

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 caja 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 .

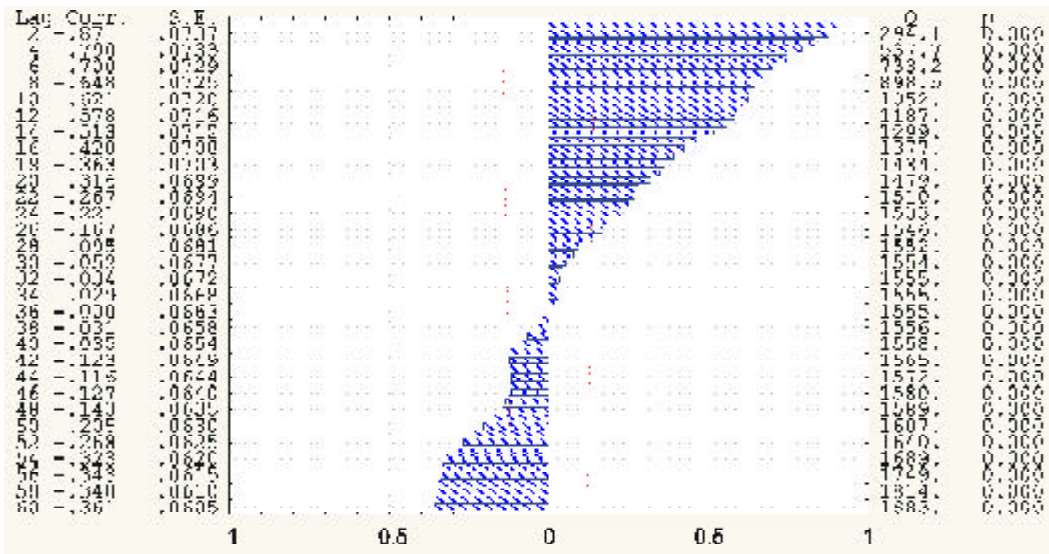


FIG. 1 Autocorrelograma de cotas piezométricas mensuales de un pozo de monitoreo en un acuífero cársico del Occidente de Cuba.

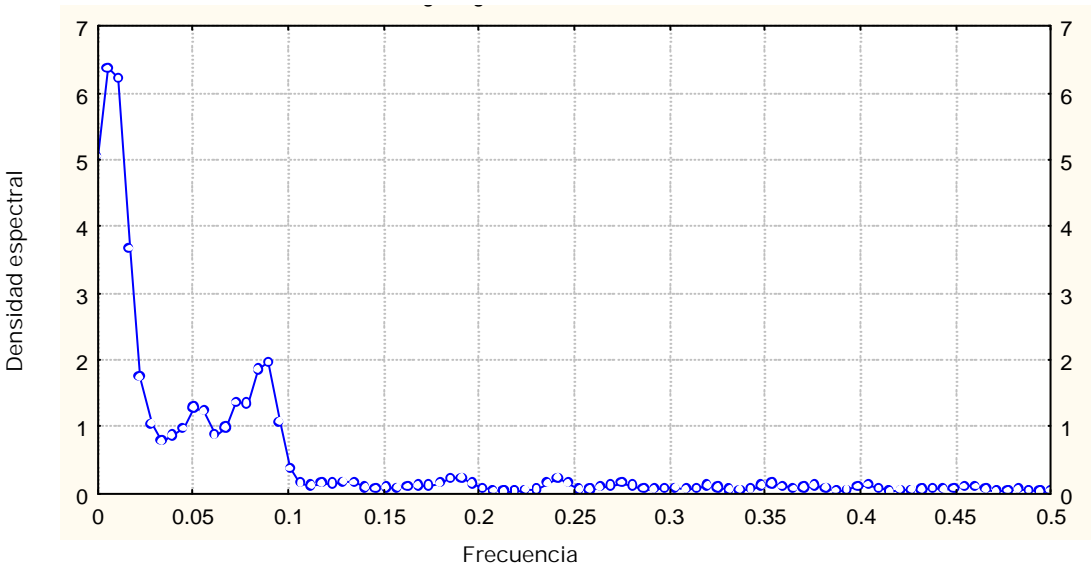


FIG. 2 Espectro de varianza de las colas piezométricas de un acuífero cársico

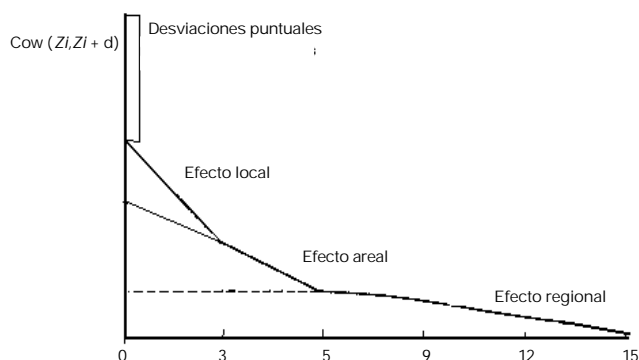


FIG. 3 *Función de covarianza con efecto de factor de escala.*

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 $\sigma_{\text{tot}}^2 = \sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 + \sigma_4^2$ (según Obdam²³)

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
	$N_1 N_2 N_3 N_4 - 1$	$S = \sum_i \sum_j \sum_k \sum_l \sum_m (x_{ijklm} - \bar{x})^2$	$S / N_1 N_2 N_3 N_4 - 1$	

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 Internatl. 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, AIHS,: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.