



NUEVAS APORTACIONES SOBRE EL FUNCIONAMIENTO HIDROGEOLÓGICO DEL ACUÍFERO DE ERG CHEBBI EN EL ENTORNO DE HASSILABIED (MARRUECOS)

Manuel García Rodríguez¹

manuel.garciaro@uah.es

M^a Eugenia Moya-Palomares²

eugenia.moya@uah.es

Miguel Ángel de Pablo³

miguelangel.depablo@uah.es

Rosa Vicente⁴

rosa.vicente@uah.es

Eduardo Acaso⁵

eduardo.acaso@uah.es

Recibido: 27 de junio de 2008

Aceptado: 28 de julio de 2008

RESUMEN

Erg Chebbi es un sistema dunar de unos 156 km² de superficie que se localiza en el límite suroriental de Marruecos. El sistema, desde un punto de vista hidrológico, constituye un gran acuífero libre cuya recarga se produce por la infiltración del agua de lluvia y las salidas a través de manantiales y por extracciones desde pozos y khetaras. En los últimos años erg Chebbi ha experimentado un considerable incremento turístico, atraídos por la singularidad del paisaje dunar. En este sentido, la creación de numerosos complejos hoteleros ha originado un incremento de la demanda de los recursos hídricos subterráneos. La extracción de una mayor cantidad de agua subterránea está produciendo un fuerte descenso del nivel freático en las zonas más pobladas. La comprensión del funcionamiento hidrogeológico y cuantificación de las reservas subterráneas es necesaria para el mantenimiento del sistema dunar. Siguiendo estas premisas presentamos en este trabajo el estudio hidrogeológico del área de erg Chebbi entre las localidades de Hassilabied y Merzouga como avance del estudio integrado del sistema dunar.

Palabras clave: Erg Chebbi, Sahara, Sistema dunar, funcionamiento hidrogeológico, Merzouga –Hassilabied, Marruecos.

HYDROGEOLOGY OF THE WESTERN EDGE OF THE ERG CHEBBY DUNE SYSTEM BETWEEN HASSILABIED AND MERZOUGA (MOROCCO)

¹ Profesor Ayudante Doctor. Departamento de Geología Facultad de Ciencias. Universidad de Alcalá de Henares.

² Profesor Contratado Doctor. Departamento de Geología Facultad de Ciencias. Universidad de Alcalá de Henares.

³ Profesor Ayudante. Departamento de Geología. Facultad de Ciencias. Universidad de Alcalá de Henares.

⁴ Profesor Titular de Universidad. Departamento de Geología. Facultad de Ciencias. Universidad de Alcalá de Henares.

⁵ Profesor Titular de Universidad. Departamento de Geología. Facultad de Ciencias. Universidad de Alcalá de Henares.

ABSTRACT

Erg Chebbi is a dune system (about 156 km²) located on the central-southern region of Morocco, near the border with Algeria. From a hydrological point of view, the dune system is an extensive free aquifer whose recharge is due to the infiltration of rainwater, and the exits are related to springs, wells and khetaras. In the last years, the erg Chebbi has experienced an important increase of tourism, attracted by the uniqueness of the landscape of dunes. In this sense, the creation of many resorts has led to an increased demand for groundwater resources. The removal of a greater quantity of groundwater is producing an important descent of the groundwater table in the most populated areas. It is necessary to understand the hydrogeological system and to quantify the groundwater reserves for the maintenance of the dune system. Following these ideas, here we present the hydrogeological study of an area of the erg Chebbi between the localities of Hassilabied and Merzouga. This work is a necessary premise for a future integrated study of the dune system.

Keywords: Erg Chebbi, Sahara, dune system, hydrogeology, Merzouga –Hassilabied, Morocco.

HYDROGÉOLOGIQUE FONCTIONS SUR LA RIVE OCCIDENTALE DU SYSTÈME DUNAIRE "ERG CHEBBI" ENTRE HASSILABIED ET MERZOUGA (MAROC)

RÉSUMÉ

Erg Chebbi est un système de dunes de certains 156 km² de surface qui est situé sur le bord sud-est du Maroc. Le système, d'un point de vue hydrologique, est un aquifère dont la recharge est causé par l'infiltration de l'eau de pluie et les sorties par des retraits à des sources et des puits et des khetaras. Au cours des dernières années erg Chebbi a connu une augmentation considérable du tourisme, attirés par le caractère unique du paysage de dunes. En ce sens, la création de nombreuses complexes hôteliers a conduit à une augmentation de la demande de les ressources en eaux souterraines. La suppression d'une plus grande quantité d'eau souterraine produit une forte baisse de la nappe phréatique dans les zones les plus peuplées. La compréhension du fonctionnement hydrogéologique et la quantification des réserves d'eaux souterraines est nécessaire pour l'entretien du système dunaire. Suite à ces prémisses nous présentons dans ce document, le étude hydrogéologique de erg Chebbi entre les localités Hassilabied et Merzouga, avance de l'étude intégrée du système dunaire.

Mots clé: Erg Chebbi, Sahara, Système de dunes, Fonctionnement hydrogéologique, Merzouga –Hassilabied, Maroc.

1. INTRODUCCION

En el actual contexto de presión humana sobre áreas de especial valor natural, los estudios referidos al estudio del medio natural y la utilización de éste juegan un papel a la hora de proponer medidas que contribuyan a su conservación. Con este sentido, presentamos los primeros resultados del análisis y valoración de los recursos de agua subterránea en un área de especial fragilidad ambiental y enorme valor paisajístico como es erg Chebbi (Norte del Sahara). Dichos recursos se constituyen en la base del mantenimiento del sistema dunar y que son la fuente de ingresos económicos, a través de la afluencia turística, para las poblaciones allí asentadas.

El esquema de trabajo seguido en este artículo ha sido el siguiente:

- Demarcación del encuadre regional de la zona de estudio, atendiendo a las características fisiográficas y geológicas del erg Chebbi y de la zona de reg o hamada, referido a una superficie de unos 750 km².
- Descripción y propuesta de un modelo conceptual de flujo regional de agua subterránea en el erg Chebbi y zona de hamada adyacente, referido a la misma superficie anterior.
- Delimitación de la zona detallada del estudio hidrogeológico (15 km²).
- Trabajo de campo. Inventario de puntos de agua y adquisición de datos geológicos.
- Interpretación de datos y planteamiento de un modelo conceptual de funcionamiento hidrogeológico.
- Resumen y discusión de los resultados.

2. LOCALIZACION

Regionalmente, el área de trabajo se localiza en el Sureste de Marruecos, al Sur de la provincia de Errachidia (figura 1A). Esta provincia tiene una superficie de unos 60.000 km², siendo una de las más extensas de Marruecos, con una densidad de población media de 8,76 habitantes/km² (Ministeré de L'Economie de Finances de la Privatization e du Turismo, 2006). Limita al Este con la provincia de Fuguig, al Oeste con Bni Mellal, y Azilal, Zagora y Ouarzazat, y al Norte con Khenira, Boulmane y con las fronteras argelinas también al Norte y Sur.

La gran extensión de la provincia mencionada, junto con los fuertes contrastes del paisaje, hacen que en ella destaquen numerosas áreas de especial protección natural (UNEP, 2004). Entre estas áreas se encuentran las dunas de Merzouga (conocidas como erg Chebbi) y el lago del mismo nombre donde se centra el presente trabajo. El estudio hidrogeológico detallado que se trata en el apartado 6, comprende una superficie relativamente pequeña de unos 15 km², en el borde occidental del erg Chebbi, entre las localidades de Hassilabied y Merzouga (figura 1B).

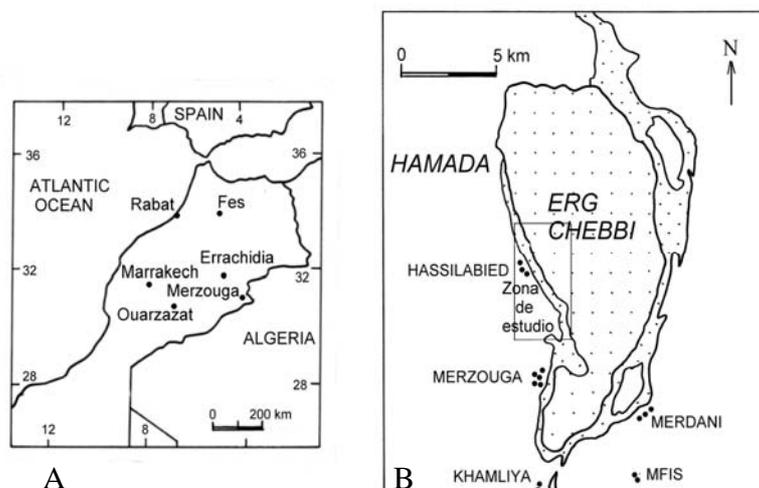


Figura 1. Localización geográfica de la zona de estudio. A.- Mapa de Marruecos. B.- Encuadre regional y delimitación de la zona detallada de estudio (en el recuadro interior).

3. CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS Y GEOMORFOLÓGICAS GENERALES

El encuadre regional que se describe está referido a una superficie de unos 750 km² (figura 1B), en la que se han diferenciado dos zonas muy características y perfectamente delimitadas: el desierto pedregoso, denominado "reg" o "hamada", donde se localiza el lago de Merzouga o "Dayat Tamazguidat" y el complejo dunar, que constituye el erg Chebbi.

3.1. El desierto pedregoso o hamada

El desierto pedregoso constituye la primera gran unidad fisiográfica, también denominada hamada o reg. Esta unidad está constituida por un pedregal suelto donde se localizan las poblaciones de Merzouga o Hassilabied así como el mencionado lago de Merzouga. La hamada se constituye como un relieve llano en líneas generales que no presenta desniveles apreciables salvo en aquellas zonas, muy puntuales, en las que el basamento aflora dando lugar a pequeños resaltes y/o cuando es cortado por los arroyos de carácter efímero, denominados ouadis o wadis. El límite exterior de la hamada que delimita al desierto de piedra está constituido por un conjunto de cuevas, en ocasiones muy escarpadas, e intensamente abarrancadas sobre las que se desarrollan glacis, conos de deyección o abanicos aluviales y cuyas morfologías son el resultado de la acción de una erosión eólica prolongada en el tiempo y de las ocasionales arroyadas.

Según la cartografía geológica disponible del Servicio Geológico de Marruecos (S.G.M., 1986), el substrato geológico lo forman principalmente materiales del Carbonífero, y en menor medida del Devónico (figura 2). La mayor parte del área estudiada está constituida por la Formación Merdani (Turonense, Visense), que está representada por esquistos argilíticos con intercalaciones de areniscas. Al noroeste de la Fm. Merdani aparece la Fm. Mougui Ayoun (Visense superior), constituida por areniscas, con intercalaciones pelíticas y argilíticas algo calcáreas, con niveles nodulares y pudingas en la base. El límite suroriental del sistema dunar está representado por materiales carbonatados del Devónico superior.

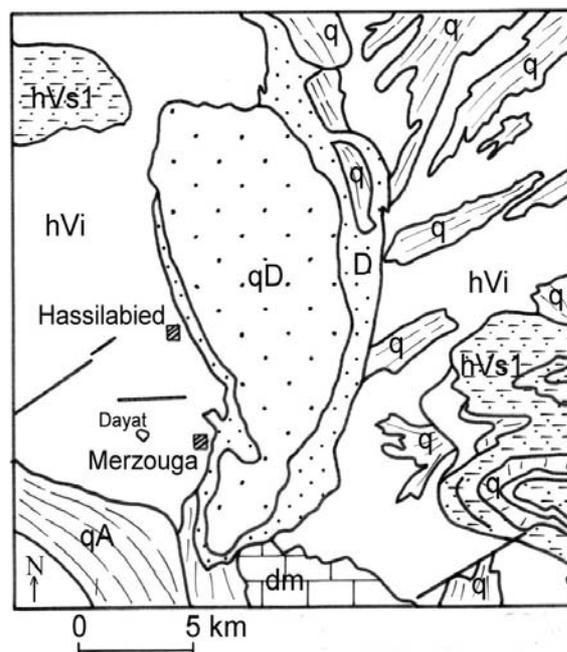


Figura 2. Esquema geológico regional de la zona de estudio basado en S.G.M, (1986).

La leyenda de la figura mantiene la terminología original (S.G.M,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 glaciares, niveles de aterramiento, y distintos depósitos de acarreo fluvial.

Cubriendo estos materiales se pueden distinguir en la zona de estudio morfologías fluviales típicas de climas áridos asociadas a sus correspondientes depósitos. Como mencionamos anteriormente los arroyos de funcionamiento puntual y esporádico han dado lugar a terrazas más o menos desarrolladas como la cartografiada en el margen Oeste de erg Chebbi.

3.2. El complejo dunar Erg Chebbi

Erg Chebbi constituye un sistema dunar de morfología romboidal asentada sobre un desierto de piedra. Este sistema se encuentra ligeramente basculado hacia el Suroeste siguiendo la inclinación del basamento. Esta acumulación arenosa de unos 156 km², se caracteriza morfológicamente por presentar dunas multidireccionales formadas por vientos de dirección Sureste – Este (Benallas *et al.*, 2003).

Constituye un sistema caracterizado por una franja arenosa de unos 20 km de longitud en la dirección Norte - Sur y unos 10 km en dirección Este - Oeste, en su parte más ancha. Todo el sistema descansa sobre una superficie de topografía plana, que presenta cierta pendiente hacia el Sur - Suroeste. Se desconoce la morfología de la plataforma bajo las dunas.

Las cotas topográficas del sistema dunar varían mucho de unos puntos a otros, oscilando entre unos 700 metros en las zonas de borde, hasta los 900 metros en las dunas más altas. Sin tener en cuenta las megadunas indicadas, la altitud media en el interior de sistema se sitúa en torno a los 750 metros, información deducida del mapa topográfico a escala 1/50.000 (Ministeré de L'Agriculture et de la Mise en Valeur Agricole, 1992).

En el límite norte entre las dunas y la hamada, la cota topográfica se sitúa entre 730 y 740 metros, mientras que en el borde sur, ese mismo límite está entre 690 y 700 metros de altitud. Así, de una manera general, la pendiente entre el extremo Norte y Sur del erg es del orden del cinco por mil.

4. CARACTERÍSTICAS CLIMÁTICAS

La provincia de Errachidia presenta un clima desértico con matices continentales y temperaturas medias anuales en torno a los 20^o C, si bien los contrastes de temperatura día-noche son elevados. Con relación a las precipitaciones anuales, éstas están comprendidas entre 129 mm y 28 mm según la latitud y año hidrológico considerado. Las variaciones apuntadas se comprenden si se tiene en cuenta la proximidad de la cordillera del Atlas que actúa como límite geográfico al noroeste de la provincia.

En el área de Chebbi, se alcanzan temperaturas máximas que rondan los 50 grados en los meses de julio y agosto con mínimas entorno a los 5 grados en el mes de diciembre. Las escasas precipitaciones que se producen se dan de manera esporádica fundamentalmente entre los meses de marzo a mayo. De ahí que se entienda que la precipitación media anual de erg Chebbi no supere los 68 mm, si bien hay que destacar

las alteraciones pluviométricas puntuales, tormentas ciclónicas, que provocan avenidas relámpago como las sufridas 2006, 2007 y recientemente en febrero de 2008

5. MODELO CONCEPTUAL DE FLUJO GENERAL (ERG Y REG CHEBBI)

5.1. Modelo conceptual de flujo en el sistema dunar erg Chebbi

El complejo dunar de erg Chebbi, constituye un acuífero libre, en arenas eólicas, que según se indicaba anteriormente, viene a ocupar una superficie de 156 km².

El modelo conceptual de flujo responde al esquema clásico en este tipo de acuíferos (Jacobson and Jankowski, 1989). Las entradas al sistema se producen por infiltración directa del agua de lluvia, y salidas por: manantiales, extracciones desde pozos y khetaras, por evaporación directa, y por infiltración a favor de fracturas en el basamento rocoso que actúa como límite del acuífero. El balance hídrico con la cuantificación de los términos que intervienen, será objeto de futuros trabajos.

El flujo subterráneo en las arenas, es radial desde las zonas interiores del conjunto dunar, hacia las zonas de borde (García Rodríguez *et al.*, 2008). El nivel freático en la zona interior, según nos indica la presencia de los oasis Hassi Bou Yeghd al Este, y Hassi Al Biod al oeste, se sitúa entre los 740 y 760 m (Ministeré de L'Agriculture et de la Mise en Valeur Agricole, 1992). En las campañas de campo realizadas durante febrero de 2006, noviembre de 2007 y enero de 2008, se han localizado pozos con el nivel freático próximo a la superficie del terreno, distribuidos a lo largo de todo el perímetro del sistema de dunas (Vicente *et al.*, 2008; Moya-Palomares *et al.*, 2008).

El gradiente hidráulico general en los bordes Oeste y Este es muy diferente. En la zona Oeste, la más poblada, entre Hassilabied y Hassi Al Biod, viene a ser del uno por ciento, valor muy alto para las aguas subterráneas, pero coherente con el importante drenaje que se realiza desde las khetaras de Hassilabied. En el borde Este, el gradiente entre Hassi Bou Yeghd y el límite erg - reg, viene a ser del cinco por mil, valor típico en aguas subterráneas sin fuertes drenajes artificiales.

5.2. Modelo conceptual de flujo en la zona de hamada

Desde el punto de vista estrictamente hidrogeológico, esta zona de hamada no tiene mucho interés debido a la baja permeabilidad de los materiales que lo constituyen. Según se comentó al tratar la geología, consiste en gran zócalo rocoso formado por materiales metamórficos, como pizarras, cuarcitas y esquistos (S.G.M., 1986), todos ellos materiales impermeables. No se conocen datos de sondeos profundos en la zona que nos suministre información hidrogeológica. Las entradas al sistema se realizan por infiltración del agua de lluvia en zonas de fracturas abiertas, siendo muy probable, que la principal zona de recarga de las fracturas, se realice desde el muro del acuífero que constituyen las arenas de erg Chebbi. Las salidas del sistema se producen por evaporación directa y descarga subterránea en zonas deprimidas. El lago de Merzouga parece corresponder a una de esas zonas (ver localización en la figura 2).

6. HIDROGEOLOGÍA DETALLADA DE LA ZONA DE BORDE ENTRE HASSILABIED Y MERZOUGA

6.1. Delimitación de la zona de estudio

La superficie estudiada ocupa 12 km² y se sitúa entre las coordenadas de latitud 34485 N - 34432 S y longitud 4010 O - 4040 E. Incluye la localidad de Hassilabied. Merzouga (núcleo urbano) queda fuera de la zona de trabajo, aunque parte de los puntos de agua estudiados pertenecen a dicho municipio. Ha de indicarse que el reconocimiento de campo efectuado ha cubierto una zona más amplia de la aquí presentada y que ha facilitado el encuadre regional. En este sentido, es necesario indicar que las características hidrogeológicas que se presentan a continuación se refieren exclusivamente a la zona del entorno de Hassilabied, para una franja de unos cinco kilómetros de longitud, que incluye la zona de borde entre el sistema dunar y la hamada (figura 3).

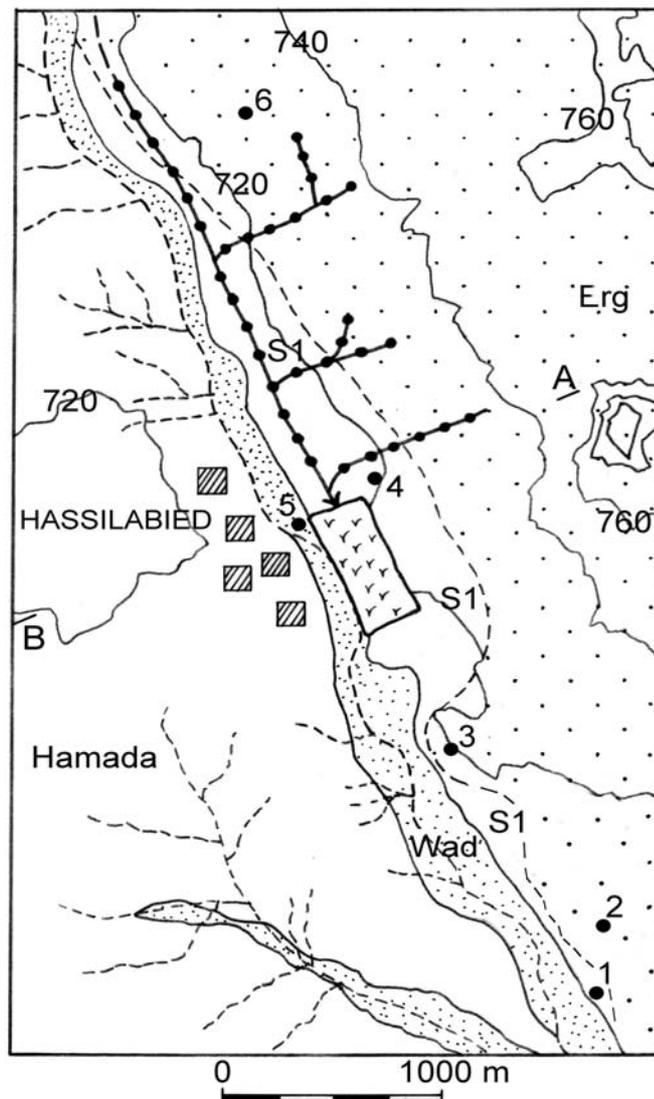


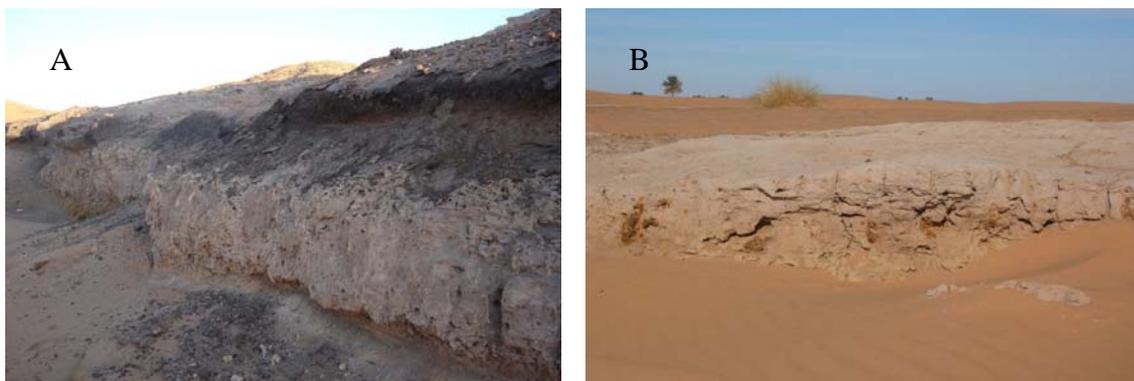
Figura 3. Esquema de localización de la zona de estudio con indicación de los elementos siguientes: zonas de erg, uadis y hamada, curvas de nivel con equidistancia de 20 metros, localización de los pozos del inventario de puntos de agua, red de drenaje superficial, ubicación de khetaras, oasis y posición de superficie Si. Se incluye la traza (A-B) del perfil hidrogeológico de la figura 11 (según García Rodríguez *et al.*, 2008).

Las razones particulares por las que se ha seleccionado esta zona de estudio, han sido principalmente y por este orden, la proximidad a dos poblaciones importantes (Merzouga y Hassilabied), la abundancia de puntos de agua, la presencia de un oasis muy bien conservado, y la existencia de un sistema de khetaras en buen estado de mantenimiento, que permiten una buena caracterización hidrogeológica de la zona. Además, el interés que puede llevar asociado el creciente desarrollo turístico y la proliferación de nuevas estructuras hoteleras (Moya-Palomares *et al.* 2008; Vicente *et al.*, 2008 opus citadas).

Para entender la caracterización hidrogeológica en la zona tratada ha de indicarse que de Este a Oeste la cota más alta de la zona se sitúa en la cresta de la duna al Este de Hassilabied (unos 812 metros de altura), mientras que el límite de las arena del reg se localiza a una cota en torno a los 720 metros de altitud. Son la arenas de ouadis las que presentan una menor altura topográfica, con cotas comprendidas ente 705 y 710 m.

Hacia el Oeste del ouadis entramos casi sin diferencia altimétrica en la hamada o reg de Chebbi. Esta superficie aplanada presenta cotas comprendidas entre 710 y 720 metros. La zona de mayor altitud se localiza al Oeste de Hassilabied, donde se llegan ha superar los 720 metros, indicando la proximidad del substrato rocoso.

El tránsito entre las arenas del erg y el reg se produce a través de la zona intermedia representada por el ouadis anteriormente mencionado. Si bien, es posible diferenciar entre los depósitos del ouadis actual y las primeras dunas del reg, una superficie plana, endurecida y de color blanquecino que presenta continuidad lateral en la zona de estudio, a la hemos denominado superficie inferior (S_i). Esta superficie en algunos puntos de la zona de estudio aparece cubierta por dunas, pero lo habitual es que no lo esté. Si se continua dirección Este, hacia el interior del conjunto dunar, a unos cinco metros por encima de la S_i , se localiza los restos de otra superficie, formada por arenas ligeramente endurecidas a la que hemos denominado superficie superior (S_s). Esta antigua superficie no aparece con la continuidad lateral que presenta S_i , si no que aparece de manera residual por el área de trabajo. Dichas superficies podrían ser identificadas como diferentes niveles de referencia de estadios anteriores del nivel freático del acuífero libre "*Stokes surface*" (Fryberger *et al.*, 1988, Lope, 1984) o bien corresponder a diferentes niveles de aterramiento del ouadis próximo. Los datos de los que disponemos en la actualidad no permiten que tomemos postura por una de las dos interpretaciones.



Figuras 4. A Perfil litológico descrito en una zanja abierta para la construcción de una khetara. Se corresponde con la S_i . En la parte superior se han identificado entre 30 y 40 centímetros de materia orgánica, con restos orgánicos vegetales (raíces) perfectamente visibles, seguido en profundidad por unos 60 centímetros de arenas blanquecinas ligeramente compactadas de la S_i . Por debajo de las arenas blanquecinas hay varios decímetros de arcillas limosas, hasta una profundidad indeterminada. La presencia de materia orgánica en superficie indica condiciones anteriores de humedad. B. Resto de un nivel endurecido (S_s) situado topográficamente a una cota por encima de la S_i .

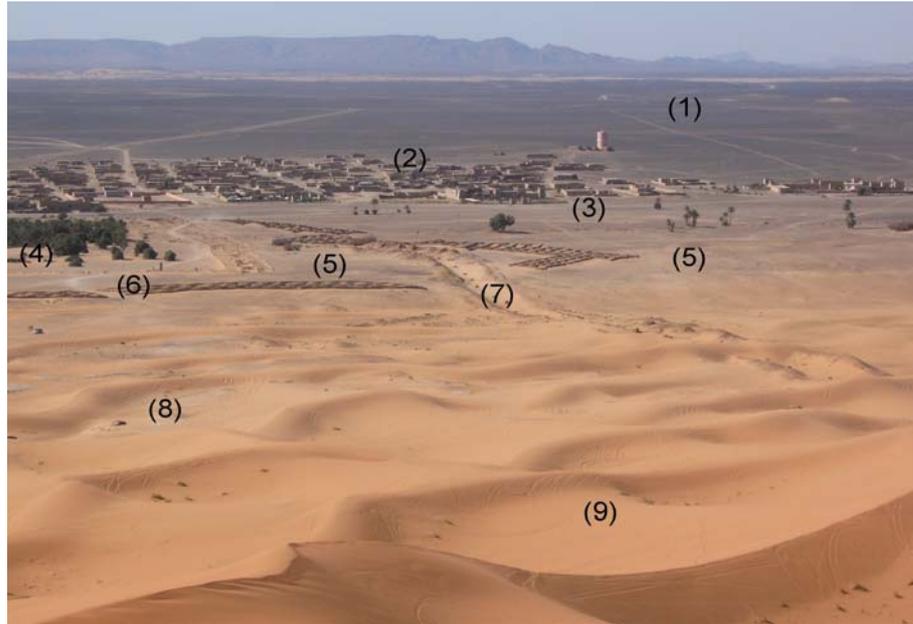


Figura 5. Panorámica general de la zona tomada desde la duna más elevada (a cota 812 metros), en la dirección de la traza A-B (Noreste Suroeste) de la figura 3. Desde el fondo hacia el punto de foto, se distinguen los siguientes elementos: (1) hamada o desierto pedregoso, (2) Hassilabied, (3) ouadis al Bayda, (4) oasis (zona vegetada a la izquierda de la foto), (5) superficie S_i (libre de dunas), (6) barreras contra el avance de las dunas, (7) khattara, (8) restos de la superficie S_s (entre las dunas en las zonas más elevadas, con tonos blancos), y (9) zona de dunas del erg.

6.2. Caracterización de puntos de agua

Con objeto de conocer las características hidrogeológicas de la zona de estudio, se ha realizado un reconocimiento de campo identificando las particularidades geológicas, y la tipología y características de los puntos de agua.

El objetivo concreto perseguido en el trabajo de campo en relación con este apartado, ha sido recopilar toda información suficiente que nos permitiera elaborar un modelo conceptual de flujo de esta zona particular de la región, y poder definir otros objetivos concretos para mejorar el conocimiento hidrogeológico en trabajos futuros. En este sentido, las observaciones realizadas en campo han sido muy satisfactorias. La información sobre las características de los puntos de agua que se expone seguidamente, complementa los datos que se presentaban en García Rodríguez *et al.*, (2008).

En la zona de estudio, los puntos de agua que se han identificado en la realización del inventario pueden incluirse en alguna de las tres categorías siguientes; pozos excavados, khattaras y el lago de Merzouga, que aunque un poco alejado de la zona detallada de estudio, puede suministrar información sobre el funcionamiento hidrogeológico en la hamada.

6.2.1. Pozos

Se trata de pozos excavados manualmente, con características constructivas y de diseño, que en términos generales pueden incluirse entre las siguientes:

- Profundidades que oscilan entre 1 y unos 10 metros.
- Diámetros de excavación entre 0,5 y unos 2 metros.

- Los revestimientos interiores suelen ser de mampostería de piedra cementada o no, o de tubería de hormigón perforada. También se ha encontrado algún pozo sin revestimiento, cuando tenía poca profundidad y el material era más competente.

- El método de extracción de agua suele ser (1) manual, con recipientes atados con cuerda, para usos en zonas muy próximas y en usos que requieran poco caudal y (2) mediante bombas eléctricas en el caso de abastecimientos que requieren mayores caudales y en los que el pozo se encuentra a una distancia grande respecto al punto de abastecimiento (del orden del centenar de metros).

En el área indicada se han localizado 12 pozos con las características señaladas anteriormente. Algunos parecen estar abandonados o en desuso, bien por haberse secado o por encontrarse en unas condiciones muy degradadas. La interpretación del flujo subterráneo se ha realizado, además de con las observaciones generales de la zona, a partir de medidas precisas realizadas en 6 de los 12 pozos identificados. La localización de los pozos medidos puede verse en la figura 3, que contiene información topográfica. De Sur a Norte, los pozos observados los hemos denominado con la numeración del 1 al 6 respectivamente. La superficie del terreno donde se ubican los pozos numerados del 1 al 4, se sitúa a cota entre unos 718 y 720 metros, el pozo 5 a unos 712 metros, y el pozo 6 a 725 metros aproximadamente (información deducida del mapa topográfico). Las medidas del nivel freático se realizaron durante los días 24 y 25 de enero de 2008.

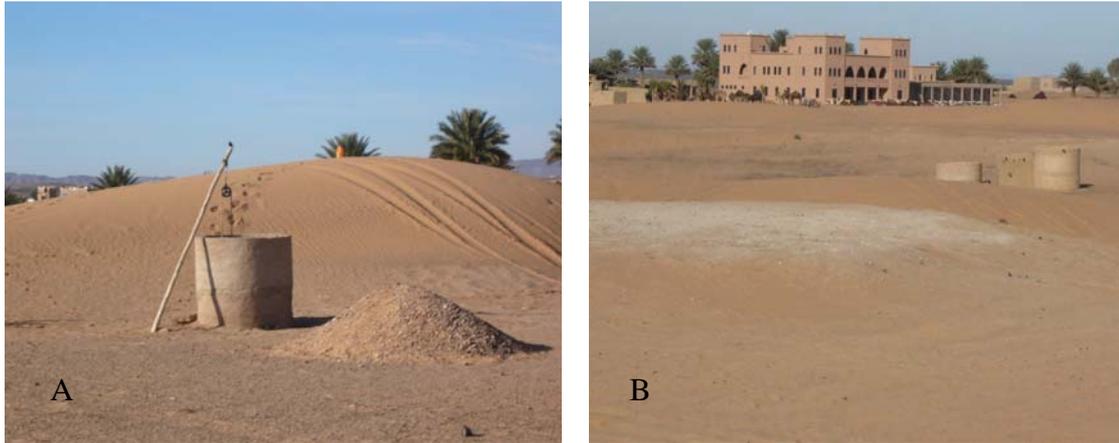
A continuación se comenta alguna particularidad de cada pozo, que ha facilitado la interpretación del flujo subterráneo en la zona:

Pozo 1

Se localiza en la zona limítrofe entre la superficie S_i y el ouadis, muy próximo al Albergue "Chez Tihri". El pozo tiene una profundidad de unos siete metros y se encuentra prácticamente seco (nivel del agua a 6,79 m bajo la superficie). En los dos metros superiores, el pozo está recubierto de mampostería de piedra. A partir de los dos metros de profundidad el pozo no tiene revestimiento y se observan materiales arcillosos, con arenas y algún canto. Presenta derrumbes. Según el propietario, permanece prácticamente seco desde los últimos cinco años, en los que estacionalmente se recupera, apenas unos decímetros.

Pozo 2

Se localiza a unos 150 metros en dirección Norte del pozo 1, situado sobre la superficie S_i y está rodeado de dunas. El pozo se encuentra entubado con anillos de hormigón y el agua se encuentra próxima a la superficie del terreno (a 1,73 m desde la superficie del terreno). El agua que se extrae se emplea para el riego de palmeras en el intento de detener el avance de las dunas hacia la zona poblada. La extracción del agua se hace de forma manual. Según información verbal de los habitantes de la zona, la recuperación de algunos de estos pozos responde con mucha rapidez a las precipitaciones, dando idea de la alta permeabilidad del substrato, cuando atraviesa niveles de arenas y gravas. Junto al pozo se observa un montón de arenas y gravas procedentes de labores recientes de reprofundización (figura 6A). La presencia de esta litología indica la existencia de depósitos fluviales de canal en profundidad. Se desconoce la distribución espacial que pueden ocupar estos depósitos por debajo del sistema dunar, tanto en profundidad como en extensión superficial. Cerca de este pozo encontramos otros tres de características constructivas y de comportamiento hidrogeológico similar (figura 6B).



Figuras 6. A. Detalle del pozo 2 junto a una duna. **B.** Otros pozos del entorno. Obsérvese su localización en relación con las dos superficies endurecidas reconocidas en campo; la superficie S_i sobre donde se ubican los pozos, y la superficie S_s , de color blanquecino situada a una cota ligeramente superior.

Pozo 3

Se localiza al Norte de los anteriores, también sobre la superficie S_i , en una zona con abundante arena. Litológicamente se localiza sobre arenas y limos arcillosos. Está revestido de mampostería de piedra y tiene el nivel freático a 0,65 metros de profundidad desde la superficie topográfica. Al igual que el pozo 2, el agua se emplea para el riego de palmeras con objeto de detener el avance de las dunas.



Figura 7. Pozo nº 3 del inventario.

Pozo 4

Se localiza en el entorno del oasis de Hassilabied, sobre la superficie S_i , en una zona sin dunas. El interior del pozo está revestido de mampostería de piedra, y litológicamente atraviesa arenas limos y arcillas, según se ha desprendido de las observaciones realizadas en zanjas próximas abiertas para la construcción de khattaras. El nivel del agua se sitúa a 7,37 metros de profundidad. Actualmente parece estar en desuso. En el entorno próximo encontramos varios pozos de características similares. Parece lógico encontrar el nivel freático tan profundo, si tenemos en cuenta la proximidad de un brazo de la khattara que está drenando el acuífero, cuyo extremo se

sitúa a unos 500 metros del pozo hacia el Este, en el interior del acuífero que forma las dunas.

Pozo 5

Se localiza en el ouadis al Bady, en el borde Oeste del oasis de Hassilabied. Geológicamente se sitúa sobre arcillas, limos y arenas eólicas en superficie. El nivel freático se encuentra a 2,98 metros desde la superficie topográfica. Se utiliza para el riego de la vegetación del oasis. La medida de este nivel freático debe considerarse con precaución, ya que por su proximidad y posición topográfica con el oasis, puede estar reflejando un nivel más alto del que le correspondería, por retornos de riego desde el propio oasis.

Pozo 6

Se localiza en el interior de las dunas (zona del erg) en el extremo norte de la zona de estudio. La captación consiste en un bidón de plástico abierto en base. Se trata de una zona donde el nivel freático está muy próximo a la superficie topográfica, a 30 centímetros de profundidad tal y como se ha medido en ese pozo. La superficie topográfica del entorno próximo al pozo presenta bastante humedad, debido a la evaporación directa que se produce desde el nivel freático.

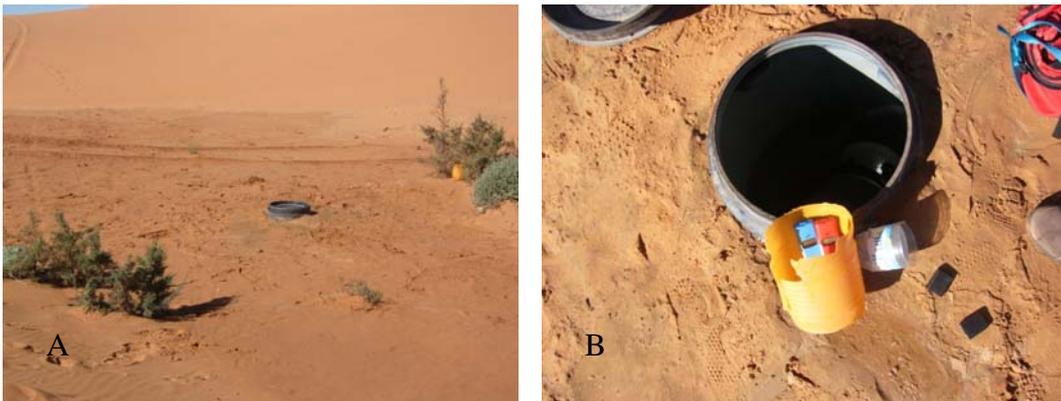


Figura 8. A. Localización del pozo 6 en el espacio intradunar en las arenas del erg. Nótese toda la zona húmeda del entorno del pozo, indicando la proximidad del nivel freático. **B.** Detalle del pozo.

La cota del nivel freático en este punto coincide con la del extremo de la khattara de más reciente construcción en las proximidades (brazo de zona Noreste, ver en figura 3).

6.2.2. Khettaras

La khattara es un sistema tradicional y ancestral para la captación y conducción de las aguas subterráneas. Dada su importancia y originalidad se explican algunas particularidades de este tipo de sistema. Consiste 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.

Esta técnica es originaria de Irán, y recibe diferentes nombres en distintos países. Así, en Irán se conoce como "quatat", en Afganistán se llaman "kiraz", en Argelia "foggara" y en Marruecos "khettaras" (A.M.P.L.E.D., 2008).

Las longitudes de una khattara puede variar desde centenas de metros a varios kilómetros, según sea el gradiente hidráulico, la posición del nivel freático y la cota

alumbramiento. En general, la distancia entre los conductos (o “pozos”) verticales, varía de unos 10 y 25 metros. Su distancia depende de la estabilidad del terreno, que debería permitir su construcción por métodos manuales, aunque actualmente se emplea maquinaria para su construcción. Finalizada la obra, esos conductos permanecen abiertos y pueden ser utilizados como puntos de captación de agua. En términos generales, los caudales que se obtienen dependen mucho de la permeabilidad del terreno, oscilando entre 2 y 20 l/s.

Para dar una idea de la importancia que tiene este sistema de suministro de agua en áreas desérticas y en particular en la región, actualmente se han contabilizado más de 300 khattaras en funcionamiento, con una longitud de 1200 km, que riegan 155 zonas y una superficie total de 12.750 ha (A.M.P.L.E.D., 2008). En contraste con estas cifras, desde 1967 hasta la actualidad han sido abandonadas 262 khattaras, con una longitud total de unos 1700 km, como consecuencia de un importante descenso del nivel freático en diferentes zonas.

En el área de estudio existen dos importantes redes de khattaras, para abastecimiento a las poblaciones de Hassilabied y Merzouga. Este trabajo se centra en el entorno de las khattaras de Hassilabied.

Khattaras de Hassilabied

Abastece el oasis de la localidad del mismo nombre. Consiste en un ramal principal de dirección Sur – Norte (hacia aguas arriba), que se extiende paralelo al contacto entre el sistema dunar y la hamada. La longitud aproximada de este ramal viene a ser de algo más de 2 km. Desde el ramal principal y perpendicularmente a él, parten otros tres brazos hacia el interior de las dunas, penetrando cada uno de ellos más de 500 m (figura 9). A su vez, dos de ellos se ramifican de nuevo. El caudal aforado en enero de 2008 a la salida de la galería principal y a la entrada del oasis era de 6,8 l/s.

Según las características geológicas observadas, el ramal principal discurre principalmente por materiales arcillosos y limosos, y cumple una función de canalización de agua más que de drenaje del acuífero. La extracción de agua subterránea se realiza desde los tres ramales que se adentran en las dunas.



Figura 9. Brazo Noreste de la khattara en Hassilabied

6.2.3. El lago de Merzouga

El lago de Merzouga se sitúa 3 kilómetros al Oeste de la localidad de Merzouga en plena zona de hamada (figura 10). Geológicamente se ubica sobre esquistos y areniscas de la Fm. Merdani. Representa uno de los principales atractivos turísticos de la zona por su alto valor ecológico en relación con el hábitat de aves acuáticas (Ministry of Territorial Planning, Water and Environment, 2001). Según información verbal de los habitantes, en condiciones normales suele tener agua de noviembre a mayo, pudiendo persistir excepcionalmente en el mes agosto.

Topográficamente se localiza en una zona deprimida a cota de unos 710 metros, con características endorreicas. Según se desprende de la red de drenaje del entorno, las entradas de agua proceden en su mayoría del drenaje superficial y subsuperficial de la zona perimetral. No se descarta la entrada de agua subterránea a través de las fracturas del substrato rocoso sobre el que se sitúa.

Por el alto contenido en arcillas y finos que se han ido acumulando en el fondo del lago durante años, actualmente es muy frecuente ver a trabajadores dedicados a la extracción de arcilla, en épocas de aguas bajas, que utilizan como material de construcción (preparación de adobe). La continua extracción de este material, está creando zanjas y hondonadas que modifican la morfología de la base del lago.



Figura 10. Lago de Merzouga y vista del erg Chebby al fondo.

6.3. Esquema de flujo en la zona de borde

A partir del modelo conceptual de flujo del erg, y sobre todo de los datos recopilados durante el inventario de puntos de agua, se ha elaborado un perfil hidrogeológico en el que se sintetiza el esquema de flujo en la zona (figura 11). Representa una sección en la zona de borde del acuífero de las arenas del erg, donde el flujo es perpendicular al límite entre el erg y el ouadis. La localización de la traza del perfil puede verse en la figura 3.

La posición del nivel freático en la situación actual, se ha determinado a partir de la información de los pozos n^o 4 y n^o 5, y del ramal sur de la khattara.

La información geológica que se presenta en el perfil, se ha dibujado a partir de las observaciones realizadas en las zanjas abiertas para la construcción de las khattaras, canteras de extracción de arcilla en las proximidades del oasis, y de los propios pozos. La información geológica mas profunda es interpretada.

Litológicamente se han diferenciado los siguientes materiales:

- Arenas eólicas del erg. Constituyen el acuífero principal. Se caracterizan por presentar una alta porosidad y permeabilidad. Según Davis (1969), las arenas eólicas tienen valores de permeabilidad (K1) comprendidos entre 10 y 80 m/día, y una porosidad total media del 35%, para un rango normal de entre un 40% y 30%. Las medidas de porosidad total realizadas en campo han dado valores del orden de un 28%, coherente con los datos de Davis (1969).

- Materiales arcillosos, limosos y niveles de arenas y gravas, de origen fluvial en la zona de ouadis. Posiblemente corresponden a depósitos de un antiguo ouadis, que tendría mayor anchura que el que encontramos actualmente en la zona de borde y cuya superficie topográfica tendría una cota superior a la actual. Estos materiales presentan una permeabilidad variable (K2) por cambios litológicos internos, pero que en su conjunto es bastante inferior a la de las arenas del erg. En particular, el oasis se sitúa sobre arcillas, con una potencia mínima observada de 1,5 metros. Para estos materiales, arcillas, limos, y limos arenosos, Davis (1969) presenta valores de permeabilidad de entre 3×10^{-2} y 6×10^{-3} m/día, y porosidad total variable de un 39% y 50%.

- Limos, arcillas y arenas eólicas, cubiertos por cantos de pavimento desértico de color oscuro en la hamada.

- Substrato rocoso formado por esquistos y areniscas de la Fm. Merdani.

La posición de los límites entre los diferentes contactos geológicos representados en el perfil debe considerarse como orientativa, a falta de datos de sondeos y/o de geofísica que los delimiten con mayor precisión.

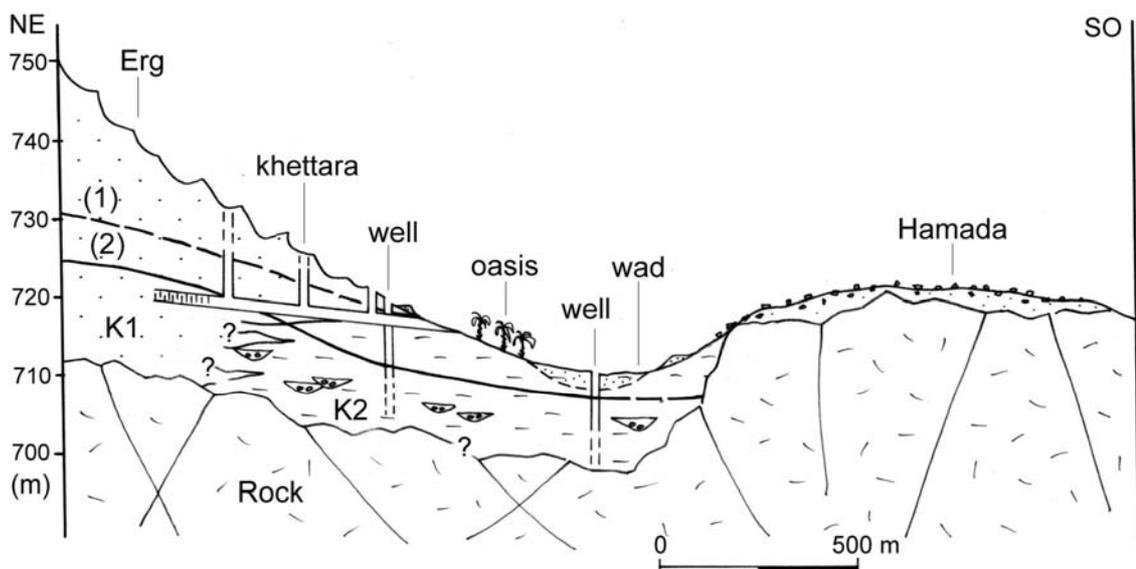


Figura 11. Perfil hidrogeológico esquemático según la traza A-B de la figura 3. (1) Posición del nivel freático en régimen natural, sin intervención antrópica, y (2) Posición actual del nivel freático, dibujado a partir de las medidas reales realizadas en los pozos nº 4 y nº 5 del inventario (según García Rodríguez *et al.*, 2008).

La posición del nivel freático en régimen natural se ha dibujado a partir de información facilitada por habitantes de la zona, así como de observaciones geológicas que nos indican que el nivel freático estuvo próximo a la superficie topográfica en otra época. El nivel freático actual se ha dibujado a partir de las medidas realizadas en los pozos durante el mes de enero de 2008.

7. RESUMEN Y DISCURSIÓN

A la luz de los datos obtenidos en campo se ha podido realizar el primer esquema de flujo subterráneo en el borde Oeste de erg Chebbi en el entorno de Hassilabied.

Por otro lado, la presencia de superficies endurecidas en la zona de borde del erg Chebbi, a distintas cotas topográficas, puede ser, a priori, y sin más datos al respecto, una referencia de la diferente posición del nivel freático en periodos anteriores. En relación a este punto, hay que indicar que si bien la existencia de costras puede ser explicada como la influencia de un nivel freático ante la proximidad a la superficie con elevados niveles de evaporación (Fryberger *et al.*, 1988; Lope.,1984) actuando como superficies de deflacción eólica, es posible que dada su disposición pueda tratarse de dos niveles de aterramiento del ouadis próximo, anteriores a la movilidad de las dunas en sentido oeste. En cualquiera de los dos casos nos encontramos claramente ante una situación progresiva de descenso del nivel freático por causas naturales (posiblemente iniciado hace miles de años), y actualmente incrementado por el fuerte desarrollo turístico.

8. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a los habitantes de los pueblos de Hassilabied y Merzouga (Marruecos), su hospitalidad durante el trabajo de campo. Especial agradecimiento a Mohamed Oubadi (Mohayut) y Youssef Tihri (Chez Tihri), amigos y excepcionales guías locales del territorio bereber.

BIBLIOGRAFÍA

- ASSOCIATION MERZOUGA POUR L'ENVIRONNEMENT ET LE DEVELOPPMENT (2008). Khettaras: Talabbast, Tamzzanat et TamaRirt. Poumons de Merzouga. Avant déntamer le rapport association/agriculture. 36 pp.
- BENALLAS, M., ALEM., EM., 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, vol (14) n° 2, 77-83 pág.
- DAVIS, S.N. (1969). Porosity and permeability of Natural Material (in Flow though Porous Media; editor De Wiest). Academic Press, 53-89 pág.
- FRYBERGER, S.G., SCHENK, C.J. AND KRYSTINIK, L.F. (1988). Stoke surfaces and the effects of nearsurface groundwater – table on aeolian deposition. Sedimentology, 35:21-41 pág.
- GARCÍA RODRÍGUEZ, M., MOYA-PALOMARES, M.E., DE PABLO, M.A., VICENTE R. y ACASO, E.(2008). Funcionamiento hidrogeológico del borde occidental del sistema dunar "erg Chebbi" entre Hassilabied y Merzouga (Marruecos). Tecnología@ y Desarrollo, Volumen VI (en prensa).
- GUTIERREZ ELORZA, M. (2001). Geomorfología climática. Editorial Omega. 642
- JACOBSON, G. AND JANKOWSKI, J. (1989). Groundwater discharge processes at a central Australian playa. Journal of Hydrology, 105: 275 – 295 pág.
- LOOPE, D.B. (1984). Origin of extensive bedding, planes in aeolian sandstones: a deference of Stokes hypothesis. Sedimentology, 31: 123-125 pág.

- MINISTERÉ DE L'AGRICULTURE ET DE LA MISE EN VALEUR AGRICOLE (1992). Carte du Maroc, 1:50.000. Feuille NH-30-XX-2b (Marzouga). Ministeré de L'agriculture et de la Mise en Valeur Agricole. Direction du Cadastre et de la Cartographie. Rabat (Maroc).
- MINISTERÉ DE L'ÉCONOMIE, DE FINANCES, DE LA PRIVATISATION ET DU TOURISME (2006) Monographie Regionale de L'Environnement, Region Meknés-Tafilet. Rapport de Synthéses. Maroc.
- MINISTRY OF TERRITORIAL PLANING, WATER AND ENVIRONMENT (2001). *National Study on Biodiversity Synthetisis Report*. Department of Environment Kingdom of Morocco. United Nations Program of Environment. 161 pp.
- MOYA - PALOMARES, M.E. (2007) Cartografía geomorfológica del sistema Erg Chebbi (Marruecos): La base de una propuesta de conservación y gestión sostenible. Memoria del proyecto de investigación (inédito). Universidad de Alcalá (España). 73 pp.
- MOYA-PALOMARES, M.E., GARCÍA, M., DE PABLO, M.A., VICENTE, R., ACASO, E., RUBIAL, M.J., ABERKAN, M & ZANNIBY, F (2008). Sustainable development or unlimited turistical grown? The case of erg Chebbi region, Morocco. Women and Year of the Planet Earth 2008, AAWGA. 4th Conference of the association of African Women Geoscientists. (Cairo, Egypt). 101-103 pág.
- SERVICE GÉOLOGIQUE DU MAROC (S.G.M,1975). Carte Géologique du Maroc. Tafilalt – Taouz, Echelle 1/200.000.
- UNEP (2004). Estratégie nationale pour la conservation et l'utilisation durable de la diversité biologique. L'Aménagement du territoire, d L'eau et de l'Environnement du Maroc. 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, centrla- South Morocco. Women and Year of the Planet Earth 2008, AAWGA. 4th Conference of the association of African Women Geoscientists. (Cairo, Egypt). 62-65 pág.