor de 0.012% en Eustaquio y de 0.007% en Sumidero), en ambas los mismos disminuyen con la profundidad. Los valores de difusividad y conductividad primeramente tienden a aumentar y luego a estabilizarse en dichas cuevas.



Los sectores identificados en esta segunda zona se clasifican como de vulnerabilidad moderada (ver Fig.2), los cuales ocupan un área de 38.62 Km cuadrados, siendo la categoría de mayor representatividad en el área de investigación.

La tercer zona ubicada al Sur del área ocupa una extensión de 12.47 Km cuadrados presenta un relieve de superficie cársica marina (Ver Fig.2), en ella se diferencian tres sectores clasificados como de vulnerabilidad alta, debido a la presencia de rocas calizas organógenas masivas, que se caracterizan por presentar un carso bien desarrollado, donde el espesor de la ZNS es menor de 20 m (8 m), y los suelos originados son el Ferralítico Rojo Hidratado y el Ferralítico Rojo Compacto, cuya permeabilidad es media, incidiendo directamente en un grado mayor de infiltración, siendo éste el proceso de transporte predominante en la ZNS. En el sector central de esta zona se ubican las cuevas Sima del Pequeño Padirác y El Taller.

Esta zona se caracteriza por un comportamiento creciente de los valores de conductividad y difusividad que con posterioridad tienden a estabilizarse a los 0.39% de contenido de agua, lo que hace que en esta parte de la ZNS el movimiento de los contaminantes hacia la parte saturada del acuífero sea menos rápido en los primeros cien centímetros y con posterioridad sea más rápido, debido al tipo de caliza yacente.

Esta zonación descrita, revela lo heterogénea que es el área en cuanto a la vulnerabilidad, y permite identificar a la zona Sur, como la de mayor riesgo, donde se deben cumplir con rigor las legislaciones ambientales existentes en aras de proteger al acuífero.

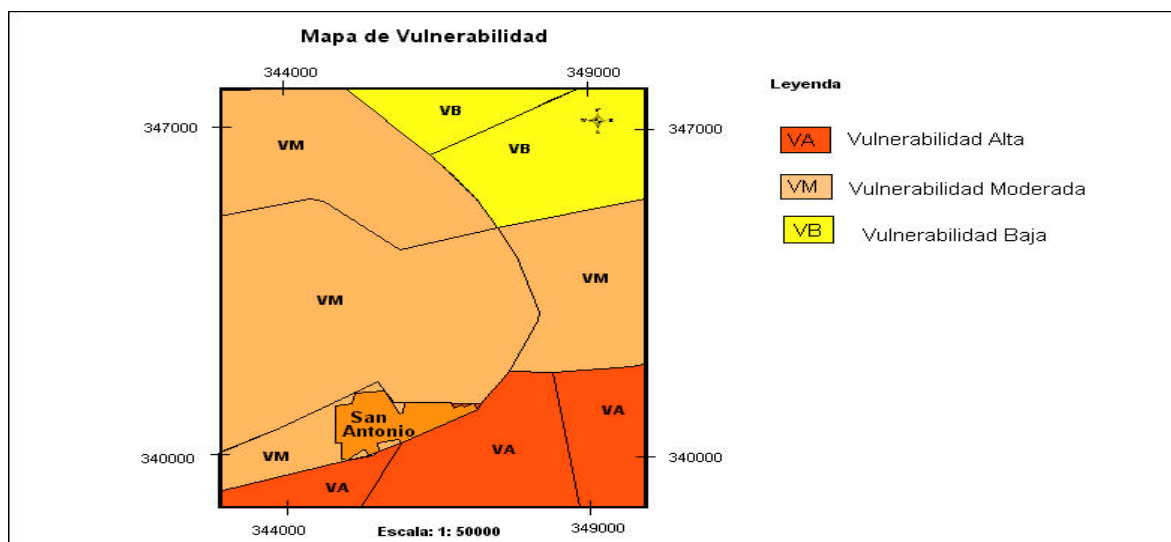


Fig. 2 Mapa de Vulnerabilidad.

Conclusiones

1. Se pudo comprobar que la zona no saturada, constituye una barrera para los contaminantes en su paso hacia las aguas subterráneas y que los procesos de transporte que intervienen en mayor medida son: retardo-adsorción, la degradación y la infiltración.



2. La presencia de suelos ferralíticos rojos de mediana permeabilidad denota que existe cierto almacenamiento en la pared más superficial de la zona no saturada, así como en los poros y grietas del material rocoso carbonatado, de ahí que la retención puede evaluarse bajo condiciones de capilaridad y adhesión que propician valores de retención oscilantes en el rango de 0.002% a 0.1%, gobernando el avance del frente de humedad hacia la zona saturada.
3. La información obtenida a partir de la aplicación de los modelos determinísticos RETC y ADRIANA, permite definir que la conductividad hidráulica y la difusividad son funciones del contenido de humedad, cuyos valores no sobrepasan en el caso de la primera al valor 0.75 m/seg. y en la segunda al valor máximo de 4400 mm/seg.
4. El criterio de selección de las categorías de vulnerabilidad a la contaminación (alta, media, baja), propició la clasificación del área en tres zonas:
 - Queda delimitada la zona Sur que ocupa 12.47Km² como la de alta vulnerabilidad, desde la que cualquier contaminante que se vierta llega más rápidamente a la zona saturada, produciendo las mayores afectaciones a las aguas subterráneas.
 - Se diferencia a la zona central y Noroeste extendida en 38.62Km², como la de moderada vulnerabilidad.
 - Se definió a la zona Noreste que ocupa 10 Km², como la de baja vulnerabilidad, donde se hace oportuno llevar a cabo una estrategia correcta de protección a la calidad de las aguas subterráneas.

Bibliografía

- Iturralde Vinet, M; Albear, J.F. 1985. Contribución a la Geología de las provincias de la Habana. I.G.P. Editorial Científico Técnico. Ciudad de la Habana: 43-48
- Molerio León, L. 1992. Procesos de Transporte de Masa en la zona no saturada de los acuíferos cársicos tropicales. GTICEK. I Taller Internacional sobre Ciencias Experimentales en el Karst. Universitat Jaume 1 de Castelló: 12-15
- Moleiro León, L. 1997. Curso Avanzado sobre Contaminación de las aguas subterráneas. Monitoreo, evaluación, recuperación. INRH, CENIC, ISPJAE . (1): 33-48
- Moleiro León, L. (en prensa). Modelo de transporte en la zona no saturada de los acuíferos cársicos. Algoritmo ADRIANA. (2): 91
- Van Geruche Genuchten, M, Th, et al, 1994. The RETC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils: 117