

SOSTENIBILIDAD DEL ABASTECIMIENTO CON AGUAS SUBTERRÁNEAS EN NÚCLEOS RURALES DE ABEGONDO (A CORUÑA) Y EVALUACIÓN DEL IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO

Javier Samper^{1*}, Acacia Naves¹, Bruno Pisani¹, Jorge Dafonte², Luis Montenegro¹, Alba Mon¹, Aitor García-Tomillo¹ y Raymundo Rangel²

¹Grupo Aquaterra, Centro de Investigaciones Científicas (CICA), Universidad de A Coruña, Campus de Elviña, 15071 A Coruña. e-mail: jsamper@udc.es, web: <https://cica.udc.es/es/grupo/gestion-sostenible-de-los-recursos-hidricos-y-del-suelo>

²Escuela Superior de Ingeniería, Universidad de Santiago, Rúa Benigno Ledo s/n, 27002 Lugo. e-mail: jorge.dafonte@usc.es

RESUMEN. Se ha analizado la sostenibilidad de los sistemas de abastecimiento autónomos con aguas subterráneas en los núcleos rurales de Abegondo (A Coruña). El área de estudio está situada en esquistos fracturados y meteorizados, que presentan una gran heterogeneidad que se ha analizado mediante tomografías eléctricas 3D. Se ha definido un modelo conceptual hidrogeológico de la zona. El nivel freático es somero. La transmisividad equivalente oscila entre 15 y 35 m²/d. Algunos pozos y manantiales muestran contaminación bacteriológica y por nitratos debida a la gestión inadecuada del purín. Se ha detectado en algunos casos también contaminación por metales (Fe y Mn). Se han estimado los recursos subterráneos mediante un modelo hidrológico de balance que se ha calibrado con datos históricos. Este modelo se ha utilizado después para evaluar los efectos del cambio climático a finales del siglo XXI para los escenarios A2 y B2. Los resultados de los modelos indican una disminución de los recursos subterráneos que no debería afectar a la disponibilidad de agua. Sin embargo, la concentración de la recarga en periodos más cortos podría agravar los problemas de suministro en los periodos de sequía.

ABSTRACT. This paper addresses the sustainability of the autonomous groundwater supply systems in rural areas of Abegondo (A Coruña). The study area is located in strongly-heterogeneous fractured and weathered schists and shales. Their heterogeneity has been characterized by means of 3D electrical tomographies. A conceptual hydrogeological model of the area has been postulated. The water table is shallow. The equivalent transmissivity ranges from 15 to 35 m²/d. Some wells and springs show bacteriological and nitrate pollution caused by inappropriate management of slurry. In some cases, metal contamination (Fe and Mn) has been detected. Groundwater resources have been estimated by using a hydrological water balance model which was calibrated with historical data. The model has been used later to assess the effects of climate change at the end of the 21st century for the A2 and B2 scenarios. Model predictions indicate a mild decrease in the average groundwater resources which should not affect the available water resources. However, the concentration of the recharge in shorter periods could aggravate water shortages in drought periods.

1.- Introducción

El 25% de la población gallega vive en comunidades rurales dispersas, en las que el abastecimiento de agua se realiza mediante la iniciativa privada usando soluciones autónomas que consisten en pozos particulares o traídas vecinales que captan manantiales. Existe una preocupación creciente acerca de la contaminación microbiológica y por nitratos de las aguas subterráneas. Esta contaminación es debida a la gestión inadecuada del abono orgánico en los cultivos, los vertidos ocasionales de purín de las granjas y una ordenación de los usos del suelo que no tiene en cuenta las captaciones de agua (Samper et al. 2016; 2018). La implantación de las normativas europeas de aguas de consumo humano (Directiva 98/83/CE) y la protección y gestión del agua (Directiva 2000/60/CE) en estas comunidades constituyen un gran reto para la administración del agua, ya que la viabilidad de infraestructuras centralizadas está limitada por las enormes inversiones necesarias y su alto coste de mantenimiento.

Más del 50% de la población de Abegondo (A Coruña) se abastece mediante sistemas autónomos (Ayuntamiento de Abegondo 2013; Naves et al. 2019). En el marco del proyecto LIFE Rural Supplies se evaluó la sostenibilidad de estos sistemas en el municipio de Abegondo y se desarrollaron medidas para mitigar los principales problemas que incluyen: (1) La insuficiente garantía de suministro; (2) El deterioro de la calidad del agua y (3) Las deficiencias en la gobernanza del uso del agua subterránea y la gestión de los residuos (Ameijenda, 2015).

La zona de estudio está situada en rocas metamórficas. Este tipo de formaciones presentan en general una gran heterogeneidad espacial, tanto en dirección horizontal como vertical, con importantes variaciones de los parámetros hidrogeológicos. La heterogeneidad está asociada a la fracturación y meteorización de las rocas y complica significativamente la caracterización de los parámetros y la definición del modelo conceptual del flujo (Sánchez-Vila et al. 1996). Los modelos conceptuales de flujo en rocas metamórficas incluyen: modelos de doble porosidad (Barenblatt et al. 1960), modelos de fracturas discretas (Lee y Farnet 1993), modelos de planos paralelos (Bear 1993; Lee y Farnet 1993) y modelos de medio poroso equivalente (McDonald y Harbaugh 1984),

que son los más extendidos.

La garantía de suministro de los sistemas autónomos se puede ver comprometida por la disponibilidad de recursos y por un diseño incorrecto o mantenimiento insuficiente de las obras de captación, regulación y distribución. El cambio climático podría causar un problema de suministro en periodos de sequía. Se han estimado los recursos hídricos subterráneos en la zona de estudio para las condiciones históricas y al final del siglo XXI, teniendo en cuenta los efectos del cambio climático. Los impactos del cambio climático se han evaluado a partir de las diferencias entre los recursos estimados para un periodo de control y un periodo de predicción (Akhtar et al. 2008; Stigter et al. 2014). Este método no predice el comportamiento futuro de las variables hidrológicas con precisión. Sin embargo, permite considerar la variabilidad diaria de las variables climáticas simuladas con los modelos climáticos (Hay et al. 2002; Wood et al. 2004) mejorando la evaluación de las componentes del balance hídrico cuando se usan pasos de tiempo diarios, como en el caso del código hidrológico VISUAL-BALAN (Espinha et al., 2013; Samper et al. 2015b; Pisani et al. 2019).

2.- Descripción de la zona de estudio

La zona de estudio está situada en el municipio de Abegondo cerca de la ciudad de A Coruña (Fig. 1). Su superficie es de 29 km². Su altitud varía entre 250 y 409 msnm, siendo la altitud media igual a 300 msnm. La pendiente del terreno tiene un valor medio de 9.1°.

El clima es Atlántico, con una temperatura media anual de 12.3°C, suaves variaciones y abundantes precipitaciones. La precipitación media anual es aproximadamente igual a 1500 mm. La red de drenaje es muy densa. Los arroyos drenan en su mayoría a los ríos Mero y Barcés.



Fig. 1. Situación del municipio de Abegondo.

Los suelos de la zona se han desarrollado sobre esquistos y presentan texturas limosas y franco limosas. Se pueden clasificar como umbrisoles ferrálicos y háplicos (FAO 1988). El espesor medio del suelo varía entre 45 y 180 cm y el contenido de materia orgánica es aproximadamente igual al 10% (Rodríguez Suárez et al. 2010).

El área de estudio está situada en una zona rural dispersa con baja densidad de población (~66 hab/km²). Los principales usos del terreno son: bosques (40%), cultivos (34%) y matorrales y pastos (26%). El abastecimiento de

agua se realiza mediante sistemas autónomos que incluyen pozos excavados artesanales, pozos de barrena y traídas vecinales que captan manantiales en las zonas más elevadas. Samper et al. (2016) presentaron los resultados de un estudio hidrogeológico en el que además se analizó la vulnerabilidad de las aguas subterráneas frente a la contaminación y la protección de las captaciones de las zonas rurales de Abegondo (A Coruña). Posteriormente, Samper et al. (2018) presentaron un análisis de la sostenibilidad de los sistemas autónomos de abastecimiento con aguas subterráneas en las zonas rurales del citado municipio de Abegondo.

3.- Geología

El Complejo de Órdenes es una unidad polimetamórfica con un núcleo esquistoso e intercalaciones discontinuas de anfibolitas e intrusiones de rocas básicas o ultrabásicas (Anthonioz y Ferragne 1978; Fernández y Macías 1985). La zona de estudio está situada en las metapsamitas y metapelitas de la Unidad Betanzos-Arzúa de dicho complejo. Se han identificado pocos afloramientos de los esquistos, debido a la extensa cobertura de suelo y la frondosa vegetación. La capa superior de esquistos alterados (regolito) es muy heterogénea y presenta un espesor entre 1 y 5 m, alcanzando algunas veces 15 m. La roca poco fracturada se ha encontrado en sondeos distribuidos en la zona de estudio a profundidades muy diferentes, entre 15 y 50 m. Al sur de la zona de estudio aparecen bandas de filitas de menos de 4 km de longitud. En las zonas más bajas y en los cursos de agua principales y sus zonas de inundación, se encuentran depósitos coluviales y aluviales del Cuaternario.

Se han realizado tomografías eléctricas al suroeste de la zona de estudio, utilizando un equipo ABEM Lund Imaging en una disposición multielectrodo dipolo-dipolo con 40 electrodos equiespaciados 5 m. Se ha medido la resistividad aparente a lo largo de 5 perfiles paralelos separados 5 m. Los resultados han sido combinados e invertidos con el programa RES3DINV 2.16 (Geotomo Software) obteniendo una imagen 3D de la resistividad eléctrica del terreno. Los valores de la resistividad del terreno varían entre 60 y 2000 $\Omega \cdot m$ y muestran una gran heterogeneidad horizontal y vertical (Samper et al. 2019). Los resultados son coherentes con las observaciones realizadas durante la perforación de dos sondeos y con estudios en esquistos realizados por otros autores (Wrede et al. 2015).

4.- Hidrogeología

4.1.- Piezometría y ensayos hidráulicos

Se ha realizado un inventario de puntos de agua que incluye pozos excavados y perforados, manantiales y fuentes. Se han registrado 133 puntos distribuidos por toda el área de estudio. Con estos datos se han elaborado mapas de isopiezas (Fig. 2). En general, el nivel piezométrico es somero. La profundidad del nivel es menor de 10 m.

Se ha instalado una red de control piezométrico que consiste en tres sondeos perforados en los que se colocaron transductores de presión eléctricos, que registran continuamente el nivel piezométrico. Se han analizado los datos recogidos durante más de dos años (Fig. 3). El nivel freático es somero. Su profundidad es en general menor de 10 m y sólo supera los 20 m en las zonas más altas. Las oscilaciones estacionales son suaves. Las oscilaciones medidas durante 2 años son menores de 4 m. El nivel piezométrico asciende en respuesta a las precipitaciones de forma que se produce recarga en los días lluviosos y en los días inmediatamente posteriores. Posteriormente, cuando cesan las lluvias los niveles presentan curvas de recesión.

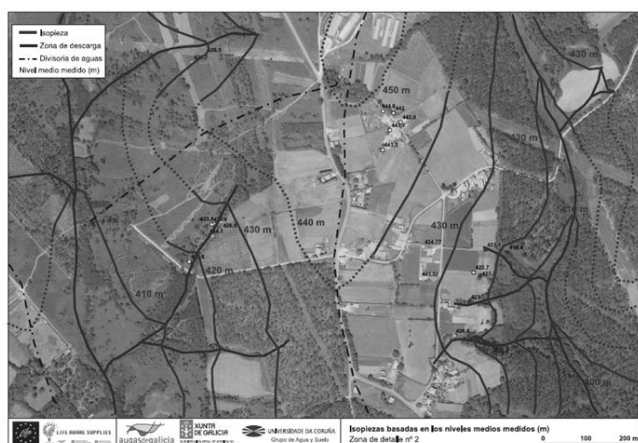


Fig. 2. Mapa de isopiezas en el entorno de la aldea de A Malata elaborado con los niveles medios medidos en los puntos de agua inventariados. El mapa muestra los arroyos (zonas de descarga) y las divisoria de aguas.

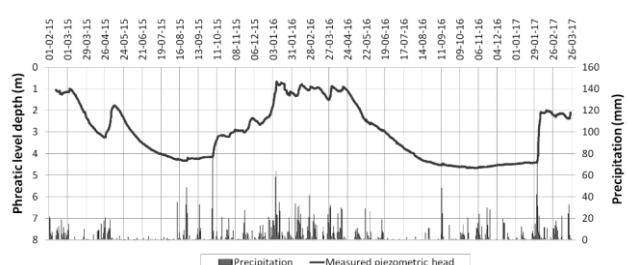


Fig. 3. Evolución temporal de la profundidad del nivel piezométrico medida en un piezómetro de la red de control y precipitación diaria entre febrero de 2015 y marzo de 2017.

Se han realizado varios ensayos hidráulicos en diferentes ubicaciones de la zona de estudio. La transmisividad equivalente estimada varía entre 15 y 35 m²/d. Estos valores son coherentes con los estimados por Carvalho et al. (2003) para los esquistos fracturados del norte de Portugal.

4.2.- Modelo conceptual hidrogeológico

El modelo conceptual hidrogeológico de la zona de estudio es un modelo de medio poroso equivalente (McDonald y Harbaugh 1984) en el que se consideran las siguientes tres capas: una capa superior de roca alterada (regolito) en la que queda incluido el suelo, una capa

intermedia de roca fracturada y una capa profunda de roca poco fracturada (Fig. 4). Este modelo es similar al propuesto por Lubczynsky y Gurwin (2005) para la cuenca de Sardón (Salamanca).

La mayor parte del flujo subterráneo tiene lugar a través del regolito y la capa de roca fracturada. La zona de contacto entre la capa de regolito y la roca fracturada es una zona de flujo preferente. Sin embargo, los datos disponibles no permiten diferenciar las propiedades de cada una de estas dos capas. El modelo conceptual propuesto supone un único acuífero libre con una transmisividad equivalente entre 15 y 35 m²/d. El flujo subterráneo por la capa más profunda se considera despreciable.

La recarga del acuífero se produce por la infiltración del agua de lluvia. El regadío no es relevante ya que ocupa una superficie muy pequeña. El acuífero descarga en las partes bajas de los valles en arroyos y en manantiales distribuidos por la zona de estudio. Los manantiales no parecen estar asociados a contactos geológicos, diques de cuarzo u otras singularidades geológicas.

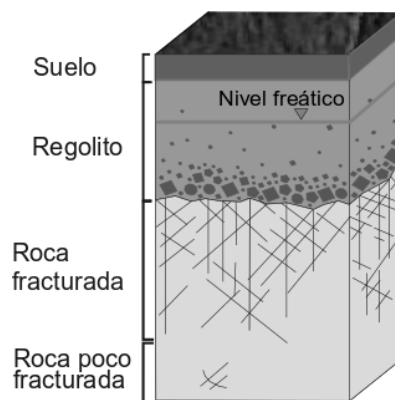


Fig. 4. Esquema del modelo conceptual hidrogeológico para los esquistos fracturados que incluye una capa superior de alteración (regolito), una capa intermedia de roca fracturada y una capa profunda de roca poco fracturada. Nótese que el suelo queda englobado en la capa superior de regolito.

5. Hidroquímica y calidad de las aguas subterráneas

Las propiedades naturales de las aguas subterráneas en las cuencas de los ríos Mero y Mandeo, en las que se encuentra la mayor parte de la zona de estudio, fueron definidas en el marco del proyecto LIFE Aqua Plann (Aqua Plann 2011). Se trata de aguas ligeramente ácidas, con valores de pH entre 5.7 y 6.5, y una conductividad eléctrica baja, entre 40 y 110 µS/cm. La concentración de nitrato varía entre 1 y 10.4 mg/L. Los intervalos de concentraciones estimados para el hierro (0.01-0.23 mg/L) y el manganeso (5-67 µg/L) supera las concentraciones recomendadas para el agua de consumo humano (Directiva 98/83/EC). Estas altas concentraciones tienen un origen natural geogénico relacionado con las áreas de contacto de los esquistos y los granitos. La concentración de estroncio (20-31 µg/L), también de origen natural, está por debajo del valor paramétrico. Las concentraciones

naturales de otros metales son muy bajas.

En el marco del proyecto LIFE Rural Supplies, se han realizado 202 análisis físico-químicos y microbiológicos en muestras de agua tomadas entre 2014 y 2016 en puntos de agua distribuidos en la zona de estudio. Los resultados han sido comparados con los valores de referencia de los parámetros para el agua natural y con los límites establecidos por la legislación para el agua de consumo humano (Directiva 98/83/EC).

Las concentraciones de nitrato medidas indican la contaminación del agua subterránea en la parte sur de la zona de estudio. Las altas concentraciones de nitrato son consecuencia del manejo inadecuado del abono orgánico en los cultivos y de las descargas ocasionales de purín de las granjas de cerdos y visones de la zona en fincas situadas aguas arriba de las captaciones. Hay evidencias de una significativa contaminación bacteriológica en puntos de agua distribuidos por toda la zona de estudio. Por último, las concentraciones medidas de metales como Al, Mn, Fe, As y Pb superan los límites establecidos por la normativa para aguas de consumo humano. En la mayor parte de los casos, la contaminación por metales está asociada a la materia en suspensión y las concentraciones disueltas están por debajo de los valores paramétricos.

La contaminación microbiológica y por metales no es muy preocupante puesto que puede ser eliminada mediante la instalación de sistemas de cloración y filtrado asequibles y de pequeñas dimensiones en las traídas de agua vecinales. Sin embargo, la contaminación por nitratos no puede ser eliminada con ningún tratamiento de asequible. Las captaciones de agua que presentan contaminación por nitratos se deben sustituir por otras captaciones situadas en zonas no afectadas por este tipo de contaminación.

Sería necesario disponer de una planificación y ordenamiento del territorio que tuviesen en cuenta medidas de protección de las captaciones de agua. La sostenibilidad de los pequeños abastecimientos rurales requiere la definición, implantación y control de las zonas de protección de las captaciones que se deberían establecer de común acuerdo entre la administración local, el organismo de cuenca, la administración medioambiental, los propietarios de las granjas, los agricultores y las comunidades de usuarios de las aguas subterráneas.

5.- Modelo hidrometeorológico

Se ha utilizado un modelo de balance hidrometeorológico para la evaluación de los recursos hídricos en las condiciones actuales y de los efectos del cambio climático al final del siglo XXI, considerando los escenarios A2 y B2 del IPCC (Nakicenovic et al. 2000). El modelo se ha realizado con VISUAL-BALAN (Samper et al. 2015), un código hidrológico semidistribuido que calcula el balance hídrico diario en el suelo, la zona no saturada y el acuífero. Este código ha sido ampliamente utilizado en la Península Ibérica y en Latinoamérica para la evaluación de los recursos hídricos, la cuantificación de la recarga y la evaluación de los efectos del cambio climático sobre los recursos hídricos (Alvares y Samper 2009, Alvares et al.

2009; Espinha et al. 2009, 2010; Pisani et al. 2011, 2013, 2017; Samper et al., 1999, 2005, 2007, 2011)

El modelo de balance se ha calibrado con los datos disponibles de niveles piezométricos en los puntos de la red de control piezométrico y con aforos del arroyo del Abelar entre 2007 y 2010 (Fig. 5).

Los resultados para el periodo 2006-2015 indican que la precipitación media anual, P, es igual a 1499 mm. La interceptación y la evapotranspiración (ETR) suponen el 34% de P, respectivamente. El 66% restante corresponde a la escorrentía total. La componente más importante de la escorrentía total es el flujo hipodérmico (78%). La recarga supone el 19% y la escorrentía superficial sólo el 3%.

6.- Evaluación del efecto del cambio climático

Se han evaluado los efectos del cambio climático en los recursos hídricos de la zona de estudio al final del s. XXI utilizando las simulaciones del modelo climático PROMES-HadAM3H (AEMET 2008; Christensen et al. 2007). Se han utilizado las series de precipitación y temperatura de los escenarios A2, más pesimista, y B2, más optimista (Nakicenovic et al. 2000). Los efectos del cambio climático en los recursos hídricos en el periodo 2071-2100 se han calculado tomando como referencia las condiciones hidrometeorológicas del periodo 1961-1990 y suponiendo que no varían los usos del suelo. Las series meteorológicas obtenidas del modelo climático para los periodos histórico y de simulación se han utilizado como datos en el modelo hidrológico calibrado del área de estudio. Se han calculado las diferencias relativas entre las componentes del balance calculadas para el periodo histórico y el periodo de simulación de forma análoga a los estudios realizados en otras zonas de España y Portugal (Stigter et al. 2014; Samper et al. 2015a; Pisani et al. 2019).

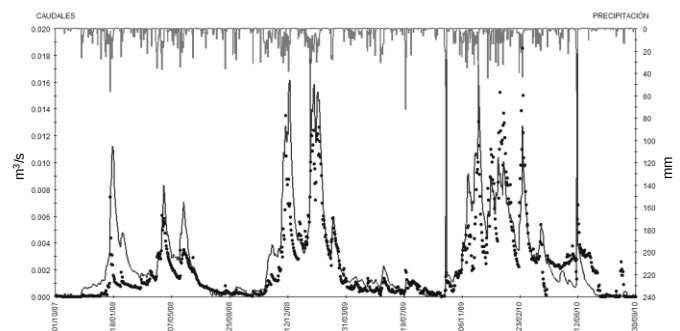


Fig. 5. Ajuste de los caudales calculados con el modelo de hidrológico de balance (línea continua) a los caudales medidos entre 2007 y 2010 (símbolos) del arroyo del Abelar.

Los resultados de los modelos indican que la temperatura media anual podría aumentar 2.4 °C en el periodo 2071-2100 para el escenario B2 y 3.4 °C para el escenario A2. Los recursos hídricos subterráneos disminuirían entre el 6 y el 12%. Esta reducción no debería afectar a la disponibilidad de los recursos para el abastecimiento de agua ya que el consumo de agua subterránea es mucho menor que los recursos medios. Se

espera que se produzca un ligero descenso de los niveles piezométricos y una leve disminución de los caudales de los manantiales. La recarga se concentraría en periodos más cortos, aumentando en invierno y disminuyendo el resto del año. Se esperan, por tanto, periodos sin recarga más frecuentes y más largos. Como consecuencia, el cambio climático podría acentuar los problemas de garantía de suministro existentes en algunas zonas donde las fuentes y los manantiales suelen secarse durante los periodos de sequía. Estos efectos del cambio climático podrían verse empeorados por el consumo de agua de las plantaciones de eucaliptos.

7.- Conclusiones

Se ha analizado la sostenibilidad de los sistemas de abastecimiento autónomos con aguas subterráneas en los núcleos rurales de Abegondo (A Coruña). El área de estudio está situada en esquistos fracturados y meteorizados que presentan una gran heterogeneidad vertical y horizontal que se ha analizado mediante una tomografía eléctrica 3D. El modelo incluye una capa de regolito, una capa intermedia de roca fracturada y una capa profunda de roca poco fracturada. La mayor parte del flujo se produce en las dos capas más superficiales. La transmisividad equivalente de dichas capas varía entre 15 y 35 m²/d. La infiltración de agua de lluvia es la única entrada de agua al acuífero. La descarga se produce en las partes bajas de los valles y los arroyos. Los datos de los manantiales y los niveles piezométricos medidos en los piezómetros y pozos de la zona de estudio, indican que el nivel piezométrico es somero y que oscila ligeramente con las precipitaciones.

El agua subterránea es ligeramente ácida y de conductividad eléctrica baja. No se aprecian cambios significativos en la composición del agua en la zona de estudio. Se ha detectado contaminación bacteriológica y por nitratos en algunos pozos y manantiales de la zona de estudio como consecuencia de un manejo inadecuado del abono orgánico en los cultivos y las descargas ocasionales de purín proveniente de granjas locales de cerdos y visones. Las concentraciones naturales de Fe y Mn superan los valores paramétricos para las aguas de consumo humano. Las concentraciones de Fe, Mn, Al, As y Pb medidas en algunos puntos de agua de la zona de estudio superan los valores paramétricos establecidos por la normativa. En la mayor parte de los casos, esta contaminación se encuentra en la materia en suspensión y puede ser eliminada mediante la filtración del agua.

Los resultados del modelo hidrológico de balance indican que la recarga media para el periodo 2006-2015 es igual a 187 mm/año, que supone un 19% de la precipitación media. El modelo hidrológico se ha utilizado para evaluar los efectos del cambio climático al final del s. XXI para los escenarios A2 (más pesimista) y B2 (más optimista) del IPCC. Se estima que los recursos subterráneos se podrían reducir entre un 6 y un 12% al final del s. XXI. Esta reducción supondrá un ligero descenso de la superficie freática y una disminución del caudal de los manantiales, especialmente en los periodos de sequía. Sin embargo, esta

reducción de los recursos hídricos subterráneos no supondrá una restricción importante puesto que el consumo de agua subterránea es mucho menor que los recursos medios. Podrían surgir problemas de garantía de suministro en algunas zonas durante los periodos de sequía. Estos problemas se podrían resolver mediante la profundización de las captaciones de los manantiales o la perforación de pozos más profundos.

Agradecimientos. Este trabajo se ha realizado en el marco de los proyectos Aqua Plann y Life Rural Supplies del Programa LIFE+ (07/ENV/E/000826 y LIFE12 ENV/ES/000557) financiados parcialmente por la Comisión Europea. Se agradece el apoyo proporcionado por Carlos Ameijenda desde la Secretaría de los proyectos Aqua Plann y Life Rural Supplies en Abegondo así como por Aguas de Galicia (Raquel Piñeiro, Mónica Velo y Roberto Arias).

7.- Bibliografía

- AEMET, 2008. Generación de escenarios regionalizados de cambio climático para España, Agencia Estatal de Meteorología, http://escenarios.inm.es/escenarios/Documentacion/AEMET_Escenarios_Regionalizados.pdf
- Akhtar, M., N. Ahmad y M.J. Booij, 2008. The impact of climate change on the water resources of Hindukush–Karakorum–Himalaya region under different glacier coverage scenarios. *J Hydrol* 355, 148-163.
- Alvares D. y J. Samper, 2009. Evaluación de los recursos hídricos de la cuenca hidrográfica del Ebro mediante GISBALAN, En: IX Jornadas de Zona no Saturada, ZNS'09, Barcelona. Vol IX. 491-498.
- Alvares D., J. Samper y MA García Vera, 2009. Evaluación del efecto del cambio climático en los recursos hídricos de la cuenca hidrográfica del Ebro mediante modelos hidrológicos, En: IX Jornadas de Zona no Saturada, ZNS'09, Barcelona 499-506.
- Ameijenda, C., 2015. LIFE Rural Supplies 2013-2017: Sustainable solutions for very small water supplies. Planes de sostenibilidad de abastecimiento autónomo. 3ª Jornada de Abastecimiento Rural, Abegondo, A Coruña.
- Anthoinoz, P. y A. Ferragne A 1978. Le precambrien polymetamorphique allochtone de la Peninsule Iberique, temoin d'une nappe charriage caledonienne. *Cuad. Sem. Est. Cerámicos de Sargadelos*, 27, pp.24-411978.
- Aqua Plann, 2011. Diagnosis and detailed study of the current state of groundwater quality in the Mero-Barcés basin / Proyecto Aqua Plann Porject, Final Report of Activity A.3-Municipality of Abegondo.
- Ayuntamiento de Abegondo, 2013. Gestion integrada de los recursos hídricos y su aplicacion en el planeamiento local de LIC embalse Abegondo- Cecebre. Informe Layman. After Life Communication Plan 07 ENV/E/000826 AQUA PLANN Project.
- Barenblatt G., I. Zheltov y I. Kochina, 1960. Basic concepts in the theory of homogeneous liquids in fissured rocks. *J Appl Math Mech USSR*, 24, 1286-1303.
- Bear, J., 1993. Modeling flow and contaminant transport in fractured rocks. En: Bear, J., C. Tsang y G. de Marsily (Eds.), *Flow and Contaminant Transport in Fractured Rocks*. Academic Press, San Diego, pp 1-36.
- Carvalho J.M., H.I. Chaminé, N. Plasencia, 2003. Caracterização dos recursos hídricos subterráneos do maciço cristalino do Norte de Portugal: implicações para o desenvolvimento regional. En: *A Geologia de Engenharia e os Recursos Geológicos: recursos geológicos e formação*. Volume de Homenagem ao Prof. Doutor Cotelto Neiva. Série Investigação Imprensa da Universidade de Coimbra, Vol. 2, 245-264, doi: 10.14195/978-989-26-0322-3_18
- Christensen J.H., T.R. Carter, M. Rummukainen y G. Amanatidis, 2007. Evaluating the performance and utility of regional climate models: The PRUDENCE project. *Clim. Change* 81, suppl. 1, 1-6.
- Espinha Marques J, J. Samper, B. Pisani, D. Alvares, J. M. Carvalho, H. I. Chaminé, J. M. Marques, F. Sodré Borges, 2009. Assessment of water resources in a mountain environment with a semi-distributed hydrological model: Serra da Estrela case, central Portugal, En: IX Jornadas de Zona no Saturada, Barcelona Vol IX. pp 514-521.
- Espinha Marques J., J. Samper, B. Pisani, D. Alvares, J. M. Carvalho, H.

- I. Chaminé, J. M. Marques, G. T. Vieira, C. Mora, F. Sodr  Borges, 2010 Evaluation of water resources in a high-mountain basin in Serra da Estrela, Central Portugal, using a semi-distributed hydrological model, *Environmental Earth Sciences* (former *Environmental Geology*). Vol 62 (6): 1219-1234.
- Espinha Marques, J, JM. Marques, HI Chaminé, P.M. Carreira, P. E. Fonseca, F. A. Monteiro Santos, R. Moura, J. Samper, B. Pisani, J. Teixeira, J. M. Carvalho, F. Rocha y F. S. Borges, 2013, Conceptualizing a mountain hydrogeologic system by using an integrated groundwater assessment (Serra da Estrela, Central Portugal): a review, *Geosciences Journal*, Vol. 17, No. 3, p. 371 – 386.
- FAO, 1998. World reference base for soil resources. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.
- Fernández M. J. y F. Macías, 1985. Contribuci n a la caracterización qu mico-mineral gica de los esquistos del “Complejo de Ordes”. *Cuad. Lab. Xeol. de Laxe*, 9, 469-494.
- Hay L.E., M.P. Clark, R.L. Wilby, W.J. Gutowski, G.H. Leavesley, Z. Pan, R.W. Arritt y E.S. Takle, 2002. Use of regional climate model output for hydrologic simulations. *J Hydrometeorol*, 3, 571–590.
- Lee C.-H. y I. Farmer, 1993. *Fluid Flow in Discontinious Rocks*. Chapman & Hall, London.
- Lubczynski, M.W. y J. Gurwin, 2005. Integration of various data sources for transient groundwater modeling with spatio-temporally variable fluxes–Sardon study case, Spain. *J. Hydrol.*, 306, 71–96.
- McDonald M.G. y A.W. Harbaugh, 1984. A Modular Three-Dimensional Finite-Difference Ground-Water Flow Model, *USGS Open-File Report*, 83-875.
- Nakicenovic, N., J. Alcamo, G. Davis, B. de Vries, J. Fenhann, S. Gaffin, K. Gregory, A. Gr bler, T.Y. Jung, T. Kram, E.L. La Rovere, L. Michaelis, S. Mori, T. Morita, W. Pepper, H. Pitcher, L. Price, K. Riahi, A. Roehrl, H.-H. Rogner, A. Sankovski, M. Schlesinger, P. Shukla, S. Smith, R. Swart, R. van Rooijen, N. Victor y Z. Dadi, 2000. *IPCC Special Report on Emission Scenarios*, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 570 pp.
- Naves, A., J. Samper, A. Mon, B. Pisani, L. Montenegro and J. Martins Carvalho, 2019, Demonstrative actions of spring restoration and groundwater protection in rural areas of Abegondo (Galicia, Spain), *Sustainable Water Resources Management*, Vol. 5: 175-186.
- Pisani, B, J Samper, L Ribeiro, Y Fakir, y T Stigter, 2011, Evaluación de los impactos del cambio climático en el ac ifero de la Plana de la Galera. En: *Jornadas de Zona no Saturada Vol X ZNS 2011*, José Martínez y Nilda Sánchez Ed, 353-358
- Pisani, B, J Samper y MA García-Vera, 2013, Evaluación de los impactos del cambio climático en los recursos y en las demandas agrarias de la cuenca del río Jalón. En: *XI Jornadas de La Zona no Saturada*, Lugo, 6-8 Noviembre, 219-226
- Pisani, B., J Samper y A Paz, 2017, Modelos hidrológicos de balance de agua y evaluación de los impactos del cambio climático en zonas rurales de Galicia con eucaliptos, En: *Estudios de la Zona no Saturada Vol XIII*, Zaragoza, 8-10 noviembre. 565-576.
- Pisani B, Javier Samper and Jorge Espinha Marques, 2019, Climate change impact on groundwater resources of Serra da Estrela mountain region in Central Portugal, *Sustainable Water Resources Management*, Vol. 5: 289-304.
- Rodríguez-Suárez J. A., B. Soto, M. L. Iglesias y F. Díaz-Fierros. 2010. Application of the 3PG forest growth model to a Eucalyptus globulus plantation in Northwest Spain. *Eur J Forest Res* (2010) 129:573–583.
- Samper, J., Huguet, LL., Ares, J. y M. A. García-Vera. 1999. Modelos interactivos de balance hidrológico, En: *IV Jornadas de Zona no Saturada*. Tenerife. Eds. R. Muñoz Carpena, A. Ritter, C. Tascón. ICIA. 187-193
- Samper, J., M.A. García-Vera, B. Pisani, D. Alvares, A. Varela y J.A. Losada, 2005. Modelos hidrológicos y sistemas de información geográfica para la estimación de los recursos hídricos: aplicación de GIS-BALAN a varias cuencas españolas, En: *VII Jornadas de Zona no Saturada, ZNS’05*, Coruña, 269-274.
- Samper, J., B. Pisani y D. Alvares y M. A. García Vera, 2007. Evaluación del efecto del cambio climático en la cuenca hidrográfica del Ebro mediante modelos hidrológicos y Sistemas de Información Geográfica, En: *VIII Jornadas de Zona no Saturada, ZNS’07*, Córdoba, J.V. Giráldez y F.J. Jiménez Ed., 347-353.
- Samper, J, Y Li, B Pisani, L Ribeiro, Y Fakir, y T Stigter 2011, Evaluación de los impactos del cambio climático en los ac iferos de la Plana de La Galera y del aluvial de Tortosa. En: *Jornadas de Zona no Saturada Vol X ZNS 2011*, José Martínez y Nilda Sánchez Ed, 359-364.
- Samper J, Y. Li, B. Pisani, 2015a, An evaluation of climate change impacts on groundwater flow in the La Plana de la Galera and Tortosa alluvial aquifers (Spain) *Environmental Earth Sciences*, Vol 73:2595–2608.
- Samper, J, B. Pisani y J. Espinha Marques, 2015b. Hydrological models of interflow in three Iberian mountain basins. *Environ. Earth Sci.*, 73, 2645-2656.
- Samper, J, A Naves, B Pisani, L Montenegro, A Mon, J Fernández, R Arias, R Piñeiro, M Velo y C Ameijenda. 2016. Estudio hidrogeológico, vulnerabilidad y protección de las captaciones de los suministros rurales en Abegondo (A Coruña), Congreso Hispano-Luso de Aguas Subterráneas, AIH-GE, Madrid, Noviembre 2016 pp. 335-344.
- Samper J., A. Naves, B. Pisani, L. Montenegro, A. Mon, J. Martins, C. Ameijenda, R. Piñeiro y R. Arias. 2018. Sostenibilidad de los sistemas autónomos de abastecimiento con aguas subterráneas en zonas rurales de Galicia: lecciones aprendidas en el municipio de Abegondo. Congreso Ibérico sobre agua subterránea, medio ambiente, salud y patrimonio, A Navarro, E. Giménez y J.J. Dur n Ed. Salamanca. pp 415-424.
- Samper, J., A. Naves, B. Pisani, J. Dafonte, L. Montenegro, A. García-Tomillo y R. Rangel, 2019. Hydrogeological model of groundwater flow through fractured schists in rural areas of Abegondo (Galicia, Spain) and impact of climate change. Submitted to: *Hydrogeol. J.*
- Sánchez-Vila, X., J. Carrera y G. P. Girardi, 1996. Scale effects in transmissivity. *J Hydrol*, 183(1-2): 1-22.
- Stigter, T.Y., Nunes, J.P., Pisani, B., Fakir, Y., Hugman, R., Li, Y., Tom , S., Ribeiro, L., Samper, J., Oliveira, R., Monteiro, J.P., Silva, A., Tavares, P.C.F., Shapouri, M., Cancela da Fonseca, L., El Himer, 2014 Comparative assessment of climate change impacts on coastal groundwater resources and dependent ecosystems in the Mediterranean. *Regional Environmental Change*, Vol 14 (Suppl 1): S41–S56.
- Wood, A.W., L. R. Leung, V. Sridhar y D. P. Lettenmaier, 2004. Hydrologic implications of dynamical and statistical approaches to downscaling climate model outputs. *Clim. Change*, 62, 189–216.
- Wrede, S., F. Fenicia, N. Martínez-Carreras, J. Juilleret, C. Hissler, A. Krein, H. Savenije, S. Uhlenbrook, D. Kavetski y L. Pfister, 2014. Towards more systematic perceptual model development: a case study using 3 Luxembourgish catchments. *Hydrol. Proc.*, 29(12), 2731-2750.