

FACTORES QUE CONTROLAN LAS RELACIONES ENTRE PRECIPITACIÓN, ESCORRENTÍA E INFILTRACIÓN EN ZONA ÁRIDA Y SUS IMPLICACIONES EN LA GESTIÓN DEL AGUA

JUAN PUIGDEFÁBREGAS
Estación Experimental de Zonas Áridas (CSIC)

INTRODUCCIÓN

La gestión de los recursos hídricos, a nivel regional, integra cuatro componentes: La evaluación y control de las entradas, la asignación y uso eficiente del agua, el control de la calidad y cantidad del recurso disponible, y de los efectos remotos.

Las entradas en el sistema (recarga) pueden ser naturales, debidas a la precipitación, o artificiales, debidas a transferencias de agua desde otras cuencas o a desalinización de aguas marinas o salobres. Recientemente, en zona árida, las entradas artificiales adquieren una importancia cada día mayor, debido a que en muchas zonas, el crecimiento de la demanda tiende a superar las entradas naturales, lo que conduce a la sobreexplotación de los recursos. Sin embargo, en muchos casos, la excesiva dependencia de factores externos (competencia, costes de producción, etc.) aconseja limitar las entradas artificiales y prestar mayor atención a maximizar las naturales.

En último término, las entradas naturales dependen de la precipitación recibida sobre la cuenca hidrológica efectiva. La primera condición para la gestión de las mismas es la evaluación de la precipitación. Con frecuencia, este aspecto se da por hecho, o se realiza por procedimientos convencionales. Sin embargo, es preciso destacar que en zona árida, esa evaluación no es un asunto trivial. Por una parte, la gran variabilidad espacial de las precipitaciones requiere procedimientos geoestadísticos de interpolación más sofisticados de los que se utilizan en zonas húmedas (BOER et al 1995). Por otra parte la determinación de la cuenca hidrológica efectiva no siempre es tarea fácil. Conocida la precipitación, para maximizar las entradas será preciso conocer el modo de operación de los factores que controlan la transformación de aquella en escorrentía e infiltración. La mayoría de esos factores están en la superficie del terreno. Algunos son fijos (o varían muy lentamente) tales como la topografía, litología, granulometría, etc. Otros son dinámicos (sufren cambios relativamente rápidos), vegetación, costras, pedregosidad superficial, etc. La manipulación de los factores dinámicos aprovechando las oportunidades ofrecidas por la distribución espacial de los fijos, constituye la base de cualquier estrategia de maximización de las entradas naturales de agua.

La transformación de la precipitación en escorrentía puede tener lugar por saturación del suelo (desde abajo) o por déficit de infiltración en la superficie. El primer mecanismo suele ser más frecuente en zonas húmedas y el segundo, en regiones secas. Un tercer mecanismo intermedio, saturación del horizonte superficial 'desde arriba' ha sido también descrito en zonas áridas (PUIGDEFÁBREGAS et al., 1998).

CARACTERÍSTICAS ESPECÍFICAS DE LAS ZONAS ÁRIDAS

El papel de la vegetación

La vegetación es uno de los principales factores dinámicos en el control de la infiltración y escorrentía. Consideraremos aquí sus implicaciones en la partición de la precipitación por las copas, en la generación de heterogeneidad espacial y en la evapotranspiración.

Implicaciones de la arquitectura de las copas en la partición de la precipitación

La porción epigea de la vegetación produce una primera partición de la precipitación en tres componentes, la intercepción, la transcolación y la escorrentía cortical, la suma de las dos últimas constituyen la precipitación neta. La intercepción gobierna el volumen de agua detenido en la copa y devuelto a la atmósfera por evaporación. Su importancia es considerable, en muchos casos puede alcanzar el 30% de la precipitación incidente. La intercepción depende de la capacidad de la biomasa vegetal para almacenar agua, de la curva de drenaje de la copa, del coeficiente de transcolación libre (dependiente de los huecos en la cubierta), de la conductancia aerodinámica de la masa vegetal y de las condiciones meteorológicas durante la precipitación. El reparto de la precipitación neta entre transcolación y escorrentía cortical está controlado por la densidad y ángulo de las ramificaciones, así como por la rugosidad y otras características de la corteza. La escorrentía cortical es particularmente importante en climas semiáridos porque permite a la planta infiltrar agua a mayor profundidad, siguiendo las discontinuidades producidas por las raíces principales, protegiéndola así de la evaporación directa.

El control de la partición de la lluvia permite a las plantas un cierto control sobre el almacenamiento y disponibilidad de agua. Investigaciones realizadas (figura 1) en el sitio experimental de Rambla Honda (Tabernas, Almería) permite documentar este asunto (SÁNCHEZ et al., 1996, DOMINGO et al., 1998). Se han estudiado dos arbustos, *Anthyllis cytisoides* y *Retama sphaerocarpa*. El primero posee un sistema radical de profundidad moderada (1-3m), alrededor de 1 m de altura, con una copa cuya capa externa está formada por hojas densamente dispuestas. El segundo presenta un sistema radical muy profundo (HAASE et al., 1996) (puede alcanzar los 25 m) y su copa es ligera, con abundantes huecos. La precipitación media anual es de unos 250 mm y la precipitación neta anual bajo las copas de *A. cytisoides* y *R. sphaerocarpa* es de 150 mm y 222 mm, con escorrentía cortical de 50 mm y 17 mm respectivamente. El primero intercepta más precipitación pero es capaz de colocar una mayor proporción de la misma en el suelo, al abrigo de la evaporación directa.

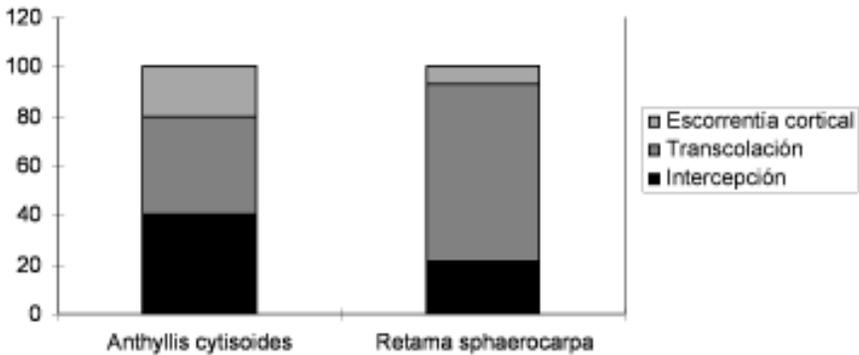


Figura 1. Partición de la lluvia por las copas de arbustos medida en el sitio experimental de Rambla Honda (Almería). Resultados expresados en porcentaje de la precipitación incidente, correspondientes al año hidrológico 1994-95. Fuente: DOMINGO ET al. 1998.

Implicaciones de la vegetación en la generación de heterogeneidad espacial

En clima semiárido, la cobertura de la vegetación está limitada por la disponibilidad de agua, por lo que predominan formaciones vegetales abiertas, en las que alternan rodales vegetados con calvas de suelo desnudo. Las áreas vegetadas y particularmente sus bordes, sustentan numerosos procesos que convergen en el incremento de la fertilidad y de la tasa de pedogénesis (PUGNAIRE et al., 1996; NICOLAU et al., 1996; MORO et al., 1997; PUIGDEFÁBREGAS, 1998), por lo que constituyen núcleos que generan heterogeneidad espacial por lo que se refiere a numerosas propiedades del suelo con implicaciones hidrológicas (porosidad, conductividad hidráulica, etc).

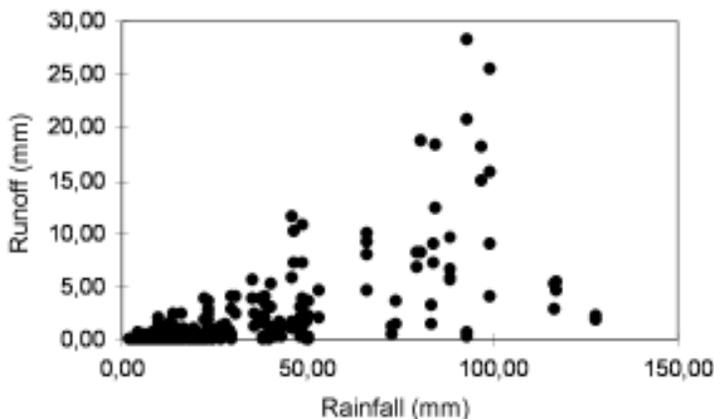


Figura 2. Escorrentía frente a precipitación a escala de parcela (2 m x 10 m) en el sitio experimental de Rambla Honda (Almería). Resultados obtenidos a resolución temporal de evento lluvioso, durante el periodo 1, septiembre, 1991 a 31, agosto, 1997. Fuente : PUIGDEFABREGAS et al. (1999).

Cada rodal de vegetación, con su área desnuda adyacente forma una unidad funcional, ya que la segunda suministra agua y sedimentos a la primera. En consecuencia, las dimensiones relativas de ambos tipos de áreas permanecen dentro de cierto intervalo de variación (figura 2), consistente con la longitud media de la escorrentía en suelo desnudo y con la capacidad de interceptación de los flujos de agua y sedimentos por parte de las matas (PUIGDEFÁBREGAS, 1996; PUIGDEFABREGAS et al., 1999).

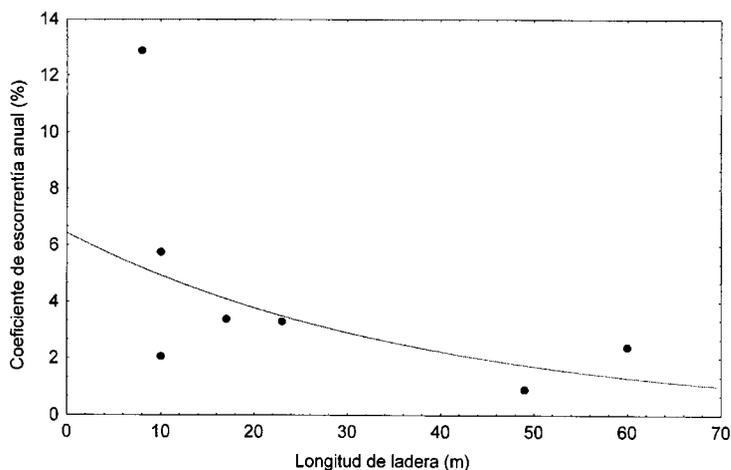


Figura 3. Coeficiente de escorrentía anual frente a longitud de ladera. Datos del sitio experimental de Rambla Honda (Almería) correspondientes al año hidrológico 1991-92. $y=a*\exp(bx)$, $a=6.436$, $b=-0.026$; $r=-0.67$ $p=0.07$. Fuente: PUIGDEFÁBREGAS y SÁNCHEZ, 1996 (a).

A nivel de ladera (figura 3), las interacciones entre las matas y las áreas desnudas, pueden compararse a un proceso de sintonización (PUIGDEFÁBREGAS y SÁNCHEZ, 1996). Si la circulación de sedimentos o de escorrentía superficial, según los casos, está en el intervalo de sintonía respecto al crecimiento de las plantas, se forman patrones bandeados, perpendiculares a las líneas de flujo. De esta manera, se maximiza la disponibilidad de agua para la vegetación y el almacenamiento de suelo en las laderas. Si los flujos de ladera están por debajo o por encima del intervalo de sintonía, los patrones espaciales resultantes son aleatorios o bandeados en el sentido de la pendiente, respectivamente.

Implicaciones de la vegetación en la evapotranspiración

De forma muy simplificada, la evapotranspiración puede describirse como un flujo de agua a lo largo de un gradiente de potencial, del suelo a la atmósfera), controlado por un sistema de resistencias. Las resistencias más elevadas se encuentran en la superficie de las hojas y del suelo. Las primeras están reguladas por los estomas y las segundas, por las discontinuidades de la porosidad en las capas superficiales del suelo. Otro sistema de resistencias, menos elevadas, pero

significativas a las escalas apropiadas, es el constituido por las resistencias aerodinámicas a nivel de hojas, de copas o de rodal.

La vegetación dispersa introduce complicaciones notables en el modelado y estimación de la evapotranspiración, porque operan varias fuentes en paralelo. Ultimamente es frecuente considerar tres fuentes, las copas, el suelo entre las copas y el suelo bajo las copas. A modo de ejemplo, determinaciones experimentales realizadas sobre rodales de *R. sphaerocarpa*, en Rambla Honda (DOMINGO et al., 1999) muestran que la evapotranspiración a nivel de copas y a nivel del suelo bajo las copas es, respectivamente, del 130 % y 20 % de la registrada en el suelo desnudo entre matas.

En general, la presencia de vegetación implica una disminución de resistencia al flujo evaporativo, el cual, en regiones secas puede alcanzar valores que superan el 95 % de la precipitación anual.

El papel de los factores fijos

El escaso recubrimiento de la vegetación, característico de las zonas áridas, da lugar a que la distribución espacial de ciertos factores fijos que controlan la infiltración, sea determinante para explicar el destino de la precipitación.

Así, numerosas observaciones confirman que, a diferencia de lo que ocurre en regiones húmedas, en zona árida, los suelos arenosos tienen más agua disponible que los arcillosos o limosos, debido a que los primeros gozan de mayor infiltración. Determinaciones experimentales realizadas en la provincia de Almería valores de infiltrabilidad, para margas, del orden del 50 % del registrado para calizas y micaesquistos (THORNES y GILMAN, 1983).

Las discontinuidades laterales en propiedades hidráulicas del sustrato suelen dar lugar a sitios de infiltración preferente. Así sucede con el contacto entre laderas rocosas y sus correspondientes formaciones aluviales (YAIR y LAVÉE, 1985).

Carácter escalo-dependiente de las relaciones precipitación-escorrentía en zona árida

La heterogeneidad espacial que, como hemos resumido, caracteriza a la zona árida, unida la heterogeneidad temporal de sus precipitaciones, determinan que las relaciones entre precipitación y escorrentía o precipitación dependan de la escala. Este hecho está confirmado por numerosas observaciones. Por ejemplo, en Rambla Honda, se observa que, para una misma dimensión espacial, la escorrentía presenta una relación no lineal con la precipitación (PUIGDEFABREGAS et al., en prensa). A valores altos de esta última, generalmente de mayor duración, la escorrentía generada es menor, debido a que la variabilidad temporal de la intensidad de precipitación facilita la aparición de intervalos con predominio de infiltración, dentro del evento lluvioso. Por otra parte, si se aumenta el área, manteniendo constante la precipitación, se observa una disminución exponencial del coeficiente de escorrentía, debido al aumento de oportunidades de reinfiltración ofrecidas por el incremento de heterogeneidad espacial.

Las laderas y cuencas de zonas húmedas suelen presentar una buena conectividad hidrológica, mantenida generalmente por flujo saturado. Esta se aprecia en la mayor humedad del suelo en la parte baja de las laderas, manifestada por la vegetación o en los caudales cre-

cientes de la red de drenaje, conforme aumenta el área contribuyente. Las características de las zonas áridas, antes resumidas, determinan un espectacular descenso de la conectividad a todos los niveles. En las laderas, sólo ocurre en condiciones de precipitación excepcionalmente elevada (PUIGDEFÁBREGAS et al., 1998), y en las cuencas, es bien conocido el fenómeno de las pérdidas por transmisión a lo largo de la red de drenaje que, con frecuencia, ocasiona pérdidas de caudal conforme aumenta el área de la cuenca.

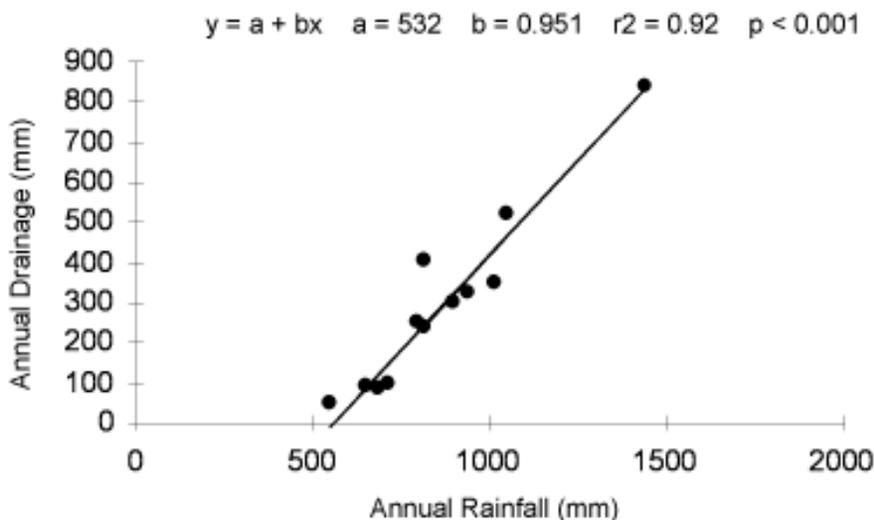


Figura 4. Determinaciones experimentales de drenaje anual frente a precipitación anual obtenidas en pequeñas cuencas (10ha - 50 ha) cubiertas de bosque o matorral, en el Mediterráneo occidental. Fuente: PUIGDEFABREGAS y MENDIZÁBAL 1998.

Implicaciones de cara a la gestión de las entradas de agua en el sistema hidrológico

Las condiciones que regulan la infiltración y la escorrentía en zonas áridas tienen implicaciones en los criterios de gestión del territorio para maximizar la recarga natural. A continuación se mencionan los más importantes

- Estimular la infiltración profunda, para situar el agua fuera del alcance de la evaporación directa.
- Manejar el ‘principio del aljibe’. Es decir, la concentración de escorrentía para obtener, localmente, un aporte adicional de agua. Este es el criterio con el que tradicionalmente se establecían los aljibes, cuyo diseño estaba dirigido, precisamente a maximizar la ‘cosecha’ de agua (VAN WESEMAEL et al., 1998).
- Identificar los puntos donde, naturalmente, se dan las mejores condiciones para asegurar la concentración de escorrentía y la infiltración de la misma : Discontinuidades geológicas, ciertos tramos de la red de drenaje, etc.

- Tratar la vegetación de forma espacialmente discriminada, para favorecer la infiltración en los puntos antes mencionados. El establecimiento de cubiertas vegetales uniformes (figura 4) sólo conduciría a incrementar la evapotranspiración (PUIGDEFÁBREGAS y MENDIZABAL, 1998). Conviene mantener mosaicos fases complementarias, constituidas por fuentes de escorrentía, con poca vegetación, y sumideros, donde el tratamiento de la vegetación estimule la infiltración profunda. El grano y diseño espacial de esos mosaicos está sujeto, además, a restricciones derivadas del control de la erosión y de las avenidas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BOER, M.; PUIGDEFÁBREGAS, J. (1995). «Assessing spatial patterns of precipitation and moisture in dry mediterranean landscapes using digital terrain analysis». *In: Análisis de la variabilidad espacio-temporal y procesos caóticos en ciencias medioambientales*. J.J. Ibáñez y C. Machado, eds. Geoforma Ediciones: 159–276. Logroño, Spain.
- DOMINGO, F.; SÁNCHEZ, G.; MORO, M.J.; BRENNER, A.J.; PUIGDEFÁBREGAS, J. (1998). «Measurement and modelling of rainfall interception by three semi-arid canopies». *Agricultural and Forest Meteorology*, 91: 275–292.
- DOMINGO, F.; VILLAGARCÍA, L.; BRENNER, A.J.; PUIGDEFÁBREGAS, J. (1999). «Predicting evapotranspiration from a Retama sphaerocarpa stand in SE Spain using a model for heterogeneous shrublands in semi-arid environments». *Agricultural and Forest Meteorology*; 95: 67–84.
- HAASE, P.; PUGNAIRE, F.I.; FERNÁNDEZ, E.M.; PUIGDEFÁBREGAS J.; CLARK S.C.; INCOLL. L.D. (1996). «An investigation of rooting depth of the semi-arid shrub Retama sphaerocarpa (L.) Boiss. by labelling of ground water with a chemical tracer». *Journal of Hydrology*, 177: 23–31.
- MORO, M. J.; PUGNAIRE, F. I.; HAASE, P.; PUIGDEFÁBREGAS, J. (1997). «Effect of the canopy of Retama sphaerocarpa on its understorey in a semiarid environment». *Functional Ecology*, 11: 425–431.
- NICOLAU, J. M.; SOLÉ-BENET, A.; PUIGDEFÁBREGAS, J.; GUTIÉRREZ, L.. (1996). «Effects of soil and vegetation on runoff along a catena in semi-arid Spain». *Geomorphology*, 14: 297–309.
- PUGNAIRE, F. I.; HAASE, P. ; PUIGDEFÁBREGAS, J. (1996). «Facilitation between higher plant species in a semiarid environment». *Ecology*, 77: 1420–1426.
- PUIGDEFÁBREGAS, J.; SÁNCHEZ, G. (1996 a). «Geomorphological implications of vegetation patchiness on semi-arid slopes». M. G. Anderson y S. M. Brooks Eds. *In Advances in Hillslope Processes*, 2: 1027–1060.
- PUIGDEFÁBREGAS, J.; SÁNCHEZ, G. (1996 b). «Vegetación dispersa y flujos de vertiente en clima semiárido». Grandal d'Anglade, A. y Pagés Valcarlos, J., Eds. *Cuadernos Laboratorio Xeológico de Laxe*, 21: 375–392.

- PUIGDEFÁBREGAS, J.; MENDIZABAL, T. (1998). «Perspectives on desertification: western Mediterranean». *Journal of Arid Environments*, 39: 209–224.
- PUIGDEFABREGAS, J. 1998. «Ecological impacts of global change on drylands and their implications for desertification». *Land Degradation y Development*, 9: 393-406.