

Aplicación de SIG para la caracterización hidrogeológica de sistemas dunares (Erg Chebbi, Marruecos)

GIS application for hydrogeological characterization of dunar systems (Erg Chebbi, Morocco)

Manuel García-Rodríguez* y Loreto Antón**

INTRODUCCIÓN

Los «erg» o «mares de arena» comprenden superficies cubiertas de arena, que recubren áreas de entre unos 125 km² hasta miles de kilómetros cuadrados (Thomas, 1997). Los erg suelen presentar una jerarquía dunar como respuesta a la dinámica eólica del la región, que incluye: ripples eólicos, dunas individuales y dunas complejas (Wilson, 1972; Lancaster, 1994). Estos sistema eólicos de ambiente desértico se consideran activos o móviles, cuando las precipitaciones medias anuales son bajas, en torno a los 150 mm (Wilson, 1973). Con frecuencia, en las zonas periféricas de los ergs se forman superficies planas de arena o mantos de arena (*sand sheets*), generalmente originados y controlados por niveles freáticos próximos a la superficie del terreno y por costras superficiales (Loope, 1984; Kocurek & Nielson, 1986).

Los ergs pueden almacenar cierta cantidad de agua subterránea que resulta imprescindible para la supervivencia de la agricultura en los oasis y de la

* Departamento de Ciencias Analíticas, Facultad de Ciencias, UNED. manu.garo@ccia.uned.es

** Departamento de Ciencias Analíticas, Facultad de Ciencias, UNED. lanton@ccia.uned.es

fauna y la flora del entorno (Barczuk & Dluzewski, 2006). Por otra parte, las reservas de agua en las dunas no suelen representar grandes volúmenes, debido a las escasas precipitaciones que reciben y en parte a su permeabilidad de media a alta, que favorece un drenaje rápido. Como dato ilustrativo, Davis (1969) basado en múltiples recopilaciones, atribuye a las dunas una permeabilidad media de 20 m/día.

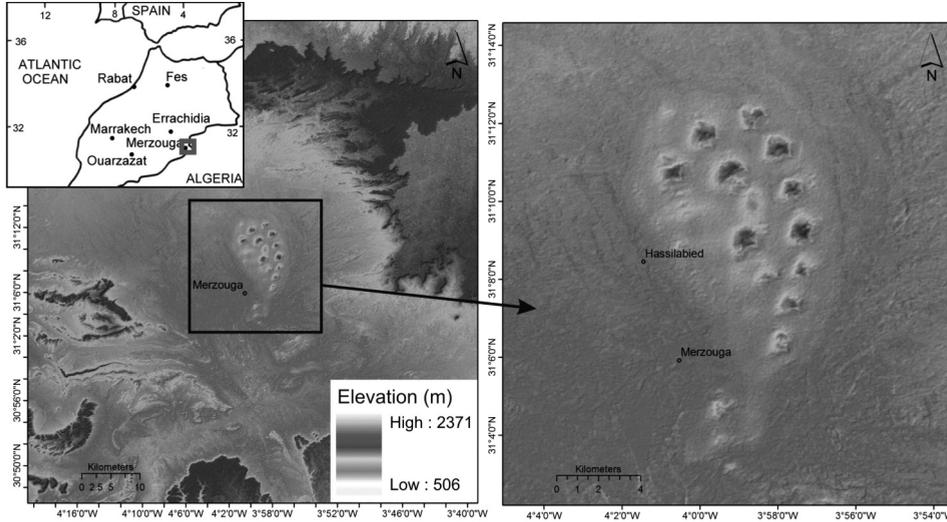
El complejo dunar de Erg Chebbi situado en el límite suroccidental de Marruecos, representa un acuífero libre que durante décadas ha abastecido a las poblaciones situadas en su periferia. Las escasas precipitaciones en la región y por tanto la recarga reducida que recibe el acuífero, hacen de él un sistema extremadamente delicado que requiere gestionarse desde el conocimiento científico. Las dimensiones reducidas, una geometría característica de los «mares de arena» y la presencia de un basamento geológico de litología homogénea (Fetah *et al.*, 1986) y topografía suave, hacen de Erg Chebbi una zona idónea para estudiar su comportamiento hidrogeológico aplicando Sistemas de Información Geográfica (SIG), y utilizar dicha metodología en otros ergs de mayor tamaño de diversos lugares del mundo.

En el presente trabajo se aborda la caracterización del sistema dunar y su comportamiento hidrogeológico. A partir del análisis del modelo digital de elevaciones (MDE), imágenes satélite y datos de campo se ha definido la geometría del complejo dunar, la posición del nivel freático, el espesor saturado de acuífero y se ha establecido la implicación de la distribución de las principales dunas gigantes en el funcionamiento hidrogeológico del sistema.

CONTEXTO

Erg Chebbi está situado en el sureste de Marruecos, al sur de la provincia de Errachidia. La provincia de Errachidia ocupa una superficie de unos 60.000 km² con fuertes contrastes del paisaje, donde destacan numerosas áreas de especial protección natural (Hosni, 2000; UNEP, 2004), entre las que se encuentra el complejo dunar estudiado (figura 1). Erg Chebbi constituye un modelo de erg de pequeño tamaño en el que se cumplen e identifican todas las características propias de los erg (Wilson, 1972 y 1973). El interior del erg estudiado se caracteriza por la presencia de grandes dunas piramidales o en estrella, siendo las zonas donde se acumulan las mayores cantidades de arena. Estas dunas gigantes están formadas por vientos multidireccionales de dirección sureste – este (Benallas *et al.*, 2003).

FIGURA 1
LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA DE LA ZONA DE ESTUDIO.



Fuente: Elaboración propia.

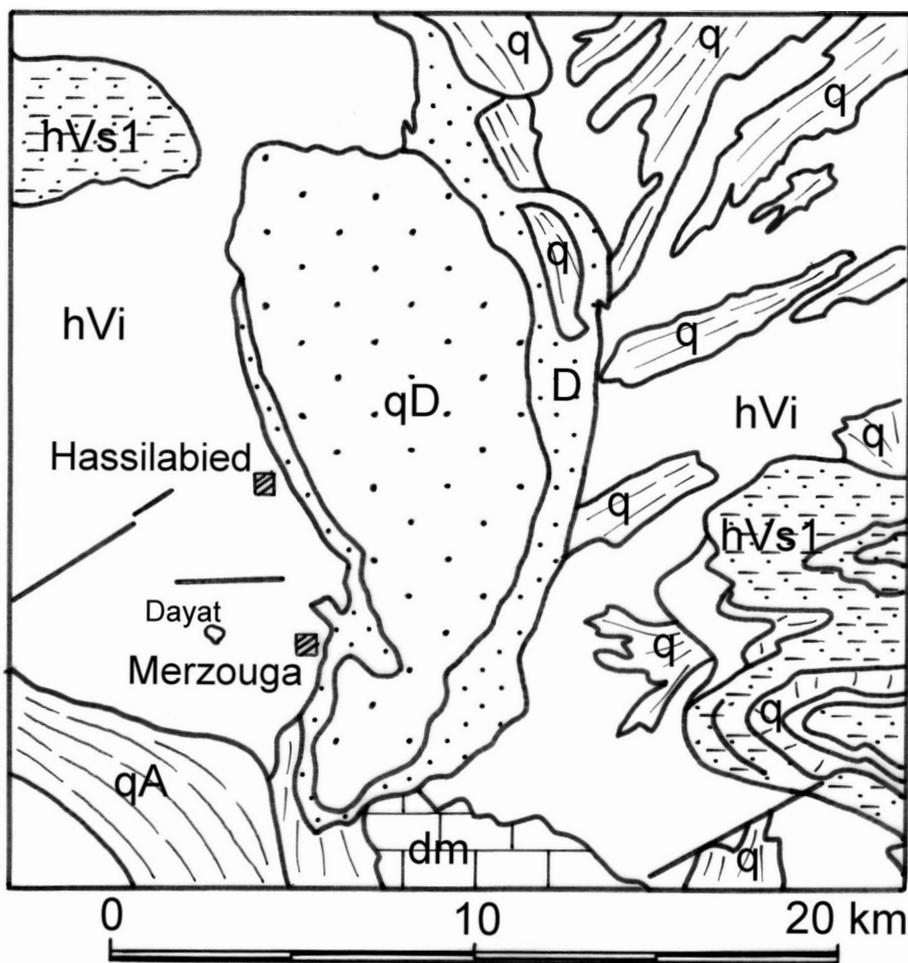
A.– Mapa de Marruecos. B.– Imagen satélite de la localización del Erg Chebbi. C.– Complejo dunar del Erg Chebbi con representación de las megadunas interiores y de los mantos de arena perimetrales.

Las arenas del Erg Chebbi se apoyan sobre esquistos arcillosos de color grisáceo, con intercalaciones de areniscas en capas muy finas y costras ferruginosas (Fm. Merdani) del Devónico medio (Fetah *et al.*, 1986). Estos materiales actúan como basamento del complejo dunar (figura 2).

Erg Chebbi presenta un clima desértico con matices continentales y temperaturas medias anuales en torno a los 20 °C, si bien los contrastes de temperatura entre el día y la noche son elevados. Las temperaturas máximas rondan los 50 °C grados en los meses de julio y agosto, con mínimas de 5 °C grados en el mes de diciembre. Las precipitaciones anuales están comprendidas entre 28 mm y 129 mm dependiendo del año hidrológico considerado (Hosni, 2000). Las escasas precipitaciones suelen producirse entre los meses de marzo y mayo, aunque hay que destacar las alteraciones pluviométricas puntuales, tormentas ciclónicas, que provocan avenidas relámpago como las sufridas

FIGURA 2

ESQUEMA GEOLÓGICO REGIONAL DE LA ZONA DE ESTUDIO BASADO EN
SERVICIO GEOLÓGICO DE MARRUECOS.



La leyenda de la figura mantiene la terminología original (Fetah et al., 1986): dm.- mármol y niveles calcáreos nodulares o estratificados del devónico medio; hVi.- esquistos arcillosos de color grisáceo con intercalaciones areniscas en capas muy finas y costras ferruginosas (fm. merdani); hVs1.- arenisca con intercalaciones pelíticas, arcillosas y fundamentalmente calcáreas (fm. mougui ayoun), en la base niveles nodulares y pudingas con restos de goniatites; qd.- arenas doradas antiguas (erg chebbi); d.- arenas actuales con morfología de barján y arenas subactuales especialmente móviles; q.- diferentes materiales de edad cuaternaria identificados como depósitos de glacia, niveles de aterrazamiento, y distintos depósitos de acarreo fluvial (en García Rodríguez et al., 2008b).

2006, 2007 y febrero de 2008 (AMED, 2008). Estas condiciones climáticas están controladas por la presencia de la cordillera del Atlas al norte, que actúa como límite geográfico noroeste de la región.

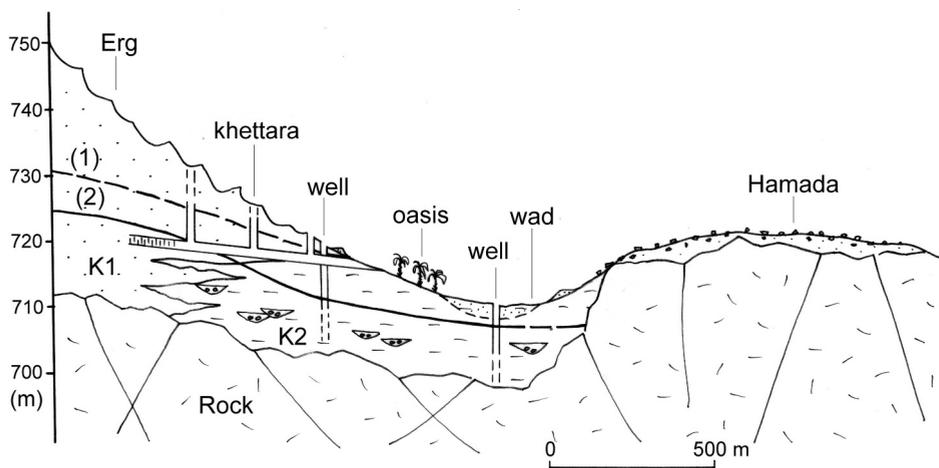
El acuífero de Erg Chebbi ha sido durante muchos años la principal fuente de abastecimiento de las poblaciones de Hassilabied y Merzouga, ambas situadas en el borde occidental del erg (figura 1). Dichas poblaciones tradicionalmente se abastecen con agua subterránea procedente del complejo dunar, extraída y distribuida por medio de khetaras, y en menor medida de pozos excavados. La khetara es un sistema tradicional y ancestral para la captación y conducción de las aguas subterráneas, consistente en una galería subterránea que al cortar el nivel freático permite que el agua salga por gravedad. La galería está conectada con la superficie del terreno por unos «pozos» o conductos verticales cada pocos metros. La afluencia de turismo durante los últimos 15 años atraído por la belleza del paisaje, ha llevado a la construcción de numerosos complejos hoteleros y al incremento de las necesidades de agua.

El balance hídrico de los acuíferos en sistemas dunares de ambientes desérticos (Jacobson & Jankowski, 1989) se caracteriza por entradas de agua debidas a la infiltración directa del agua de lluvia, y por conexión hidráulica con los depósitos aluviales de las zonas de borde. El efecto de la recarga debido a la precipitación media anual suele ser inferior al 1% de la precipitación total anual (Custodio & Llamas, 1983), pudiendo ser más significativa tras episodios tormentosos en los que la infiltración compensa la evaporación. La descarga se realiza por manantiales, extracciones desde pozos y khetaras, por evaporación directa y por infiltración en las fracturas del basamento rocoso.

El trabajo de campo realizado en estudios previos (García Rodríguez, *et al.*, 2008a y 2008b) ha permitido comprobar cómo ha descendido el nivel freático de los pozos situados en la zona de borde del sistema dunar, llegando a secarse muchos de ellos (figura 3).

Igualmente se ha constatado que casi la totalidad de las khetaras antiguas han dejado de funcionar como galerías de drenaje, y ha sido necesario abrir nuevas galerías excavadas hacia el interior del complejo dunar para volver a cortar el nivel freático, que cada año retrocede hacia el interior del erg (AMED, 2008 y 2009; Pilia *et al.*, 2009). Algunos trabajos de índole general sobre el desarrollo sostenible del Erg Chebbi ponen de manifiesto los problemas derivados de una explotación intensiva de las aguas subterráneas del complejo dunar (Hosni, 2000, Moya-Palomares *et al.*, 2008a Moya-Palomares *et al.*, 2008b, UNEP, 2004 y Vicente *et al.*, 2008).

FIGURA 3
PERFIL HIDROGEOLÓGICO ESQUEMÁTICO
EN EL ENTORNO DE HASSILABIED



(Según García Rodríguez *et al.*, 2008a). (1) posición del nivel freático en régimen natural, sin intervención antrópica, y (2) posición del nivel freático en 2008. su localización coincide con los 3000 m iniciales del perfil 7-7' de la figura 9.

MÉTODO

Son numerosas las publicaciones en las que se han utilizado los sistemas de información geográfica y la teledetección para caracterizar, cartografiar zonas desérticas y mantos de arena (e.g., Walker & Olsen, 1987; Warren & Allison, 1998; Janke, 2002; Levin *et al.* 2004, Saqqa & Atallah, 2004; Maman *et al.*, 2011). Sin embargo, la aplicación de este tipo de análisis para obtener resultados en estudios hidrogeológicos en zonas de erg, no es tan común.

Con objeto de realizar una caracterización geométrica de Erg Chebbi, así como la cuantificación de sus recursos hídricos y comportamiento hidrogeológico, se han realizado diversos trabajos que incluyen la recopilación de datos de campo, el análisis mediante SIG de la información cartográfica, y el análisis geoestadístico de la información topográfica del complejo dunar y del basamento rocoso.

Datos del terreno, análisis e interpolación geoestadística

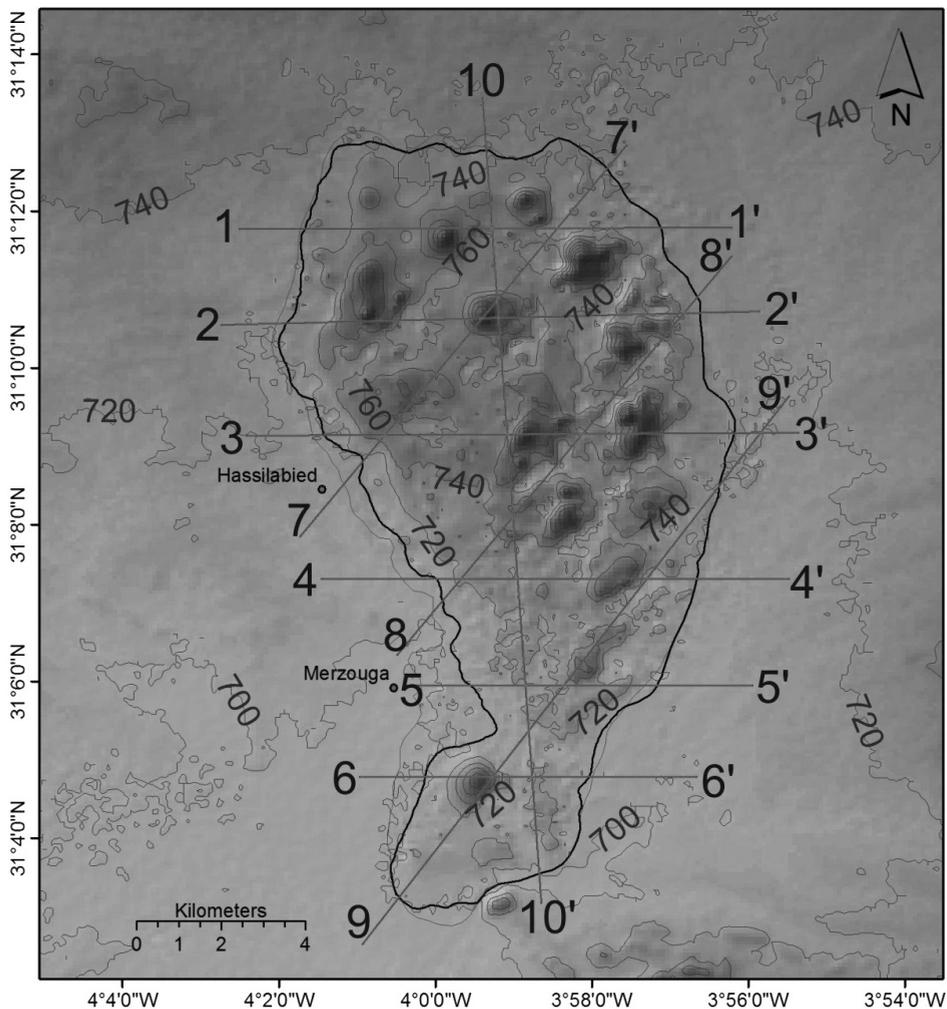
Los Modelos digitales del elevaciones utilizados en el presente trabajo, para el análisis cuantitativo de las características del Erg Chebbi y su entorno, se han obtenido a partir de los datos del Shuttle Radar Topographic Mission (SRTM Version 4, Jarvis *et al.*, 2008). Como elementos de apoyo a las observaciones realizadas así como para cotejar algunos de los datos procedentes del MDE se han utilizado imágenes de satélite y mapas topográficos de Marruecos a escala 1:50.000 (Ministère de l'Égriculture et de la Mise en Valeur Agricole, 1992).

A partir de los datos topográficos y mediante la aplicación de SIG (ArcGis 9.3 y Global Mapper v.12) se ha caracterizado la geometría del complejo dunar, sus dimensiones y sus características principales. También se han identificado las principales dunas gigantes y su distribución. Una vez generado el MDE se han extraído del mismo 10 perfiles topográficos, distribuidos a lo largo del complejo dunar y sus bordes (figuras 4 y 5). Con objeto de obtener una mayor representatividad en los perfiles topográficos la escala vertical está exagerada 30 veces con respecto a la escala horizontal (figura 5).

El área alrededor del Erg Chebbi constituye una superficie de poco relieve formada por esquistos arcillosos (Fm. Merdani) del basamento. El hecho de que se trate de una superficie plana permite reconstruir con cierta fidelidad la superficie del basamento por debajo del complejo dunar. Para ello se ha realizado una reconstrucción geoestadística del basamento por debajo de Erg Chebbi, mediante el análisis de superficie de tendencia (figura 6). En primer lugar se han eliminado los datos topográficos correspondientes a la superficie de la duna mediante un blanqueo y, posteriormente se ha generado la superficie del basamento por debajo de las arenas aplicando una regresión polinómica de segundo orden a los datos de elevación del basamento en el entorno de la duna. Las regresiones polinómicas son útiles para este tipo de análisis ya que permiten definir la tendencia regional, del basamento en este ejemplo. En el caso de Erg Chebbi se han realizado varios cálculos resultando la regresión polinómica de segundo orden la más adecuada para la zona estudiada.

FIGURA 4

MODELO DIGITAL DEL TERRENO DEL COMPLEJO DUNAR DE ERG CHEBBI

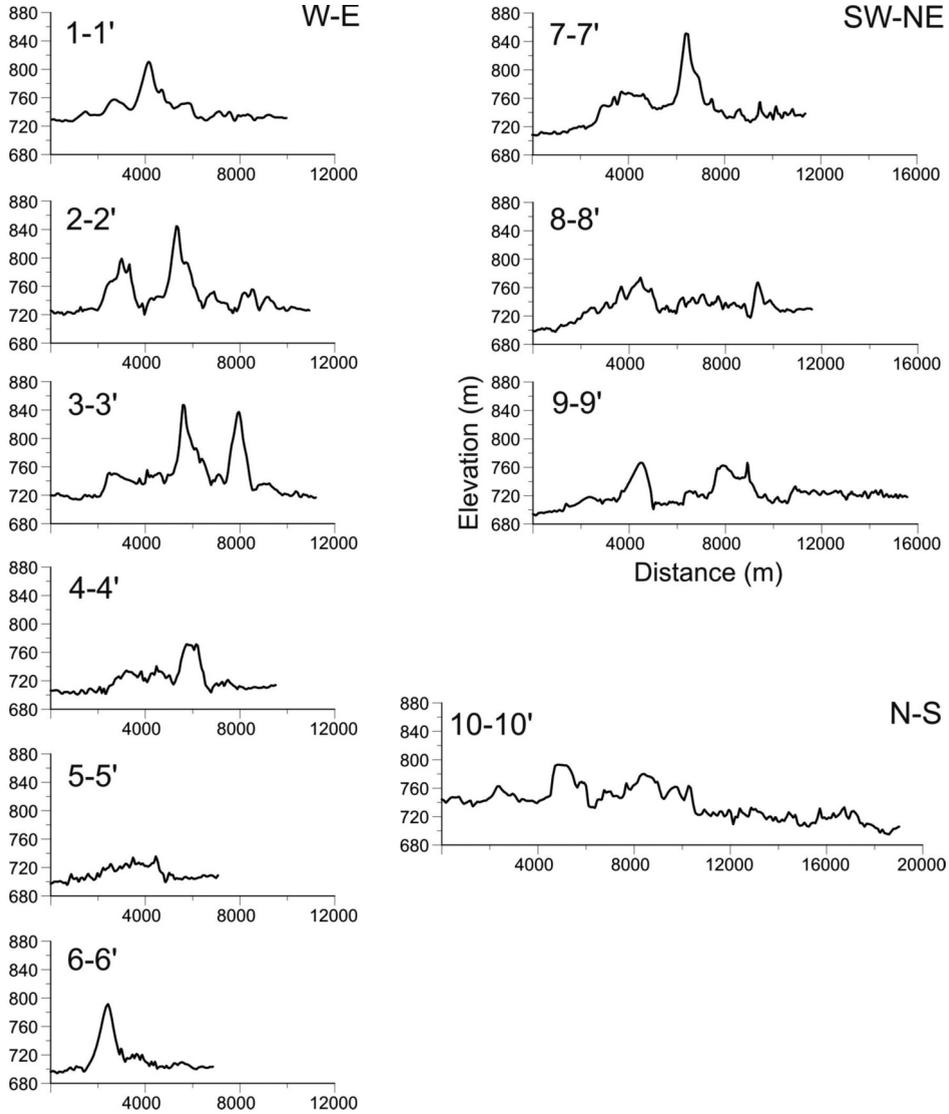


En tonos claros se representan las alturas mínimas y en tonos oscuros las máximas (equidistancia entre curvas de nivel 20 m.). La línea perimetral delimita la superficie de las arenas eólicas antiguas (materiales qd de la figura 2). En trazo grueso se indica la localización de los perfiles de las figuras 5 y 9.

Fuente: elaboración propia.

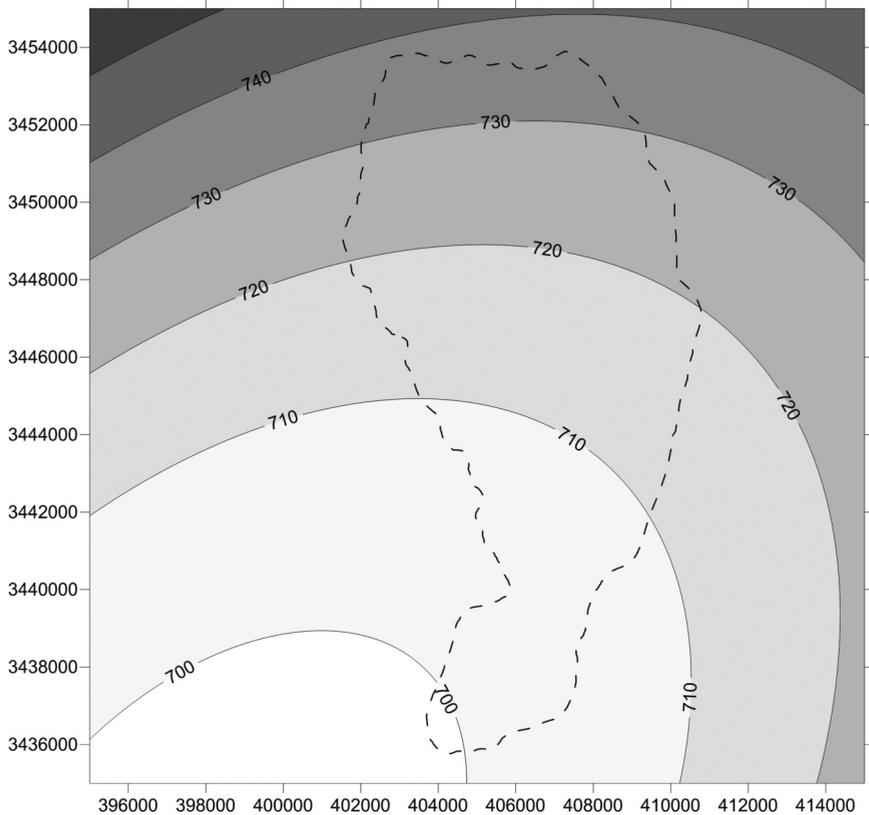
FIGURA 5

PERFILES TOPOGRÁFICOS SERIADOS DE ERG CHEBBI



La escala vertical exagerada 30 veces con respecto a la escala horizontal (ver localización en la figura 4).

FIGURA 6
RECONSTRUCCIÓN GEOESTADÍSTICA DE LA COTA DEL BASAMENTO EN EL
ENTORNO DEL ERG CHEBBI



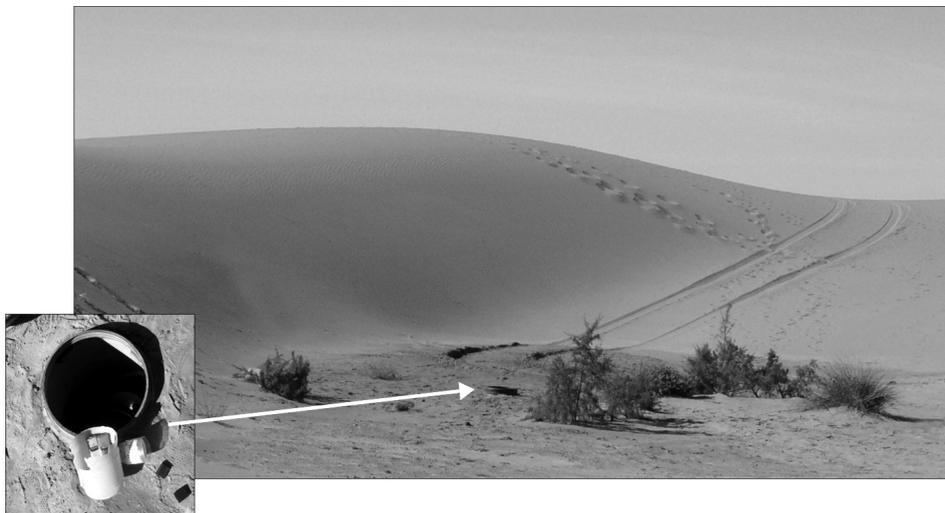
En línea discontinua se representa el perímetro del erg.
Fuente: elaboración propia.

Datos geológicos e hidrogeológicos

El trabajo de campo ha permitido delimitar y conocer los límites del complejo dunar, definiendo y seleccionando los puntos de agua más idóneos para dibujar la piezometría. Debido a la dificultad para desplazarse por el interior del complejo dunar, la mayor parte de los puntos de agua visitados se localizan en las zonas de borde del erg, según se presentaba en el inventario de puntos de

FIGURA 7

MANIFESTACIÓN DEL NIVEL FREÁTICO EN UNA ZONA INTERDUNAR DEL INTERIOR DEL ERG CHEBBI



La proximidad del nivel freático se reconoce por la existencia de una tonalidad más oscura y por la presencia de vegetación. La rodada del vehículo se hace más consistente en la zona húmeda. El disco de la zona central de la foto es un pozo que tiene el agua a una profundidad de 0,30 m (ver detalle en el recuadro de la izquierda).

Fuente: elaboración propia.

agua publicado en García-Rodríguez *et al.*, (2008 a). Otras referencias utilizadas como indicios de una piezometría próxima a la superficie del terreno se han obtenido mediante las aplicaciones de ArcGis v.9.3 y Google Earth, localizando campamentos nómadas con pozos, zonas con vegetación, oasis y manifestaciones salinas (Tillman *et al.*, 2012) encontradas en zonas con el nivel freático próximo a la superficie del terreno (figura 7). En trabajos ya clásicos sobre zonas desérticas (Mann, 1958), ya se apuntaba que la presencia de plantas herbáceas indica un nivel freático situado a menos de 3 m de profundidad, y a menos de 10 m si se trata de arbustos. La localización precisa de los datos del interior del erg Chebbi utilizados como referencias piezométricas se han obtenido mediante las aplicaciones de ArcGis y Google Earth. En la tabla 1 se presenta un resumen del inventario de puntos de agua, que recoge todos los datos utilizados para dibujar la piezometría en erg Chebbi.

TABLA 1
RESUMEN DEL INVENTARIO DE PUNTOS DE AGUA

Inventario de puntos de agua del sector occidental de erg Chebbi				
Nº de orden	Latitud (N)	Longitud (O)	Cota del suelo (m.s.n.m)	Nivel freático (m.s.n.m)
1	31°07'27"	4°00'94"	718	711,2
2	31°07'35"	4°00'38"	719	717,3
3	31°07'57"	4°00'49"	720	719,3
4	31°08'39"	4°01'12"	720	712,6
5	31°08'35"	4°01'25"	709	706
6	31°09'30"	4°01'35"	726	725,7

Fuente: García Rodríguez, *et al.*, 2008a.

Referencia piezométricas del interior del erg				
Nº de orden	Latitud (N)	Longitud (O)	Cota del suelo (m.s.n.m)	Nivel freático (m.s.n.m)
7	31°10'36"	4°00'22"	732	728-731
8	31°11'47"	3°58'51"	734	730-733
9	31°11'21"	3°58'18"	734	730-733
10	31°11'12"	3°57'65"	730	726-729
11	31°10'29"	3°58'42"	735	731-734
12	31°08'97"	3°58'38"	727	722-726
13	31°09'59"	3°57'00"	728	724-727
14	31°08'02"	3°57'53"	721	717-720
15	31°07'19"	3°57'20"	716	712-715
16	31°06'09"	3°57'39"	708	704-707
17	31°08'42"	3°58'38"	728	724-727

Datos obtenidos mediante interpretación de imágenes de satélite.

Fuente: elaboración propia.

A partir de los datos del inventario de puntos de agua se realizó una primera aproximación al modelo de flujo subterráneo, representando el mapa de isopiezas de todo el Erg Chebbi (figura 8). Posteriormente y con el objetivo de representar el espesor saturado de agua subterránea, se seleccionaron cinco

perfiles representativos del complejo dunar y se dibujó el nivel freático en cada uno de ellos. Como el gradiente hidráulico en las aguas subterráneas es muy pequeño, la escala vertical de los perfiles se amplió 55 veces respecto a la escala horizontal, obteniendo así unos perfiles hidrogeológicos representativos (figura 9). El límite inferior del acuífero se determinó a partir de la interpolación del basamento (figura 6).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Geometría del complejo dunar

Las arenas eólicas de Erg Chebbi forman un acuífero que se extiende por una superficie de 105 km². De norte a sur el eje mayor tiene una longitud de 18 km. De oeste a este, la anchura máxima es de 8,6 km en la mitad norte, y la mínima de 2 km en el sur. La cota topográfica del límite norte del erg se sitúa entre 730 y 740 metros. El basamento del conjunto dunar está formado por esquistos arcillosos y presenta cierta pendiente hacia el S – SW, que concuerda con las pendientes y topografía del basamento en las zonas de afloramiento. El borde meridional está a una altura de entre 690 y 700 metros. La pendiente entre el extremo Norte y Sur del erg, obtenida a partir de la superficie del basamento interpolada, es del orden del 6,6 por mil. Las pendientes obtenidas del basamento son acordes con las pendientes regionales de los mismos materiales.

A partir del modelo digital de elevaciones se han identificado variaciones importantes de cota topográfica entre las zonas de borde e interiores, de hasta unos 180 m. Todo el sistema está salpicado de dunas gigantes que pueden llegar a alcanzar más de 100 m de altitud sobre la superficie media de las arenas. En número, se han contabilizado 14 dunas o conjuntos de dunas gigantes. Las cotas de las dunas gigantes oscilan entre 813 m y 875 m que mide la más alta. El espaciado medio entre las dunas gigantes varía entre unos 1500 a 2000 m. La relación entre altura de las dunas y el espaciado entre ellas está dentro de los valores recopilados por Lancaster (1995) para la descripción y definición de los ergs (Gutiérrez, 2001).

La altitud media del interior de sistema dunar de la mitad norte, desechando las megadunas, se sitúa en torno a los 750 metros, con un espesor medio de arena de unos 30 m, acorde con la potencia media de los erg saharianos definida entre 21-43 m por Wilson (1973). En la mitad sur del erg Chebbi la altitud media del sistema dunar es de 720 m.

Toda la zona perimetral forma mantos de arena relacionados con la presencia del nivel freático próximo a la superficie del terreno, sobre la que se deslizan dunas de tipo barján.

Hidrogeología

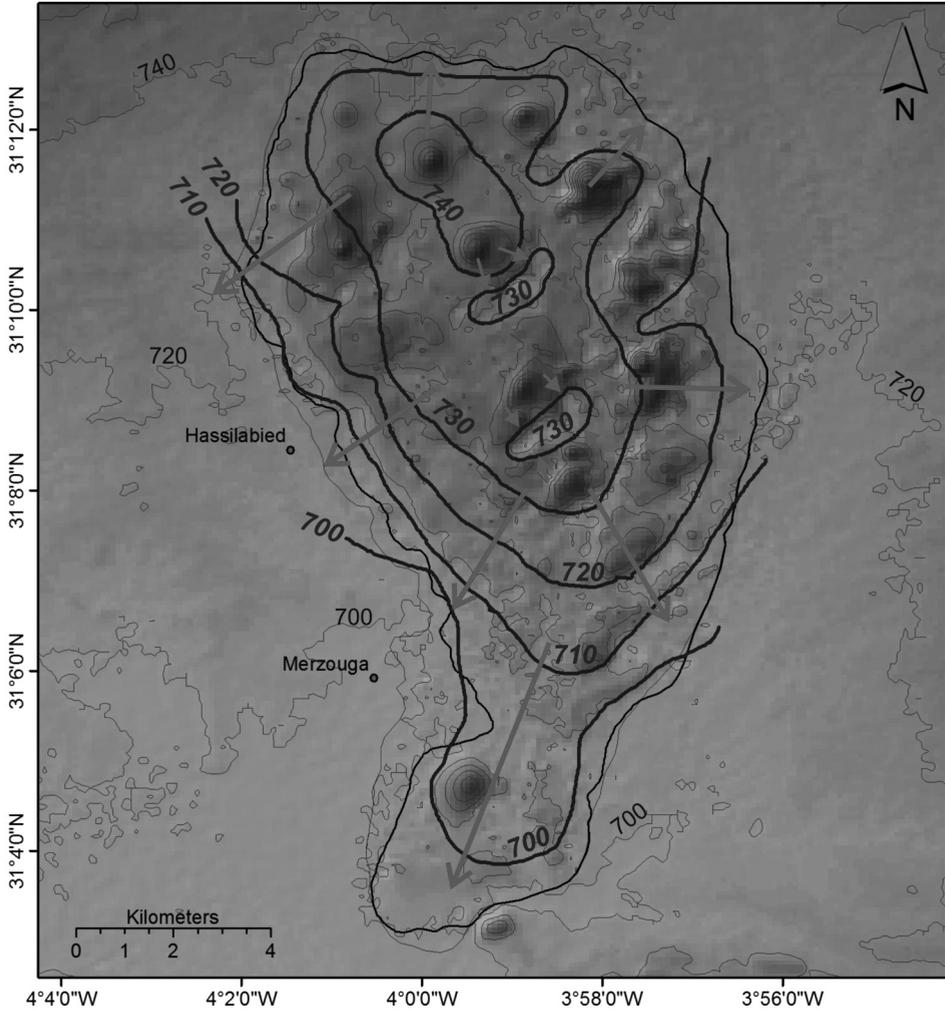
Los datos de campo obtenidos en el borde occidental de Erg Chebbi, indican una profundidad del nivel freático comprendida entre unos 10 m y algo menos de 1 m medido desde la superficie topográfica. En el interior del complejo dunar, en las zonas interdunares (referido a las dunas gigantes), el nivel freático interpretado a partir de imágenes satélite, se localiza a profundidades de entre 1 m y 5 m. Fuera del erg, la zona de hamada está formada por materiales impermeables y no contiene agua subterránea.

La interpolación de la superficie del basamento por debajo del complejo dunar ha permitido delimitar la posición del límite inferior del acuífero, que es coherente con los datos de campo y con estimaciones realizadas a partir de los perfiles.

A partir del inventario de puntos de agua y de los indicios de presencia de agua subterránea identificados en superficie se ha determinado la posición del nivel freático para toda la superficie del erg y se ha generado un mapa de isopiezas y cinco perfiles hidrogeológicos (figuras 8 y 9). El nivel freático en el interior del erg se sitúa, en la mitad norte, entre los 730 y 740 m, mientras que en la mitad sur del erg el límite superior de la zona saturada se encuentra entre 700 y 720 m.

El sistema de flujo es radial desde las zonas interiores del conjunto dunar, que son las que tienen mayores espesores de arena, hacia las zonas de borde, con una componente de flujo profundo hacia el SW a favor de la pendiente del basamento (figura 9). No obstante, la presencia y distribución de megadunas aisladas en el interior del complejo dunar favorece la formación de flujos locales radiales, desde las mayores acumulaciones de arena hacia zonas deprimidas donde la descarga se realiza por evaporación (figura 8). El modelo confirma que la recarga se produce por infiltración directa del agua de lluvia en los periodos tormentosos y por conexión hidráulica con los depósitos aluviales distribuidos en todo el borde oriental. Actualmente la descarga se realiza de forma artificial desde las khattaras situadas en el borde occidental y por evaporación directa en aquellas zonas donde el nivel freático se sitúa próximo a la superficie.

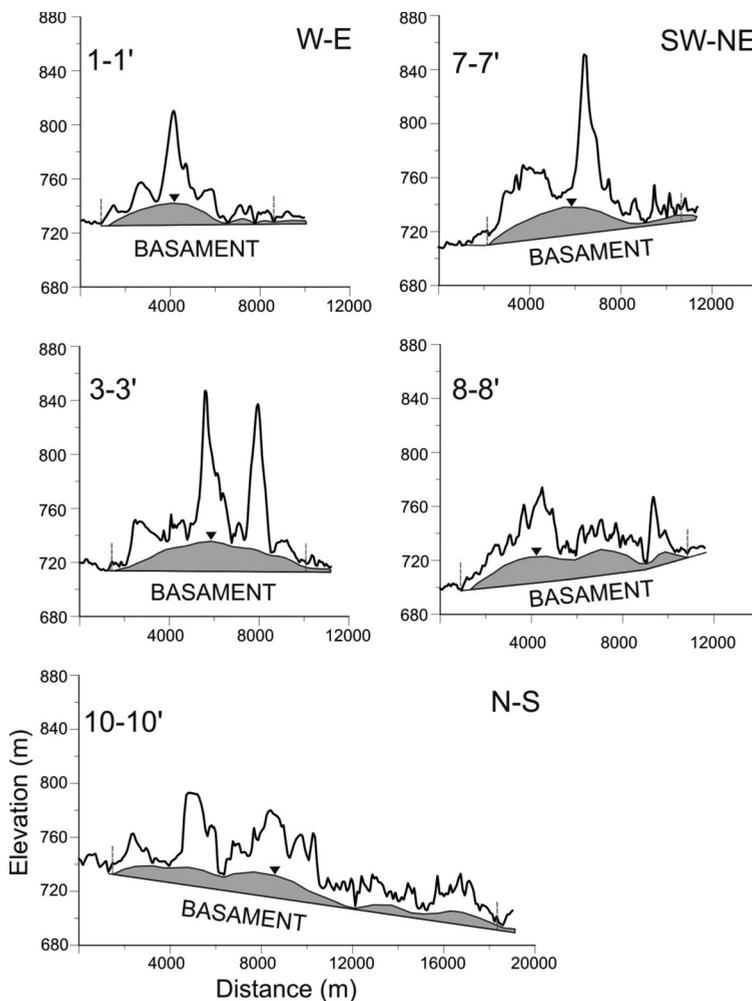
FIGURA 8
 MAPA DE ISOPIEZAS DE ERG CHEBBI



Se representan las isopiezas del complejo de dunas en el interior del perímetro definido (equidistancia entre isopiezas de 10 m). No se representan las isopiezas de los depósitos de ouadis en los bordes oriental y occidental del erg.

Fuente: elaboración propia.

FIGURA 9
SELECCIÓN DE PERFILES HIDROGEOLÓGICOS REPRESENTATIVOS DEL
ACUÍFERO DE ERG CHEBBI



En gris se representa la posición del nivel freático y el espesor saturado de acuífero. El límite superior de la zona saturada se ha dibujado a partir de los datos de piezometría publicados en García Rodríguez *et al.*, (2008a y 2008b) en las zonas de borde, y de imágenes satélite en la zona interior. La base de la zona saturada representa la posición del basamento geológico dibujada por interpolación desde las zonas periféricas del Erg Chebbi, a partir de observaciones de campo y de la cartografía geológica. Escala vertical exagerada 30 veces la escala horizontal.

Fuente: elaboración propia.

El espesor máximo saturado de agua del sistema dunar se ha estimado en unos 20 m, suponiendo las condiciones más favorables de recarga del acuífero. Este espesor se ha determinado con la premisa de profundidad del sustrato geológico definida previamente. No obstante, es posible la presencia de agua subterránea en las fracturas del basamento geológico por debajo de las arenas, aunque el espesor saturado al que se hace referencia en este trabajo es exclusivamente el de las arenas del complejo dunar.

En las proximidades de Hassilabied el mapa de isopiezas muestra una inflexión hacia el interior del complejo dunar (figura 8) que se debe a la explotación intensiva de aguas subterráneas que desde años se viene realizando en el borde occidental del erg. Este retroceso de las isopiezas se ha visto favorecido por la construcción de nuevos ramales de khattaras hacia el interior del erg. Los resultados obtenidos sobre piezometría y flujo son coherentes con el aprovechamiento del agua en la zona, constatado durante el trabajo de campo.

El gradiente hidráulico calculado (ver perfil 7-7' de la figura 9) entre la zona central del erg y el borde oeste tiene un valor muy pequeño (del orden del 6 por mil), coherente con los valores de las aguas subterráneas en este tipo de acuíferos (Custodio & Llamas, 1983). En la zona sur del erg donde el espesor de arenas es más reducido, el gradiente máximo obtenido es del 1,5 por mil. Estos valores son coherentes con las dimensiones del erg y con los espesores de arena calculados en este trabajo.

CONCLUSIONES

Basados en aplicaciones SIG y con apoyo de datos de campo ha sido posible caracterizar geométrica e hidrogeológica el sistema dunar Erg Chebbi, localizado en una zona desértica y de difícil acceso.

Erg Chebbi representa un ejemplo de erg de dimensiones reducidas (105 km²) y con una geometría bien definida. Con un espesor medio de arena de 30 m, el espesor máximo saturado de agua del sistema dunar se ha estimado en unos 20 m.

El sistema de flujo es radial desde las zonas interiores del conjunto dunar hacia las zonas de borde, con un gradiente hidráulico entre la zona central del erg y el borde oeste del 7 por mil, mientras que en la zona sur del erg, donde el espesor de arenas es más reducido, el gradiente máximo obtenido es del 1,5 por mil. La interpolación geoestadística del basamento geológico del complejo dunar ha permitido definir el límite inferior del acuífero.

El mapa de isopiezas (figura 8) y los perfiles hidrogeológicos (figura 9) elaborados han contribuido a conocer mejor la geometría del acuífero del erg Chebbi, suministrando información sobre la distribución del espesor saturado en distintas zonas.

Una aplicación relativamente sencilla de empleo de los SIG ha permitido elaborar un modelo de flujo subterráneo que ha resultado coherente con el aprovechamiento que se hace del agua subterránea en las poblaciones periféricas. El modelo presentado puede utilizarse como herramienta básica para la gestión de los recursos hídricos subterráneos de la zona. Los resultados obtenidos y la metodología empleada pueden resultar de utilidad para realizar una primera aproximación al estudio hidrogeológico de otras zonas remotas con características similares.

Fecha de recepción: 21 de noviembre de 2012.

Fecha de aceptación: 16 de enero de 2014.

BIBLIOGRAFÍA

- Association Merzouga pour l'environnement et le Developpment (AMED) (2008): *Khattaras: Talabbast, Tamzzanat et Tamarirt*. Poumons de Merzouga, Avant déntamer le rapport association/agriculture, Merzouga Errachidia, 36 pp.
- Association Merzouga pour l'environnement et le Developpment (AMED) (2009): *Project Réhabilitation Khettara Talabbast a Merzouga*. <http://www.merzouga.eb2a.com/> (Fecha de consulta: 27/10/2014).
- Barczuk, A. & Dluzewski, M. (2006): "Influence of human activity on dunes fields", in: *International Symposium on Drylands Ecology and Human security Perspectives, Policy Responses and Sustainable Development in the Arab Region Challenges and Opportunities*. Dubai, United Arab Emirates. Abstract, pp. 141.
- Benallas, M.; Alen, E. M.; Rognon, P.; Desjardins, R.; Hilari, A. & Khardi, A. (2003): "Eolian dynamic and palm grove encroachment in the sand dunes of Tafilatet". *Sciences et Changement Planétaires. Sécheresse*, 14 (2), pp. 77-83.
- Custodio E. & Lamas M. R. (ed.) (1983): *Hidrología subterránea*. Barcelona, Editorial Omega, tomos I y II, 2.350 pp.
- Davis, S. N. (1969): "Porosity and permeability of Natural Material", in De Wiest (ed.): *Flow through Porous Media*. New York, Academic Press, pp. 53-89.
- Fetah, S. E.; Bensaid, M. & Dahmai, M. (1986): *Carte Géologique du Maroc. Tafilalt – Taouz, Echelle 1/200.000*. Rabat, Ed. Service Géologique du Maroc. p. 244.
- Fryberger, S. G; Schenk, C. J. & Krystinik, L. F. (1988): "Stoke surfaces and the effects of nearsurface groundwater – table on aeolian deposition". *Sedimentology*, 35, pp. 21-41.

- García Rodríguez, M.; Moya-Palomares, M. E.; de Pablo, M. A.; Vicente R. & Acaso, E. (2008a): "Funcionamiento hidrogeológico del borde occidental del sistema dunar "erg Chebbi" entre Hassilabied y Merzouga (Marruecos)". *Tecnología y Desarrollo*, VI, pp. 1-18.
- García Rodríguez, M.; Moya-Palomares, M. E.; de Pablo, M. A., Vicente R. & Acaso, E. (2008b): "Nuevas aportaciones sobre el funcionamiento hidrogeológico del acuífero de erg Chebbi en el entorno de Hassilabied (Marruecos)". *m + a Revista Electrónica de Medioambiente UCM*, 5, pp. 26-40.
- Groeneveld, D. P.; Baugh, W. M.; Sanderson, J. S. and Cooper, D. J. (2007): "Annual groundwater evapotranspiration mapped from single satellite scenes". *Journal of Hydrology*, 344, pp. 146-156.
- Gutiérrez Elorza, M. (2001): *Geomorfología climática*. Barcelona, Editorial Omega, 642 pp.
- Hosni, E. (2000): *Strategy for sustainable tourism development in the Sahara*. Francia, Ed. UNESCO, Ref. CLT-2000/WS/1, 71 pp.
- Jacobson, G. & Jankowski, J. (1989): "Groundwater discharge processes at a central Australian playa". *Journal of Hydrology*, 105, pp. 275-295.
- Janke, J. R. (2002): "An analysis of the current stability of the Dune Field at Great Sand Dunes National Monument using temporal TM imagery (1984-1998)". *Remote Sensing of Environment*, 83 (3), pp. 488-497.
- Jarvis, A.; Reuter, H. I.; Nelson, A. & Guevara, E. (2008): *Hole-filled seamless SRTM data V4*. International Centre for Tropical Agriculture (CIAT). Available from: <http://srtm.csi.cgiar.org>.
- Kocurek, G. & Nielson, J. (1986): "Conditions favorables for the formation of warm-climate aeolian sands sheets". *Sedimentology*, 33: 795-816.
- Lancaster, N. (1994): "Dune morphology and dynamics", in A. D. Abrahams, y A. J. Parson (eds.): *Geomorphology of Desert Environments*. Londres, Chapman and Hall, pp. 474-505.
- Levin, N.; Ben-Dor, E. & Karnieli, A. (2004): "Topographic information of sand dunes as extracted from shading effects using Landsat images". *Remote Sensing of Environment* 90 (2), pp. 190-209.
- Loope, D. B. (1984): "Origin of extensive bedding, planes in aeolian sandstones: a deference of Stokes hypothesis". *Sedimentology*, 31, pp. 123-125.
- Maman, S.; Blumberg, D. G.; Tsoar, H.; Mamedov, B. & Porat, N. (2011): "The Central Asian ergs: A study by remote sensing and geographic information systems". *Aeolian Research*, 3(3): pp. 353-366.
- Mann, J. F. (1958): *Estimating Quality and Quantity of Ground water in dry regions using airphotographs*. Toronto, Intern. Assoc. Scienc. Hydrol. General Assembly of Toronto, vol. 2, pp. 125-134.
- Ministère de l'Ágriculture et de la Mise en Valeur Agricole (1992): *Carte du Maroc, 1:50.000. Feuille NH-30-XX-2b (Merzouga)*. Rabat (Maroc), Ed. Ministère de L'ágriculture et de la Mise en Valeur Agricole. Direction du Cadastre et de la Cartographie.

- Ministère de l'Économie, de Finances, de la Privatisation et du Tourisme (2006): *Monographie Regionale de L'Environnement, Region Meknès-Tafilatet*. Rabat, Rapport de Synthèses.
- Ministry of Territorial Planning, Water and Environment (2001): *National Study on Biodiversity Synthesis Report*. Department of Environment Kingdom of Morocco, Berlin, United Nations Program of Environment. 161 pp.
- Moya-Palomares, M. E.; García, M.; de Pablo, M. A.; Vicente, R.; Acaso, E.; Rubial, M. J.; Aberkan, M. & Zanniby, F. (2008a): "Sustainable development or unlimited turistical grown?". The case of erg Chebbi region, Morocco", in: *Women and Year of the Planet Earth 2008, AAWGA. 4th Conference of the Association of African Women Geoscientists*. Cairo, (Egypt), pp. 101-103.
- Moya-Palomares, M. E.; de Pablo, M. A.; Acaso, E.; Vicente, R.; García, M. & Rubial, M. J. (2008b): "The educative interest of the virtual geologic itineraries: the examples of geomorphologic itineraries on mars and central south Morocco", in: *Women and Year of the Planet Earth 2008, AAWGA. 4th Conference of the Association of African Women Geoscientists*. Cairo, (Egypt), pp. 60-62.
- Pataki, D. E.; Billings, S. A., Naumburg, E. and Goedhart, C. M. (2008): "Water sources and nitrogen relations of grasses and shrubs in phreatophytic communities of the Great Basin Desert". *Journal of Arid Environments* 72, pp. 1581-1593.
- Pilia, A.; Spanu, V.; Concollato, C.; Calzolari, E. & Valenilla A. M. (2009): "Rehabilitation and extension of a khattara for a sustainable use of underground water resources". Viena, *Geophysical Research Abstracts*, Ref: EGU 2009-9840. vol. 11, p. 9.840.
- Saqqa, W. & Atallah, M. (2004): "Characterization of the aeolian terrain facies in Wadi Araba Desert, southwestern Jordan". *Geomorphology*, 62, pp. 63-87.
- Steinwand, A. L.; Harrington, R. F. and Or, D. (2006): "Water balance for Great Basin phreatophytes derived from eddy covariance, soil water, and water table measurements". *Journal of Hydrology*, 329, pp. 595-605.
- Tillman, F. D.; Callegary, J. B.; Nagler, P. L. and Glenn E. P. (2012): "A simple method for estimating basin-scale groundwater discharge by vegetation in the basin and range province of Arizona using remote sensing information and geographic information systems". *Journal of Arid Environments*, 82, pp. 44-52.
- Thomas, D. S. G. (ed.) (1997): *Arid Zone Geomorphology: Process, Forms and Change in Drylands*. Chichester, Ed. John Wiley, 713 pp.
- United Nations Environment Programme, UNEP (2004): *Estratégie nationale pour la conservation et l'utilisation durable de la diversité biologique*. Rabat, l'Aménagement du territoire, de l'Eau et de l'Environnement du Maroc, UNEP, 181 pp.
- Vicente, R.; Moya-Palomares, M. E.; de Pablo, M. A.; Acaso, E.; García, M.; Aberkan, M. & Zanniby, F. (2008): "Study of the groundwater quality in the erg Chebbi area, central - South Morocco", in: *Women and Year of the Planet Earth 2008, AAWGA. 4th Conference of the Association of African Women Geoscientists*. Cairo (Egypt), pp. 62-65.

- Walker, A. S. & Olsen, J. W. (1987): "The Badain Jaran desert: remote sensing investigations". *The Geographical Journal*, 153 (2), pp. 205-210.
- Warren, A. & Allison, D. (1998): "The paleoenvironmental significance of dune size hierarchies". *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 137, pp. 289-303.
- Wilson, I. G. (1972): "Aeolian bedforms – their development and origins". *Sedimentology*, 19, pp. 173-210.
- Wilson, I. G. (1973): "Ergs". *Sedimentary Geology*, 10, pp. 77-106.

RESUMEN

Los estudios hidrogeológicos en áreas desérticas de difícil acceso resultan logísticamente complicados. Sin embargo, en algunas de estas zonas el aprovechamiento de los recursos hídricos subterráneos resulta esencial para la supervivencia de las comunidades que las habitan. El complejo dunar de Erg Chebbi, constituye un acuífero libre que ocupa una superficie de unos 100 km². Durante decenas de años el agua subterránea almacenada en su interior ha abastecido las poblaciones asentadas en sus proximidades. Con una precipitación media anual inferior a 150 mm, representa un sistema extremadamente delicado, que requiere una explotación muy bien diseñada que permita un desarrollo sostenible. En este trabajo, el análisis mediante SIG (ArcGis 9.3 y Global Mapper v.12) del modelo digital del elevaciones, imágenes de satélite y de la cartografía geológica ha permitido describir en detalle la geometría del complejo dunar y ofrecer una primera aproximación a un modelo hidrogeológico que ha sido validado con datos de campo. La metodología empleada en este trabajo es de aplicación para el estudio de otros ergs del mundo.

PALABRAS CLAVE: sistema dunar; hidrogeología; Erg Chebbi; SIG.

ABSTRACT

Hydrogeological studies in remote areas are difficult to tackle and often logistically complicated. However, in some of these areas the exploitation of groundwater resources is essential for the survival of the communities that inhabit them. The dunes of Erg Chebbi configure a free aquifer about 100 km² in area. With an average annual rainfall of less than 150 mm, Erg Chebbi represents an extremely delicate hydrological system that requires a very well designed exploitation to enable a sustainable development. This paper addresses the hydrogeological characterization of an erg system by means of Geographic Information Systems (GIS) (ArcGis 9.3 y Global Mapper v.12), Digital Elevation Model (DEM) and geological information analysis. Results allowed the characterization the dune system and the setting of a hydrogeological model, consistent with field data. The results are relevant to the management of the groundwater exploitation in the studied system, and highlight the utility of this methodology to the characterization of other areas with similar characteristics.

KEY WORDS: dunar system; hydrogeology; Erg Chebbi; GIS.

RÉSUMÉ

Des études hydrogéologiques dans les zones difficiles d'accès sont compliquées. Cependant, dans certains de ces domaines, l'utilisation des eaux souterraines sont essentiel pour la survie des communautés qui les habitent. Les dunes de l'Erg Chebbi, forment un aquifère libre qui occupe une superficie l'ordre de 100 km². Durant des décennies les eaux souterraines stockées à l'intérieur a ensemencé les populations vivant à proximité. Avec une pluviométrie moyenne annuelle de moins de 150 mm, le système dunaire est très fragile et a besoin d'une utilisation bien conçus, pour un développement durable. Dans cet article, l'analyse utilisant le SIG (ArcGIS 9.3 et Global Mapper v.12) modèle d'élévation numérique, l'imagerie satellite et cartographie géologique, a permis décrire en détail la géométrie des dunes et offrir une première approximation d'une modèle hydrogéologique qui a été validé avec des données de terrain. La méthodologie utilisée dans cette étude est applicable à l'étude d'autres ergs du monde.

MOTS CLÉS: système de dunes; hydrogéologie; Erg Chebbi; SIG.