

LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS Y LA PLANIFICACIÓN HIDROLÓGICA

Congreso hispano-luso sobre las aguas subterráneas en el Segundo Ciclo de Planificación Hidrológica

28 - 30 de noviembre de 2016 - Madrid



Asociación Internacional de Hidrogeólogos
Grupo Español



Asociación Internacional de Hidrogeólogos
Grupo Portugués

Patrocinan:



Colaboran:



FUNDACIÓN CENTRO INTERNACIONAL
DE HIDROLOGÍA SUBTERRÁNEA



Grupo Español de la AIH

Luis Martínez Cortina y Pedro Martínez Santos (editores)

Las aguas subterráneas y la planificación hidrológica

Ponencias y comunicaciones presentadas al Congreso Hispano-Luso sobre
"Las aguas subterráneas en el segundo ciclo de planificación hidrológica"
Madrid, 28–30 de noviembre de 2016

Autor:

*Asociación Internacional de Hidrogeólogos – Grupo
Español*

Editores:

*Luis Martínez Cortina
Pedro Martínez Santos*

Asistente editorial:

José Manuel Nieto López

© 2016 Asociación Internacional de Hidrogeólogos – Grupo Español
Gran Capitán s/n, 08034 – Barcelona
Edición digital, noviembre de 2016. Edición electrónica: www.aih-ge.org
ISBN: 978-84-938046-5-7

Portada: Captaciones de agua subterránea en el acuífero aluvial del Bajo Guadalhorce
(Provincia de Málaga)

Índice de contenidos

Presentación	17
Ponencias del Congreso	19
<i>Tema 1. Caracterización de las aguas subterráneas</i>	
Evolución en la delimitación y caracterización de las masas de agua subterránea en España desde la entrada en vigor de la Directiva Marco del Agua	
<i>Loreto Fernández</i>	21
A evolução da cartografia hidrogeológica em Portugal	
<i>Renata Santos y Ana Paula Pereira</i>	37
<i>Tema 2. Presiones e impactos en las masas de agua subterránea. Vinculación con los programas de control y seguimiento</i>	
Águas subterrâneas em Portugal no 2º ciclo dos Planos de Gestão de Região Hidrográfica	
<i>Ana Rita Lopes</i>	39
Contaminantes emergentes en aguas subterráneas: origen, presencia y aspectos normativos	
<i>Lucila Candela</i>	41
<i>Tema 3. Definición y determinación del estado químico y cuantitativo de las masas de agua subterránea</i>	
El estado químico y cuantitativo en las masas de agua subterránea: retos y tareas pendientes	
<i>Josep Fraile, Xavier Carreras, Teresa Garrido y Núria Micola</i>	49
<i>Tema 4. Zonas protegidas. Caracterización, protección y gestión</i>	
Zonas protegidas: caraterização, proteção e gestão	
<i>António Chambel</i>	63

Tema 5. Papel de las aguas subterráneas en la gestión y satisfacción de las demandas y en la gestión de las sequías

- Seguimiento del control y la gestión de la demanda del agua subterránea en el Alto Guadiana
Alberto Fernández Lop 65
- El papel de las aguas subterráneas en la satisfacción de demandas y en la gestión de sequías en la demarcación hidrográfica del Júcar
Teodoro Estrela y Arancha Fidalgo 77

Tema 6. Gobernanza de aguas subterráneas

- Caracterização territorial e institucional das “massas de água subterrânea” em Portugal. Uma proposta para a sua actualização sistemática
José Paulo Monteiro y Ricardo Martins 91

Tema 7. Aspectos económicos relacionados con el uso de aguas subterráneas

- ¿Cuánto cuesta mejorar la calidad ambiental de las aguas subterráneas en España?
Daniel Cabello, Alberto del Villar y Josefina Maestu 113

Ponencia de clausura

- Las aguas subterráneas en el segundo ciclo de planificación en España: avances y retos de futuro
Luis Martínez Cortina, Víctor Arqued y Javier Ruza 123

Comunicaciones libres..... 145

- Repercusiones de una atención tardía al conocimiento hidrogeológico en la gestión de los acuíferos costeros del sur de Sierra de Gádor – Campo de Dalías (Almería, España)
P. Domínguez; P.A. Franqueza y M.A. Fernández 147
- La estimación de la recarga natural al acuífero del norte de Gran Canaria: comparación de diferentes metodologías
M.C. Cabrera; F. de Paoli; G. Naranjo; T. Cruz-Fuentes; M.P. Hernández-Quesada; E. Estévez; L.F. Martín y E. Custodio 155
- Evaluación de recursos hídricos y balance hidrogeológico en acuíferos karsticos de montaña. Caso de la Sierra de Grazalema (Cádiz, España)
J.F. Martín Rodríguez; D. Sánchez García; M. Mudarra; B. Andreo; M. López Rodríguez y M.R. Navas..... 163

Efectos sobre la planificación hidrológica de los procesos de acumulación/fusión de nieve y su incidencia en el régimen de caudales de estiaje ante escenarios de cambio climático: el caso del Alto Tajo y la cabecera del Guadiela <i>J. Mora; I. Menéndez Pidal y E. Sanz Pérez</i>	171
Potencial de la técnica InSAR para estudiar la evolución espacio temporal de la deformación y los niveles piezométricos en el acuífero terciario detrítico de Madrid <i>P. Ezquerro; M. Béjar-Pizarro; G. Herrera; R. Tomás; C. Guardiola-Albert; J.M^a Ruiz Hernández; J.A. Fernández Merodo; M. Marchamalo y R. Martínez Marín</i>	179
Variabilidad espacio/temporal de las masas de aguas superficiales dependientes de las aguas subterráneas en áreas semiáridas. El caso del río Andarax (Almería) <i>F. Navarro; F. Sánchez Martos; J. Gisbert; L. Molina y J.P. Rigol</i>	187
Recurso natural o recarga en la gestión del sistema acuífero Almonte-Marismas (Doñana) según la revisión del Plan Hidrológico (2016-2021) de la demarcación hidrográfica del Guadalquivir <i>C. Guardiola-Albert; C. Mediavilla; H. Aguilera; N. Fernández Naranjo; F. Ruiz Bermudo y N. García Bravo</i>	193
Estimación de la recarga mediante la modelación numérica del balance de agua en el suelo en el Parque Nacional de Ordesa y Monte Perdido (Huesca, España) <i>J. Jódar; L.J. Lambán y E. Custodio</i>	201
Evaluación de los recursos hídricos y de los efectos del cambio climático en las aguas subterráneas en el municipio de Abegondo (Galicia) <i>J. Samper; B. Pisani; A. Naves; L. Montenegro; A. Mon; J. Fernández Águila; R. Arias; R. Piñeiro; M. Velo y C. Ameijenda</i>	209
Análisis paramétrico y numérico de las oscilaciones piezométricas en acuíferos libres y su relevancia para la estimación de la recarga a partir de datos piezométricos <i>J. Fernández Águila; J. Samper; B. Pisani y A. Naves</i>	219
Modelo numérico del acuífero Plana de Valencia Sur (Valencia-España). Determinación de su comportamiento hidrodinámico en situación de estrés hídrico y valoración medioambiental <i>B.J. Ballesteros y J.O. Navarro</i>	227
Criterios de actuación por presiones e impactos de subproductos agropecuarios y residuos industriales en “Zonas hidrogeológicas de influencia” (ZHIN) <i>F.J. García Mariana</i>	237
Evolución de las redes de control del estado de las aguas subterráneas en la demarcación hidrográfica del Duero. Parte española <i>E. Rodríguez Jiménez</i>	245

Distribución de nitratos e incertidumbre espacial asociada – Caso de estudio del acuífero del Páramo de Cuéllar, España <i>L. Alonso; M.T. Albuquerque; R. Martínez Alegría; I. M. Antunes y J. Taboada</i>	251
Identificación de factores geológicos que controlan la distribución de arsénico y otros elementos traza asociados en las masas de agua del sur de la cuenca del Duero (Proyecto HidroGeoTox) <i>E. Giménez Forcada; A. Fernández Fernández; M. García Rodríguez; D. Gómez Ortiz; C. Kohfahl; M.T. López Bahut; M.C. Moro; M.C. Rey; S. Timón; M. Vega y P. Smedley</i>	259
Avaliação da vulnerabilidade espacial na água subterrânea <i>I.M. Antunes; M.T. Albuquerque y M.F. Seco</i>	269
El antiinflamatorio naproxeno: sorción, biodegradación y tratamiento a través de materiales reactivos <i>V. Martínez-Hernández; M. Leal; R. Meffe; I. de Bustamante y J. Lillo</i>	277
Estudio de contaminantes emergentes en acuíferos detríticos de la cuenca hidrográfica del río Guadalhorce (Málaga) <i>I. Vadillo; L. Candela; P. Jiménez Gavilán; B. Urresti y C. Corada</i>	283
Interpretación de los resultados del estudio sobre la presencia y evolución de antibióticos en las aguas subterráneas del Baix Fluvià (Alt Empordà, Girona) en el contexto de la planificación hidrológica <i>J. Mas Pla; M. Boy Roura; A. Menció; L. Portell; D. Brusi; M. Villagrasa; M. Petrovic; M. Gros; I. Lekunberri; M. Fillol y C.M. Borrego</i>	289
IMPRESS: analisis de presiones e impactos en las masas de agua del Distrito de Cuenca Fluvial de Catalunya <i>N. Micola; X. Carreras; T. Garrido y J. Fraile</i>	297
Determinación del estado químico de una masa de agua subterránea mediante la elaboración de intervalos estadísticos. Aplicación a la plana de Vinaroz <i>J. Grima</i>	311
Generación de colapsos asociados a la explotación de aguas subterráneas en un acuífero kárstico de Cantabria <i>M. Meléndez; T. Bros; M.T. Martínez-Antón; J.M. Pardo; J. Mulas; J. Remondo y J. Bonachea</i>	319
Recursos hídricos y abastecimiento humano. Protección y su integración en la ordenación del territorio. Aspectos normativos y metodológicos <i>A. Jiménez Madrid; C. Martínez Navarrete; F. Carrasco y P. Jiménez Fernández</i>	327
Estudio hidrogeológico, vulnerabilidad y protección de las captaciones de los suministros rurales en Abegondo (A Coruña) <i>J. Samper; A. Naves; B. Pisani; L. Montenegro; A. Mon; J. Fernández Águila; R. Arias; R. Piñeiro; M. Velo y C. Ameijenda</i>	335

Caracterização de charcos temporários mediterrânicos como ecossistemas dependentes de águas subterráneas na costa oeste do Alentejo <i>N. Salvador y J.P. Monteiro</i>	345
Definição dos ecossistemas dependentes de águas subterráneas nos planos de bacia do sul de Portugal <i>A. Chambel y J.P. Monteiro</i>	353
Seguimiento mediante teledetección de la superficie inundada y la vegetación de las lagunas del Parque Nacional de Doñana entre 1983/84 y 2014/15 <i>V.J. Cifuentes; R. Escudero; J. Castaños y M.P. Porcel</i>	361
Caracterización hidroquímica de las salinas litorales de Santa Pola, La Mata y Torrevieja (provincia de Alicante) <i>J.M. Fornés; A. de la Hera; R. Morales; A. de la Losa; J.M. Murillo; J.J. Durán; J.M. Soria; J.E. Tent-Manclús; J.A. Hernández Bravo y M. Fernández Mejuto</i>	365
Aspectos normativos de los aprovechamientos geotérmicos someros. La experiencia del acuífero urbano de Zaragoza <i>E.A. Garrido; A. García-Gil; C. Arrazola; O. Escayola; J. San Román; F. Delgado; J.A. Sánchez Navarro; E. Vázquez y F.J. Elorza</i>	373
Aproximación al abastecimiento poblacional de las urbanizaciones en la parte española de la demarcación hidrográfica del Tajo <i>M. Martínez Parra</i>	381
Indicadores para una operación eficiente en la explotación de aguas subterráneas. Caso del sistema de abastecimiento de la Comunidad de Madrid <i>E. Sánchez Sánchez y S. Gómez Gálvez</i>	391
Análisis preliminar de diferentes índices de sequía en el marco de la planificación hidrológica. El caso del sistema de explotación de la Costa del Sol occidental <i>J. Martín Arias; M. Argamasilla; B. Andreo y P. Martínez Santos</i>	399
Experiencias piloto en depuración y reutilización mediante filtros verdes intensivos <i>A. Pérez Barbón; M. Tortuero; J. Lillo e I. de Bustamante</i>	407
Análisis de situación en la metodología de evaluación del estado de las aguas subterráneas y requerimientos futuros dentro del programa de trabajo 2016-2018 en la estrategia común europea de implementación de la Directiva Marco del Agua <i>I. Gimeno y B. Muñoz</i>	415
Trabajos en aguas subterráneas para la elaboración de los planes hidrológicos de cuatro demarcaciones turcas de acuerdo a los requerimientos de la Directiva Marco del Agua <i>C. Macías; R. Martínez Gamo; E.R. Crespo; M.C. Martín Moro J. Martínez Cuevas y M.J. Minaya</i>	423
30 años de la Ley de Aguas y 15 años de la Directiva Marco del Agua europea. Lecciones aprendidas en cuanto al conocimiento y gobernanza de las aguas subterráneas <i>J.M. Fornés; A. de la Hera; M.R. Llamas y E. Custodio</i>	429

Un paso importante en la gestión de las aguas subterráneas en España: la constitución de la asociación de usuarios de aguas subterráneas del acuífero detrítico de Madrid <i>G. Ariño; J. Codina; J.M. Fornés; J.A. López Geta; M.R. Llamas; J.L. Molina; M. Sastre y F. Villarroya</i>	435
Técnica de remediación in situ de un suelo y un acuífero contaminado. Caso de estudio en el aluvial del Jarama <i>V. Rodríguez; E. Montero; F. Villarroya; A. Santos y A. Romero</i>	443
Efecto de una recarga artificial utilizando los efluentes de la edar en el acuífero costero río Verde (Almuñécar, Granada) <i>M.L. Calvache</i>	451
Valorização das águas subterrâneas da bacia hidrográfica da ribeira do poço das patas (Porto, Portugal): otimização da gestão integrada dos recursos “água e território” <i>R. Santos; A.P. Pereira; M.T. Teles y L. Borges</i>	459
Dificultades para la aplicación de los planes de gestión de sequías en aguas privadas subterráneas no inscritas en el catálogo de aguas privadas <i>M. Martínez Martínez</i>	471
Reutilización de aguas regeneradas en el marco de la planificación hidrológica <i>V. Martínez Hernández</i>	479
Costo de la desalobración de aguas subterráneas con pequeñas plantas desalobradoras ($\leq 2200 \text{ m}^3 / \text{ día}$) y su uso en el Campo de Cartagena <i>J.O. Aparicio; L. Candela y O. Alfranca</i>	487
Pósteres/resúmenes	495
Modelización Geológica 3D como apoyo a la planificación hidrológica: masas de agua subterránea de la demarcación de Melilla <i>A. Ruiz Constán; C. Marín; J.C. Rubio; J. Facenda; C. Martín Montañés; J. Jiménez Sánchez; J. Galindo; F.J. Martínez Moreno y A. Pedrera</i>	497
Variabilidad espacio/temporal de las masas de aguas superficiales dependientes de las aguas subterráneas en áreas semiáridas. El caso del río Andarax (Almería) <i>F. Navarro; F. Sánchez Martos; J. Gisbert; L. Molina y J.P. Rigol</i>	499
Redefinición de la red de control de aguas subterráneas en el ámbito de la demarcación hidrográfica del Júcar en el segundo ciclo de planificación hidrológica <i>C. Montoro; T. Alabadí y M. Mañá</i>	501
Modelización hidrológica diaria en la laguna de Santa Olalla (manto eólico de Doñana). Periodo: enero 2015 a marzo 2016 <i>A. Fernández Ayuso; M. Rodríguez Rodríguez; F. Moral y J. Benavente</i>	503

La optimización energética en las aguas subterráneas <i>E. Sánchez Sánchez y J. Henche</i>	505
Proyecto de estudio y detección de contaminantes emergentes en cuatro cuencas antropizadas del sur de España <i>I. Vadillo; S. Ballester; P. Jiménez Gavilán; J.L. Aranda; J. Benavente y B. Urresti</i>	507
Modelo de parámetros agregados precipitación-escorrentía de las subcuencas media y alta del río Pas (Cantabria, España) <i>J. G. Heredia y M. L. Meléndez</i>	509
Índice de autores	511

**POTENCIAL DE LA TÉCNICA INSAR PARA ESTUDIAR LA EVOLUCIÓN ESPACIO
TEMPORAL DE LA DEFORMACIÓN Y LOS NIVELES PIEZOMÉTRICOS EN EL
ACUÍFERO TERCIARIO DETRÍTICO DE MADRID**

**Pablo EZQUERRO*, Marta BÉJAR-PIZARRO*, Gerardo HERRERA*, Roberto
TOMÁS**, Carolina GUARDIOLA-ALBERT*, José M. RUIZ HERNÁNDEZ***, José
A. FERNÁNDEZ MERODO*, Miguel MARCHAMALO SACRISTÁN**** y Rubén
MARTÍNEZ MARÍN******

(*) Geohazards InSAR laboratory and Modeling group (InSARlab), Geoscience research department, Geological Survey of Spain (IGME), Alenza 1, E-28003 Madrid, Spain.
p.ezquerro@igme.es, m.bejar@igme.es, g.herrera@igme.es, c.guardiola@igme.es,
jose.fernandez@igme.es

(**) Departamento de Ingeniería Civil, Escuela Politécnica Superior, Universidad de Alicante, P.O. Box 99, 03080 Alicante, Spain. roberto.tomas@ua.es

(***) Área de Hidrogeología General y Calidad del agua, Geoscience research department, Geological Survey of Spain (IGME), Ríos Rosas 23, E-28003 Madrid, Spain.
jm.ruiz@igme.es

(****) Technical University of Madrid. Laboratorio de Topografía y Geomática. ETSI Caminos, Canales y Puertos C/ Profesor Aranguren s/n, 28040 Madrid, Spain.
miguel.marchamalo@upm.es, ruben.martinez@upm.es

RESUMEN

El acuífero terciario detrítico de Madrid (ATDM) refuerza el suministro de agua a parte de la Comunidad Autónoma de Madrid, incluyendo Madrid, la ciudad más poblada de España (3.2 millones de habitantes en el área metropolitana). Entre 1992 y 2011 el acuífero experimentó cinco ciclos de extracción asociados a varios periodos de sequía. En este trabajo se analiza la deformación del terreno producida por la extracción de agua y su posterior recuperación utilizando para ello la técnica de interferometría de radar (InSAR). Para ello se han analizado series temporales InSAR y datos piezométricos en 19 pozos de extracción durante el periodo 1997-2010. La correlación entre la deformación del terreno y la piezometría en los pozos analizados es superior al 85%, siendo pues posible modelizar esta relación asumiendo un comportamiento elástico del acuífero. Para construir los modelos elásticos, primero se estima el coeficiente de almacenamiento elástico (S_{ke}) para cada pozo, que muestra un gradiente N-S correlacionado con un cambio litológico gradual en el acuífero. Este coeficiente es utilizado después para predecir la deformación del terreno y el nivel piezométrico en cada pozo durante el periodo de estudio. Por último, se discute la posibilidad de extender este análisis a todo el

ATDM para crear mapas piezométricos y estimar variaciones en el volumen de agua almacenada en el acuífero.

Palabras clave: *Subsidencia, interferometría, radar, acuífero detrítico*

INTRODUCCIÓN

La subsidencia relacionada con la extracción de agua subterránea es un fenómeno que se ha identificado en varias de las mayores ciudades del mundo (OSMANOGLU et al., 2008; PHIEWEJ et al., 2006). La relación entre los cambios en la piezometría y la consolidación de los materiales que forman el acuífero puede ser explicada a través del principio de tensiones efectivas de Terzaghi (TERZAGHI, 1925). La deformación superficial asociada a este tipo de fenómenos puede devenir en daños a estructuras e infraestructuras, haciéndose necesaria la monitorización y estudio de los mismos (GALLOWAY & BURBEY, 2011). La Interferometría Radar (InSAR) se incorpora a las técnicas clásicas de control de movimientos superficiales aportando una alta densidad espacial de muestreo que estas no son capaces de alcanzar (TOMÁS et al., 2014).

El acuífero Terciario detrítico de Madrid (ATDM), localizado en su mayor parte en la zona N de la comunidad de Madrid, está constituido por depósitos continentales Miocenos (IGME, 2000). Los materiales se estructuran en lentejones de arenas arcósicas en una matriz arcillosa o areno- arcillosa, propios de las fases intermedias depositados por los abanicos aluviales.

En este estudio se ha trabajado con 45 pozos de entre 400 y 700 metros distribuidos en dos campos principales: el campo de Fuencarral y el de Pozuelo de Alarcón. Estos pozos son utilizados principalmente en épocas de sequía, habiendo sido activados en cinco ocasiones entre los años 1992 y 2011 (Tabla 1). En la zona de Pozuelo de Alarcón existen numerosos pozos privados que se rigen por otros parámetros y generan una extracción constante y no cuantificada.

Fase	Comienzo	Final	Duración (meses)
Ext 1	Mar. 1992	Sep. 1993	19
Rec 1	Oct. 1993	Feb. 1995	17
Ext 2	Mar. 1995	Dic. 1995	10
Rec 2	Ene. 1996	Ene. 1999	36
Ext 3	Feb. 1999	Mar. 2000	13
Rec 3	Abr. 2000	Feb. 2002	22
Ext 4	Mar. 2002	Dic. 2002	10
Rec 4	Ene. 2003	Mar. 2005	27
Ext 5	Abr 2005	Nov. 2006	20
Rec 5	Dic. 2006	Dic. 2011	60

Tabla 1. Fechas y duración de cada ciclo de extracción (Ext) – recuperación (Rec).

Para el estudio de la deformación se han procesado 81 imágenes SAR estructuradas en dos sets de datos. El primero está compuesto por 50 imágenes de los satélites ERS1 y ERS2 entre

abril de 1992 y noviembre del 2000. El segundo contiene 31 imágenes del satélite ENVISAT entre agosto de 2003 y septiembre de 2010. Ambos han sido procesados mediante la técnica PSP-IFSAR (CONSTANTINI et al., 2008). Mediante el procesado de paquetes de imágenes se pueden detectar deformaciones superficiales con una precisión entre los 3 y los 5 mm (BELL et al., 2008).

ANÁLISIS ESPACIAL

La extensión e intensidad de las deformaciones han sido estudiadas en cada uno de los ciclos de extracción/recuperación a los que se ha visto sometido el acuífero (Figura 1a). Como consecuencia de este análisis se han definido dos zonas de especial interés que se corresponden con los campos de pozos definidos anteriormente. El campo de pozos de Fuencarral tiene un comportamiento deformacional que sigue los ciclos de extracción y recarga. En el campo de Pozuelo de Alarcón este comportamiento no está tan definido y se sigue produciendo subsidencia durante las fases de recuperación, siendo esto especialmente notable durante el periodo 1992-2000.

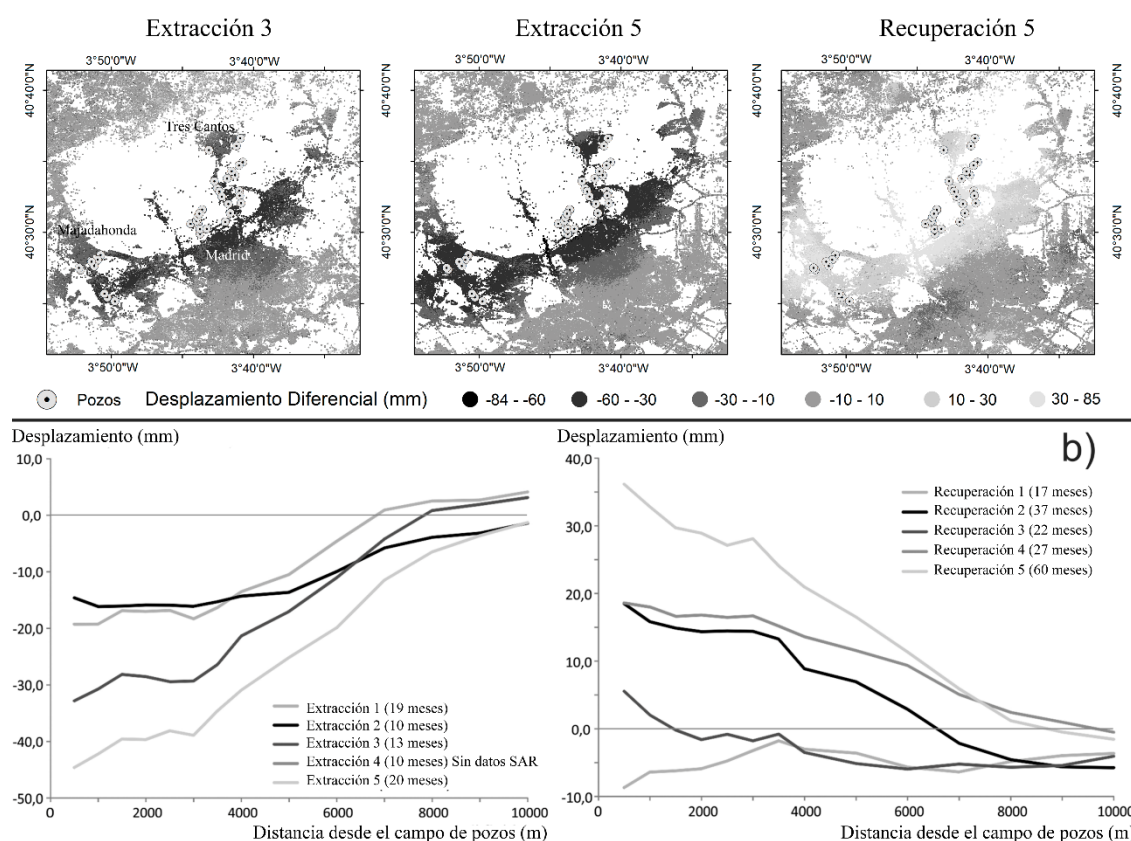


Figura 1. a) Deformación diferencial en los periodos de extracción 3 y 5, y recuperación 5. b) Evolución de la deformación con la distancia a los pozos.

El análisis de la distribución espacial de la deformación y su relación con la posición de los pozos muestra la deformación más intensa en los primeros 4 km de distancia, decreciendo hasta los 6 km y alcanzando niveles estables entre los 7 y los 10 km (Figura 1b). Analizando el ratio levantamiento/subsidencia (SR) y su expresión temporal (TR) se ha llegado a la conclusión de

que el SR se equilibra cuando los tiempos de recuperación se prolongan entre 2 y 4 veces los de extracción.

ANÁLISIS TEMPORAL Y MODELIZACIÓN

El estudio de las series temporales de deformación en torno a los pozos y la piezometría de los mismos refleja un coeficiente de correlación (r) entre 0.64 y 0.92 con un valor medio de 0.85 ± 0.07 . Teniendo en cuenta este nivel de correlación lineal se puede asumir un comportamiento cercano al elástico del acuífero (Figura 2). Dado que no se aprecia retardo temporal entre las dos series, los desplazamientos verticales (ΔD) solo depende del cambio en la piezometría (Δh) y de las características deformacionales del acuífero (HOFFMAN, 2003).

$$\Delta D = S_k \times \Delta h \quad (1)$$

Este coeficiente de almacenamiento debido a la matriz (S_k) varía con respecto al historial de tensiones que han soportado los materiales que componen el acuífero, aplicándose dos coeficientes, elástico e inelástico (SNEED & GALLOWAY, 2000). En este caso debido a que la parte más importante del acuífero está compuesta por materiales tamaño arena, la parte inelástica se puede despreciar, sustituyéndose S_k por S_{ke} en la ecuación 1.

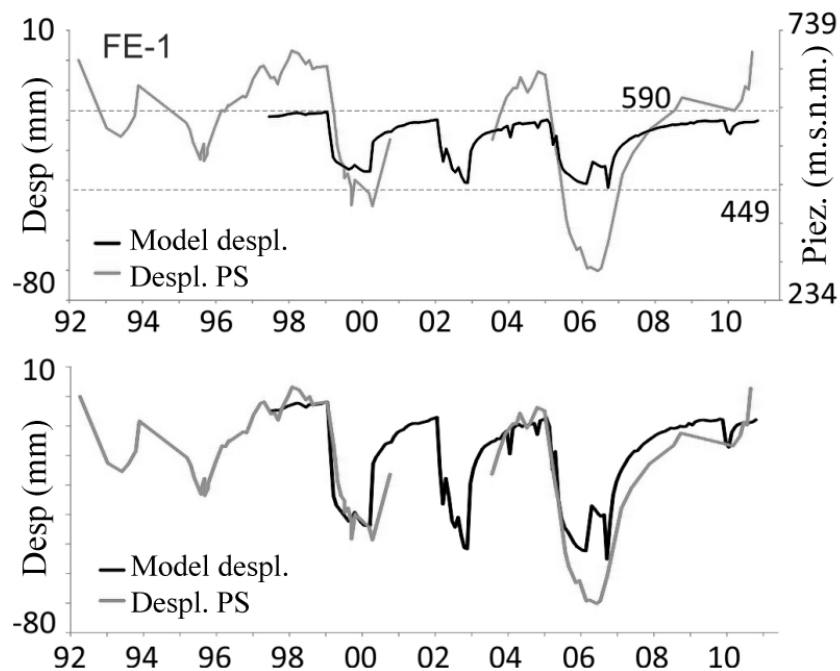


Figura 2. Gráficos de deformación InSAR en los 500 m más cercanos al pozo FE-1 frente a la piezometría del mismo (arriba) y el resultado de la modelización (abajo).

El ciclo de histéresis de los gráficos tensión deformación muestra una respuesta dentro del comportamiento elástico y con una buena correlación temporal (ZHANG et al., 2014).

El cálculo del coeficiente S_{ke} para cada pozo se realiza aplicando la metodología propuesta por RILEY (1969), utilizando la tercera extracción como datos de calibración. Con este parámetro se ha modelizado la deformación a partir de la serie piezométrica mediante un

modelo elástico unidimensional (TOMÁS et al., 2009). En su comparación con la deformación obtenida mediante InSAR el error relativo se sitúa en el 16 ± 4 % en el conjunto del campo de pozos para el periodo 2003 – 2010. Este error se localiza principalmente en la extracción 5, subestimándose la deformación. La diferencia puede justificarse con la mayor duración e intensidad del periodo extractivo, el cual ha permitido a las zonas de menor permeabilidad la reducción progresiva de la presión intersticial y su consecuente asentamiento.

POTENCIALIDAD DE LA TÉCNICA

Uno de los grandes problemas a la hora de realizar estudios hidrogeológicos es la baja densidad de datos piezométricos con los que se suele trabajar. Esto se debe generalmente a los costes asociados a la ejecución y mantenimiento de una red de control piezométrico. Dada la alta densidad de los datos InSAR, su combinación con los datos piezométricos puntuales puede aportar un valor añadido a ambas fuentes y mejorar los modelos de funcionamiento y estado de las masas de agua subterránea (CHAUSSARD et al., 2014).

Una vez demostrado el comportamiento elástico del ATDM y teniendo unos parámetros deformacionales definidos en los pozos se propone invertir el modelo utilizado para calcular deformaciones y aplicarlo a los datos de deformación superficial para el cálculo de variaciones en las superficies piezométricas. El primer paso, consistente en hacer modelos de predicción de la evolución temporal de los niveles piezométricos en los pozos y validarlo con los niveles observados, fue realizado por BÉJAR-PIZARRO et al. (2015). El paso siguiente sería aplicar el modelo a todos los datos de deformación, para obtener mapas piezométricos. Posteriormente, estos mapas podrían ser utilizados, a través de parámetros y modelos hidrogeológicos, para calcular cambios volumétricos en el acuífero, pudiendo representar un avance en la monitorización y gestión de los recursos hídricos.

CONCLUSIONES

Los datos de deformación superficial obtenidos mediante InSAR y la información piezométrica han permitido la monitorización de las deformaciones y se ha podido constatar una estrecha relación entre ellas y la piezometría. La principal característica del ATDM es la respuesta de subsidencia y levantamiento que se detecta, muy diferente de otras localizaciones observadas mediante las mismas técnicas. Espacialmente, se ha observado que la expresión superficial de las variaciones piezométricas se concentra en los 4 primeros km desde los campos de pozos, siendo muy leve a partir de los 7 km. La buena correlación entre ambas series y la validez de un modelo lineal que las relaciona con un bajo error, permite definir al ATDM como un sistema que responde de manera elástica a los ciclos de extracción y recuperación a los que se ha visto sometido. Como tal esta área de estudio constituye un caso ideal para avanzar en el conocimiento de este tipo de acuíferos y en las potencialidades que se devienen del uso de herramientas de monitorización como el Radar de Apertura Sintética (SAR).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BÉJAR-PIZARRO, M.; EZQUERRO, P.; HERRERA, G.; TOMÁS, R.; GUARDIOLA-ALBERT, C.; RUIZ, J.M.; MARCHAMALO, M. & MARTÍNEZ, R. (2015). *Evaluation of the potential of InSAR time series to study the spatio-temporal evolution of piezometric levels in the Madrid aquifer*. Proc. IAHS 372, 29-32
- BELL, J. W.; F. AMELUNG; A. FERRETTI; M. BIANCHI, & F. NOVALI. (2008), *Permanent scatterer InSAR reveals seasonal and long-term aquifer-system response to groundwater pumping and artificial recharge*, Water Resour. Res., 44, W02407, doi:10.1029/2007WR006152
- CHAUSSARD, E.; BÜRGMANN, R.; SHIRZAEI, M.; FIELDING, E.J. & BAKER, B. (2014). *Predictability of hydraulic head changes and characterization of aquifer-system and fault properties from InSAR-derived ground deformation*. J. Geophys. Res. Solid Earth, 119, 6572-6590, doi: 10.1002/2014JB011266.
- COSTANTINI, M.; FALCO, S.; MALVAROSA, F. & MINATI, F. (2008). *A new method for identification and analysis of persistent scatterers in series of SAR images*. Int. Geosci. Remote Sensing Symp. (IGARSS). 449-452.
- GALLOWAY, D. & BURBEY, T. (2011). *Review: Regional land subsidence accompanying groundwater extraction*. Hydrogeology Journal 19, 1459-1486.
- HOFFMAN, J. (2003). *The application of satellite radar interferometry to the study of land subsidence over developed aquifer systems*. PhD Thesis, University of Stanford, 211 pp.
- IGME. (2000). *Mapa geológico de España, region 534*. Informe Técnico. Disponible en: http://info.igme.es/cartografiadigital/geologica/Magna50Hoja.aspx?Id=534#memoria_y_metadatos
- OSMANOGLU, B.; DIXON, T. H.; CABRAL-CANO, E. & WDOWINSKI, S. (2008). *Mexico City Subsidence*. American Geophysical Union, Fall Meeting 2008.
- PHIEN-WEJ, N.; GIAO, P.H. & NUTALAYA, P. (2006). *Land subsidence in Bangkok, Thailand*. Engineering Geology 82, 187 – 201.
- RILEY, F.S. (1969). *Analysis of borehole extensometer data from central California*. Paper presented at: Tokyo Symposium: International Association of Hydrological Sciences (IAHS). Tokyo. IAHS publication 88, 423-431. (1969, September).
- SNEED, M. & GALLOWAY, D.L. (2000). *Aquifer-system compaction and land subsidence: measurements, analyses, and simulations: the Holly site, Edwards Air Force Base, Antelope Valley, California*. US Geol Surv Water-Resour Invest Rep 00–4015. <http://pubs.usgs.gov/wri/2000/wri004015/>. 65 pp.
- TERZAGHI, K. (1925). *Settlement and consolidation of clay*. McGraw-Hill, New York, pp. 874-878
- TOMÁS, R.; HERRERA, G.; DELGADO, J.; LOPEZ-SANCHEZ, J.M.; MALLORQUÍ, J.J. & MULAS, J. (2009). *A ground subsidence study based on DInSAR data: Calibration of soil parameters and subsidence prediction in Murcia City (Spain)*. Engineering Geology 111, 19-30.
- TOMÁS, R.; ROMERO, R.; MULAS, J.; MARTURIA, J.J.; MALLORQUÍ, J.J.; LÓPEZ-SÁNCHEZ, J.M.; HERRERA, G.; GUTIÉRREZ, F.; GONZÁLEZ, P.J.; FERNÁNDEZ, J.; DUQUE, S.; CONCHA-DIMAS, A.; COCKSLEY, G.; CASTAÑEDA, C.; CARRASCO, D. & BLANCO, P. (2014). *Radar interferometry techniques for the study of ground subsidence phenomena: a review of practical issues through cases in Spain*. Environmental Earth Sciences 71, 163-181.

ZHANG, Y.; GONG, H.; GU, Z.; WANG, R.; LI, X. & ZHAO, W. (2014). *Characterization of land subsidence induced by groundwater withdrawals in the plain of Beijing city, China*. *Hidrogeology Journal* 22, 397. doi: 10.1007/s10040-013-1069-x