

Guías de aplicación de la Directiva Marco de Agua: análisis de la herramienta GW-stat en la red de calidad de aguas subterráneas del Duero

DIAGO SÁNCHEZ, I. (*); DOMÍNGUEZ CABRERIZO, A. (*); RUZA, J. (**); ESPINOSA EXPÓSITO, G. (**); DANÉS, C. (**) y ALONSO GARCÍA, A.M. (*)

RESUMEN En el año 2000 se aprobó la Directiva 2000/60/CE, por la que se establece un marco comunitario en el ámbito de la política de aguas. Con la finalidad de facilitar la trasposición y aplicación de los principios contenidos en la misma, se establece una estrategia común de implantación (CIS), constituyendo grupos de trabajo para desarrollar una aproximación común, elaborar guías técnicas, compartir experiencias y recursos, evitando, de esta forma, la duplicación de esfuerzos y limitando los riesgos de errores en la aplicación. Dentro de este marco de trabajo se desarrolla la herramienta GW-stat que permite, entre otras cosas, examinar los criterios de definición de las redes de control de la calidad química de las aguas subterráneas. Del análisis realizado de esta herramienta se concluye que la forma de abordar el problema puede resultar adecuada para el seguimiento de masas de agua con formas regulares (proyección superficial) y gran homogeneidad estructural y funcional, pero no parece la mejor opción para la definición de una red de control para la zona analizada (cuenca del Duero), que debería ser elaborada en base a criterios hidrogeológicos.

WATER FRAMEWORK DIRECTIVE IMPLEMENTATION GUIDANCE DOCUMENTS: TESTING OF THE GW-STAT TOOL IN THE DUERO'S GROUNDWATER QUALITY MONITORING NETWORK

ABSTRACT *In 2000 the Directive 2000/60/EC, by which a EC frame is set on the field of water policy, was approved. For the purpose of ease the transposition and application of the principles contained in it, a common strategy for implantation is set, forming working groups to develop a common approach, elaborate technical guidance, share experiences and resources, (this way) avoiding duplication of unnecessary efforts and limiting the risk of mistakes in its application. Within this framework the GW-Stat is developed, which allows, among other things, to examine the defining criteria for the chemical control networks of the underground waters. It is concluded by the analysis performed of this tool, that the way to undertake this problem could be adequate for the monitoring of regular-shaped groundwater bodies (superficial projection) and large structural and functional homogeneity but does not seem to be the best choice for the definition of a control network over the analysed area (Duero's river basin) which should be elaborated on a hydrogeologic criteria base.*

Palabras clave: Aguas subterráneas, Redes de control, Directiva Marco de Aguas, Estadística.

1. INTRODUCCIÓN

Una vez culminado el proceso de aprobación de la Directiva Marco de Aguas, su aplicación práctica supone un complejo reto para los estados miembros de la Unión Europea, que se enfrentan a una normativa difícil, con unos objetivos sumamente ambiciosos y que debe llevarse a la práctica con un calendario muy exigente.

La dificultad en la aplicación de la Directiva se refiere, en algunos casos, a la falta de definiciones concretas así como a la complejidad de obtener un acuerdo sobre el significado e interpretación de algunos conceptos básicos, y, en otros, a la

falta de medios técnicos apropiados o incluso de la necesaria información requerida para la aplicación.

Tras un proceso de evolución continua se aprobó finalmente la denominada Estrategia Común de Implantación (CIS: *Common Implementation Strategy*), en Junio de 2001, en Goteburgo, como mecanismo mediante el que se intenta dar respuesta a la necesidad de establecer grupos de trabajo que desarrollaran guías y documentos que ayudaran a una correcta comprensión y aplicación de la Directiva, de tal forma que los países miembros y la propia Comisión Europea interpreten de la misma forma sus preceptos.

Dado que la aplicación de la Directiva es una responsabilidad que reside exclusivamente en cada país miembro, la Estrategia Común ha de ser considerada como un procedimiento informal, no vinculante desde el punto de vista legal, y que se basa en el consenso, siendo aceptada por los países miembros de forma voluntaria.

(*) Centro de Estudios Hidrográficos (CEDEX)

(**) Dirección General del Agua. Ministerio de Medio Ambiente.

UH	cellsize	UH	cellsize	UH	cellsize	UH	cellsize
02.01	400	02.06	1000	02.11	200	02.17	600
02.02	400	02.07	400	02.13	150	02.18	550
02.03	600	02.08	800	02.14	500	02.19	650
02.04	300	02.09	1100	02.15	500	02.20	100
02.05	400	02.10	500	02.16	350	02.21	200

TABLA 1. Tamaño de la celda empleado. Resolución de la matriz GIS-data a emplear en la evaluación de la herramienta GWstat, condicionado por la limitación en el número de filas y columnas.

2. GUÍA DE ASPECTOS ESTADÍSTICOS

En el área relativa a las aguas subterráneas, el grupo de trabajo 2.8¹, que surge dentro del marco de colaboración e intercambio establecido en Goteburgo, tiene por objetivo elaborar propuestas para:

- un algoritmo para la agregación de datos y la determinación del estado químico de las aguas subterráneas,
- un algoritmo para determinar tendencias y la inversión de tendencias,
- la amplitud de las series temporales y el punto de inicio para calcular tendencias,
- el tratamiento de los valores inferiores al límite de cuantificación, y
- la consideración de distribuciones desiguales de contaminación de las aguas subterráneas.

Como resultado de los trabajos realizados, se elabora una guía y una herramienta informática (GWstat)¹, que pretende simplificar el tratamiento de los datos obtenidos.

El requisito de partida de esta propuesta es la homogeneidad espacial de la red de seguimiento, que permita un estudio estadístico de los datos, para lo cual desarrolla un *Índice de Representatividad* de la red. En caso de que la masa de agua subterránea sea hidrogeológicamente heterogénea, el desarrollo de la red de seguimiento debe realizarse en base a criterios de representatividad hidrogeológica, en lugar de criterios de homogeneidad espacial.

En el presente artículo se describe el proceso seguido para analizar la herramienta GW-Stat, valorándose el uso del *Índice de Representatividad* como indicador de la distribución espacial de los puntos de control y la representatividad de la información obtenida, en estos puntos de control, en relación con el conjunto de la Unidad analizada.

El *"Índice de Representatividad"* de la herramienta *GWStat*, representa la distancia mínima media entre cualquier lugar en el área, al punto de control más cercano, y se expresa en porcentajes de la distancia media para una red óptima², y considera como representativa cualquier red cuyo *Índice de Representatividad* sea igual o superior al 80%.

El *Índice de Representatividad* depende del número de puntos de control, del tamaño y de la forma de la zona a controlar, y está basado en el principio de homogeneidad espacial de la red de control para el seguimiento de la calidad química de las aguas subterráneas.

1 EU Water Framework Directive: Statistical aspects of the identification of groundwater pollution trends, and aggregation of monitoring results. WFD-GW Final report. December 2001.

2 El *Índice de Representatividad* máximo es 100%, y corresponde a un patrón triangular óptimo.

2.1. MATERIALES Y MÉTODOS

El proceso seguido para la validación de esta herramienta ha sido el siguiente:

- 1) Instalación de la herramienta GWstat.
- 2) Selección de las Unidades Hidrogeológicas a analizar. Se selecciona la cuenca del Duero como cuenca piloto para este estudio.
- 3) Preparación de los datos geográficos disponibles, las poligonales de las Unidades, de forma que sean compatibles con la herramienta *GWStat* (matrices de ceros y unos, donde los unos representan las masas de agua a analizar). La resolución del modelo está limitado a 256 columnas y 65536 filas. Con el objeto de aprovechar al máximo los recursos del modelo, se ha trabajado con una resolución diferente en cada una de las Unidades analizadas (ver Tabla 1).
- 4) Preparación de los datos de localización de puntos de control³.
- 5) Incorporación de los datos en GWstat⁴.
- 6) Análisis de los datos con la herramienta GWstat.
- 7) Interpretación de los resultados obtenidos.

2.2. RESULTADOS

Los criterios del algoritmo utilizado establecen que se puede considerar que la red de control es homogénea cuando el *Índice de Representatividad* es igual o superior al 80%, siendo el valor máximo el 100%, que corresponde a una red óptima teórica triangular.

En la Tabla 2 se resumen los resultados obtenidos para las Unidades Hidrogeológicas analizadas, indicando el número de puntos de control de la red y el *Índice de Representatividad* calculado en base a la distribución espacial de los mismos.

Como se puede observar, sólo se podría considerar espacialmente homogénea la red en dos de las veinte Unidades analizadas (Unidades 02.05 y 02.13). En la Figura 1 se representa gráficamente la red existente.

Una vez observados los resultados de homogeneidad obtenidos con los datos existentes, se procede a analizar la respuesta del modelo ante diferentes situaciones, comparando el *Índice de Representatividad* resultante, con las características del fun-

3 La herramienta GWstat representa las coordenadas de los puntos de control sobre la matriz GIS-data, en forma de coordenadas absolutas (X,Y), donde el origen (0,0) se sitúa en el extremo superior izquierdo de la matriz.

4 La herramienta GWstat requiere que los datos a utilizar estén almacenados en un archivo Excel 5.0/95, en forma de libro con dos hojas, una de las cuales contiene la matriz GIS-data y la otra las coordenadas (X,Y) de los puntos de control presentes.

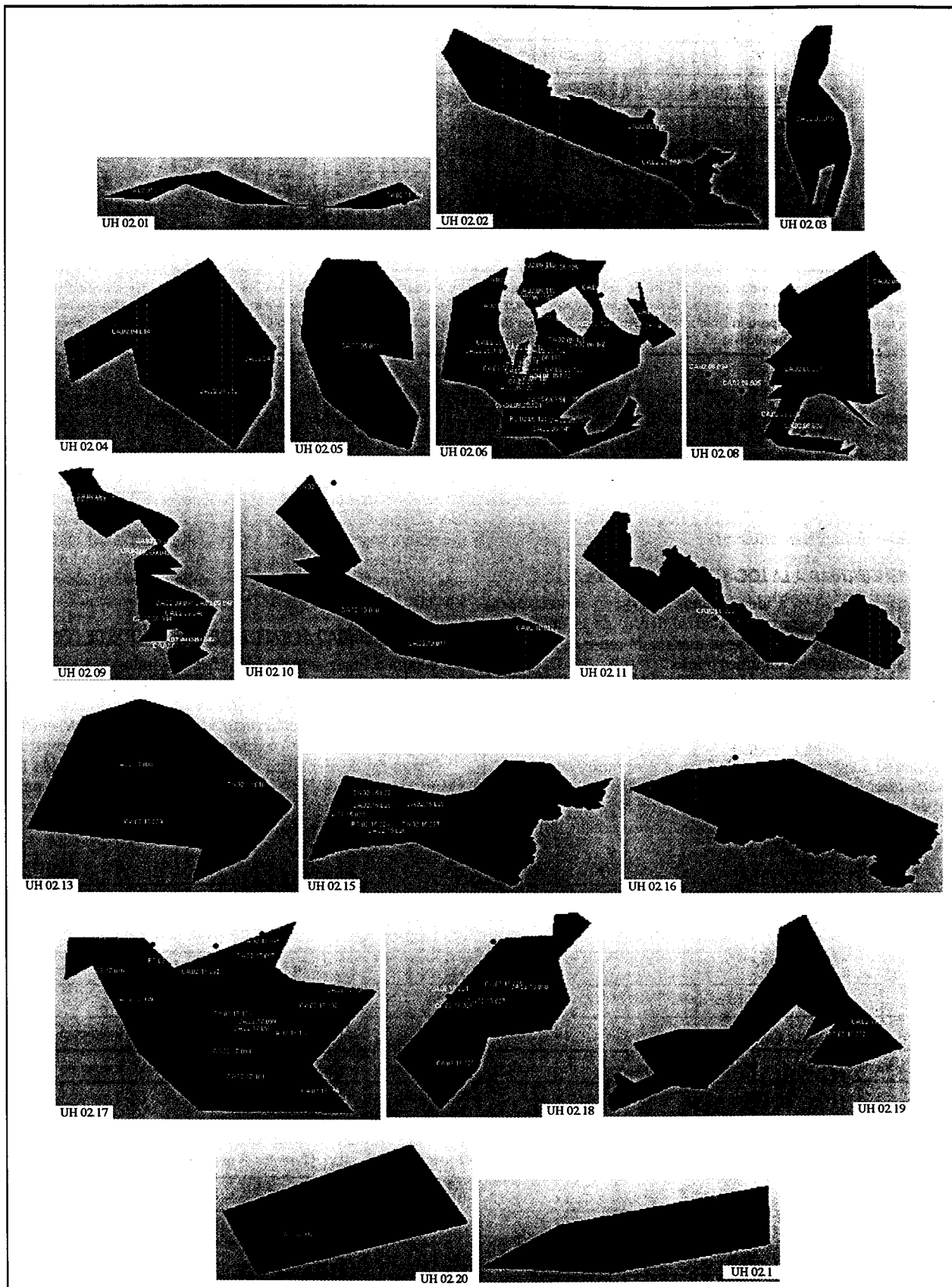


FIGURA 1. Índice de Representatividad de la red actual de control de la calidad química de las aguas subterráneas. Unidades 02.01, 02.02, 02.03, 02.04, 02.05, 02.06, 02.07, 02.08, 02.09, 02.10, 02.11, 02.13, 02.15, 02.16, 02.17, 02.18, 02.19, 02.20 y 02.21.

UH	ÍR	Puntos	UH	ÍR	Puntos	UH	ÍR	Puntos
02.01	31,2 %	2	02.08	45,5 %	6	02.16	44,3 %	3
02.02	35,5 %	2	02.09	60,0 %	12	02.17	68,9 %	20
02.03	74,6 %	1	02.10	60,0%	5	02.18	65,5 %	7
02.04	75,5 %	3	02.11	41,39 %	1	02.19	34,4 %	2
02.05	88,3 %	1	02.13	81,3 %	3	02.20	66,7 %	1
02.06	58,7 %	35	02.14	NA	0	02.21	55,8 %	1
02.07	NA	0	02.15	33,2 %	7			

TABLA 2. Índice de Representatividad calculado con la herramienta GW-stat. Para considerar homogénea una red, el Índice de Representatividad debe ser igual o superior al 80%. UH→ código de la Unidad Hidrogeológica analizada. IR→ valor del Índice de Representatividad obtenido. Puntos→ número de puntos de control disponibles para la Unidad Hidrogeológica. NA→ no se disponen de puntos de control en la Unidad Hidrogeológica: no se puede determinar el Índice de Representatividad.

cionamiento hidrogeológico de una Unidad Hidrogeológica. La Unidad seleccionada es la 02.17, que dispone de 20 puntos de control, distribuidos atendiendo a criterios hidrogeológicos, con un Índice de Representatividad del 68,9% (ver Tabla 2).

El objeto de este ejercicio es identificar como afectan estos factores, número de puntos y localización, al resultado del modelo (Índice de Representatividad).

2.2.1. SENSIBILIDAD A LA LOCALIZACIÓN ESPACIAL

En primer lugar se va a identificar la influencia de la situación espacial de los puntos de control dentro de la masa de agua, para ello, se va a utilizar el modelo de red más sencillo posible, que consiste en un único punto.

Con el fin de visualizar e interpretar de forma rápida los resultados, se calcula el Índice de Representatividad para cuatro casos diferentes (ver Figura 2). Los resultados obtenidos se resumen en la Tabla 3.

Como se puede observar en la Figura 2, el Índice de Representatividad aumenta al situarse el punto en una zona central de la Unidad, esto se debe a que al situar el punto de control en la zona central, se minimiza la distancia mínima

media desde cualquier punto de la Unidad y el punto de control más cercano.

Según los criterios del modelo, se considera que la red es suficientemente homogénea cuando el valor del Índice de Representatividad obtenido es igual a superior al 80%. Los casos C y D cumplen este criterio (84,2% y 91,8% respectivamente). En ambos casos, los puntos se encuentran en zonas más o menos centrales de la Unidad. Los casos A y B, situados en zonas periféricas de la Unidad, no cumplen este requisito de homogeneidad.

2.2.2. SENSIBILIDAD AL INCREMENTO DE PUNTOS DE CONTROL

En segundo lugar se va a identificar la influencia del incremento de puntos de control en la masa de agua, relacionando este aumento de densidad de puntos con la distribución espacial de los mismos. En esta segunda etapa, la red más sencilla que se puede definir está compuesta de dos puntos de control.

Con el fin de visualizar e interpretar de forma rápida los resultados, se calcula el Índice de Representatividad para cuatro casos diferentes (ver Figura 3). Los resultados obtenidos se resumen en la Tabla 4.

Caso	Localización del Punto en la Unidad	Índice Representatividad	Comentarios relativos a la localización del punto
A	extremo	52,1 %	Zona de recarga
B	periférico	72,3 %	Zona de recarga
C	próximo al centro	84,2 %	Zona de bombeo
D	centrado	91,8 %	Zona de descarga local y regional

TABLA 3. Variación del Índice de Representatividad en función de la localización espacial de los puntos de control dispuestos: un punto de control.

Caso	Localización de los Puntos en la Unidad	Índice Representatividad	Comentarios relativos a la localización del punto
A	extremos	56,9 %	Zona de recarga
B	periféricos	69,0 %	Zona de recarga
C	próximos al centro	80,9 %	Zona de bombeo
D	centrados	71,4 %	Zona de descarga local y regional

TABLA 4. Variación del Índice de Representatividad en función de la localización espacial de los puntos de control dispuestos: un punto de control.

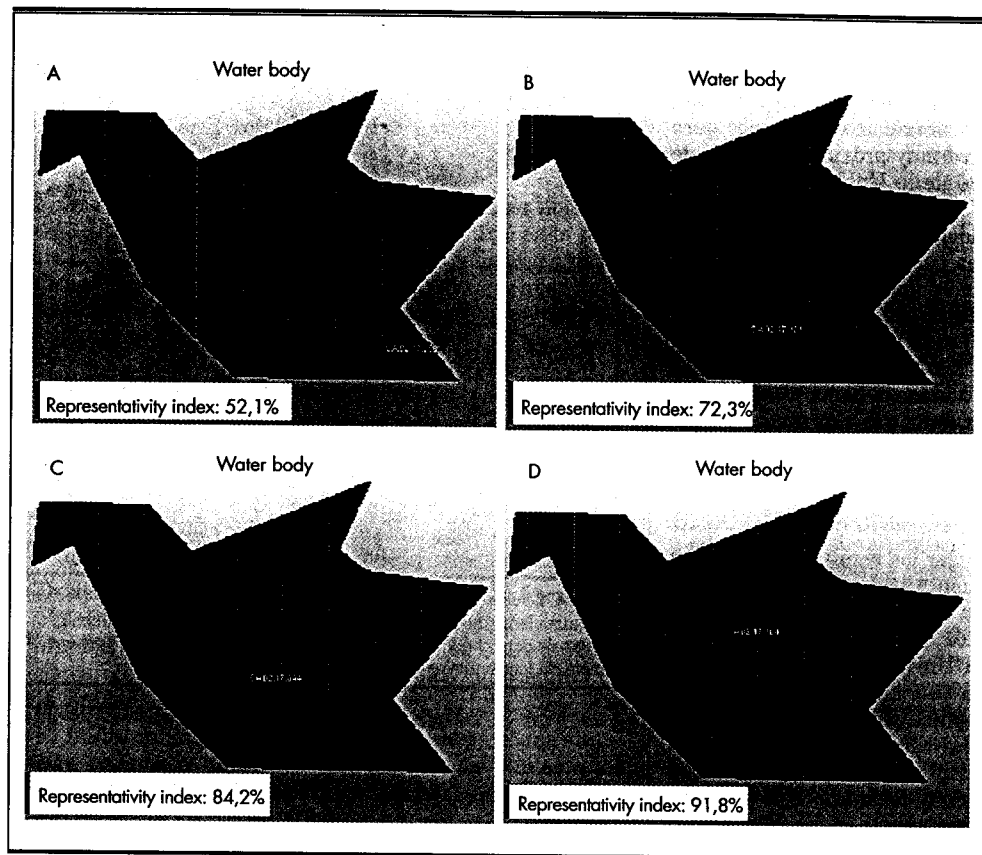


FIGURA 2. Sensibilidad de la localización espacial. El Índice de Representatividad aumenta al situar el punto de control en la zona central.

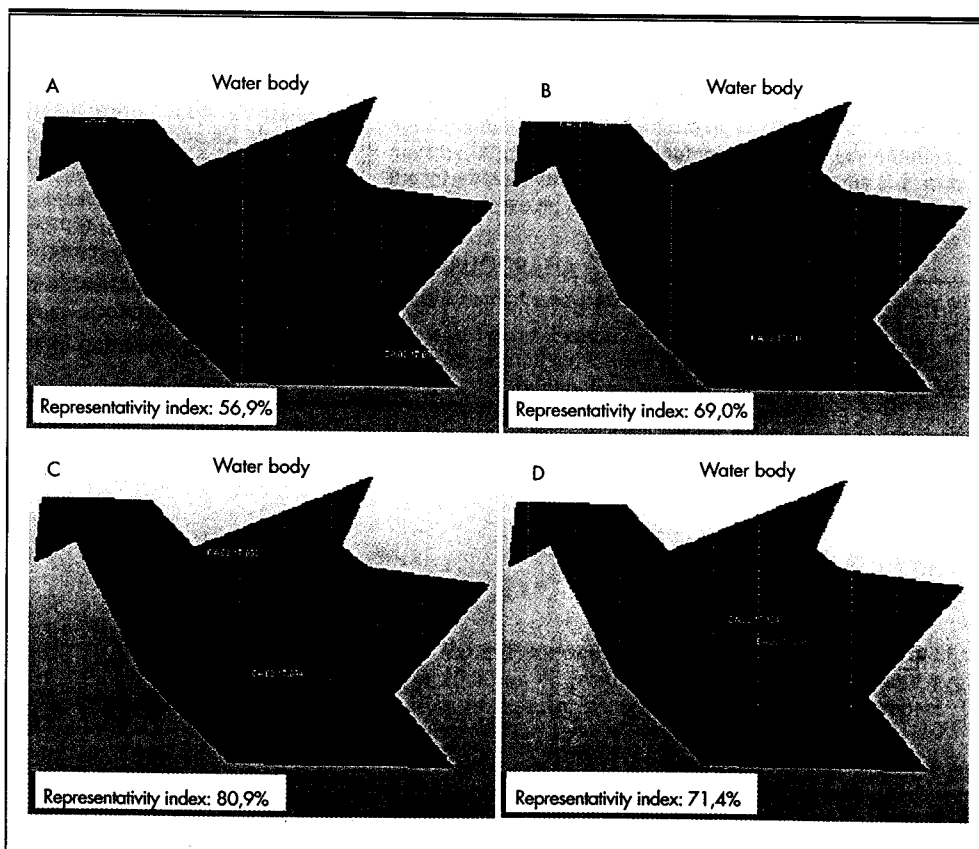


FIGURA 3. Variación del Índice de Representatividad en función de la localización espacial de los puntos de control dispuestos: dos puntos de control distribuidos según se indica en la Tabla 4.

Como se puede observar en la Figura 3, el *Índice de Representatividad* aumenta al situarse ambos puntos en zonas menos periféricas de la Unidad (caso C), ya que se minimiza la distancia mínima media desde cualquier punto de la Unidad y el punto de control más cercano, pero cuando los puntos se encuentra muy próximos, a pesar de encontrarse en la zona central de la Unidad, se reduce el valor del *Índice* (caso D).

Según los criterios del modelo, se considera que la red es suficientemente homogénea cuando el valor del *Índice de Representatividad* obtenido es igual a superior al 80%. Sólo el caso C cumple este criterio (80,9%).

En el apartado anterior, el caso D representa un valor óptimo del 91,8% (ver Figura 2 D). Al introducir un punto de control adicional, el Índice se reduce hasta el 71,4% (ver Figura 3 D) y aparentemente reduce la representatividad espacial de la red de control. Esto se debe a la aplicación del algoritmo de cálculo.

2.2.3. RELACIÓN CON EL FUNCIONAMIENTO HIDROGEOLÓGICO

En último lugar se van a analizar los resultados del *Índice de Representatividad* en función a las características propias de la masa de agua y su funcionamiento hidrogeológico. La Unidad Hidrogeológica que se va a utilizar es la **02.16, ALMAZAN SUR**, una Unidad de unos 1.300 Km² de superficie poligonal con un 65% de superficie aflorante carbonatada y un 25% de superficie aflorante detrítica.

El espesor de los materiales calcáreos oscila entre los 100 y 300 metros, en general plegados, apareciendo una tectónica de fallas que da origen al levantamiento y hundimiento de bloques que regulan en parte el funcionamiento hidráulico.

Las recargas al acuífero se realizan a través de la infiltración del agua de lluvia que cae sobre los afloramientos carbonatados y en algunos perdederos⁵ localizados en los cauces de los ríos de la zona.

Las descargas se realizan mediante manantiales a los ríos Escalote, Talegonos, Caracena y Pedro ó directamente al río Duero, a través de fuentes situadas en sus orillas o en el fondo del cauce (flujo subterráneo principal). En la Figura 4 B se representan los flujos dominantes de forma esquemática, donde se puede observar la existencia de

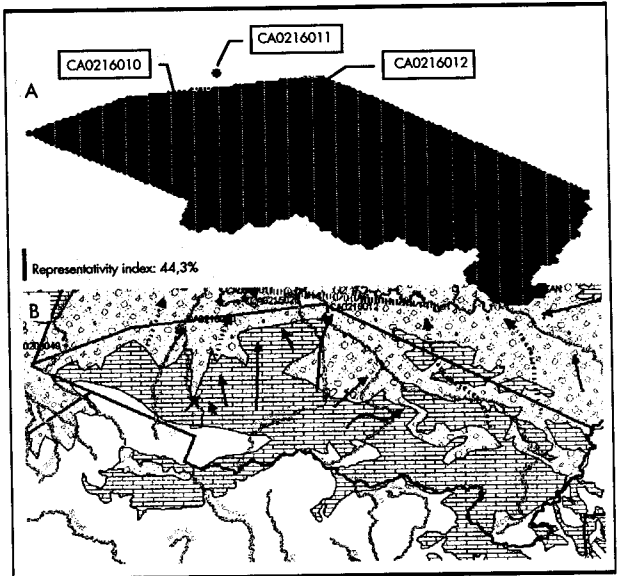


FIGURA 4. Puntos de la red actual de Control y esquema de funcionamiento de la Unidad 02.16. A → distribución espacial de los puntos de control e índice de Representatividad. B → modelo conceptual simple de funcionamiento hidrogeológico de la Unidad.

transferencias laterales a la UNIDAD 02.15 Cubeta de Almazán.

Los puntos de control de la red actual se encuentran dispuestos de la siguiente forma (ver Figura 4 A y B):

- El CA0216010, es un punto representativo (sondeo) de la calidad del agua del sector intermedio del acuífero calcáreo que circula hacia Gormaz, como transferencia lateral. Uso: abastecimiento.
- El CA0216011 representa un punto de descarga (manantial) de los acuíferos jurásicos y cretácicos, cuyo flujo proviene del sur, fundamentalmente. Uso: piscifactoría y riego aguas abajo.
- El punto CA0216012 representa la calidad del agua (manantial) de flujos de recorridos más o menos locales.
- Los flujos profundos están controlados a través de diversos sondeos y manantiales en la UNIDAD 02.15.

⁵ Río perdedor. El cauce del río, y las características hidrogeológicas, favorecen el proceso de recarga del acuífero.

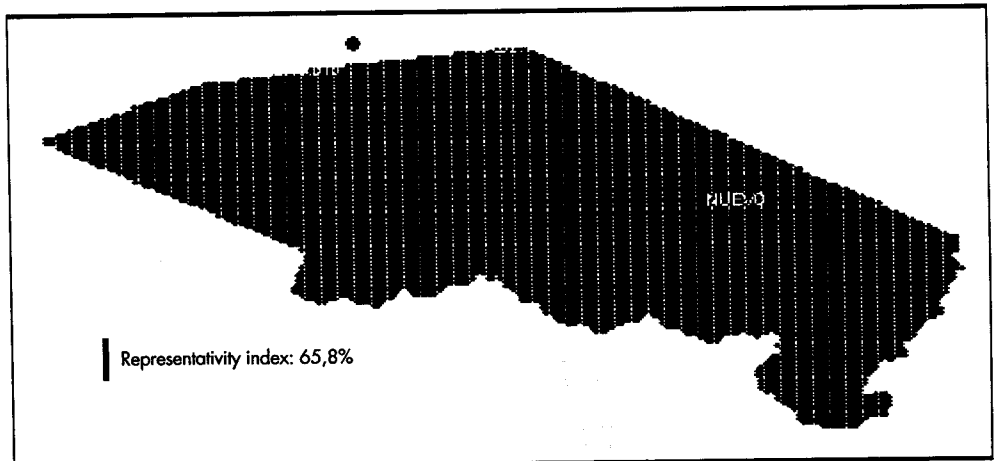


FIGURA 5. Variación del Índice de Representatividad al incorporar un nuevo punto (teórico) a la red actual.

El *Índice de Representatividad* de la red actual (44,3%) en esta Unidad, compuesta por tres puntos de control, es inferior al límite (80%) que establece el Grupo 2.8 para determinar que la red es homogénea. Sin embargo, la red aporta información relativa a descargas de flujos locales y otros flujos de mayor recorrido, así como de las transferencias laterales existentes entre la Unidad 02.16 y la Unidad 02.15.

La red actual está muy focalizada en el sector noroeste de la Unidad. Si se añadiese un punto de control en la zona sureste (ver Figura 5), el valor del Índice se incrementaría (pasando de 44,3% a 65,8%), obteniéndose un resultado aparentemente mejor, al margen del interés que pueda tener situar un punto de control en esa zona.

3. CONCLUSIONES

Tras el análisis realizado de la herramienta desarrollada por el Grupo 2.8, se puede concluir que:

- Los mejores resultados para el valor del Índice se han obtenido cuando se dispone de un único punto de control, situado en el centro de gravedad de la zona a controlar⁶.
- Desde un punto de vista hidrogeológico, la información obtenida a partir de un único punto de control, en una Unidad de más de 7.500 Km² como es la Unidad 02.17, no es representativa del estado químico del conjunto de la Unidad⁷.
- El *Índice de Representatividad* se obtiene para una situación estática, y dificulta incorporar nuevos puntos a los ya existentes.
- Con el fin de maximizar el *Índice de Representatividad*, cuando se dispone de dos puntos de control en una Unidad, estos se deben situar en zonas equidistantes del centro⁸, de los límites de la Unidad y de ellos mismos.
- Desde un punto de vista hidrogeológico, la información obtenida a partir de dos únicos punto de control, en una Unidad de más de 7.500 Km² como es la Unidad 02.17, no es representativa⁹ del estado químico del conjunto de la Unidad.
- Cuando se disponen dos o más puntos, se maximiza el valor del Índice de Representatividad, cuando estos se encuentran uniformemente distribuidos dentro de la zona a controlar, equidistantes del centro de gravedad, de los límites de la Unidad y de ellos mismos.
- El modelo tiende a dar mayor valor a las distribuciones homogéneas de puntos, por lo que para obtener valores

6 Con el fin de maximizar el Índice de Representatividad, cuando se dispone de un único punto de control en una Unidad, este debe disponerse en una zona central.

7 La información obtenida a partir de un punto de control situado en la zona central (localización óptima del punto, Figura 2, caso D), donde se han identificado inversiones locales de flujo debido a la explotación realizada de los recursos disponibles, no puede resultar representativa de las condiciones químicas en las zonas de recarga o descarga, ni de las condiciones existentes en otras zonas de la Unidad.

8 Sensibilidad al incremento de puntos de control.

9 La información obtenida a partir de dos puntos, tal como están situados en el caso C, no resulta representativa del conjunto de la Unidad, ya que no permite obtener información a cerca de la zona de recarga ni de las transferencias laterales desde la Unidad Hidrogeológica 02.18 en el Sureste de la Unidad, ni de las características del agua en la zona Oeste de la Unidad situada "aguas abajo" de los puntos de control seleccionados.

altos del Índice en situaciones en las que se sitúan puntos para controlar las transferencias laterales o las zonas de descarga de la Unidad, situadas habitualmente en los márgenes de la misma, es necesario disponer de un número elevado de puntos, que puede no estar justificado por el tamaño de la Unidad en cuestión o su interés dentro del conjunto de Unidades de la Cuenca.

- El algoritmo empleado por la herramienta depende de el número de puntos de control y el tamaño y forma de la zona a controlar, sin tener en cuenta:
 - las características propias de la Unidad Hidrogeológica (tipo de acuífero, profundidad del nivel freático, litología, subsectores, etc.),
 - el funcionamiento hidrogeológico de la Unidad (áreas de recarga y descarga, conexión con otras Unidades, tipo de flujo, etc.),
 - las presiones potenciales o reales existentes (densidad de población, uso del suelo, etc.) en la zona, o
 - el aprovechamiento realizado (bombeo para riego, abastecimiento a poblaciones, etc.) de los recursos disponibles.
- La aproximación propuesta por la herramienta puede resultar adecuada para el seguimiento de masas de agua con formas regulares (proyección superficial) y gran homogeneidad estructural y funcional, pero no parece la mejor opción para la definición de una red de control para la zona analizada (cuenca del Duero), que debería ser elaborada en base a criterios hidrogeológicos.

Se concluye que se deben definir métodos válidos, basados en **criterios hidrogeológicos para determinar la densidad de la red** de control en cada masa de agua identificada y la posterior **ubicación de los puntos de control**.

El *Índice de Representatividad* puede ser utilizado como indicador de la distribución espacial de los puntos de control, pero no como elemento de decisión para la ubicación de los puntos o selección de diversas alternativas definidas en base a criterios hidrogeológicos, y siempre teniendo en cuenta el objeto y características de cada punto de control y la información obtenida a partir de la red.

4. BIBLIOGRAFÍA

"Carrying forward the Common Implementation Strategy for the Water Framework Directive -Progress and work Programme for 2003 and 2004- as agreed by the Water Directors". Common Implementation Strategy for the Water Framework Directive (200/60/CE).June 2003

Directiva 2000/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de octubre de 2000, por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas.

"Directiva 2000/60/CE. Análisis de trasposición y procedimientos de desarrollos". Ministerio de Medio Ambiente, abril 2003.

EU Water Framework Directive: Statistical aspects of the identification of groundwater pollution trends, and aggregation of monitoring results. WFD-GW Final report. December 2001.

"Realización de estudios relativos a la calidad de las aguas subterráneas. Proyecto redes de vigilancia: Criterios generales." Centro de Estudios Hidrográficos - CEDEX (dir. Alonso García, A.) para la DGOHCA, 2004.