

HIDROGEOLOGÍA DE UN VALLE GLACIAR: EL CASO DE LA CUBETA DE ANDORRA (PIRINEOS ORIENTALES). PARTE 2: MODELIZACIÓN

GUTIÉRREZ RORIGUEZ, M^a Carmen⁽¹⁾; TURU MICHELS, Valentí⁽²⁾

⁽¹⁾Igeotest, SL. Avd Príncep Benlloch, 66-72, dptx 407. Andorra la Vella maryclip@hotmail.com

⁽²⁾Fundació P. Marcel Chevalier. Avd Príncep Benlloch, 66-72, dptx 307. Andorra la Vella igeofundacio@andorra.ad

Palabras clave: acuífero multicapa, piezometría, modelo matemático, macizo fisurado, valle glaciar

RESUMEN

El aporte de nuevos datos hidroquímicos e hidrodinámicos, junto con los datos piezométricos han ayudado a aumentar el conocimiento sobre el funcionamiento del sistema hídrico que existe en la cubeta de Andorra. El objetivo principal ha sido poder establecer un modelo matemático básico, en régimen permanente, que englobe la totalidad de la cubeta para una futura mejora en la gestión del agua. Así mismo se establece la hipótesis de que el acuífero inferior pueda contener aguas con alto tiempo de residencia y baja renovación.

SITUACIÓN

El área de estudio se centra en el valle glaciar principal (unos 2,3 km² de dirección NE-SW) que se sitúa entre las poblaciones de La Margineda (930 m.s.n.m) y Escaldes-Engordany (1050 m.s.n.m) en el Principat d'Andorra.

OBJETIVOS

A partir de la consulta de la bibliografía de la zona, se observó que no existía hasta el momento un modelo matemático que englobara la totalidad de la cubeta, y que sirviera posteriormente para la mejora de la eficiencia en la gestión del recurso hídrico almacenado. Por esta razón, se decidió establecer un modelo matemático básico a partir de un régimen permanente para una época de nivel freático alto, que servirá de base para futuras gestiones.

DATOS PREVIOS

La caracterización hidrogeoquímica de las aguas de la zona junto con la piezometría medida a lo largo de la cubeta, durante la campaña de campo realizada entre abril y mayo del 2009, han permitido profundizar en el conocimiento de la cubeta. Determinando un flujo de agua que se dirige desde la zona NE, en Escaldes-Engordany, hasta la zona SW, en La Margineda. A lo largo de su recorrido existen diversas entradas laterales de agua procedentes del macizo rocoso que la rodea, existiendo también una relación río-acuífero.

PARÁMETROS HIDRÁULICOS

El relleno de la cubeta de Andorra la Vella-Escalades -Engordany está formado por diferentes materiales, y de acuerdo con su génesis, el acuífero superior se clasifica como de tipo multicapa. De aquí reside la explicación de la gran variabilidad de parámetros encontrados en la bibliografía, con valores que varían desde permeabilidades de 0,1 m/d hasta valores que rozan los 1000 m/d (TURU, 1999). En los materiales del acuífero superior, se distinguen capas consolidadas y no consolidadas (TURU 2007a y b) lo que produce un confinamiento múltiple. Los materiales más impermeables son los constituidos por lutitas o limos (generalmente morrenas de fondo y sedimentos glaciolacustres) consolidados, mientras que los más permeables constituyen tramos formados principalmente por gravas (generalmente materiales de tipo flúvioglaciario y coluviones) no consolidados. Hay que destacar que en los márgenes laterales del valle se pueden encontrar paleocanales de muy alta permeabilidad en comparación con los materiales adyacentes a los mismos (TURU, 2011).

En la campaña de campo se realizaron dos ensayos de bombeo – recuperación en régimen variable. En el primero de ellos (31/03/09) se tomaron lecturas directamente en el pozo de bombeo y para el segundo (30/04/09) se tomaron las lecturas en un panel de niveles automáticos donde se controla todo el proceso de captación. Para la interpretación de los ensayos se ha realizado una asimilación del acuífero libre a uno confinado, ya que los descensos obtenidos son pequeños comparados con el espesor saturado ($s/H_0 < 0,2$), finalmente cabe decir que el método aplicable ha sido la simplificación de Jacob (1944). El primer ensayo se realizó en los pozos S4 y S3 (Figura 1) pero debido a que estos dos pozos no disponen de un control del caudal y no se ha podido establecer unos valores concretos de los parámetros obtenidos, aunque sí un rango según la capacidad máxima y mínima de la bomba. No obstante, este ensayo sirvió para tener una idea de la rápida respuesta que experimentan estos los pozos. En la Tabla 1 se muestran los resultados obtenidos.

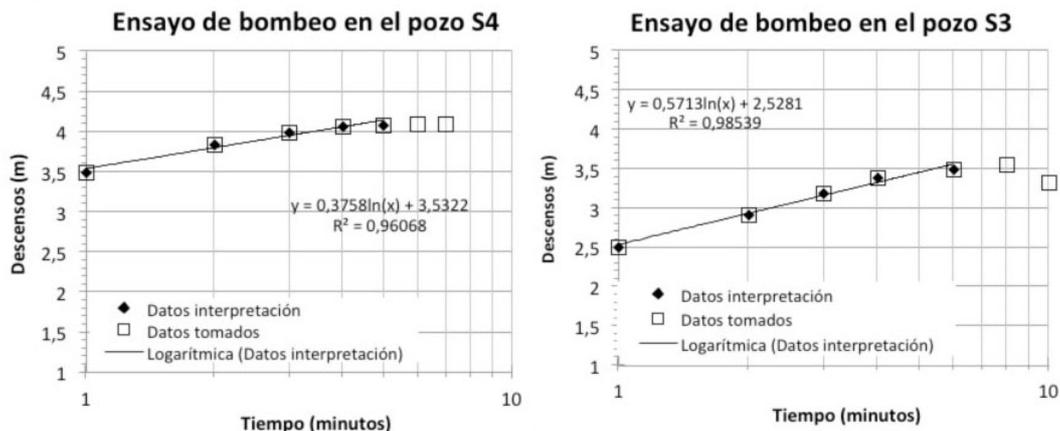


FIGURA 1: Gráficos del ensayo de bombeo sobre los pozos S4 y S3 (31/03/09)

Ensayo	Pozo	Litología Zona admisión	Q (m ³ /d)	T (m ² /d)	b (m)	k (m/d)
Bombeo	S4	Gravas y arenas	480-3360	101-711	5	20-142
Bombeo influenciado	S3	Gravas y arenas	480-3360	66-468	4	17-117

TABLA 1: Resultados del ensayo de bombeo realizado el día 31 de marzo del 2009

En el segundo ensayo se tomaron las lecturas del nivel freático a partir de las sondas de niveles que existen en los pozos. Esto permitió, realizar un ensayo en el pozo S2 mientras que simultáneamente se tomaban medidas en los pozos S3 y S4 (Figura 2 y 3) que fueron utilizados a modo de piezómetros. Durante el ensayo se paró la bomba dos veces, esto ha sido tenido en cuenta a la hora de interpretar los datos, en la Tabla 2 se muestran los resultados.

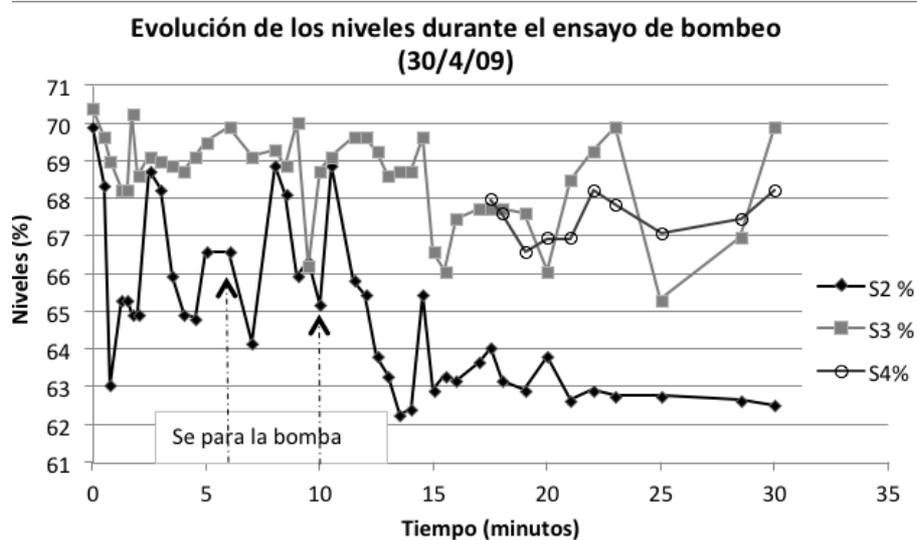


FIGURA 2: Evolución de los niveles de los pozos durante el ensayo de bombeo (30/04/09)

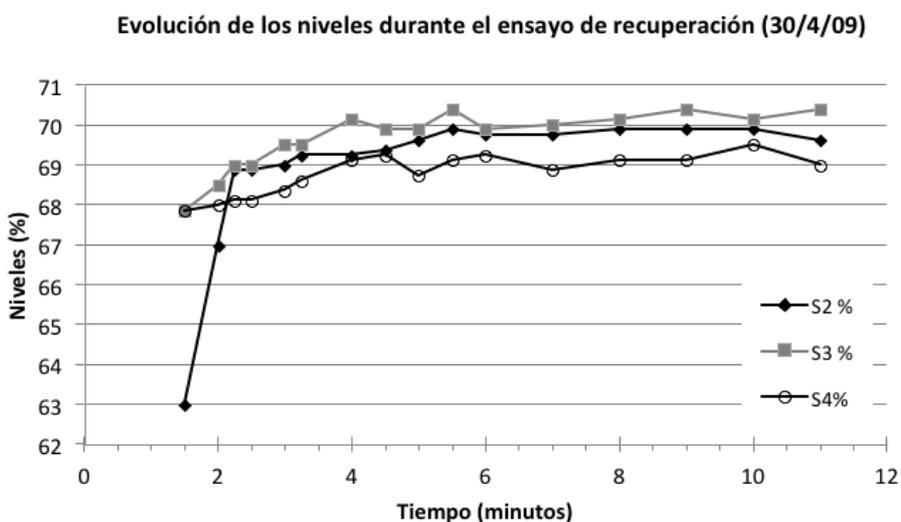


FIGURA 3: Evolución de los niveles de los pozos durante el ensayo de recuperación (30/04/09)

Ensayo	Pozo	Litología Zona admisión	Piezómetro	Q (m ³ /d)	T (m ² /d)	b (m)	k (m/d)
Bombeo	S2	Gravas y arenas con intercalación de limos	-	2208	200-811	4	50-203
Bombeo	-		S3	-	511	4	128
Bombeo	-		S4	-	119	5	24
Recuperación	S2		-	1776	879	4	220
Recuperación	-		S3	-	754	4	189
Recuperación	-		S4	-	812	5	162

TABLA 2 : Resultados del ensayo de bombeo realizado el día 30 de abril del 2009

Los resultados obtenidos muestran por un lado transmisividades del orden de los 200 m²/d y permeabilidades del orden de los 50 m/d y por el otro transmisividades del orden de 800 m²/d y permeabilidades de 200 m/d.

Estos datos están acordes a la variabilidad litológica del relleno de la cubeta de Andorra la Vella – Escaldes-Engordany, donde se da una alternancia de materiales gravosos y arenosos con lutitas que producen una alternancia de materiales más y menos permeables.

BALANCE HÍDRICO Y MODELO CONCEPTUAL

Las entradas al sistema hídrico de la cubeta (Figura 4) se producen por las precipitaciones tanto sobre la cubeta como en el macizo rocoso adyacente, por la recarga urbana difusa en la cubeta, por la recarga lateral del acuífero fisurado y por la influencia de aguas hidrotermales en el sector Norte. Las salidas del sistema de la cubeta se producen por las extracciones mediante bombes en la zona (abastecimiento humano, regadío, rebajes del nivel freático para la construcción), la salida subterránea profunda en la zona sur de la cubeta y a los aportes al río Gran Valira a lo largo de su recorrido. En relación con el macizo rocoso cabría mencionar las salidas a través de diversos manantiales.

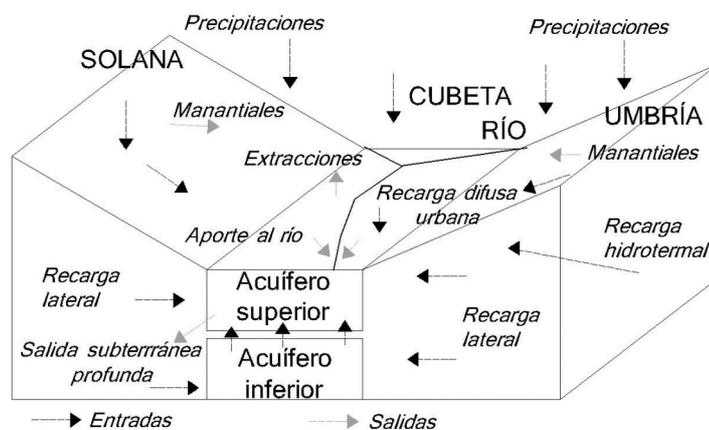


FIGURA 4: Esquema del modelo conceptual del sistema acuífero de la cubeta

El balance hídrico general para la zona de estudio, basado en la estación meteorológica de la Central de FEDA, situada a 1140 m en la zona NE de la cubeta de Andorra, para el período mayo 2008-abril 2009 nos da la siguiente tabla.

Estación Central (cota 1140 m)	Unid.	Precipitación	ETP	ETR	Excedentes	Déficit
Diario-Mensual	mm	888,1	673,6	449,6 - 561,9	438,5-326,2	-233,3 - -111,7
	%	100	75,8	50,6 – 63,3	49,4 – 36,7	-26,3 - -12,6

TABLA 3: Resultados del balance hídrico para la estación Central de FEDA (cota 1140 m), para el periodo mayo 2008- abril 2009 (Datos de partida, precipitación y temperatura, disponibles en <https://www.feda.ad/cat/coneixnos/comunicacio/meteo.aspx>)

Sector	Unidades	P	ETP	ETR	Exc	I	ES
Macizo rocoso_ Zona de la Solana	Hm ³	8,39	6,66	4,92	3,31	3,01	0,29
	%	100	79	59	39	36	4
Macizo rocoso_ Zona de la Umbría	Hm ³	8,65	6,92	4,95	3,46	3,46	0,00
	%	100,00	80	57	40	40	0
Cubeta Andorra la Vella – Escaldes-Engordany	Hm ³	2,14	1,60	1,36	0,78	0,06	0,71
	%	100,00	75	64	36	3	33

TABLA 4: Balance hidrometeorológico basado en cada subcuenca de la zona de estudio. Donde P=precipitación; ETP=evapotranspiración potencial; ETR=evapotranspiración real; Exc=excedentes; I=infiltración; ES=escorrentía superficial

El cálculo del balance hidrometeorológico, se ha realizado utilizando el método de Thornthwaite para el cálculo de la ETP, ya que únicamente se disponen de los datos de precipitación y temperatura.

Para el balance mensual, de mayo a junio (figura 5), la $P > ETP$, produciendo excedentes; de julio a agosto, hay más ETP y menos P, entonces existe una utilización de la reserva del suelo y una generación de déficit hídrico; de septiembre a octubre, aumentan las precipitaciones y se recupera la reserva del suelo, incluso empieza a haber excedentes. La misma situación se encuentra hasta marzo, donde disminuyen las precipitaciones, siendo necesaria una utilización de la reserva del suelo; en abril la reserva se recupera.

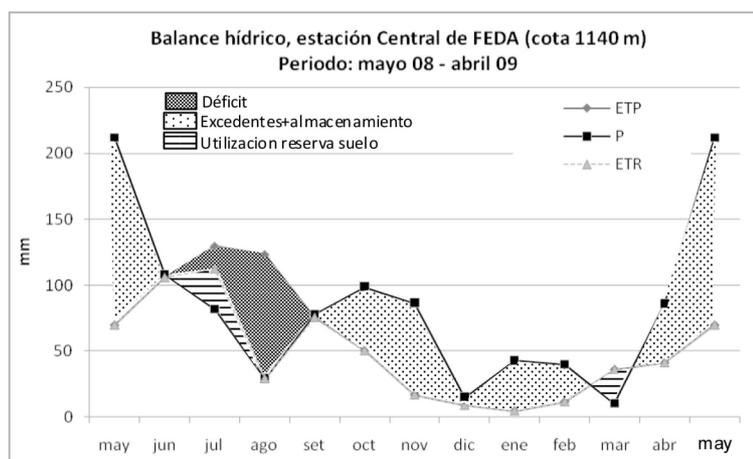


FIGURA 5: Balance hídrico para la estación Central de FEDA (cota 1140 m) para el periodo mayo 2008- abril 2009

En un proceso más detallado, se ha realizado el balance hídrico para toda la zona de estudio, basado en un balance hidrometeorológico para cada subcuenca de la zona de estudio, teniendo en cuenta los gradientes topográficos (Tabla 4). De los datos obtenidos se podría destacar el hecho de que prácticamente el 40 % de la precipitación que cae sobre el macizo rocoso es susceptible de recargar la cubeta como un aporte lateral exterior. Este hecho contrasta con la cantidad de agua que se infiltraría directamente sobre la cubeta procedente de las precipitaciones, que en este caso sería solo de un 3 %, debido a la gran impermeabilización (edificios, calles, etc...) de la superficie de la cubeta, donde menos del 17 % de la superficie permitiría las condiciones de infiltración.

En la siguiente Figura 6 se muestran los resultados obtenidos del balance hídrico teniendo en cuenta las entradas y salidas del sistema.

$$\text{Entradas} = \text{Salidas} \pm \text{Variación de almacenamiento}$$

Infiltrac. cuenca cubeta + aportes laterales + hidrotermal + recarga difusa = bombeos + flujo SW + río

$$0,06 \text{ Hm}^3 + 3,01 \text{ Hm}^3 + 3,46 \text{ Hm}^3 + 4,5 \text{ Hm}^3 + 0,17 \text{ Hm}^3 = 0,60 \text{ Hm}^3 + 0,36 \text{ Hm}^3 + 10,24 \text{ Hm}^3$$

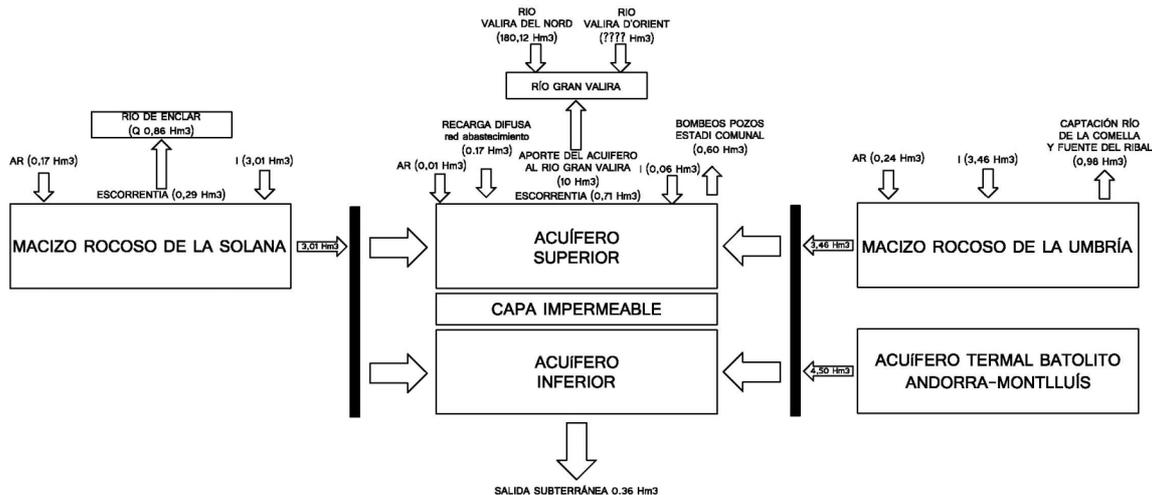


FIGURA 6: Distribución de las entradas y salidas del sistema acuífero de la zona de estudio (periodo mayo 2008-abril 2009).

MODELO MATEMÁTICO

A partir de la bibliografía consultada se puso en evidencia la falta de un modelo general matemático para la totalidad de la cubeta de Andorra la Vella – Escaldes- Engordany, ya que los existentes eran modelizaciones parciales de la cubeta, como son los de IGEOEST-Lamban (1999) que engloba desde la zona NE (Escaldes-Engordany) hasta la zona media (Santa Coloma, 975 m.s.n.m), o el realizado por IGEOEST-DRYAS (2005) que se centraba exclusivamente en la zona Norte (Prat del Roure, en Escaldes-Engordany, 1030 m.s.n.m).

A falta de datos más concretos sobre el acuífero inferior se ha decidido modelizar solo el acuífero superior de la cubeta de Andorra - Escaldes, por encima del nivel impermeable formado por las lutitas de morrena de fondo (capa 3 de TURU et al. 2007). De cara a simplificar la modelización se ha supuesto que todos los niveles potenciométricos del acuífero superior están en régimen estacionario y igual al nivel freático. La simulación se ha efectuado para una situación de régimen estacionario del mes de abril-mayo 2009, considerándose el máximo nivel freático. Para la modelización se ha utilizado el programa 2D FLOWPATH II v.1.3.2 (Nº serie: 132.545). Como resultados obtenidos, el modelo marca un flujo del agua desde la zona NE a la zona SW, con entradas de agua en el sector de la Solana de Andorra la Vella, que hacen modificar las isopiezas (Figura 7). En general se han medido errores de unos 3 metros entre los valores medidos y los calculados (Figura 7).

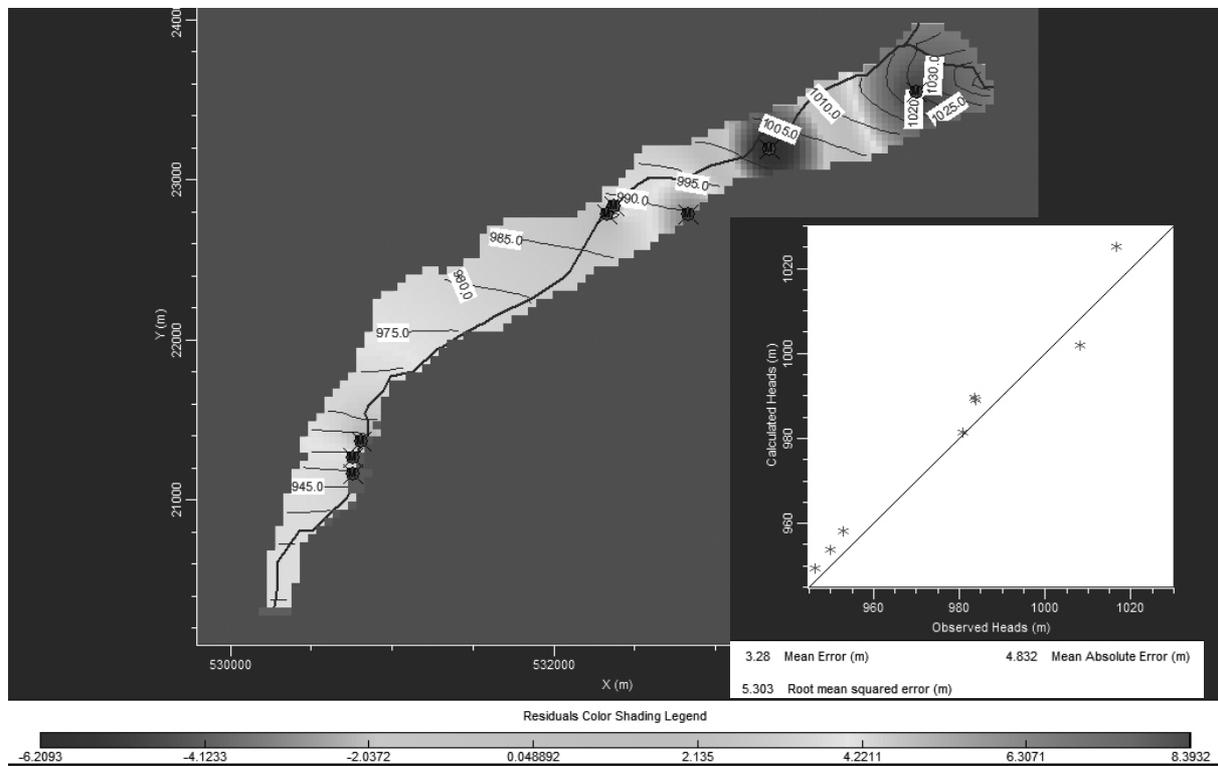


FIGURA 7: Modelo matemático de la cubeta de Andorra la Vella-Escaldes-Engordany y grafico de calibración del modelo matemático

DISCUSIÓN

La Tabla 5 muestra el balance hídrico de la cubeta obtenido con el método empírico y con la modelización matemática, las desviaciones entre ambos son debidas por algunas de las simplificaciones adoptadas.

Las desviaciones del nivel piezométrico en algunos tramos del acuífero (Figura 7) pueden deberse a que localmente el río puede ser efluente (recibe agua del acuífero) o influente (da agua al acuífero) en función de los aportes laterales.

Estas situaciones son complejas de modelizar numéricamente y requieren densidades de malla distintas, solo justificables para estudios de más detalle. No obstante el modelo matemático es capaz de indicar importantes aportes del río al acuífero así como aportes del acuífero al río pero en menor cuantía, ya que se interpreta que el flujo subterráneo restante ha de continuar hacia cotas inferiores (fuera del modelo). En este sentido recordar que no se dispone de ninguna estación de aforo del río Gran Valira a la salida del sistema (La Margineda), de forma que no se puede determinar bien la influencia de los torrentes laterales (La Comella y valle d'Enclar), ni estar seguro de que cantidad de agua sale fuera del sistema por el río y cual por el acuífero.

Otro motivo por el cuál pueden haber desviaciones de los niveles piezométricos medidos y los calculados (Figura 7) puede deberse a que únicamente se ha modelizado el acuífero superior. Según datos de IGEOEST-Lamban (1999) sólo el 33 % de los aportes laterales y el 29 % del flujo hidrotermal recargarían el acuífero superior, el resto lo harían para el acuífero inferior. Esto contrasta con la idea de un acuífero inferior con una baja renovación (según datos de MIQUEL et al, 2011) y los porcentajes considerados habrían de ser superiores.

Tampoco se han tenido en cuenta la extracciones de agua del sistema por bombeos, parte de la cuál sale de la zona de estudio como agua residual hacia la depuradora sur del Principado.

Por otro lado el modelo empírico (método de Thornthwaite), que es el método oficialmente adoptado por la administración central para el Principado, puede no ser el más adecuado y quizá su validación aquí está por demostrarse. En este sentido se recomienda investigar activamente en esta cuestión.

Balance hídrico de la cubeta de Andorra la Vella – Escaldes-Engordany									
		Entradas					Salidas		
<i>Modelo</i>	<i>Ud.</i>	<i>Inf. directa</i>	<i>Aportes laterales</i>	<i>Flujo hidrot.</i>	<i>Recarga urb. dif.</i>	<i>Aportes del río</i>	<i>Bombeos</i>	<i>Flujo SW</i>	<i>Aportes al río</i>
Modelo empírico	Hm ³	0,06	3,01 + 3,46	4,5	0,17	-	0,60	0,36	10,24
	%	0,5	26,9 + 30,9	40,2	1,5		5,4	3,2	91,4
Modelo matemático	Hm ³	0,07	3,26		-	53,3	-	16	42,9
	%	0,1	5,7			94,1		27,2	72,8

TABLA 5: Balance hídrico obtenido a partir de dos métodos, empírico y modelación matemática. Donde: Ud=unidades; Inf. directa=infiltración directa de la precipitación; Aportes laterales= aportes desde el macizo rocoso; Flujo hidrot=Flujo hidrotermal; Recarga urb. difusa= recarga urbana difusa

CONCLUSIONES

El fondo del valle glaciar de Andorra la Vella – Escaldes-Engordany está formado principalmente por dos acuíferos, el más superficial de tipo multicapa separado por una capa impermeable del acuífero inferior que se encontraría confinado. Éstos, a su vez, están relacionados hídricamente con el macizo rocoso que le rodea.

La evolución de los niveles piezométricos medidos durante la campaña marzo 2008-mayo 2009, han permitido determinar un modelo conceptual del sistema, que junto a los datos hidroquímicos y hidrodinámicos han servido de base para la modelización matemática.

En los ensayos de bombeo-recuperación realizados en los pozos se han obtenido diferentes parámetros, por un lado transmisividades del orden de los 200 m²/d y permeabilidades del orden de los 50 m/d y por el otro transmisividades del orden de 800 m²/d y permeabilidades de 200 m/d. Estos datos están acordes a la variabilidad litológica del relleno de la cubeta, donde según la bibliografía (TURU, 1999 o TURU, 2011) se encuentran valores desde los 0,01 m/d de permeabilidad para los materiales lutíticos (impermeables) a los casi 1000 m/d para algunos tramos de materiales más gravosos.

El balance hídrico del sistema de la cubeta indicaría que las entradas de agua corresponderían a: infiltración directa por precipitación (0,5 %), aportes laterales de los macizos adyacentes (57,8 %), flujo hidrotermal (40,2 %) y recarga urbana difusa (1,5 %). Mientras que las salidas del sistema serían: extracciones por bombeos (5,4 %), flujo de salida de la cubeta por el extremo SW (3,2 %), flujo por aportes al río Gran Valira (91,4 %). Éstos valores se deben tomar con precaución, ya que existen varias incógnitas sobre los diferentes parámetros de cálculo.

El modelo matemático realizado del acuífero superior de la cubeta, nos da una idea general que coincide considerablemente con los datos conceptuales del sistema y con los datos medidos en el campo, sin embargo, debido a una serie de limitaciones y simplificaciones, el modelo considerado no representa las heterogeneidades de las recargas laterales. Se propone para futuras modelizaciones una densidad en la malla variable, siendo esta más densa en los sectores de confluencia con los torrentes laterales; el replanteo del modelo teniendo en cuenta los niveles piezométricos de épocas diferentes, y en el caso de ser posible disponer de una red piezométrica más regular que permita la caracterización detallada de toda la cubeta .

Finalmente, respecto a la instalación de nuevas captaciones en la zona, el volumen de reservas de la cubeta permitiría más captaciones de agua potable sin problema de explotación; no obstante se deberían tener en cuenta que:

1) Las aguas situadas en la parte más profunda de la cubeta (a partir de unos 935 m) aproximadamente, coincidiendo con la cota a la que se encuentra el alto rocoso del fondo de la cubeta en el sector de Santa Coloma (TURU, 1999; TURU et al. 2007), pudieran tener poca o nula renovación a confirmar con estudios isotópicos.

2) Asimismo en la delimitación de los perímetros de protección para aguas potables, habría que tener en cuenta el efecto de drenaje diferido que se produce en este tipo de sistemas de acuíferos multicapa.

Por último se propone, que antes de la ubicación definitiva de una nueva captación se realice un nuevo estudio de detalle de la zona de implantación del pozo, utilizando quizá como técnica de estudio la resonancia magnética nuclear para disminuir los costos en la determinación de la distribución y contenido de agua en el subsuelo.

BIBLIOGRAFÍA

- IGEOTEST-Lamban, J. (1999): *Perímetres de protecció dels pous de l'Estadi comunal d'Andorra. Parròquia d'Andorra la Vella*. Expediente núm. A-085-ACA-080.09.99. Informe inédito, (FMC).
- IGEOTEST-DRYAS (2005): *Model hidrogeològic del Prat del Roure. Parròquia d'Escaldes-Engordany*. Expediente núm. D-030-ACEE-007.03.05. Informe inédito, (fondo documental Fund. M.Chev.)
- Miquel, C.; Ponsa, A. & Rivero, L. (2011). Coneixements hidrogeològics en el sector del con de dejecció de La Comella (Parròquia d'Andorra la Vella). In: Turu, V. y Constante, A. (Eds.) *Actas XIII Reunión Nacional del Cuaternario. Andorra 2011*. p. 324-327. Disponible en <http://www.igeotest.ad/igeofundacio/Activitats/Docs/PDF/ACTAS%20ANDORRA%202011.pdf>
- Turu, V. (1999). Aplicación de diferentes técnicas geofísicas y geomecánicas para el diseño de una prospección hidrogeológica de la cubeta de Andorra (Pirineo Oriental): Implicaciones paleohidrogeológicas en el contexto glacial andorrano. In: *Actualidad de las técnicas geofísicas aplicadas en hidrogeología*. Olmo M. I López, J.A. ITGE, p. 203-210. Disponible en: http://aguas.igme.es/igme/publica/pdfactu_tec_geofi/14a_comunicacion.pdf
- Turu, V.; Boulton, G.; Ros, X.; Peña, J.L.; Martí, C.; Bordonau, J.; Serrano, E.; Sancho, C.; Constante, A.; Pous, J.; González, J.J.; Palomar, J.; Herrero, R. & García, J.M. (2007): *Structure des grands bassins glaciaires dans le nord de la Péninsule Ibérique: comparaison entre les vallées d'Andorre (Pyrénées orientales), du Gállego (Pyrénées centrales) et du Trueba (Chaîne Cantabrique)*; *Quaternaire*, vol. 18/4, 309-325; Disponible en <http://quaternaire.revues.org/index1167.html>
- Turu, V. (2007 a): *Pressuremeter test in glaciated valley sediments (Andorra, Southern Pyrennes). Part one: An improved approach o their geomechanical behaviour*. Landform Analysis, Vol. 5: 89-94 (2007). Disponible en: http://www.geoinfo.amu.edu.pl/sgp/LA/La05/LA5_Turu_1.pdf
- Turu, V. (2007 b): *Pressuremeter test in glaciated valley sediments (Andorra, Southern Pyrennes). Part two: Fossil subglacial dranaige patterns, dynamics and rheology*. Landform Analysis, Vol. 5: 95-101 (2007). Disponible en: http://www.geoinfo.amu.edu.pl/sgp/LA/La05/LA5_Turu_2.pdf
- Turu, V. (2011): Subglacial plougging and dranaige patterns in the glaciated valley of Andorra (SE Pyrennes), dynamics and rheology; *Quaternary International* (279-280), 505-505 : <http://www.inqua2011.ch/?a=programme&subnavi=abstract&id=2345&sessionid=104>