



RELIEVE Y AGUA EN REGIONES GRANÍTICAS: UN MODELO CUANTITATIVO CON APLICACIONES EN LA GESTIÓN DEL AGUA Y LA GEODIVERSIDAD

Manuel García Rodríguez¹

manuel.garciaro@uah.es

Juan D. Centeno Carrillo²

juande@geo.ucm.es

Miguel Ángel de Pablo¹

miguelangel.depablo@uah.es

Recibido: 2 de junio de 2008

Aceptado: 28 de julio de 2008

RESUMEN

Se estudian las relaciones entre aspectos geomorfológicos e hidrogeológicos de las regiones graníticas y, en especial, su influencia en el balance hídrico y su papel fundamental en la interacción entre Geodiversidad y Biodiversidad. Partiendo de un modelo conceptual, se diseña un modelo cuantitativo y se aplica en cuatro escenarios que difieren por el régimen de precipitaciones y por la proporción superficial de regolito y roca fresca.

Palabras clave: Relieves graníticos, Modelos del balance hídrico, Geodiversidad.

LANDFORMS AND WATER IN GRANITIC REGIONS: A QUANTITATIVE MODEL WITH APPLICATION TO WATER AND GEODIVERSITY MANAGEMENT

ABSTRACT

We explore the relationships between geomorphologic and hydrogeological aspects in granitic regions, and especially its influence on the water balance and its pivotal role in the interaction between Geodiversity and Biodiversity. Based on a conceptual model, a quantitative model is designed and applied in four scenarios that differ by rainfall distribution and the surface proportion of regolith and fresh rock.

Key words: Granite Landforms, Water balance modeling, Geodiversity

RELIEF ET EAU DANS REGION GRANITIQUE: AN MODEL QUANTITATIVE AVEC APPLICLATION A LE MANAGEMENT DE L'EAU ET LA GEODIVERSITÉ

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

² Profesor Titular de Universidad. Departamento de Geología. Facultad de Ciencias Geológicas. Universidad Complutense de Madrid.

RÉSUMÉ

On explore les relations entre les aspects géomorphologique et hydrogéologique des régions de granit, et en particulier son influence sur le bilan hydrique et son rôle crucial dans l'interaction entre Geodiversité et la Biodiversité. Sur la base d'un modèle conceptuel, un modèle quantitatif est conçu et appliquée dans quatre scénarios qui diffèrent par la distribution mensuelle de la pluie et la proportion de régolite superficiel frais et rock.

Mots clé: Reliefs granitiques, Modèles de bilan de l'eau, Geodiversité

1. INTRODUCCIÓN

Hay una relación entre evolución del relieve y procesos superficiales actuales con la hidrogeología de pequeños acuíferos, vegetación y usos del territorio. La geomorfología granítica ejerce un control sobre la disponibilidad de agua y la biodiversidad y también al contrario, la disponibilidad de agua en el suelo condiciona la formación de mantos de alteración y el aspecto de las rocas antes incluso de ser expuestas por la erosión del regolito. Los modelos numéricos muestran que la evolución del relieve es un factor fundamental para entender el ciclo del agua en este tipo de paisajes. Además, la historia de usos del territorio (tradicionales, industriales o de segunda residencia) muestra una profunda dependencia de los aspectos geomórficos. El modelo suministra un buen ejemplo del importante papel de la Geodiversidad en la conservación de la Biodiversidad.

2. LOS PROCESOS DE FORMACIÓN DE LAS SUPERFICIES GRABADAS

Los relieves más comunes en las regiones graníticas son la alternancia de afloramientos de roca fresca (domos, bloques, bolos, etc.) entre restos de regolito con suelos más o menos evolucionados. Los detalles de los afloramientos graníticos han sido estudiados y explicados en varios trabajos, y es comúnmente aceptado que la mayor parte de los relieves deriva de un proceso de grabado por alteración superficial que con frecuencia se inició en condiciones subsuperficiales (Twidale, 1982). Así, es posible encontrar rocas con tafoni o pequeños abrigos a escala de centímetro o decímetro, que se iniciaron bajo la superficie a favor de la humedad del suelo (en términos edáficos), o bien, otras formas mayores tipo abrigos de hasta varios metros de altura, cuyo origen tiene relación con la presencia de un acuífero detrítico (generalmente del manto de alteración) con una capacidad de almacenamiento y regulación del agua subterránea muy



Figura 1: **A.** Abrigo relacionado con la humedad del agua en el suelo, **B.** Abrigo originado en condiciones subaéreas, con un espesor de regolito suficiente con entidad de acuífero.

superior al de los suelos, y por tanto también de meteorización (figura 1). En ambos casos, los procesos de alteración y erosión pueden alternarse fases de dominio de uno u otro proceso dando lugar a "escaleras" de abrigos que fueron estudiadas por Twidale (1982).

La alteración diferencial es el principal proceso en la evolución de los relieves graníticos, alteración producida por agentes atmosféricos, la hidrosfera y la biosfera. La heterogeneidad que da lugar a la alteración diferencial es casi siempre la densidad de fracturación (figura 2) y su orientación espacial (verticales, inclinadas, horizontales u otras) que en su variabilidad da lugar a diferencias en la exposición a los agentes de alteración; aunque a diversas escalas pueden intervenir otras causas como enclaves, cambios de composición o textura, etc.

Una propiedad interesante de las rocas graníticas (y otras rocas granulares) es que el contacto entre la roca fresca y la roca alterada es a menudo una superficie neta, llamada frente de alteración. La alteración diferencial y el carácter neto del frente de alteración se combinan con los procesos erosivos, que remueven el regolito y exponen el frente de alteración. El resultado es el relieve de afloramientos y regolito que predomina en casi todas las regiones graníticas del mundo. Las posibles combinaciones de alteración, erosión y formas residuales dan lugar a una gran variedad de rugosidad del relieve y heterogeneidad del medio físico (figuras 2 y 3).

Un examen más cuidadoso revela el predominio de algunas formas de relieve: domos (bornhardts), bloques y bolos son las formas más frecuentes en los afloramientos, a la vez que las superficies planas y navas son las más frecuentes en las zonas ocupadas

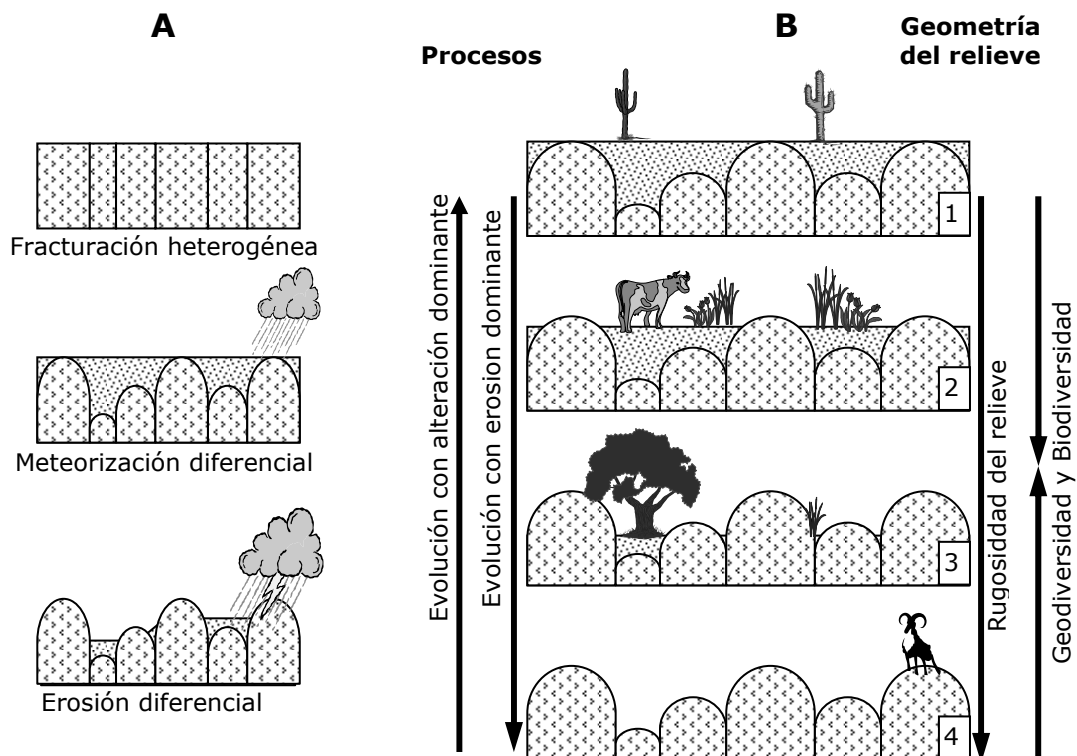


Figura 2: A. La formación de superficies grabadas en sus tres etapas fundamentales. **B.** Grados de exposición del frente de alteración en superficies grabadas y su influencia en la Geodiversidad y Biodiversidad.

por el regolito (figura 4). Además, los afloramientos muestran microformas como pilas, taffoni, acanaladuras, pendientes invertidas o abrigos. Estas formas se dan en todas las condiciones climáticas (salvo en ambientes glaciales) aunque la abundancia relativa y distribución de micro-, meso- y macro-formas puede estar controlada por las condiciones ambientales (ver por ejemplo Domínguez Villar, 2007).



Figura 3: A. Domo incipiente (Mérida, Badajoz) con vegetación del género *Sedum* adaptada al progreso de alteración de roca y erosión de regolito. B. Domo granítico expuesto por la erosión del regolito (Australia central) con la vegetación más desarrollada en las fracturas y en los bordes del afloramiento. C. Domo complejo (Ulaca, Ávila). D. Sistema complejo de vertientes con afloramientos y regolito (Valdemanco, Madrid).

Los detalles sobre la formación de superficies grabadas han sido estudiados por bastantes autores. Los trabajos de Thomas (1974), Twidale (1982), Vidal and Twidale (1998), Centeno (1987) o Domínguez Villar (2007) suministran un marco conceptual suficiente para este trabajo. El trabajo sobre la Pedriza de Manzanares de Pedraza et al. (1989) contiene ilustraciones adecuadas en el centro de la península Ibérica. La alteración diferencial puede progresar varios metros bajo la superficie, bajo el regolito o el manto de alteración. De esta forma, una superficie suave y bastante plana puede esconder un frente de alteración de alta rugosidad. Sin embargo, los procesos erosivos pueden exponer ese frente de alteración transformando el paisaje originalmente plano en un relieve irregular y rugoso. La erosión produce así dos formas de irregularidad: geometría o rugosidad de la superficie y diversidad geológica de la superficie (figura 2).

Conforme la exposición del frente de alteración avanza, se produce un aumento de rugosidad. En la mayoría de los casos, los paisajes se harán más irregulares, controlados por la alteración diferencial y la estructura, concretamente por la distribución de la densidad de fracturas. Incluso en el caso poco frecuente de una erosión completa del regolito, la alteración progresará más tiempo en las depresiones, donde el agua se acumula y la rugosidad será raramente eliminada por procesos erosivos (ver ejemplos en la figura 3)

El paisaje a escala local depende del balance de alteración y transporte: un periodo de predominio de la alteración crea una planicie de alteración (como en la fase 1 de la figura 2); un periodo de erosión dominante construye un paisaje rocoso y estructural (como en la fase 4 de la figura 2). Sin embargo, en estadios intermedios o largos periodos de alternancia entre erosión y alteración dominante, se produce un paisaje heterogéneo, una superficie grabada semiexpuesta, que puede considerarse una forma de Geodiversidad.

En este tipo de situación, el dominio de fracturas verticales da lugar a crestones con pocos restos de regolito que consiste esencialmente en laderas cubiertas por pedreras y canchales. En estos relieves la escorrentía desde los afloramientos y el flujo dentro de los canchales son muy rápidos; lo que en conjunto no favorece el almacenamiento de agua subterránea en el escaso regolito.

En los mismos relieves semiexpuestos, cuando predominan los domos y patrones de fractura más complejos, se encuentran frecuentes porciones de regolito en las depresiones que quedan entre los afloramientos. Como la escorrentía de los afloramientos complejos y el flujo en regolitos de grano más fino (generados más por alteración que por transporte) es más lento, estas condiciones favorecen el almacenamiento de agua subterránea. Un ejemplo interesante es el de la fuente del collado de las Machotas (Zarzalejo, Sierra de Guadarrama) que mana de un regolito que, a su vez, recibe toda la escorrentía de los afloramientos y domos que le rodean (figura



Figura 4: **A.** Manantial en el collado de las Machotas (Zarzalejo, Madrid). **B.** Vegetación y cultivos entre afloramientos graníticos (Gebel Musa, Sinaí).

4A).

En climas muy áridos, la dependencia de esta situación es vital para sus pobladores. En este caso, el almacenamiento de agua en el regolito sólo es posible

cuando recibe la escorrentía de grandes extensiones de afloramiento rocoso, que compensan la baja precipitación y alta ETP. En el mundo, hay cientos de pequeños asentamientos humanos que dependen de este tipo de situación. Por ejemplo, en el monte Sinaí, donde la precipitación anual no llega a los 50 mm (Moustafa & Klopatek, 1995), los monjes del monasterio de Santa Catalina y los beduinos de la región aprovechan el agua de fuentes y pozos en los regolitos que quedan entre los afloramientos (figura 4B).

En cualquier sitio, un aumento de Geodiversidad favorece la Biodiversidad local. La variedad de relieves, las barreras geográficas y la variedad de suelos tienen un efecto evidente sobre la Biodiversidad. A esta tendencia/relación general se suma, en el caso de los paisajes graníticos, una estrecha relación entre relieve y disponibilidad de agua a través del balance hídrico local, ya que cada porción de territorio ocupada por regolito actúa como un pequeño acuífero libre en medio poroso entre afloramientos impermeables. En estas zonas de regolito con disponibilidad de agua es donde mayor biodiversidad encontramos.

3. FLUJO Y ALMACENAMIENTO DE AGUA EN PAISAJES GRANÍTICOS

En un relieve como el descrito en el apartado anterior, el tamaño de las porciones de territorio ocupadas por regolito puede variar entre algunos centímetros cuadrados y varios kilómetros cuadrados. Además, puede haber varios grados de conexión entre parcelas, desde el aislamiento absoluto hasta la conexión subterránea mediante fracturas, la conexión superficial mediante estrechos corredores entre afloramientos y la conexión superficial mediante la red de drenaje (ver por ejemplo García Rodríguez *et al.*, 2004a, 2004b)

Localmente, la permeabilidad del granito fresco es nula. Incluso a nivel regional y con un macizo fracturado, la permeabilidad del granito es siempre mucho menor que la del granito alterado (grus, arena, etc.) o el regolito. La tabla 1 muestra los rangos normales de la permeabilidad de estos materiales. Por esta razón, cada unidad de regolito puede considerarse como un acuífero libre (a veces en miniatura) con el frente de alteración que actúa como base impermeable.

Tabla 1. Permeabilidad (K): valores comunes en granitos y sus productos de alteración. Adaptado de (1) Brassington (1988) y (2) Fitts (2002).		
Materiales	K (m/día) (1)	K (cm/s) (2)
Granitos	0,0003-0,03	10 ⁻¹¹ - 10 ⁻²
Granito fracturado	1-10	
Granito alterado, grus, arena	0,001-1	10 ⁻⁵ - 10 ⁻¹
Regolito granítico (Granito alterado más suelo y coluvial)	0,001-0,1	

Tradicionalmente los estudios hidrogeológicos en ambientes graníticos, dentro del campo denominado "hard rocks hydrogeology", se centran en la caracterización de las fracturas por donde circula y se almacena el agua subterránea (ver por ejemplo el trabajo de Yélamos & Villarroja, 1997); en sus dimensiones, orientación, grado de abertura y conexión entre ellas. Durante los últimos veinte años ha sido una de las líneas prioritarias de investigación hidrogeológica por parte de algunos organismos, motivada por el interés de los granitos como posible roca almacén de residuos radiactivos.

Para los efectos del presente artículo, no interesa tanto el tipo y disposición de las fracturas, ni el flujo profundo, como las características del regolito o manto de alteración del granito. En este sentido, el funcionamiento hidrogeológico se asimila más al de un acuífero detrítico libre. Para regolitos con espesores inferiores a 1 metro, más que de un acuífero se habla de agua en el suelo.

En un paisaje como los de las figuras 3 o 4, la infiltración en los afloramientos de granito es casi inexistente y, después de la precipitación, la escorrentía hacia el regolito adyacente alcanza valores altos y tiene tiempos de respuesta bastante cortos.

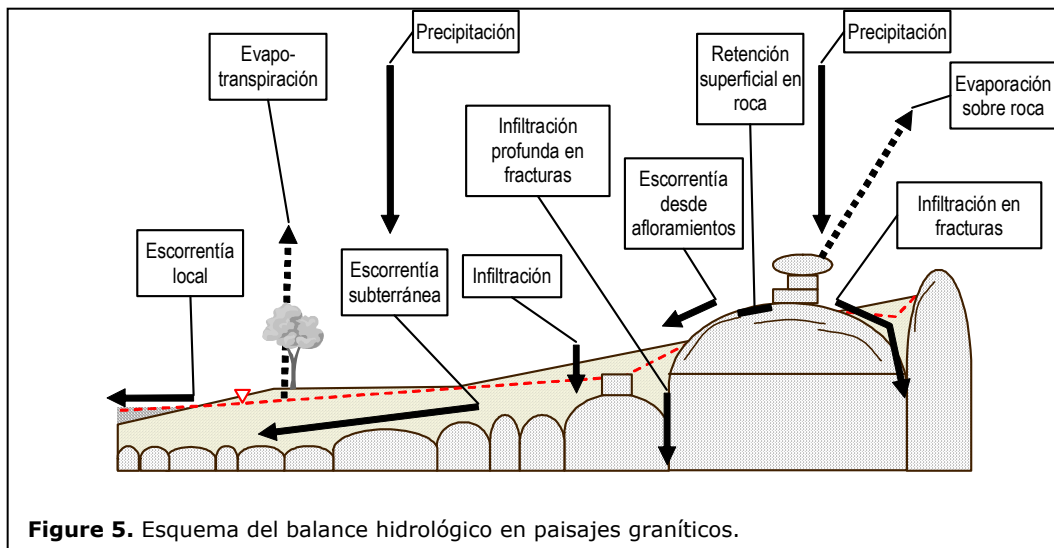
Por todo ello, el balance hídrico en los suelos y acuíferos depende en gran medida de la cantidad y clase de los afloramientos de roca fresca; muy especialmente de la proporción de territorio ocupada por afloramientos y regolito.

La figura 5 representa un modelo detallado del ciclo hidrológico en estas condiciones. Evidentemente, se trata de una simplificación, pero muestra algunos aspectos interesantes:

En una cuenca de drenaje, la entrada total de agua en las parcelas de regolito (o en el acuífero) está en relación directa con la proporción de superficie ocupada por los afloramientos de roca fresca, al menos si se asumen tasas muy bajas de evapotranspiración e infiltración en los afloramientos. En consecuencia, la mayor parte de la precipitación se convierte en escorrentía hacia el acuífero. Así, las zonas de regolito pueden recibir varias veces el volumen de agua que correspondería a la precipitación local.

A esto se añade un reparto heterogéneo del agua en el regolito; sobre todo, como consecuencia de variables como la distribución y geometría de los afloramientos.

Sobre la base de estas ideas podemos proponer un modelo cuantitativo del balance hídrico con el que trabajar sobre casos reales.

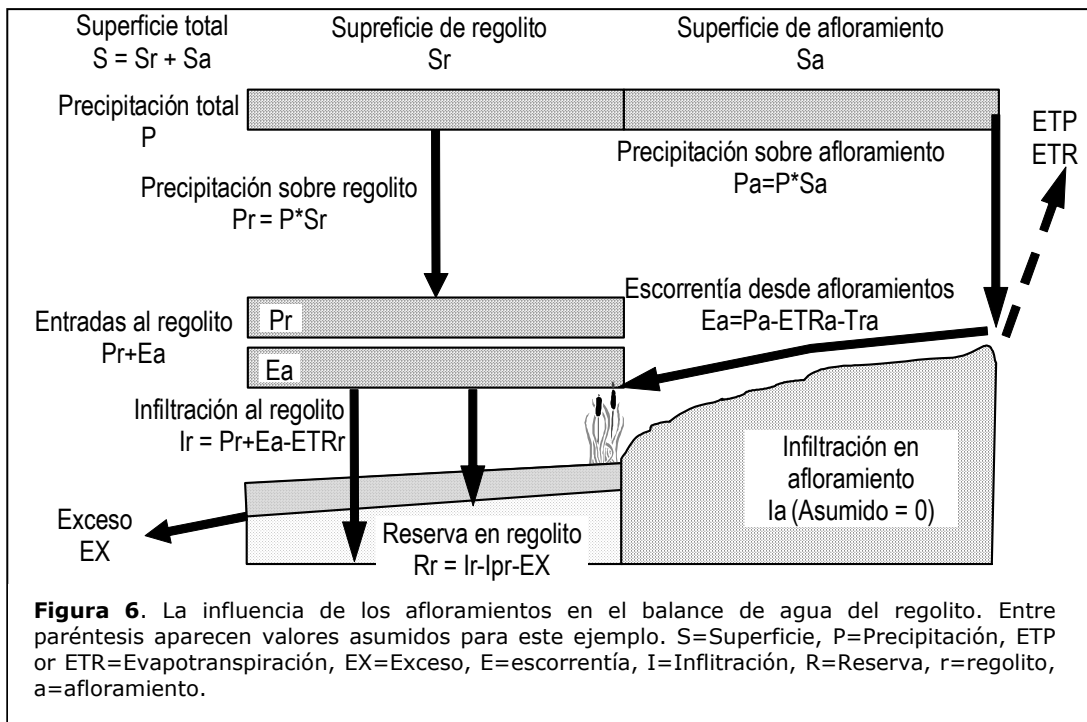


4. LA INFLUENCIA DE LOS AFLORAMIENTOS EN EL BALANCE DE AGUA DEL REGOLITO: UN MODELO CUANTITATIVO

El balance hídrico consiste en analizar, cuantificando en la medida de lo posible, qué cantidad de agua se infiltra y almacena en el acuífero, y cuánta se queda retenida en los niveles más superficiales o bien se evapora. Este tipo de balance permite calcular la variación de la reserva del agua en el suelo y acuífero, así como el exceso de escorrentía.

Basado en el balance hídrico del suelo convencional, tal como el método de Thornthwaite, en este trabajo se introducen algunas variaciones que tienen en cuenta cómo influye la proporción de superficie de regolito o afloramiento que tengamos. Para ello, ha sido necesario definir nuevos términos en la ficha del balance hídrico (ver figura 6 y tabla 2).

Para su aplicación, se debe contar con los datos de precipitación y evapotranspiración potencial (ETP) acumulados del intervalo de tiempo considerado, así como la capacidad máxima de almacenamiento del regolito del suelo y su reserva inicial de saturación al inicio del balance. A partir de estos datos se calcula; la evapotranspiración real, el exceso, la falta y la reserva real del suelo al final del intervalo de tiempo considerado (con frecuencia un mes).



En la explicación del modelo cuantitativo, la figura 6 representa el modelo conceptual del balance, la tabla 2 sirve para explicar los datos de partida del modelo, y la tabla 3 explica los términos calculados que intervienen en el balance y sus resultados.

Tabla 2. Datos de partida para la elaboración del modelo cuantitativo.	
P (L/m ² o mm)	Precipitación en el intervalo de tiempo considerado.
ETP (L/m ²)	Evapotranspiración potencial en el intervalo de tiempo considerado. Se calcula con la fórmula de Thornthwaite mediante parámetros meteorológicos de la red sinóptica (temperatura y precipitación).
Sr (m ²)	Superficie proporcional de regolito. Para conseguir homogenización en las unidades, y obtener resultados expresados directamente en litros, se ha hecho una simplificación en la que toda la superficie (regolito y afloramiento) se asimila a un metro cuadrado. Se calcula haciendo una sencilla proporcionalidad, quedando expresado en m ² . Este valor será siempre inferior a la unidad.
Sa (m ²)	Superficie proporcional de afloramiento. Como Sr. Igualmente se expresa en m ² . y es siempre inferior a la unidad.
Er (m)	Espesor del regolito (Er). Es el espesor o profundidad de la zona alterada o regolito (en metros).
me (adimensional)	Porosidad eficaz del regolito (me). Parámetro adimensional determinado experimentalmente. Se ha considerado para todo el modelo un valor constante de 0,02.
Car (L) = Sr*Er*me*1000	Capacidad máxima de almacenamiento del regolito (Car). Se refiere al volumen de agua que puede almacenar el regolito, que va a ser función de su superficie, espesor y porosidad eficaz. Viene expresado en litros.
Rir (L)	Reserva de saturación inicial del regolito (Rir). Es el volumen de agua (en litros) disponible en el regolito en el momento anterior de iniciar el balance.
Tra (adimensional)	Tasa de retención en afloramiento (Tra). Permite determinar la cantidad de agua que puede quedar retenida en el afloramiento (adimensional). Depende mucho de la geometría del afloramiento, presencia de pilas y/o pilancones, lajamiento superficial, presencia o no de líquenes y/o musgo sobre la superficie rocosa, etc...
Tir (adimensional)	Tasa de infiltración profunda desde el regolito (Tir). Con mucha frecuencia la roca inalterada que constituye el límite inferior del regolito, presenta fracturas más o menos abiertas por las que puede infiltrarse agua subterránea hacia zonas profundas, recargando acuíferos con las particularidades que presentan los acuíferos en medio fracturado. La tasa propuesta es adimensional y da una idea de las pérdidas por infiltración según la abundancia y tipo de fracturas presentes bajo el regolito.

Tabla 3. Términos o variables calculadas en la aplicación del modelo.		
ENTRADAS AL AFLORAMIENTO	$Pa (L) = P * Sa$	Precipitación en afloramiento (Pa). Se refiere al volumen de precipitación directa sobre el afloramiento rocoso. $Pa = P * Sa$ y se expresa en litros.
SALIDAS DEL AFLORAMIENTO	$ETRa (L) = Sa * ETP * Tra$	Evapotranspiración real en el afloramiento (ETRa). Son las pérdidas por evaporación desde el afloramiento (en litros). Se determina como el producto $ETRa = Sa * ETP * Tra$
	$Ra (L) = Sa * Tra * P$	Retención en el afloramiento (Ra). El volumen (en litros) de agua retenida en el afloramiento. Se determina como el producto $Ra = Sa * Tra * P$.
	$Ea (L) = Pa - Ra - ETRa$	Escorrentía del afloramiento (Ea). Es el volumen de agua que escurre desde el afloramiento hacia el regolito (en litros). Se determina como $Ea = Pa - Ra - ETRa$
ENTRADAS AL REGOLITO	$Pr (L) = P * Sr$	Precipitación directa en el regolito (Pr). Se refiere al volumen de precipitación directa sobre el regolito. $Pr = P * Sa$ y se expresa en litros.
	$Ea (L) = Pa - Ra - ETRa$	Escorrentía desde el afloramiento (Ea). Volumen de agua procedente del afloramiento por escorrentía (en litros).
	$\Sigma IN REG$	Sumatorio de entradas
SALIDAS DEL REGOLITO	$ETPr (L)$	Evapotranspiración potencial en el regolito (ETPr). Es la ETP empleada como dato inicial, multiplicada por la superficie de regolito. Como la superficie sobre la que aplicamos el balance se ha asimilado a 1 m ² , las unidades de la ETPr vienen expresadas directamente en litros.
	$ETRr (L)$	Evapotranspiración real en el regolito (ETR). Volumen de agua que se pierde desde el regolito (en litros). Coincidirá con al ETPr, siempre y cuando haya agua disponible en el suelo.
	$Ipr (L) = Car * Tir$	Infiltración profunda (Ipr). Es la cantidad de agua (en litros) que se pierde por infiltración a favor de fracturas hacia niveles más profundos. Se ha definido como el producto de la capacidad de almacenamiento del regolito y de la tasa de infiltración del regolito; $Ipr = Car * Tir$
	$\Sigma OUT REG$	Sumatorio de pérdidas
BALANCE	$Rp (L)$	Reserva potencial = Reserva inicial + Entradas regolito - Pérdidas regolito
	$Rr (L)$	Reserva Real de agua en el regolito al finalizar el mes = $Ep - EX$
	$EX (L)$	Exceso o escorrentía

En un trabajo anterior y para poner en práctica la idea de balance (Centeno y García, 2008), considerábamos ocho escenarios a partir de la combinación de las siguientes variables: espesor medio de regolito, proporción de superficie ocupada por regolito y afloramiento y distribución mensual de la precipitación, todos ellos dentro de condiciones climáticas templado-húmedas. Con estos escenarios, elaborábamos varios balances y explorábamos la relación entre morfología granítica y ciclo hídrico en función de estas condiciones. Una de las conclusiones era que la proporción de afloramientos rocosos regula el almacenamiento y disponibilidad de agua en el regolito.

Desde el punto de vista del aprovechamiento (humano o de los ecosistemas) del agua, esto tiene especial interés en los climas semiáridos y áridos, algo que los agricultores conocen desde antiguo. Por ejemplo, en tiempos del rey Salomón (unos 3000 años antes de nuestra era) los habitantes del desierto del Negev cultivaban los fondos de valle recogiendo agua en las laderas rocosas y almacenándola en aljibes subterráneos (Issar, 1990). Más aún, los granjeros de la península de Eyre (Australia del Sur) recogen la escorrentía de los afloramientos graníticos para evitar su infiltración en el regolito y la almacenan en aljibes excavados.

Por eso, en este trabajo parece oportuno aplicar el modelo de balance a condiciones de precipitación y evapotranspiración propios de climas semiáridos o áridos.

5. APLICACIÓN E INTERPRETACIÓN DEL BALANCE HÍDRICO

Con ese objetivo de estudiar regiones áridas, se ha elaborado un balance hídrico en cuatro escenarios definidos en función de la proporción de regolito y afloramiento en la superficie y la distribución anual de la precipitación

Respecto a la proporción superficial del regolito y afloramiento, se ha expresado como porción de una superficie de 1 m². Esta pequeña simplificación facilita enormemente todo el proceso de cálculo posterior. Se han considerado dos casos extremos: 0,1 m² de regolito y 0,9 m² de afloramiento, y 0,9 m² de regolito y 0,1m² de afloramiento.

En cuanto a la distribución de precipitación, se han considerado una precipitación mensual teórica y constante de 10 mm, y la precipitación media mensual de la estación de Cabo de Gata (según Instituto de Estadística de Andalucía, 1997). El balance realizado con precipitación uniformemente distribuida se ha incluido para reducir el número de variables a interpretar y poder estudiar con más detalle el efecto del relieve sobre el balance hídrico.

La tabla 4 muestra la combinación de estas variables, con los escenarios resultantes A-D. Entre las muchas combinaciones posibles de estas variables, hemos elegido unas pocas que nos permitan analizar las variables más relevantes.

En todos los casos se ha usado la evapotranspiración potencial mensual de la estación de Cabo de Gata.

Escenario	Proporción de superficie ocupada por regolito y afloramiento (m ²)		Distribución de la precipitación
	Regolito	Afloramiento	
A	0,1	0,9	Constante = 10 mm/mes
B	0,9	0,1	Constante = 10 mm/mes
C	0,1	0,9	Real en Cabo de Gata (Almería)
D	0,9	0,1	Real en Cabo de Gata (Almería)

El resto de variables se han supuesto constantes para facilitar el análisis de resultados. Respecto al espesor de regolito se ha supuesto un valor de 2 m que es un valor frecuente en los regolitos de las superficies grabadas graníticas semi-expuestas; y la porosidad eficaz en el regolito se ha supuesto en un valor de 0,02, que también es un valor frecuente en regolitos graníticos.

La tasa de retención en afloramiento (Tra) y la tasa de infiltración profunda desde el regolito (Tir) son necesarias para completar el modelo. Sus valores pueden variar dependiendo de la morfología de los afloramientos y la presencia y geometría de las fracturas. En todos los escenarios hemos asignado valores pequeños correspondientes a afloramientos dómicos o de bolos con pocas formas pseudokársticas y fracturas. Este tipo de relieve es bastante común en las rampas y piedemontes del macizo Ibérico, donde el uso y gestión del agua es muy importante para las explotaciones ganaderas.

En la figura 7 se representan los balances hídricos de los cuatro escenarios supuestos.

5.1. Balance hídrico del escenario A

El escenario A (figura 7A) se caracteriza por tener una precipitación mensual de 10 mm y una proporción regolito/afloramiento de 0,9/0,1.

En estas condiciones, no hay exceso ningún mes y las variaciones de reserva sólo reflejan el retraso entre acumulación y evapotranspiración. Podríamos considerar que los picos de gráfico y el desfase entre reserva y evapotranspiración son sólo un error metodológico, derivado del hecho de contabilizar periodos mensuales en lugar de periodos de tiempo más cortos.

En todo caso, demuestra que, cuando las condiciones son áridas y los afloramientos escasos, no hay almacenamiento y no hay agua disponible para la vegetación u otros usos humanos.

5.2. Balance hídrico del escenario B

El escenario B (figura 7B) se caracteriza por tener una precipitación mensual de 10 mm y una proporción regolito/afloramiento de 0,1/0,9.

El gráfico muestra claramente que un aumento de la superficie de afloramiento incrementa las aportaciones de agua al regolito permitiendo que se almacene agua en el regolito en los meses de menor evapotranspiración.

Con un regolito como el supuesto (de 2 m de espesor) llega a producirse escorrentía superficial en algunos meses. Pero es importante resaltar que, con regolitos de igual extensión pero mayor espesor, aumentarían las reservas de agua subterránea durante todo el año permitiendo una mayor gestión y regulación del agua necesaria.

5.3. Balance hídrico del escenario C

El escenario A (figura 7C) se caracteriza por una precipitación igual a la media de la estación del Cabo de Gata y una proporción regolito/afloramiento de 0,9/0,1.

En este gráfico se observa prácticamente el mismo proceso que en el descrito en la figura 7A. Todos los meses la ETP retira cualquier volumen de agua que hubiera podido almacenarse y la reserva del mes anterior. En todo caso, los picos de ETP quedan enmascarados por los cambios de precipitación.

5.4. Balance hídrico del escenario D

El escenario A (figura 7D) se caracteriza por una precipitación igual a la media de la estación del Cabo de Gata y una proporción regolito/afloramiento de 0,1/0,9.

De nuevo, este caso "real" confirma lo previsto en 7B. Un aumento de la proporción de afloramientos se traduce siempre en un incremento en la disponibilidad de agua almacenada o en escorrentía. Ni siquiera las oscilaciones de precipitación llegan a enmascarar este hecho.

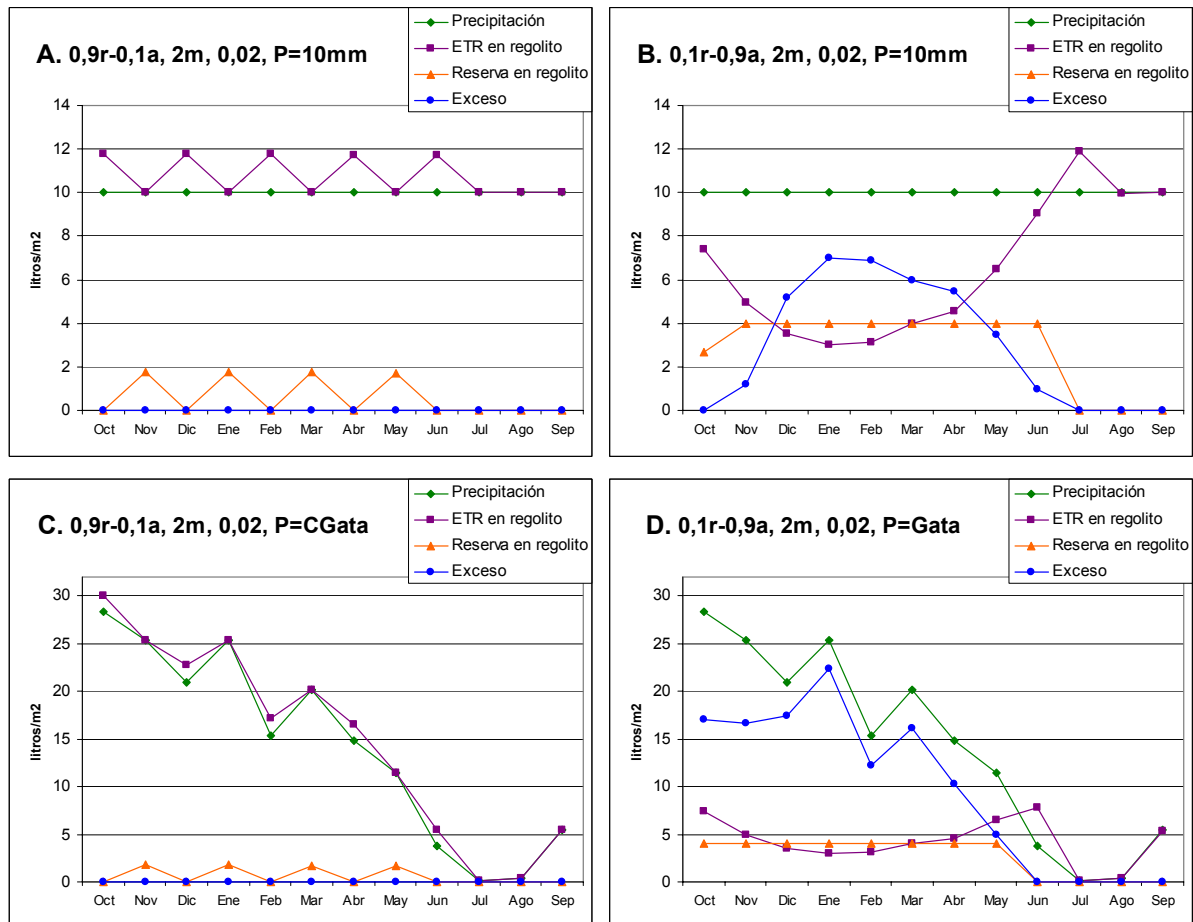


Figura 7. Balance hídrico de los escenarios propuestos.

El otro lado de la cuestión es que se produce un exceso de agua en casi todos los meses. Si se trata de zonas con poca superficie y espesor de regolito, este relieve puede dar lugar a un aumento de la frecuencia de las avenidas. Por ejemplo, Dantin (1983) cita la existencia de avenidas en cualquier estación el la zona del monte Sinaí.

6. CONCLUSIONES

Los relieves graníticos dan lugar a una disponibilidad local del agua distinta de la regional. Dependiendo de la proporción regolito/afloramiento, el espesor de regolito y relieve, la disponibilidad de agua para zonas de iguales condiciones climáticas puede ser muy variable.

La redistribución de agua entre los afloramientos y el regolito modifica notablemente las posibilidades de almacenamiento de agua subterránea y la distribución anual de escorrentía. En consecuencia, los relieves tienen una influencia decisiva en las posibilidades de gestión del recurso agua.

Del análisis del balance en los cuatro escenarios propuestos en clima semiárido, se deduce que grandes superficies de regolito la ETP supera siempre a la infiltración por precipitación, lo que impide la recarga y el almacenamiento en el acuífero y el suelo. Al contrario, cuando el paisaje está dominado por los afloramientos, los regolitos reciben agua por escorrentía desde los afloramientos además de la precipitación directa. Entonces, las entradas al regolito pueden superar a la ETP en el regolito y, consecuentemente, hay un aumento de reserva e incluso de exceso de agua en el regolito.

Como el agua es un factor limitante para los ecosistemas en medios semiáridos, en algunas zonas, la proporción de superficie ocupada por afloramiento o regolito puede ser un factor determinante en el balance hídrico, la Biodiversidad y el aprovechamiento humano.

Hay buenos ejemplos del aprovechamiento de estas circunstancias en la gestión del agua en medios áridos o semiáridos entre las culturas tradicionales de diversos lugares del mundo.

Las relaciones entre Geomorfología, Hidrogeología y Biodiversidad en regiones graníticas han sido poco exploradas y este trabajo muestra que hay conexiones que pueden arrojar resultados interesantes. Y a esto debemos añadir que los procesos mencionados, dan lugar a una topografía muy diversa que permite más biodiversidad que otros relieves más homogéneos.

BIBLIOGRAFÍA

- CENTENO, J.D. (1987) *Morfología granítica de un sector del Guadarrama Occidental*. Editorial Complutense. Colección Tesis Doctorales nº262/88
- CENTENO CARRILLO J.D. Y GARCÍA RODRÍGUEZ, M. (2008) *Balance hídrico de las superficies grabadas en rocas graníticas. Un modelo geomorfológico e hidrogeológico con implicaciones ambientales*. Tecnología@ y Desarrollo. Vol 6. (En prensa)
- DANIN, A. (1983). *Desert Vegetation of Israel and Sinai*. Jerusalem, Israel: Cana Publishing House. 148 pp.
- DOMÍNGUEZ VILLAR, D. (2007) *Análisis morfométrico de pilancones: consideraciones, genéticas, evolutivas y paleoambientales*. Tesis Doctoral. Servicio de Publicaciones de la Universidad Complutense de Madrid. 319 pp.
- GARCÍA RODRÍGUEZ, M., GALLEGO J.I., FDEZ. ESCALANTE A.E. (2004a) Características hidrogeológicas de la zona de borde entre el macizo cristalino y el terciario detrítico en Torrelodones (Madrid). Tecnología@ y Desarrollo. Vol.2.
- GARCÍA RODRÍGUEZ, M., GALLEGO, J.I. Y FDEZ. ESCALANTE, A.E. (2004b) Potencialidad acuífera del macizo granítico en Torrelodones (Madrid). VII Simposio de hidrogeología. Actas 225-234 pp. Zaragoza.

- INSTITUTO DE ESTADÍSTICA DE ANDALUCÍA. (1997) Consejería de Economía y Hacienda. Junta de Andalucía. <http://www.juntadeandalucia.es/iea/anuario/anuario97/cap01/01020504.htm>
- ISSAR, A. (1990) *Water Shall Flow from the Rock. Hydrogeology and Climate in the Lands of the Bible*. Springer-Verlag, 213 pp.
- MOUSTAFA, A.A. & KLOPATEK, J.M. (1995) Vegetation and landforms of the Saint Catherine area, southern Sinai, Egypt. *Journal of Arid Environments* 30: 385–395
- PEDRAZA, J., SANZ, M.A. Y MARTÍN, A.. (1989) *Formas graníticas de la Pedriza*. Agencia de Medio Ambiente. Comunidad de Madrid. 205 pp.
- THOMAS, M.F. (1974) *Tropical Geomorphology*. McMillan Press Ltd. Focal Problems in Geography, London, 322 pp.
- TWIDALE, C.R. (1982) *Granite Landforms*. Elsevier Scientific Publishing Company, 372 pp.
- VIDAL, J.R. Y TWIDALE, C.R. (1998) *Formas y paisajes graníticos*. Universidade da Coruña. Servicio de Publicacións.
- YÉLAMOS, J.G. Y VILLARROYA, F. (Eds., 1997) *Hydrogeology of Hard Rocks*. Internacional Association of Hydrogeologists-Spanish Chapter (AIH-GE). Iberian Subgroup on Hard Rock Hydrogeology, Madrid, 290 pp