

Indicadores e índices sobre el estado cuantitativo de las aguas subterráneas en función del nivel piezométrico. Aplicación al acuífero de la Sierra de Estepa

Pernía Llera, J. M. ¹; Lambán Jiménez, L. J. ²; Molinero García, A. ¹

¹ Instituto Geológico y Minero de España. Ríos Rosas, 23, Madrid. E-mail: jm.pernia@igme.es

² Oficina del IGME en Zaragoza.

RESUMEN

Para valorar la influencia de la explotación de agua subterránea y a su vez detectar las variaciones naturales y estacionales de un acuífero con el fin de observar la sostenibilidad del recurso, resulta necesario desarrollar índices o indicadores que lo permitan. Este trabajo pretende ser una herramienta para medir y definir el estado cuantitativo de las aguas subterráneas y posibilitar comparaciones entre diferentes masas de agua subterránea. La comparación de los valores numéricos de datos hidrogeológicos entre distintas masas de agua subterránea precisa que los datos sean homogéneos, tanto en la metodología seguida como en la referencia temporal de las medidas de los niveles piezométricos. En esta comunicación se describe la metodología a seguir para obtener finalmente un perfil del estado cuantitativo que analiza la tendencia y evalúa la situación actual de una masa de agua subterránea, mediante una serie de indicadores e índices tanto numéricos como gráficos. Se aplica la metodología propuesta al acuífero de Sierra Estepa, que por su amplio conocimiento y particulares características de funcionamiento hidrodinámico, resulta idóneo para ello.

Palabras clave: indicadores, índices, niveles piezométricos, aguas subterráneas.

ANTECEDENTES

El establecimiento de índices e indicadores del estado de las aguas subterráneas, tanto en sus aspectos de cantidad como de calidad, es básico para poder evaluar las situaciones presentes y efectuar un seguimiento y control de las aguas subterráneas. Estos indicadores permitirán de una manera más rápida efectuar el seguimiento del estado de las aguas subterráneas o las desviaciones que se produzcan sobre planteamientos tales como la planificación hidrológica, cambio climático, situaciones de sequía y otros aspectos relacionados.

La correcta definición de estos indicadores resulta esencial dado que se encuentran orientados hacia la gestión y planificación de los recursos hídricos subterráneos, teniendo en cuenta aspectos sociales (disponibilidad y uso), económicos (desarrollo, captación y protección) y ambientales (descenso de niveles y contaminación). La aplicación de indicadores se ha realizado con anterioridad por Pernía y Corral (2000) para los informes de coyuntura del Ministerio de Medio Ambiente. También se han aplicado por Pernía et al. (2000) en las redes de control de las aguas subterráneas en la Cuenca del Júcar. Actualmente se están aplicando en los acuíferos de Sierra Estepa y de la Mancha Oriental por los autores de esta comunicación.

El Instituto Geológico y Minero de España está colaborando en el desarrollo de una serie de indicadores sobre el estado cuantitativo y cualitativo de las aguas subterráneas para el *"Groundwater Indicators Working Group"*, GIWG (UNESCO, IAEA, IAH, UNECE). Por ello, ha propuesto una metodología que tiene en cuenta tanto los indicadores previamente establecidos por el IGME como los inicialmente propuestos por el GIWG (Lambán y Pernía, 2004a). Los indicadores propuestos en este estudio en relación con el estado cuantitativo fueron: recursos hídricos subterráneos por habitante, recarga respecto a las salidas totales de agua subterránea, salidas totales respecto a recursos disponibles de agua subterránea y variación en el almacenamiento de agua subterránea.

En la actualidad se están haciendo públicos los primeros resultados de los trabajos sobre la aplicación de los indicadores propuestos. De este modo, se han definido y aplicado por Pernía y Lambán (2004) para el informe *"World Water Development Report"* dentro del programa *"World Water Assessment Programme"* (de próxima publicación). Además, la definición de los indicadores del estado cualitativo se presentaron como anticipo de la metodología en el VII Simposio de Hidrogeología en Zaragoza. (Lambán y Pernía, 2004b).

CONCEPTO DE INDICADOR, ÍNDICE Y PERFIL

Desde el punto de vista de su funcionalidad un indicador es un instrumento útil para medir variaciones y posibilitar comparaciones. Para ello, todo indicador intenta reducir un número de factores diferentes a términos comparables entre sí, sustituyendo estos términos parciales por uno que represente a todo el conjunto. Su objetivo fundamental es que informe de una manera clara, sencilla y rápida, permitiendo así el desarrollo de nuevas acciones y evaluar los efectos de planes y proyectos políticos.

Cabe destacar la definición propuesta por el Ministerio de Medio Ambiente (MIMAM, 1996), en la que un *indicador es una variable que ha sido socialmente dotada de un significado añadido al derivado de su propia configuración científica, con el fin de reflejar de forma sintética una preocupación social con respecto al medio ambiente e insertarla coherentemente en el proceso de toma de decisiones.*

La optimización en los indicadores debe permitir que con el menor número de ellos se recoja la mayor información posible. Sin embargo, otros aspectos como la indefinición de los parámetros, la incertidumbre sobre la calidad de las estadísticas y las dificultades técnicas y metodológicas para su elaboración, también han sido aspectos decisivos para intentar utilizar el menor número posible de indicadores. (Pernía y Alonso, 2004)

Un *índice* es una expresión numérica adimensional y se obtiene por medio de la combinación de varias variables a las que se les asigna un valor numérico y un factor de ponderación. Hablamos de *perfil* cuando

se seleccionan varios indicadores con un fin y dan cuenta del estado para un sistema, una política, un problema o un espacio territorial determinado. (Pernía y Alonso, 2004)

Los *criterios* más utilizados para la *selección* de un indicador son: que tenga validez científica, representatividad, fiabilidad y relevancia, que sea sensible a los cambios, predictivo, comparable y comprensible, que tenga cobertura geográfica y buena relación coste-eficiencia y por último, que proponga metas a alcanzar comparables con la situación actual.

INDICADORES SOBRE EL ESTADO CUANTITATIVO DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

En el Instituto Geológico y Minero de España se ha desarrollado y aplicado en los Informes de Coyuntura del MIMAM (Pernía y Corral 2000), una serie de índices e indicadores cuyo conjunto integran lo que se denomina Perfil de Llenado. Este perfil se calcula a partir de los datos de una serie histórica de piezometría, que tiene que ser lo suficientemente amplia en el tiempo como para reflejar todos los posibles tipos de eventos (periodos de lluvia, sequía, bombeos prolongados, etc.). Por medio de estos datos se obtiene una evolución anual, enmarcada entre las curvas de valores de máximos y mínimos históricos mensuales de todos los años que componen la serie considerada. Esta representación nos permite obtener con la aplicación de una fórmula, el valor del índice de llenado, valor numérico que permite establecer comparaciones entre acuíferos o partes de un mismo acuífero. Con la representación gráfica de valores también se puede comprobar si la situación de llenado es mayor, menor o igual que en una época anterior, lo cual permite efectuar una representación cartográfica de la situación de los acuíferos.

Los componentes del Perfil de Llenado (Pernía y Alonso, 2004) son:

- a) *Evolución gráfica de los niveles piezométricos*, que se efectúa para cada piezómetro de los que componen la red de control. Se puede extrapolar a toda la unidad hidrogeológica si se tienen puntos de control suficientes y representativos, por medio de una media geométrica.
- b) *Tendencia a medio o largo plazo*: mediante una recta de regresión se calculan las tendencias normalmente a cinco o diez años o tomando el número total de años que se consideren en la serie histórica.
- c) *Representación de la evolución anual entre máximos y mínimos históricos*: de la información obtenida mediante esta representación se calcula el índice de llenado para un momento dado.
- d) *Índice de llenado*: representa la situación que ocupa la evolución anual en un mes entre las oscilaciones máximas y mínimas. Se define como nivel de llenado en una fecha determinada respecto a un periodo histórico de años, al cociente entre el incremento del nivel medido respecto al nivel mínimo histórico y la diferencia de los valores máximos y mínimos históricos en dicha fecha (Pernía y Corral, 2000),

$$(N_h)_i = \frac{\Delta NP_i}{(\Delta NP_T)_i} = \frac{NP_i - (NP_{MIN})_i}{(NP_{MAX})_i - (NP_{MIN})_i}$$

donde:

- h, es el periodo histórico (años)
 i, es la fecha (mes) en que se efectúa la medida

NP_t es el nivel piezométrico medido en el mes
 NP_{MAX} es el nivel piezométrico máximo de la fecha en el periodo histórico considerado
 NP_{MIN} es el nivel piezométrico mínimo de la fecha en el periodo histórico considerado.

e) *Representaciones cartográficas de la variación de llenado*, que indican espacialmente la situación de llenado en los distintos acuíferos o secciones de un mismo acuífero.

La aplicación de índices e indicadores por el IGME se ha realizado siempre en los puntos de una red piezométrica optimizada en la que efectuaba la toma de datos de una manera sistemática y con la misma periodicidad. Actualmente se pretende desarrollar una metodología que sirva para cualquier tipo de red de toma de datos, para lo cual debe realizarse un análisis de los datos para validar aquellos que se utilicen en el estudio y con los que se efectúe su evaluación en el tiempo.

El funcionamiento hidrodinámico de las masas de agua subterránea debe conocerse al máximo nivel de detalle posible, para lo cual se representa toda la información disponible sobre la evolución de niveles piezométricos. Si refleja sectores de comportamiento hidrodinámico diferente, se deben analizar por separado, y comparar las distintas zonas de las masas de agua subterránea. Se integrarán todos los piezómetros representativos para dar una única evolución de niveles de las masas de agua subterránea tomando el valor de la media o mediana de los piezómetros seleccionados. La mediana tiene ventajas sobre la media como medida descriptiva, al no verse afectada por observaciones extremas. Asimismo debe tenerse muy en cuenta que para dicha evolución deben descartarse no solo aquellos piezómetros que presenten anomalías o errores de medida, sino también aquellos que no representen la misma serie histórica y además ésta debe ser lo más completa posible. La evolución de los niveles piezométricos resultante se compara con datos de precipitaciones y de caudales de cursos superficiales para analizar su relación y respuesta.

Una vez tenido en cuenta lo anterior, se aplican índices estadísticos para observar la evolución de los niveles de las masas de agua subterránea dentro de un periodo histórico determinado: media, mediana, desviación típica, máximo, mínimo, diagramas de frecuencias, y evolución de los percentiles de 25%, 50%, y 75%. Esto nos dará información sobre la estabilidad de los niveles en la evolución del comportamiento.

Posteriormente, es necesario estudiar la tendencia para conocer si los niveles del acuífero ascienden o por el contrario tienden a descender con el tiempo. Para evaluar la tendencia de los niveles a medio y largo plazo en el acuífero pueden aplicarse dos tipos de indicadores estadísticos. Además del indicador numérico que nos da la regresión lineal sobre la evolución de los niveles, otro indicador gráfico que aporta información intuitiva son la representación de la media móvil.

Para obtener información sobre el estado cuantitativo actual de las masas de agua subterránea puede aplicarse un indicador gráfico que muestre la situación de niveles correspondiente a los valores del último año con respecto a la media del periodo histórico, pero con más detalle la representación de la evolución anual de la mediana entre máximos y mínimos históricos proporciona asimismo información gráfica sobre la situación actual respecto al periodo histórico considerado. Por medio de esta representación se obtiene un índice que expresa la situación piezométrica actual, es decir, el índice de llenado para las masas de agua subterránea consideradas.

APLICACIÓN AL ACUÍFERO DE LA SIERRA DE ESTEPA

Síntesis hidrogeológica de Sierra Estepa

La siguiente síntesis está basada en el trabajo realizado por Vazquez Mora, M., *et al*, (2001) y por Lambán y Pernía, (2004a):

La comarca de Estepa está situada en la región central de Andalucía, en la provincia de Sevilla, al sur de España (Figura 1). Presenta una extensión de 30 km² y cotas comprendidas entre 500 m y 845 m. La comarca está poblada por unos 50.000 habitantes y su actividad económica principal es la agricultura, especialmente el olivar, para producción de aceite. Posee un clima árido y debido a que la escasez de recursos hídricos superficiales limita el desarrollo agrícola, se recurre a las aguas subterráneas. La principal fuente de suministro de agua de la comarca es el acuífero de la sierra de Estepa.

Pertenece al dominio Subbético Externo de la Cordillera Bética y se trata de un acuífero carbonatado con una superficie aflorante de 24 km² de carácter libre predominante. Su disposición estructural responde a un domo anticlinal jurásico cabalgante hacia el N. Está constituido fundamentalmente por los afloramientos calcáreo-dolomíticos del Jurásico y está limitado en profundidad por la presencia de un substrato impermeable de arcillas y yesos del Trías y lateralmente por las margas cretácicas y terciarias que también son impermeables. Presenta un flujo regional en sentido SO y E-SE.

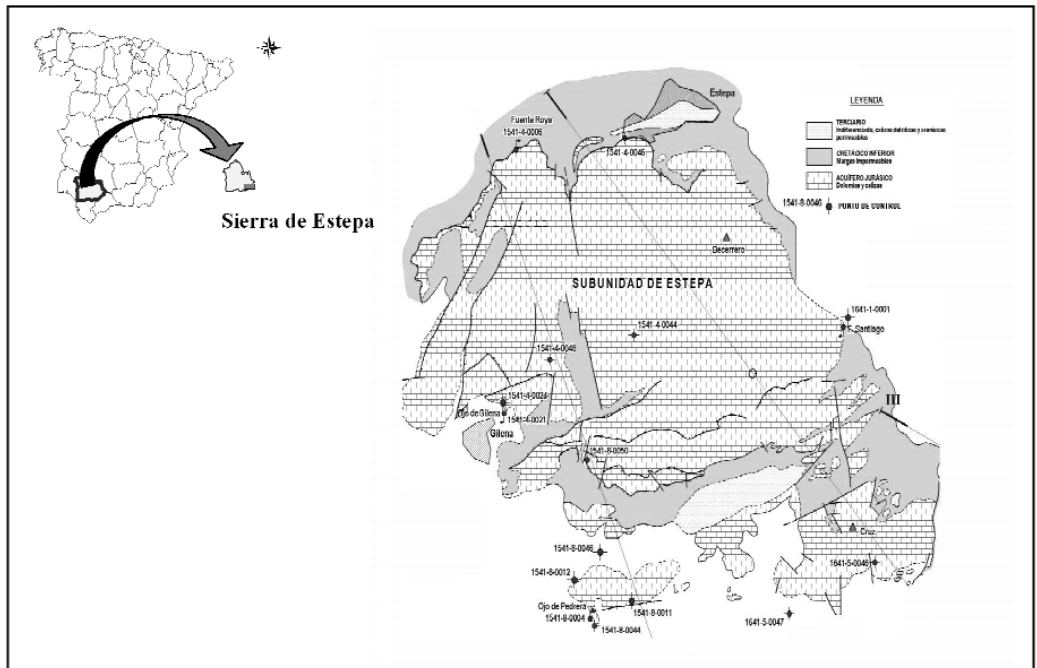


Figura 1. Situación geográfica y redes de control. (Modificado de Sergio Martos)

El funcionamiento del acuífero de Sierra de Estepa está dominado por fenómenos kársticos. La principal fuente de recarga es la infiltración de agua de lluvia y existen zonas con manifestaciones de lapiares y dolinas que implican áreas de infiltración preferente. Análogamente, en lo que respecta a salidas del sistema, son los manantiales, actualmente regulados con obras de captación para abastecimiento urbano, los que en régimen natural, representan la mayor parte de salidas del sistema. La cota piezométrica actual oscila entre los 463 y 477 m s.n.m. (profundidad entre 1,5 m y 91 m.). Los usos del agua subterránea son abastecimiento urbano y regadío. Se abastece a 50.000 habitantes, lo que supone una demanda de 400 m³ /h y riegan 350 ha de olivar con una dotación anual de 2000 m³/ha.

Indicadores del estado cuantitativo

Siguiendo la metodología anteriormente propuesta se han representado conjuntamente los puntos en los que existen datos periódicos de niveles desde al menos los últimos 5 años hasta la fecha del presente estudio (1997-2004). No existen cursos de agua superficial ni datos históricos de manantiales en régimen no influenciado que permitan tener en cuenta además la evolución en los caudales.

La evolución gráfica de los niveles piezométricos desde el año 1976, indica una evolución similar en todos los puntos de control, lo que parece poner de manifiesto un funcionamiento hidrodinámico relacionado con un almacenamiento y comportamiento único independientemente del área o sector de acuífero considerado. Asimismo, si se comparan estos datos con la precipitación, se observa una buena correlación y una rápida recuperación en los niveles del acuífero después de cada episodio de lluvias (Figura 2).

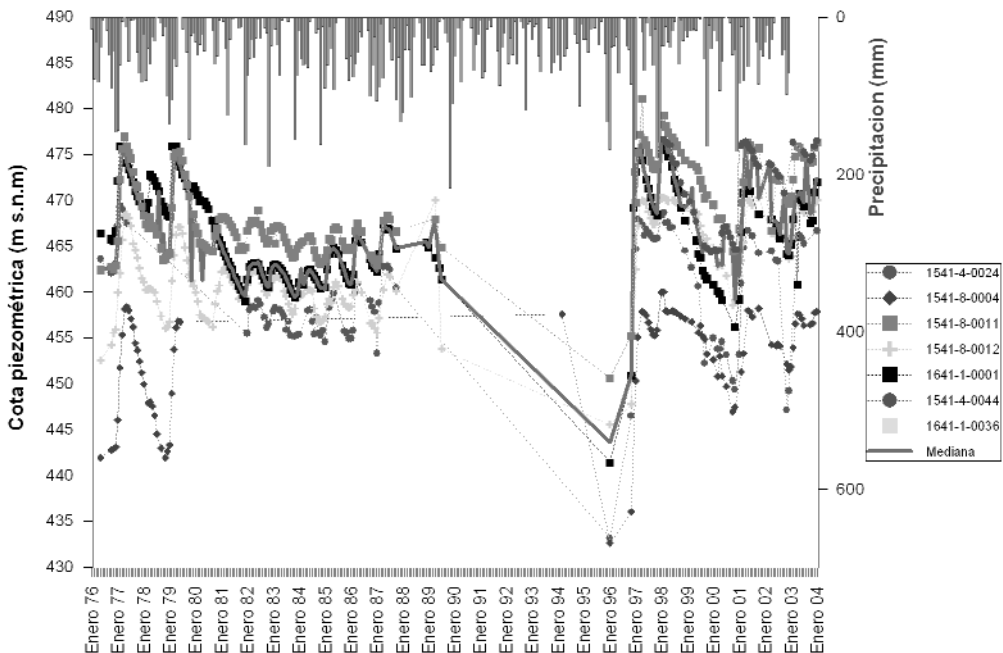


Figura 2. Cotas piezométricas y evolución de la mediana

Se han aplicado índices estadísticos para la evolución de la mediana de los niveles piezométricos en los periodos 1976-2004, 1997-2004 y 1999-2004. Los resultados obtenidos se han considerado como representativos de todo el acuífero, dado el comportamiento similar de todos los piezómetros y la escasa diferencia existente en la cota piezométrica en las diversas zonas del acuífero (Tabla1).

Tabla 1. Índices estadísticos de los niveles del acuífero.

Parámetro	1976-2004	1997-2004	1999-2004 (5años)
Media	466,34	469,37	467,99
Mediana	465,43	469,52	467,67
Máximo	476,60	476,60	476,38
Mínimo	443,62	459,18	459,18
Desviación típica	4,98	4,12	3,82

Como confirmación a lo observado mediante estos índices numéricos, la figura 3 muestra que para los periodos 1976-2004, 1997-2004 y 1999-2004, no hay grandes variaciones en los niveles y que durante los tres periodos los niveles se encontraban entre 460 m y 475 m., rasgo que se verifica también en la figura 4, que muestra para el periodo 1997-2004, como los niveles se encuentran siempre entre ambos valores en toda la evolución temporal.

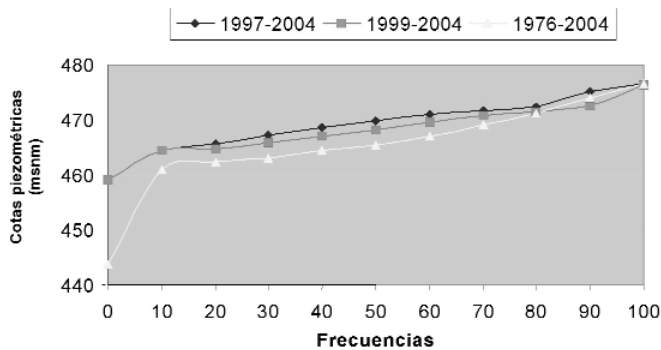


Figura 3. Diagramas de frecuencias acumuladas en distintos periodos

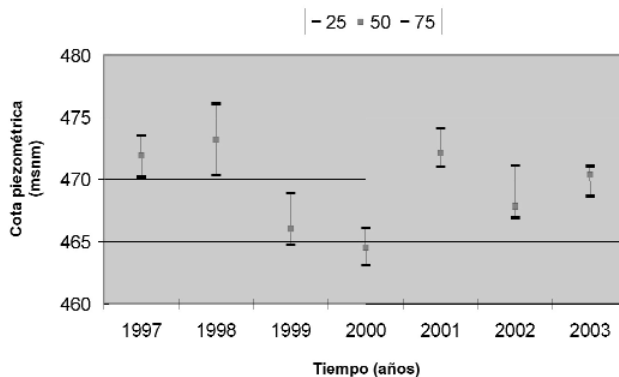


Fig 4. Evolución temporal de los percentiles en el periodo 1997-2004

En consecuencia, del análisis de la evolución de los niveles, se desprende que no existen diferencias significativas, lo que indica una situación piezométrica sin grandes variaciones, independientemente del periodo de medidas considerado.

En cuanto a la tendencia se ha aplicado una regresión lineal para los periodos 1997-2004 y 1999-2004 obteniéndose una pendiente para la recta de ajuste comprendida entre -0,0012 y 0,0028 respectivamente. La tendencia ligeramente negativa para los niveles de 1997-2004 y ligeramente positiva en el periodo 1999-2004, indica una leve recuperación de los niveles con el tiempo.

Otro de los métodos utilizado para determinar la tendencia ha sido la media móvil de orden doce (línea continua en la figura 5). Para el periodo 1997-2004, la media móvil se encuentra comprendida entre los 465 y 475 m, observándose una tendencia inicial negativa en los niveles y de acuerdo con lo dicho en el párrafo anterior, una leve recuperación de niveles a partir del año 2000.

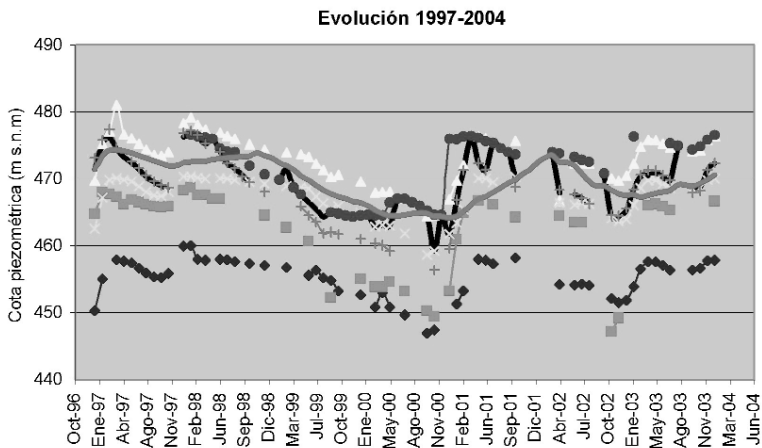


Figura 5. Media móvil correspondiente a los valores de la mediana

El análisis de la situación actual se realiza teniendo en cuenta los últimos datos disponibles, correspondientes tanto al año 2003 como a los niveles medidos en enero de 2004. En el diagrama de frecuencias obtenido a partir de la diferencia entre los valores medidos en 2003 con respecto al valor medio 1997-2003, una vez más se observa una situación estable en los niveles piezométricos, apreciándose cómo los percentiles comprendidos entre 10% y 90% se encuentran siempre ± 2 m respecto al valor medio (Figura 6), lo que indica que la situación actual es similar a la del periodo considerado, al estar la mayoría de los valores de niveles en 2003 próximos a la media de los valores de los niveles para el periodo 1997 –2003.

En la figura 7, se muestra un gráfico de comparación entre la media, mediana, mínimo, máximo y desviación correspondientes a la mediana para el periodo 1997-2003 y la mediana para el año 2003. Este gráfico pone de manifiesto una situación próxima entre los valores correspondientes a 2003 y los valores medios y medianos obtenidos para todo el periodo, a excepción de los datos relativos al mes de agosto, donde los valores medidos superan ligeramente la desviación, situándose unos cinco metros por encima de la media y coincidiendo con los valores máximos registrados hasta el momento.

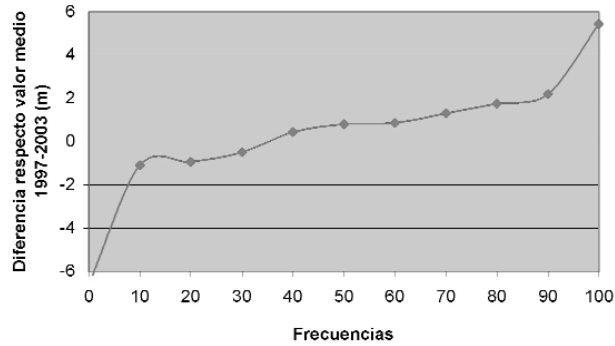


Figura 6. Diagrama de frecuencias acumuladas correspondiente a la diferencia entre los valores medidos en 2003 respecto al valor medio para el periodo 1997-2003

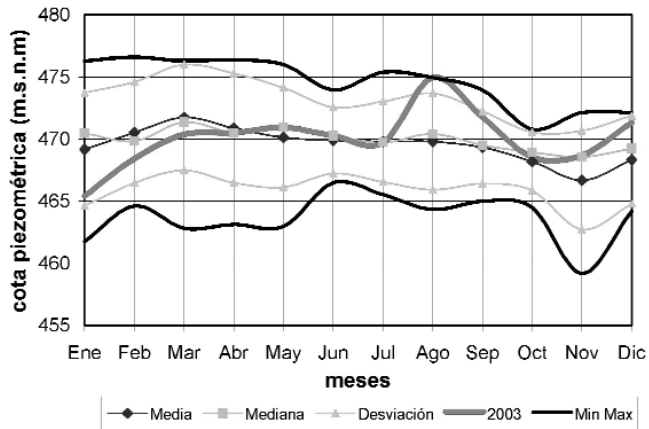


Figura 7. Evolución piezométrica anual (2003) entre estadísticos del periodo 1997-2003

De acuerdo con las definiciones dadas anteriormente se han calculado los índices de llenado o de evolución piezométrica aplicados a la evolución de la mediana de los periodos que comprenden los años 1997-2004 y 1999-2004. Estos índices son de 0,73 y de 1 respectivamente, lo que indica una situación de recuperación del nivel, incluso de máximo histórico si el análisis se centra en los últimos cinco años.

Los resultados obtenidos así como el resto de índices obtenidos hasta el momento se presentan en la tabla 2.

Tabla 2. Índices obtenidos en Sierra de Estepa relacionados con el perfil de llenado

	Parámetros e índices	1976-2004	1997-2004	1999-2004
Parámetros estadísticos	Media	466,34	469,37	467,99
	Mediana	465,43	469,52	467,67
	Máximo	476,60	476,60	476,38
	Mínimo	443,62	459,18	459,18
	Desviación típica	4,98	4,12	3,82
Índices	Índice de tendencia (regresión lineal)		-0,0012	0,0028
	Índice de llenado de la mediana		0,73	1,00

La integración de todos los indicadores e índices que se presentan y su análisis conjunto permite concluir que en el acuífero Sierra de Estepa se produce un uso sostenible del agua subterránea en relación a la cantidad de los recursos disponibles. Dicha sostenibilidad queda reflejada tanto en el propio índice de llenado aplicado a la evolución de la mediana de los niveles piezométricos como en el resto de indicadores gráficos analizados.

Por último cabe destacar que el caso de la Sierra de Estepa ofrece unas condiciones idóneas de aplicación de esta metodología de una manera eficaz y sencilla, al ser un acuífero que funciona de manera única en su conjunto, quedando muy claro en la representación de la evolución de los niveles de todos los piezómetros.

CONCLUSIÓN

Se propone la utilización de indicadores gráficos que permitan analizar el estado o la situación del acuífero y asimismo se propone el cálculo de índices numéricos que permitan cuantificar la situación actual y hacer un posterior seguimiento cuantitativo de las evoluciones de las situaciones futuras. En el caso de la Sierra de Estepa éstos se basan principalmente en el tratamiento de los datos del nivel de las aguas subterráneas. Se precisa de una serie de piezómetros representativos de las masas de agua subterránea con una serie histórica de datos significativos. Consecuentemente, se definen los siguientes índices e indicadores:

- a. Indicadores gráficos de evolución de niveles
- b. Índices numéricos y gráficos de tendencia
- c. Indicadores gráficos de situación piezométrica actual
- d. Índice de llenado de las masas de agua subterránea

La aplicabilidad de estos indicadores e índices es muy amplia destacándose sobre todas el apoyo al establecimiento de buenas políticas de gestión y planificación, por lo que resulta imprescindible la correcta definición de estos indicadores y conviene no olvidar que esta metodología debe ser adaptada a cada masa de agua subterránea según su comportamiento hidrodinámico.

Por último, aunque la presente comunicación trate únicamente los indicadores sobre el estado cuantitativo, es primordial trabajar con la premisa de que la sostenibilidad del recurso hídrico no debe definirse únicamente por el estado cuantitativo, sino que es igualmente importante contar con el estado cualitativo y que ambos aspectos no deben separarse a la hora de evaluar el estado de las aguas subterráneas.

AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren expresar su agradecimiento a los compañeros de la oficina de proyectos de Sevilla que han colaborado y facilitado información del acuífero de la Sierra de Estepa; el conocimiento y experiencia de Miguel Martín Machuca, la aportación de los datos históricos por Ángel Díaz Pérez, la actualización del conocimiento de Sergio Martos Rosillo y sus explicaciones en el campo, han enriquecido los trabajos que sirven de base para la presente comunicación.

REFERENCIAS

- Groundwater Indicators Working Group, 2004. Development of groundwater indicators for second edition of the World Water Development Report. Third Version (Draft). Paris, Abril 2004.
- Lambán, L.J., Pernía, J.M., 2004a. Indicadores sobre el estado cuantitativo y cualitativo de las aguas subterráneas: aplicación en Sierra de Estepa (Sevilla, España). Informe IGME.
- Lambán, L.J., Pernía, J.M., 2004b. Propuesta de indicadores sobre el estado cualitativo de las aguas subterráneas: aplicación al acuífero de Sierra de Estepa. *Hidrogeología y Recursos Hidráulicos* XXVI: 337-347. Zaragoza.
- MIMAM, 1996. Indicadores Ambientales. Una propuesta para España. Serie monografías. I.S.B.N.:84-498-0244-X.
- MIMAM, 1999 y 2000. Informe de Coyuntura de Ministerio de Medio Ambiente. Publicación mensual. I.S.S.N.:1139-7950.
- Pernía, J.M., Alonso, B., 2004. Análisis de los índices e indicadores utilizados para definir el estado de los acuíferos. Informe IGME.
- Pernía, J.M., Corral, M.M., 2000. Llenado de los acuíferos. Propuesta de un indicador. V Congreso Geológico de España. Alicante. *Geotemas* volumen 2: 111-114.
- Pernía, J.M., Ferrer, F.J., Corral M.M., López J., García O., Serrano F., Mejías M., Abolafia de Llanos M., 2000. Redes de control "C.H.J. 2000" de las Aguas Subterráneas en la Cuenca del Júcar. Llenado de los acuíferos y calidad de las aguas subterráneas. IGME- CHJ.
- Pernía, J.M., Lambán, L.J., 2004. Groundwater Indicators in Sierra Estepa (Seville, Spain). *Water for People, Water for Life. The United Nations World Water Development Report (WWDR II)*.
- Vázquez Mora, M., Martín Machuca, M., Díaz Pérez, A., 2001. Respuesta de un acuífero kárstico mediterráneo a un ciclo climático húmedo-seco: el caso de la Sierra de Estepa, Sevilla. *Boletín Geológico y Minero*. Vol. 112-1, 65-76.