

SEGURIDAD HÍDRICA



JOAQUÍN MELGAREJO MORENO
M^a INMACULADA LÓPEZ ORTIZ
PATRICIA FERNÁNDEZ ARACIL

SEGURIDAD HÍDRICA

© los autores, 2023
© de esta edición: Universitat d'Alacant
ISBN: 978-84-1302-234-5

Reservados todos los derechos. No se permite reproducir, almacenar en sistemas de recuperación de la información, ni transmitir alguna parte de esta publicación, cualquiera que sea el medio empleado -electrónico, mecánico, fotocopia, grabación, etcétera-, sin el permiso previo de los titulares de la propiedad intelectual.

TABLA DE CONTENIDO

BLOQUE I - PLANIFICACIÓN

Consideraciones ambientales con relación a la aprobación del Plan Hidrológico del Tajo de Tercer Ciclo 2022-2027 y el Traspase Tajo-Segura José Navarro Pedreño.....	19
Planificación Hidrológica: información, participación y evaluación ambiental estratégica Ángel Ruiz de Apodaca Espinosa	39
Representación espacio-temporal del riesgo de inundación a partir de las indemnizaciones del seguro de riesgos extraordinarios Francisco Espejo Gil, Urko Elozegi Gurmendi.....	59
La desalación en la estrategia de seguridad hídrica. Implicaciones económicas y ambientales Alberto del Villar García.....	73
La desalación en la provincia de Almería: garantía para el abastecimiento y el regadío Francisco Javier Alcántara Pérez	93
Mejorar la resiliencia ante las inundaciones en la Vega Baja (España). Propuesta didáctica en bachillerato Ángela del Carmen Zaragoza, Álvaro-Francisco Morote, María Hernández Hernández.....	105
Resignificando la ciudad como biotopo humano Javier Eduardo Parada Rodríguez, Liliana Romero Guzmán, Jesús Enrique De Hoyos Martínez	117
Gestión del agua y saneamiento básico en una reserva de desarrollo sostenible: comunidad de Nossa Senhora do Livramento do Tupé, Brasil Antonio Jorge Barbosa da Silva Maria Claudia da Silva Antunes de Souza	133
Proposición de una metodología para estimar la erosión del suelo en viticultura mediante ISUM (Improved Stock Unearthing Method). Un caso en el viñedo leonés Antonio Jódar-Abellán, Marta García-Fernández, Susana García-Pisabarro, Jesús Rodrigo-Comino	141
Estimación de la disponibilidad y seguridad hídrica bajo escenarios de cambio climático en una cuenca hidrológica agro-forestal del sureste de España Antonio Jódar-Abellán, Dámaris Núñez-Gómez, Efraín Carrillo-López, Ryan T. Bailey, Pablo Melgarejo	151
Determinación del umbral de escorrentía y disponibilidad hídrica de la cuenca hidrográfica del río Jubones, Ecuador Paolo Brazales Cervantes, Seyed Babak Haji Seyed Asadollah, Antonio Jódar-Abellán.....	163
Análisis del umbral de escorrentía de la cuenca del río Obispo, en la provincia del Carchi (Ecuador) Pablo David Viera Ríos, Derdour Abdessamed, Antonio Jódar-Abellán.....	175
El acuífero del Peñón (Alicante): un pequeño acuífero kárstico Víctor Sala Sala, José Miguel Andreu Rodes, Miguel Fernández Mejuto, Ernesto García Sánchez.....	185

¿Se observan cambios en la precipitación que afecten al Acuífero del Ventós (provincia de Alicante)?

José Miguel Andreu Rodes, Igor Gómez Domenech, Miguel Fernández-Mejuto, Juan Bellot Abad197

Revisión de las políticas de modernización de regadíos en la Comunidad Valenciana. La estrategia valenciana de regadíos 2020-2040

David Sancho-Vila, Marta García-Mollá207

El impacto del proyecto europeo ARSINOE en la gestión del acuífero de la isla de El Hierro (Canarias)

Juan C. Santamarta, Noelia Cruz-Pérez, Joselin S. Rodríguez-Alcántara, Alejandro García-Gil, Miguel Á. Marazuela, Carlos Baquedano, Jesica Rodríguez Martín, Luis Fernando Martín Rodríguez 219

BLOQUE II - INFRAESTRUCTURAS

Reutilización de aguas regeneradas en la cuenca del seguro. Adaptación al reglamento (UE) 2020/741: retos y oportunidades

Sonia M. Hernández López, José Carlos González Martínez231

Caracterización hidrológica de los caudales ecológicos mínimos en España

Luis Garrote de Marcos 249

Sobrevvertido en presas de hormigón. Evaluación de las acciones hidrodinámicas

Luis G. Castillo Elsitdié, José M. Carrillo Sánchez, Juan T. García Bermejo 269

Consideraciones sobre la estimación de hidrogramas de rotura de presas

Luis Altarejos García 295

La seguridad de las infraestructuras hidráulicas

Francisco Javier Flores Montoya315

La ordenación del territorio y la planificación hidrológica al servicio de la seguridad hidráulica y energética

Francisco Javier Flores Montoya325

La evolución de los servicios urbanos del agua en Madrid: un servicio de alta calidad

Ignacio Lozano Colmenarejo345

BALTEN: el agua regenerada como garantía de suministro de agua de riego en Tenerife

Ana Sánchez Espadas, Jesús Rodríguez Martí363

El sector del agua urbana frente a las nuevas exigencias legislativas para mantener la seguridad hídrica

Carmen Hernández de Vega, Alicia Ayuso Solís381

El abastecimiento de la ciudad de Ávila: retos y soluciones científico-técnicas

José Luis Molina González, Jorge Mongil Manso 399

El Consorcio de Aguas de la Marina Baja: un ejemplo de economía circular en la garantía del abastecimiento urbano ante el reto continuo de las sequías

Jaime Berenguer Ponsoda409

Gestión activa de sistemas de abastecimiento mediante el empleo de sistemas multiagente (MAS) para la sostenibilidad

Carlos Calatayud Asensi, José Vicente Berná Martínez, Vicente Javier Macián Cervera, Lucía Arnau Muñoz439

La gestión municipal del ciclo urbano del agua digitalizado

Rosa Rozas Torrente, M^a José Moya Llamas, Arturo Trapote Jaime451

Microsectorización dinámica redes de distribución de agua	
Arturo Albaladejo Ruiz.....	463
Uso de compuertas en redes de drenaje para reducir inundaciones	
Leonardo Bayas-Jiménez	477
Detección y monitoreo de aguas superficiales en la región semiárida brasileña a partir de datos orbitales de sensores remotos	
Izaias de Souza Silva.....	487

BLOQUE III - EVALUACIÓN SOCIOECONÓMICA Y JURÍDICA

La inseguridad hídrica del informe del Consejo Nacional del Agua sobre el recorte del travase Tajo-Segura	
Miguel Ángel Blanes Climent.....	499
El necesario impulso a las centrales hidroeléctricas reversibles como contribución a la seguridad energética nacional: algunas cuestiones jurídicas	
Estanislao Arana García	511
Políticas públicas para la mitigación del impacto del cambio climático sobre los aprovechamientos energéticos	
Jesús Conde Antequera	529
La legislación contra el cambio climático y la transición a una economía descarbonizada desde una doble perspectiva: ambiental y social	
José Esteve Pardo.....	549
Huella hídrica y financiación sostenible	
Domingo Zarzo Martínez, Mercedes Calzada Garzón, Patricia Terrero Rodríguez.....	559
¿Estamos sobreestimando los recursos de agua regenerada? Una ducha fría con la realidad hidro-económica	
Julio Berbel, Esther Díaz-Cano, Alfonso Expósito	577
Taxonomía de los instrumentos económicos aplicados para la gestión sostenible del agua	
Nazaret M ^a Montilla López, Esther Díaz-Cano y Julio Berbel.....	597
Seguridad hídrica y objetivos del PNIEC desde una perspectiva jurídica	
José Antonio Blanco Moa	613
SIAGES: un innovador sistema integrado de apoyo a la gestión del agua	
Alberto Esteban Barrera García, Álvaro Rodríguez García, Ramón Bella Piñeiro, Jose Pablo Ormaechea, Luis José Ruiz Aznar, Abel Solera Solera et al., Manuel Argamasilla Ruiz, Lupicino García Ortiz.....	631
Crisis energética y equilibrio económico financiero en la contratación pública	
Esteban Arimany Lamoglia	643
Garantía del abastecimiento en el Sureste español: la Mancomunidad de los Canales del Taibilla	
Patricia Fernández Aracil, M ^a Inmaculada López Ortiz, Joaquín Melgarejo Moreno.....	655
La evaluación de impacto ambiental de proyectos hidráulicos ¿lo estamos haciendo bien?	
Carlos Martín Cantarino.....	677

La seguridad energética y el autoconsumo fotovoltaico como herramienta para la seguridad hídrica	
Marcos García-López, Joaquín Melgarejo	695
Seguridad hídrica y equilibrio ecológico en el parque natural «El Hondo»: visión histórico-jurídica	
Francisco José Abellán Contreras	709
Los trasvases en tiempos de seguridad hídrica	
Paul Villegas Vega	723
Vulnerabilidad e incidencia de la pobreza hídrica en Alicante	
Ricardo Abad Coloma	735
Asequibilidad al agua urbana y pobreza hídrica en ciudades del Norte global: el caso de Alicante	
Luis E. Zapana Churata, Rubén A. Villar Navascués, María Hernández Hernández, Antonio M. Rico Amorós	745
Políticas públicas de ayudas para la mejora, modernización e innovación en el regadío de la Región de Murcia	
Ramón Martínez Medina, Encarnación Gil Meseguer, José María Gómez-Gil, José María Gómez Espín	759
O reflexo das <i>fake news</i> frente a crise ambiental: uma reflexão necessária nos dias atuais	
Aline Hoffmann, Liton Lanes Pilau Sobrinho	773
Apontamentos sobre o pagamento por serviços ambientais	
André Luiz Anrain Trentini	783
Constitucionalismo das águas – o “aguar” das constituições	
Luciana Pelisser Gottardi Trentini	795
Uso sustentável da água: uma definição a partir dos conceitos de segurança hídrica, de eficiência e de sustentabilidade	
Ana Luisa Schmidt Ramos, Alexandre Morais da Rosa	805
O regime de responsabilidade penal pela poluição hídrica no Brasil	
Jefferson Zanini, Luiz Antônio Zanini Fornerolli	815
Segurança hídrica e seu tratamento jurídico no o regime de responsabilidade penal pela poluição hídrica no Brasil e na Espanha	
Leandro Katscharowski Aguiar	827
Debatendo os ODS com base na sustentabilidade e no desenvolvimento sustentável.....	
Denise Schmitt Siqueira Garcia, Heloise Siqueira Garcia	837
A falta de efetividade no planejamento da segurança hídrica do Brasil	
Denise Schmitt Siqueira Garcia, Alexandre Waltrick Rates	851
Do constitucionalismo ao constitucionalismo global: por uma constituição mundial em defesa de bens fundamentais	
Vanessa Ramos Casagrande	863
A dessalinização da água como instrumento de segurança hídrica	
Anaxágora Alves Machado Rates	875
A canção dos oceanos	
Paola Fava Saikoski	885

Análise da lei de recursos hídricos à luz da responsabilidade do Brasil para com a sustentabilidade e a conscientização ambiental	
Adilor Danieli	895
Investigación sobre el río Amarillo en las dinastías Ming y Qing. Comentario sobre la Ley de protección del río Amarillo	
Yang Yang.....	907
Propuesta metodológica para la recolección del etnoconocimiento en la gestión del riesgo de desastre	
Isaleimi Quiguapumbo Valencia, Antonio Aledo Tur.....	919

BLOQUE IV - TECNOLOGÍAS

Nuevo sistema de riego con recuperación de agua y nutrientes	
Pablo Melgarejo, Dámaris Núñez-Gómez, Pilar Legua, Vicente Lidón, Agustín Conesa, Antonio Marhuenda, Juan José Martínez-Nicolás.....	933
Dinapsis: transformación digital para la gestión sostenible del agua y la salud ambiental	
María Tuesta San Miguel.....	953
Los contaminantes emergentes en la reforma de la directiva de aguas residuales	
Daniel Prats Rico.....	959
Fertirrigación y nuevas estrategias como garantía de seguridad hídrica en el regadío	
Alejandro Pérez Pastor y Elisa Pagán Rubio.....	985
La desalación y el hidrógeno	
Alejandro Zarzuela López.....	1005
Análisis regional de la reducción de boro en agua marina desalinizada para el riego agrícola en el sureste español	
Alberto Imbernón Mulero, José Francisco Maestre Valero, Saker Ben Abdallah, Victoriano Martínez Álvarez, Belén Gallego Elvira.....	1021
Impacto ambiental de la reducción del boro del agua de mar desalinizada para el riego en parcela	
Saker Ben Abdallah, Belén Gallego-Elvira, Alberto Imbernón-Mulero, Victoriano Martínez-Alvarez, José Francisco Maestre Valero.....	1031
Modelado cinético del consumo de CO₂ para la cepa Spirulina platensis	
Antonio F. Marcilla Gomis, Inmaculada Blasco López.....	1041
Empleo de filtro verde construido con residuos para reducir el contenido en fósforo en aguas de riego	
Teresa Rodríguez Espinosa, María Belén Almendro Candel, Ana Pérez Gimeno, Iliana Papamichael.....	1055
Tecnologías de oxidación avanzada para la degradación del fármaco carbamazepina: la ozonización	
María José Moya-Llamas, Marta Ferre Martínez, Elizabetha Domínguez Chabaliná, Arturo Trapote Jaime, Daniel Prats Rico.....	1067
Aprendizaje basado en proyectos colaborativos globales en formación profesional: banco de ensayos hidráulicos para la digitalización del agua	
Albert Canut Montalvã, Joaquín Martínez López, Maties Roma mayor, Antonio Oliva Sánchez.....	1079

Reutilización de agua para riego en la ciudad de Murcia. Proyecto LIFE CONQUER Eva Mena Gil, Simón Nevado Santos, Elena de Vicente Aguilar, Adriana Romero Lestido Benoît Fabien Claude Lefèvre.....	1091
Eliminación de microcontaminantes emergentes en lodos de depuradora mediante procesos de oxidación avanzada: peróxido de hidrógeno y ozono Clara Calvo Barahona, Adrián Rodríguez Montoya, María José Moya-Llamas, Arturo Trapote Jaume, Daniel Prats Rico.....	1103
Vigilancia y protección de las aguas superficiales mediante el proyecto WQeMS y los servicios del Copernicus Pablo Cascales de Paz, Eva Mena Gil, Isabel Hurtado Melgar, Laurent Pouget.....	1115
Tratamiento ecológico para la eutrofización y la anoxia en las masas de agua Ricardo Mateos-Aparicio Baixauli.....	1125
Modelado de descarga submarina de salmuera antes y después de la instalación de un difusor Silvano Porto Pereira, José Luís Sánchez-Lizaso, Paulo César Colonna Rosman. Ángel Loya, Iran Eduardo Lima Neto.....	1137
Las sequías en España en el siglo XXI: su influencia en la disminución y cierre de transferencias de agua del acueducto Tajo-Segura y de la conexión Negratín-Almanzora Encarnación Gil Meseguer, Ramón Martínez Medina, José María Gómez-Gil, José María Gómez Espín.....	1147

¿Se observan cambios en la precipitación que afecten al Acuífero del Ventós (provincia de Alicante)?

José Miguel Andreu Rodes

Departamento de Ciencias de la Tierra y del Medio Ambiente,
Universidad de Alicante, España
andreu.rodes@ua.es
<https://orcid.org/0000-0001-9448-9270>

Igor Gómez Domenech

Dpto. Física Aplicada, Universidad de Alicante, España
igor.gomez@ua.es
<https://orcid.org/0000-0002-2176-5630>

Miguel Fernández-Mejuto

Dpto. Ciclo Hídrico, Diputación de Alicante, España
mfmejuto@diputacionalicante.es
<https://orcid.org/0000-0002-1682-2979>

Juan Bellot Abad

Dpto. Ecología, Universidad de Alicante, España
Juan.bellot@ua.es
<https://orcid.org/0000-0002-2066-8265>

RESUMEN

El acuífero del Ventós es un pequeño acuífero próximo a la ciudad de Alicante cuyas aguas se destinan exclusivamente al abastecimiento de la localidad de Agost. Sus recursos subterráneos son, por tanto, de especial importancia para esta población. Puesto que estos recursos son fuertemente dependientes de la precipitación, y ante el actual escenario de cambio climático, se ha realizado un estudio con el objeto de comprobar si se han producido cambios y tendencias en la precipitación anual, así como en el número de días de lluvia, episodios lluviosos y episodios lluviosos eficaces frente a la recarga durante los últimos 44 años. Los resultados obtenidos indican que el valor de precipitación anual media es de 282 mm, y a pesar de observarse una ligera tendencia positiva, esta no es estadísticamente significativa. Tampoco la disminución del número de días y episodios lluviosos tienen significación estadística. Los episodios superiores a 20 mm, considerados eficaces frente a la recarga, no reflejan tendencia alguna, por lo que, en principio, se puede concluir que no hay evidencias de un cambio significativo en la precipitación anual sobre el acuífero del Ventós, y especialmente en lo que respecta a precipitación que genera recarga.

1. INTRODUCCIÓN

La presencia de aguas subterráneas en casi todos los lugares, su buena calidad y una menor sensibilidad a las sequías, las convierte en un recurso habitual y esencial para satisfacer la demanda urbana. Muchos países del mundo muestran una alta dependencia de las aguas subterráneas como fuente de abastecimiento. En Europa, países como Dinamarca o Islandia solo emplean agua subterránea como agua potable, mientras que otros como Alemania, Países Bajos o Austria utilizan un 70% (Riedel et al., 2020). En España su empleo es algo menor, aproximadamente un 30% de las extracciones se destinan a abastecimiento (Villarroya et al., 2014), si bien muchos municipios pequeños dependen exclusivamente de las aguas subterráneas. Este es el caso de la provincia de Alicante donde el 66% de los municipios (Fernández-Mejuto et al., 2020) se abastecen de pozos. Entre ellos se encuentra la localidad de Agost, situada aproximadamente a 20 km al NW de la ciudad de Alicante y que bombea agua del acuífero del Ventós. Todo ello muestra la importancia del recurso subterráneo a nivel mundial, y especialmente, en nuestro entorno próximo.

Como parte integral del Ciclo Hidrológico, las aguas subterráneas son dependientes de las condiciones climáticas. La mayor parte del agua almacenada en el subsuelo proviene fundamentalmente de la recarga del agua de lluvia. Es por ello que cualquier cambio o alteración en las condiciones climáticas, y especialmente de la precipitación y la evapotranspiración, pueden tener un efecto directo sobre los recursos subterráneos.

Los cambios que actualmente se manifiestan en el clima conllevan un estrés hídrico en la superficie del planeta (hielos, ríos, lagos, o zonas húmedas), pero también pueden suponer una amenaza para las aguas subterráneas (Schlosser et al., 2014; Teuling et al., 2019; Riedel et al., 2020; Böhnisch et al., 2021). Las regiones que pueden verse más afectadas son las áreas montañosas y las zonas áridas y semiáridas. En las primeras debido a las variaciones estacionales en la dinámica de la capa de nieve y patrones de precipitación, mientras que en las zonas áridas y semiáridas además de por el cambio en el régimen de lluvias por las sequías más duraderas podrían ocasionar reducciones en la recarga. En el SE peninsular, diversos trabajos apuntan que las proyecciones futuras ocasionarán una posible disminución de la alimentación de los acuíferos a medio y largo plazo (Pulido-Velazquez et al., 2014; Tohuami et al., 2015; Mountahir et al., 2019). Sin embargo, hay que tener en cuenta que son numerosos los factores que afectan la recarga natural de los acuíferos, por lo que resulta imposible establecer generalidades extrapolables a todos los casos.

El principal objetivo del presente trabajo ha sido realizar de forma preliminar un análisis del comportamiento y la tendencia de la precipitación en el área en la que se encuentra el acuífero del Ventós (provincia de Alicante), y si pudiera estar mostrando algún indicio de poder llegar a afectar a sus recursos subterráneos. A pesar de que se trata de un acuífero pequeño y sus recursos no son muy elevados, estos tienen una gran importancia a nivel local, ya que el abastecimiento de agua potable a la localidad de Agost depende, en gran medida, de este acuífero.

2. METODOLOGÍA

2.1. Área de trabajo

El acuífero Ventós está formado por calizas cretácicas pertenecientes al dominio Prebético de la Cordillera Bética. Las calizas reposan sobre margas del Cretácico inferior que actúan de impermeable de base. La disposición estructural en forma de sinclinal inclinado hacia el SW origina que el propio impermeable basal forme sus límites laterales oriental y meridional, mientras que los límites occidental y septentrional se producen como consecuencia de fallas que ponen en contacto el acuífero margas del Cretácico Superior y Terciario. Esta disposición hace que, a grandes rasgos, el acuífero coincida prácticamente con el relieve positivo que presenta la sierra del Ventós.

El acuífero se explota únicamente por un solo sondeo, el cual dispone de contador, por lo que es posible conocer las extracciones que se efectúan en el sistema. Los bombeos medios anuales durante los últimos 20 años son muy constantes, las cuales se encuentran en torno a 200.000 m³/año. A pesar de que las extracciones no parecen demasiado elevadas, las reducidas dimensiones de este reservorio conllevan una capacidad limitada en cuanto al volumen almacenado, por lo que a lo largo del tiempo de explotación ha experimentado un vaciado significativo.

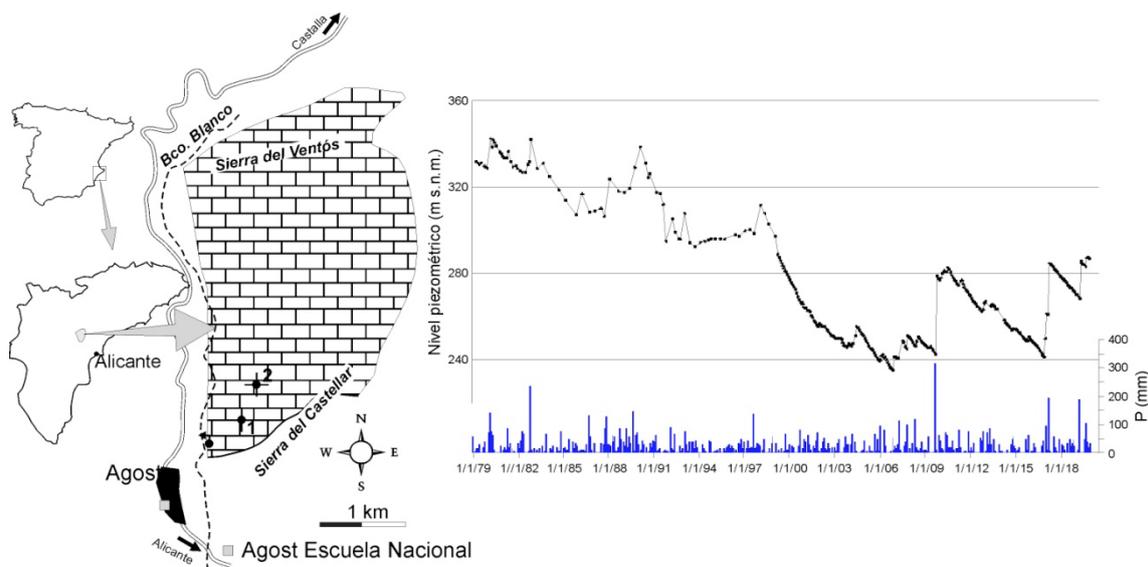


Figura 1. Localización geográfica y evolución del nivel piezométrico del acuífero.

Los diversos estudios realizados en el acuífero del Ventós han puesto de manifiesto la rapidez de respuesta de la piezometría frente a los eventos de precipitación (Andreu et al., 2006; Tohuami et al., 2008). La disposición y geometría del acuífero unido a la karstificación de sus rocas carbonatadas han sido los principales factores responsables de este rápido comportamiento hidrodinámico. Así, el buzamiento de la serie carbonatada, y por tanto del muro del acuífero, hacia la zona de drenaje natural en su borde SW favorece una rápida circulación del agua hacia dicho sector. Ello explica que los pulsos de recarga natural se reflejen en recuperaciones piezométricas a escasas horas después de comenzar la lluvia.

Esos mismos estudios constataron que aquellos eventos de precipitación superiores a 20 mm generaban una respuesta en la piezometría capaz de ser medida y cuantificada en los sondeos. Este valor se definió como un umbral de infiltración, lo que significa que aquellos eventos lluviosos por encima de 20 mm son capaces de recargar el acuífero, mientras que aquellos inferiores a dicha magnitud no elevan el nivel piezométrico y, por tanto, no eran considerados como lluvias eficaces (Tohuami et al., 2008).

2.2. Datos climáticos

La caracterización y el comportamiento de la precipitación del área en la que se encuentra el acuífero se ha realizado a partir de los registros correspondientes a la estación de Agost Escuela Nacional perteneciente a la AEMET. Aunque la estación está ubicada al SW del acuífero, y por tanto fuera del perímetro formal del mismo (UTM X= 705.166; Y= 4.255.200), se puede considerar representativa de las condiciones climáticas existentes en la sierra del Ventós, ya que se trata de un relieve de pequeña extensión. El periodo de estudio ha sido de 44 años comprendido entre 1976 y 2019.

2.3. Análisis estadístico

El análisis estadístico efectuado ha consistido en la caracterización de las series de precipitación anual media, días de lluvia y episodios de precipitación, así como la detección de sus posibles tendencias. La detección de tendencias en los datos climáticos ha proliferado en los últimos años como consecuencia del aumento de los estudios sobre cambio climático (González-Hidalgo, 2010; Valdés et al., 2017). La utilización de los métodos no paramétricos como el test de Mann-Kendall, aplicado en el presente trabajo, está basado en los rangos de datos, por lo que no se verá afectado por la existencia de datos atípicos y no presupone normalidad en la distribución de los datos de la serie, por lo que puede considerarse como válida para cualquier tipo de distribución.

El test de Mann-Kendall se compone de dos parámetros que permiten realizar una caracterización de la tendencia de la serie; por un lado, el estadístico Z, que nos da idea de la existencia de una tendencia creciente o decreciente y, por otro lado, el p-valor (p) que indica el nivel de significación de la tendencia. Para ello se establecen unos umbrales de significación que en este trabajo han sido $<0,05$ (95% de confianza para rechazar la hipótesis nula). Además, el test no paramétrico de Sen se utiliza para la pendiente de la tendencia aportando información sobre el cambio que experimenta la variable considerada a lo largo del tiempo, en este caso para la precipitación a nivel anual.

3. RESULTADOS

3.1. Influencia de la precipitación en el acuífero

Aunque el acuífero está captado desde hace décadas, el hecho de que la explotación se haya mantenido constante y regulada durante los últimos 20 años ha facilitado que el acuífero ofrezca un comportamiento hidrodinámico relativamente “naturalizado”, es decir, condicionado por los factores climáticos, y muy especialmente por la precipitación. Así, existe una buena correspondencia entre la evolución piezométrica con los periodos húmedos y secos de esta región (Fig. 2). Durante los periodos secos (tramos descendentes en la curva de desviación acumulada

respecto a la precipitación media) se producen las mayores pérdidas piezométricas, mientras que los periodos húmedos (tramos ascendentes) se recuperan los niveles incrementando las reservas del acuífero. El predominio de periodos secos frente a húmedos durante el intervalo estudiado ha condicionado que el acuífero haya experimentado vaciados notables en algunos ciclos temporales, pudiendo llegar a producirse desaturaciones del mismo de casi 100 m con respecto a su nivel en régimen natural. La mayor duración de los periodos secos frente a los húmedos explica que el acuífero no haya alcanzado su recuperación total.

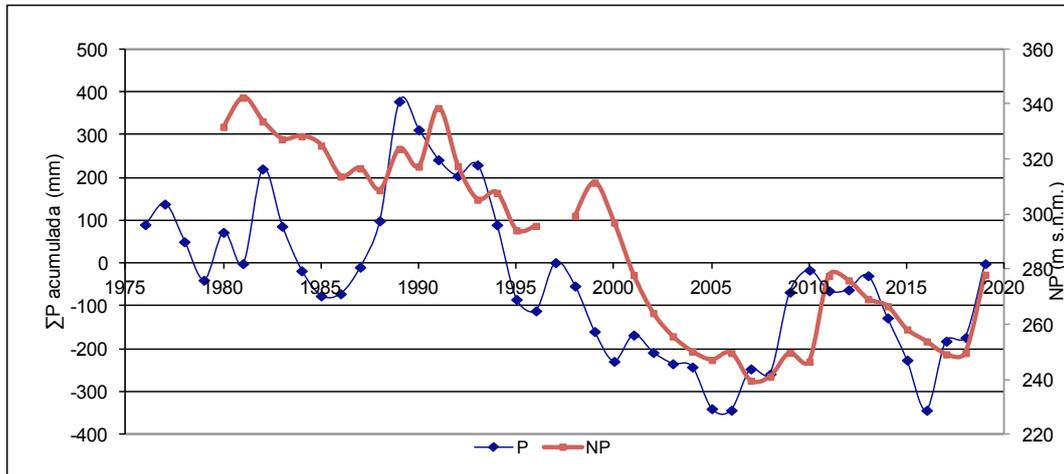


Figura 2. Curva de desviaciones acumuladas de precipitación frente a la precipitación anual media y evolución piezométrica del acuífero del Ventós.

3.2. Características de la precipitación y tendencias

La precipitación media anual para el periodo de estudio ha sido de 282 mm, valor que puede considerarse semejante a los establecidos por los diferentes estudios efectuados en este acuífero (Andreu, 1997; Abdelli, 1999; Villacampa, 2015), aunque todos ellos para periodos inferiores al presente estudio. El elevado valor del coeficiente de variación ($CV = 37$) indica un comportamiento bastante irregular de la precipitación anual de esta región, con diferencias entre el año más seco y más húmedo que duplican el valor medio (453 mm). Este tipo de comportamiento es habitual en el clima mediterráneo semiárido del sureste peninsular. Cuando se traza una línea de tendencia para la serie de precipitación anual del periodo estudiado se observa una ligera pendiente positiva (Fig. 3) que adquiere una pendiente de Sen de 1,15 mm/año (Tabla 1), si bien dado su elevado p-valor de 0,571 esta tendencia no se puede considerar estadísticamente significativa.

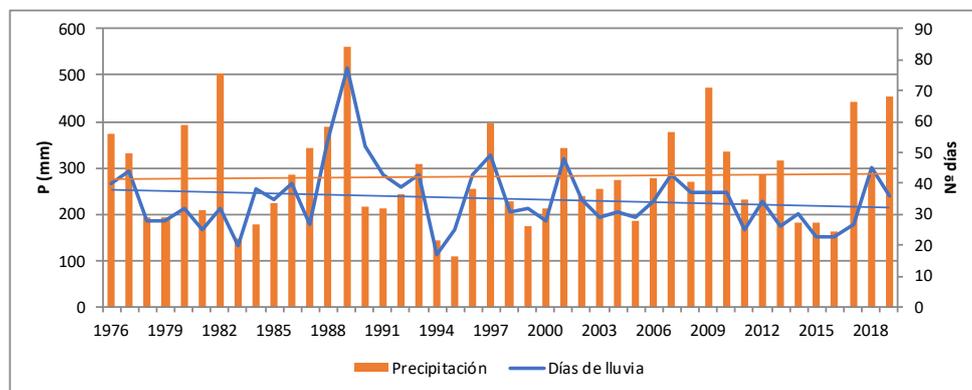


Figura 3. Evolución de la precipitación y número de días lluviosos registrado en la estación de Agost.

A grandes rasgos la distribución de la precipitación a lo largo del año ofrece un comportamiento bimodal, característico del ámbito mediterráneo, en la que las mayores cuantías se registran en las estaciones de otoño y primavera. El máximo absoluto se alcanza en el mes septiembre con valores medios próximos a 40 mm. Por su parte las menores cantidades se recogen en la época estival, recayendo en el mes de julio el mínimo absoluto en la que los valores medios se sitúan en torno a 7 mm.

La distribución de la precipitación a lo largo del tiempo es un aspecto de gran importancia en el proceso de recarga de un acuífero. Así, variables como el número de días lluviosos, su repartición temporal o la cuantía e intensidad de lluvia son variables relacionadas con la precipitación que afectan el proceso de infiltración y, por consiguiente, a la recarga. En el caso de la estación de Agost, el número de días de lluvia es altamente variable dependiendo del año pudiendo oscilar entre 17 y 77 días de lluvia al con un valor medio de es de 35. Contrariamente al módulo pluviométrico anual medio, el número de días de precipitación adquiere una tendencia descendente (Fig. 3), que podría interpretarse como que el número de días lluviosos sobre el acuífero del Ventós está disminuyendo. Pero tampoco pueden considerarse significativa esta tendencia dado que muestra un p-valor de 0,3 (Tabla 1).

Más interesante que el propio número de días de lluvia son los eventos o episodios de precipitación. Para ello en el presente trabajo se han definido como episodios de lluvia a aquellas precipitaciones que presentan continuidad en el registro diario, de forma que un episodio lluvioso debe estar comprendido entre dos días sin precipitación. De esta forma hay episodios lluviosos que corresponden a un único día y otros que incluyen dos, tres o más días lluviosos.

A partir de las series diarias de precipitación se han establecido los episodios de lluvia. El número de estos varía entre 13 y 34 con un valor medio de 23. La Figura 4, además del número de días de lluvia, representa el número de episodios lluviosos y el número de episodios lluviosos superiores a 20 mm. En el caso de los episodios lluviosos en su conjunto, de nuevo la línea de tendencia experimenta una ligerísima pendiente negativa, lo que podría interpretarse como una disminución de los eventos de lluvia sobre el acuífero, si bien estadísticamente tampoco es significativa. Por último, los eventos superiores a 20 mm, considerados como episodios que generan recarga (Tohuami et al., 2008) no muestran tendencia alguna. Este tipo de episodios lluviosos son mucho más escasos ya que por término medio son 4 pudiendo llegar hasta 8 como ocurrió en los años 1988 y 1989 o incluso no producirse ninguno, como en el año 1995.

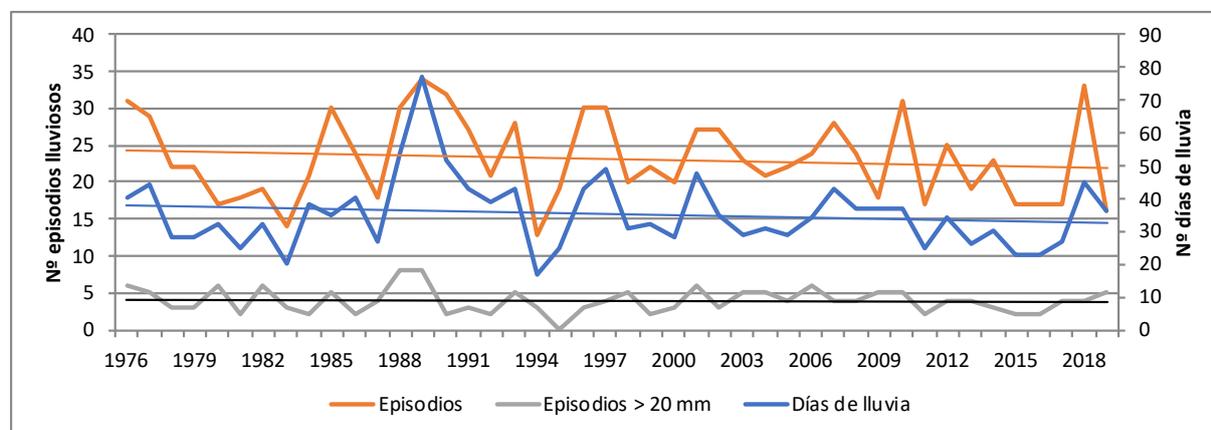


Figura 4. Evolución del número de episodios lluviosos, número de episodios lluviosos superiores a 20 mm y número de días de lluvias en la estación de Agost.

La Figura 5 representa el porcentaje entre la precipitación de los episodios lluviosos de más de 20 mm con respecto a la precipitación anual. Esta relación establece el peso de los episodios lluviosos efectivos respecto al total de la precipitación. En cierto modo puede considerarse como indicador de una mayor probabilidad de recarga en el acuífero. La evolución temporal de esta relación también muestra un ligerísimo crecimiento. Sin embargo, de nuevo esa ligera tendencia positiva carece de significancia estadística.

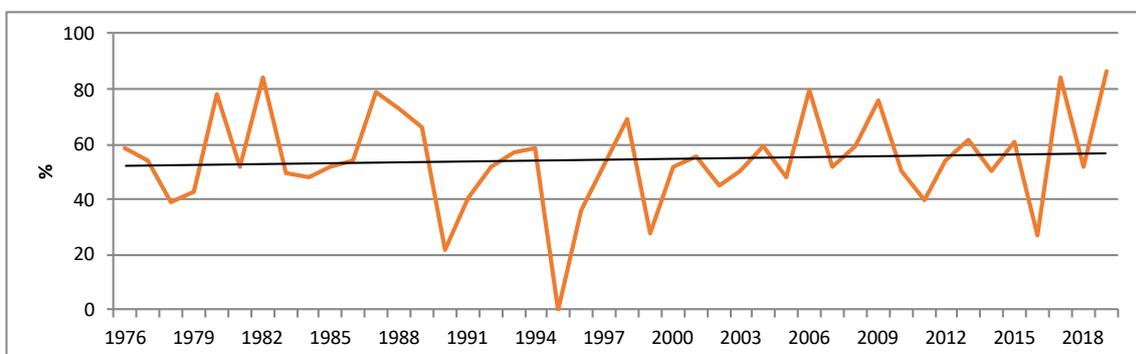


Figura 5. Evolución del porcentaje entre la precipitación de los episodios lluviosos de más de 20 mm con respecto a la precipitación anual para la estación de Agost.

VARIABLE	z	P-VALOR	PENDIENTE DE SEN
Precipitación	0,566	0,571	1,1015 mm/año
Días de lluvia	-1,033	0,302	-0,106 mm/año
Episodios lluviosos	-1,096	0,273	-0,078 episodios/año
Episodios lluviosos > 20 mm	-0,289	0,773	
% $P_{\text{evento}>20\text{mm}}/P_{\text{anual}}$	0,618	0,536	0,083 %/año

Tabla 1. Estadísticos del test Mann-Kendall y pendiente de Sen para algunas variables relacionadas con la precipitación de la estación de Agost para el periodo 1976-2019.

4. DISCUSIÓN

La recarga natural de acuíferos se presenta como un proceso de elevada complejidad, en la que son múltiples los factores que influyen en ella (Scalon et al., 2002), si bien, la precipitación y sus formas de presentarse (cuantía, intensidad, distribución en el tiempo) es una de las variables más importantes de este proceso. Así, en la mayoría de los acuíferos de nuestro entorno los mayores volúmenes de agua subterránea provienen de la recarga procedente de la lluvia, siendo el resto de las entradas subterráneas de menor magnitud. Es por ello que las posibles alteraciones en esta variable del ciclo hidrológico afectan a los recursos de los acuíferos, y especialmente a aquellos casos que sus aguas se destinan al abastecimiento urbano, como es el caso del acuífero del Ventós.

La buena correlación entre el comportamiento hidrodinámico del acuífero y la precipitación, unido a que en este acuífero convergen una serie de circunstancias como un buen conocimiento hidrogeológico, que sea un sistema muy poco inercial capaz de transcribir en muy poco tiempo las variaciones en la recarga, así como que se disponga de un buen control y seguimiento de los parámetros hidrodinámicos y climáticos, permite poder evaluar si la recarga podría estar siendo

afectada actualmente de alguna manera La ubicación de este acuífero en una región en las que los estudios regionales indican que se han empezado a producir cambios en las tendencias de la precipitación, aumento de la torrencialidad y alteraciones que afectan tanto a los eventos de precipitación extremos como a los periodos de sequía (Mountahir, et al., 2017; Valdés, et al, 2017) es necesario tratar de comprobar si estos cambios podrían estar ya afectando a acuíferos concretos. Esta información resulta extremadamente importante para poder empezar a tomar decisiones y optimizar la gestión de los acuíferos y evitar situaciones que pudieran llevar a la sobreexplotación, como ha ocurrido en nuestro entorno próximo durante el pasado siglo.

5. CONCLUSIONES

Las entradas de agua en el acuífero del Ventós se deben únicamente a la infiltración del agua de lluvia. La estación perteneciente a AEMET Agost Escuela Nacional está muy cerca del relieve del Ventós, por lo que los valores de precipitación medidos son representativos de lo que cae sobre el acuífero. El estudio de la serie temporal 1976-2019 ha permitido establecer que el módulo pluviométrico anual medio ha sido de 282 mm, si bien hay que tener en cuenta la variabilidad en función del año. Aunque se observa una ligera tendencia positiva que apuntaría que se viene produciendo un pequeño aumento de precipitación anual a lo largo del tiempo, esta tendencia no puede considerarse estadísticamente significativa.

El número de días lluviosos medio es de 35 aunque presenta una fuerte oscilación entre años. Aunque presenta una ligera tendencia descendente a lo largo del tiempo, tampoco puede considerarse significativa. Lo mismo pasa con el número de episodios lluviosos, que varía entre 13 y 34 con un valor medio de 23. Lo que sí parece estable es el número de episodios lluviosos o efectivos que generan recarga en el acuífero que presentan un valor medio de 4. Aunque el porcentaje de lluvia de estos episodios con respecto a la lluvia anual también muestra una tendencia positiva, no puede considerarse significativa estadísticamente.

En definitiva, se puede concluir que no hay evidencias de un cambio significativo en la precipitación anual que recibe el acuífero del Ventós, ni tampoco en lo que respecta a precipitaciones efectivas o que generan recarga. Dado que la explotación durante las últimas décadas ha permanecido relativamente estable y en cierto modo regulado, todo apunta que, a corto plazo, esta explotación puede considerarse como sostenible. No obstante, sería interesante establecer este tipo de estudios con cierta frecuencia como herramienta de gestión de acuíferos.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se engloba dentro del marco del proyecto HIDROMED (PID2019-111332RB-C21) financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación. Agradecemos a la Diputación Provincial de Alicante, a la empresa AGUAGEST LEVANTE y Ayto. de Agost las facilidades ofrecidas para poder realizar la presente investigación.

REFERENCIAS

- Abdelli, F. (1999). *Análisis comparativo de la contribución de distintas comunidades vegetales a la distribución del agua de lluvia a la conservación del agua e el suelo y la recarga de acuíferos en medio semiáridos*. Master of Science. CIHEAM.
- Andreu, J. M. (1997). *Contribución de la sobreexplotación al conocimiento de los acuíferos kársticos de Crevillente, Cid y Cabeço d'Or (provincia de Alicante)*. Tesis Doctoral Universidad de Alicante.
- Andreu, J. M., Linares, J., Pulido-Bosch, A., García-Sánchez, E. y Bellot, J. (2006). Utilización de registros automatizados para el conocimiento de la infiltración en un pequeño acuífero kárstico mediterráneo: ejemplo del Ventós (Alicante, España). En: (J. J. Durán, B. Andreo y F. Carrasco (eds.), *Karst, cambio climático y aguas subterráneas* (pp. 193-202). IGME, Ser: Hidrogeología y Aguas Subterráneas, nº 18.
- Böhnisch, A., Mittermeier, M., Leduc, M., & Ludwig, R. (2021). Hot spots and climate trends of meteorological droughts in Europe—assessing the percent of normal index in a single-model initial-condition large ensemble. *Frontiers in Water*, 3, 716621. <https://doi.org/10.3389/frwa.2021.716621>
- Feinstein M. A., Fernández-Mejuto M. y Andreu Rodes J. M. (2022). Evaluación de la recarga del acuífero Solana. Análisis de escenarios de cambio climático En: J. Melgarejo Moreno, M. I. López Ortiz y Patricia Fernández Aracil (eds.), *Agua, Energía y Medioambiente* (pp. 381-391). Universidad de Alicante. <http://hdl.handle.net/10045/127170>
- Fernández-Mejuto, M., Andreu, J.M., Pla, C. & Valdés-Abellán, J. (2019). Assessing groundwater recharge in two sites with different climates in the Alicante region of South-East Spain. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 229, 117-129. <https://doi:10.2495/WRM190121>
- González-Hidalgo, J. C., Brunetti, M., & de Luis, M. (2010). Precipitation trends in Spanish hydrological divisions, 1946–2005. *Climate Research*, 43, 215-228. <https://doi.org/10.3354/cr00937>
- Moutahir, H., Bellot, P., Monjo, R., Bellot, J., García, M., & Touhami, I. (2017). Likely effects of climate change on groundwater availability in a Mediterranean region of South-eastern Spain. *Hydrological processes*, 31(1), 161-176. <https://doi.org/10.1002/hyp.10988>
- Moutahir, H., Fernández-Mejuto, M., Andreu, J. M., Tohuami, I., Ayanz, J., & Bellot, J. (2019). Observed and projected changes on aquifer recharge in a Mediterranean semi-arid area, SE Spain. *Environmental Earth Sciences*, 78, 671. <https://doi.org/10.1007/s12665-019-8688-z>
- Fernández-Mejuto, M., Hernández-Bravo, J. A., Palencia, R., Rodríguez-Hernández, L., Fernández-Rodríguez, H. y Pérez-Calvo, F. (2020). Abastecimientos: los municipios abastecidos con aguas subterráneas. En: J. Melgarejo y M. Fernández-Mejuto (eds.), *El agua en la provincia de Alicante* (pp. 269-280). <http://hdl.handle.net/10045/108286>
- Pulido-Velazquez, D., García-Aróstegui, J. L., Molina, J. L., & Pulido-Velazquez, M. (2015). Assessment of future groundwater recharge in semi-arid regions under climate change sce-

- narios (Serral-Salinas acuífero, SE Spain). Could increased rainfall variability increase the recharge rate? *Hydrological Processes*, 29(6), 828-844. <https://doi.org/10.1002/hyp.10191>
- Riedel, T. & Weber, T. K. D. (2020). Review: The influence of global change on Europe's water cycle and groundwater recharge. *Hydrogeology Journal*, 28, 1939-1959. <https://doi.org/10.1007/s10040-020-02165-3>
 - Scanlon, B. R., Healy, R. W., & Cook, P. G. (2002). Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge. *Hydrogeology Journal*, 10 (1), 18-39. <https://doi.org/10.1007/s10040-001-0176-2>
 - Schlosser, C. A., Strzepek, K., Gao, X., Fant, C., Blanc, È., Paltsev, S., Jacoby, H., Reilly, J., & Gueneau, A. (2014). The future of global water stress: an integrated assessment. *Earth's Future*, 2, 341-361. <https://doi.org/10.1002/2014EF000238>
 - Teuling, A. J., De Badts, E., Jansen, F. A., Fuchs, R., Buitink, J., van Dijke, A. J. H., & Sterling, S. (2019). Climate change, re-/afforestation, and urbanisation impacts on evapotranspiration and streamflow in Europe. *Hydrology and Earth System Sciences*. <https://doi.org/10.5194/hess-2018-634>
 - Tohami, I., Andreu, J. M., Bellot, J., García-Sánchez, E. y Pulido-Bosch, A. (2008). Contribución de algunos eventos de recuperación al conocimiento de la recarga en el acuífero del Ventós (Alicante). *Geotemas*, 10, 1597-1600.
 - Touhami, I., Chirino, E., Andreu, J. M., Sánchez, J. R., Moutahir, H. & Bellot, J. (2015). Assessment of climate change impacts on soil water balance and aquifer recharge in a semiarid region in south east Spain. *Journal of Hydrology*, 527, 619-629.
 - Valdés-Abellán, J., Pardo, M. A. & Tenza-Abril, A. J. (2017). Observed precipitation trend changes in the western Mediterranean region. *International Journal of Climatology*, 37, 1285-1296. <https://doi.org/10.1002/joc.4984>
 - Villacampa, L. (2015). *Estudio hidroquímico del acuífero Ventós-Castellar (Agost, Alicante)*. Tesis Doctoral Universidad de Alicante. https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/53468/1/tesis_leopoldo_villacampa.pdf
 - Villarroya, F., García, E., Reyeroy, C. y de la Hera, Á. (2014). Datos básicos sobre el uso del agua en España: recursos didácticos. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 22(3), 217-217.