

63089

**INDICADORES SOBRE EL ESTADO
CUANTITATIVO Y CUALITATIVO DE LAS
AGUAS SUBTERRÁNEAS:
APLICACIÓN AL ACUÍFERO CARBONATADO DE
LA SIERRA DE ESTEPA (SEVILLA, ESPAÑA).**

AÑO 2005



MINISTERIO
DE EDUCACIÓN
Y CIENCIA



Instituto Geológico
y Minero de España



INFORME	Identificación: H4-003-06
	Fecha: 22-05-2006
TÍTULO: INDICADORES SOBRE EL ESTADO CUANTITATIVO Y CUALITATIVO DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS: APLICACIÓN AL ACUÍFERO CARBONATADO DE LA SIERRA DE ESTEPA (SEVILLA, ESPAÑA).	
PROYECTO: VALORACIÓN NUMÉRICA DEL ESTADO Y EVOLUCIÓN DE LOS ACUÍFEROS. METODOLOGÍA NUMÉRICA PARA DEFINIR LA EVOLUCIÓN DE LOS ACUÍFEROS CON PROBLEMAS INDUCIDOS POR LA EXPLOTACIÓN DE LOS RECURSOS. ASPECTOS CUANTITATIVOS Y DE CALIDAD.	
RESUMEN: <p>Para valorar la influencia de la explotación de agua subterránea y a su vez detectar tanto las variaciones naturales y estacionales de un acuífero como las variaciones en su calidad química, se han desarrollado unos índices e indicadores que miden y definen el estado cuantitativo y cualitativo de las aguas subterráneas. Estos índices e indicadores permiten la comparación entre distintos acuíferos y representan una importante ayuda para la correcta planificación y gestión de los recursos hídricos disponibles.</p> <p>El documento comienza presentando un avance de la metodología y los indicadores propuestos hasta el momento en relación con el estado cuantitativo y cualitativo de las aguas subterráneas, comentando tanto su utilidad y aplicabilidad como sus limitaciones e incertidumbres. A continuación se aplican dichos indicadores al acuífero carbonatado de la Sierra de Estepa (Sevilla, España), para lo cual, previamente se realiza una síntesis hidrogeológica en la que se describen los aspectos principales relacionados con el funcionamiento del acuífero (marco geológico, recarga, descarga, hidrogeoquímica, redes de control y datos disponibles,...).</p> <p>Este informe da continuidad al documento "Análisis de los índices e indicadores utilizados para definir el estado los acuíferos", incluido dentro del mismo proyecto.</p>	
Revisión Nombre: Juan Antonio López Geta Unidad: Hidrogeología y Aguas Subterráneas Fecha:	Autores: Luis Javier Lambán Jiménez (IGME) José María Pernía Llera (IGME) Responsable: José María Pernía Llera

**INDICADORES SOBRE EL ESTADO CUANTITATIVO Y
CUALITATIVO DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS:
APLICACIÓN AL ACUÍFERO CARBONATADO DE LA
SIERRA DE ESTEPA (SEVILLA, ESPAÑA).**

AÑO 2005

El presente informe titulado “**Indicadores sobre el estado cuantitativo y cualitativo de las aguas subterráneas: Aplicación al acuífero carbonatado de La Sierra de Estepa (Sevilla, España)**” forma parte de las actividades del proyecto “*Valoración numérica del estado y evolución de los acuíferos. Metodología numérica para definir la evolución de los acuíferos con problemas inducidos por la explotación de los recursos. Aspectos cuantitativos y de calidad*” En él se presentan los indicadores que se han propuesto al “*Groundwater Indicators Working Group*” (GIWC).

Director del Proyecto:

José María Pernía Llera.

Autores del informe:

Luis Javier Lambán Jiménez.

José María Pernía Llera.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. INDICADORES SOBRE EL ESTADO DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	3
2.1 INDICADORES SOBRE EL ESTADO CUANTITATIVO.....	3
2.1.1. Recursos hídricos subterráneos por habitante.....	3
2.1.2. Recarga respecto a salidas totales de agua subterránea.....	4
2.1.3. Salidas totales respecto a recursos disponibles de agua subterránea.....	5
2.1.4. Variación en el almacenamiento de agua subterránea.....	6
2.2 INDICADORES SOBRE EL ESTADO CUALITATIVO.....	11
2.2.1. Metodología e indicadores propuestos para la calidad del agua subterránea ...	11
2.2.2. Tratamiento requerido según el uso del agua subterránea.....	17
3. APLICACIÓN AL ACUÍFERO CARBONATADO DE LA SIERRA DE ESTEPA	18
3.1 SÍNTESIS HIDROGEOLÓGICA.....	18
3.2 INDICADORES SOBRE EL ESTADO CUANTITATIVO	21
3.3 INDICADORES SOBRE EL ESTADO CUALITATIVO	33
4. CONCLUSIONES.....	41
5. REFERENCIAS.....	42

1. INTRODUCCIÓN

En este documento se presentan los indicadores propuestos al “*Groundwater Indicators Working Group*” (GIWG) sobre el estado cuantitativo y cualitativo de las aguas subterráneas, aplicándolos al acuífero de Sierra de Estepa (Sevilla, España). Para ello se toman como punto de partida los indicadores presentados en el último informe elaborado por el grupo (GIWG, 2004) resultado de las conclusiones de la reunión de trabajo realizada en París, abril 2004, en la que se modificaron los indicadores propuestos en las reuniones anteriores de París (enero 2002) y Viena (junio 2003).

El objeto de estos indicadores consiste en definir, mediante diversas variables y expresiones sintéticas, aspectos específicos sobre el estado cuantitativo y cualitativo de las aguas subterráneas que permitan la comparación entre distintos países así como una correcta planificación y gestión de los recursos hídricos disponibles. Dichos indicadores son adimensionales y se obtienen a partir de datos fácilmente observables y medibles, proporcionando información a cerca del estado natural de los acuíferos así como de las posibles tendencias y/o impactos provocados en el agua subterránea. No obstante, dada la simplicidad de los mismos y el elevado número de variables e incertidumbre asociada a los términos empleados, previamente a su aplicación resulta imprescindible tener un conocimiento suficiente sobre el funcionamiento del acuífero, de lo contrario, pueden cometerse errores significativos. Es decir, la aproximación y definición de dichos indicadores debe abordarse siempre considerando el funcionamiento hidrodinámico y las características específicas de cada acuífero (litología, zonas de recarga y descarga, carácter libre o confinado, sistemas de flujo, procesos de mezcla, procesos hidrogeoquímicos, tiempos de residencia,...) y no basarse exclusivamente en aproximaciones estadísticas. La correcta definición de estos indicadores resulta esencial dado que se encuentran orientados hacia una correcta 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).

El documento comienza presentando un avance de la metodología e indicadores propuestos hasta el momento en relación con el estado cuantitativo y cualitativo de las aguas subterráneas, comentando tanto su utilidad y aplicabilidad como sus limitaciones e

incertidumbres. A continuación se aplican dichos indicadores al acuífero carbonatado de la Sierra de Estepa (Sevilla, España), para lo cual, previamente se realiza una síntesis hidrogeológica en la que se describen los aspectos principales relacionados con el funcionamiento del acuífero (marco geológico, recarga, descarga, hidrogeoquímica, redes de control y datos disponibles,...)

2. INDICADORES SOBRE EL ESTADO DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

Con la finalidad de simplificar y clasificar los diferentes indicadores relativos al estado de las aguas subterráneas, se han diferenciado dos grandes grupos o conjuntos de indicadores según se consideren los aspectos de cantidad o calidad de los recursos hídricos subterráneos. No obstante, para definir adecuadamente el estado de las aguas subterráneas, conviene recordar la necesidad de considerar conjuntamente ambos aspectos.

2.1. INDICADORES SOBRE EL ESTADO CUANTITATIVO

2.1.1. Recursos hídricos subterráneos por habitante

<u>Recursos hídricos subterráneos</u>	$[m^3/año]$
Habitante	[hab]

Indicador definido por “Groundwater Indicators Working Group” (GIWG, 2004) de interés sobre todo a nivel nacional y/o global. Informa sobre los recursos hídricos subterráneos disponibles para abastecimiento urbano, agricultura, industria, medio ambiente,... Los recursos hídricos subterráneos en relación con el número de habitantes resulta un factor importante para el desarrollo económico de un país. Para evaluar los recursos de agua subterránea se tienen en cuenta los siguientes factores:

- a) Recarga natural dentro de los límites del área de estudio o país.
- b) Flujo subterráneo lateral procedente de acuíferos adyacentes.
- c) Infiltración de cuerpos de agua superficial hacia las aguas subterráneas
- d) Descarga subterránea hacia los ríos u otros cuerpos de agua superficiales.

La evaluación de estos factores no puede realizarse de forma simplista sino que requiere de un mínimo de infraestructura hidrogeológica así como de un conocimiento preciso sobre el funcionamiento del acuífero mediante la aplicación de diversas técnicas y métodos de estudio independientes (hidrodinámicos, hidrogeoquímicos,...) que permitan una cierta fiabilidad en los resultados obtenidos. Por otro lado, puede existir una incertidumbre importante asociada al número de habitantes dependientes de las aguas subterráneas, sobre todo cuando este

indicador se aplica a escala regional o local (tener en cuenta el posible trasvase de recursos de una región a otra, incertidumbres relacionadas con la limitación de los acuíferos,...) La aplicación de este indicador sin un mínimo de fiabilidad en cuanto a los recursos hídricos subterráneos y a escala local o regional puede llevar a conclusiones erróneas, alejadas de la realidad y por tanto, a una inadecuada planificación y gestión de los recursos hídricos disponibles. Se recomienda trabajar con rangos de valores para tener en cuenta tanto la variabilidad como la incertidumbre asociada a los términos empleados. Este indicador se encuentra estrechamente relacionado con el que se define a continuación.

2.1.2. Recarga respecto a las salidas totales de agua subterránea

$$\frac{\text{Recarga}}{\text{Salidas totales}} \times 100\%$$

Las principales fuentes de recarga son la infiltración de agua de lluvia, infiltración de masas de agua superficiales, pérdidas de riego y zonas urbanas (GIWG, 2004). La estimación y/o cálculo de la recarga se realizará mediante la aplicación combinada de diversos métodos (balance de agua en el suelo, simulación numérica, balance de cloruros, ley de Darcy,...) seleccionados en función de las condiciones climáticas e hidrogeológicas y los datos disponibles. En cualquier caso y considerando tanto su posible variabilidad natural como el elevado número de variables y parámetros involucrados, la incertidumbre en la estimación de la recarga deberá ser siempre considerada. Por otro lado, resulta importante considerar la escala de tiempo empleada al evaluar la recarga, sobre todo en regiones áridas y semiáridas en las que un evento de lluvia puede ser más significativo que una precipitación regular de mayor duración. El uso de valores medios anuales debe ser cuidadosamente considerado al calcular la recarga en regiones áridas y semiáridas.

Las salidas totales de agua subterránea integran el agua total extraída del acuífero mediante pozos, sondeos, manantiales, descargas laterales y otras vías para abastecimiento urbano, agricultura, industria u otros usos (GIWG, 2004). En muchos países parte de estas salidas son conocidas, dado que es obligatorio registrar las captaciones de agua subterránea para poder obtener el correspondiente permiso de extracción. En pozos domésticos los datos

se obtienen generalmente mediante estimaciones cualitativas. En cuanto a las salidas naturales (manantiales, descargas subterráneas,...) pueden estimarse o calcularse cuando existen datos disponibles.

Al igual que en el caso anterior, se recomienda trabajar con rangos de valores para tener en cuenta tanto la variabilidad como la incertidumbre asociada a los términos empleados. A partir de este indicador se pueden diferenciar dos escenarios principales: 1) uso sostenible del agua subterránea con respecto a la cantidad (salidas totales \leq recarga + recarga inducida) y 2) uso no sostenible del agua subterránea (sobreexplotación) con respecto a la cantidad (salidas totales $>$ recarga + recarga inducida). Este indicador permite conocer de forma preliminar el grado de sostenibilidad con respecto al uso del agua subterránea, aunque no considera los aspectos relacionados con la calidad. Para definir adecuadamente si un determinado acuífero presenta o no un uso sostenible es necesario integrar y tener en cuenta de manera conjunta todos los posibles indicadores relacionados tanto con la cantidad como con la calidad de las aguas subterráneas.

2.1.3. Salidas totales respecto a recursos disponibles de agua subterránea

$$\frac{\text{Salidas totales}}{\text{Recursos disponibles}} \times 100\%$$

El término correspondiente a las salidas totales de agua subterránea es el mismo que el utilizado en el indicador anterior. Los recursos disponibles de agua subterránea se definen como la cantidad de agua que puede ser extraída de un acuífero bajo las necesidades socio-económicas actuales manteniendo las condiciones ecológicas (GIWG, 2004). Teniendo en cuenta dicha definición y las variaciones existentes en la recarga natural, se propone considerar este término como un porcentaje del volumen de agua situado por encima del nivel de desagüe, entendidas como el volumen de agua que puede ser extraído sin perjudicar el funcionamiento del acuífero. Para fijar dicho porcentaje se tendrá en cuenta no sólo las condiciones hidrogeológicas y climáticas (recarga) sino también el ritmo de explotación.

Por lo tanto, desde un punto de vista cuantitativo:

$$R_d = (R_v/t) - Q_e$$

Dónde:

R_d = Recursos disponibles

R_v = Reservas vivas

t = Tiempo en el que se pretenden extraer las reservas vivas considerando las condiciones hidrogeológicas y climáticas (p.e. recarga)

Q_e = Caudal necesario para mantener unas condiciones ecológicas o ambientales

Sin embargo, además de cuantificar cuales son los recursos disponibles resulta esencial considerar los aspectos relacionados con la calidad del agua subterránea (ver indicador de calidad). Al igual que en el caso anterior, se pueden diferenciar inicialmente dos tipos de escenarios: 1) Desarrollo o uso sostenible (salidas totales \leq recursos disponibles y calidad aceptable según el uso del agua) y 2) Desarrollo o uso no sostenible (salidas totales $>$ recursos disponibles y/o calidad no aceptable según el uso del agua). Conviene insistir en que para definir adecuadamente si un determinado acuífero presenta o no un uso sostenible es necesario integrar y tener en cuenta de manera conjunta todos los posibles indicadores relacionados tanto con la cantidad como con la calidad de las aguas subterráneas.

2.1.4. Variación en el almacenamiento de agua subterránea

La explotación del agua subterránea puede producir un descenso del nivel piezométrico regional como consecuencia de la disminución del agua almacenada en el acuífero. Dicha disminución puede producir un incremento en el coste de bombeo, una disminución en la producción de los pozos y puede llevar a un uso no sostenible del agua subterránea desde un punto de vista social y económico. Por tanto, resulta necesario disponer de un indicador que permita detectar y evaluar los efectos de la explotación en el acuífero. Sin embargo, las oscilaciones del nivel piezométrico dependen, además de la explotación, de las fluctuaciones naturales y estacionales debido a la influencia de las condiciones climáticas y características

del acuífero. Por otro lado, la disminución en el almacenamiento de las aguas subterráneas puede también estar asociada a largos tiempos de tránsito desde un estado estacionario a otro estado distinto, lo cual no tiene porqué representar un problema o situación de explotación no sostenible. El uso correcto de este indicador debe considerar los siguientes aspectos:

- Modelo conceptual de funcionamiento hidrodinámico: con la finalidad de diseñar adecuadamente la red de control piezométrico.
- Localización y diseño de piezómetros: posibles interferencias hidráulicas.
- Situaciones transitorias: sondeos sin bombeos continuos en el tiempo

Además de tener en cuenta estas limitaciones, para que un indicador sobre la variación en el almacenamiento sea fiable deben además considerarse:

Descensos regionales en el nivel del agua subterránea. En áreas con una elevada densidad de pozos en explotación, un continuado descenso de la superficie piezométrica puede ocasionar una disminución en los manantiales y pozos así como un incremento en el coste del bombeo, lo que puede indicar un uso intensivo actual y una disminución del agua subterránea para el futuro.

Cambios en el flujo de base. En muchas zonas los ríos y/o masas de agua superficial reciben un importante volumen de agua procedente del flujo subterráneo. Una drástica reducción de este flujo se puede asociar con un agotamiento o disminución del agua subterránea.

Subsidencia del terreno. La explotación de agua subterránea en potentes sistemas no consolidados constituidos por una alternancia de acuíferos y acuitardos, puede producir en algunas zonas asentamientos significativos del terreno. En dicha situación el asentamiento del terreno se puede considerar como indicador indirecto de una explotación no sostenible del agua subterránea.

Cambios en la calidad química. Aunque las características hidrogeoquímicas pueden variar temporalmente y espacialmente a lo largo de un acuífero de forma natural, resulta frecuente que se produzcan cambios en la calidad química inducidos por un aumento de la

velocidad del flujo como consecuencia de la explotación, lo que acelera la manifestación de tendencias naturales que de otra forma requerirían mucho más tiempo para ser observadas. Dichos cambios pueden ser un indicador de la disminución de los recursos de agua subterránea disponibles (ver indicador de calidad)

Para conocer tanto el estado como la tendencia hacia una variación en el almacenamiento del agua subterránea se propone aplicar la metodología siguiente (LAMBÁN Y PERNÍA, 2004):

a) Análisis preliminar y representación conjunta de la evolución temporal de todos los caudales y niveles disponibles comparándolos con la precipitación: permite obtener información sobre el **funcionamiento hidrodinámico y comportamiento del acuífero** (zonas de recarga y descarga, sistemas de flujo, flujos verticales, capacidad de regulación, puntos de control anómalos, zonas de bombeo...) así como la frecuencia y posibles lagunas de datos. Todo ello permitirá definir un modelo hidrogeológico conceptual de funcionamiento así como definir zonas o áreas con distinto comportamiento hidrogeológico y sus posibles causas.

b) Obtención de índices gráficos y numéricos en relación tanto con la evolución histórica como con la situación actual de las aguas subterráneas (caudales y niveles), en general, y para cada una de las zonas o áreas anteriormente diferenciadas. Con respecto a los **caudales**, se propone representar los datos a escala diaria con la finalidad de evaluar y cuantificar, mediante diferentes métodos de descomposición de hidrogramas, los aportes subterráneos y la escorrentía superficial. Se propone además analizar la evolución temporal de los distintos coeficientes de agotamiento con objeto de evaluar y cuantificar una posible disminución de los aportes subterráneos. Con respecto a los **niveles piezométricos**, se propone obtener índices gráficos y numéricos relacionados tanto con la evolución histórica como con la situación actual de las aguas subterráneas para cada una de las zonas o áreas anteriormente diferenciadas. Los índices de evolución propuestos para informar sobre la evolución temporal durante el periodo de control son: *parámetros estadísticos* (media, mediana, desviación típica, máximo, mínimo, diagramas de frecuencias y evolución de percentiles correspondientes al 25, 50 y 75%) e *índices de tendencia* (regresión lineal, media móvil y desviación acumulada respecto a la media). Los índices de la situación informan sobre la situación con respecto a la última campaña y/o año de control (diagrama de

frecuencias con respecto al valor medio del periodo de control, comparación mensual con respecto a la media, mediana, desviación típica, mínimo y máximo durante el periodo de control e índices de situación piezométrica).

El denominado *índice de situación piezométrica* constituye una variación del tradicionalmente conocido como *índice de llenado*. El índice de llenado se define como el cociente entre el incremento del nivel medido en una determinada fecha respecto al nivel mínimo histórico y la diferencia de los valores máximos y mínimos históricos en dicha fecha (PERNÍA Y CORRAL, 2000). El índice de situación piezométrica propuesto se aplica únicamente a la evolución de la mediana de las series históricas de datos correspondientes a un área o sector del acuífero (previamente diferenciado de acuerdo con el funcionamiento del mismo) y viene dado por la expresión (Figura 1):

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

Dónde:

h	periodo histórico (años)
i	fecha (mes) en que se efectúa la medida
NP _i	mediana de los últimos niveles piezométricos medidos en el mes i
NP _{MAX}	valor máximo de la mediana en el mes i durante el periodo de control
NP _{MIN}	valor mínimo de la mediana en el mes i durante el periodo de control

Se incluye la última medida en la serie de datos históricos para que no existan valores superiores a 1 ni inferiores a 0 ($0 \leq N_h \leq 1$) y la ponderación de valores es la siguiente:

$N_h=1$	Máximo nivel de la mediana
$0,5 < N_h < 1$	Aumento de nivel respecto a la media de la mediana
$N_h=0,5$	Valor medio de la mediana
$0 \leq N_h < 0,5$	Disminución de nivel respecto a la media de la mediana
$N_h=0$	Mínimo nivel de la mediana

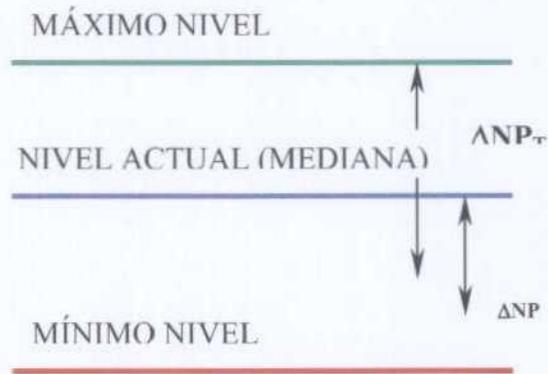


Figura 1.- Esquema de cálculo índice de situación piezométrica (modificado de PERNÍA Y CORRAL, 2000)

Una variación de este índice de llenado consiste en considerar los percentiles correspondientes al 10 y 90% en lugar de los mínimos y máximos de la mediana, con la finalidad de evitar en la medida de lo posible la influencia de valores extremos anómalos debido a medida de niveles dinámicos, errores de medida,...

2.2. INDICADORES SOBRE EL ESTADO CUALITATIVO

Para definir adecuadamente la calidad de las aguas subterráneas en un determinado acuífero es necesario diferenciar entre la calidad de origen natural (fondo natural) y las modificaciones de dicha calidad como consecuencia de la explotación y/o contaminación de las aguas subterráneas por la actividad humana. El fondo natural se define como: “*el rango de concentraciones en el agua de un cierto elemento, especie o sustancia presente, y derivado de fuentes geológicas, biológicas o atmosféricas naturales*” (BASELINE, 1999). La metodología propuesta para establecer este fondo natural se desarrolla ampliamente en el proyecto europeo BaSeLiNe (Natural BaSeLiNe Quality in European Aquifers, EVK1-CT1999-0006) y su conocimiento resulta esencial para poder discernir adecuadamente entre las tendencias naturales y aquellas producidas como resultado de la actividad humana (BASELINE, 1999; MANZANO ET. AL., 2004). La definición de indicadores relacionados con el estado cualitativo de las aguas subterráneas debe tender por lo tanto a considerar dicha realidad. No obstante, el “fondo natural” es diferente para cada acuífero, dependiendo de la combinación particular de sus características geológicas, hidrodinámicas, etc., y su definición requiere de series históricas de datos así como de un buen conocimiento generalmente inexistente sobre el funcionamiento hidrodinámico del acuífero. Por tanto, teniendo en cuenta esta situación y los objetivos prioritarios definidos por UNESCO, en el presente documento se propone una metodología e indicadores (LAMBÁN Y PERNÍA, 2004) que permiten una evaluación preliminar de la calidad, pudiendo integrar el conocimiento disponible o el que pueda ir obteniéndose progresivamente sobre el “fondo natural”

2.2.1. Metodología e indicadores para evaluar la calidad del agua subterráneas

Con objeto de evaluar el estado cualitativo de las aguas subterráneas se propone, inicialmente, describir la calidad actual a partir de la última o últimas campañas de muestreo realizadas. Para ello, tras eliminar los datos erróneos o análisis químicos inadecuados, se definirán las facies hidrogeoquímicas predominantes (**caracterización hidrogeoquímica regional o espacial**) y se clasificará el agua teniendo en cuenta tanto su potabilidad (según Directiva 98/93/CE y RD 140/2003) como su peligro para la alcalinización y salinización del suelo (según las normas de Thorne y Peterson).

Además de los parámetros descriptivos (T^a , pH, OD y CE) y de los elementos mayoritarios Ca, Mg, Na, K, HCO_3 , Cl y SO_4 , se analizan los siguientes parámetros como posibles indicadores de contaminación: NO_3 , NO_2 , NH_4 , PO_4 , DQO (EUROPEA ENVIRONMENT AGENCY, 1998), carbono orgánico disuelto (COD) y carbono orgánico total (COT)¹ (BASELINE, 1999; MANZANO, 2004). Las sustancias inorgánicas que más frecuentemente pueden ocasionar problemas en la calidad son Fe, Mn, F, Cl, SO_4 y elementos traza tales como As, Ba y Ni (origen natural) así como NO_3 , K, Na, Cl, SO_4 , NH_4 , PO_4 y metales pesados (origen antrópico) (BASELINE, 1999). En función de la disponibilidad de datos y presiones o tensiones a las que se encuentren sometidas las aguas subterráneas se consideraran además: metales pesados, sustancias orgánicas, pesticidas u otros. La presión sobre las aguas subterráneas dependerá principalmente de la densidad de población, uso del suelo, fuentes puntuales de contaminación y/o uso de fertilizantes.

Como resultado de esta primera descripción se **seleccionarán aquellos parámetros que indiquen un riesgo y/o contaminación** de las aguas subterráneas de acuerdo con la clasificación del estado químico propuesta en la Tabla 1 (modificada de COSTA, 2002) así como unos **indicadores de calidad** de acuerdo con las características específicas de cada acuífero.

Tabla 1.- Riesgo de contaminación y estado químico del agua subterránea según su uso (modificada de COSTA; 2002)

Valor orientativo	Tipo de afección	Riesgo contaminación	Estado químico
$> 1000\% V_L$	Muy grave	Contaminación	Malo
$> 100\% V_L$	Grave		
$> 50\% V_L$	Moderada	Riesgo	Bueno
$< 50\% V_L > V_N$	Leve		
V_N	Nula	Sin riesgo	

V_L = valor límite según el uso del agua o valor umbral para el estado químico; V_N = concentración o fondo natural (según la definición de “contaminación” del Artículo 93 del Texto Refundido de la Ley 46/1999)

La clasificación propuesta se basa en el concepto de “contaminación” (Artículo 93 del Texto Refundido de la Ley 46/1999) según el cual “*se entiende por contaminación la acción y el efecto de introducir materias o formas de energía, o inducir condiciones en el agua que, de*

¹ La concentración media en COT oscila entre 0,7 y 1,8 mg/L, una mayor concentración indica contaminación

modo directo o indirecto, impliquen una alteración perjudicial de su calidad en relación con los usos posteriores o con su función ecológica". Por tanto, no considera posibles problemas asociados a la calidad natural del agua subterránea. El término "V_N" corresponde en realidad a un rango de concentraciones resultado de la variabilidad espacial y temporal de la composición química del acuífero, pudiendo superar dicho rango ciertos valores límite (V_L) en función del uso del agua.

El riesgo de contaminación depende del uso del agua, por lo que los valores límite (V_L) se establecerán según dicho uso. Por el momento, dado que se considera prioritario el uso para consumo humano y todavía no han quedado fijadas las normas de calidad ambiental en la Directiva (derivada) del Agua Subterránea (DAS) (COM 2003/0210), se propone considerar los valores límite fijados por la Directiva 98/93/CE y R.D 140/2003 relacionados con la calidad de las aguas destinadas al consumo humano (Tabla 2).

Tabla 2.- Valores límite indicados u obligados(*) por la Directiva 98/93/CE y R.D 140/2003

Parámetro	Valor Límite	Unidades
Concentración iones hidrógeno	entre 6,5 y 9,5	unidades pH
Conductividad eléctrica	2500	μS/cm a 20°C
Oxidabilidad	5	mg/l de O ₂
Cloruro	250	mg/l
Sulfato	250	mg/l
Sodio	200	mg/l
Nitrato	50 (*)	mg/l
Nitrito	0,50 (*)	mg/l
Amonio	0,5	mg/l
Arsénico	10 (*)	μg/l
Tritio	100 (*)	Bq/l

A continuación y con la finalidad de completar la descripción general sobre la calidad de las aguas subterráneas, se propone realizar un **tratamiento conjunto de todos los análisis químicos** en todos los puntos disponibles durante el periodo de control, representándolos así como obteniendo los parámetros estadísticos más significativos (media, mediana, desviación estándar, mínimo y máximos) y los **diagramas de frecuencias acumuladas** para cada parámetro de control. La mediana se utilizará como nivel de referencia regional o para comparar distintos elementos entre sí. Las poblaciones observadas frecuentemente no presentan una distribución normal ni lognormal debido a la coexistencia de más de un proceso

(Figura 2). Los resultados obtenidos permitirán identificar los procesos principales que controlan las distribuciones observadas así como mantener, modificar y/o ampliar los indicadores de contaminación y calidad previamente seleccionados.

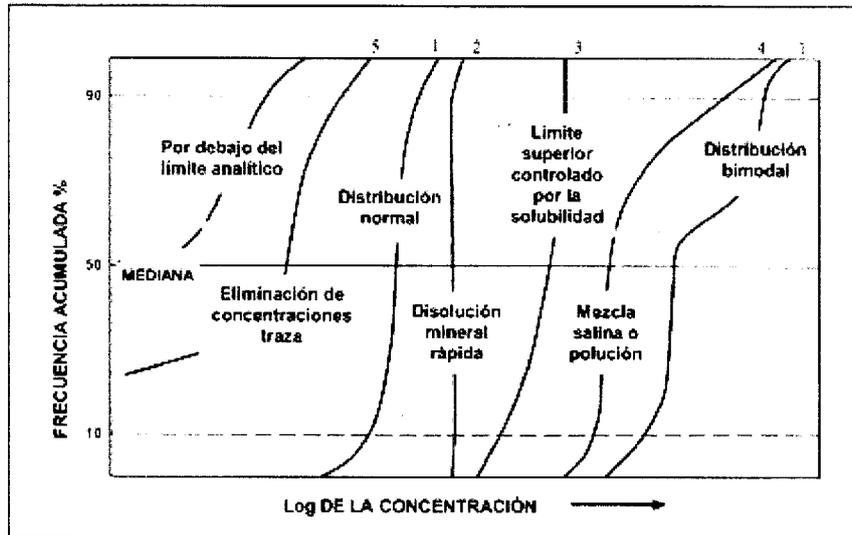


Figura 2.- Representación esquemática de la frecuencia acumulada con respecto al logaritmo de la concentración de cada indicador mostrando diferentes tipos de distribuciones y procesos (MANZANO, 2004).

Para la **determinación de tendencias** se propone representar y analizar la evolución temporal de los parámetros anteriormente seleccionados en los puntos históricos de control. Se calculará la evolución anual de la media, mediana, desviación estándar, mínimo, máximo y percentiles del 10, 20, 25, 30, 40, 60, 70, 75, 80 y 90% (EUROPEA ENVIRONMENT AGENCY, 1998) representando gráficamente la evolución de los percentiles correspondientes al 25, 50 y 75%. Siempre que exista información suficiente, en lugar de la evolución anual se considerará la evolución entre las distintas campañas de muestreo. Así mismo, se calculará mediante regresión lineal la pendiente de la recta de ajuste correspondiente a la evolución temporal de la mediana para cada uno de los parámetros seleccionados. En la medida de lo posible se diferenciará entre: a) tendencias de origen natural (variaciones a escala de acuífero y/o a pequeña escala debido a la heterogeneidad del medio), b) tendencias causadas por la explotación de los acuíferos (aceleración de tendencias naturales debido al aumento de la velocidad del flujo) y c) tendencias relacionadas con la contaminación (puntual o difusa)

Con la finalidad de evaluar el **estado actual de la calidad** en las aguas subterráneas se propone obtener, para los parámetros indicadores de contaminación, el diagrama de frecuencias acumuladas a partir de los valores medidos en la última campaña de muestreo con respecto al valor medio durante el periodo de control. Así mismo, se propone obtener para dichos parámetros el denominado índice de calidad del estado químico, definido como el cociente entre la concentración del parámetro de referencia y la concentración asignada a dicho parámetro para que la masa de agua pueda utilizarse para un determinado uso (o la que se asigne como umbral para el buen estado químico).

$$IC_p = \frac{[P]}{[V_L]}$$

Dónde:

IC_p Índice de calidad del estado químico del parámetro “p”

[P] Concentración actual del parámetro “p” (último año o campaña de muestreo)

[V_L] Valor límite según el uso o valor umbral para el estado químico del parámetro “p” según normas de calidad de la COM 2003/0210 (DAS) (por el momento valores fijados por la Directiva 98/93/CE y RD 140/2003)

Obteniendo la ponderación de valores siguiente:

$IC_p > 1$ Calidad no utilizable o mal estado químico.

$IC_p = 1$. Calidad con concentraciones del valor límite o umbral.

$IC_p = 0,5$ Calidad con concentraciones medias del límite requerido.

$IC_p = N$ Calidad obtenida con la concentración representativa del estado natural.

$IC_p = M$ Calidad obtenida con la concentración mínima conocida.

$IC_p = 0$.Calidad cuando la concentración es inferior al límite de detección analítica.

De forma conjunta con el anterior se propone utilizar un índice de evolución del estado químico con objeto de establecer un criterio para valorar la evolución del estado químico en un punto de control o masa de agua subterránea. El índice de evolución es el cociente entre la diferencia de la concentración actual del parámetro y el valor o fondo natural para dicho

parámetro (mediana del rango de concentraciones) y la diferencia entre la concentración máxima del parámetro durante el periodo de control y el valor o fondo natural para dicho parámetro (mediana del rango de concentraciones)

$$IE_p = \frac{[P] - [V_N]}{[P_{Max}] - [V_N]}$$

Dónde:

- IE_p Índice de evolución del estado químico del parámetro “p”
 $[P]$ Concentración actual del parámetro “p” (último año o campaña de muestreo)
 $[P_{Max}]$ Concentración máxima medida durante el periodo de control
 $[V_N]$ Concentración o fondo natural, mediana del rango de concentraciones (cuando no sea conocido se sustituirá por la concentración mínima del parámetro “p” durante el periodo de control)

Obteniendo la ponderación de valores siguiente:

- $IE_p = 1$ Concentración igual al valor máximo durante el periodo de control
 $0 < IE_p < 1$ Concentración entre el valor natural (mediana rango de concentraciones) o mínimo y el máximo del periodo de control
 $IE_p = 0$ Concentración igual al fondo natural (mediana rango de concentraciones) o concentración mínima del periodo de control
 $IE_p < 0$ Concentración inferior al fondo natural (mediana rango de concentraciones) o concentración mínima del periodo de control.

Para evitar la influencia de valores máximos anómalos (fuente de contaminación puntual, errores analíticos...) se propone aplicar este índice de evolución considerando además la concentración mediana correspondiente al periodo de control. El índice de calidad informa sobre el riesgo y tipo de contaminación con respecto al uso del agua o el estado químico de un

determinado punto o masa de agua. El índice de evolución permite evaluar el estado actual en comparación con el periodo de control.

2.2.2. Tratamiento requerido según el uso del agua subterránea

Este indicador informa sobre si es necesario o no realizar un tratamiento y de que tipo en función del uso de agua (abastecimiento, agricultura, industria, refrigeración...)(GIWG, 2004). El indicador se divide en cuatro categorías según el tratamiento que requiera el agua:

- Apta para uso sin tratamiento.
- Necesita un tratamiento simple.
- Necesita tratamiento económicamente y tecnológicamente posible.
- Para que el agua alcance la calidad adecuada no existe un tratamiento posible desde el punto de vista tecnológico y económico.

Los tratamientos considerados como simples son: aireación, filtración, desinfección, alcalinización y separación del hierro y manganeso. Los tratamientos económicamente o técnicamente posibles incluyen procesos como: métodos de membrana, métodos biológicos, coagulación y floculación así como más recientemente: desalinización, ósmosis inversa o membrana filtrante. Un tratamiento complejo incrementa los costes de suministro y mantenimiento del agua. La conservación del buen estado de la calidad del aguas subterráneas debe ser un aspecto prioritario que debería estar basado en una adecuada política de protección, implantándose la legislación necesaria y estableciendo una red de muestreo operativa de la calidad.

3. APLICACIÓN AL ACUÍFERO CARBONATADO DE LA SIERRA DE ESTEPA

3.1 SÍNTESIS HIDROGEOLÓGICA

El acuífero de la Sierra de Estepa se encuentra al sur de España, en la región central de Andalucía (provincia de Sevilla) y cuenca del Guadalquivir (Figura 3). Presenta una extensión de 30 km² y cotas comprendidas entre 500 y 845 m. Constituye la única fuente de suministro de agua en un clima árido (precipitación media 500 mm/año). La comarca está poblada por 50.000 habitantes y la actividad económica principal es la agricultura, predominando el olivo (VÁZQUEZ MORA ET AL., 2001).

Desde un punto de vista geológico pertenece al dominio Subbético Externo de la Cordillera Bética, está constituido por afloramientos del Jurásico y presenta una estructura en domo anticlinal cabalgante hacia el N. El acuífero es carbonatado, con una superficie aflorante de 24 km², carácter libre predominante y flujo regional en sentido SO y E-SE. La principal fuente de recarga es la infiltración de agua de lluvia, mientras que la descarga se produce por manantiales actualmente regulados con obras de captación. La cota piezométrica actual oscila entre los 463 y 477 m s.n.m (profundidad entre 1,5 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/año (demanda de 80 m³/h, JUNTA DE ANDALUCÍA, 2000).

Se trata de aguas bicarbonatadas cálcicas con contenidos significativos en cloruro y sodio según el punto de control. El agua es potable para el consumo humano (Directiva 98/93/CE y RD 140/2003) y con un bajo peligro de alcalinización y salinización del suelo (según normas de Thorne y Peterson). Las canteras, carreteras y, en menor medida, las explotaciones ganaderas constituyen potenciales focos de contaminación, dado que la agricultura se concentra en los materiales arcillosos del Cretácico y Keuper alejados de la zona de recarga.

Se dispone de redes de control piezométrico, de calidad e hidrometría con datos históricos desde los años 70 (Figura 3). Los puntos de control corresponden mayoritariamente

a captaciones de agua subterránea. En la actualidad existen 12 puntos de control piezométrico mensual de los cuales 5 presentan registros históricos (1976-2004) y 3 registro continuo. Las medidas de nivel mensual se realizan al día siguiente de detener el bombeo una vez recuperado el nivel. La red de calidad consta de 12 puntos de control semestral de los cuales 4 presentan registros históricos (1977-2004). La toma de muestras se realiza directamente (manantiales), mediante tomamuestras (sondeos y piezómetros) o después de un determinado tiempo de bombeo (captaciones) y los parámetros de control son: DQO, Cl, SO₄, HCO₃, NO₃, Na, Mg, Ca, K, pH, CE, NO₂, NH₄, P₂O₅ y SiO₂. En campo se determina pH, T^a, CE y alcalinidad. Se dispone de 2 puntos para control de la química del agua de lluvia desde 2003. La red de hidrometría consta de 2 puntos con registro continuo desde 2001.

En relación con el funcionamiento hidrodinámico del acuífero, no existen cursos de agua superficial ni datos históricos de manantiales en régimen no influenciado que permitan tener en cuenta la evolución en los caudales. Se han representado conjuntamente los puntos con datos periódicos de nivel piezométrico observándose una evolución similar en todos los puntos, lo que parece indicar un almacenamiento único independientemente del sector considerado. Por otro lado, se observa una buena correlación con la precipitación así como una rápida recuperación de niveles.

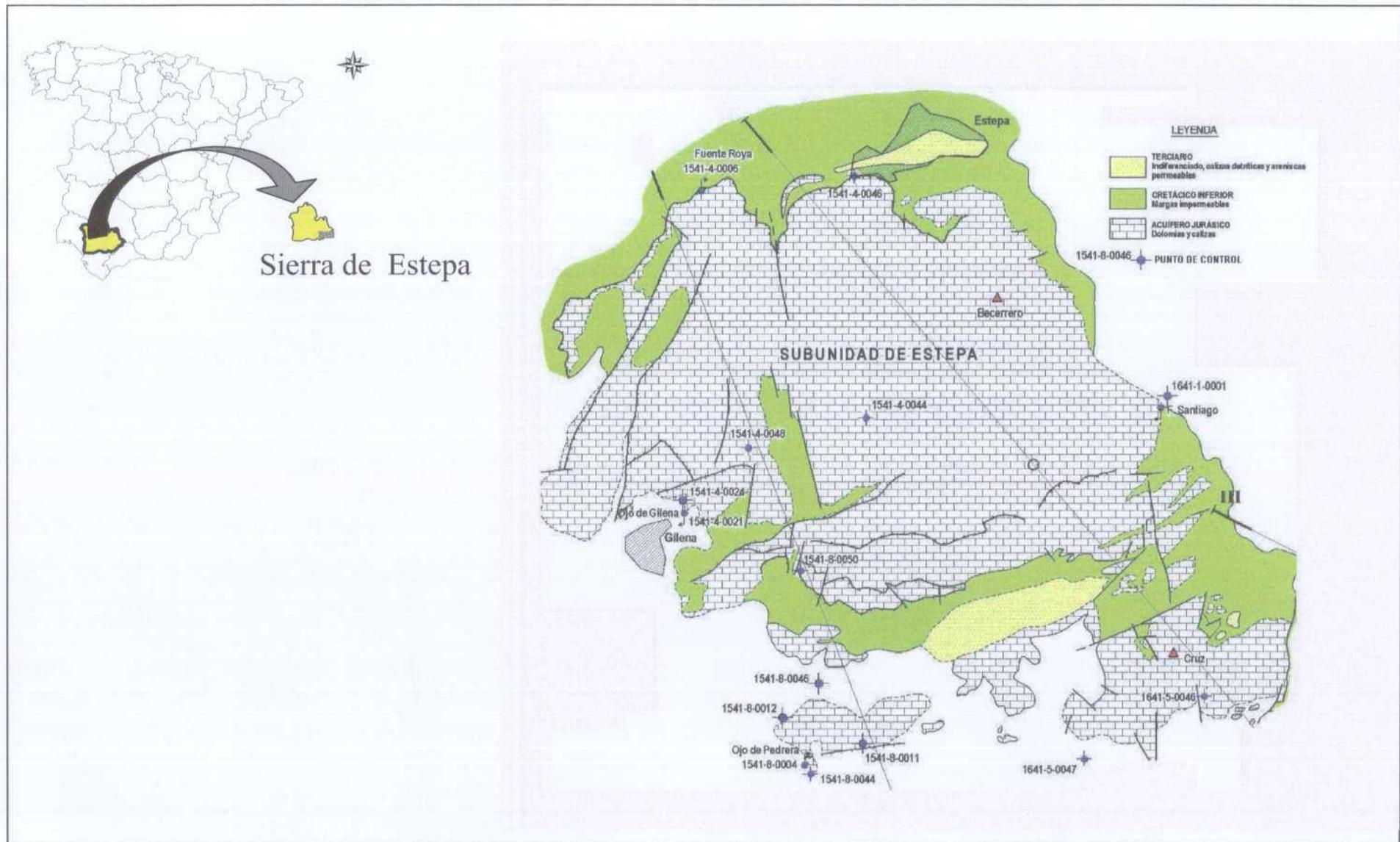


Figura 3.- Situación geográfica y redes de control en la Sierra de Estepa (Sevilla) (MARTOS modificado)

3.2. INDICADORES SOBRE EL ESTADO CUANTITATIVO

3.2.1. Recursos hídricos subterráneos por habitante

<u>Recursos hídricos subterráneos</u>	$[m^3/año]$
Habitante	[hab]

Dada la ausencia de aportes subterráneos laterales así como de cursos y/o cuerpos de agua superficial significativos, los recursos hídricos subterráneos son igual a la recarga natural. La recarga media es de unos $7,2 \text{ hm}^3/año$ (VÁZQUEZ MORA ET AL., 2001) y se obtiene considerando una precipitación media anual de 503 mm/año (periodo 1975-1999), una superficie aflorante de $32,7 \text{ km}^2$ y una tasa de infiltración media del 44%. Dicha tasa de infiltración se obtiene a partir del análisis estadístico de diferentes series de datos en los que se conoce la precipitación, extracciones, salidas por manantiales y evolución de la superficie piezométrica, teniendo en cuenta la expresión:

$Entradas = Salidas + Variación \text{ en el almacenamiento}$

$P * Ti = B + (A * S * \Delta H)$

P = Precipitación (hm^3)

Ti = Tasa de infiltración (%)

B = Extracciones más salidas por manantiales (hm^3)

A = Superficie (km^2)

S = Coeficiente de almacenamiento (%)

ΔH = Variación del nivel de la superficie piezométrica (km^2)

Los resultados obtenidos ponen de manifiesto la existencia de un umbral de precipitaciones (volumen mínimo de precipitación en un periodo de tiempo determinado) a partir del cual la respuesta del sistema aumenta significativamente. En periodos secos e incluso medios, la tasa de infiltración obtenida es en torno al 20%, mientras que en periodos húmedos cuando la capacidad de campo del suelo ya está saturada la tasa de infiltración aumenta hasta el 80 % (VÁZQUEZ MORA ET AL., 2001).

Si se tiene en cuenta esta variabilidad en la tasa de recarga y se considera que el acuífero abastece a una población relativamente constante de unos 50.000 habitantes², el rango de valores obtenido para el periodo 1975-99 se presenta en la Tabla 3.

Tabla 3.- Rango de valores obtenido para el indicador "Recursos hídricos subterráneos por habitante" en función del periodo y tasa de infiltración considerada.

Periodo	Tasa de recarga (%)	Recursos hídricos subterráneos (m3/año)	Indicador
Seco	20	3289620	66
Humedo	80	13158480	263
Medio	44	7237164	145

Como puede observarse en la Tabla 3 los valores obtenidos para este indicador oscilan entre 66 y 263, obteniéndose un valor medio en torno a 145. Ello indica una disponibilidad suficiente por habitante para periodos medios y húmedos, pero insuficiente en periodos secos.

3.2.2. Recarga respecto a las salidas totales de agua subterránea

$$\frac{\text{Recarga}}{\text{Salidas totales}} \times 100\%$$

Se recuerda que la recarga media obtenida es de unos 7,2 hm³/año, oscilando entre 3,3 y 13,2 hm³/año en función del periodo y tasa de infiltración considerada (VÁZQUEZ MORA ET AL., 2001).

Con respecto a las extracciones totales hay que considerar por una parte el abastecimiento a la población y por otra las extracciones para regadíos. La principal población abastecida es Estepa, pero existen hasta ocho núcleos de población más lo que supone un total de 50.000 habitantes y una demanda anual de unos 3,5 hm³ (VÁZQUEZ MORA ET AL., 2001). Por otro lado, las extracciones para regadío han aumentado durante los últimos años

² Se considera como habitantes aquellos que se abastecen directa o indirectamente del acuífero, independientemente de la localización geográfica de los mismos.

hasta convertirse en un volumen importante que afecta a los términos municipales de Estepa, Gilena, La Roda de Andalucía y Casariche. En la actualidad se riegan con agua procedente del acuífero de Sierra Estepa unas 350 ha de olivar (JUNTA DE ANDALUCÍA, 2000) con una dotación anual de riego aproximada de unos 2000 m³/ha/año, lo que supone una demanda de unos 0,7 hm³/año (VÁZQUEZ MORA ET AL., 2001). Por lo tanto, las extracciones totales ascienden a 4,15 hm³/año.

Si se tiene en cuenta la variabilidad en la tasa de recarga anteriormente mencionada y se consideran como salidas totales la suma de las extracciones totales (unos 4,15 hm³/año) más el agua drenada por los manantiales (0,5 hm³/año en años normales; VÁZQUEZ MORA ET AL., 2001) se obtiene para este indicador el rango de valores presentado en la Tabla 4.

Tabla 4.- Rango de valores obtenido para el indicador "Recarga respecto a las salidas totales de agua subterránea" en función del periodo y tasa de infiltración considerada.

Periodo	Tasa de recarga (%)	Recarga (hm ³ /año)	Salidas totales (hm ³ /año)	Indicador
Seco	20	3,3	4,65	71
Humedo	80	13,2	4,65	284
Medio	44	7,2	4,65	155

Como puede observarse en la Tabla 4 los valores obtenidos para este indicador oscilan entre 71 y 284, obteniéndose un valor medio en torno a 150. Si se consideran los escenarios anteriormente comentados, durante los periodos secos (tasa de recarga inferior al 20%) el uso del agua subterránea sería en principio considerada como "no sostenible".

3.2.3 Salidas totales respecto a recursos disponibles de agua subterránea

$$\frac{\text{Salidas totales}}{\text{Recursos disponibles}} \times 100\%$$

Se recuerda que las salidas totales (extracciones más salidas naturales) se han evaluado en unos 4,65 hm³/año (VÁZQUEZ MORA ET AL., 2001).

Los recursos explotables vendrían dados por:

$$R_d = (R_v/t) - Q_e$$

Dónde:

R_v = Volumen de agua comprendido entre el nivel piezométrico (isopiezas mayo 2004; Figura 4) y la cota de surgencia mínima (460 m). El volumen de roca obtenido es de unos 512 hm³, por lo que si se considera una porosidad eficaz de 0.033 (VÁZQUEZ MORA ET AL., 2001) el volumen de agua resultante es de 16.9 hm³.

t = Tiempo en el que se pretende extraer las reservas teniendo en cuenta la recarga.

Q_e = Descarga natural considerada como mínima de acuerdo con unas determinadas condiciones ambientales: 0,5 hm³/año (VÁZQUEZ MORA ET AL., 2001)

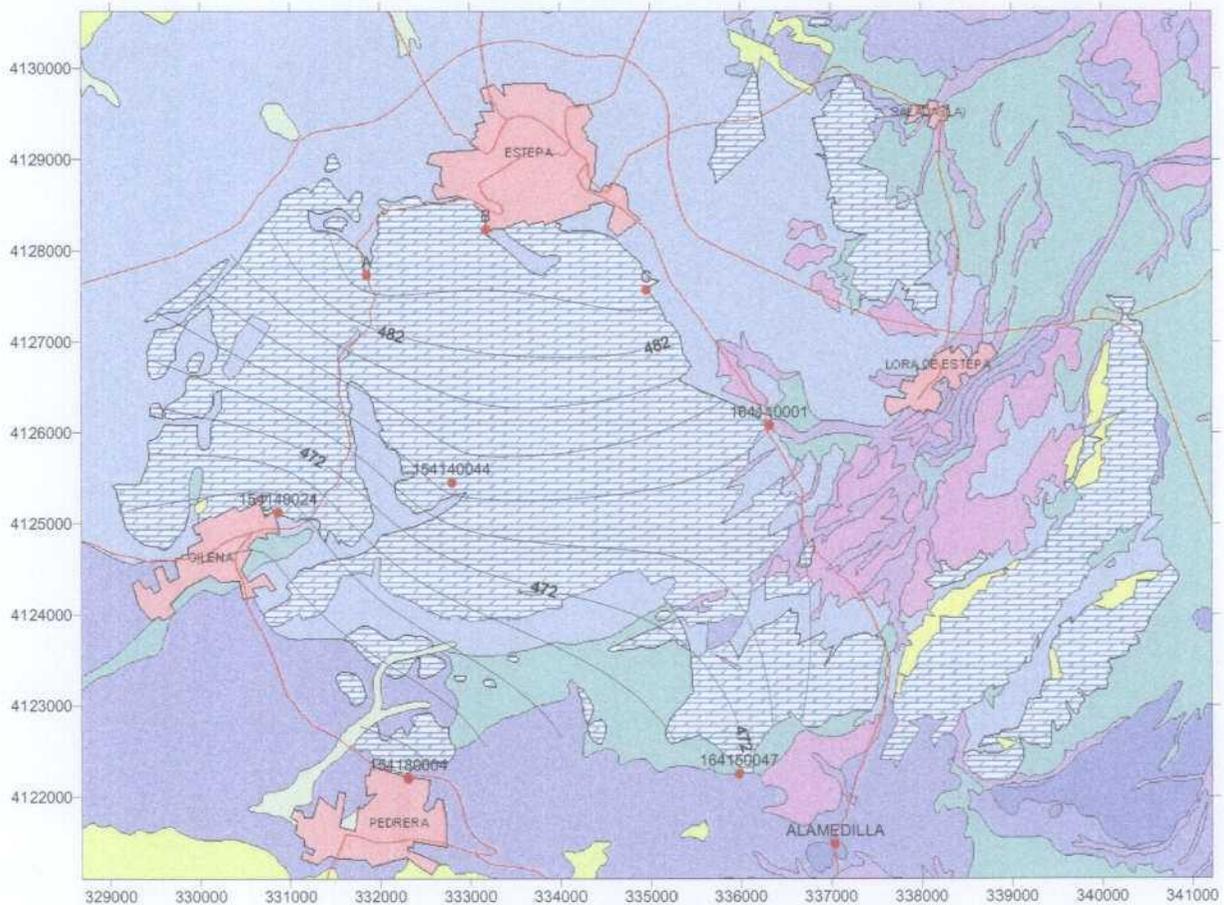


Figura 4.- Mapa de isopiezas correspondiente a mayo de 2004 en Sierra de Estepa (MARTOS, 2004)

Teniendo en cuenta todo lo anteriormente comentado, el rango de valores obtenido para este indicador se presenta en la Tabla 5.

Tabla 5.- Rango de valores obtenido para el indicador "Extracciones totales respecto a recursos disponibles de agua subterránea" en función del tiempo de extracción de las reservas vivas.

Salidas totales ($\text{hm}^3/\text{año}$)	Reservas vivas (hm^3)	Tiempo extracción (años)	Recursos disponibles ($\text{hm}^3/\text{año}$)	Indicador
4,65	16,9	0,5	33,3	14
		1	16,4	28
		1,5	10,8	43
		2	8,0	58
		2,5	6,3	74
		3	5,1	91
		3,27	4,7	100
		3,5	4,3	107
		4	3,7	125

En un año de tipo medio, con una recarga aproximada de unos $7 \text{ hm}^3/\text{año}$, el tiempo de extracción de las reservas vivas debe ser superior o igual a 3,27 años para que el uso del agua subterránea resulte sostenible en relación con los aspectos de cantidad. Para tiempos inferiores se produce un desarrollo no sostenible.

3.2.4. Variación en el almacenamiento de agua subterránea

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 (1998-actualidad) (puntos 1541-4-0024, 1541-8-0011, 1541-8-0012, 1541-8-0004, 1641-1-0001, 1641-1-0036 y 1541-4-0044). 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 representación de los datos piezométricos 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. Así mismo, 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 5).

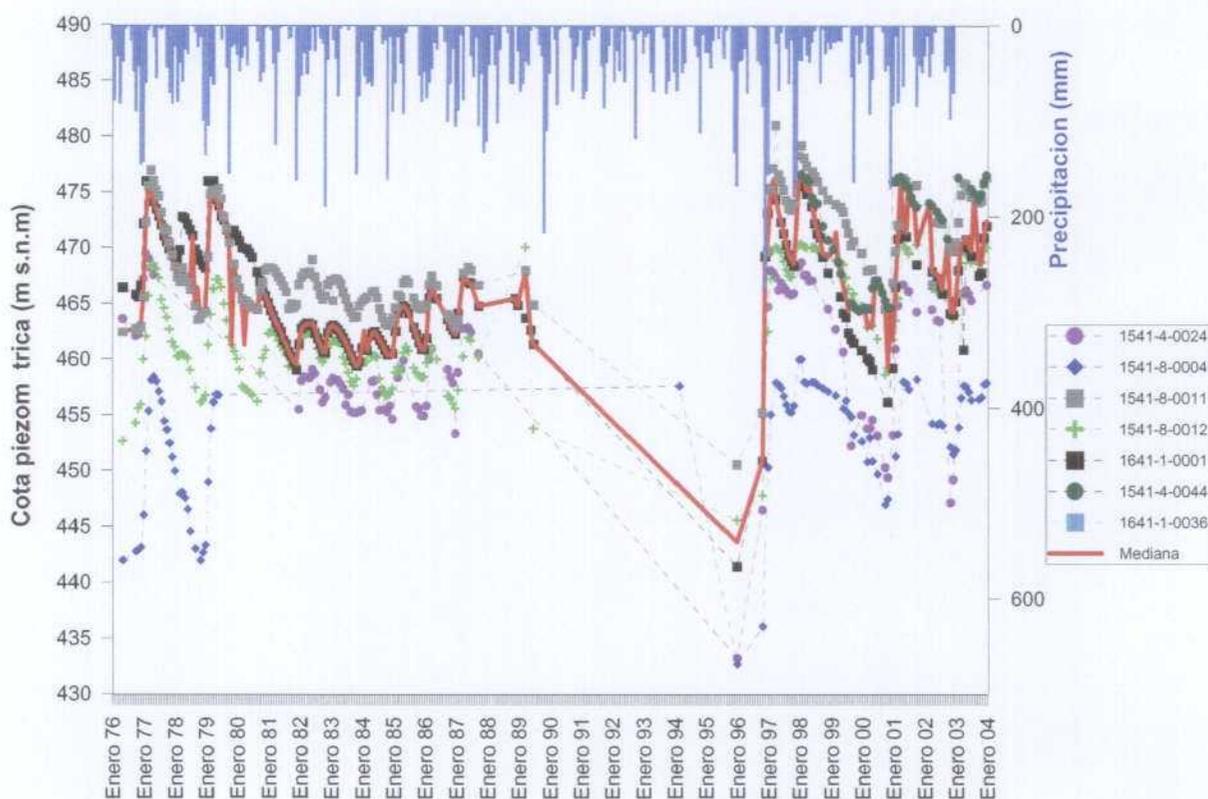


Figura 5.- Cotas piezométricas y mediana correspondiente al periodo 1976-2004. Comparación con la precipitación en la estación de Estepa.

Se observa la existencia de cuatro periodos claramente diferenciados: 1976-1981 (descensos significativos de niveles alcanzando en el punto 1541-8-0004 valores mínimos históricos), 1981-1990 (estabilización de los niveles y evolución de los mismos en coherencia con la precipitación), 1990-1997 (ausencia de datos y explotación intensiva de los niveles alcanzando los mínimos históricos) y 1997-2004 (rápida recuperación de niveles y relativa estabilización de los mismos).

El análisis de los datos y el cálculo de los índices obtenidos se centrará principalmente en el último de estos periodos (1997-2004) ya que existe una serie continua de datos y se desea disponer de un indicador que permita evaluar la situación actual del acuífero. Dado el comportamiento similar de todos los niveles y la escasa diferencia en la cota piezométrica observada (entre 440 y 480 m) se ha calculado la media, mediana, máximos y mínimos de todos los datos, considerando dichos parámetros como representativos para todo el acuífero (Figura 5).

Índices de evolución piezométrica.

Inicialmente se han calculado los índices estadísticos de la mediana correspondientes a la media, mediana, desviación típica, máximo y mínimo. Con la finalidad de disponer de un criterio que permita la comparación con otros acuíferos se han obtenido dichos parámetros para los periodos 1976-2004, 1997-2004 y 1999-2004 (Tabla 6). Como puede observarse no existen diferencias significativas independientemente del periodo de medidas considerado.

Tabla 6.- Índices estadísticos de la mediana para los periodos 1976-2004, 1997-2004 y 1999-2004

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

A continuación se han obtenido los diagramas de frecuencias acumuladas correspondientes a los periodos 1976-2004, 1997-2004 y 1999-2004 (Figura 6) y se han calculado y representado la evolución temporal de los percentiles correspondientes al 25, 50 y 75% para el periodo 1997-2004 (Figura 7).

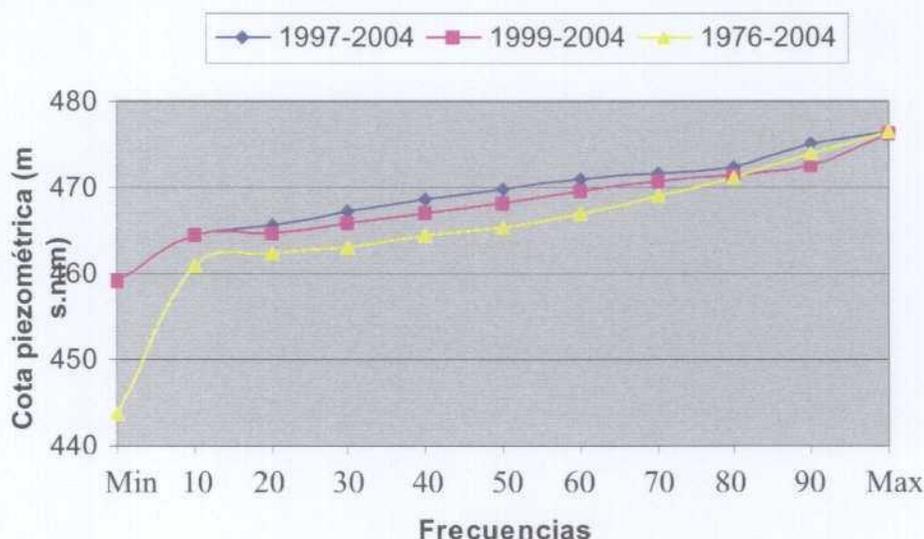


Figura 6.- Diagramas de frecuencias acumuladas durante los periodos 1976-2004, 1997-2004 y 1999-2004.

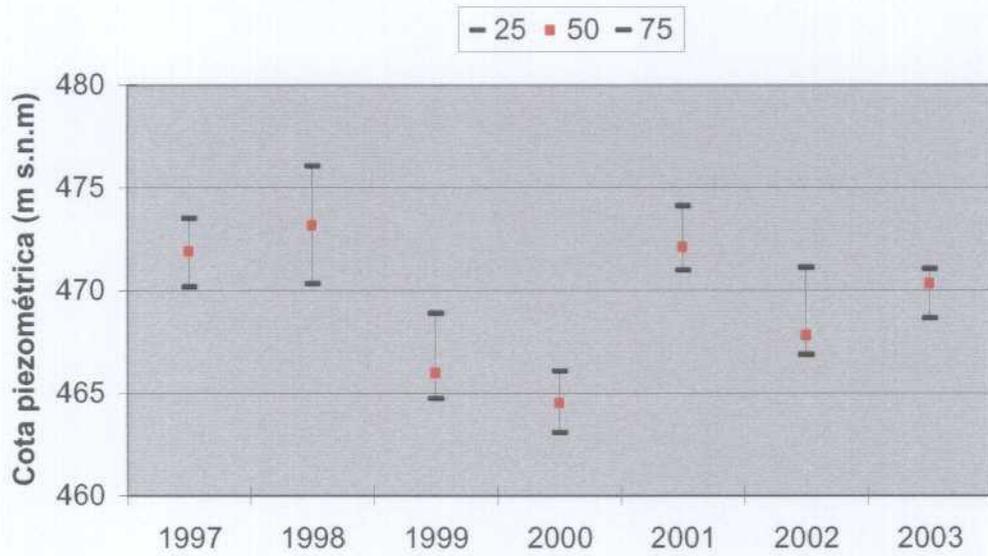


Figura 7.- Evolución temporal de los percentiles 25,50 y 75% durante el periodo 1997-2004.

Con respecto a los índices de tendencia se han aplicado conjuntamente los siguientes métodos: regresión lineal (pendiente de la recta de ajuste obtenida por mínimos cuadrados), media móvil y desviación acumulada respecto a la media. Dada la ausencia de datos durante el periodo 1990-97, se ha aplicado la 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 (Figuras 8 y 9).

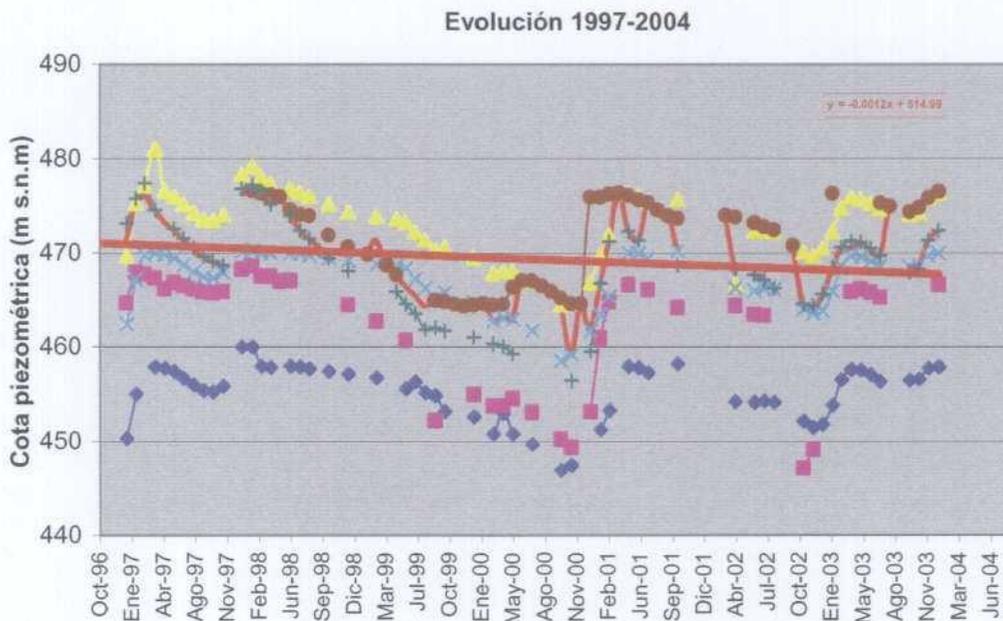


Figura 8.- Ajuste de valores medianos durante el periodo 1997-2004 mediante regresión lineal ($m = -0,0012$)

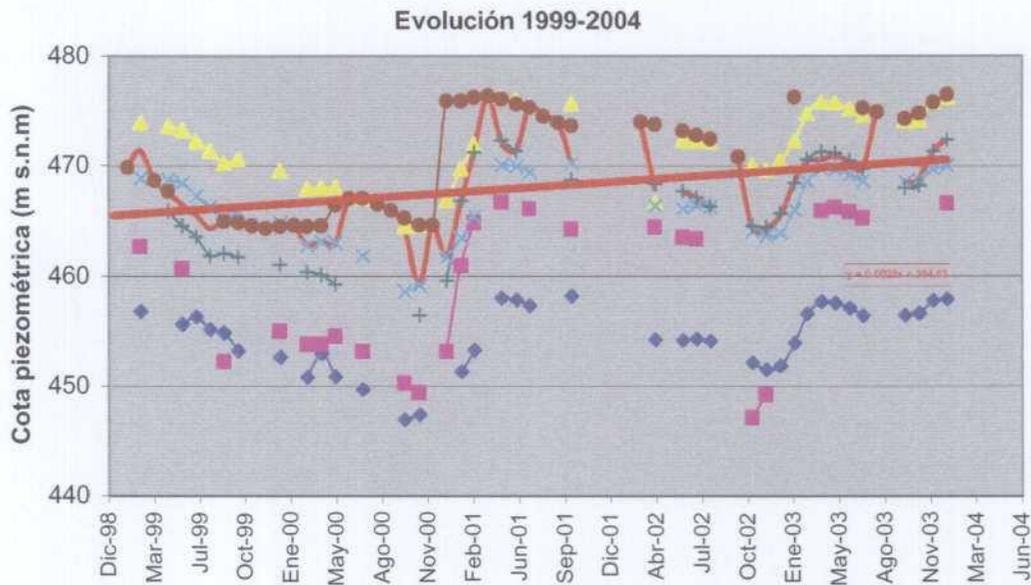


Figura 9.- Ajuste de valores medianos durante 1999-2004 mediante regresión lineal ($m = 0,0028$)

Otro de los métodos utilizado para determinar la tendencia ha sido la media móvil de orden doce (Figura 10). Para el periodo 1997-2004, la media móvil se encuentra comprendida entre los 465 y 475 m, observándose dos valores máximos separados por un mínimo aproximadamente coincidente con el año 2000, en coherencia con lo observado en la Figura 7.

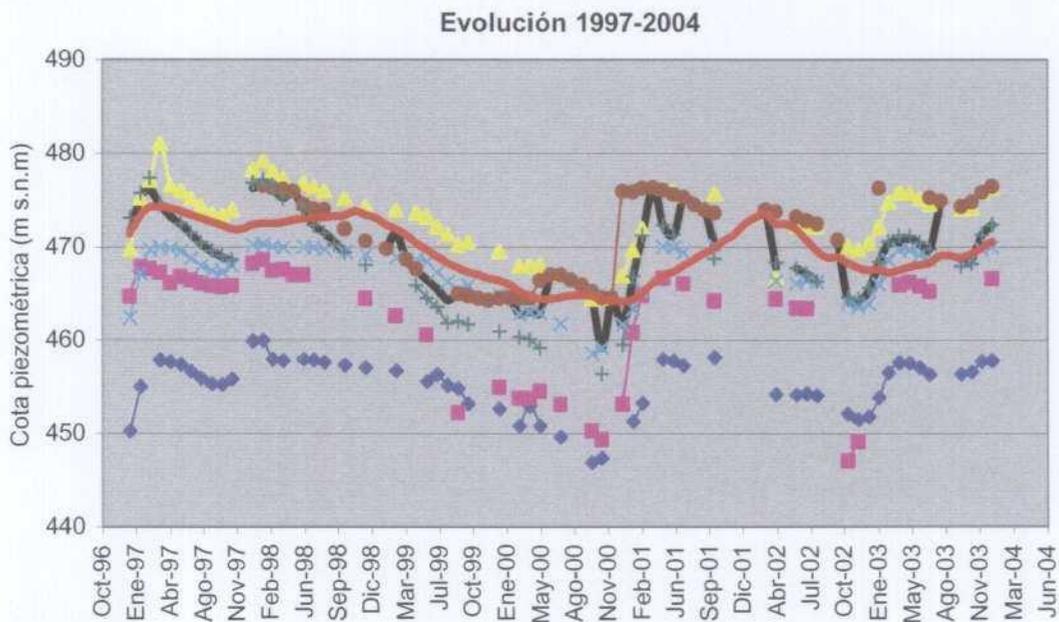


Figura 10.- Media móvil correspondiente a los valores medianos durante el periodo 1997-2004

Por último, para terminar de caracterizar la tendencia, se ha representado la desviación acumulada con respecto a la media correspondiente a la precipitación en la estación de Sierra Estepa y tanto a la media como a la mediana correspondiente al nivel piezométrico (1997-2004). Como puede observarse, al igual que en el caso anterior, se obtienen dos máximos separados por un mínimo aproximadamente coincidente con el año 2000. Así mismo, se observa como la respuesta del acuífero se produce con un cierto retraso con respecto a la precipitación y de una forma más amortiguada. Se ha representado el ajuste de la precipitación mediante una polinomial con objeto de suavizar la función y compararla con el nivel piezométrico (Figura 11).

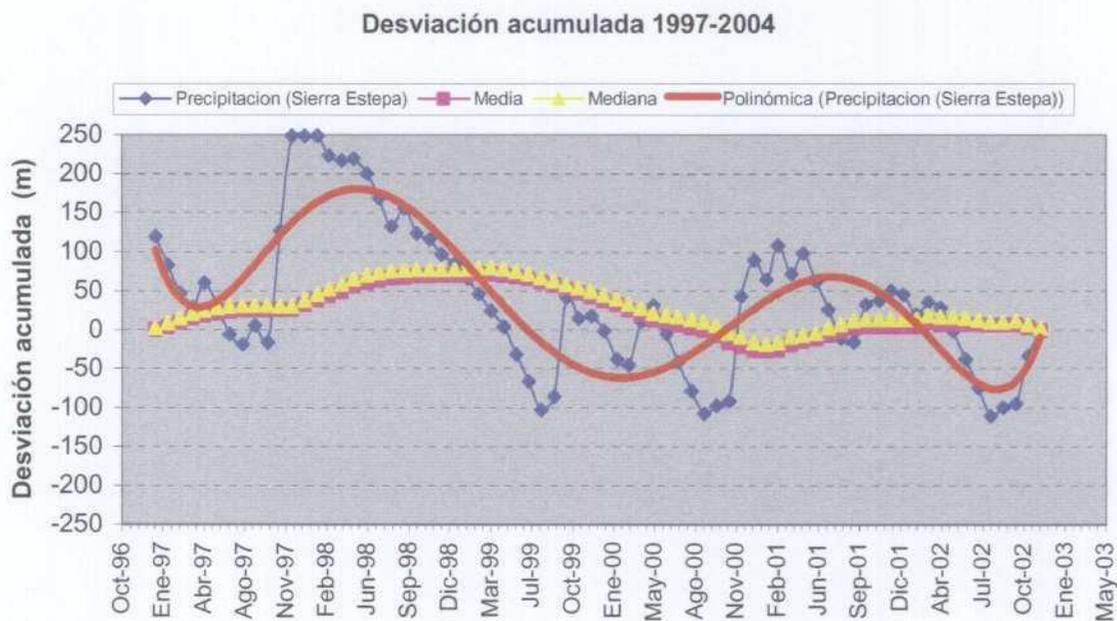


Figura 11.- Desviación acumulada de la precipitación, media y mediana del nivel piezométrico respecto a la media correspondiente al periodo 1997-2004.

Índices de situación piezométrica.

El análisis de la situación actual se realiza teniendo en cuenta los datos correspondientes tanto al último año de control (2003) como a la última campaña realizada en enero de 2004. Para ello, se representa el diagrama de frecuencias para 2003 respecto al valor medio del periodo 1997-2004 (EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY, 1998) (Figura 12) y se comparan los valores medidos en el año 2003 con los valores medios, medianos, mínimo, máximo y desviación típica correspondiente al periodo 1997-2003 (Figura 13). Así mismo, se

calculan los índices de situación piezométrica correspondientes a los periodos 1997-2004 y 1999-2004.

El diagrama de frecuencias obtenido a partir de la diferencia entre los valores medidos en 2003 con respecto al valor medio 1997-2003 pone de manifiesto una situación estable en los niveles piezométricos, observándose cómo los percentiles comprendidos entre 10 y 90 se encuentran siempre ± 2 m respecto al valor medio (Figura 12). Por otro lado, la comparación con la media, mediana, mínimo, máximo y desviación correspondiente al periodo 1997-2003 pone de manifiesto una situación próxima entre los valores correspondientes al 2003 y los valores medios y medianos obtenidos para dicho periodo, a excepción de los datos relativos al mes de agosto, donde los valores medidos superan ligeramente la desviación, situándose unos 5 m por encima de la media y coincidiendo con los valores máximos registrados hasta el momento (Figura 13).

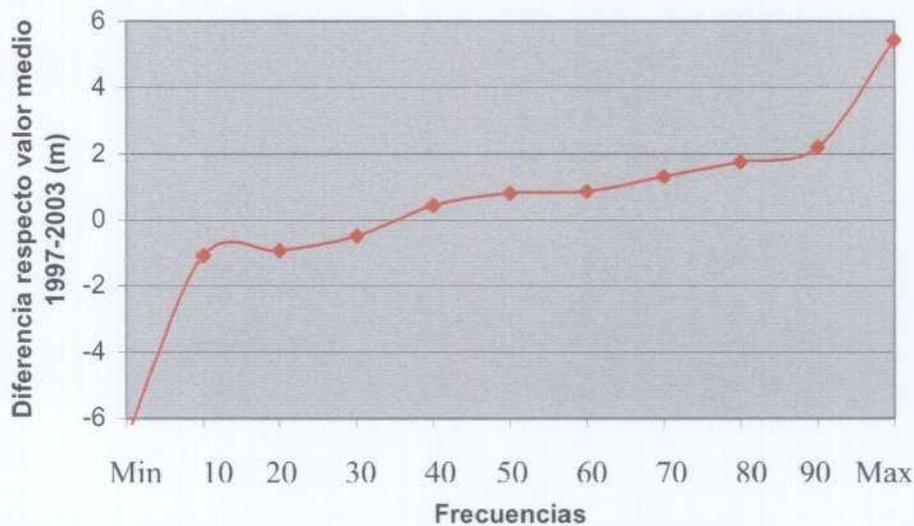


Figura 12.- Diagrama de frecuencias acumuladas correspondiente a la diferencia entre los valores medidos en 2003 respecto al valor medio para el periodo 1997-2003.

Finalmente y de acuerdo con las definiciones dadas anteriormente se han calculado los índices de situación piezométrica correspondientes a los periodos 1997-2004 (última serie continua de datos) y 1999-2004 (últimos 5 años). Dichos índices para el periodo 1997-2004 son de 0,73-0,88, mientras que para el periodo 1999-2004 son de 1-1,01 (Tabla 7), 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 7.

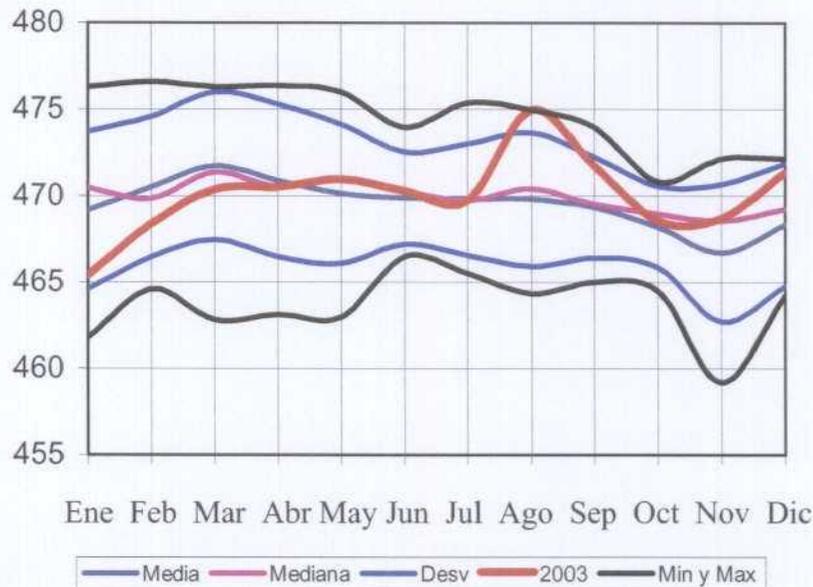


Figura 13.- Comparación entre los valores medidos en 2003 con la media, mediana, mínimo, máximo y desviación típica correspondiente al periodo 1997-2003.

Tabla 7.- Índices obtenidos en Sierra de Estepa relacionados con la variación en el almacenamiento.

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 de tendencia	Pendiente (regresión lineal)		-0,0012	0,0028
Índices situación piezométrica (enero 2004)	Índice de situación		0,73	1,00
	Índice de situación (percentiles)		0,88	1,01

Teniendo en cuenta todo lo comentado hasta el momento, el indicador sobre la variación en el almacenamiento de las aguas subterráneas vendría dado por todos los índices anteriores. El análisis de los mismos permite poner de manifiesto una tendencia constante en la evolución de los niveles, no observándose por lo tanto ningún signo de agotamiento en el agua subterránea.

3.3. INDICADORES SOBRE EL ESTADO CUALITATIVO

3.3.1. Indicador de calidad

Siguiendo la metodología anteriormente propuesta se han considerado inicialmente 13 análisis químicos correspondientes a la última campaña (octubre 2003) (MARTOS ET AL., 2004) y calculado el error en el balance iónico comparándolo con la conductividad eléctrica (CE), observándose un error admisible comprendido entre -1,48 y 5,76 % para una CE que oscila entre 310 y 587 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (CUSTODIO Y LLAMAS, 1983). La representación de dichos análisis (Figura. 14) pone de manifiesto la presencia de aguas bicarbonatadas cálcicas coherentes con la naturaleza del acuífero. Según el punto de control se observan además contenidos significativos en cloruro y sodio (1641-1-0036). En general se trata de agua aceptable para consumo humano (Directiva 98/93/CE y RD 140/2003) con bajo peligro de alcalinización y salinización del suelo. La DQO se encuentra entre 0,6 y 1 mg/L de O_2 (mayo-junio 2003), el contenido en NO_3 entre 16 y 70 mg/L (promedio 33,77 mg/L). En un análisis (1541-8-0047) el contenido en NO_2 es de 1,1 mg/L.

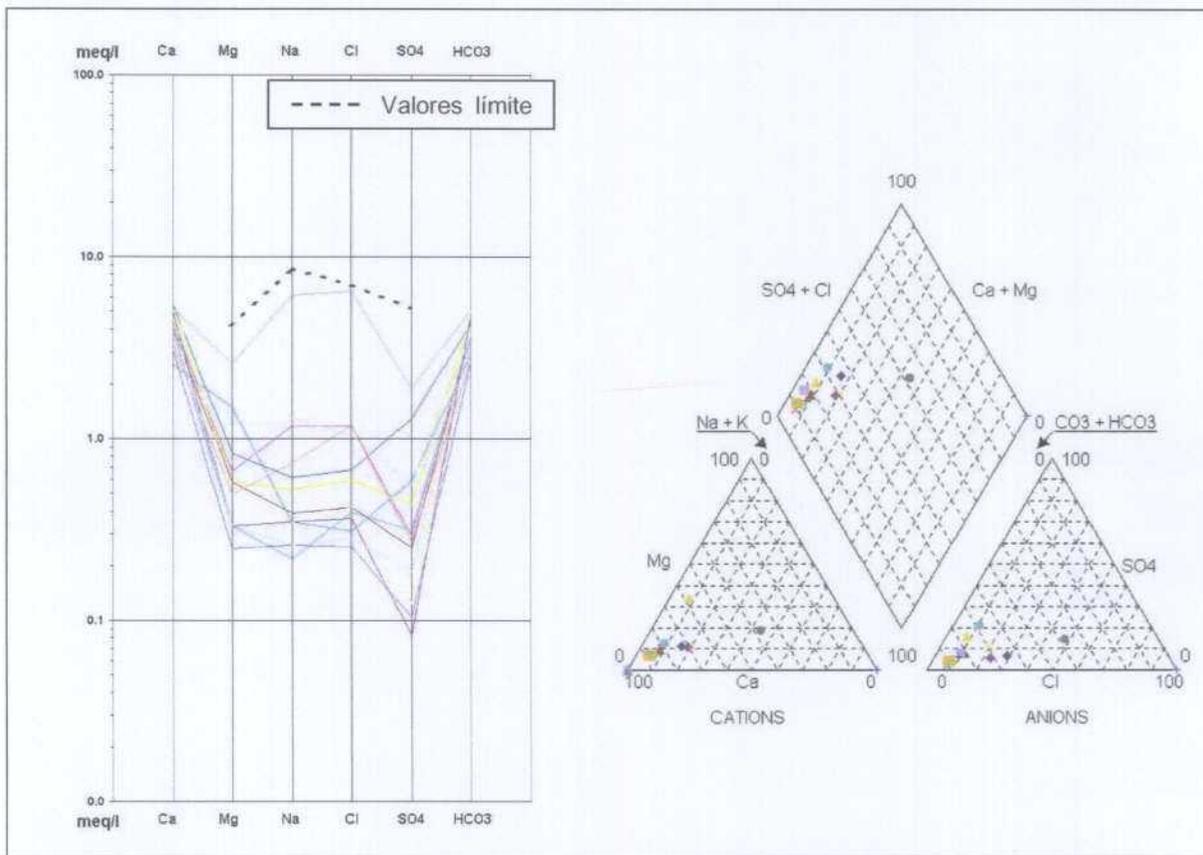


Figura 14.- Columnas logarítmicas verticales y diagrama de Piper (campaña octubre 2003)

Se han calculado los valores medios y máximos correspondiente a los parámetros fijados por la Directiva 98/93/CE. Si se consideran los valores promedio de todos los análisis realizados únicamente existe riesgo de contaminación en nitrato al observarse valores del 68% V_L , lo que supone una afección moderada (Tabla 1). Sin embargo, si se consideran los valores máximos obtenemos una contaminación grave en nitratos (140% V_L) y nitritos (220% V_L). Un caso particular lo constituye el punto de control 1641-1-0036, cuyo análisis pone de manifiesto un riesgo de contaminación en cloruro y sodio (92% y 71% V_L respectivamente). Por lo tanto, los indicadores de contaminación seleccionados son NO_3 , Cl y Na mientras que los de calidad son CE, HCO_3 y Ca. Con la finalidad de completar la descripción general de la calidad del agua subterránea en Sierra de Estepa se ha realizado un tratamiento conjunto de todos los análisis químicos disponibles en todos los puntos de control durante el periodo 1967-2003 obteniéndose los parámetros estadísticos (Tabla 8) y los diagramas de frecuencias acumuladas presentados en las Figuras 15 y 16.

Tabla 8.- Parámetros estadísticos durante el periodo 1967-2003 (media, mediana, desviación estándar, mínimo y máximo). (Unidades en mg/L)

	Cl	SO ₄	HCO ₃	Na	Mg	Ca	K	CE	DQO	pH	NO ₃	NO ₂	NH ₄	P ₂ O ₅	SiO ₂
Media	33,35	25,42	223,55	19,31	8,32	82,69	0,72	504,80	0,87	7,57	26,48	0,03	0,03	0,07	11,24
Mediana	21,00	22,50	231,50	12,00	7,00	84,00	1,00	497,00	0,70	7,60	22,00	0,00	0,00	0,00	7,40
Mínimo	6,00	0,00	92,00	4,00	1,00	28,00	0,00	269,00	0,10	7,20	4,00	0,00	0,00	0,00	2,10
Máximo	270,00	91,00	323,00	179,00	33,00	126,00	9,00	1100,00	10,40	8,50	144,00	1,10	0,49	3,40	85,00
Desviación	36,91	15,32	47,12	23,29	5,52	17,10	1,05	113,77	0,98	0,20	15,95	0,11	0,07	0,35	11,24

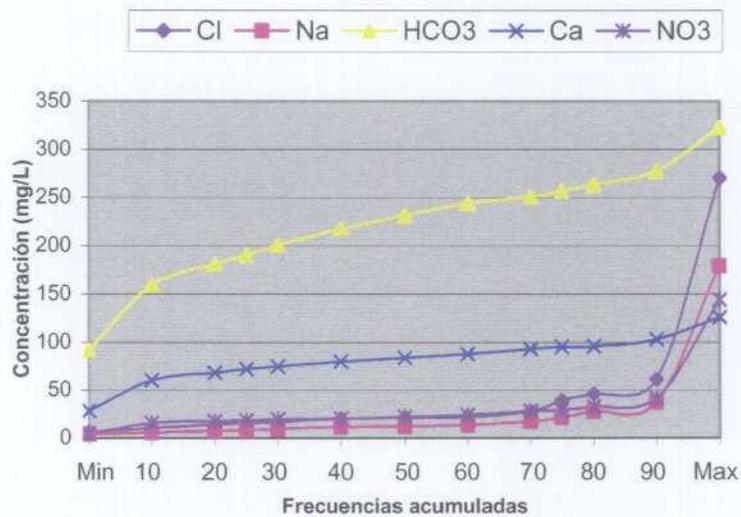


Figura. 15.- Diagramas de frecuencia (frecuencias acumuladas-concentración) durante 1967-2003.

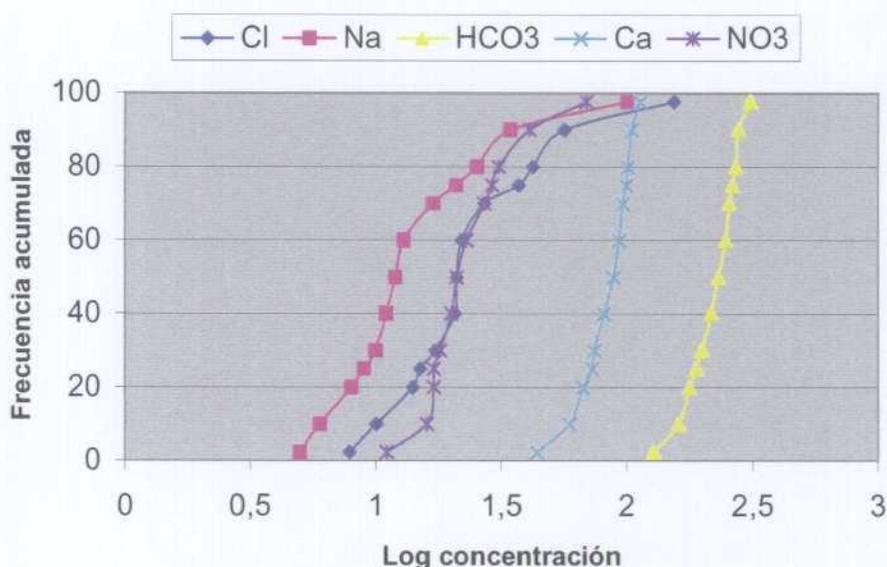


Figura. 16.- Diagrama de frecuencia (log concentración-frecuencias acumuladas) durante 1967-2003.

Como puede observarse, se confirma que el agua es bicarbonatada cálcica y que existe una significativa variabilidad en cloruro y sodio (mayor desviación estándar). Así mismo, se observa una distribución normal para el bicarbonato y el calcio, mientras que para el cloruro y el sodio se observa una mayor asimetría poniendo de manifiesto un proceso de mezcla con agua salina (Figuras 2 y 16). Por otro lado, la asimetría observada para el nitrato se atribuye a un proceso de contaminación. Los resultados obtenidos permiten mantener los indicadores de contaminación y calidad previamente establecidos.

Para la determinación de tendencias se comienza representando y analizando la evolución temporal de los parámetros anteriormente seleccionados (CE, Cl, NO₃, HCO₃, Ca y Na) en los puntos históricos de control del IGME 154140021, 154140024, 154180004, 164110001 y 164110037. Dicha representación se realiza tanto por parámetro (Figura 17) como por punto de control (Figura 18) pudiendo realizarse las observaciones siguientes: a) mayor contenido (1998-2001) y variabilidad en Cl y Na en los puntos 154180004 y 164110037 (situados en los márgenes del acuífero en contacto con margas y evaporitas del Cretácico Superior). En el punto 154180004 se observa además el mayor contenido en nitrato, b) predominio de bicarbonato y calcio con una buena correspondencia (paralelismo) entre ambos durante el periodo de control (en coherencia con la litología del acuífero) y c) correspondencia o paralelismo entre Cl y Na en los puntos de control próximos al Cretácico Superior (punto 1541-8-0004)

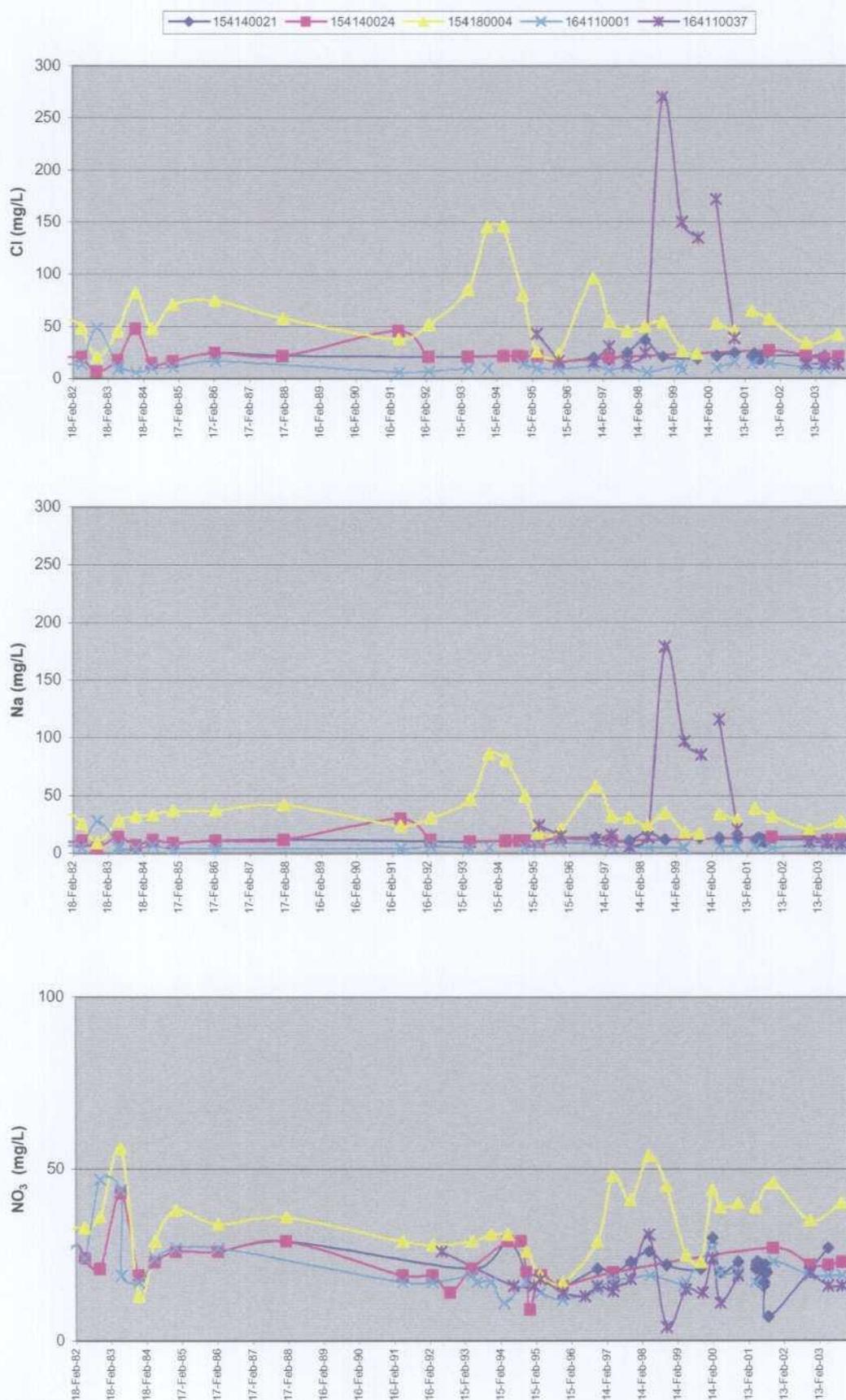
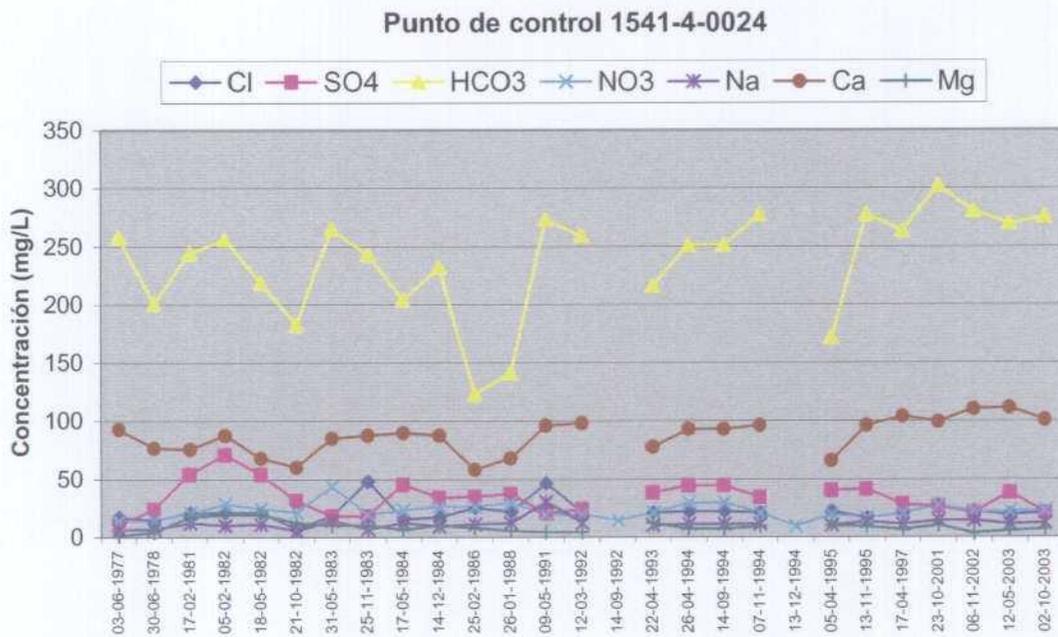
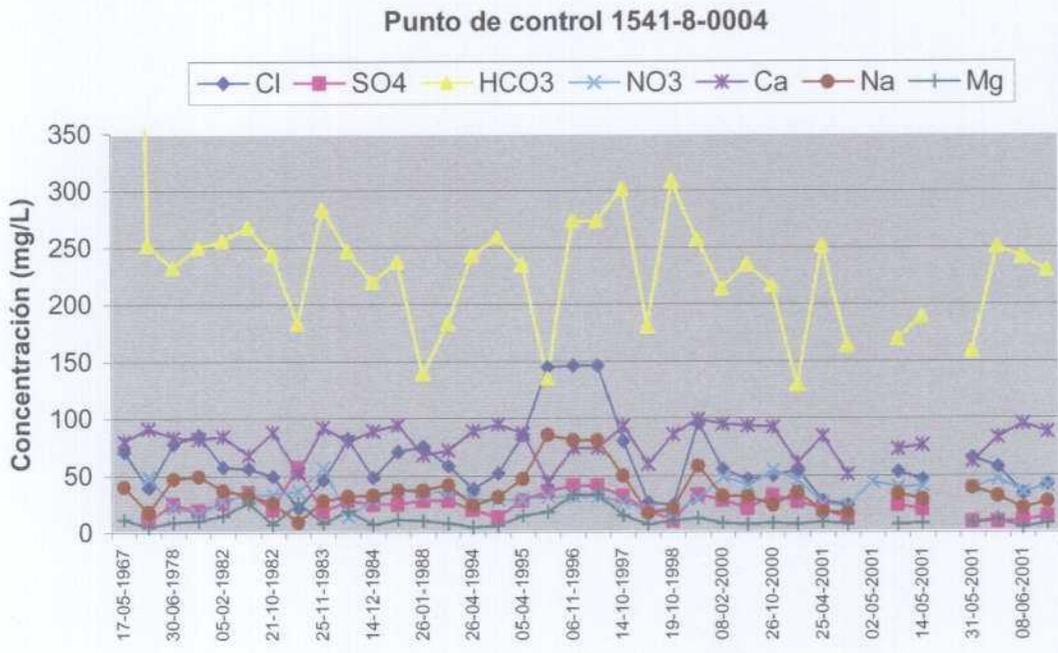


Figura 17.- Evolución temporal en Cl, Na y NO₃ en los puntos de control de la Sierra de Este



Fi

Figura 18.- Evolución temporal en los puntos de control 1541-4-0024 y 1541-8-0004 (Sierra de Estepa)

Posteriormente se calcula la evolución anual de los siguientes parámetros estadísticos: media, mediana, desviación estándar, mínimo, máximo y percentiles del 10, 20, 25, 30, 40, 60, 70, 75, 80 y 90% (EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY, 1998) para los indicadores de contaminación NO₃, Cl y Na durante el periodo 1991-2003 (Tabla 9). En la Figura 19 se representa la evolución anual de los percentiles correspondientes al 25, 50 y 75% para el nitrato, cloruro y sodio durante el periodo 1991-2003. Además, se ha calculado la pendiente de la recta de ajuste correspondiente a los valores de la mediana para cada uno de dichos parámetros. Las pendientes obtenidas son 0,54 (nitrato), -0,35 (cloruro) y - 0,25 (sodio). Todo ello parece indicar una cierta tendencia ascendente con respecto al contenido en nitrato a lo largo de los tres últimos años (aunque sin alcanzar los 50 mg/L) así como una tendencia estable en el contenido en cloruro y sodio (con valores ligeramente más altos durante el periodo 1998-2000).

Por último se han calculado los índices de calidad y evolución anteriormente definidos. El índice de calidad para el nitrato (0,68; entre 0,5 y 1) pone de manifiesto un riesgo de contaminación con una afección moderada. Los índices de calidad para el cloruro y sodio (0,15 y 0,11; entre 0 y 0,5) indican una afección en general leve (a excepción del punto 1641-0036). El índice de evolución para el nitrato es igual a 1, por lo que en la actualidad (octubre de 2003) se obtienen las máximas concentraciones durante el periodo de control. El índice de evolución para el cloruro y sodio es de 0,89 y 0,43, respectivamente. Un resumen de todos los índices relacionados con la calidad se presenta en la Tabla 10.

Tabla 10.- Resumen de todos los índices relacionados con la calidad en la Sierra de Estepa

	Parámetros e índices	NO₃	Cl	Na
Parámetros estadísticos	Media	26.48	33.35	19.31
	Mediana	22.00	21.00	12.00
	Mínimo	4.00	6.00	4.00
	Máximo	144	270	179
	Desviación típica	15.95	36.91	23.29
Índices de tendencia	Regresión lineal 1991-03	0.54	-0.35	-0.25
Índices de estado químico (octubre 2003)	Índice de calidad	0.68	0.15	0.11
	Índice de evolución	1.00	0.89	0.43

Tabla 9a.- Número de puntos de muestreo, análisis realizados y evolución anual de los parámetros estadísticos correspondientes al NO₃ durante 1991-2003.(Base de datos del IGME)

Año	Puntos	Nº análisis	Media	Desv	Min	10	20	25	30	40	50	60	70	75	80	90	Max
1991	3	3	21.67	5.25	17	17.4	17.8	18	18.2	18.6	19	21	23	24	25	27	29
1992	4	5	20.8	5.34	14	15.2	16.4	17	17.4	18.2	19	21.8	24.6	26	26.4	27.2	28
1993	4	7	22.14	5.22	17	17	17.4	18	18.6	19.8	21	21	22.6	25	27.4	29.8	31
1994	5	12	22.33	7.54	9	11.5	16.2	16.75	17.9	20	23	27.8	29	29	29	30.8	31
1995	5	11	16.36	2.23	12	14	14	15	16	16	16	17	18	18.5	19	19	19
1996	4	5	18.8	5.74	13	13.8	14.6	15	15.2	15.6	16	18	20	21	22.6	25.8	29
1997	5	10	36.6	37.26	16	17.8	18	18	18	19.2	20	21.2	28.4	36.5	42.4	57.6	144
1998	4	7	28.71	15.43	4	13	19.6	20.5	21.4	23.6	26	29	33.8	38	42.2	48.6	54
1999	4	7	18.71	3.95	14	14.6	15.2	15.5	15.8	16.4	17	19.4	21.4	22	22.6	23.8	25
2000	4	12	26.42	9.57	11	19.1	20	20	20	21.2	23.5	25.8	29.1	32.25	37.2	39.9	44
2001	4	25	21.32	7.33	7	17	17	17	17	19.2	21	21	22	23	23	25.4	46
2002	4	4	24.67	7.32	19	19.2	19.4	19.5	19.6	19.8	20	23	26	27.5	29	32	35
2003	18	30	38.23	22.13	16	19	21.6	22.25	23.7	26.2	32.5	40	40.3	41	46.8	61.9	112

Tabla 9b.- Número de puntos de muestreo, análisis realizados y evolución anual de los parámetros estadísticos correspondientes al Cl durante 1991-2003. (Base de datos del IGME)

Año	Puntos	Nº análisis	Media	Desv	Min	10	20	25	30	40	50	60	70	75	80	90	Max
1991	3	3	30.00	17.28	6	12.4	18.8	22	25.2	31.6	22	39.6	41.2	22	42.8	44.4	46
1992	4	3	26.67	18.80	7	9.8	12.6	14	15.4	18.2	14	27.2	33.4	14	39.6	45.8	52
1993	4	6	48.67	50.20	10	10	10	12.75	15.5	21	12.75	21	53	12.75	85	115	145
1994	5	9	54.89	52.12	14	19.6	21	21	21.4	22	21	22	56.8	21	106.4	146	146
1995	5	10	20.50	9.21	9	9.9	14.8	16	16	16.6	16	22	22.6	16	24.4	27.7	43
1996	4	4	36.00	34.76	12	13.2	14.4	15	15.6	16.8	15	19.2	27.6	15	50.4	73.2	96
1997	5	9	20.50	9.21	9	9.9	14.8	16	16	16.6	16	22	22.6	16	24.4	27.7	43
1998	4	7	66.14	84.65	6	15	21.8	23	24.2	29.8	23	44.8	50.8	23	53.2	140.4	270
1999	4	7	53.71	56.60	8	11	14.2	16	17.8	21	16	25.8	48.6	16	113.4	141	150
2000	4	8	47.88	48.94	10	14.2	18.4	20.5	22.3	24.4	20.5	40.4	45.3	20.5	50.2	88.7	172
2001	4	25	23.88	11.29	14	19	19	19	20	21	19	21.4	22	19	23	25.8	65
2002	4	4	20.00	9.17	10	11.2	12.4	13	13.6	15.6	13	20.4	23.2	13	26.8	30.4	34
2003	18	30	30.60	39.09	9	10.9	13.8	14	14.7	15	20	22.8	34.2	37	39.6	43.4	230

Tabla 9c.- Número de puntos de muestreo, análisis realizados y evolución anual de los parámetros estadísticos correspondientes al Na durante 1991-2003. (Base de datos del IGME)

Año	Puntos	Nº análisis	Media	Desv	Min	10	20	25	30	40	50	60	70	75	80	90	Max
1991	3	3	19.33	11.12	4	8	12	14	16	20	24	25.2	26.4	27	27.6	28.8	30
1992	4	3	16.33	10.66	6	7.2	8.4	9	9.6	10.8	12	15.8	19.6	21.5	23.4	27.2	31
1993	4	6	27.00	30.20	4	4.5	5	6.25	7.5	10	10	10	28.5	37.75	47	66.5	86
1994	5	9	30.22	29.87	5	9.8	11	11	11	11	11	11	34.4	50	62.4	81	81
1995	5	10	13.90	5.17	7	8.8	9.8	10	10	11.8	13	13.8	15.6	16.5	17.8	21.3	24
1996	4	4	22.75	20.44	8	9.2	10.4	11	11.6	12.2	12.5	12.8	17.5	24.25	31	44.5	58
1997	5	9	14.22	9.77	5	5.8	6	6	7.6	10.2	11	11	14	16	22	31.2	32
1998	4	7	41.00	57.03	5	9.2	12.4	13	13.6	15.6	18	21.6	26.2	29.5	32.8	92.6	179
1999	4	7	34.29	36.33	5	5	6.6	9	11.4	14.6	17	17.6	31.4	51.5	71.6	89.8	97
2000	4	8	29.75	33.95	6	6	8.8	11.25	13	13	17	22.6	28.2	30.25	32	58.6	116
2001	4	25	13.24	6.91	5	10.4	11	11	11	11.6	11	12	12	13	13	13.6	39
2002	4	4	12.33	6.34	6	6.8	7.6	8	8.4	9.2	10	12.2	14.4	15.5	16.6	18.8	21
2003	18	30	18.70	24.41	5	6	8	8	8.7	9	11.5	13.4	18.6	20.75	25.4	30.1	142

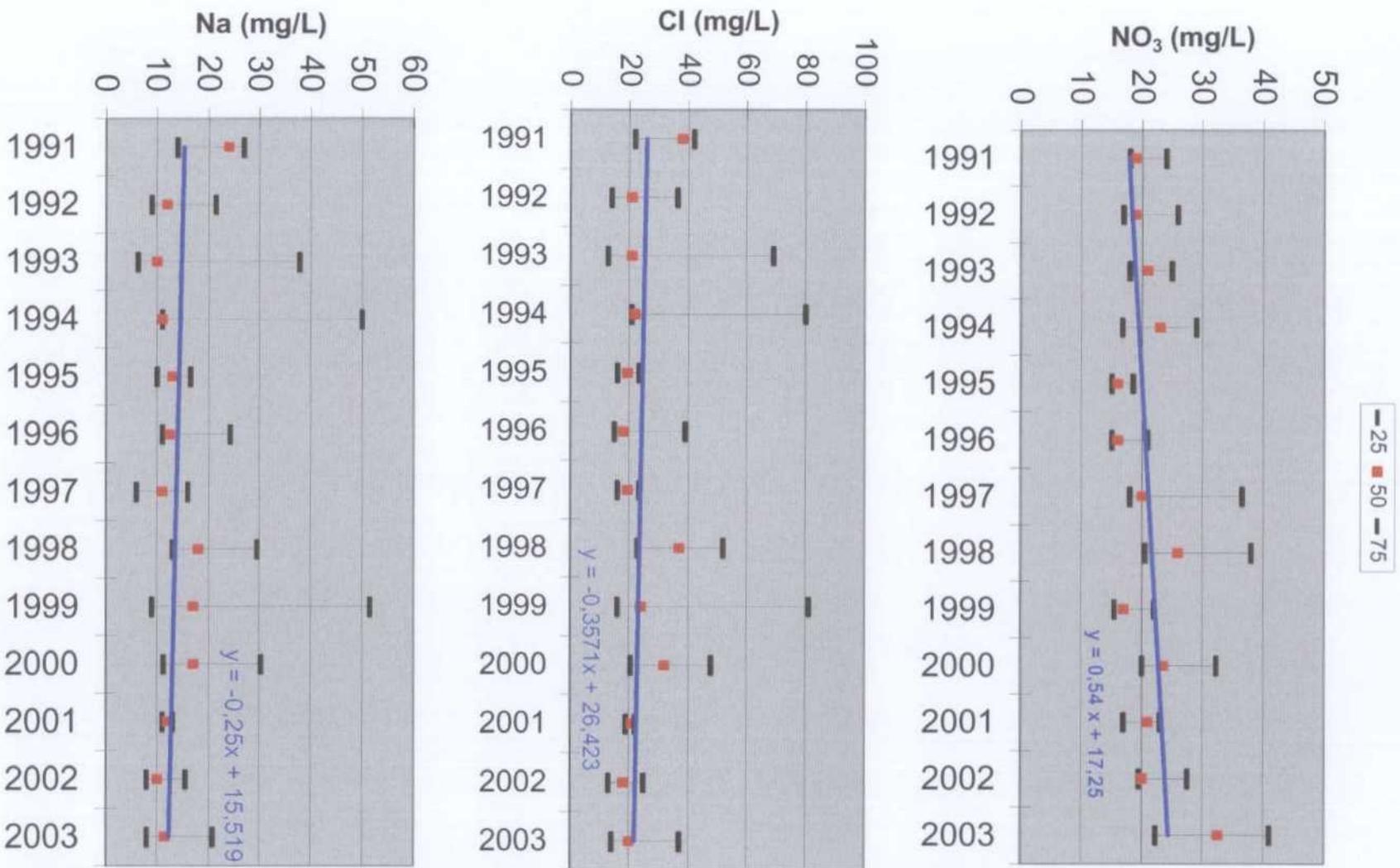


Figura 19.- Evolución de percentiles y regresión lineal de la mediana (1991-2003)

4. CONCLUSIONES

La integración y análisis conjunto de todos los indicadores presentados permite concluir que en el acuífero Sierra de Estepa se produce un uso sostenible del agua subterránea teniendo en cuenta tanto la cantidad como la calidad de los recursos disponibles. Dicha sostenibilidad queda reflejada en las tendencias de evolución obtenidas tanto para los niveles piezométricos como para los principales parámetros químicos del agua. Únicamente durante periodos secos (tasa de infiltración del 20%) y/o para un tiempo de extracción de las reservas utilizables inferior a 3 años puede producirse una situación no sostenible en cuanto a la cantidad. Con respecto a la calidad, existe una cierta tendencia al aumento así como un riesgo de contaminación en nitratos que conviene controlar. Así mismo, un aumento significativo y desproporcionado de la extracción podría conllevar un cierto riesgo de contaminación en cloruro y sodio en áreas próximas a los materiales evaporíticos del Cretácico Superior y/o Keuper.

5. REFERENCIAS

BASELINE, 1999.- BaSeLiNe. Natural BaSeLiNe.quality in European aquifers. A basis for aquifer management. <http://www.bgs.ac.uk/hydrogeology/baseline/europe/EUBaseline.pdf>

BOLETÍN OFICIAL DEL ESTADO, 2001.- Real Decreto Legislativo 1/2001, de 20 de julio, por el que se aprueba el Texto Refundido de la Ley de Aguas. *BOE número 176, de 24 de julio.*

BOLETÍN OFICIAL DEL ESTADO, 2003.- Real Decreto Legislativo 140/2003, de 7 de febrero, por el que se establecen los criterios sanitarios de la calidad del agua de consumo humano. *BOE número 45, de 21 de febrero.*

COMISIÓN DE LAS COMUNIDADES EUROPEAS, 2003.- Propuesta de Directiva del Parlamento Europeo y del Consejo sobre la protección de las aguas subterráneas de la contaminación. COM 2003/0210 (COD). 19.9.2003.

COSTA, 2002.- Vigilancia y seguimiento de la calidad del agua subterránea. Visión desde la Administración. *Jornadas sobre presente y futuro del agua subterránea en España y la Directiva Marco Europea.* AIH-GE. Zaragoza 2002.

CUSTODIO, E Y LLAMAS, M, 1983. Hidrología Subterránea. Ediciones Omega, 2 Vols.:1-2350. barcelona.

DAS (GWD), 2003.- Draft 1.0. Communication from the Commission. Proposal for a Directive of the European Parliament and of the Council establishing strategies to prevent and control pollution of groundwater. Brussels, 20.02.2003.

EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY, 1998.- The European Environment Agency's Monitoring and Information Network for Inland Water Resources. Technical Guidelines for Implementation. Technical Report N° 7. <http://www.fcih.org/info/aih-ge.htm>

GROUNDWATER INDICATORS WORKING GROUP, 2004.- Development of groundwater indicators for second edition of the World Water Development Report. Third Version (Draft). Paris, Abril 2004.

INSTITUTO GEOLÓGICO Y MINERO DE ESPAÑA, 1972. - Mapa de Vulnerabilidad a la Contaminación de los Mantos Acuíferos de la España Peninsular, Baleares y Canarias. Escala 1:1.000.000.

JUNTA DE ANDALUCÍA, 2000.- Inventario y caracterización de los regadíos en Andalucía. Consejería de Agricultura y Pesca. CD, mem. 25 pp.

LAMBÁN, L.J; PERNÍA, J.M, 2004.- 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.

MARTOS, S; BROS, T; LAMBÁN, L.J., DÍAZ, A., MARTÍN, M., 2004.- Análisis preliminar de la hidrogeoquímica del acuífero carbonatado de la Sierra de Estepa (Sevilla). *Hidrogeología y Recursos Hidráulicos XXVI*: 13-26. Zaragoza.

MANZANO, M; CUSTODIO, E; NIETO, P, 2004.- El fondo natural del agua subterránea. Definición, establecimiento y papel en la Directiva Marco del Agua. *Hidrogeología y Recursos Hidráulicos XXVI*: 223-237. Zaragoza.

MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS, TRANSPORTE Y MEDIO AMBIENTE, 1994.- Inventario de Recursos de Agua Subterránea en España (2ª Fase). Vulnerabilidad de Acuíferos en la Cuenca del Guadalquivir.

PERNÍA, J.M Y CORRAL, M, 2001.- Análisis del llenado de los acuíferos en función de diferentes periodos históricos de referencia. *Hidrogeología y Recursos Hidráulicos. XXIII*: 3-12. IV Simposio de Hidrogeología (Murcia).

UNIÓN EUROPEA, 1998.- Directiva 98/93/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 3 de noviembre de 1998, relativa a la calidad de las aguas destinadas al consumo humano. DO L 330/32 de 5-12-1998.

VÁZQUEZ MORA, M., MARTÍN MACHUCA, M. Y 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.