

MODELO HIDROLÓGICO DE BALANCE DEL VERTEDERO DE SARDAS EN SABIÑÁNIGO (HUESCA)

Javier Samper¹, Bruno Pisani¹, Joaquín Guadaño², Acacia Naves¹, Brais Sobral¹ y Jesús Fernández³

¹Centro de Investigaciones Científicas Avanzadas (CICA), ETS de Ingenieros de Caminos, Universidade da Coruña, España, e-mail: j.samper@udc.es; bruno.pisani@udc.es; acacia.naves@udc.es; brais.sobral@udc.es; web: <https://cica.udc.es/es/grupo/gestion-sostenible-de-los-recursos-hidricos-y-del-suelo>

²Empresa para la Gestión de Residuos Industriales, S.A., S.M.E., M.P. (EMGRISA). C/ Velázquez, 105, 28006, Madrid. e-mail: jguadano@emgrisa.es, web: <http://www.emgrisa.es>

³Unidad para la descontaminación integral del lindano. Departamento de Desarrollo Rural y Sostenibilidad. Gobierno de Aragón. Zaragoza. Plaza San Pedro Nolasco, 7, 50071 Zaragoza. E-mail: jfernandezc@aragon.es, web: <http://www.aragon.es/DepartamentosOrganismosPublicos/Departamentos/DesarrolloRuralSostenibilidad>

RESUMEN. La fábrica de lindano de INQUINOSA en Sabiñánigo cesó su actividad en 1992. Los residuos de la fábrica se depositaron en los vertederos de Sardas y Bailín. El emplazamiento de Sardas está a menos de 1 km al este del casco urbano, ocupa una superficie de casi 4 ha y es atravesado por la carretera N-330. Se ha realizado un modelo hidrológico de balance para cuantificar las entradas y salidas de agua diarias del vertedero de Sardas. Los resultados del modelo indican que: 1) La pantalla de bentonita actúa como barrera al flujo de agua desde el vertedero hacia la llanura aluvial; 2) El flujo subterráneo por el sustrato geológico margoso es muy pequeño; 3) La cobertera del vertedero sigue cumpliendo su papel de sellado; 4) Las cunetas perimetrales cumplen su función en la mayor parte del vertedero; 5) Las entradas de agua se han estimado entre 20 y 34 m³/d; 6) Las salidas de agua se realizan por bombeos y por debajo de la pantalla frontal con un caudal medio de 26 m³/d.

ABSTRACT. The INQUINOSA lindane factory in Sabiñánigo stopped operating in 1992. Lindane production wastes were disposed at the Sardas and Bailín landfills. The Sardas landfill occupies an area of 4 ha and is located less than 1 km to the East of the downtown. The landfill is crossed by the N-330 road. Daily water inflows and outflows of the landfill have been quantified by means of a water balance model. Model results indicate that: 1) The front slurry-wall acts as a barrier to the water flow from the landfill into the alluvial plain; (2) The geological marl substratum allows a small groundwater flow; (3) The cover of the landfill provides adequate sealing; (4) For the most part, the landfill perimeter ditches perform well; (5) Water inflows are small and range from 20 to 30 m³/d; (6) Water outflows include water pumping and groundwater flow underneath the slurry-wall (26 m³/d in average).

El lindano es el isómero comercial del hexaclorociclohexano (HCH) que se utilizó ampliamente como pesticida hasta su prohibición.

La acumulación de contaminantes orgánicos persistentes procedentes de la actividad de la antigua fábrica de lindano de INQUINOSA en Sabiñánigo (Huesca) es un condicionante potencial de la calidad del agua de la cuenca del río Ebro y representa un grave riesgo para la salud humana y los ecosistemas (GA, 2016). Los emplazamientos afectados por las actividades de INQUINOSA en Sardas y Bailín constituyen uno de los mayores retos medioambientales de la cuenca del río Ebro.

La situación del vertedero de Sardas en los años 80 era de completa colmatación, con un volumen de más de 400.000 m³ de residuos. A principios de la década de 1990 se construyó la variante de la N330 y su trazado cortó el frente del vertedero. Debido a estas obras, aproximadamente 50.000 m³ de residuos del vertedero fueron trasladados a la parte baja del emplazamiento (Fernández et al., 2013). El vertedero fue sellado de forma superficial y lateral en los años 1992 y 1993. El sellado consistió en la construcción de unas pantallas perimetrales y una pantalla frontal de cemento-bentonita. La superficie del vertedero se selló con una cubierta multicapa que incluía una lámina de polietileno de alta densidad.

Desde el año 2013 se viene realizando un modelo conceptual y numérico del funcionamiento hidráulico del vertedero utilizando programas comerciales.

El grupo de investigación de Gestión Sostenible de los Recursos Hídricos y del Suelo (AQUATERRA) de la UDC ha realizado recientemente un modelo hidrológico de balance para cuantificar los caudales diarios de entrada y salida de agua del vertedero. En este trabajo se presentan los resultados y las conclusiones de esta modelización.

1.- Introducción

En la década de 1960 se comenzaron a verter diversos tipos de residuos en una cárcava existente junto al río Gállego, incluyendo residuos industriales de la producción de lindano y otras industrias químicas, residuos sólidos urbanos y residuos de construcción.

2.- Descripción de la zona de estudio

El vertedero de Sardas ocupa una superficie de casi 4 ha y está situado a menos de 1 km al este del casco urbano, en la margen izquierda del río Gállego (Fig. 1). El emplazamiento de Sardas incluye el vertedero y la parcela situada al pie del vertedero. Las instalaciones del vertedero

comprenden los siguientes elementos: 1) El relleno del vertedero, 2) Las parcelas al pie del vertedero, 3) Las dos balsas de lixiviados y 4) La depuradora de carbón activo.

Los materiales del vertedero fueron removidos y esparcidos sobre el aluvial del río Gállego en los años 90 durante la construcción de la N-330. La carretera N-330 divide al emplazamiento en dos partes (zonas A y B de la Fig. 1). Los depósitos del vertedero removidos durante la construcción de la carretera se encuentran sobre los limos del aluvial del río Gállego (zona A de la Fig. 1) (IDOM-EMGRISA, 2011).

El vertedero de Sardas se ubica sobre las margas de Larrés. Se trata de una formación fracturada de conductividad hidráulica entre baja y muy baja. Puede presentar zonas más permeables asociadas a zonas más fracturadas. Aguas abajo del vertedero, las margas están cubiertas por la terraza aluvial del río Gállego que está formada por una capa superior de limos arenosos de baja permeabilidad y potencia comprendida entre 5 y 10 m y una capa inferior de gravas y arenas que tiene un espesor aproximado de 5 m y una elevada conductividad hidráulica (Fernández et al., 2013).

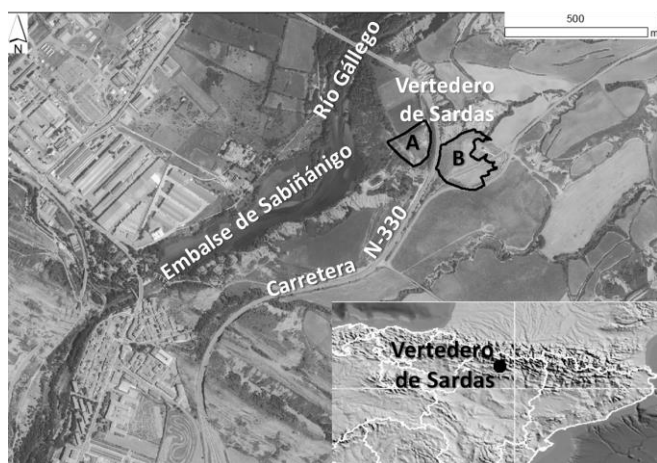


Fig. 1. Situación del vertedero de Sardas (Sabiñánigo) en la cuenca del río Gállego. La carretera N-330 divide al emplazamiento en dos partes. La zona B es el vertedero y la zona A corresponde a los rellenos del vertedero removidos durante la construcción de la carretera.

2.- Metodología de cálculo

2.1.- Modelo conceptual

Se ha realizado un detallado análisis de las entradas y salidas de agua en el relleno que ha servido para elaborar un esquema conceptual y una visión tridimensional del relleno del vertedero de Sardas. Este esquema conceptual ha servido para visualizar y definir la hidrología del vertedero. Se han definido varios sectores en el vertedero de Sardas y se han identificado los segmentos más significativos del perímetro del vertedero (Fig. 2). Los flujos de entrada a los materiales del relleno del vertedero de Sardas aguas arriba de la pantalla de bentonita incluyen (Fig. 2): 1) la infiltración de la escorrentía superficial de los barrancos situados aguas arriba del vertedero; 2) la infiltración en las cunetas perimetrales y las cunetas de la carretera antigua de la escorrentía superficial y del flujo

subsuperficial (hipodérmico) de la capa de cobertera del relleno; 3) la infiltración del agua de lluvia a través de la cobertera del vertedero; 4) los flujos procedentes de los glaciares; y 5) los flujos procedentes de las margas subyacentes. Las tres primeras entradas son las más importantes y por ello se han cuantificado con mayor detalle.

Los flujos de salida de agua desde los materiales del relleno incluyen: 1) las descargas subterráneas por debajo de la pantalla de bentonita a través de la parte superior de la formación margosa en la que la roca está más fracturada, alterada y descomprimida; 2) los bombeos de agua en el pozo S37 (Fig. 3) para controlar el nivel del agua en el relleno y los bombeos en los sondeos destinados a la extracción de fase libre; 3) los flujos subterráneos desde el relleno hacia las margas subyacentes. Los dos primeros flujos de salida son los más importantes y por ello se han cuantificado con mayor detalle.

Hay que señalar las diferencias existentes entre el balance global de agua en el relleno del vertedero antes del inicio de los bombeos en junio de 2014 y después de esta fecha. Los bombeos de aguas han reducido las descargas de agua por las zonas de rezume y los desbordamientos por la coronación de la pantalla de bentonita/cemento.

La Fig. 3 muestra el perfil del vertedero de Sardas en dirección E-W realizado por EMGRISA y el Gobierno de Aragón. Este perfil ha servido de base para definir el modelo conceptual de flujo del emplazamiento (Fernández et al., 2013). Su traza coincide con la situación de los sondeos PS26B, PS21, PS14, PS19B, PS5, PS29, S37, S39B, S39F y S35E.

El balance hidrometeorológico en el vertedero y en las cuencas situadas aguas arriba se calculó en el periodo comprendido entre octubre de 2011 y septiembre de 2018.

Se han realizado modelos hidrológicos de balance con el código VISUAL-BALAN que calcula balances diarios de agua en el suelo, la zona no saturada y el acuífero, utilizando como datos entrada los datos meteorológicos. Las componentes del balance se resuelven secuencialmente comenzando por las correspondientes al suelo y finalizando por las del acuífero. El programa permite obtener los valores diarios de todas las componentes del balance, así como de las oscilaciones del nivel freático en el acuífero. Este código se viene utilizando ampliamente en la Península Ibérica y en Latinoamérica para la evaluación de los recursos hídricos y la estimación de la recarga (Alvares y Samper 2009, Espinha et al. 2009, 2010; Pisani et al. 2011, 2013, 2017; Samper et al. 1999, 2011a,b; 2015).

2.2.- Escorrentía de las cuencas situadas aguas arriba del vertedero

Las entradas procedentes de la infiltración de la escorrentía superficial de los barrancos situados aguas arriba del vertedero se producen fundamentalmente en el barranco situado al norte del vertedero que desagua en la zona de los sondeos de la serie S35.

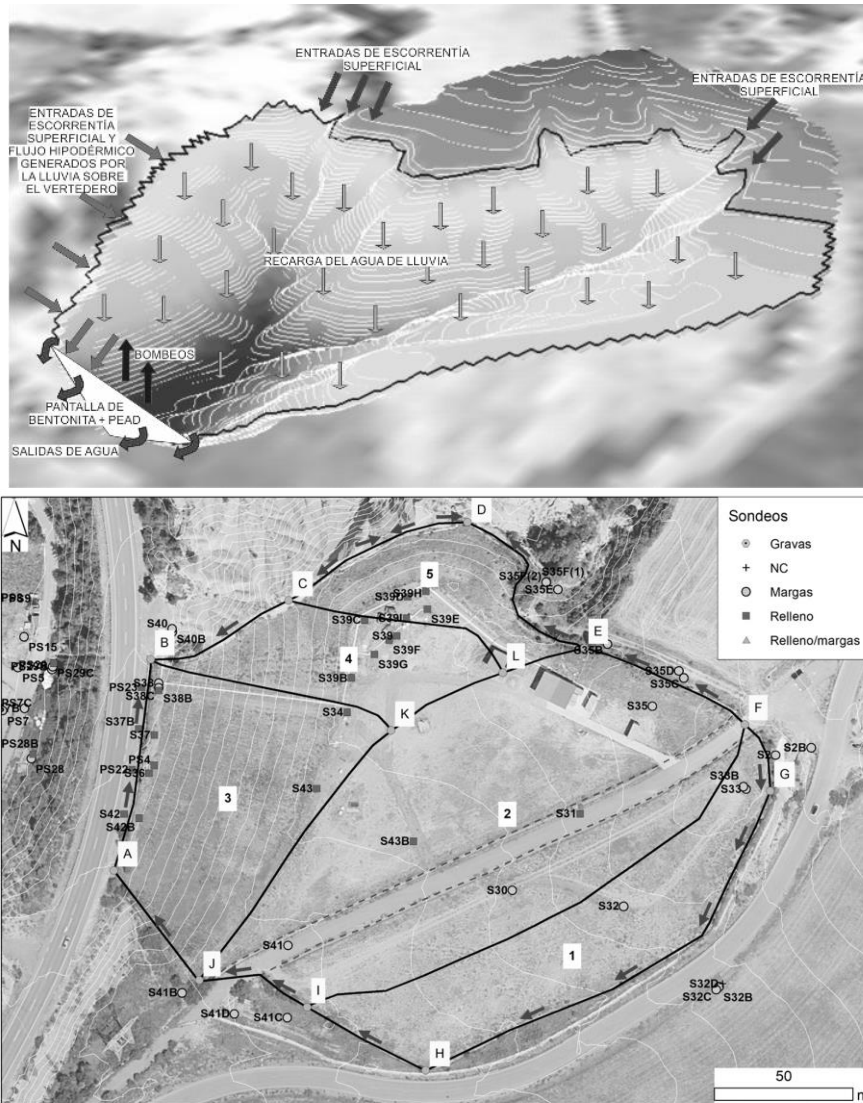


Fig. 2. Esquema del vertedero (zona B de la Fig. 1) con las principales entradas y salidas de agua (figura superior) y definición de los sectores 1, 2, 3, 4 y 5 del vertedero de Sardas y de los puntos y segmentos significativos a lo largo del perímetro del vertedero (figura inferior). Las flechas indican el sentido de la pendiente de las cunetas perimetrales. Se indican también los sondeos disponibles cuyos símbolos indican la formación en la que tienen su tramo de rejilla (Samper et al., 2019a).

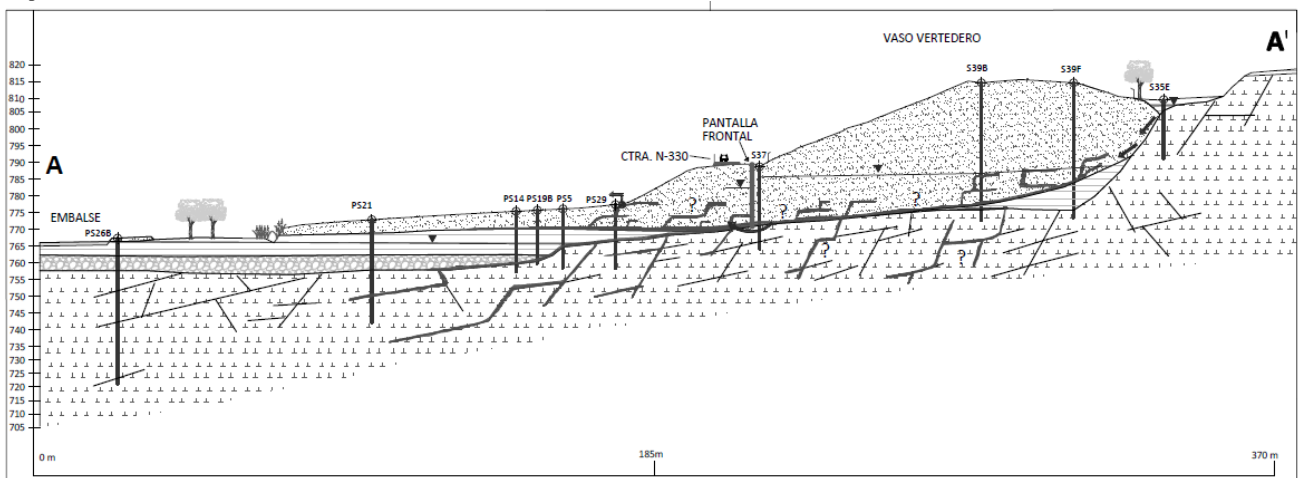


Fig. 3. Perfil del vertedero de Sardas utilizado por EMGRISA y el Gobierno de Aragón para definir el modelo conceptual del emplazamiento (Fernández et al., 2013).

También se producen entradas al vertedero, aunque de menor entidad, por la infiltración de la escorrentía superficial del barranco situado al este del vertedero (zona de los sondeos S2 y S2B; Fig. 2). Las entradas por el barranco del S35 se han calculado con el modelo hidrológico VISUAL-BALAN de la cuenca vertiente del barranco situado aguas arriba del vertedero.

Se ha supuesto que una parte de la escorrentía de las cuencas situadas aguas arriba del vertedero penetra en el relleno del vertedero, principalmente en las zonas bajas de los segmentos ED y FG del perímetro del vertedero (Fig. 2). El modelo hidrológico de las cuencas vertientes al vertedero se ha realizado con el programa VISUAL-BALAN y se ha calibrado con datos de niveles medidos en los sondeos S35E y S35F(1). Los valores iniciales de los parámetros del modelo hidrológico se tomaron del modelo de la cuenca del Alto Gállego realizado por Pisani (2008).

2.3.- Recarga a través de la capa de cobertera

La capa de cobertera incluye una manta orgánica, una capa de tierra vegetal de 40 cm de espesor, una capa de geotextil y una capa drenante de zahorra de 30 cm de espesor que se apoya sobre una lámina de PEAD (polietileno de alta densidad). En la parte inferior de la cobertera hay una capa de arcilla de espesor variable (DGA, 1997).

Para calcular la recarga a través de la capa de cobertera, se realizó un modelo hidrológico de balance de agua de la cobertera del vertedero con el programa VISUAL-BALAN. Este modelo permitió calcular la escorrentía superficial sobre la superficie del vertedero, el flujo subsuperficial que recoge la capa drenante y la recarga a través de las capas de PEAD y de arcilla.

Los valores iniciales de los parámetros del modelo de la cobertera se tomaron de otros modelos de coberteras similares realizados por Samper et al. (2016a, b) y posteriormente se calibraron de modo que condujesen a un buen ajuste del modelo de balance hídrico del relleno del vertedero.

2.4.- Entradas por las cunetas perimetrales

El modelo conceptual considera que existen entradas de agua al relleno del vertedero por las cunetas perimetrales procedentes de la escorrentía superficial y subsuperficial de la cobertera del vertedero. Las entradas a lo largo de las cunetas perimetrales se evaluaron mediante un modelo de balance de agua en los sectores 3 y 4 del relleno del vertedero (Fig. 2).

La Fig. 4 muestra el esquema conceptual para las entradas de agua al relleno procedentes de la escorrentía superficial y del flujo hipodérmico de la cobertera en el contacto entre la capa de cobertera y la pantalla lateral de bentonita/cemento a lo largo del perímetro del vertedero.

Es habitual que la pantalla perimetral se ejecute antes de colocar la lámina de PEAD de forma que la lámina rodea la pantalla. Sin embargo, las calicatas realizadas en algunas

zonas del perímetro del vertedero indican que la lámina podría haberse despegado, permitiendo el flujo de agua hacia el relleno. Por otro lado, la pantalla perimetral puede no alcanzar las margas subyacentes y permitir también un flujo hacia (desde) el relleno.

El balance hídrico en los sectores 3 y 4 del relleno del vertedero se calculó a partir de los resultados del balance de agua en la cobertera. Además, se utilizaron las siguientes hipótesis y métodos:

1) Una fracción de la escorrentía superficial y del flujo hipodérmico generados por la precipitación sobre la capa de cobertera percola dentro del vertedero. Se calibraron las fracciones de estos flujos de agua que entran al vertedero: b ($0 < b < 1$) para la escorrentía superficial y c ($0 < c < 1$) para el flujo hipodérmico.

2) La salida de agua se calcula como el producto de un coeficiente de agotamiento, α , por la diferencia ($V - V_0$), donde V es el volumen de agua almacenado en el vertedero y V_0 es el valor umbral de V a partir del cual hay descarga.

3) Se consideraron los datos mensuales de los bombeos de agua realizados en el relleno a partir de junio de 2014 en el sondeo S37.

4) La variación del nivel piezométrico en el relleno se calculó a partir del volumen almacenado de agua, V , del valor de la porosidad, Φ , y de la curva cota-volumen del vertedero. Se supuso además que el volumen de agua acumulado en los sectores en los que se calculó el balance, V , es una fracción, f , del volumen total de agua almacenado en el relleno del vertedero.

Los parámetros del modelo en el sector en el que están situados los sondeos S37 y S38C se calibraron con los niveles piezométricos medidos en dichos sondeos.

La Fig. 5 presenta el ajuste de niveles en los sondeos S37 y S38C para dos pasadas representativas del modelo hidrológico de balance en el relleno que difieren en la magnitud de las entradas de la escorrentía procedente de las cuencas situadas aguas arriba del vertedero.

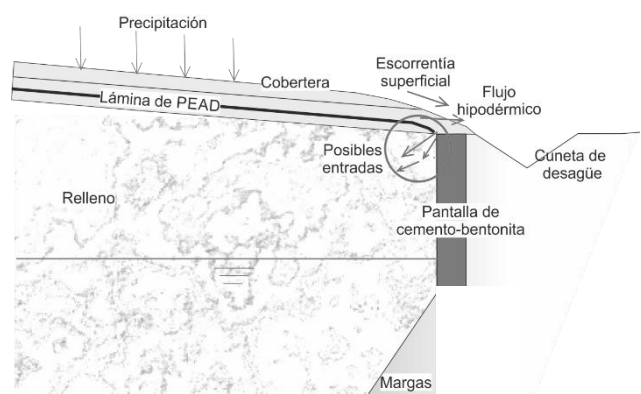


Fig. 4. Posibles entradas de agua al relleno procedentes de la escorrentía superficial y del flujo hipodérmico en el contacto entre la capa de cobertera y la pantalla lateral de bentonita/cemento a lo largo del perímetro del vertedero.

2.5.- Otras entradas de agua

Hay otras entradas de agua al vertedero posiblemente de

menor entidad a través de las cunetas de la carretera antigua (sector 2 en la Fig. 2) y en las zonas sur y sureste del vertedero procedentes de las margas subyacentes y de los glacis (tramos GH, HI e IJ en la Fig. 2). Estas entradas se estimaron de forma cualitativa mediante juicio de experto. Hay que tener en cuenta que la carretera situada dentro del vertedero está apoyada sobre la lámina PEAD. Las aguas recogidas por esta carretera son drenadas, captadas y conducidas fuera del vertedero.

2.6.- Salidas de agua

Los flujos de salida de agua desde los materiales del relleno incluyen:

1) Las descargas subterráneas por debajo de la pantalla frontal de bentonita a través de la parte superior de la formación margosa en la que la roca está más fracturada, alterada y descomprimida y por los extremos de la pantalla.

2) Los bombeos de agua en el pozo S37 para controlar el nivel del agua en el relleno y los bombeos en los sondeos destinados a la extracción de fase libre.

3) Los flujos subterráneos desde el relleno hacia las margas subyacentes.

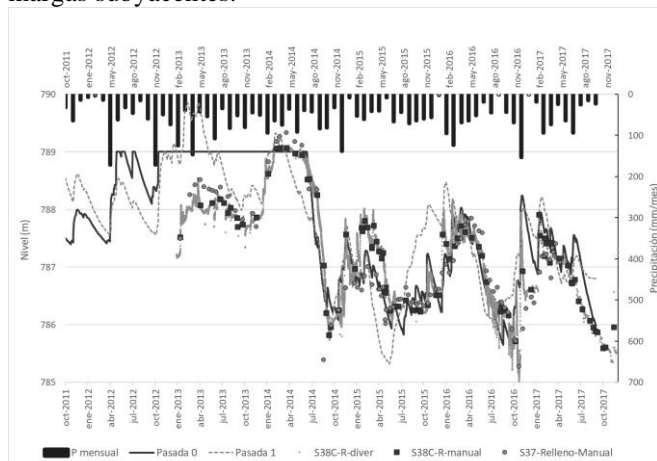


Fig. 5. Niveles medidos en los sondeos S37 y S38C situados en el sector 3 del relleno y niveles calculados con las pasadas 0 y 1 del modelo hidrológico de balance de agua en el relleno del vertedero. En el eje de ordenadas secundario se han representado las precipitaciones mensuales. La línea horizontal del hidrograma calculado en la pasada 0 considera que existe un nivel umbral a partir del cual el nivel del agua en el interior del vertedero rebosa por la coronación de la pantalla.

3.- Resultados e incertidumbres del modelo de balance hidrometeorológico en el vertedero

Se han cuantificado las siguientes entradas de agua al relleno del vertedero:

1) La entrada procedente de la infiltración de la escorrentía de los barrancos situados aguas arriba del vertedero.

2) La infiltración de la escorrentía superficial y el flujo subsuperficial de la capa de cobertera del vertedero a lo largo de las cunetas perimetrales en el contacto de la capa de cobertera con el perímetro del vertedero.

3) La recarga de agua de lluvia a través de la lámina de PEAD.

El caudal medio anual de entrada al relleno del vertedero procedente de la escorrentía del barranco en la zona de los sondeos de la serie S35 entre los años hidrológicos 2011-12 y 2017-18 está comprendido entre 8 (pasada 0) y 20.5 m³/d (pasada 1).

El caudal medio anual de entrada por el barranco situado al este del vertedero (zona de los sondeos de la serie S2) se ha estimado suponiendo que las entradas por este barranco son proporcionales a las calculadas en el barranco del S35. Las entradas en el barranco del sondeo S2 se estiman entre 0.8 (pasada 0) y 2.1 m³/d (pasada 1).

El modelo hidrológico de balance de agua de la cobertera del vertedero ha permitido calcular la escorrentía superficial sobre la superficie del vertedero, el flujo subsuperficial drenado por el dren de la capa de cobertera del vertedero y la percolación o recarga a través de la capa de arcilla. La precipitación media anual sobre el vertedero en el periodo 2011/12 - 2017/18 es igual a 729 mm. Con el modelo hidrológico de la cobertera del vertedero se ha calculado una escorrentía superficial media comprendida entre 164 y 209 mm/a, mientras que la ETR está comprendida entre 258 y 297 mm/a. La recarga en tránsito está comprendida entre 230 y 268 mm/a. El flujo subsuperficial medio anual está comprendido entre 217 y 255 mm y la recarga a través de la lámina de PEAD y de la capa de arcilla es igual a 13 mm. Para el conjunto del vertedero, el caudal medio anual correspondiente a la recarga del agua de lluvia a través de la capa de cobertera es igual a 423 m³/a que equivale a 1.1 m³/d.

Las entradas procedentes de la infiltración de la escorrentía superficial de las cunetas perimetrales se han evaluado mediante modelos de balance de agua en los sectores del vertedero situados aguas arriba de los sondeos S37, S38C y S39. El mejor ajuste a los niveles medidos se ha obtenido con un caudal medio anual de entrada al vertedero en la zona del S37 comprendido entre 6.1 (pasada 0) y 6.9 m³/d (pasada 1).

El balance de agua en el sector de los sondeos de la serie S39 indica que el caudal de entrada de agua al vertedero por la cuneta perimetral septentrional del vertedero se encuentra dentro del rango comprendido entre 2.1 (pasada 0) y 2.5 m³/d (pasada 1).

Se ha calculado un caudal total medio diario de entrada al relleno del vertedero comprendido entre 20.4 (pasada 0) y 33.8 m³/d (pasada 1).

Se han evaluado también las siguientes salidas de agua desde el relleno: 1) el caudal de flujo subterráneo por debajo de la pantalla de bentonita a través de la parte superior de la formación margosa en la que la roca está más fracturada; 2) los bombeos de agua y fase libre; y 3) los flujos subterráneos entre el relleno y las margas subyacentes.

El caudal de descarga por debajo de la pantalla se ha calculado mediante un modelo de flujo subterráneo 2D a lo largo del perfil vertical que va desde la parte alta del vertedero hasta el embalse de Sabiñánigo (Samper et al., 2019b, en este mismo volumen). Se ha calculado un caudal medio de flujo subterráneo por debajo de la pantalla frontal

igual a 21.14 m³/d. Este caudal es similar al estimado por IDOM-EMGRISA (2011) (20 m³/d).

Los bombeos de agua se realizan mayoritariamente en el pozo S37. Los volúmenes bombeados en los años 2015, 2016 y 2017 fueron iguales a 2207 m³, 2857 m³ y 1916 m³, respectivamente. El caudal medio de bombeo varía entre 6 y 7 m³/d.

Los datos disponibles no permiten cuantificar los flujos subterráneos desde el relleno hacia las margas subyacentes en zonas diferentes a la parte inferior de la pantalla de bentonita/cemento. Presumiblemente estas descargas serán de poca entidad. Se estima de forma cualitativa que serán menores de 2 a 3 m³/d.

La Tabla 1 muestra los caudales de entradas y salidas de agua del vertedero calculados con las 3 pasadas más representativas del modelo hidrológico (Samper et al., 2019a).

El modelo hidrológico de balance del vertedero tiene incertidumbres debidas a:

1) Las incertidumbres del modelo hidrológico de las cuencas situadas aguas arriba del vertedero. No se ha podido contar con datos de aforos en estas cuencas.

2) Las incertidumbres sobre la integridad y el estado de la conexión de la lámina PEAD y la capa de arcilla con el muro de bentonita perimetral.

3) La falta de datos de niveles piezométricos en algunas zonas del vertedero.

Tabla 1. Balance global de agua en el vertedero (Samper et al., 2019a).

	Entradas (m ³ /d)			Salidas (m ³ /d)	
	Pasada 0	Pasada 1	Pasada 2		
Escorrentía del barranco S35 (sector 5)	8.1	20.5	8.0	Por debajo de la pantalla	20
Escorrentía del barranco S2, S33 (sector 1)	0.8	2.1	0.8		
Recarga por infiltración a través de la cobertera (sectores 1, 2, 3, 4 y 5)	1.1	1.1	1.1		
Entradas laterales en la zona del S38C (sector 3)	6.9	6.1	6.7	Bombeos	6.4
Entradas laterales en la zona del S39 (sectores 4 y 5)	2.1	2.5	2.3		
Otras (cunetas de la carretera antigua, margas subyacentes y glacis) (sectores 1, 2, 3, 4 y 5)	1.5	1.5	1.5		
TOTAL ENTRADAS	20.5	33.8	20.4	TOTAL SALIDAS	26.4

Hay que tener en cuenta que el flujo de agua por las margas puede ser muy bajo. Sin embargo, este flujo en las margas tiene relevancia para el movimiento de la fase densa DNAPL (Dense Non-Aqueous Phase Liquid). Este hecho puede ser especialmente importante cuando las fracturas de las margas afloran en el terreno.

4.- Conclusiones

Las principales conclusiones del modelo de balance hidrológico en el vertedero incluyen:

1) El caudal de entrada procedente de la infiltración de las aguas de lluvia de los barrancos situados aguas arriba del vertedero tiene un valor comprendido entre 8.8 y 22.6 m³/d y representa entre el 43% y el 67% del caudal total de entrada al vertedero.

2) El caudal de infiltración de la escorrentía superficial y subsuperficial de la capa de cobertera del vertedero a lo largo de las cunetas perimetrales en el contacto de la capa de cobertera con el perímetro del vertedero puede oscilar entre 8.6 y 9.0 m³/d y representa entre el 25% y el 44% del total.

3) El caudal de recarga de agua de lluvia a través de la lámina de PEAD es igual a 1.1 m³/d y representa entre el 3% y el 5% del total.

4) Otras entradas de agua tales como las entradas por las cunetas de la carretera antigua y las entradas de agua en la zona sur y sureste del vertedero procedentes de las margas subyacentes y de los glacis son de menor entidad. Se han estimado de forma cualitativa en aproximadamente 1.5 m³/d (representan entre el 4% y el 7% del total).

Los flujos de salida de agua desde los materiales del relleno del vertedero incluyen:

1) El caudal de flujo subterráneo por debajo de la pantalla de bentonita a través de la parte superior de la formación margosa en la que la roca está más fracturada se ha calculado con un modelo de flujo subterráneo y es igual a 21.14 m³/d (Samper et al., 2019b).

2) El caudal medio de bombeo en los años 2015, 2016 y 2017 varía entre 6 y 7 m³/d.

Los resultados de la modelización permiten concluir que:

- 1) Las entradas de agua al vertedero son pequeñas y se han estimado entre 20 y 30 m³/d;
- 2) Las salidas tienen lugar por debajo de la pantalla frontal con valores estimados de 26 m³/d y mediante bombeos.
- 3) La pantalla de bentonita actúa parcialmente como una barrera que limita el flujo de agua subterránea desde el vertedero hacia la llanura aluvial situada aguas abajo.
- 4) El sustrato geológico permite muy poco flujo subterráneo;
- 5) La cobertera del vertedero mantiene su función de sellado;
- 6) Las cunetas perimetrales funcionan correctamente

en la mayor parte del perímetro del vertedero ya que los datos medidos de los niveles de agua en los sondeos perforados dentro del vertedero no indican entradas de agua asociadas a las lluvias;

Cuando no se bombea, es posible que se produzcan descargas de agua desde el vertedero cuando el nivel del agua en el relleno llega a la cota de la coronación de la pantalla de bentonita/cemento. Se carece de datos de los caudales de rezume. Con la implantación de los bombes a partir de 2014, los niveles de agua en el relleno descendieron y los rezumes y los desbordes de agua cesaron. Muy posiblemente, el caudal de bombeo es mayor que el caudal de los rezumes ya que los niveles en el relleno con los bombes son menores que los niveles de agua existentes previamente.

Agradecimientos. El trabajo de la UDC presentado en esta contribución se ha realizado en el marco de un contrato suscrito entre EMGRISA y la Fundación de la Universidad de A Coruña. Los trabajos de EMGRISA han sido financiados por el Gobierno de Aragón. Se agradecen los comentarios y sugerencias del revisor anónimo que han servido para mejorar esta comunicación.

5.- Bibliografía

- 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.
- DGA (Diputación General de Aragón) (1997). Proyecto de Impermeabilización del vertedero de Sardas. Sabiñánigo (Huesca). Liquidación Provisional.
- Espinha Marques J, J. Samper, B. Pisani, D. Alvares, J. M. Carvalho, H. I. Chaminé, J. M. Marques, F. Sodré Borgas, 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 y F. Sodré Borgas, 2010. Evaluation of water resources in a high-mountain basin in Serra da Estrela, Central Portugal, using a semi-distributed hydrological model. *Environ. Earth Sci.* 62:6, 1219-1234.
- Fernández J., Arjol M A Arjol y Cacho C (2013) POP-contaminated sites from HCH production in Sabi n nigo, Spain. *Environ Sci Pollut Res* (2013) 20:1937–1950 DOI 10.1007/s11356-012-1433-8
- GA (Gobierno de Aragón) (2016). Plan estratégico de lucha integral contra la contaminación de los residuos generados por la fabricación de lindano en Aragón. Informe elaborado con la colaboración de EMGRISA. Versión diciembre 2016: http://www.aragon.es/estaticos/GobiernoAragon/Departamentos/AgriculturaGanaderiaMedioAmbiente/temas_medio_ambiente/areas/lindano/acciones_administrativas/plan_estrategico_lucha_lindano_201612_v1.pdf (consultado en diciembre de 2017).
- IDOM-EMGRISA (2011). Diagnóstico ambiental. Campaña de investigación y estudio hidrogeológico y geotécnico de detalle para la mitigación de la contaminación en el área afectada del vertedero de Sardas, Sabi n nigo (Huesca) en el año 2009. Planteamiento de alternativas y trabajos complementarios para una solución definitiva. Julio de 2011.
- Pisani, B. (2008). Acoplamiento de modelos hidrológicos semidistribuidos y sistemas de información geográfica. Tesis Doctoral. Universidad de Coruña. <https://ruc.udc.es/dspace/handle/2183/1102> (verificado en mayo de 2019).
- Pisani, B, J Samper, L Ribeiro, Y Fakir, y T Stigter, 2011, Evaluación de los impactos del cambio climático en el acuífero 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.
- Samper J, Ll. Huguet, M.A. García Vera y J. Ares, 1999. Manual del usuario del programa VISUAL BALAN V.1.0: Código interactivo para la realización de balances hidrológicos y la estimación de la recarga. Publicación Técnica de ENRESA n  5/99. Madrid. 205 pp.
- Samper, J., B. Pisani y J. Espinha-Marques, 2011a. Estudio del flujo hipodérmico en zonas de montaña. Actas de las X Jornadas de Estudios en la Zona No Saturada, ZNS'11. Salamanca. Pp. 365-370.
- Samper, J, Y Li, B Pisani, L Ribeiro, Y Fakir, y T Stigter 2011b, Evaluación de los impactos del cambio climático en los acuíferos 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., B. Pisani y J. Espinha-Marques, 2015. Hydrological models of interflow in three Iberian mountain basins. *Environ. Earth Sci.* 73, 2645-2656.
- Samper J, Pisani B y Naves A (2016a). Trabajos adicionales de modelización del flujo y transporte de uranio del acuífero de la FUA (ENRESA: 056-CO-TA-2015-0001). Informe de la actividad n  2: Revisión del modelo de balance hidrológico en la propiedad de la FUA (Versión revisada V1). Universidade da Coruña.
- Samper J, Mon A, Fernández J y Pisani B (2016b). Two-dimensional numerical flow models for the predesign of a multilayer cover for a LILW disposal facility in Bulgaria. Informe de la UDC para Westinghouse.
- Samper, J, Sobral B, Naves A y Pisani B (2019a). Hidrogeología y modelos de balance hidrológico, y modelos de flujo subterráneo y transporte de contaminantes en los emplazamientos afectados por INQUINOSA, Actividad 3: Modelos numéricos de flujo y transporte de contaminantes en el emplazamiento de Sardas. Informe Final, ETS Ingenieros de Caminos, Coruña, UDC, febrero 2019.
- Samper, J, Sobral B, Mon A, Pisani B, Naves A, Guadaño J y Fernández J. (2019b) Modelo de flujo y transporte de solutos del emplazamiento de Sardas en Sabi n nigo (Huesca). En: Estudios de la Zona no Saturada Vol XIV, Madrid, 28-30 octubre (este mismo volumen).